

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA INTEGRADA DE DOS TRANSECTOS
REGIONALES EN EL ÁREA MAYOR DE SOCORORO, ESTADO
ANZOÁTEGUI**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por los
Brs. Gómez P., Melwin
y Ubieda D., Adriana
para optar al Título de Ingeniero Geofísico

Caracas, Febrero 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA INTEGRADA DE DOS TRANSECTOS
REGIONALES EN EL ÁREA MAYOR DE SOCORORO, ESTADO
ANZOÁTEGUI**

Tutor Académico: Prof. Antonio Ughi

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por los
Brs. Gómez P., Melwin
y Ubieda D., Adriana
para optar al Título de Ingeniero Geofísico

Caracas, Febrero 2007

Caracas, Febrero 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Gómez Melwin y Ubieda Adriana, titulado:

**“INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA INTEGRADA DE DOS TRANSECTOS
REGIONALES EN EL ÁREA MAYOR DE SOCORORO, ESTADO
ANZOÁTEGUI”**

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

Prof. Inírida Rodríguez
Jurado

Prof. Juan Infante
Jurado

Prof. Antonio Ughi
Tutor Académico

A mi mamá, mi luz y mi fuerza
A mamá linda y papá lindo
Adriana

A Dios, mis padres y mi hermano
Melwin

AGRADECIMIENTOS

A Dios por regalarnos el don de la vida, dador de paz y sabiduría.

A esta Ilustre Universidad, *la casa que vence las sombras* y a los profesores de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Al Ing. Antonio Ughi, por ser siempre incondicional y confiar en nosotros. Gracias por ser nuestro amigo, por tus oportunas y coherentes correcciones, por exigirnos siempre lo mejor de nosotros.

Queremos agradecer especialmente al Ing. Román Paz por guiarnos y por estar siempre dispuesto a colaborar con el desarrollo de nuestro trabajo. A la Ing. Yaraixa Pérez por su entusiasmo e interés, por sus ideas útiles para ayudarnos a mejorar.

A la empresa Schlumberger de Venezuela por donar el software esencial para el desarrollo de este proyecto y en especial a Larry Castro y Jorge Guzmán, por brindarnos su asesoría técnica. Gracias por su paciencia y por estar siempre dispuestos a colaborar con esta investigación. También agradecemos a Gustavo Montenegro y a los Srs. Walter Velásquez y José Cordero.

A los Ing. Kenny García y Edwin Amaris de FUNVISIS por ayudarnos en la etapa de interpretación de los datos de gravedad.

A los Ing. Daniel Naval y Wenner Hilla.

A Dios por ser siempre quien ilumina mis caminos.

A mis padres y hermano a quienes amo y me aman, son ellos mi estímulo para superarme en la vida, mi apoyo y ejemplo.

La Universidad Central de Venezuela por ser mi segundo hogar y darme la oportunidad de ser parte de su comunidad académica.

Al Ingeniero Antonio Ughi por brindarme su confianza, apoyo y amistad.

A mi nueva compañera, amiga y hermana Adriana Valentina, sin ella no hubiese logrado esta investigación, gracias por ser quien eres *“una de las personas más valiosas que he conocido en mi vida”*.

Melwin

A mi mamá, una mujer maravillosa, mi mejor amiga, mi ejemplo y modelo a seguir.

A mi familia, lo más hermoso que tengo en la vida, por bendecirme día a día, por guiarme y apoyarme en todas las metas que he emprendido.

A Melwin, por cambiar lágrimas por sonrisas. Quiero agradecerte por extender tu mano y brindarme tu apoyo en los momentos más difíciles. Pese a las adversidades me hiciste continuar en el camino. Gracias por tu comprensión y por tener siempre una palabra de aliento. Querido compañero de tesis gracias por ser mi *amigo*.

A Ybeth, Carmen, Woodwarde, Verónica, Leonor y Yashira por su amistad a lo largo de este camino. Iniciamos juntos esta meta y espero verlos pronto culminarla. A Maryu, Gemma, Francisco y Luis mis queridos compañeros de carrera.

Al Profesor Ricardo Alezones. Papá Ricardo gracias por tus sabios consejos, gracias por siempre confiar en mí y brindarme la oportunidad de aprender a querer la geología. Gracias por enseñarme que “*un geofísico que no es geólogo no va pal baile... es así!!!*”.

A Angela Rojas por tanto cariño, por estar siempre atenta del desarrollo de esta investigación, por su apoyo y cuidados cuando más los necesite.

A mis compañeras de nado sincronizado porque a su lado aprendí que *siempre se puede más...!!!*

A Herman Rojas . . .

Adriana

Gómez P., Melwin, Ubieda D., Adriana

**INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA INTEGRADA DE DOS TRANSECTOS
REGIONALES EN EL ÁREA MAYOR DE SOCORORO, ESTADO
ANZOÁTEGUI**

Tutor Académico: Prof. Antonio Ughi. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2007, 125 p.

Palabras Claves: Gravimetría, Sísmica 2D, Registros de Pozo, Estadística, Modelo Gravimétrico-Estructural, Área Mayor de Socororo.

Resumen.

En esta investigación se integró información proveniente de levantamientos gravimétricos realizados durante los años 2005 y 2006, seis líneas sísmicas 2D y quince registros de pozos pertenecientes al Área Mayor de Socororo. Los datos de gravedad fueron evaluados y validados estadísticamente para construir un mapa de Anomalía de Bouguer y a partir de su interpretación cualitativa se seleccionaron dos transectos regionales. La interpretación estructural de las secciones sísmicas 2D paralelas a la dirección de los transectos permitió controlar la geometría y profundidad de los cuerpos de roca. A través de los registros de pozo, previamente analizados con herramientas estadísticas se estimaron las densidades de las formaciones geológicas de interés. Se obtuvo un modelo gravimétrico-estructural para cada transecto, donde se evidencia que las anomalías gravimétricas de la zona están controladas principalmente por la geometría del basamento cristalino y no por las estructuras geológicas que afectan la geometría de la secuencia sedimentaria cuyo espesor disminuye hacia el sureste, considerando el rumbo NO-SE y buzamiento hacia el norte del monoclinall fallado que caracteriza la zona.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIAS	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xiv
LISTA DE APÉNDICES	ixv
CAPÍTULO 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo General	7
1.2.2 Objetivos Específicos	7
1.3 Localización de la zona en estudio	8
CAPÍTULO 2	9
2.1 Síntesis Tectónica Regional	10
2.2 Geología Estructural y Estratigrafía del Área Mayor de Socororo	14
CAPÍTULO 3	25
3.1 Método Gravimétrico	26
3.2 Interpretación Sísmica-Estructural	28
3.2.1 Calibración Sísmica-Pozos: Sismograma Sintético	31
3.2.2 Interpretación Estructural de las secciones en tiempo.....	33
3.2.3 Conversión Tiempo Profundidad	33
3.3 Registros de Pozos.....	35
3.4 Análisis Geoestadístico	37

	Pág.
CAPÍTULO 4	40
4.1 Procesamiento e Interpretación de Datos Geofísicos	41
4.2 Procesamiento Gravimétrico	43
4.2.1 Validación Estadística de los Datos Gravimétricos.....	45
4.3 Interpretación Sísmica Estructural	56
4.4 Registros de Pozo	64
CAPÍTULO 5	74
5.1 Interpretación Integrada.....	75
5.2 Modelado Gravimétrico-Estructural.....	85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	102
APÉNDICES	109

LISTA DE FIGURAS

Figura N°	Pág.
1.1. Ubicación del Área Mayor de Socororo.....	8
2.1. Ubicación de la Cuenca Oriental en el marco de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela.....	10
2.2. Corte geológico conceptual noroeste-sureste desde la Plataforma Margarita-Los Testigos hasta el Río Orinoco.....	11
2.3. Principales estructuras de la Cuenca Oriental de Venezuela.....	15
2.4. Columna estratigráfica del subsuelo en el Área Mayor de Socororo.....	17
2.5. Distribución de las facies sedimentarias durante el <i>Cenomaniense-Campaniense</i> al este de Venezuela.....	20
3.1. Modelo sintético de acuñaamiento.....	30
3.2. Elementos necesarios para la construcción de un sismograma sintético.....	32
3.3. Ejemplo de las actividades de adquisición de sísmica de pozo para tiros de verificación o “check-shots”.....	36
3.4. Ejemplo de un histograma de frecuencia.....	38
3.5. Ejemplo de un diagrama de caja y bigotes.....	39

Figura N°	Pág.
3.6. Ejemplos de los gráficos P-P y Q-Q.....	39
4.1. Organigrama de la secuencia metodológica empleada en cada una de las etapas de la investigación.	42
4.2. Ubicación de las estaciones bases utilizadas para los levantamientos gravimétricos.	43
4.3. Distribución de las estaciones gravimétricas adquiridas en las campañas de Geofísica de Campo años 2005 y 2006.	44
4.4. Organigrama de la secuencia de procesamiento del SPIDGRAV utilizada para la obtención de la Anomalía de Bouguer.	45
4.5. Histograma de frecuencia del total de datos de gravedad.	46
4.6. Diagrama de caja y bigotes para el total de datos de gravedad.	47
4.7. Prueba paramétrica P-P para el total de datos de gravedad.	49
4.8. Prueba paramétrica Q-Q para el total de datos de gravedad.	50
4.9. Evaluación estadística de la subpoblación menor a -40 mGal.	53
4.10. Evaluación estadística de la subpoblación mayor a -40 mGal.	54
4.11. Bondad de ajuste para cada grado de polinomio utilizado.	55

Figura N°	Pág.
4.12. Ubicación de las líneas sísmicas 2D utilizadas para la interpretación sísmica estructural.	57
4.13. Resultado del análisis de frecuencia de la línea sísmica S-75A-04 para el pozo ES-451.....	58
4.14. Sismograma sintético del pozo ES-451.....	60
4.15. Despliegue del sismograma sintético obtenido sobre la línea sísmica S-75A-04...	61
4.16. Visualización de las líneas sísmicas 2D desde la aplicación GeoViz®.	62
4.17. Ejemplo de la visualización de los horizontes interpretados en IMain® desde la aplicación GeoViz®..	63
4.18. Mapa de distribución de pozos en el Área Mayor de Socororo.	64
4.19. Estudio de la variación del gradiente de velocidad en el Área Mayor de Socororo.	66
4.20. Gráfico de la curva conversión tiempo-profundidad para el pozo ES-420 utilizada para los pozos ES-431 y ES-439.	67
4.21. Gráfico de la curva tiempo-profundidad para el pozo ES-451 utilizada para los pozos ES-401 y ES-460.....	67
4.22. Histograma de frecuencias de la densidad para la Formación Freitas.....	69

Figura N°	Pág.
4.23. Histograma de frecuencias para la Formación Oficina.	70
4.24. Histograma de frecuencias para la Formación Merecure.	71
4.25. Histograma de frecuencias para el Grupo Temblador.	72
5.1. Mapa de Anomalía de Bouguer del Área Mayor de Socororo.	76
5.2. Separación gravimétrica regional y de residuos utilizando un polinomio de grado 2.	78
5.3. Líneas sísmicas LS-DV-5.	80
5.4. Resultados de la interpretación de las secciones sísmicas BUD-96-A17 y S-77D-04DV.	81
5.5. Interpretación de la línea sísmica S-75A-04.	83
5.6. Mapa de fallas para el tope de la Formación Merecure.	84
5.7. Dirección de los transectos seleccionados para construir los modelos gravimétrico-estructurales.	85
5.8. Resultado del ajuste de la curva gravimétrica sin modelar el tope del basamento cristalino en el transecto AA'.	88
5.9. Resultado del ajuste de la curva gravimétrica sin modelar el tope del basamento cristalino en el transecto BB'.	88

Figura N°	Pág.
5.10. Modelo gravimétrico-estructural del transecto AA'	91
5.11. Modelo gravimétrico-estructural del transecto BB'	94
5.12. Modelo gravimétrico-estructural del transecto AA' desde las secuencias sedimentarias hasta la discontinuidad de Mohorovich.....	95
5.13. Modelo gravimétrico-estructural del transecto BB' desde las secuencias sedimentarias hasta la discontinuidad de Mohorovich.....	95
5.14. Modelo estructural del transecto AA'	97
5.15. Modelo estructural del transecto BB'	98

LISTA DE TABLAS

Tabla N°	Pág.
1. Etapas de la evolución geodinámica de la Cuenca Oriental de Venezuela	11
2. Estaciones bases utilizadas	44
3. Medidas de tendencia central y dispersión del total de datos de Anomalía de Bouguer	48
4. Medidas de tendencia central y dispersión de la subpoblación de valores menores a -40 mGal	51
5. Medidas de tendencia central y dispersión de la subpoblación de valores mayores a -40 mGal	52
6. Líneas sísmicas 2D utilizadas para la interpretación sísmica estructural	56
7. Cálculo de la resolución sísmica vertical para las arenas gasíferas F8 y N2.	59
8. Inventario de registros de pozo ..	65
9. Diferencia de profundidad entre el valor calculado de la conversión T-Z y el obtenido directamente del pozo	68
10. Medidas de tendencia central para la Formación Freites.	69
11. Medidas de tendencia central para la Formación Oficina.	70

12. Medidas de tendencia central para la Formación Merecure.....	71
13. Medidas de tendencia central para el Grupo Temblador.....	72
14. Valor de densidad de las formaciones evaluadas a partir de los registros de pozo.	73
15. Espesor de las formaciones geológicas de acuerdo con el modelo del transecto AA'.....	90
16. Espesor de las formaciones geológicas de acuerdo con el modelo del transecto BB'.....	93

LISTA DE APÉNDICES

APÉNDICE 1	109
Tabla A1. Estaciones de gravedad utilizadas para la construcción del mapa de Anomalía de Bouguer.....	110
APÉNDICE 2	123
Tabla A2. Inventario de las líneas sísmicas 2D disponibles en el Laboratorio de Interpretación del Subsuelo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	124
APÉNDICE 3	125
Tabla A3. Coordenadas de los pozos utilizados en la investigación.....	126

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

La Cuenca Oriental de Venezuela es una depresión en el basamento cristalino que está ubicada en la zona noreste del país, se extiende desde el sur de la Cordillera de la Costa y la Serranía del Interior Oriental hasta el Escudo de Guayana. Está subdividida en dos subcuencas, a saber: la Subcuenca de Guárico al oeste y la Subcuenca de Maturín al este, abarcando los Estados Guárico, Anzoátegui, Delta Amacuro, Monagas y el suroeste del Estado Sucre.

La Cuenca Oriental es la segunda provincia más rica en hidrocarburos de Sur América luego de la Cuenca de Maracaibo; esta cuantificación no contempla las reservas estimadas para la Faja del Orinoco, de lo contrario la Cuenca Oriental sería considerada como la de mayores recursos petrolíferos del subcontinente (González de Juana *et al.*, 1980).

La evolución geodinámica de la Cuenca comprende eventos que van desde una fase pre-apertura o “prerift” en el Paleozoico, hasta la transformación de la misma en una cuenca tipo “foreland” o antepaís a finales del Mioceno. Las secuencias sedimentarias se depositaron sobre el basamento ígneo-metamórfico del Precámbrico perteneciente al Macizo Guayanés.

Las características estratigráficas de cada una de las formaciones que conforman la Cuenca Oriental varían de acuerdo con el ambiente en el que fueron depositados los sedimentos, así una misma formación geológica tiene equivalentes en cada uno de los estados que conforman las Subcuencas; esta variedad garantizó la existencia de las condiciones necesarias y suficientes para la constitución de tan importante sistema petrolífero.

La zona de interés para esta investigación es el Área Mayor de Socororo (AMS), ésta se encuentra al sur del Estado Anzoátegui y pertenece a la Subcuenca de

Maturín. El AMS fue descubierta el 31 de agosto de 1939, a través de la perforación del pozo “SOC001” (PetroUCV, 2001). La columna estratigráfica de la zona en estudio se extiende desde rocas de edad Paleozoico con la Formación Hato Viejo en la base, hasta rocas de edad Pleistoceno pertenecientes a la Formación Mesa.

En el AMS, Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) ha realizado importantes proyectos de adquisición de datos correspondientes a sísmica 2D y 3D y registros de pozos desde que se descubrió el campo. En 2005 y 2006 el Departamento de Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, llevó a cabo dos levantamientos gravimétrico-magnéticos como complemento a los datos sísmicos y petrofísicos existentes.

Pese a la importancia económica del Área las investigaciones realizadas se han centrado en el análisis estructural y estratigráfico de niveles muy específicos; es decir, en el estudio particular de diversas arenas productoras de las formaciones Oficina y Merecure, principalmente. Los modelos sedimentológicos, estratigráficos, estructurales y geoquímicos que se manejan para la zona son los mismos que se utilizan en áreas vecinas y en general en el Área Mayor de Oficina.

La información obtenida de las investigaciones antes mencionadas no ha permitido interpretar el subsuelo desde las secuencias sedimentarias cercanas a la superficie hasta el basamento cristalino, razón por la cual se desconoce si las estructuras observadas en estos estratos obedecen a efectos tectónicos regionales o si están controlados por la geometría del basamento de la zona.

A continuación se presenta un breve recuento de los trabajos de investigación que se han realizado específicamente en el AMS y que han utilizado la información geológico-geofísica disponible en la zona.

- PetroUCV (2001) realizó un plan de desarrollo a través de informes técnicos que incluyen datos de las características generales del Área, descripción de los yacimientos, modelos sedimentológicos, petrofísicos, estratigráficos y geológicos de las formaciones de interés comercial para la extracción de petróleo y/o gas; éstas son las formaciones Oficina y Merecure. Adicionalmente, presentó la estimación de reservas probadas y probables de petróleo y gas, estrategias de explotación del Campo, actividades de reactivación y perforación de pozos, auditoría ambiental, evaluación económica y esquemas financieros.
- Avendaño y Cáceres (2002) orientaron su estudio a elaborar modelos geológicos partiendo de la caracterización de las arenas de Oficina Superior e Inferior y Merecure Superior, en el Área Mayor de Socororo, utilizando información de registros de pozos y criterios geoestadísticos. Como resultado obtuvieron mapas, secciones y cubos estratigráficos que permiten interpretar la distribución vertical y lateral de los fluidos, así como el ambiente de sedimentación de las arenas estudiadas.
- Díaz (2002) utilizó la simulación de registros de pozos mediante la suma de atributos petrofísicos ponderados de manera convolucional con el fin de generar registros sintéticos de densidad. Para comprobar la calidad de los mismos realizó una evaluación petrofísica utilizando los registros originales. Concluyó que en el Campo Socororo los modelos convolucionales de múltiples atributos ofrecen menor error de predicción y para el total de arenas empleadas en el estudio, en el 77% de los casos analizados los registros sintéticos permiten identificar arenas con contenido de hidrocarburo.
- Morales (2002) definió el marco estratigráfico de las arenas ubicadas en los topes de las formaciones Merecure y Oficina en el Campo Socororo Oeste, basada en los conceptos de estratigrafía genética secuencial. A través de registros de 29 pozos, mapas isópacos estructurales y seis unidades genéticas subdivididas con

base en los patrones de empaquetamiento, estableció que predominan los depósitos de canales distributarios, abanicos de rotura y depósitos de llanuras de inundación que caracterizan a la secuencia de estudio como un sistema de llanura deltaica.

- Reina (2002) interpretó estructural y estratigráficamente un área de 18 Km^2 por medio de sísmica 3D, en el Campo Socororo Este. Su intervalo de estudio estuvo comprendido por las formaciones Merecure y Oficina Inferior/Media y consistió en identificar patrones de fallas a través de atributos sísmicos y sistemas depositacionales y encadenados a través de un análisis secuencial. Los resultados obtenidos evidencian fallas normales con orientaciones NE-SO y NO-SE con edades Mioceno Inferior y Pleistoceno-Reciente.
- González y Vázquez (2005) elaboraron un modelo sedimentológico y estratigráfico de las arenas H, J y U pertenecientes a las formaciones Oficina y Merecure, en el Campo Socororo Oeste, para lo cual utilizaron la correlación entre registros de pozos y la representación espacial de las facies para cada unidad. En su investigación se propuso la arquitectura de las arenas prospectivas y sus respectivas características estratigráficas y sedimentológicas; sin embargo, se recomendó enriquecer el modelo propuesto con un modelo estructural y estudios petrofísicos.
- Hilla y Naval (2005) realizaron la interpretación estructural de las arenas gasíferas F8, I3, J3M, J3L, N2, R0U, R0M y R4L, pertenecientes a la Formación Oficina del Mioceno. A través de registros de pozos y sísmica 2D y 3D estudiaron la factibilidad de atributos sísmicos estructurales y petrofísicos para posteriormente realizar una interpretación sísmica estructural que les permitió delimitar los yacimientos gasíferos, realizar mapas de pseudo propiedades en las arenas F8, R0U, M y R4L e identificar la tendencia general de fallamiento en el Área Mayor de Socororo.

- Useche y Villamediana (2005) mediante el empleo de registros eléctricos y a partir de correlaciones estratigráficas interpretaron el marco estructural y estratigráfico de las arenas U y J en las formaciones Oficina y Merecure del Campo Socororo Este. Utilizaron marcadores estratigráficos regionales y elaboraron secciones estratigráficas que les permitieron evaluar que el paso de la Formación Merecure a la Formación Oficina está evidenciado por cambios de facies de canales, barras, abanicos de rotura hasta llanuras de inundación.
- León y Vielma (2006) estudiaron el intervalo comprendido desde las arenas U1U hasta H4, H5, H6 correspondiente a la parte basal y media de la Formación Oficina. Construyeron mapas de fallas a partir de sísmica 2D y 3D y secciones estratigráficas tanto en sentido de la sedimentación como perpendicular a la misma donde se observó la geometría de los cuerpos de arena y su extensión lateral. Caracterizaron la parte basal y media de la Formación Oficina como un sistema de ciclos deltaicos progradantes con influencia mareal marcada en las zonas de frente deltaico. Con base en toda la información estructural afirman que en campo predomina una estructura tipo monoclinal de rumbo aproximado este-oeste con una geometría de bloques limitados por fallas normales.

En vista de las ideas antes expuestas, es evidente que a pesar de todos los esfuerzos de investigación desarrollados hasta la fecha, en la actualidad persiste la necesidad de generar un modelo estructural regional. El modelado regional permitirá evaluar las condiciones del subsuelo del área en estudio desde el basamento cristalino hasta de las secuencias sedimentarias visibles en las secciones sísmicas.

La metodología de integración empleada en esta investigación será útil para generar dos modelos gravimétrico-estructurales, restringidos por datos de gravedad, registros de pozo y datos sísmicos 2D y permitirá comprender con mayor claridad los controles estructurales presentes en al Área Mayor de Socororo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Proponer un modelo gravimétrico-estructural del subsuelo en el Área Mayor de Socororo, a partir de la interpretación integrada entre datos sísmicos 2D, registros de pozos y gravimetría.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Generar un mapa regional de Anomalía de Bouguer que permita seleccionar dos perfiles en dirección paralela a las líneas sísmicas 2D disponibles.
- Estimar las relaciones existentes entre los datos provenientes de los registros de pozos empleando herramientas estadísticas.
- Utilizar los registros de pozos para calibrar las secciones sísmicas y obtener la densidad de los cuerpos de roca.
- Interpretar estructuralmente las líneas sísmicas 2D seleccionadas.
- Restringir los modelos gravimétrico-estructurales a partir de la información geológico-geofísica disponible.

1.3 Localización de la zona en estudio

El Área Mayor de Socororo (AMS) se encuentra en el suroeste del flanco sur de la Subcuenca de Maturín perteneciente a la Cuenca Oriental de Venezuela, específicamente al este de la población de Pariaguán, Municipio Miranda del Estado Anzoátegui y entre las coordenadas geográficas N 8° 43' 00" - 8° 53' 53" y W 64° 30' 56" - 64° 42' 06".

El Área abarca una extensión superficial de 270 Km^2 conformando un bloque de geometría irregular, se divide en tres (3) campos petroleros principales, ellos son: Caricari, Cachicamo y Socororo, este último se subdivide en Socororo Este, Oeste y Noreste (Figura 1.1). El AMS se encuentra limitada al oeste por el Campo Budare, en el este por el Campo Yopales, los campos de Petrozuata en el sur, y al noreste por el Campo Caracoles.

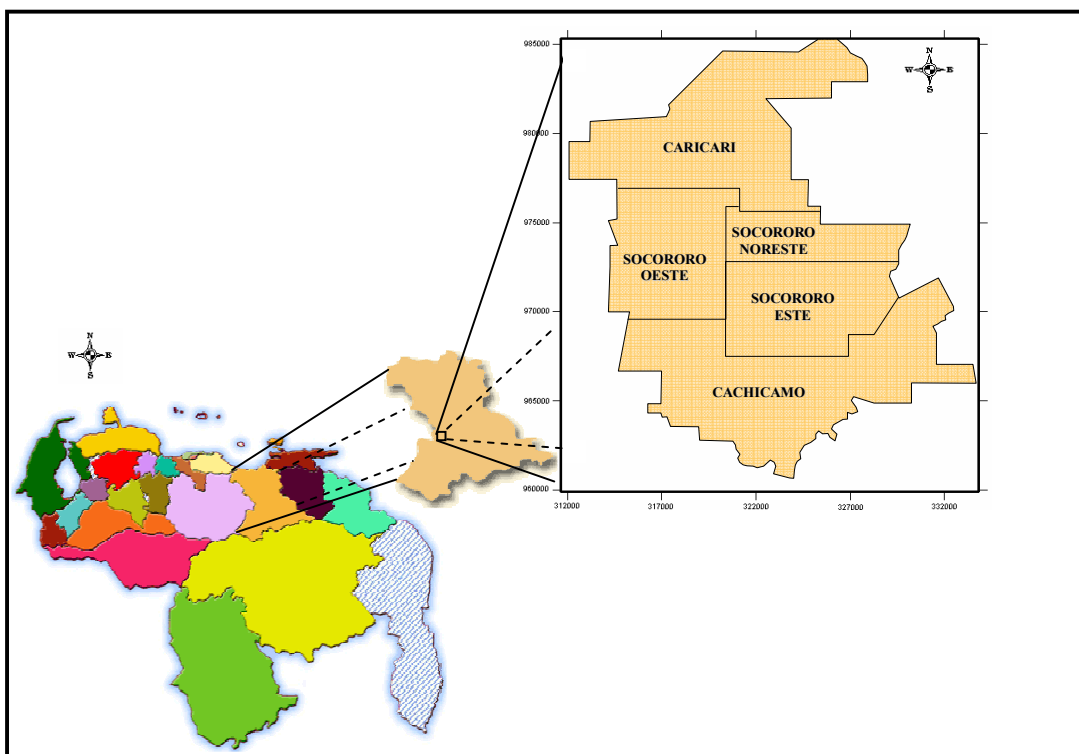


Figura 1.1. Ubicación del Área Mayor de Socororo.

CAPÍTULO 2

2.1 Síntesis Tectónica Regional

Según González de Juana *et al.* (1980) la Cuenca Oriental de Venezuela es una depresión estructural limitada al sur por el extremo norte del Cratón de Guayana, al norte por el cinturón de fallamiento y plegamiento de la Serranía del Interior Central y Oriental, y al oeste por el alto estructural de El Baúl (Figura 2.1).

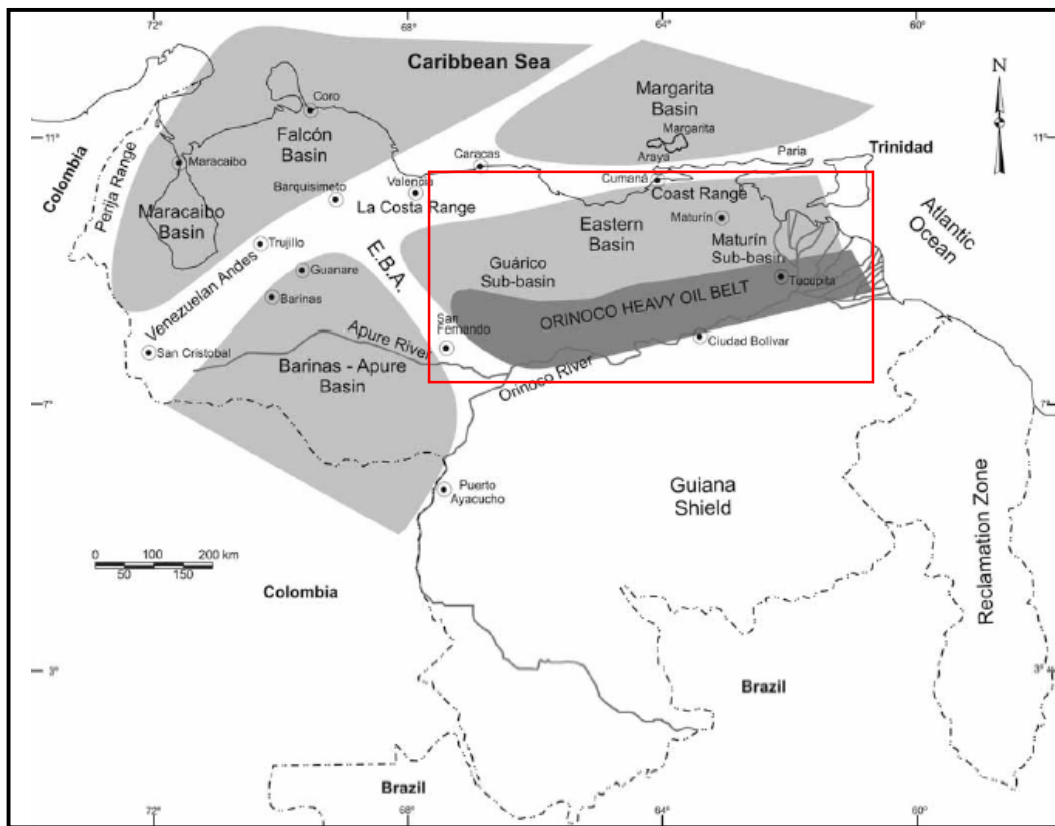


Figura 2.1. Ubicación de la Cuenca Oriental en el marco de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela. E.B.A= Arco El Baúl; límite entre la cuenca Oriental y la Cuenca Barinas-Apure (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 2004).

La Cuenca Oriental de Venezuela se caracteriza por tener una geometría asimétrica, su flanco sur buza suavemente al norte hasta que es intersectada por una zona de complejas perturbaciones tectónicas y plegamientos, que forman el flanco norte (Figura 2.2). Toda la cuenca se inclina hacia el este, de manera que su parte más profunda se encuentra al noreste, hacia Trinidad (Méndez, 1985).

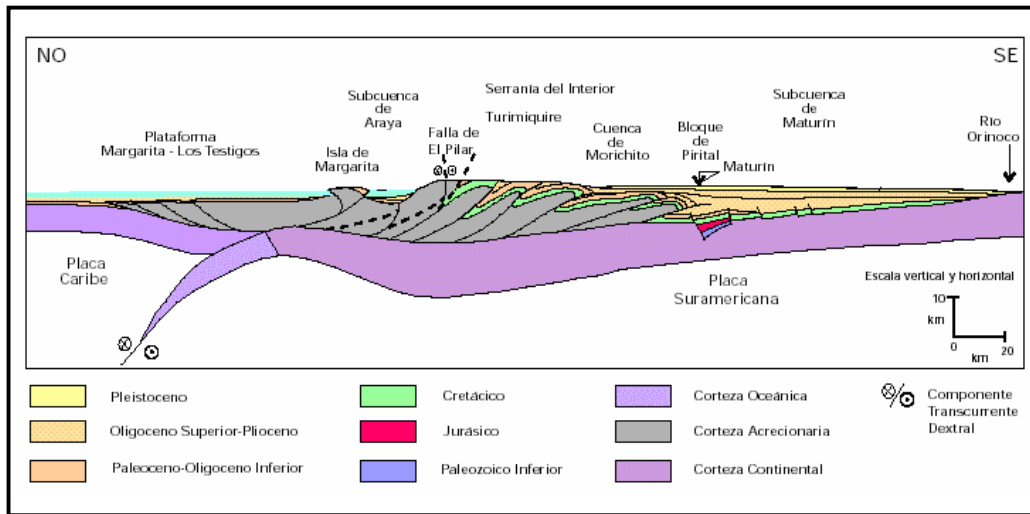


Figura 2.2. Corte geológico conceptual noroeste-sureste desde la Plataforma Margarita-Los Testigos hasta el Río Orinoco (Tomado y modificado de Schlumberger, 1997).

La evolución geodinámica de la Cuenca Oriental de Venezuela puede dividirse en cuatro eventos tectónicos (Eva *et al.*, 1989; citado en: Parnaud *et al.*, 1995); a continuación se presentan y describen cada una de dichas etapas.

Tabla 1. Etapas de la evolución geodinámica de la Cuenca Oriental de Venezuela

FASE	EDAD	EVENTO
Pre-Apertura	Paleozoico	Deposición de sedimentos en ambientes neríticos y costeros
Apertura - Deriva	Jurásico - Cretácico Temprano	Generación de estructuras de extensión
Margen Pasivo	Cretácico - Paleoceno	Sedimentación en una plataforma continental estable
Colisión Oblicua	Mioceno - Plioceno a Cuaternario	Formación de una cuenca “foreland” o antepaís

Pre-Apertura (Paleozoico)

Es la responsable de la depositación de secuencias sedimentarias en ambientes neríticos y costeros como las formaciones Hato Viejo y Carrizal en la Subcuenca de Guárico (Parnaud *et al.*, 1995). De acuerdo con Yoris y Ostos (2004) Hato Viejo y Carrizal son formaciones “syn-rift” típicas de Gondwana y Laurentia, por ende sólo es posible encontrarlas en depresiones estructurales de cuencas sedimentarias tal como el Graben de Espino.

Apertura y Deriva (Jurásico-Cretácico Temprano)

En Venezuela el “rifting” produjo grandes lineamientos estructurales que tuvieron posteriormente influencia en la evolución de las cuencas sedimentarias (Yoris y Ostos, 2004). Según Parnaud *et al.* (1995) esta etapa se caracteriza por la generación de estructuras “horst” y “graben”, creación de corteza oceánica o Protocaribe al norte y una discordancia regional hacia el Cratón cuya separación ocurre a lo largo de fallas transformantes. Este período se representa por las capas rojas de la Formación La Quinta, al oeste del Graben de Espino, la cual fue depositada en ambientes continentales (Schlumberger, 1980).

Margen Pasivo (Cretácico-Paleoceno)

Al final del Albiense ocurrió un evento de transgresión diacrónica donde el mar cubrió Suramérica (Yoris y Ostos, 2004). La sedimentación se desarrolló con la ocurrencia de tres fases transgresivas que inundan el continente de norte a sur. Éstas ocurrieron durante el Turoniense, Paleoceno Temprano-Eoceno y Oligoceno respectivamente, y fueron generadas por cambios eustáticos del nivel del mar. El máximo avance transgresivo de esta fase está marcado por la depositación de carbonatos de plataforma (Parnaud *et al.*, 1995). En conclusión, el norte de

Suramérica estuvo caracterizado por una plataforma continental estable, limitada al sur por el Cratón de Guayana y un océano abierto hacia el norte.

Colisión Oblicua (Mioceno-Plioceno y el Cuaternario)

Parnaud *et al.* (1995) explican que esta etapa marca el final del margen pasivo durante el Oligoceno como consecuencia de la colisión de la Placa Caribe contra el borde septentrional de la Placa Suramericana, lo que permitió el desarrollo de una cuenca antepaís. La colisión migró progresivamente hacia el este desde el Oligoceno hasta el Mioceno Tardío, dividiendo la cuenca antepaís en tres zonas: una plataforma al sur, una zona de sobrearco en la parte central y un sobrecorrimento al norte. Esta última zona estuvo caracterizada por la formación de la Serranía del Interior Central y Oriental.

La influencia de la colisión oblicua de la Placa Caribe en la depositación de las rocas en el oeste de Venezuela pudo empezar a mediados del Eoceno, esta depositación ocurrió en el “foredeep” localizado para ese entonces al norte de Venezuela. Como consecuencia de la colisión la forma de la Cuenca fue variando, lo que generó que los sedimentos adquirieran una distribución diferente, dando lugar a ambientes principalmente continentales con invasiones marinas frecuentes. (Yoris y Ostos, 2004).

2.2 Geología Estructural y Estratigrafía del Área Mayor de Socororo

Los principales rasgos estructurales de la Cuenca Oriental de Venezuela se encuentran representados en la Figura 2.3. Las estructuras más cercanas al Área Mayor de Socororo son el Corrimiento Frontal de Guárico, el Corrimiento de Anaco y el Corrimiento de Pirital.

- El Corrimiento de Pirital divide la Subcuenca de Maturín en dos dominios importantes; hacia el norte la Serranía del Interior Oriental con una gran complejidad tectónica y hacia el sur una zona menos compleja tectónicamente, dominada por fallas normales (Méndez, 1985). De acuerdo con Yoris y Ostos (2004) es un cabalgamiento de sedimentos desde el Cretáceo hasta el Oligoceno.
- En el Corrimiento Frontal de Guárico existe un contacto tectónico entre formaciones cretácicas metamorfizadas y paleocenas sobre formaciones oligo-miocenas. La línea de corrimiento atraviesa la parte noroccidental de Anzoátegui; está segmentada por fallas oblicuas con dirección noroeste-sureste y algunos pliegues suaves (González de Juana *et al.*, 1980).
- El Corrimiento de Anaco tiene un rumbo preferencial noreste y buzamiento promedio de 45° hacia el noroeste, está ubicado en la parte central del Estado Anzoátegui y se caracteriza por conjuntos de domos con acumulaciones de hidrocarburos. Fue generado por movimiento rumbo deslizante de la falla de El Pilar ubicada en la Serranía del Interior Oriental (González de Juana *et al.*, 1980).

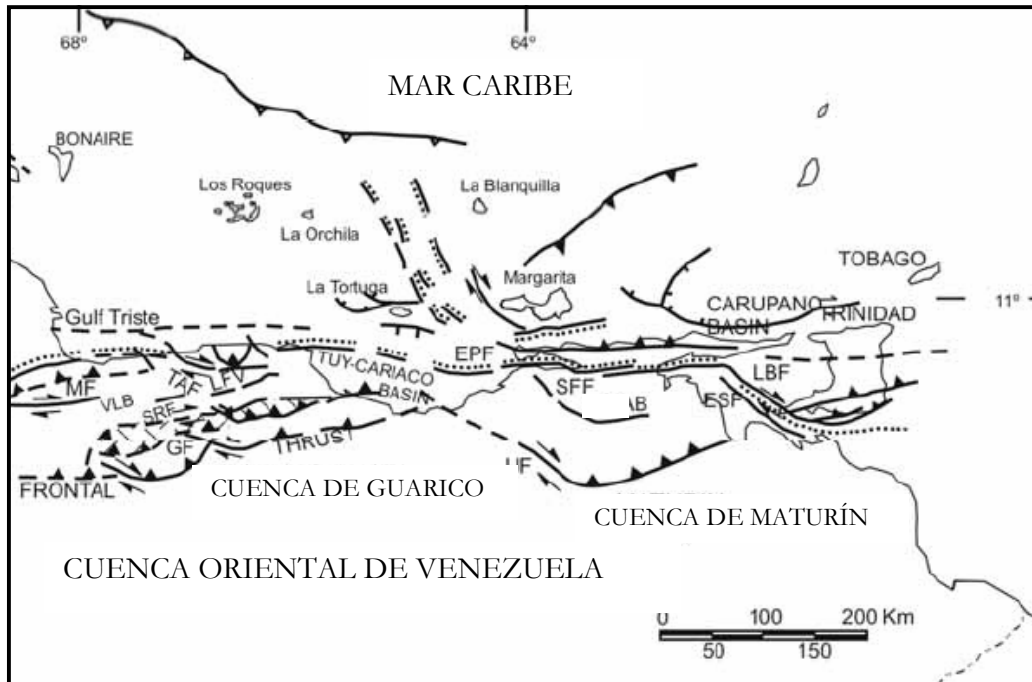


Figura 2.3. Principales estructuras de la Cuenca Oriental de Venezuela. UF: Falla de Urica, GF: Corrimiento de Guárico, EPF: Falla El Pilar, SFF: Falla San Francisco (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 2004).

El Área Mayor de Socororo (AMS) ha sido interpretada como un monoclinall fallado con rumbo NO-SE y buzamiento regional entre dos a tres grados hacia el norte (PetroUCV, 2001). En el Área, y a través de interpretaciones estructurales de diversas arenas correspondientes a las formaciones Oficina y Merecure, ha sido posible identificar un sistema de fallas normales con dirección NO-SE, aproximadamente paralelo al rumbo regional, las mismas son consecuencia de un régimen de esfuerzos distensivos. Existe otro sistema de fallas con rumbo NE-SO al que pertenece la Falla Cachicamo, ésta es considerada el elemento estructural principal del AMS debido a que atraviesa todo el campo y se extiende hasta campos vecinos. Ambas familias de fallas son de alto grado de buzamiento, aproximadamente entre 70° y 80° hacia el norte (PetroUCV, 2001; Morales, 2002; Reina, 2002; González y Vázquez, 2005; Hilla y Naval, 2005; León y Vielma, 2006).

De acuerdo con Hilla y Naval (2005) la magnitud del salto de la Falla Cachicamo es 120-180 pies. Por su parte León y Vielma (2006) afirman que su salto aumenta con la profundidad desde 80 pies hasta unos 220 pies en la parte basal de la Formación Oficina. Adicionalmente, existe discrepancia sobre el salto de la familia de fallas con dirección NO-SE, Morales (2002) propone magnitudes que se encuentran en el rango entre 20 y 100 pies, mientras que León y Vielma (*op. cit.*) proponen un rango de 20 a 35 pies. De acuerdo con PetroUCV (2001) este último sistema de fallas es el responsable de la mayor parte de las acumulaciones de hidrocarburos en los Campos Socororo y Caricari.

La columna estratigráfica en el Área Mayor de Socororo descansa sobre el basamento ígneo metamórfico del Complejo Basal de Guayana, de edad Precámbrico (Figura 2.4). Las secuencias sedimentarias suprayacentes se extienden hasta rocas de edad Pleistoceno, caracterizadas por la depositación de la Formación Mesa (Méndez, 1985).

A continuación se realiza una descripción estratigráfica detallada de las secuencias sedimentarias pertenecientes al subsuelo del Área Mayor de Socororo, empezando por las más antiguas y profundas.

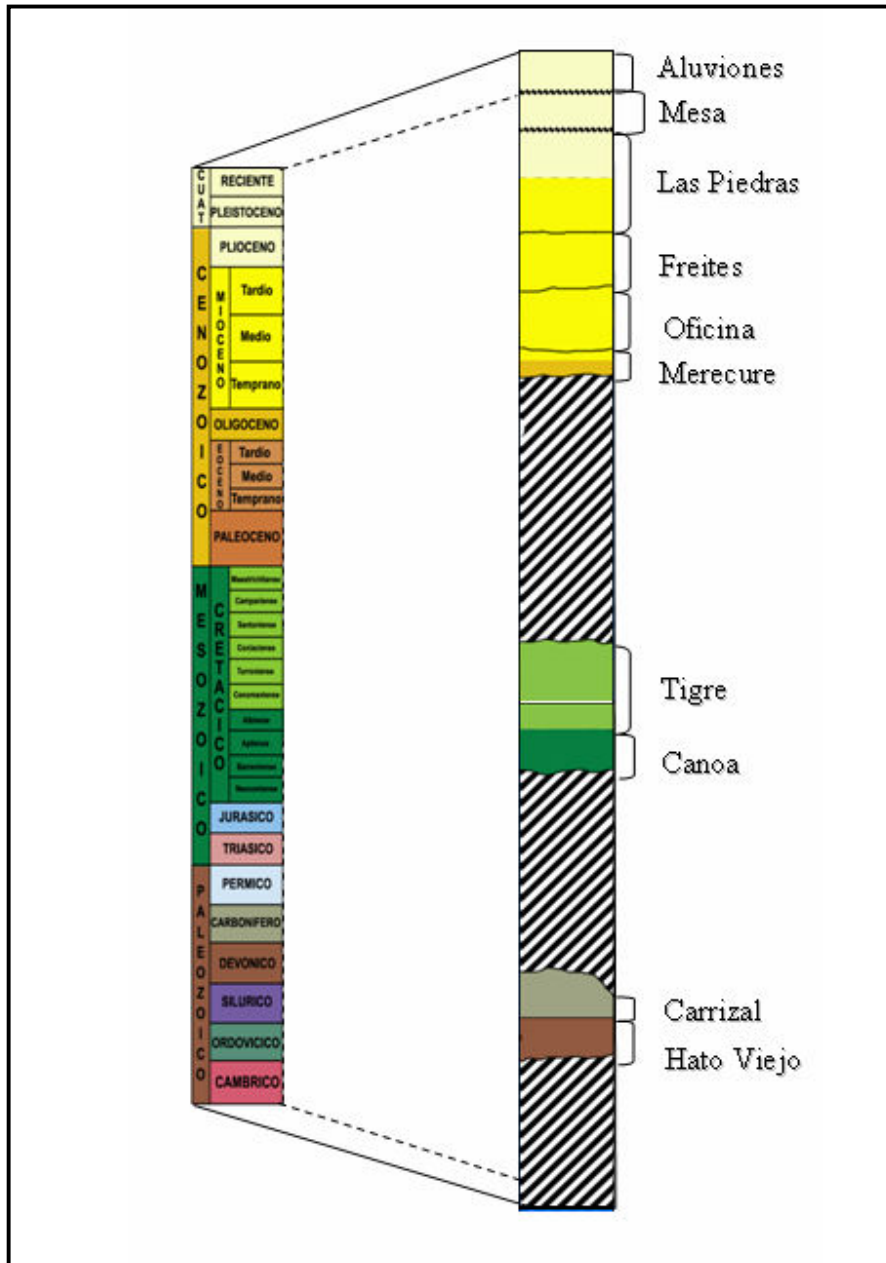


Figura 2.4. Columna Estratigráfica del subsuelo en el Área Mayor de Sozororo.

Formación Hato Viejo (Paleozoico: Devónico)

De acuerdo con Hedberg (1942), la formación se encuentra en el subsuelo de la parte sur del Estado Guárico y suroccidental del Estado Anzoátegui y se desconoce en afloramientos. La unidad está constituida por areniscas de grano fino a grueso con colores que varían de gris a rosado, con granos redondeados y muy bien cementados, maciza y ligeramente calcárea. Las areniscas contienen conglomerados y peñas de cuarcita a intervalos irregulares; localmente, se presentan vetas de calcita a lo largo de fracturas.

El ambiente de sedimentación se define de tipo continental, los sedimentos representan el relleno de la cuenca (facies fluvial y/o pie de monte) como resultado de una fase erosiva, contemporánea o subsiguiente a un período de intensa actividad tectónica. La formación infrayace a la Formación Carrizal del Paleozoico (Cámbrico Temprano) y suprayace discordantemente a las rocas precámbricas del Escudo de Guayana. Su espesor máximo es 91 m (Hedberg, 1942).

Formación Carrizal (Paleozoico: Devónico Superior a Carbonífero Inferior)

Se extiende geográficamente en el subsuelo de la parte meridional de los Estados Guárico y Anzoátegui, y probablemente sur de Monagas. Está constituida por una espesa secuencia de arcillitas verdosas a gris oscuro, masivas, densas y compactas. Contiene algunas capas intercaladas de limonita, areniscas y conglomerados, generalmente hacia la base de la formación. Es claramente diferenciable en registros eléctricos, con base en la respuesta de las curvas de rayos gamma y potencial espontáneo, típico de sedimentos lutíticos (Hedberg, 1942).

Las estructuras sedimentarias sugieren que estas litologías fueron depositadas bajo condiciones de ambiente marino (nerítico), en aguas someras y condiciones de

corriente típicas de llanuras de marea. El tope de la Formación Carrizal es siempre erosional y está cubierto por sedimentos del Grupo Temblador y de la Formación Oficina. En la base suprayace a la Formación Hato Viejo y su espesor es aproximadamente 2000 m (Hedberg, 1942).

Grupo Temblador (Cretácico)

El Grupo Temblador designa las capas del Cretácico presentes en el subsuelo en el sur de los Estados Monagas y Anzoátegui (Dusenbury, 1960). De acuerdo con Yoris y Ostos (2004) está constituido por las formaciones Canoa y Tigre y es la principal evidencia de la transgresión marina que se inició en el este de Venezuela aproximadamente en el *Cenomaniense* (Figura 2.5).

- ***Formación Canoa (Aptiense-Albiense)*** Se ubica en el subsuelo de la región meridional, central y parte de la región septentrional de los Estados Monagas, Anzoátegui y Guárico. Su espesor aproximado es 100 m. Litológicamente la formación consta de conglomerados de grano fino y areniscas conglomeráticas, limolitas y arcillitas con restos de plantas. La presencia de conglomerados y restos de plantas sugiere su depositación en ambientes continentales de carácter fluvial, en aguas llanas no-marinas, bajo clima árido y una topografía plana. El contacto inferior es marcadamente discordante sobre una superficie aparentemente peneplanada, constituida por rocas ígneas y metamórficas del basamento de las Formaciones Hato Viejo y Carrizal. El contacto superior es transicional y marca un cambio de facies predominantemente continental a facies suprayacentes predominantemente marinas (Formación Tigre).
- ***Formación Tigre (Cenomaniense-Campaniense)*** Se extiende en el subsuelo en el sur, centro y parte del norte del Estado Monagas, Anzoátegui y Guárico. Está constituida por una secuencia variable, irregularmente estratificada de areniscas gruesas, limonitas de grano fino, y lutitas carbonáceas y fosfáticas con

intercalaciones de calizas dolomíticas. El ambiente sedimentario de la formación es de talud, con el desarrollo de ambientes de plataforma hacia el sur de la región de Guárico. La transición entre ambos ambientes fue muy suave y con pocas diferencias. La plataforma presentaba variaciones en extensión, dando por origen variación en los espesores (aproximadamente 200 m) y texturas de las calizas. El contacto inferior es diacrónico y transicional sobre los sedimentos continentales de la Formación Canoa. El contacto superior es discordante, de carácter erosional, por debajo de la Formación Merecure, según la región de estudio.

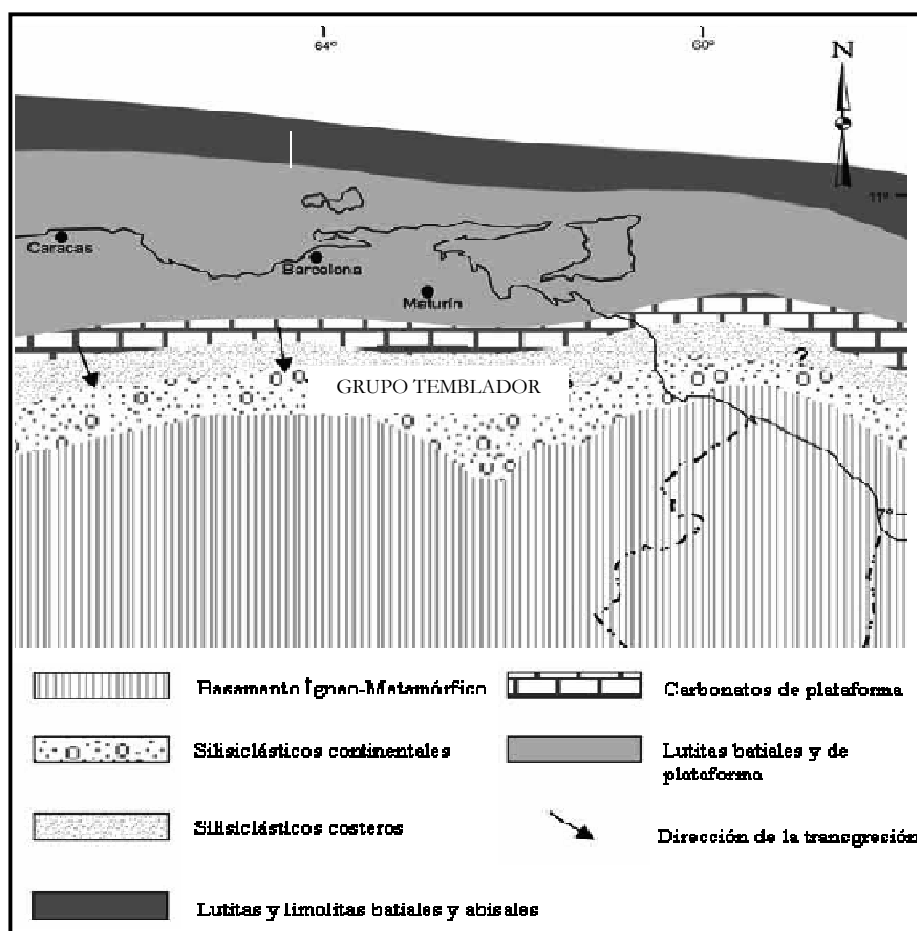


Figura 2.5. Distribución de las facies sedimentarias durante el *Cenomaniense-Campaniense* al este de Venezuela (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 2004).

Formación Merecure (Terciario: Oligoceno-Mioceno Inferior)

De acuerdo con Funkhouser *et al.* (1948), la Formación Merecure es reconocida en el subsuelo de la Subcuenca de Maturín, al sur del frente de deformación y en los Campos de Anaco. Está constituida en más del 50% por areniscas de color gris claro a oscuro, masivas, mal estratificadas y muy lenticulares, duras, de grano fino a grueso, incluso conglomeráticas, con estratificación cruzada y una variabilidad de porosidad y permeabilidad. Las areniscas se encuentran separadas por láminas e intervalos delgados de lutitas carbonáceas, de color gris oscuro a negro.

La formación tiene un espesor de aproximadamente 520 m y adelgaza, hasta acuñaarse, hacia el sur por debajo de la Formación Oficina, en los límites sur del Área Mayor de Oficina (Funkhouser, *op. cit.*). De acuerdo con Méndez (1985), el tope de Merecure constituye un reflector regional en toda la cuenca, debido al contraste acústico entre las areniscas masivas y la alternancia de areniscas y lutitas de la Formación Oficina. En los registros eléctricos se observa la existencia de picos casi continuos en la curva de Potencial Espontáneo (SP), mientras que la resistividad es alta, independiente de la existencia o no de hidrocarburos.

La sedimentación de la Formación Merecure ocurrió en aguas dulces a salobres a francamente marinas. El ambiente es típico de clásticos basales transgresivos depositados por corrientes fluviales entrelazadas y, en posición más distal, por condiciones deltáicas. La Formación, en el noreste de Anzoátegui, subyace concordantemente a la Formación Oficina y discordantemente a la Formación Las Piedras. Existe además un contacto transicional lateral con la parte inferior de la Formación Carapita (González de Juana *et al.*, 1980).

Formación Oficina (Terciario: Mioceno Inferior-Mioceno Medio)

La Formación Oficina se extiende geográficamente en el subsuelo de los Estados Anzoátegui y Monagas. Consta de una alternancia de lutitas grises, gris oscuro y gris marrón, intercaladas con areniscas y limolitas de color claro y grano fino a grueso. En general, las areniscas se hacen más abundantes, de mayor espesor y de grano más grueso hacia la base de la formación (Hedberg *et al.*, 1947).

La sedimentación de la Formación Oficina se inicia en condiciones de aguas dulces o salobres, continuando con repetidas alternancias de ambientes marinos someros, salobres y pantanosos; en general, las condiciones se hacen más marinas de oeste a este y de sur a norte. El ambiente se caracteriza como un inmenso complejo fluvio-deltaico, donde son comunes las arenas lenticulares y de relleno de canales de ríos. El ambiente sedimentario en el norte del Área Mayor de Oficina puede resumirse como repeticiones de ciclos caracterizados por transgresiones marinas, asociadas a caídas del nivel del mar y progradaciones de la plataforma. El espesor varía entre 600 a más de 1400 m en el Área Mayor de Oficina (González de Juana *et al.*, 1980).

El contacto inferior de la formación puede ser discordante sobre unidades cretácicas, así como también, concordante sobre la Formación Merecure. El contacto superior con la Formación Freites ha sido definido como concordante. La Formación Oficina pasa lateralmente a la Formación Carapita y a la parte media y superior de la Formación Chaguaramas (Funkhouser *et al.*, 1948).

Las arenas de la Formación Oficina constituyen, junto con la Formación Merecure, los principales yacimientos petrolíferos en la mayoría de los campos de la Cuenca Oriental (Méndez, 1985).

Formación Freites (Terciario: Mioceno Medio-Mioceno Tardío)

De acuerdo con Hedberg *et al.* (1947) la Formación Freites se extiende en el subsuelo a través de todo el flanco sur de la subcuenca de Maturín, casi hasta el Río Orinoco. Se describe litológicamente como lutitas fisiles verdes a gris verdoso, con areniscas en el tope y la base, que permiten la subdivisión de la unidad en tres intervalos: un intervalo superior, con capas delgadas de areniscas arcillosas de grano fino, extensas lateralmente; un intervalo intermedio e inferior de lutitas intercaladas con areniscas verde-amarillentas, de grano medio a grueso, calcáreas y muy fosilíferas. En las lutitas, a través de toda la formación, son frecuentes concreciones calcáreo-ferruginosas. Según González de Juana *et al.* (1980), su espesor varía de 275 a 1000 m, se considera que aumenta hacia el eje de la Cuenca.

La Formación suprayace concordantemente a la Formación Oficina en casi toda su extensión. Hacia el tope, es concordante con la Formación Las Piedras. Se reconoce en los perfiles sísmicos como un intervalo opaco. En general representa un ambiente marino somero en su proporción inferior, pasando a ambientes de aguas algo más profundas en la parte media. La parte superior corresponde de nuevo a ambientes de aguas llanas. Representa la segunda transgresión mayor del Mioceno (Hedberg *et al.*, *op. cit.*).

González de Juana *et al.* (*op. cit.*) afirman que las lutitas y arcillas de la formación constituyen el sello principal de los reservorios petrolíferos de la Formación Oficina, específicamente en el Área Mayor de Oficina.

Formación Las Piedras: (Terciario: Mioceno Tardío-Plioceno)

La Formación aflora en la porción septentrional de los Estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo se extiende al este hasta Pedernales, Territorio Delta Amacuro y Golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del Río Orinoco en la

faja petrolífera. Consiste en areniscas micáceas, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminadas con lutitas gris a verdoso, lutitas ligníticas y lignitos. También se encuentran algunas calizas arenosas duras y de color verde. Los espesores de la Formación varían de unos cientos de metros hasta aproximadamente 1525 m. En secciones sísmicas se reconoce con reflexiones de amplitud considerable (Hedberg *et al.*, 1947).

Según González de Juana *et al.* (1980) la Formación fue depositada en un ambiente deltáico a marino somero. El contacto superior es aparentemente concordante y transicional con la Formación Mesa. En el borde norte de la Cuenca, la Formación yace con fuerte discordancia angular sobre unidades del Mioceno al Cretácico. En el flanco sur de la Cuenca, yace concordantemente sobre la Formación Freites. Las arenas de la Formación Las Piedras son productoras de petróleo pesado en algunos campos del norte del Estado Monagas.

Formación Mesa (Cuaternario: Pleistoceno)

La Formación Mesa se extiende por los llanos centro-orientales y orientales, abarcando los Estados Guárico, Anzoátegui, Monagas. Hedberg y Pyre (1944) explican que litológicamente está constituida por arenas de grano grueso y gravas; con cemento ferruginoso y muy duras, conglomerados casi negros, arenas blanco-amarillentas con estratificación cruzada. Contiene también lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita. Los sedimentos gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos. Tiene un espesor máximo de 275 m.

De acuerdo con González de Juana *et al.* (*op. cit.*), la Formación Mesa es el producto de una sedimentación fluvio-deltáica y paludal, resultado de un extenso delta que avanzaba hacia el este en la misma forma que avanza hoy el delta del Río Orinoco. La Formación suprayace en contacto concordante y transicional, a la Formación Las Piedras.

CAPÍTULO 3

3.1 Método Gravimétrico

De acuerdo con Dobrin (1961), dada la dinámica de la corteza terrestre, es común la existencia de anomalías en el campo gravitatorio. El método gravimétrico mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria en las rocas que constituyen el subsuelo de un área en estudio y es por excelencia el método utilizado para prospectar eventos profundos incluyendo el basamento cristalino de una secuencia sedimentaria.

Según Parasnis (1970) en la prospección geofísica no existe interés en el conocimiento de la gravedad absoluta. De acuerdo con Rodríguez (1983) cuando se hace un sondeo gravimétrico se determina la aceleración de gravedad del campo en el punto de medición, de tal manera que la diferencia entre la gravedad absoluta y la gravedad en el punto de medición da origen al valor conocido como anomalía gravimétrica en ese punto.

Las anomalías del campo gravitatorio se asocian a cambios en la distribución de densidades de los materiales, relacionadas con alguna deformación estructural, o bien, a la presencia de un material de densidad distintiva en una formación geológica. Las variaciones determinadas en el campo gravitatorio terrestre son muy pequeñas y se expresan en miligales (Dobrin, 1961).

La gravedad medida en un punto de la superficie de la Tierra no puede ser utilizada directamente para hacer interpretaciones con respecto a las estructuras geológicas debido a que diferentes efectos se superponen y encubren las anomalías buscadas. El valor de la gravedad en un punto cualquiera de la superficie terrestre depende de la latitud, la altura sobre el nivel del mar o una superficie de referencia, la topografía del área circundante, los efectos de las mareas, la distribución de densidades en el subsuelo y las posibles variaciones del valor medido por razones de deriva instrumental (Rodríguez, 1983). La separación y eliminación de estos efectos

son el primer paso de la gravimetría después de que se ha realizado un levantamiento; de acuerdo con las correcciones que le sean aplicadas a un conjunto de datos observados, se podrán calcular Anomalías de Aire Libre o de Bouguer.

Según Rodríguez (1974), los factores que afectan el carácter de las anomalías gravimétricas son: 1) el contraste de densidades, 2) el volumen o espacio ocupado por el conjunto de rocas anómalas, 3) la profundidad y forma de los cuerpos causantes de las anomalías y 4) el aislamiento, es decir, la separación de la anomalía de interés del marco regional. Los factores antes mencionados deben ser considerados al momento de realizar la interpretación del subsuelo de una zona en estudio, pues permiten evaluar variables tales como la intensidad, la agudeza, la resolución y el alargamiento de los contornos isoanómalos (Parasnis, 1970).

De acuerdo con Rodríguez (*op. cit.*), los mapas gravimétricos manifiestan el efecto combinado de dos fuentes: una regional y una de carácter local. Las anomalías regionales son de gran amplitud y representan la configuración estructural de la propia corteza terrestre. Por su parte las distorsiones locales, de menor amplitud y extensión, están asociadas a eventos del subsuelo relativamente cercanos a la superficie y son conocidas como anomalías residuales. Los métodos empleados en la separación regional-residual pueden clasificarse en métodos gráficos y métodos analíticos.

El método analítico utiliza el cálculo de una superficie matemática, el cual permite adaptar superficies polinómicas a una distribución de valores observados de Anomalía de Bouguer mediante un ajuste por mínimos cuadrados (Rodríguez, 1974), con el fin de obtener los valores de las anomalías regionales y residuales. Cabe destacar que para poder utilizar los valores obtenidos de la separación regional-residual, se requiere la aplicación de criterios estadísticos y del investigador para seleccionar los valores correspondientes a la superficie polinómica más adecuada, de acuerdo a la información geológica del área. Los mapas regionales y

residuales proporcionan información que permite interpretar la forma estructural tanto del basamento como de diversas estructuras más cercanas a la superficie.

A partir de la interpretación cualitativa del mapa de Anomalía de Bouguer se deben seleccionar perfiles perpendiculares a la dirección de los contornos isoanómalos y de las estructuras geológicas presentes en la zona. La información obtenida de los perfiles serán los valores de anomalías observadas y permitirán realizar el modelado gravimétrico. Para generar el modelo del subsuelo y ajustar la curva de los valores observados a los valores calculados se deben asignar valores de densidad a los cuerpos de roca de acuerdo con la información obtenida de núcleos o registros de pozos, adicionalmente debe controlarse la geometría y profundidad de los mismos con la ayuda de modelos geológicos previos, datos sísmicos 2D y/o 3D, tomografía sísmica, entre otros.

3.2 Interpretación Sísmica-Estructural

El método de reflexión sísmica consiste en recolectar la respuesta de las reflexiones de las ondas elásticas cuando éstas han penetrado desde la superficie hasta distintas profundidades. Estas respuestas se miden en términos de las propiedades físicas de amplitud y tiempo.

El objetivo principal de la sísmica de reflexión es estimar la posición y forma de los estratos o capas que constituyen el subsuelo de un área en estudio. El conjunto de actividades que enmarca la sísmica de reflexión puede agruparse en tres grandes etapas: 1) adquisición, 2) procesamiento e 3) interpretación. En la primera se realizan todas las operaciones en campo referentes a la recolección de datos, en el procesamiento se reconstruyen, filtran, amplifican y modifican las señales obtenidas de los frentes de ondas con el fin de generar mapas y secciones sísmicas. Finalmente, a través de las secciones sísmicas se lleva a cabo la interpretación del subsuelo.

De acuerdo con Schlumberger (1980), una sección sísmica es un plano vertical en el que aparecen representados los diferentes reflectores; un reflector se define como la superficie entre dos estratos donde se refleja parte de un frente de ondas incidente. Las secciones sísmicas son herramientas que permiten evaluar el subsuelo de un área en estudio, facilitando la visualización de la orientación preferencial y geometría de los estratos y los eventos estructurales de la historia geológica de la zona.

En el estudio sísmico, independientemente de cual sea el objetivo, se debe conocer la resolución sísmica vertical, ésta representa la menor distancia existente entre dos (2) interfases litológicas diferentes y consecutivas que producen reflexiones, lo que permite dar conocimiento si el objetivo del estudio se puede identificar con los datos obtenidos en la adquisición sísmica. La resolución está controlada por la longitud de onda y la frecuencia dominante de una señal sísmica y depende de la velocidad de propagación de la onda en la formación.

La resolución sísmica vertical viene expresada de acuerdo con la siguiente ecuación y su efecto se muestra en la Figura 3.1 a través de un modelo sintético de acuñaamiento.

$$\text{Resolución Sísmica Vertical} = \frac{\lambda}{4} = \frac{V_{\text{interválica}}}{4f_{\text{dominante}}}$$

donde: V : velocidad interválica del estrato de interés

f : frecuencia dominante

λ : longitud de onda de la señal

A medida que el espesor de un estrato disminuye las amplitudes de la onda se mantienen relativamente constantes; sin embargo, cuando el espesor se aproxima a $\lambda/4$ la amplitud alcanza su valor máximo. Este espesor se denomina espesor de entonación; la disminución del espesor de un estrato por debajo de este valor produce

interferencia destructiva entre las reflexiones del tope y la base, lo cual se manifiesta en la atenuación de la amplitud, y en la mayoría de los casos, pérdida de la señal.

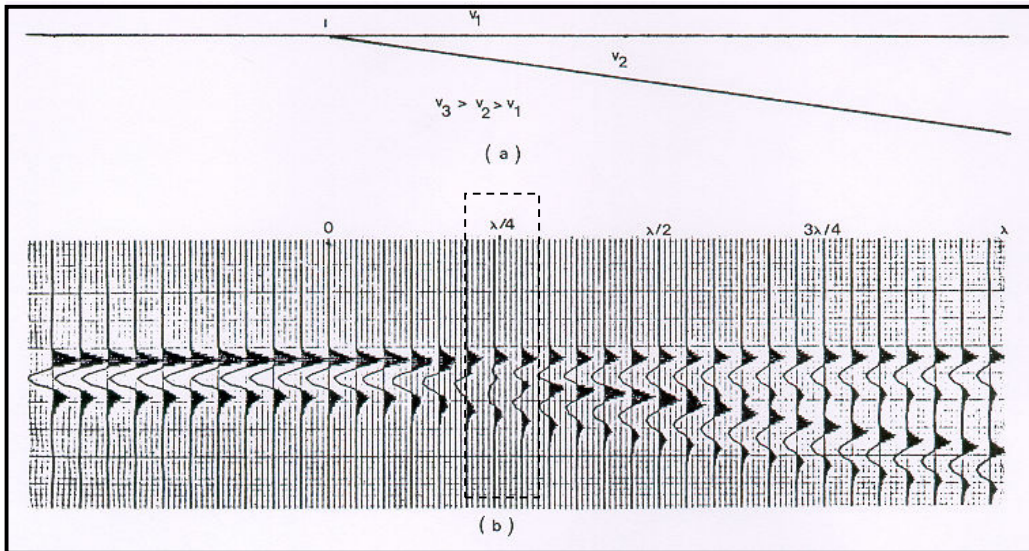


Figura 3.1. Modelo sintético de acuñaamiento. a) Modelo de tres capas donde la capa 2 se acuña debajo de la capa 1. b) Resultado esperado en una sección sísmica. Nótese como a medida que el espesor de la capa 2 se aproxima a $\lambda/4$ se produce la atenuación de la señal (Tomado de Sheriff *et al.*, 1990).

La interpretación sísmica se basa en dos aspectos fundamentales, ellos son: continuidad y correlación. La primera es la propiedad donde un pulso sísmico puede ser reconocido en trazas sucesivas, que crean alineaciones que dan la característica de continuidad a lo largo de las secciones sísmicas. La segunda permite hacer un reconocimiento de patrones, bien sea longitud, amplitud o forma, se utiliza principalmente para relacionar un área de coincidencia con otra y depende de las características de las reflexiones (Sánchez, 1999).

Para identificar un conjunto de reflectores de interés en una sección sísmica se debe realizar una metodología de interpretación que consta de varias fases, en principio es necesario calibrar las secciones sísmicas con los registros de pozo a través de sismogramas sintéticos, una vez culminada esta etapa se puede iniciar la interpretación las secciones en tiempo.

3.2.1 Calibración Sísmica-Pozos: Sismograma Sintético

Es una herramienta utilizada para calibrar la información y resultados obtenidos de la sísmica de reflexión, verificando la existencia y continuidad de un evento o reflector de interés, a una determinada profundidad. Es fundamental para la integración de datos ya que permite correlacionar los reflectores sísmicos en tiempo con la información geológica en profundidad e identificar la información existente en las secciones sísmicas con los registros de pozos, generando una escala continua de referencia tiempo-profundidad en dirección vertical y horizontal (Sánchez, 1999).

Para construir un sismograma sintético se utiliza la ecuación del Coeficiente de Reflexión (CR), la cual se define como el cociente entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente sobre una interfase de interés (Schlumberger, 1980). Es necesario construir el sismograma sintético para poder establecer una efectiva relación entre los topes geológicos en profundidad y los reflectores sísmicos en tiempo.

La amplitud de la onda es una función de la densidad y velocidad de las formaciones geológicas inmediatamente por encima y por debajo de la interfase. Esta función se denomina Impedancia Acústica (Schlumberger, 1980) y se obtiene a partir del producto de registros de densidad y sónico, editados previamente y corregidos por los tiros de verificación sísmica, conocidos como punto de verificación o “check-shots”.

El CR se convoluciona con una ondícula, generalmente se escoge una ondícula teórica fase cero (Ricker) o una ondícula extraída de la sísmica (Figura 3.2). La información de la densidad y la velocidad de las formaciones se deben obtener de los registros de un pozo ubicado cerca o sobre la línea sísmica donde se realizará la adquisición de los datos. El resultado es una traza sísmica sintética en la dirección del pozo.

Según Sánchez (1999), uno de los problemas que tiene la elaboración de los sismogramas sintéticos es la selección de la ondícula más adecuada, de forma tal que al ser convolucionada con los coeficientes de reflexión permita obtener una respuesta similar a los datos sísmicos de cada levantamiento. Existen varios tipos de ondículas teóricas tales como Ricker, Klauder, entre otras; sin embargo, también es posible extraerlas a partir de los datos sísmicos. En ambos casos es necesario considerar la fase y la frecuencia para generar una respuesta adecuada en la correlación.

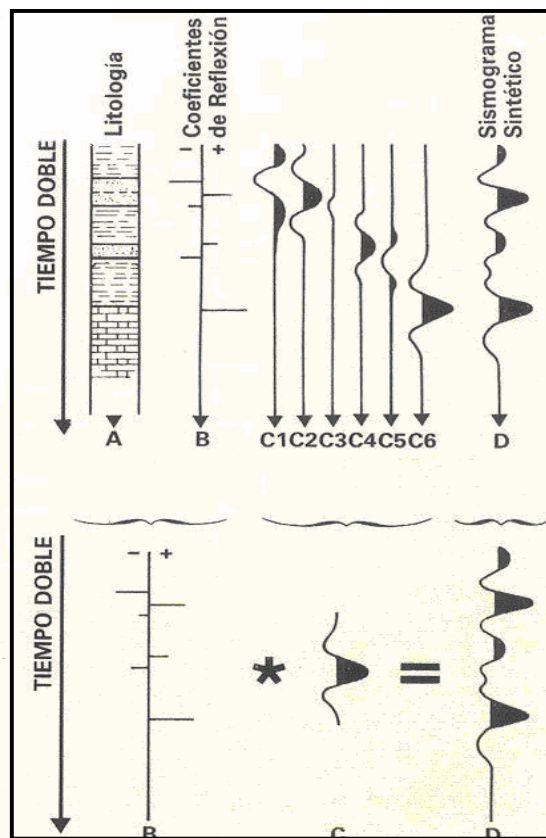


Figura 3.2. Elementos necesarios para la construcción de un sismograma sintético. El coeficiente de reflexión convolucionado con una ondícula genera una traza sintética en la dirección del pozo (Tomado de Sheriff *et al.*, 1990).

3.2.2 Interpretación Estructural de las secciones en tiempo

Según Sánchez (1999), consiste en generar una malla a partir de los valores obtenidos a nivel de los reflectores de interés, para así realizar una interpolación para la generación de los reflectores isócronos. De esta manera se procede a realizar una interpretación de la continuidad de los reflectores u horizontes y de las posibles fallas u otras estructuras presentes.

Durante la interpretación estructural se deben identificar los reflectores sísmicos de interés para el estudio utilizando herramientas manuales y evaluando la continuidad de los reflectores, para poder identificar cualquier evento estructural local y minimizar los errores por la pérdida de la resolución sísmica (Hilla y Naval, 2005).

La interpretación de fallas consiste en seguir la tendencia de los horizontes de acuerdo a información previa de la zona; sin embargo, una falla también puede verse representada en una sección sísmica por la pérdida en la continuidad lateral del reflector interpretado, representando un cambio abrupto en los valores del tiempo.

3.2.3 Conversión Tiempo Profundidad

La conversión Tiempo-Profundidad (T-Z) debe realizarse para poder transformar la información de la sección sísmica en tiempo a profundidad. Esta etapa se lleva a cabo posterior a la interpretación estructural de las secciones.

Los métodos que permiten convertir tiempo en profundidad necesitan conocer las velocidades promedio hasta el evento de interés. Existen distintos métodos para realizar dicha conversión, entre ellos se tienen los siguientes:

- Schlumberger (1980) explica que se pueden utilizar registros de pozos preferiblemente Tiros de Verificación Sísmica (TVS o “check-shots”), a partir de esta información se construye una curva T-Z, de la cual se obtiene una función

que permite generar un modelo de velocidades. Idealmente se utilizan las velocidades promedio para construir la sección sísmica en profundidad; sin embargo, esto depende de la existencia de pozos en el área en estudio y de la complejidad estructural de la misma.

- Si se tiene una buena distribución espacial de registros en pozos del área, se procede a construir un cubo de velocidades, de éste se obtienen los horizontes interpretados en tiempo con su profundidad. Este método se aplica utilizando los “check-shots”, sismogramas sintéticos disponibles y velocidades de apilamiento si muestran la misma tendencia (Sánchez, 1999).

3.3 Registros de Pozos

Los registros de pozo son utilizados en distintas etapas, bien sea, durante la evaluación a pozo abierto, la completación de pozo y/o en el estudio detallado del yacimiento y de la producción. Según Schlumberger (1980) se puede resumir el uso de los perfiles de pozos a dos aplicaciones, ellas son: 1) correlación y estudios stratigráficos y 2) evaluación de la litología y de los fluidos de la formación.

Existe una gran variedad de registros de pozo; sin embargo, para los fines de esta investigación se utilizarán los registros de densidad de diversos pozos, pues permitirán conocer las distintas litologías dentro de las estructuras en el modelado gravimétrico-estructural. Adicionalmente, con el registro sísmico y el “check shot” se calibrarán las secciones sísmicas.

- Registro de Densidad: es un registro radioactivo, también se conoce con el nombre de Gamma-Gamma. Es uno de los registros que permite obtener valores de la porosidad directamente en función de la densidad, otra de sus aplicaciones son: 1) identificación de minerales en depósitos de evaporitas, 2) identificación de gas, 3) determinación de la densidad de hidrocarburos y 4) evaluación de arenas arcillosas y litologías complejas (Schlumberger, 1972).
- Perfil Sísmico: es un registro de la profundidad contra tiempo, consiste en registrar el tiempo transcurrido por una onda compresional de sonido por un pie de formación, este tiempo también se conoce como tiempo de tránsito y depende de la litología y porosidad en la formación (Schlumberger, 1972).
- Tiros de Verificación Sísmica (TVS ó “check-shots”): tal como aparece representado en la Figura 3.3 consiste en una fuente sísmica en superficie que genera un tren de onda registrada por una herramienta de pozo con un conjunto de receptores. Para distintas profundidades de pozo se obtiene un registro sísmico en

el cual se mide el tiempo de viaje de las ondas primarias desde la fuente al receptor, generando una curva de tiempos de viaje de la onda a través del subsuelo. Una de las aplicaciones de este tipo de registros de pozo, es obtener la función de conversión tiempo a profundidad para las secciones sísmicas de reflexión y calibrar los registros sísmicos (Schlumberger, 1980).

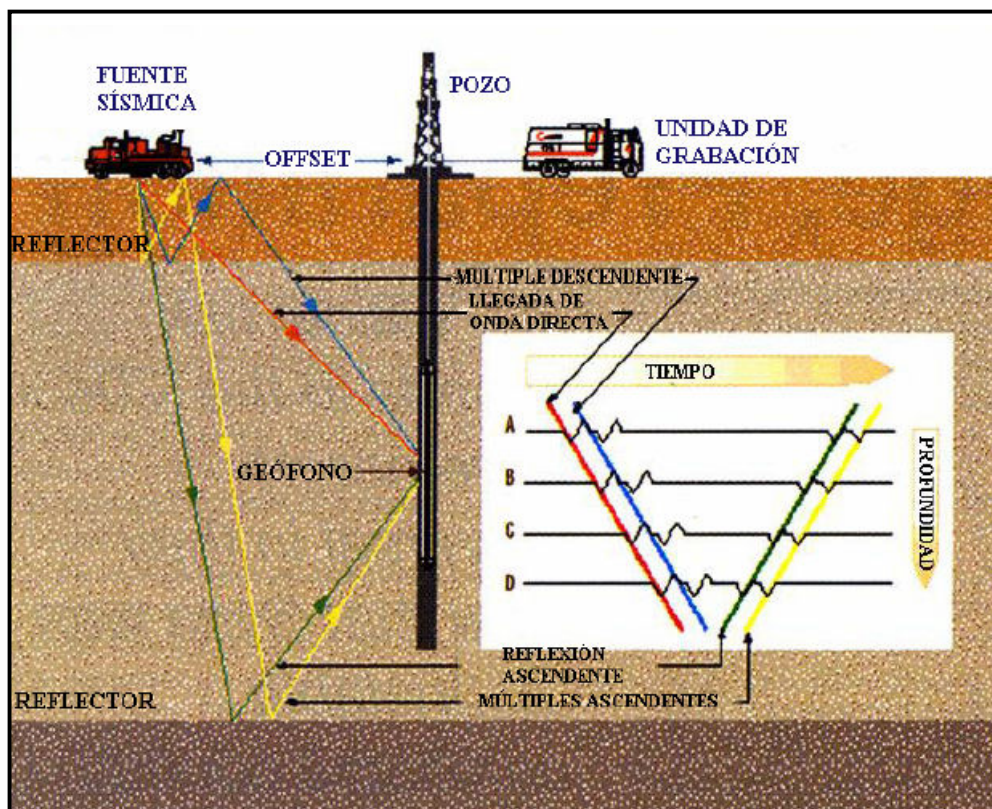


Figura 3.3. Ejemplo de las actividades de adquisición de sísmica de pozo para tiros de verificación o "Check-Shots" (Tomado y modificado de Hilla y Naval, 2005)

3.4 Análisis Geostadístico

La geoestadística durante los años 50 se utilizaba como término para referirse a aquellos métodos estadísticos que aplicaban distribuciones reales y localizaciones espaciales (Cressie, 1991). En el año 1962, George Matheron, el principal precursor en esta rama de la ciencia, utilizó la geoestadística para la caracterización de reservorios y a partir de allí comienza a influenciar en distintas disciplinas de las Ciencias de la Tierra (Chilés, 1999). Según Matheron (1971), la geoestadística es definida como “la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales” y Chilés (1999) la define como “la aplicación de métodos probabilísticos a variables regionalizadas”.

La geoestadística describe cuantitativamente la distribución de variables naturales en el espacio o en el espacio- tiempo (Chilés, 1999). Una de las aplicaciones de esta ciencia es obtener profundidad y espesores de capas geológicas, porosidad y permeabilidad en medios porosos y otros. Es importante destacar que las variables utilizadas en el análisis geostadístico son de gran complejidad de detalle que limitan la descripción a través de modelos simplificados.

La aplicación de métodos estadísticos, tal como la estadística descriptiva en la evaluación de datos geofísicos, permite obtener mayor información del comportamiento del subsuelo. Las herramientas más comunes son las medidas de tendencia central, medidas de dispersión, las distribuciones de frecuencias y las pruebas paramétricas y no-paramétricas. A continuación se definen algunos conceptos básicos de interés para esta investigación.

- Medidas de tendencia central: son un valor típico o representativo de un conjunto de datos que suele situarse hacia el centro de su distribución de probabilidad ordenados por magnitud; entre los más utilizados se tienen la media aritmética, la mediana y la moda (Spiegel y Stephens, 2002).

- Medidas de dispersión: según Spiegel y Stephens (2002) son conocidas también como medidas de variación, indican el grado en que los valores numéricos de un conjunto de datos tienden a expandirse alrededor de un valor promedio.
- Histogramas de frecuencias: son representaciones gráficas de las distribuciones de frecuencias. Consisten en un conjunto de rectángulos que tienen sus bases en el eje horizontal, sus centros son marcas de clases y longitudes del tamaño del intervalo de clase, su longitud en la vertical es proporcional a la frecuencia de clase (Spiegel y Stephens, 2002).

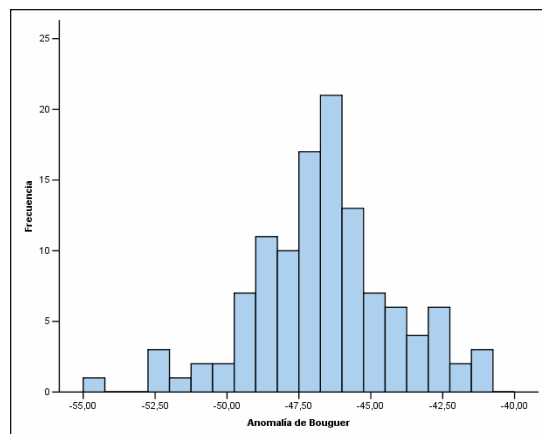


Figura 3.4. Ejemplo de un histograma de frecuencia. El eje horizontal indica el intervalo de clase y el vertical la frecuencia.

- Prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S): compara la función de distribución teórica con la observada y calcula un valor de discrepancia, que corresponde a la discrepancia máxima en valor absoluto entre la distribución observada y la distribución teórica.
- Diagrama de caja y bigotes: de acuerdo con Freund *et al.* (1992) consiste en un gráfico que muestra un rectángulo (caja), donde los lados más largos indican el recorrido intercuartílico; se encuentra dividido por un segmento vertical que

indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero. Este rectángulo se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable.

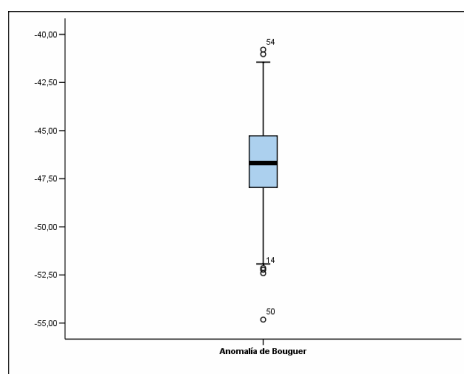


Figura 3.5. Ejemplo de un diagrama de caja y bigotes.

- Gráficos P-P y Q-Q: en el primero se confrontan las proporciones acumuladas de una variable con las de una distribución normal. Si la variable seleccionada coincide con la distribución de prueba, los puntos se concentran en torno a una línea recta. Los gráficos Q-Q se obtienen de modo análogo, esta vez representando los cuantiles de distribución de la variable estudiada respecto a los cuantiles de una distribución teórica.

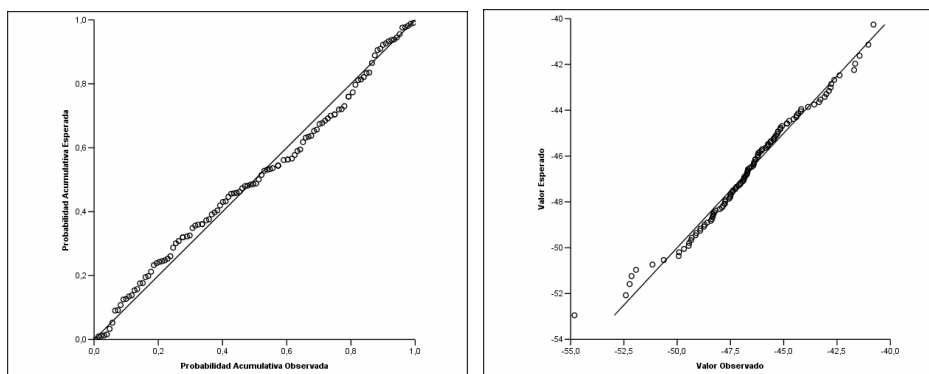


Figura 3.6. Ejemplos de los gráficos P-P y Q-Q.

CAPÍTULO 4

4.1 Procesamiento e Interpretación de Datos Geofísicos

Para desarrollar esta investigación fue necesario llevar a cabo una serie de actividades las cuales fueron agrupadas en tres etapas de acuerdo al conjunto de datos que se procesaron e interpretaron, a saber: procesamiento y validación estadística de datos de gravedad, interpretación sísmica estructural y análisis de registros de pozo. En este capítulo se describe detalladamente cada una de ellas puntualizando la secuencia metodológica que permitió obtener los modelos gravimétrico-estructurales.

En este proyecto de investigación se integró información proveniente de levantamientos gravimétricos realizados durante los años 2005 y 2006, seis líneas sísmicas 2D y quince registros de pozos. Los datos de gravedad fueron evaluados y validados con el uso de herramientas estadísticas. Posteriormente se generó un mapa de Anomalía de Bouguer y a partir de su interpretación cualitativa se seleccionaron dos transectos regionales. La interpretación estructural de las secciones sísmicas 2D paralelas a la dirección de los transectos, permitió controlar la geometría y profundidad de los cuerpos de roca. Los registros de pozo, previamente analizados con herramientas estadísticas, permitieron calibrar las secciones sísmicas y estimar las densidades de las formaciones geológicas en estudio. Finalmente, se obtuvo un modelo gravimétrico-estructural para cada transecto, restringido por toda la información geológico-geofísica que se disponía para la zona. Las ideas antes expuestas se presentan en la Figura 4.1.

Con base en una constante revisión de la literatura especializada se logró obtener información referente a la geología estructural y estratigrafía de la zona en estudio, así como también organizar la información disponible para el desarrollo la investigación.

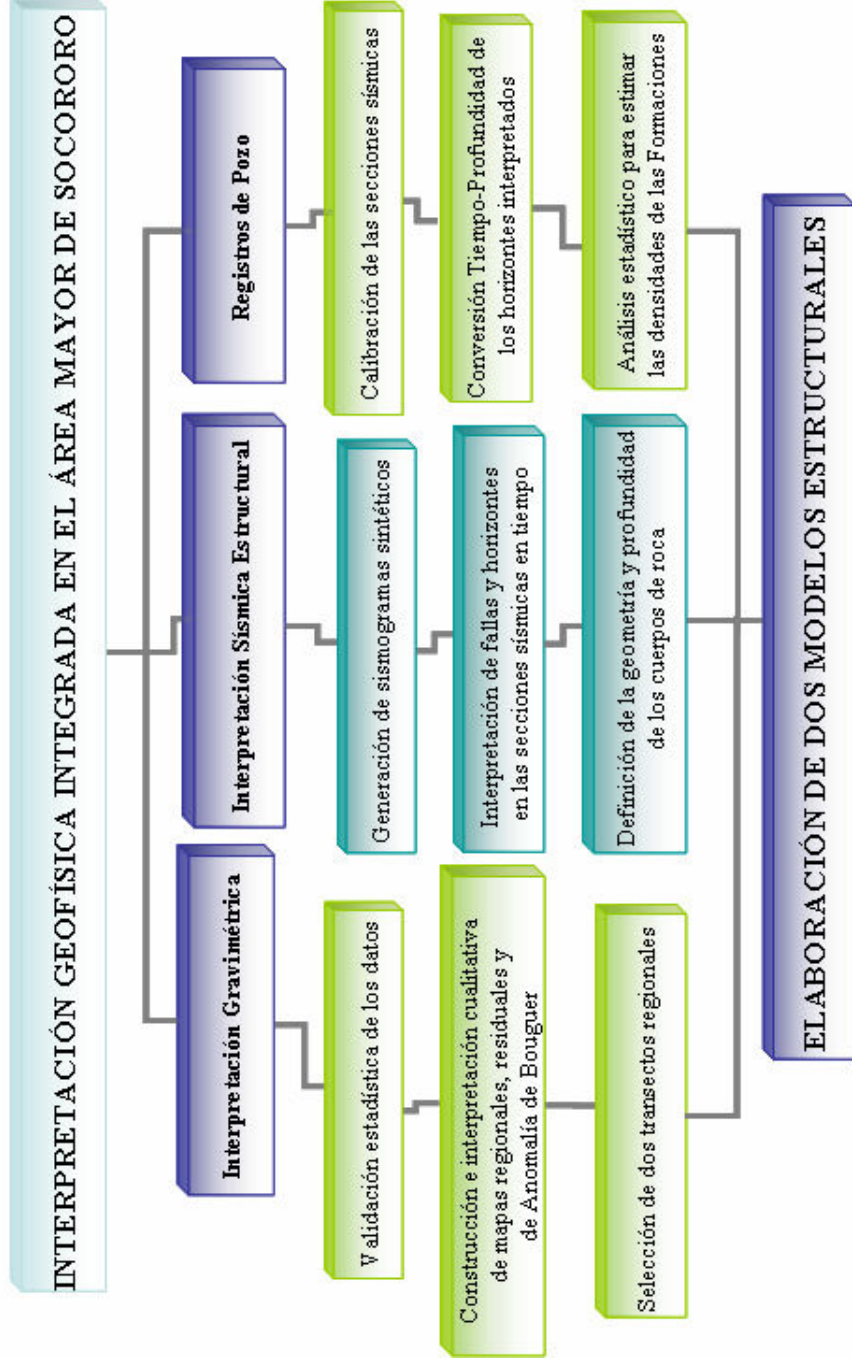


Figura 4.1. Organigrama de la secuencia metodológica empleada en cada una de las etapas de la investigación.

4.2 Procesamiento Gravimétrico

Durante las campañas de adquisición de datos gravimétricos realizadas en los años 2005 y 2006, bajo el marco de las actividades académicas de Geofísica de Campo del Departamento de Geofísica, se adquirió un total de 543 estaciones gravimétricas (Apéndice 1). Los levantamientos gravimétricos se llevaron a cabo a través de circuitos que utilizaron cuatro puntos de control de cota y gravedad (“Bench Mark”, BM) existentes en la zona en estudio, a saber: ANZ-379 al oeste, YOP-01 ubicado en la vía Pariaguán-Las Matas, ANZ-378 al sur en la vía Las Camazas, en el Campo Cachicamo y ANZ-388 al norte, en el Campo Caricari (Figura 4.2).

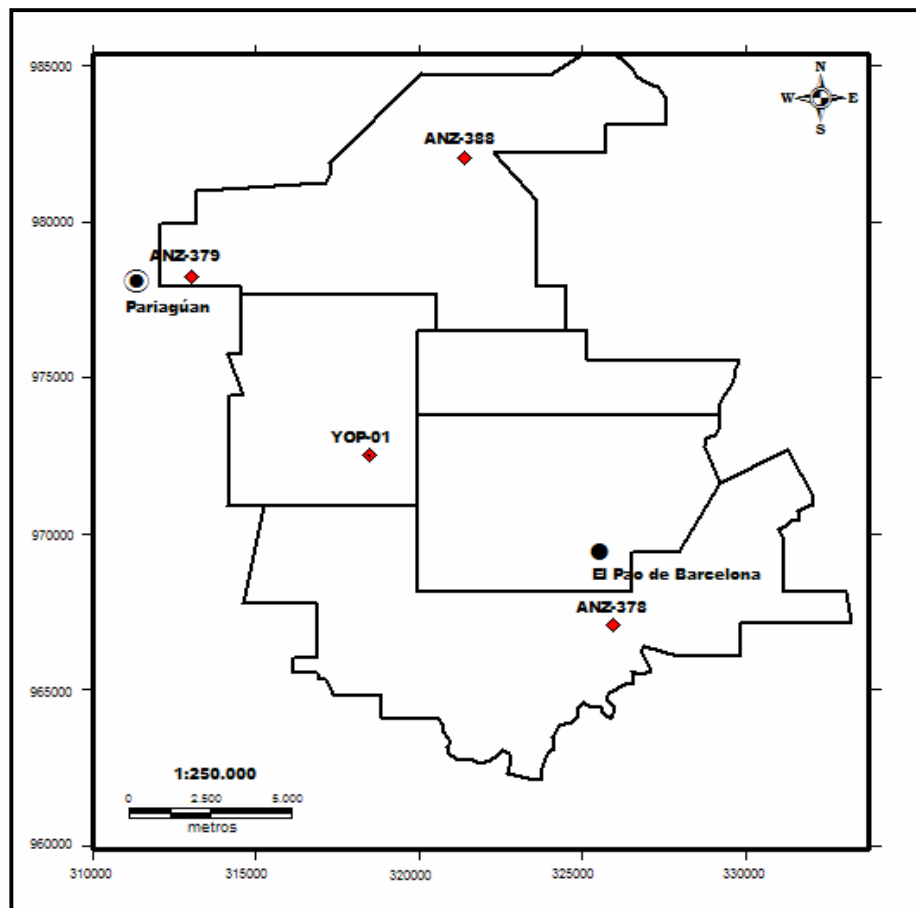


Figura 4.2. Ubicación de las estaciones bases utilizadas para los levantamientos gravimétricos. Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

La Tabla 2 resume los datos de la ubicación geográfica de las estaciones bases utilizadas, así como los valores de la gravedad absoluta de estos puntos. En la Figura 4.3 se presenta la distribución del total de estaciones adquiridas.

Tabla 2. Estaciones bases utilizadas. Datum Geodésico: La Canoa; Elipsoide: PSAD56.

Estación	Latitud	Longitud	Cota (m)	Gravedad Absoluta (mGal)
YOP-01	N 8°47'27"	W 64°39'09"	229,38	978078,463
ANZ-378	N 8°46'22"	W 64°34'48"	227,74	978073,700
ANZ-388	N 8°52'38"	W 64°37'35"	260,01	978051,900
ANZ-379	N 8°50'26"	W 64°42'09"	255,13	978078,362

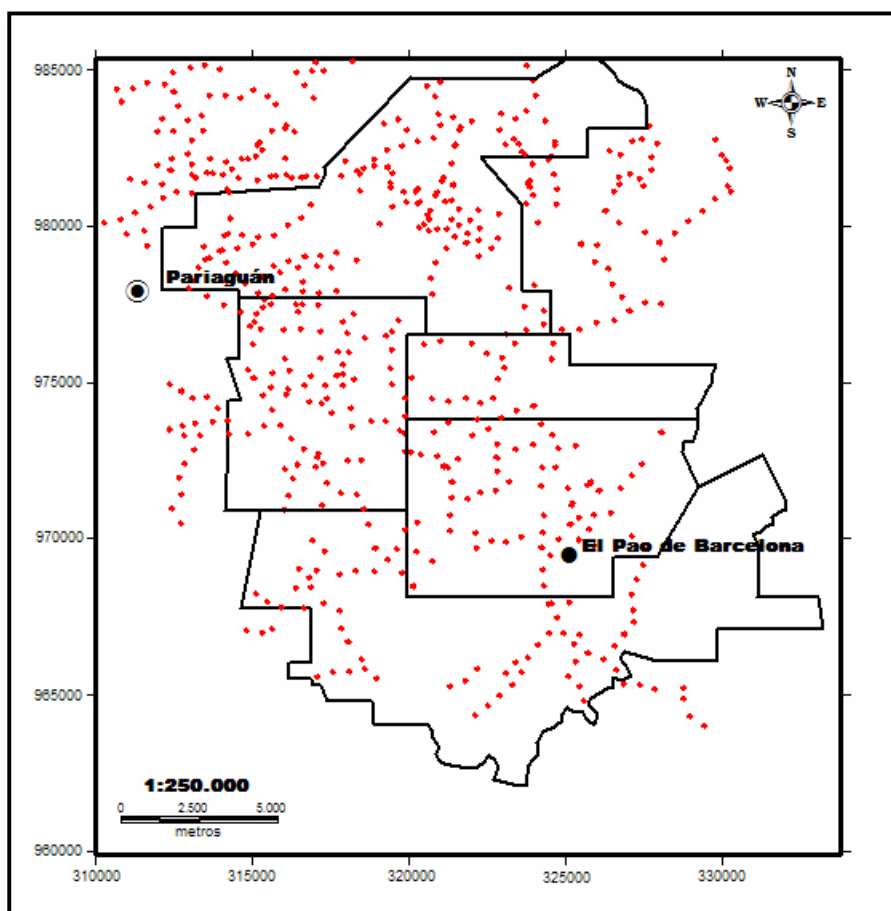


Figura 4.3. Distribución de las estaciones gravimétricas adquiridas en las campañas de Geofísica de Campo años 2005 y 2006. Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

La secuencia de procesamiento de los datos gravimétricos se presenta en la Figura 4.4, la cual está basada en el Sistema de Procesamiento e Interpretación de Datos Gravimétricos (SPIDGRAV). Es importante mencionar que para realizar la corrección topográfica fue necesario digitalizar un mapa topográfico de la zona a través de bloques con diferentes intervalos de digitalización de acuerdo a la distribución de las estaciones. El valor de la densidad utilizada para el cálculo final de la Anomalía de Bouguer fue 2.35 gr/cm^3 .

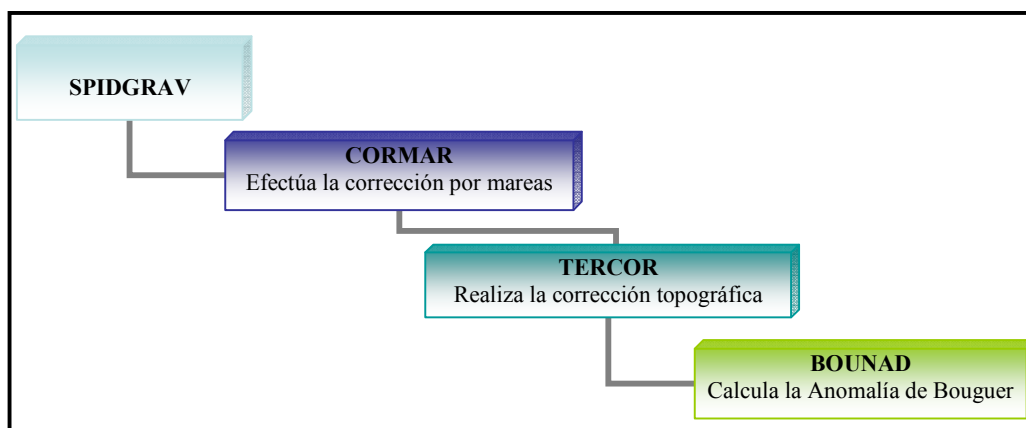


Figura 4.4. Organigrama de la secuencia de procesamiento del SPIDGRAV utilizada para la obtención de la Anomalía de Bouguer.

4.2.1 Validación Estadística de los Datos Gravimétricos

Para la validación de los datos de gravedad se realizó un análisis estadístico haciendo uso de histogramas de frecuencia, diagramas de caja y bigotes, pruebas paramétricas P-P y Q-Q, prueba Kolmogorov-Smirnov y medidas de tendencia central y de dispersión con la ayuda del programa **SPSS® Versión 13.0**.

De los resultados obtenidos a partir del análisis del histograma de frecuencia (Figura 4.5) es posible observar que los datos de Anomalía de Bouguer para una muestra de 543 estaciones gravimétricas está conformada por dos subpoblaciones que le confieren un comportamiento bimodal.

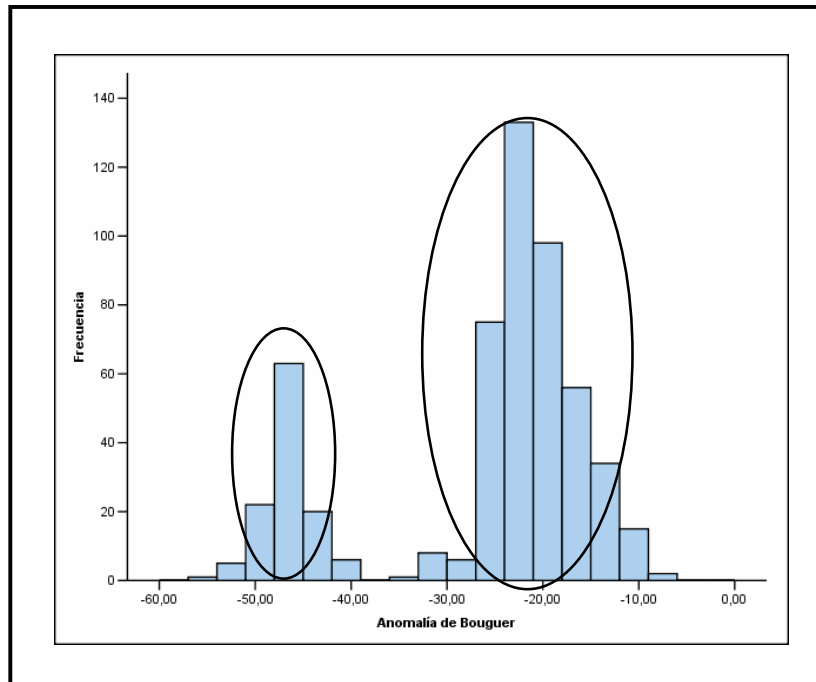


Figura 4.5. Histograma de frecuencia del total de datos de gravedad. Nótese la existencia de dos subpoblaciones claramente diferenciadas.

En la Figura 4.5 es posible apreciar que la subpoblación de menor rango está comprendida aproximadamente entre -55 mGal y -40 mGal y la de mayor rango se encuentra entre -35 mGal y -10 mGal. De acuerdo con las ideas antes expuestas fue necesario realizar un diagrama de caja y bigotes con la finalidad de evaluar la forma en la que se distribuyen los datos en dos las subpoblaciones.

La Figura 4.6 muestra los resultados del diagrama de caja y bigotes. En primer lugar es posible observar que existen valores que se separan del cuerpo principal de datos, están representados con círculos y estrellas de acuerdo a cuan dispersos estén y el número adyacente a cada símbolo es el nombre de la estación a la cual pertenece el valor. Este conjunto de valores atípicos de la variable excede los límites de prolongación de los bigotes y sus magnitudes corresponden con la subpoblación de menor rango identificada en la Figura 4.5, debido a que el diagrama se genera en torno a la moda de mayor magnitud.

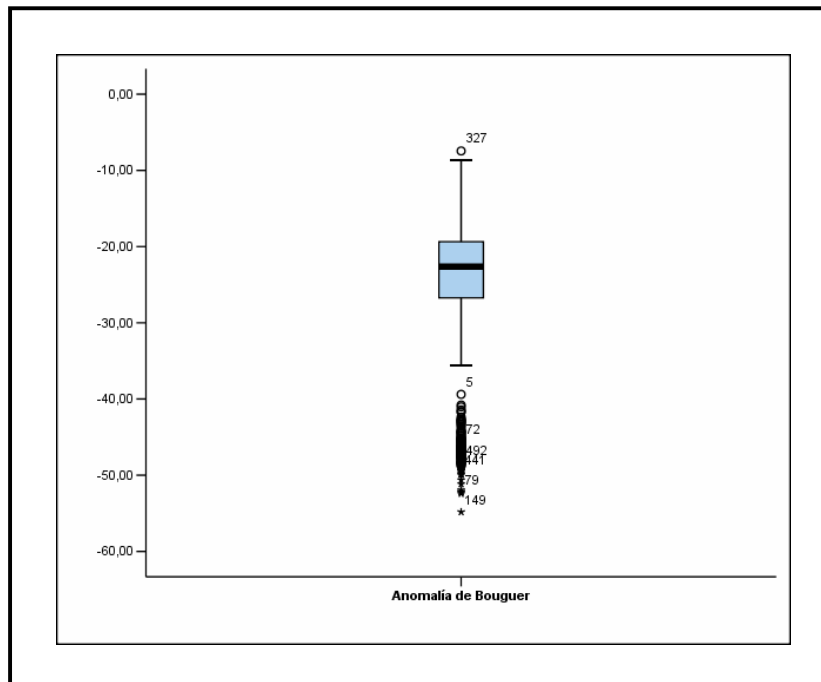


Figura 4.6. Diagrama de caja y bigotes para el total de datos de gravedad.

La línea gruesa de color negro que atraviesa la caja (Figura 4.6) es la mediana, paralela al eje vertical se encuentran dos líneas más delgadas, éstos son los bigotes. El bigote inferior se extiende desde el valor mínimo hasta el primer cuartil y el bigote superior se inicia en el tercer cuartil hasta el valor máximo. El primer cuartil corresponde al 25% de los valores de la distribución, el segundo cuartil o percentil 50 es la mediana y el tercer cuartil es el valor igual al 75% de los valores.

En la Tabla 3 se encuentran registrados los valores de las medidas de tendencia central y dispersión para el total de datos de gravedad, así como también los percentiles, valor máximo y mínimo que permitieron construir el diagrama de caja y bigotes explicado anteriormente.

Tabla 3. Medidas de tendencia central y dispersión del total de datos de Anomalía de Bouguer. La muestra corresponde a la población de datos de gravedad con un total de 543 estaciones.

Estadístico		Anomalía de Bouguer (mGal)
Media		-26,2299028
Mediana		-22,65
Moda(menor)		-46,33
Moda(mayor)		-20,47
Desviación Estándar		11,3793612
Varianza		129,489862
Mínimo		-54,82
Máximo		-7,45
Percentiles	25	-26,74
	50	-22,65
	75	-19,325
Kolmogorov-Smirnov		5,58660162

Para definir la forma de la distribución de los datos debe considerarse la ubicación de la mediana, en vista de que ésta divide a la caja en dos partes. En la Figura 4.6 es posible observar que la parte inferior de la caja es de mayor longitud que la superior, esto indica que la mediana está más cerca del tercer cuartil lo que permite afirmar que la distribución es negativamente asimétrica y que el colectivo de datos menores a la mediana está más disperso. Adicionalmente, es notorio que la longitud del bigote inferior es menor que la del superior, lo que permite interpretar que los datos entre el mínimo valor y primer cuartil están más concentrados que entre el tercer cuartil y el valor máximo.

En la última fila de la Tabla 3 se encuentra el resultado de la prueba Kolmogorov-Smirnov. Ésta es una prueba no paramétrica que evalúa la normalidad de la distribución de un conjunto de datos. Mientras más cercano a cero sea el valor obtenido mayor comportamiento normal muestra una población.

El resultado obtenido concuerda con la existencia de las dos subpoblaciones de datos identificadas en el histograma de frecuencias y en el diagrama de cajas y bigotes (Figuras 4.5 y 4.6), es decir, el ajuste del total de datos no muestra normalidad en la distribución de los mismos. En vista de estos resultados se decidió realizar las pruebas paramétricas P-P y Q-Q para evaluar gráficamente dicho comportamiento (Figuras 4.7 y 4.8).

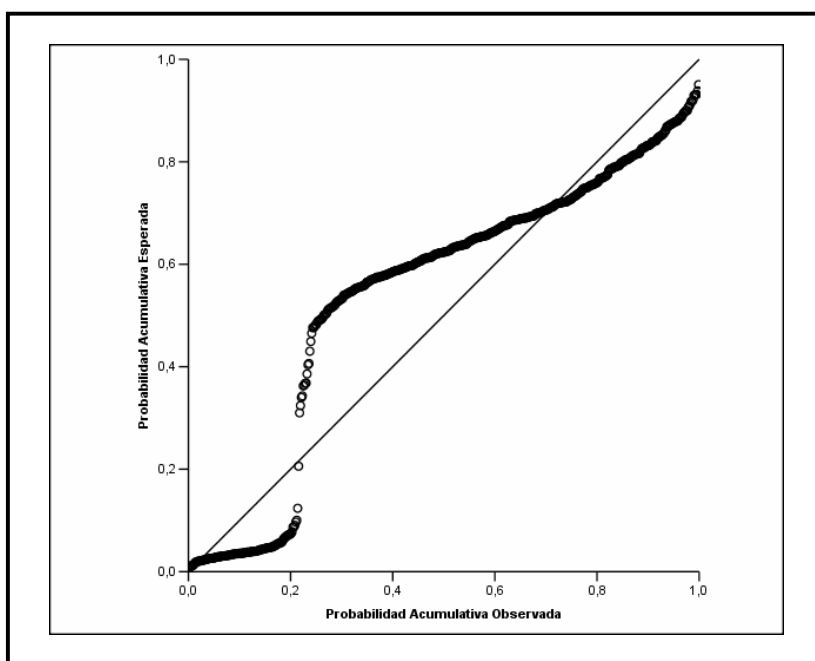


Figura 4.7. Prueba paramétrica P-P para el total de datos de gravedad.

En la prueba paramétrica P-P se representa en el eje horizontal la función de distribución o probabilidad acumulada observada para cada valor del total de datos y en el eje vertical la establecida por el modelo de distribución normal (Figura 4.7). Por su parte la Figura 4.8 muestra el diagrama Q-Q en el que se representan los cuantiles de distribución de la variable respecto a los cuantiles de la distribución normal.

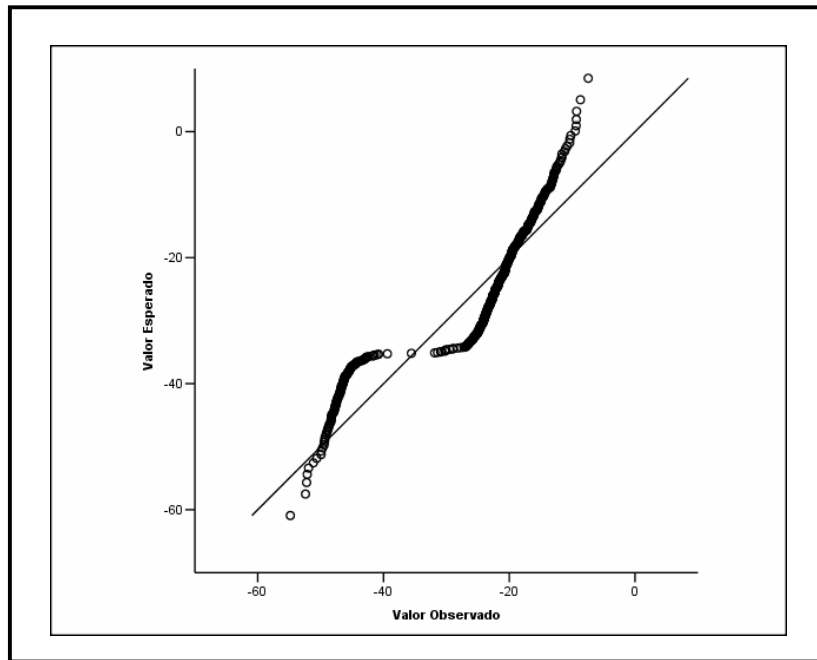


Figura 4.8. Prueba paramétrica Q-Q para el total de datos de gravedad.

Si la población del total de datos tuviese un comportamiento normal, en ambos diagramas los puntos deberían distribuirse aproximadamente sobre la recta de 45°; sin embargo, se observa que existe cierta discrepancia y que los datos se agrupan bajo dos tendencias que buscan ajustarse individualmente. El resultado era el esperado en vista de que el histograma de frecuencia y el diagrama de caja y bigotes revelaron previamente la existencia de dos subpoblaciones.

De acuerdo con las ideas antes expuestas se decidió analizar cada subpoblación por separado con la finalidad de verificar la normalidad de las distribuciones de los datos en cada una. Se realizaron pruebas Kolmogorov-Smirnov con el fin de seleccionar un valor de Anomalía de Bouguer que permitiese subdividir la población total en las dos subpoblaciones observadas en el histograma de frecuencia (Figura 4.5), los valores más cercanos a cero se obtuvieron cuando se utilizó -40 mGal como valor divisorio.

A continuación se presentan las tablas con los valores de las medidas de tendencia central y dispersión así como también los percentiles, valor máximo y mínimo que resultaron del análisis estadístico realizado a cada subpoblación de datos. La primera contiene los resultados del conjunto de datos menores a -40 mGal (Tabla 4) que constituyen la subpoblación de menor rango de la Anomalía de Bouguer y la segunda es la subpoblación de mayor rango caracterizada por los valores mayores a -40 mGal (Tabla 5).

Al igual que en el análisis del total de datos de Anomalía de Bouguer en la última fila de ambas tablas se encuentran los valores de la prueba no paramétrica Kolmogorov-Smirnov, de acuerdo con estos resultados es posible afirmar que la subpoblación de menor rango se ajusta más a un comportamiento normal en comparación con la subpoblación de mayor rango.

Tabla 4. Medidas de tendencia central y dispersión de la subpoblación de valores menores a -40 mGal. La muestra corresponde a 115 estaciones gravimétricas y pertenece a la subpoblación de menor rango en la Anomalía de Bouguer.

Estadístico		Anomalía de Bouguer (mGal)
Media		-46,60474138
Mediana		-46,685
Moda		-46,33
Desviación Estándar		2,487357411
Varianza		6,186946889
Mínimo		-54,82
Máxima		-40,79
Percentiles	25	-47,975
	50	-46,685
	75	-45,27
Kolmogorov-Smirnov		0,594360144

Tabla 5. Medidas de tendencia central y dispersión de la subpoblación de valores mayores a -40 mGal. La muestra corresponde a 428 estaciones gravimétricas y pertenece a la subpoblación de mayor rango en la Anomalía de Bouguer.

Estadístico		Anomalía de Bouguer (mGal)
Media		-20,7206224
Mediana		-21,26
Moda		-24,38
Desviación Estándar		4,47066118
Varianza		19,9868114
Mínimo		-39,39
Máximo		-7,45
Percentiles	25	-23,695
	50	-21,26
	75	-18,035
Kolmogorov-Smirnov		1,37736799

Las Figuras 4.9a, 4.9b, 4.9c y 4.9d muestran los resultados del histograma de frecuencia, diagrama de caja y bigotes y los resultados de las pruebas paramétricas P-P y Q-Q respectivamente para la subpoblación de menor rango, es decir, el conjunto de datos menores a -40 mGal. De igual forma las Figuras 4.10a, 4.10b, 4.10c y 4.10d presenta los resultados de los valores mayores a -40 mGal (subpoblación de mayor rango)

En ambos histogramas (Figuras 4.9a y 4.10a) es posible observar un comportamiento unimodal. Los diagramas de caja y bigotes (Figuras 4.9b y 4.10b) muestran nuevamente valores que se separan del cuerpo principal de datos. De acuerdo con la ubicación de las medianas es posible afirmar que la distribución de la subpoblación de menor rango es simétrica mientras que la de mayor rango es positivamente asimétrica. En los diagramas P-P y Q-Q (Figuras 4.9c y 4.10c; 4.9d y 4.10d) se observa el ajuste de las subpoblaciones a una distribución normal, a diferencia de los diagramas obtenidos para el total de datos de gravedad es notorio el arreglo de los puntos sobre las rectas de 45°.

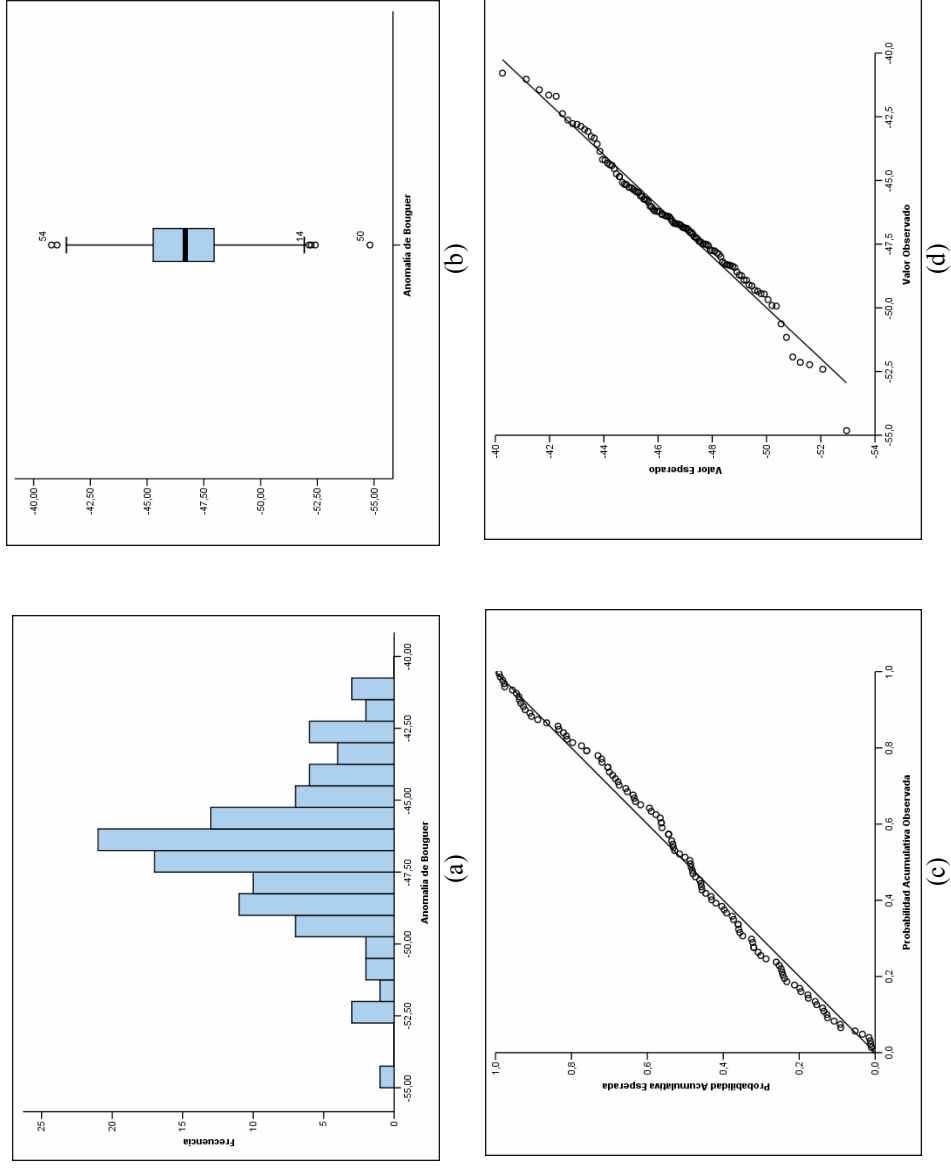


Figura 4.9. Evaluación estadística de la subpoblación menor a -40 mGal. a) Histograma de Frecuencias. b) Diagrama de caja y bigotes. c) Prueba paramétrica P-P. d) Prueba paramétrica Q-Q.

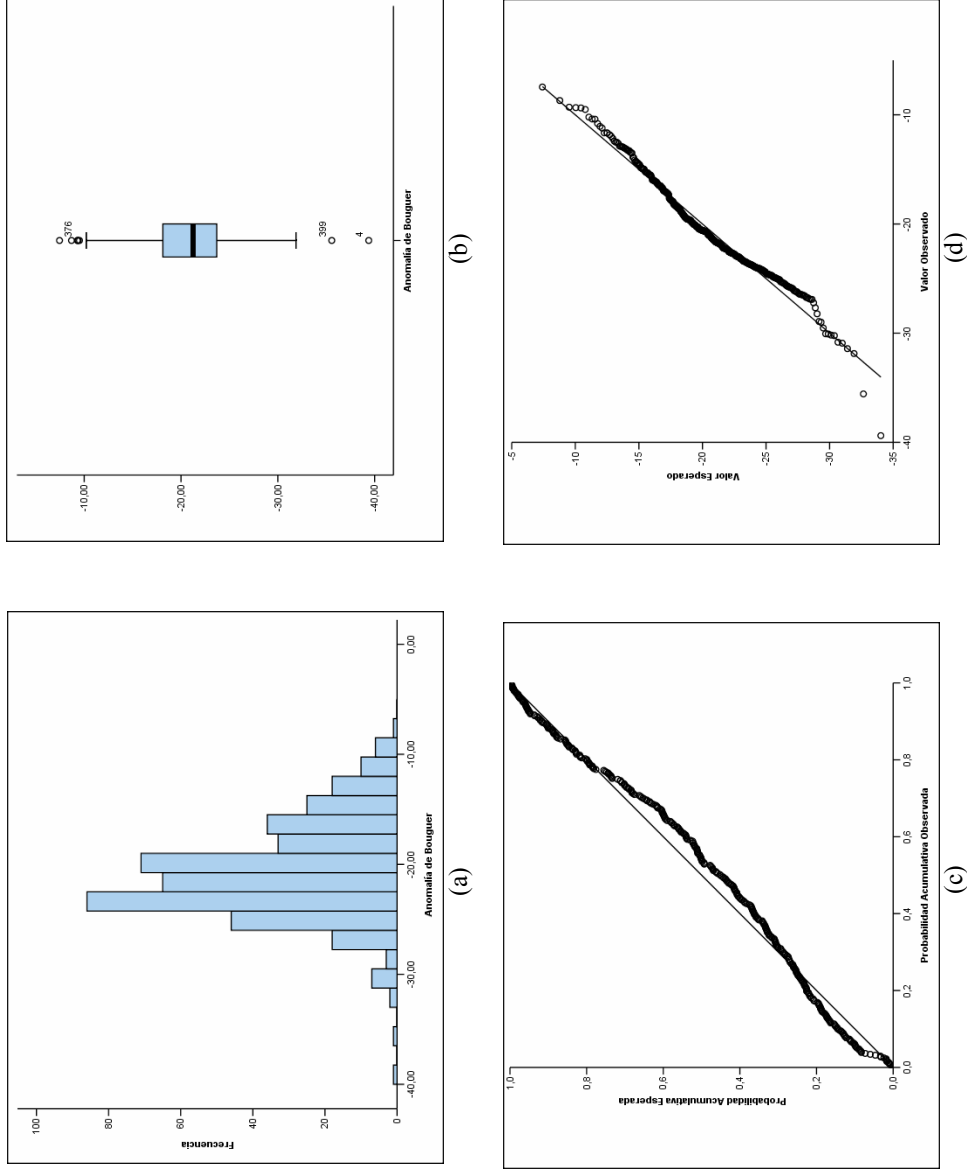


Figura 4.10. Evaluación estadística de la subpoblación mayor a -40 mGal. a) Histograma de Frecuencias. b) Diagrama de caja y bigotes. c) Prueba paramétrica P-P. d) Prueba paramétrica Q-Q.

Finalmente, se construyó el mapa de Anomalía de Bouguer que será debidamente presentado y analizado en el capítulo siguiente. Para construir el mapa regional y su respectivo mapa de residuos se realizó el proceso de separación de la tendencia regional del efecto residual. Se utilizó la técnica del análisis de superficies de tendencia polinómica, la cual permite adaptar superficies matemáticas a las distribuciones de valores observados de Anomalía de Bouguer.

Con el fin de seleccionar la superficie que mejor se ajusta a la tendencia regional de la zona, se calculó la bondad de ajuste de cada una de las superficies en función del grado del polinomio utilizado, obteniendo como resultado que el polinomio de grado 2 es el que mejor modela la distribución de la Anomalía de Bouguer de la zona con una bondad de ajuste de 85,574%. La Figura 4.11 muestra el ajuste obtenido para cada grado de polinomio utilizado, en ella se puede reconocer que la primera inflexión en la curva corresponde al polinomio de grado 2.

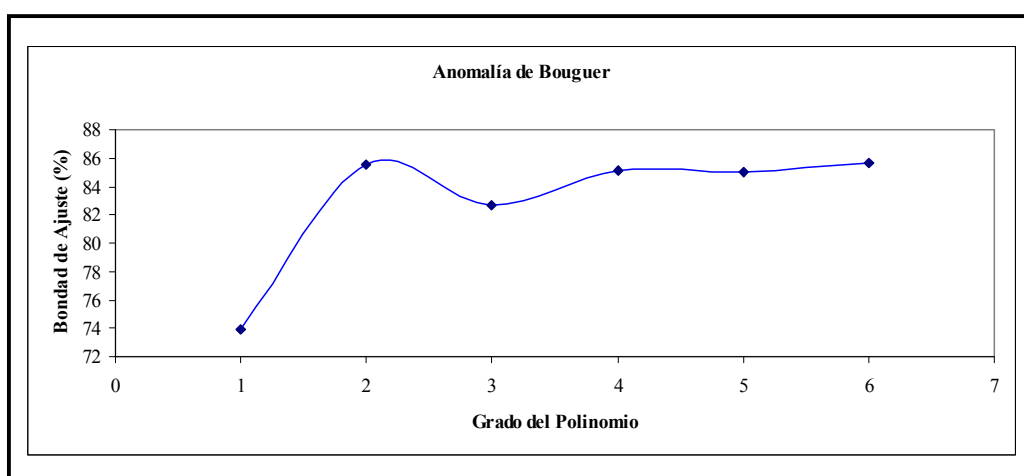


Figura 4.11. Bondad de ajuste para cada grado de polinomio utilizado.

De acuerdo con los resultados obtenidos se construyeron el mapa de Anomalía de Bouguer (Figura 5.1), el mapa regional y su respectivo mapa de residuos (Figura 5.2a y 5.2b). Una vez finalizada la interpretación cualitativa de los mismos se procedió a seleccionar las direcciones de los transectos bajo los cuales se realizaron los modelos gravimétrico-estructurales (Figura 5.7).

4.3 Interpretación Sísmica Estructural

En el inicio de esta etapa se realizó un inventario de las líneas sísmicas 2D disponibles en el Laboratorio de Interpretación del Subsuelo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería. De acuerdo con el inventario resultó necesario cargar nuevamente todas las líneas 2D en la plataforma Geoframe®.

La información sísmica se organizó de acuerdo con los diversos levantamientos que se han llevado a cabo, a saber: SOCORORO_77D, SO_77D_1, LS-80A-1, GR-99-SOC_75_77, GO_YOPALES_75A, CARICARI-75A, CACHAMA_TASC_91A, BUDARE_78_2D y BUDARE_2D_1996 para un total de 115 líneas sísmicas (Apéndice 2).

Las líneas sísmicas 2D útiles para esta investigación se listan en la Tabla 6 y fueron seleccionadas con base en la interpretación cualitativa del mapa de Anomalía de Bouguer, para ello se verificó su ubicación respecto a la dirección de los transectos seleccionados en la etapa de procesamiento e interpretación de los datos de gravedad. La Figura 4.12 muestra la ubicación de las líneas sísmicas 2D utilizadas.

Tabla 6. Líneas sísmicas 2D utilizadas para la interpretación sísmica estructural.

Levantamiento Sísmico	Línea Sísmica 2D
BUDARE_2D_1996	BUD-96-A13
	BUD-96-A17
GR-99-SOC_75_77	S-75A-04
	S-77D-04DV
	S-77D-12DV
LS-80A-1	LS-DV-5

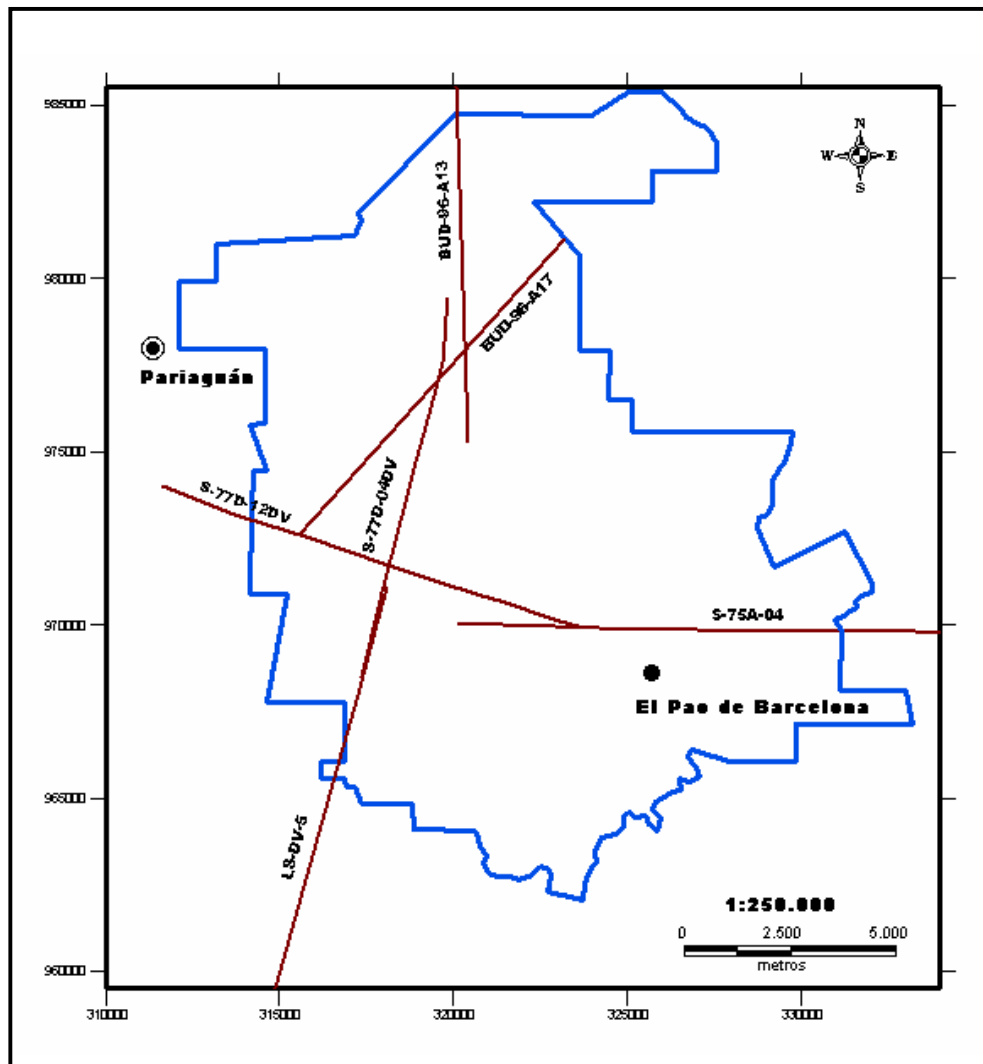


Figura 4.12. Ubicación de las líneas sísmicas 2D utilizadas para la interpretación sísmica estructural.
 Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

Una vez seleccionadas las líneas sísmicas 2D se procedió con la calibración de las mismas a través de la construcción de sismogramas sintéticos mediante el uso de la aplicación Synthetics® de la plataforma Geoframe®. La finalidad de elaborar los sismogramas fue obtener una traza sísmica sintética que permitiera correlacionar los reflectores sísmicos en tiempo con la información geológica en profundidad. Para generar la traza sintética se utiliza una serie de reflectividad o de coeficientes de

reflexión y una ondícula seleccionada bajo el criterio del especialista que realiza el estudio.

La serie de reflectividad fue generada a partir de los registros de densidad (RHOB) y sónico (DT) del pozo ES-451, utilizando coeficientes de reflexión de tipo primario. Se seleccionaron dos tipos de ondícula: una extraída a partir del análisis de la frecuencia dominante de la línea sísmica S-75A-04 y otra teórica tipo Ricker, ambas fase cero y de 28 Hz de frecuencia de acuerdo con los resultados de la ventana de estudio (Figura 4.13).

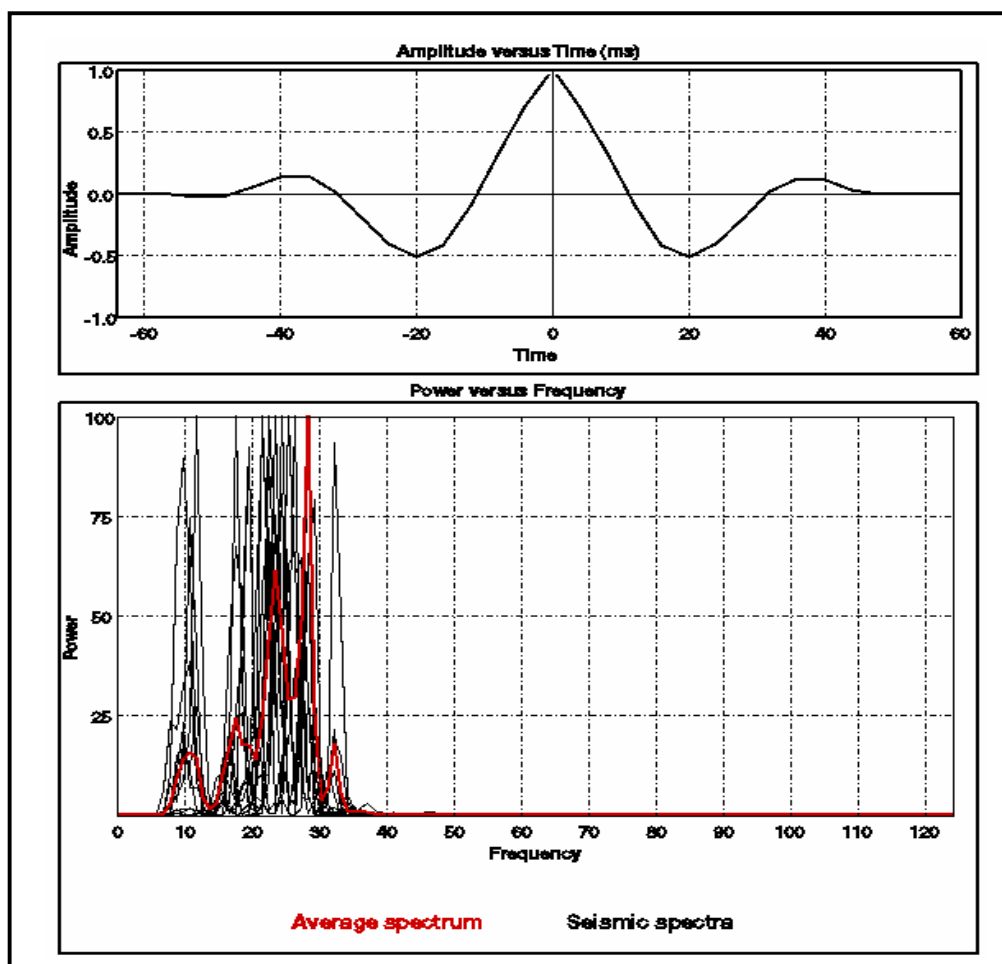


Figura 4.13. Resultado del análisis de frecuencia de la línea sísmica S-75A-04 para el pozo ES-451. Nótese que en el espectro de amplitud la frecuencia dominante es 28 Hz. La imagen superior muestra la ondícula extraída.

Los marcadores geológicos seleccionados para realizar el cálculo de la resolución vertical y la calibración sísmica fueron las arenas F8 y N2 de la Formación Oficina. Estas arenas, entre otras, fueron estudiadas por Hilla y Naval (2005) y debido a su contenido de gas constituyen reflectores fácilmente identificables en la sísmica.

Para obtener la profundidad del tope de las arenas y su velocidad interválica se utilizó la aplicación Synthetics®. Su espesor fue calculado a partir del registro Gamma Ray del pozo ES-451.

La Tabla 7 presenta los resultados del cálculo de la resolución vertical, la frecuencia utilizada fue la obtenida en el análisis de la frecuencia dominante de la línea sísmica S-75A-04, mostrados previamente en la Figura 4.13.

Tabla 7. Cálculo de la resolución sísmica vertical para las arenas gasíferas F8 y N2.

Arena	Espesor (pies)	Frecuencia Dominante (Hz)	Velocidad Interválica (pies/s)	Resolución Vertical (pies)
F8	73	28	8077,963	72,12
N2	89	28	8663,665	77,35

La Figura 4.14 muestra el sismograma sintético final seleccionado, en éste se utilizó la ondícula teórica tipo Ricker fase cero y de 28 Hz de frecuencia, en vista de que el coeficiente de correlación calculado por la aplicación era mayor que en los resultados obtenidos cuando se utilizó la ondícula fase cero de 28 Hz extraída de los datos sísmicos.

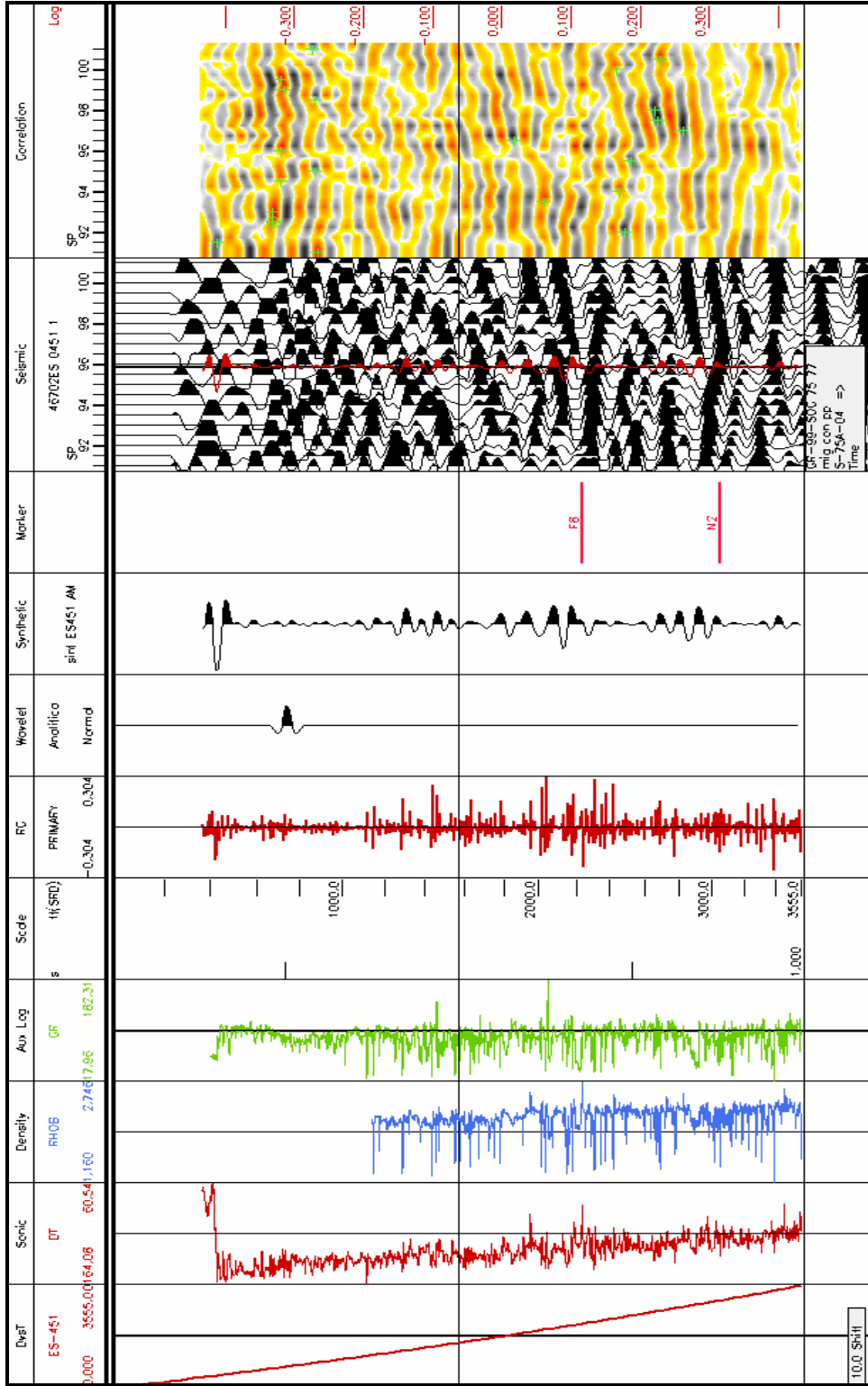


Figura 4.14. Sismograma sintético del pozo ES-451. De izquierda a derecha se muestra la curva T-Z, el registro sísmico, registro de densidad y Gamma Ray, la escala en profundidad en pies, serie de reflectividad y la ondícula utilizada, el sismograma sintético obtenido, la ubicación de los marcadores geológicos, la ventana en tiempo de la línea sísmica S-75A-04 y sobre ella en color rojo la traza del sismograma y finalmente la correlación con su escala respectiva.

En la Figura 4.15 es posible visualizar la traza sintética obtenida para el pozo ES-451 en una ventana en tiempo de la línea sísmica S-75A-04. Para realizar este despliegue fue necesario cargar el resultado en los registros del pozo. En color rojo se pueden observar los horizontes interpretados correspondientes a los topes de las arenas gasíferas F8 y N2 utilizadas para la calibración.

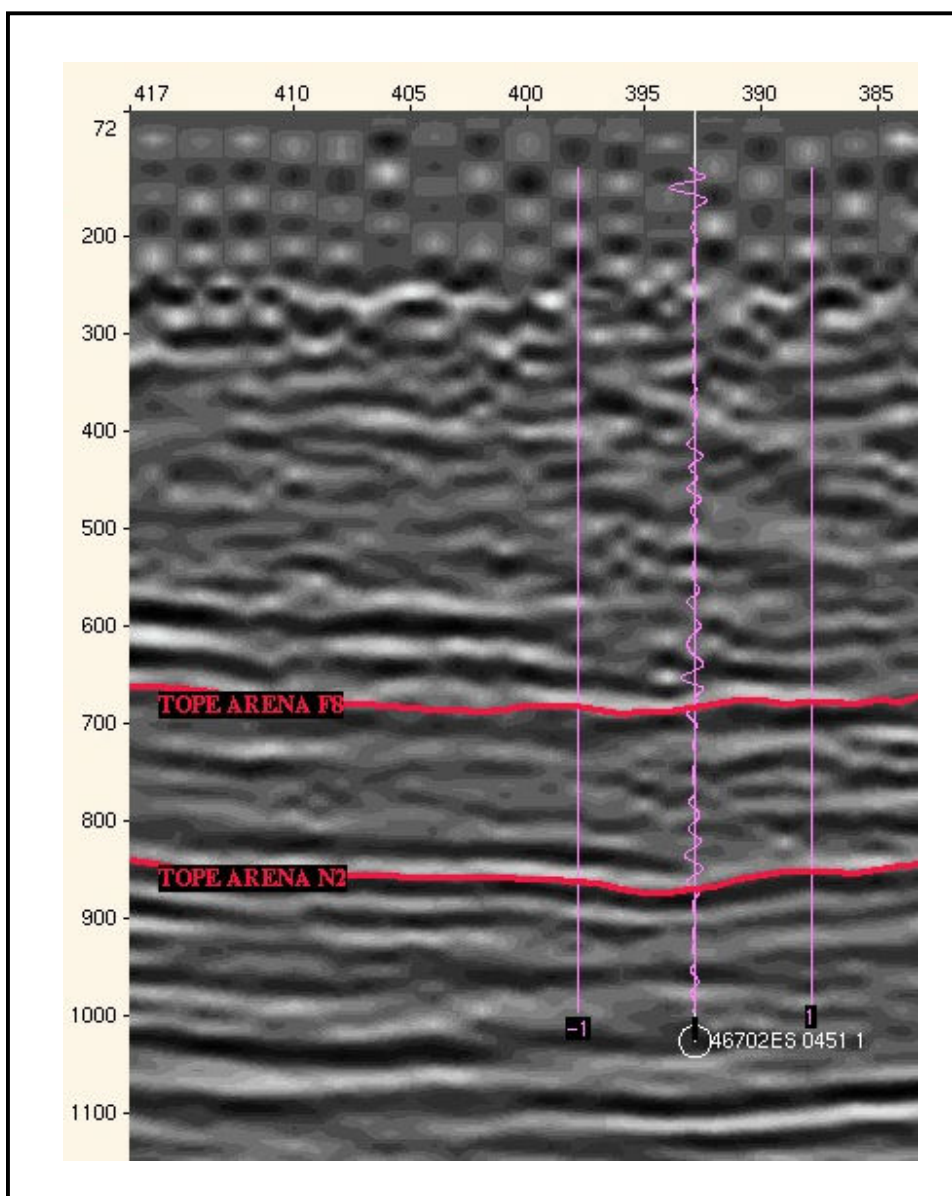


Figura 4.15. Despliegue del sismograma sintético obtenido sobre la línea sísmica S-75A-04.

Para identificar los reflectores de interés en las secciones sísmicas se ubicaron los marcadores geológicos de los pozos ES-428 y ES-451 y se interpretaron los horizontes de interés en las líneas BUD-96-A17 y S-75A-04, respectivamente. Los pozos anteriormente mencionados permitieron identificar el tope de la Formación Oficina, caracterizado por la arena A0, asimismo el pozo ES-428 fue utilizado para ubicar los marcadores geológicos de las formaciones Freites, Merecure y Grupo Temblador (tope del Cretácico).

Partiendo de esta información se realizó finalmente el amarre con las líneas 2D restantes, verificando en cada caso la correspondencia entre el reflector u horizonte con el marcador geológico inicial a través de la aplicación GeoViz®, la cual facilitó la visualización en 3D de la continuidad de los reflectores entre las líneas sísmicas (Figuras 4.16 y 4.17).

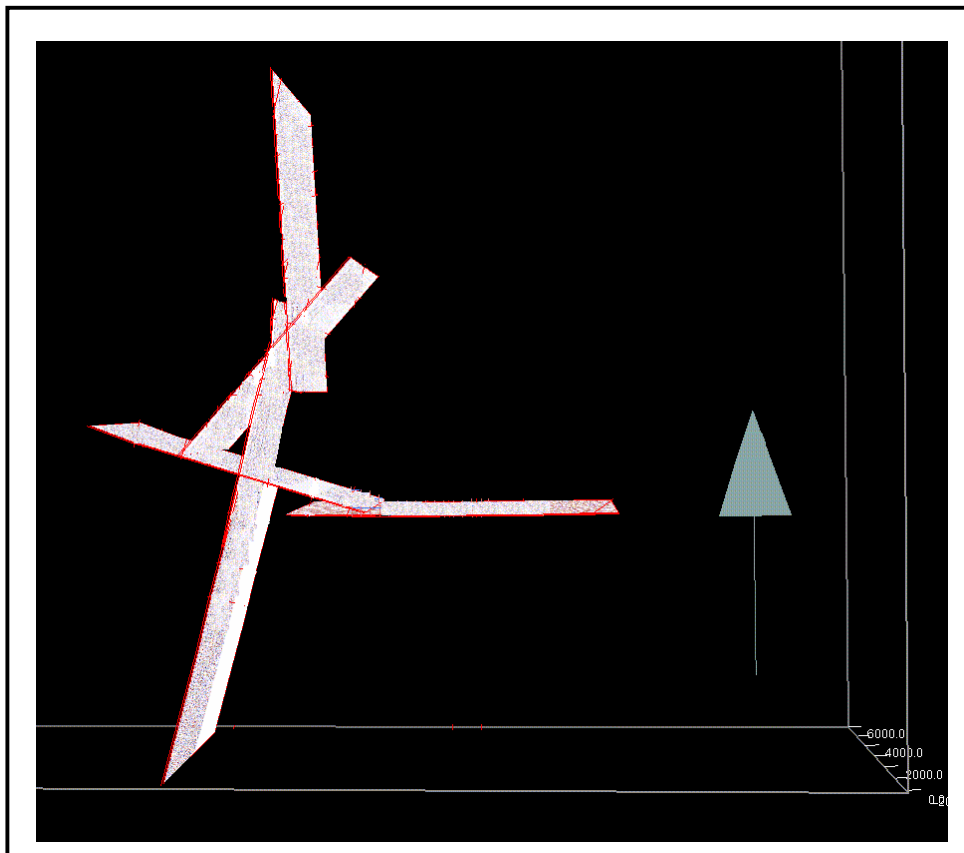


Figura 4.16. Visualización de las líneas sísmicas 2D desde la aplicación GeoViz®.

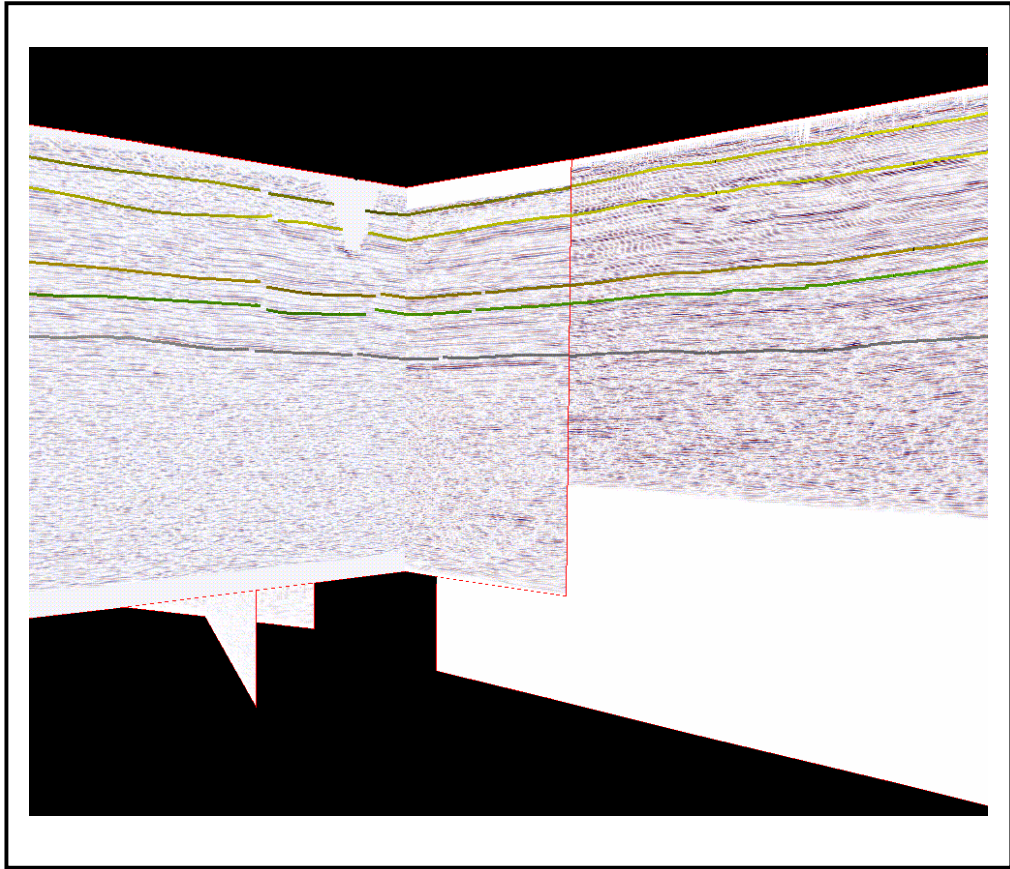


Figura 4.17. Ejemplo de la visualización de los horizontes interpretados en IMain® desde la aplicación GeoViz®. Nótese las discontinuidades de los reflectores.

Una vez culminada esta etapa se realizó la interpretación estructural donde se identificaron las principales fallas de la zona, con la ayuda de las discontinuidades laterales observadas en los horizontes o reflectores.

4.4 Registros de Pozo

Para seleccionar los pozos a utilizar en el estudio, se realizó un inventario que arrojó como resultado un total de 107 pozos con una variedad de distintos tipos de registros. Se utilizó como primer criterio de selección la cercanía a las líneas sísmicas 2D utilizadas en esta investigación, como se muestra en la Figura 4.18; el segundo criterio se basó en la verificación de la existencia de registros de Densidad (RHOB), Sónico (DT), Tiros de Verificación Sísmica (“check shot”) y Gamma Ray (GR), resultando útiles un total de 15 pozos (Apéndice 3). El inventario de los registros se muestra en la Tabla 8.

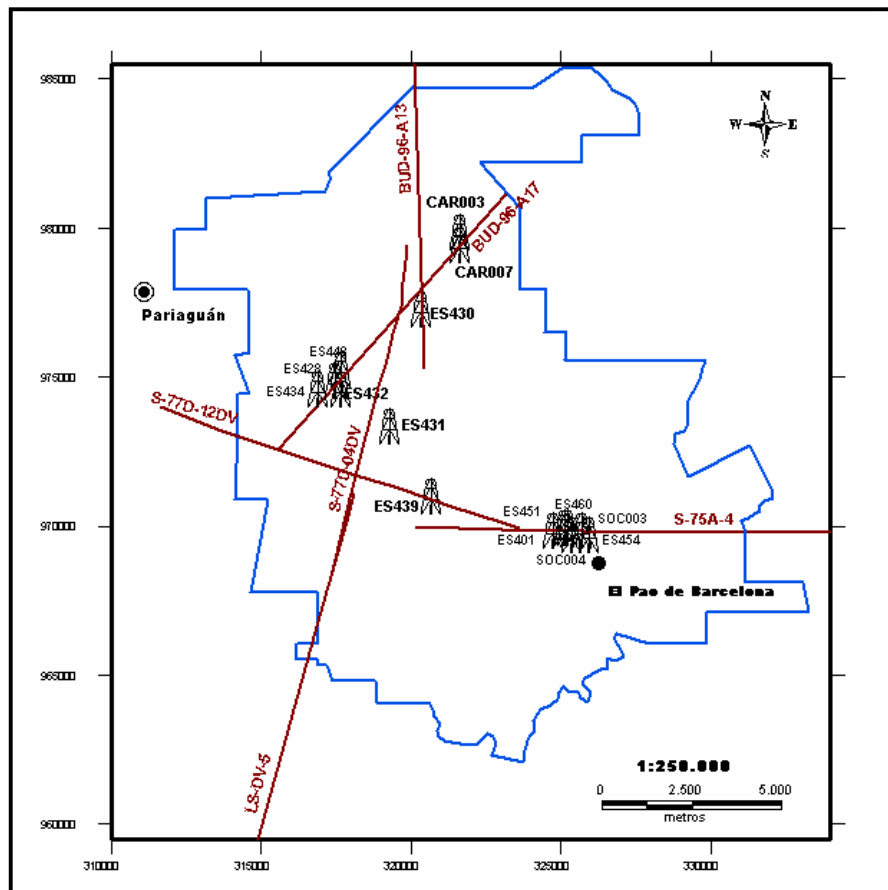


Figura 4.18. Mapa de distribución de pozos en el Área Mayor de Socororo. Se muestra la ubicación de los pozos seleccionados de acuerdo a la cercanía a las líneas sísmicas 2D. Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

Tabla 8. Inventario de registros de pozo. Se muestra el nombre del pozo y los distintos tipos de registros que contiene. Adicionalmente se señalan aquellos pozos que contienen curvas de conversión Tiempo-Profundidad (T-Z).

Pozo	Gamma Ray	Check Shot	Sónico	Densidad	Curva T-Z
CAR-003	✓	✗	✗	✓	✓
CAR-007	✓	✗	✗	✓	✓
ES-401	✓	✗	✗	✓	✗
ES-428	✓	✗	✓	✓	✓
ES-430	✓	✗	✓	✓	✓
ES-431	✓	✗	✓	✓	✗
ES-432	✓	✗	✓	✓	✓
ES-434	✓	✗	✗	✓	✓
ES-439	✓	✗	✓	✓	✗
ES-448	✓	✗	✗	✓	✓
ES-451	✓	✓	✓	✓	✓
ES-454	✓	✗	✗	✓	✓
ES-460	✓	✗	✗	✓	✗
SOC-003	✓	✗	✗	✓	✓
SOC-004	✓	✗	✗	✓	✓

El pozo ES-451 es el único con registro “Check Shot”, el cual permitió la construcción del sismograma sintético para la calibración de las líneas sísmicas 2D. La disponibilidad de los registros de densidad (RHOB) permitió estimar la densidad de cada una de las formaciones para la elaboración de los modelos gravimétrico-estructurales. El registro de Gamma Ray se utilizó para la comprobación de los topes de las formaciones donde el registro de pozo intersectase los diferentes marcadores geológicos. Y por último, el registro sísmico se utilizó para el cálculo del coeficiente de reflectividad en la interpretación sísmica.

El cálculo de la densidad para las formaciones geológicas se realizó a partir de la información obtenida de la interpretación sísmica de los topes de las secciones en tiempo. Para la conversión tiempo-profundidad de los marcadores geológicos en cada pozo, se procedió a realizar un estudio de la variación del gradiente de velocidad en toda la zona en estudio como se muestra en la Figura 4.19.

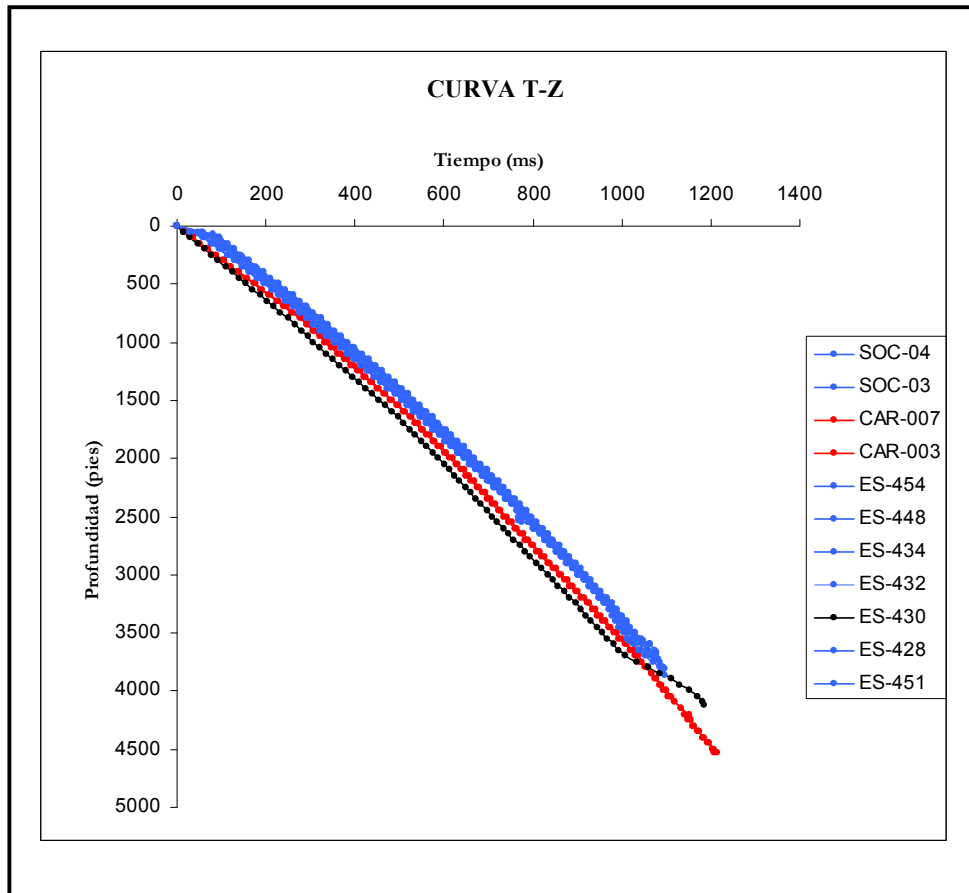


Figura 4.19. Estudio de la variación del gradiente de velocidad en el Área Mayor de Socororo. En la figura se muestran las curvas T-Z de los distintos pozos, aquellas curvas con el mismo color señalan que tienen el mismo gradiente de velocidad.

El análisis de la variación del gradiente de velocidad presentado en la Figura 4.19 permitió utilizar, para aquellos casos en donde el pozo no contiene curva T-Z, la curva del pozo más cercano de acuerdo con la Figura 4.18. Por ejemplo, la curva T-Z del pozo ES-420 fue utilizada en los pozos ES-431 y ES-439 (Figura 4.20), de igual manera en los pozos ES-401 y ES-460 se utilizó la del pozo ES-451 (Figura 4.21) lo que permitió obtener finalmente la profundidad de los topes de las formaciones de interés en cada uno de los pozos.

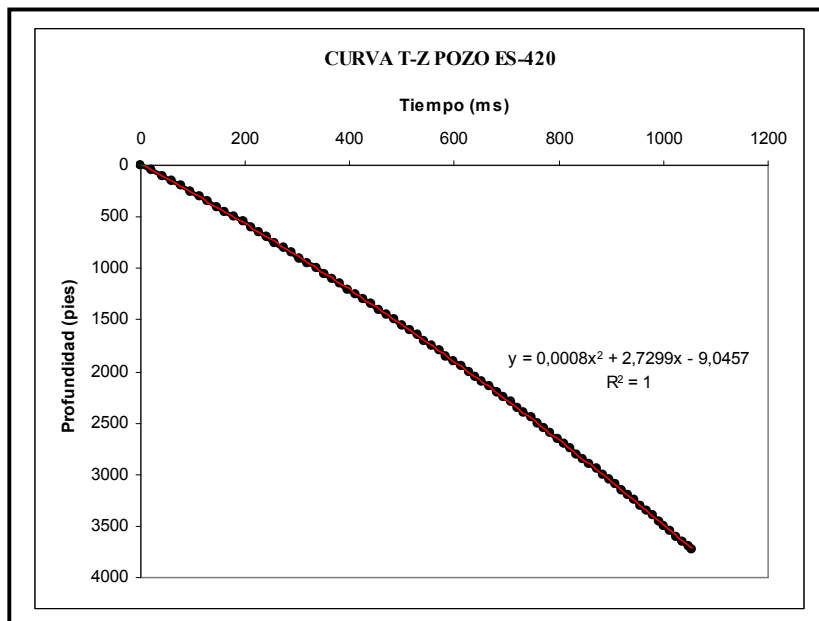


Figura 4.20. Gráfico de la curva conversión tiempo-profundidad para el pozo ES-420 utilizada para los pozos ES-431 y ES-439. Se muestra la ecuación empleada para la conversión T-Z junto con su coeficiente de determinación.

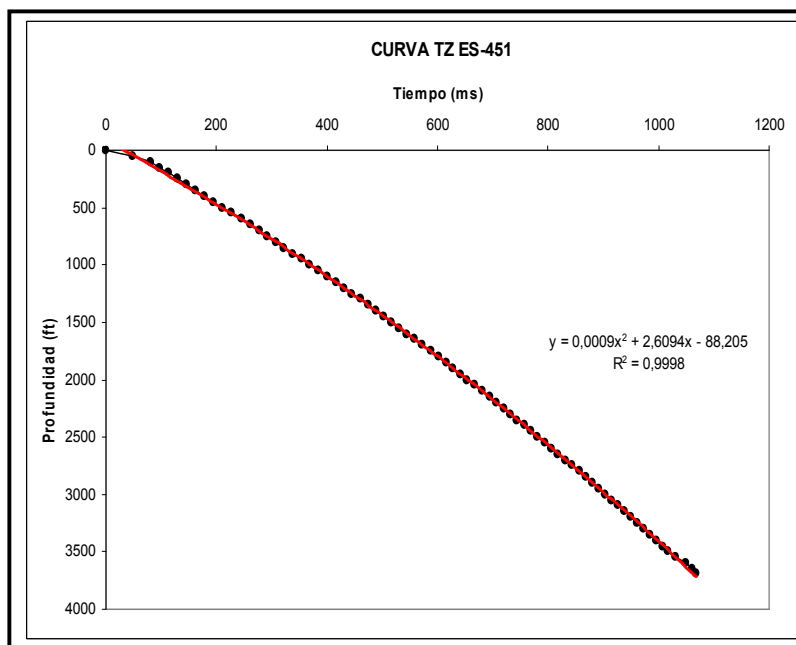


Figura 4.21. Gráfico de la curva tiempo-profundidad para el pozo ES-451 utilizada para los pozos ES-401 y ES-460. Se muestra la ecuación empleada para la conversión T-Z junto con su coeficiente de determinación.

Se realizó una estimación del error obtenido de la conversión T-Z para los horizontes interpretados. Para ello se compararon los valores calculados con la profundidad obtenida directamente de los registros de pozo. Considerando la resolución sísmica vertical promedio de las líneas 2D utilizadas es posible despreciar las diferencias en profundidad resultantes (Tabla 9).

Tabla 9. Diferencia de profundidad entre el valor calculado de la conversión T-Z y el obtenido directamente del pozo. Se utiliza como ejemplo la diferencia que se calculó en los pozos ES-428 y ES-451 con las formaciones Freites y Oficina. La profundidad 1 señala la calculada de la curva T-Z y la profundidad 2 la obtenida directamente del pozo.

Pozo	Formación	Tiempo (ms)	Profundidad 1 (pies)	Profundidad 2 (pies)	Δ Profundidad (pies)
Línea Sísmica BUD-96-A17					
ES428	Freites	251	670,54	765	94,46
	Oficina	586,5	1786,32	1868	81,68
Línea Sísmica S-75^a-04					
ES451	Freites	260,8	653,53	739,98	86,45
	Oficina	456,8	1291,57	1375,98	84,41

El valor de densidad para cada formación geológica de interés se obtuvo a partir de un análisis estadístico con ayuda del programa SPSS® Versión 13.0, que consistió en el cálculo de medidas de tendencia central y dispersión e histogramas de frecuencias. Para ello fue necesario seleccionar y agrupar en cada pozo con registro de densidad (RHOB), los valores correspondientes a cada formación, tomando en cuenta las profundidades obtenidas con las curvas T-Z de cada pozo.

En la Tabla 10 se listan los resultados de las medidas de tendencia central para la Formación Freites. La Figura 4.22 muestra el histograma de frecuencia donde se observa una distribución normal para una población de 8212 valores de densidad. Se

identifica un comportamiento bimodal sesgado; sin embargo, la moda de mayor valor puede ser atribuida a la acumulación de valores erráticos en una muestra tan grande. Dada la consistencia que existe entre el valor de la media, mediana y moda es posible utilizar el valor promedio como representativo de la densidad de la Formación.

Tabla 10. Medidas de tendencia central para la Formación Freites. Cálculo a partir de una muestra de 8212 valores de densidad.

Estadístico	Densidad gr/cm^3
Media	2,19
Mediana	2,17
Moda	2,11
Desviación Estándar	0,22
Varianza	0,05
Mínimo	1,33
Máximo	2,64

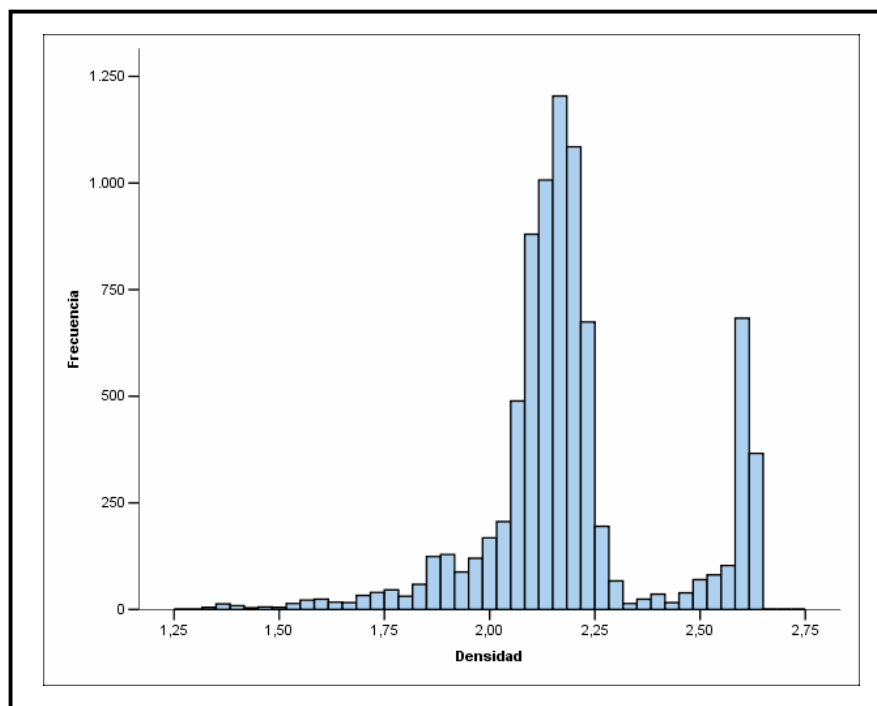


Figura 4.22. Histograma de frecuencias de la densidad para la Formación Freites.

Los valores de las medidas de tendencia central para la Formación Oficina se obtuvieron a partir de una muestra de 79099 valores (Tabla 11). El histograma de frecuencias de la Figura 4.23 señala una distribución normal en esta población de datos donde se puede identificar un comportamiento unimodal.

Tabla 11. Medidas de tendencia central para la Formación Oficina. Cálculo a partir de una muestra de 79099 valores de densidad.

Estadístico	Densidad gr/cm^3
Media	2,24722
Mediana	2,2505
Moda	2,2101
Desviación Estándar	0,19221
Varianza	0,03694
Mínimo	1,106
Máximo	2,8945

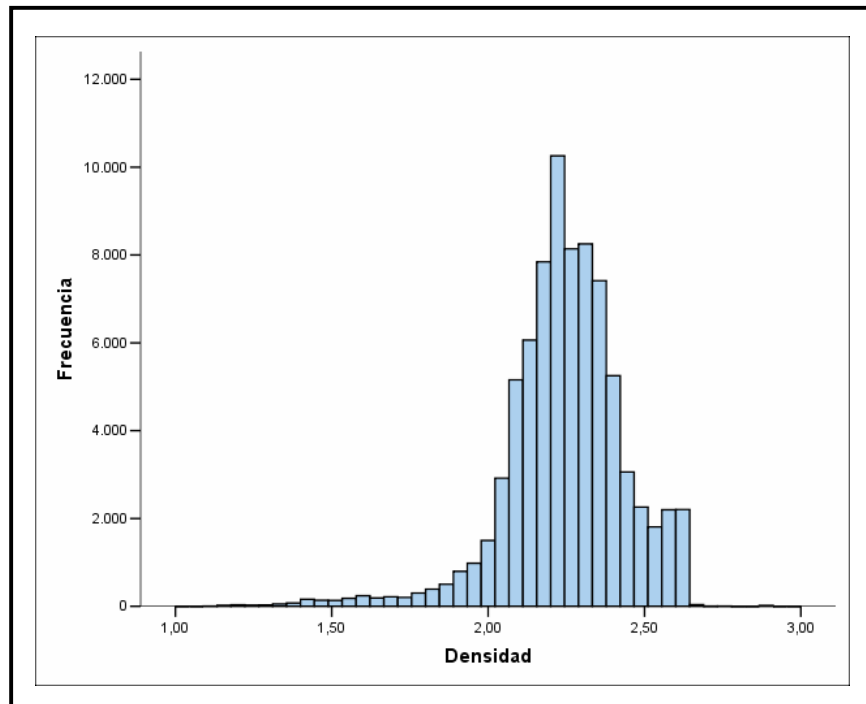


Figura 4.23. Histograma de frecuencias para la Formación Oficina.

La evaluación estadística para obtener la densidad en la Formación Merecure fue calculada a partir de una muestra de 23702 valores, las medidas de tendencia central y dispersión se indican en la Tabla 12. El histograma de frecuencias (Figura 4.24) muestra un comportamiento unimodal en la población de datos evaluados.

Tabla 12. Medidas de tendencia central para la Formación Merecure. Cálculo a partir de una muestra de 23702 valores de densidad.

Estadístico	Densidad gr/cm^3
Media	2,32
Mediana	2,34
Moda	2,40
Desviación Estándar	0,15
Varianza	0,02
Mínimo	1,31
Máximo	2,76

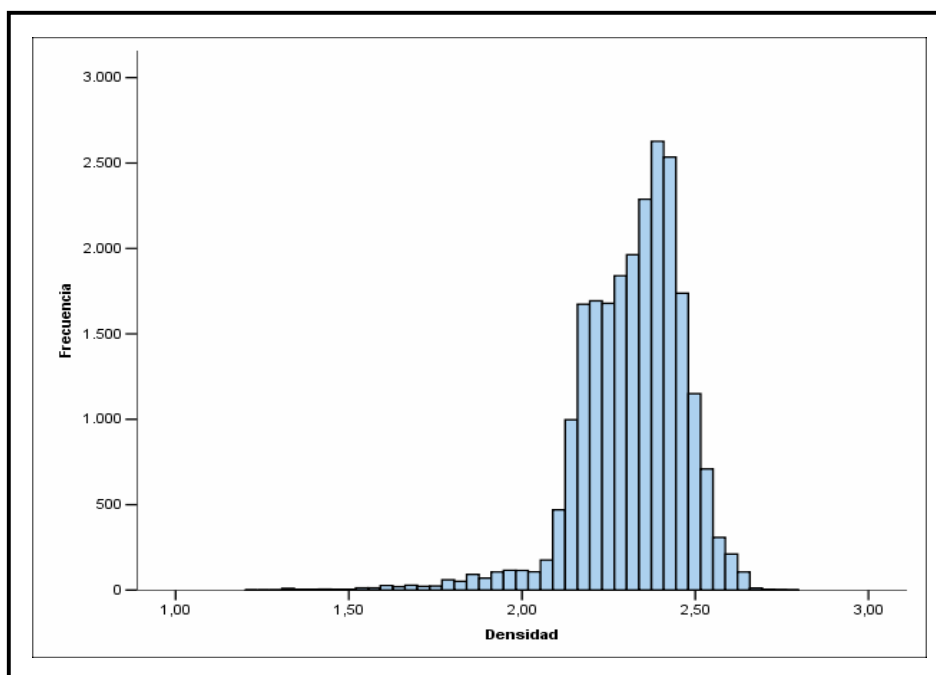


Figura 4.24. Histograma de frecuencias para la Formación Merecure.

Los resultados que se muestran en la Tabla 13 corresponden a las medidas de tendencia central del Grupo Temblador (Formaciones Tigre y Canoa). Los resultados obtenidos para una muestra de 2303 indican una distribución normal en los valores de densidad, por su parte en el histograma de frecuencias (Figura 4.25) se evidencia un comportamiento unimodal de los datos.

Tabla 13. Medidas de tendencia central para el Grupo Temblador. Cálculo a partir de una muestra de 2303 valores de densidad.

Estadístico	Densidad gr/cm^3
Media	2,35
Mediana	2,37
Moda	2,46
Desviación Estándar	0,16
Varianza	0,03
Mínimo	1,47
Máximo	2,68

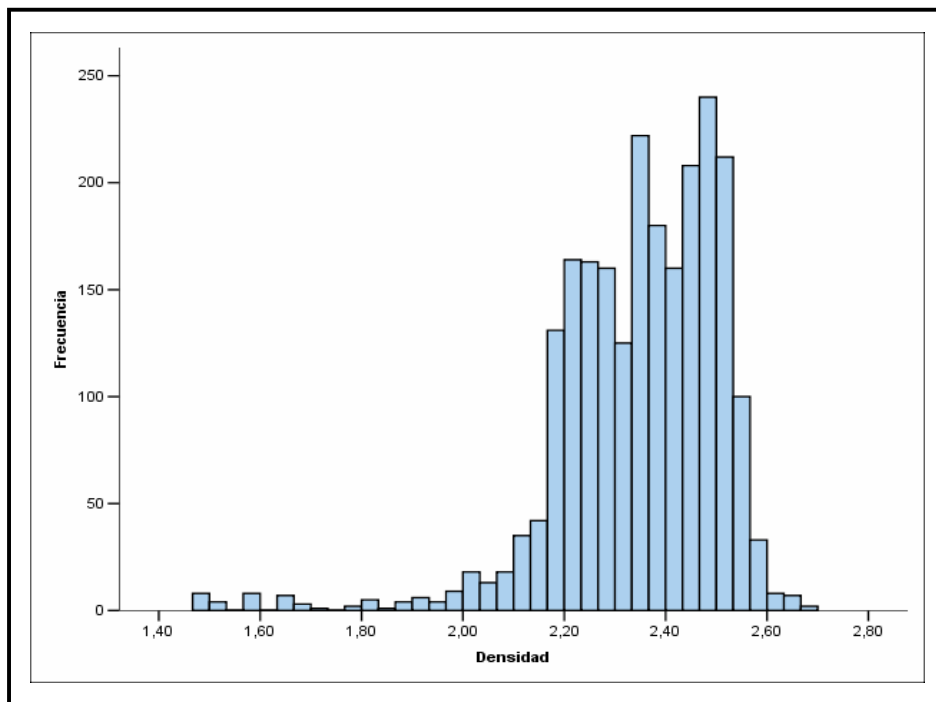


Figura 4.25. Histograma de frecuencias para el Grupo Temblador.

El estudio de las medidas de tendencia central e histogramas de frecuencias de las formaciones geológicas de interés evaluadas por separado, muestra una población de datos con distribución normal. Es importante destacar que en todos los casos los resultados de la desviación estándar y la varianza de los datos señalan muy poca dispersión en torno a la media, aunado a esto la consistencia entre los valores de media, mediana y moda permitió utilizar los valores promedio como valores representativos de las densidades de las formaciones estudiadas. En la Tabla 14 se listan los valores finales de las densidades calculadas.

Tabla 14. Valor de densidad de las formaciones evaluadas a partir de los registros de pozo. Estos valores se obtuvieron a partir del análisis estadístico del registro de densidad en 15 pozos del Área Mayor de Socororo.

Formación	Densidad gr/cm^3
Freites	2,19
Oficina	2,25
Merecure	2,32
Tigre y Canoa	2,35

CAPÍTULO 5

5.1 Interpretación Integrada

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante cada una de las etapas de la investigación; a continuación se analizará en forma detallada el mapa de Anomalía de Bouguer que permitió seleccionar los transectos bajo los cuales se escogieron las líneas sísmicas 2D. De igual forma se mostrará la interpretación sísmica estructural realizada que permitió definir la geometría y profundidad de las formaciones geológicas presentes en los modelos gravimétrico-estructurales y finalmente el modelado de los mismos.

En la Figura 5.1 se muestra al mapa de Anomalía de Bouguer, es posible observar como disminuyen los valores de las anomalías en sentido norte. Los contornos isoanómalos tienen una geometría en forma de “C” donde su parte cóncava se encuentra al suroeste, esta tendencia de las curvas se expresa en una anomalía negativa que abarca todo la zona norcentral y noreste del mapa, su magnitud varía desde -30 mGal hasta -50 mGal y presenta un gradiente gravitatorio de aproximadamente 10 mGal/km.

Las magnitudes de la distorsión gravimétrica que controla la zona norte del mapa corresponden con la subpoblación de menor rango observada en los histogramas de frecuencias (Figura 4.5), analizados previamente en la sección dedicada a la validación estadística de los datos de gravedad. Esta anomalía está asociada a una estructura generada por un sistema de fallas con dirección NO-SE que estuvo activo durante el Paleozoico. La estructura es denominada Depresión Carrizal y aparece referenciada en los estudios de las formaciones Hato Viejo y Carrizal realizados por Aymard (1980). Este autor propone que la estructura afecta principalmente al basamento cristalino y la profundidad de la depresión alcanza valores mayores a los 11000 pies.

Es posible afirmar que la disminución de los valores de las anomalías de sur a norte es indicativa del aumento del espesor de sedimentos, considerando que la profundidad del basamento cristalino aumenta en la misma dirección, de acuerdo con la geometría del flanco sur de la Cuenca Oriental de Venezuela.

Los máximos relativos de Anomalía de Bouguer están ubicados en la zona sur del mapa (Figura 5.1), con valores entre -10 y -20 mGal. De acuerdo con la evaluación estadística de los datos estos valores forman parte de la subpoblación de mayor rango (Figura 4.5). Por su parte los mínimos absolutos se encuentran al noreste de la zona estudiada con valores que alcanzan los -55 mGal aproximadamente.

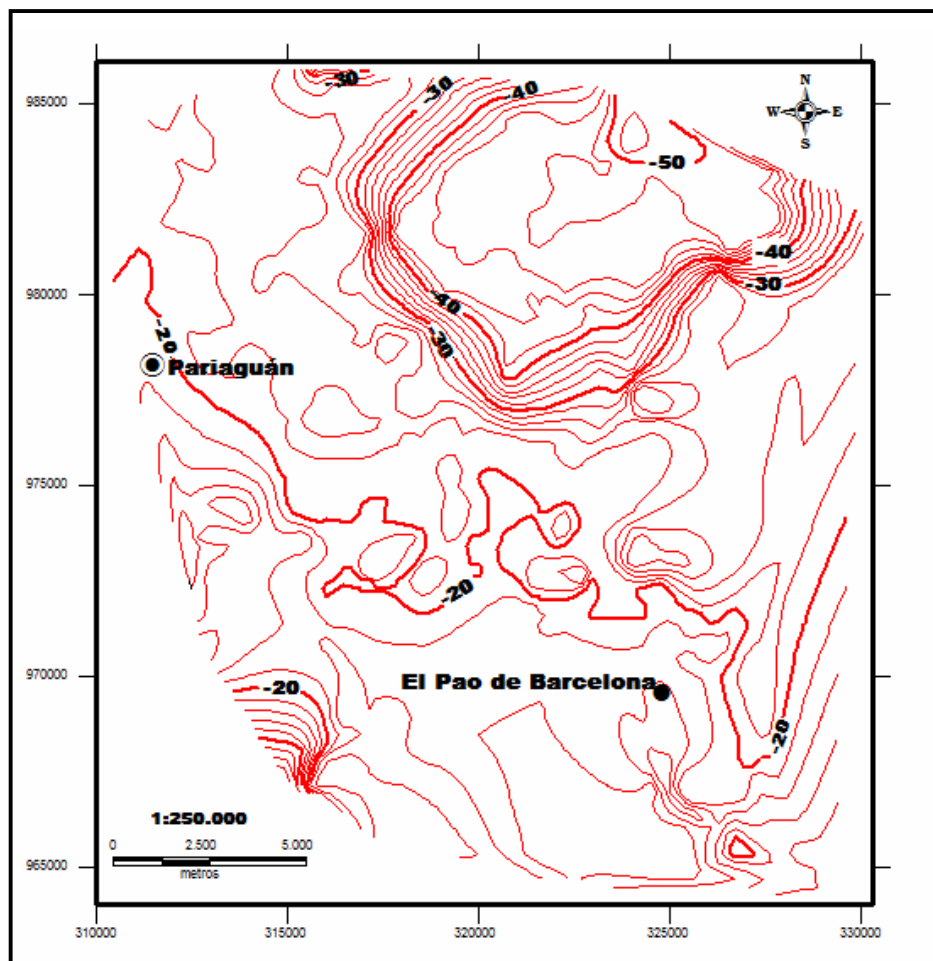


Figura 5.1. Mapa de Anomalía de Bouguer del Área Mayor de Socororo. Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

Las distorsiones observadas al sureste del mapa de Anomalía de Bouguer están controladas por la Falla Cachicamo. El rumbo de esta falla es NE-SO y es considerada el principal elemento estructural de la zona debido a que atraviesa los Campos Cachicamo y Socororo, y se extiende hasta campos vecinos (PetroUCV, 2001; Morales, 2002; Reina, 2002; González y Vázquez, 2005, Hilla y Naval, 2005; León y Vielma, 2006).

El mapa regional de Anomalía de Bouguer (Figura 5.2a) indica que la orientación de las curvas isoanómalas es NO-SE en la zona noroeste y NE-SO en el sureste, lo que sugiere una geometría en forma de “C” cuya parte cóncava se encuentra al suroeste. Esta dirección coincide con el rumbo del monoclinual que define la zona de acuerdo con PetroUCV (2001). De igual forma se observa un decrecimiento en las magnitudes de las anomalías hacia el norte, correspondiente con el buzamiento del basamento cristalino.

La Figura 5.2b corresponde al mapa de residuos, se observa al igual que en el mapa de Anomalía de Bouguer una distorsión que controla la orientación de los contornos al noreste de la zona. Su gradiente es 10 mGal/km y las magnitudes de los contornos que la definen decrecen hacia el norte. La existencia de esta distorsión en el mapa de residuos sugiere el efecto local de basamento asociado a la Depresión Carrizal.

Hacia el sureste del mapa es posible identificar que la dirección de los contornos es NE-SO, esta orientación preferencial responde al rumbo de la Falla Cachicamo. En las zonas noroeste y suroeste las curvas isoanómalas tienen un rumbo NO-SE, esta dirección coincide con un sistemas de fallas menores existentes en la zona que cortan las secuencias sedimentarias cercanas a superficie y principalmente a la Formación Oficina y Merecure (PetroUCV, 2001; Morales, 2002; Reina, 2002; González y Vázquez, 2005, Hilla y Naval, 2005; León y Vielma, 2006).

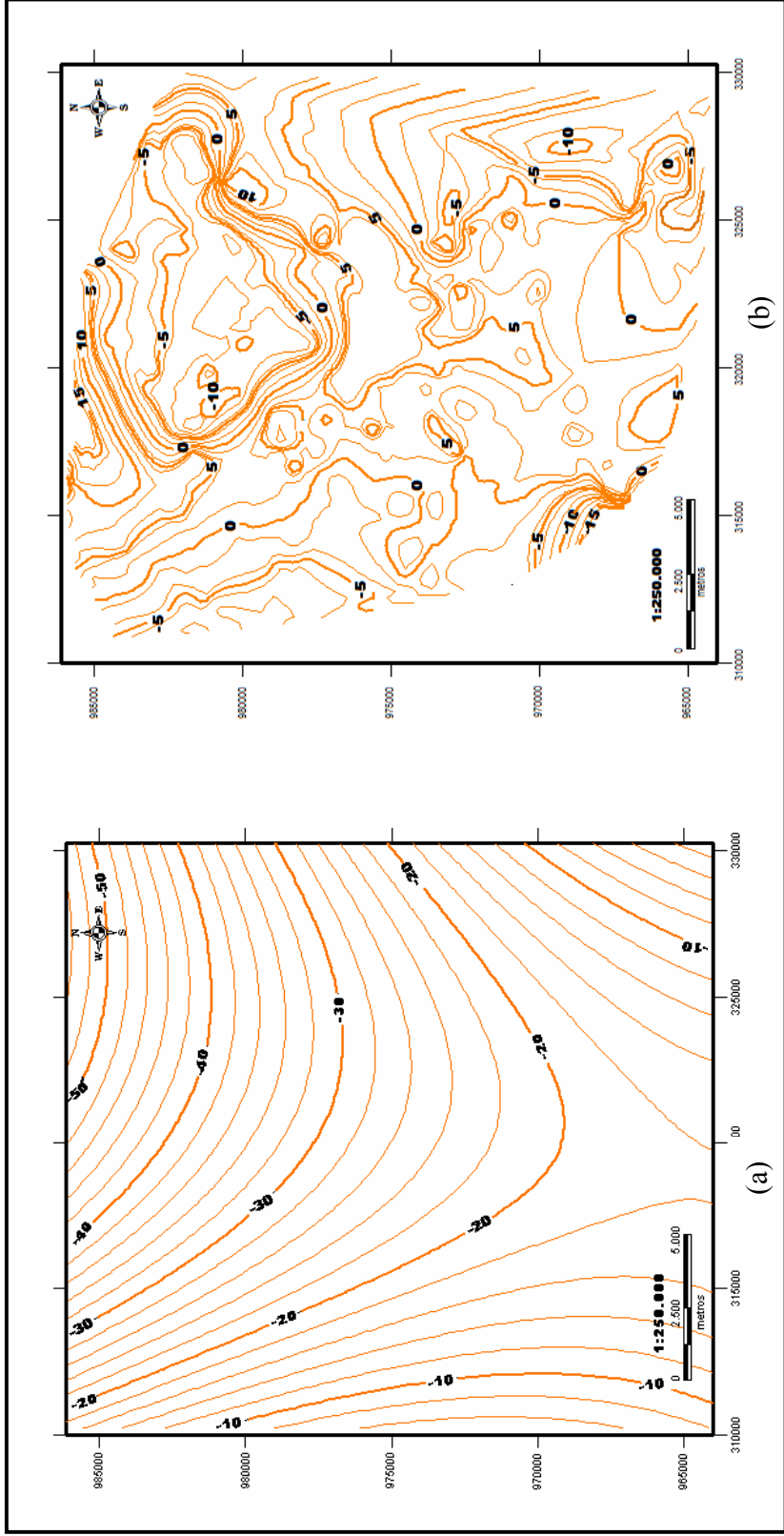


Figura 5.2. Separación gravimétrica regional y de residuos utilizando un polinomio de grado 2. a) Mapa Regional de Anomalía de Bouguer. b) Mapa de Residuos. Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

El análisis estructural de las secciones sísmicas aunado a los marcadores geológicos obtenidos de los pozos, permitió definir las estructuras presentes y ubicar la profundidad de los topes de las formaciones Freites, Oficina, Merecure y Grupo Temblador (tope del Cretácico). Estas secuencias sedimentarias conforman junto con las formaciones Carrizal y Hato Viejo el espesor de rocas suprayacentes al basamento cristalino, este último no fue identificado en las secciones debido a la pérdida de la resolución sísmica de los reflectores en profundidad.

Al inicio de la interpretación se identificaron los reflectores sísmicos de interés, siendo posible observar en las secciones de las líneas LS-DV-5, S-77D-04DV, BUD-96-A13 y BUD-96-A17 el buzamiento hacia el norte de los horizontes interpretados (Figuras 5.3 y 5.4), en contraste, en las secciones de las líneas S-75A-04 y S-77D-12DV los reflectores estudiados no muestran un buzamiento preferencial.

La pérdida de la continuidad lateral de los horizontes interpretados facilitó la detección de los eventos estructurales. Se reconocieron fallas normales que cortan toda la secuencia sedimentaria en estudio, principalmente las formaciones Oficina, Merecure y Grupo Temblador. Por encima del reflector identificado como el tope de la Formación Oficina la pérdida de la amplitud de los reflectores dificultó la interpretación de las estructuras, adicionalmente no existe información geológica que respalde la existencia o afloramiento de las fallas en superficie.

Las fallas normales identificadas son de alto grado de buzamiento, la mayoría son fallas verticales a sub-verticales y en general tienen un buzamiento hacia el norte (Figuras 5.3 y 5.4). Adicionalmente, se encontraron fallas con buzamiento hacia el sur (Figura 5.4a). Asociadas a las fallas normales existen fallas de ajuste o de reacondo (Figura 5.4b), estas fallas son de menor extensión que las fallas principales y varían entre 1 y 1,5 Km.

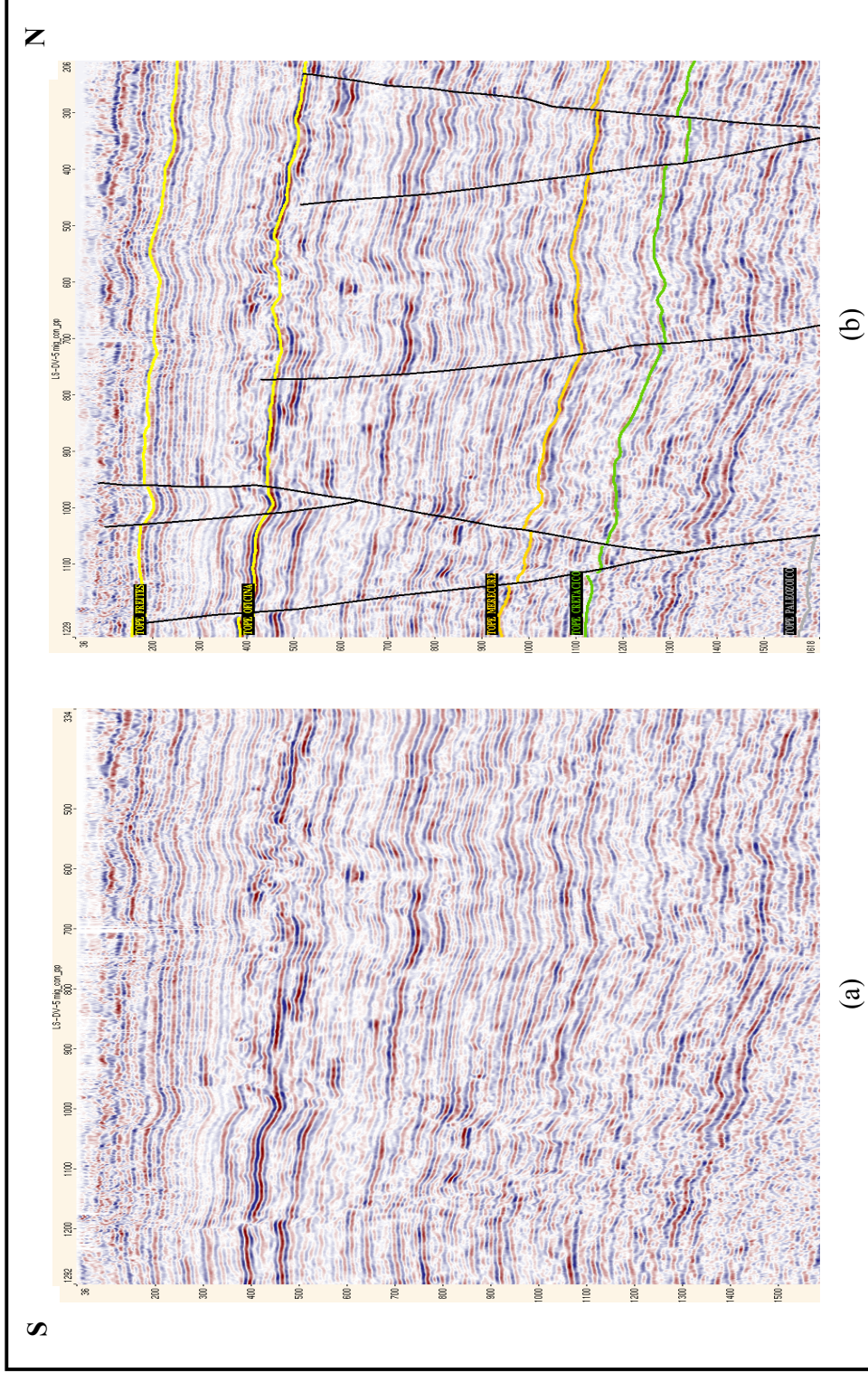


Figura 5.3. Líneas sísmicas LS-DV-5. a) Sección sísmica original. b) Resultado de la interpretación estructural. Nótese los topes de las formaciones de interés y las fallas identificadas.

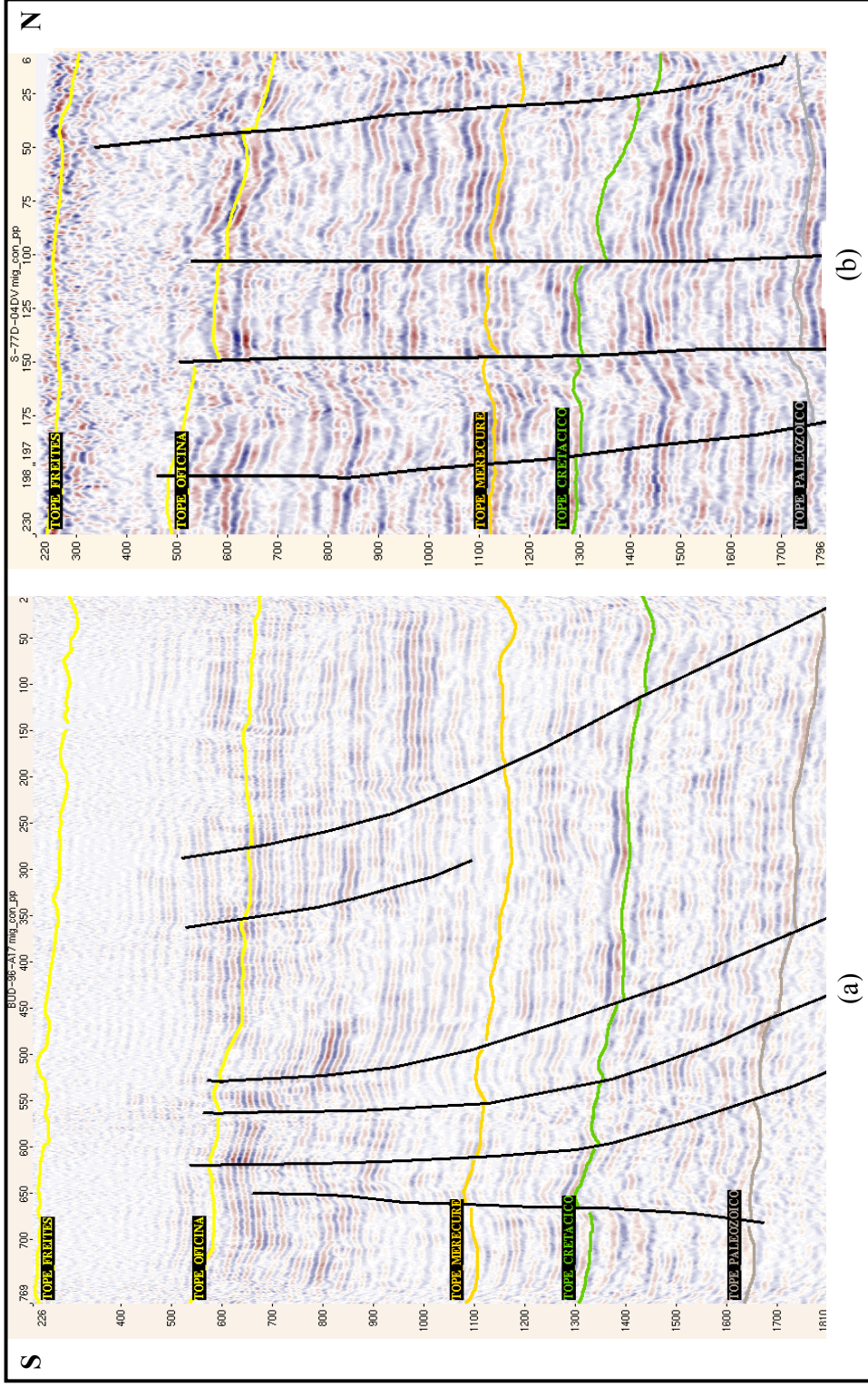


Figura 5.4. Resultados de la interpretación de las secciones sísmicas BUD-96-A17 y S-77D-04DV. a) Sección BUD-96-A17 interpretada.
b) Sección S-77D-04DV interpretada.

Para realizar la interpretación de las fallas se utilizaron líneas sísmicas 2D adicionales a las mencionadas en capítulos anteriores. Esta información permitió verificar la existencia y continuidad de los planos de falla.

En las líneas LS-DV-5, S-77D-04DV, BUD-96-A13 y BUD-96-A17 se identificó un sistema de fallas con un rumbo NO-SE. Morales (2002) propone que el salto de este sistema de fallas se encuentra en un rango entre 20 y 100 pies, mientras que León y Vielma (2006) afirman que el rango varía de 20 a 35 pies; sin embargo, en ambas investigaciones sólo se utilizaron registros de pozos. De acuerdo con los resultados de la interpretación estructural es posible afirmar que el salto de las fallas identificadas es aproximadamente 80 pies, considerando además que la resolución sísmica de las secciones no permitió ver saltos menores a 70 pies.

Con la ayuda de mapas estructurales de diversas arenas de la Formación Oficina (León y Vielma, 2006 y Hilla y Naval, 2005) fue posible identificar la Falla Cachicamo en las líneas sísmicas S-75A-04 y LS-DV-5. En la Figura 5.5 es posible observar como el salto entre los reflectores aumenta en profundidad a través del plano de la falla, las magnitudes del mismo varían de 90 a 180 pies. Adicionalmente, se encuentran identificados los reflectores correspondientes a los topes de las formaciones en estudio así como también los topes de las arenas gasíferas F8 y N2 con las cuales se realizó la calibración sísmica.

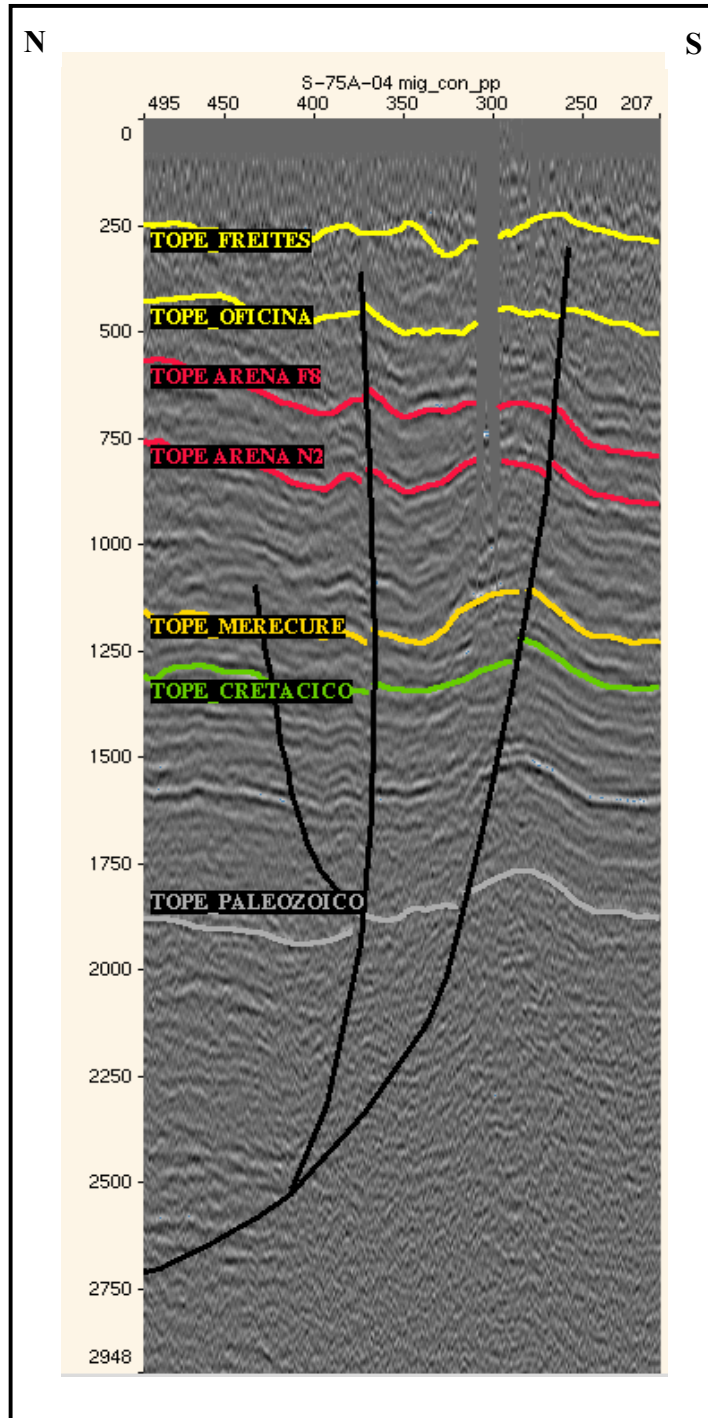


Figura 5.5. Interpretación de la línea sísmica S-75A-04. La falla Cachicamo es la estructura ubicada a la derecha de la sección. Nótese como su salto aumenta progresivamente desde la Formación Oficina hasta el tope del Paleozoico (formaciones Carrizal y Hato Viejo).

Seleccionando los contactos de cada falla a ambos lados del horizonte que corresponde con la Formación Merecure fue posible calcular el salto aproximado de las mismas y construir un mapa estructural en tiempo (Figura 5.6). Se utilizó la Formación Merecure, visto que de acuerdo con los resultados de la interpretación estructural de las secciones, es un reflector atravesado tanto por las fallas de rumbo NO-SE como por la Falla Cachicamo. En la figura 5.6 se muestra el mapa estructural correspondiente al tope de la Formación Merecure, en él se puede apreciar en la zona sur del mapa la Falla Cachicamo con rumbo NE-SO y con una extensión aproximada de 18 km. Hacia la zona noroeste y suroeste se encuentra el sistema de fallas con rumbo NO-SE, las extensiones de las mismas varían entre los 5 y 10 km.

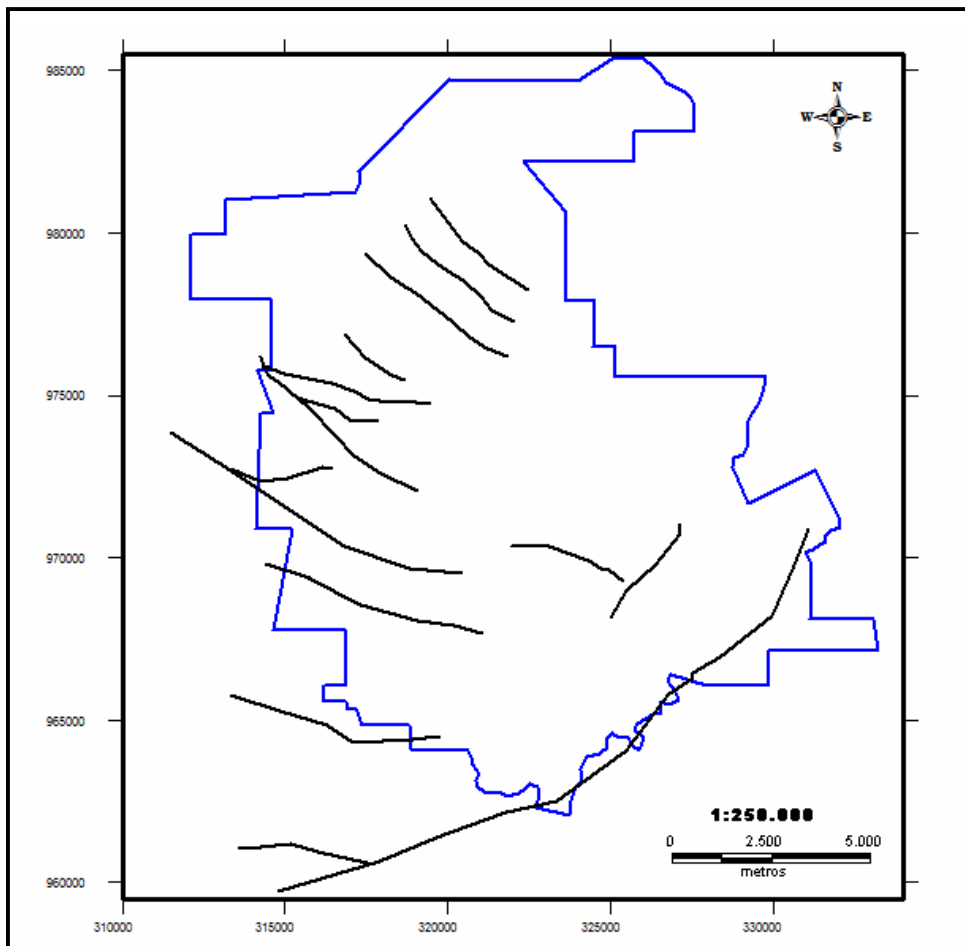


Figura 5.6. Mapa de fallas para el tope de la Formación Merecure. En el mapa se puede apreciar la dirección de las fallas identificadas en las líneas sísmicas 2D utilizadas.

5.2 Modelado Gravimétrico-Estructural

A continuación se presenta la dirección de los transectos bajo los cuales se realizaron los modelos gravimétrico-estructurales del Área Mayor de Socororo. La Figura 5.7 permite reconocer dos transectos identificados con las letras AA' y BB', el primero tiene un rumbo N10°E y su extensión es 19 Km. El transecto BB' es de dirección N80°W y su longitud es 16,7 Km.

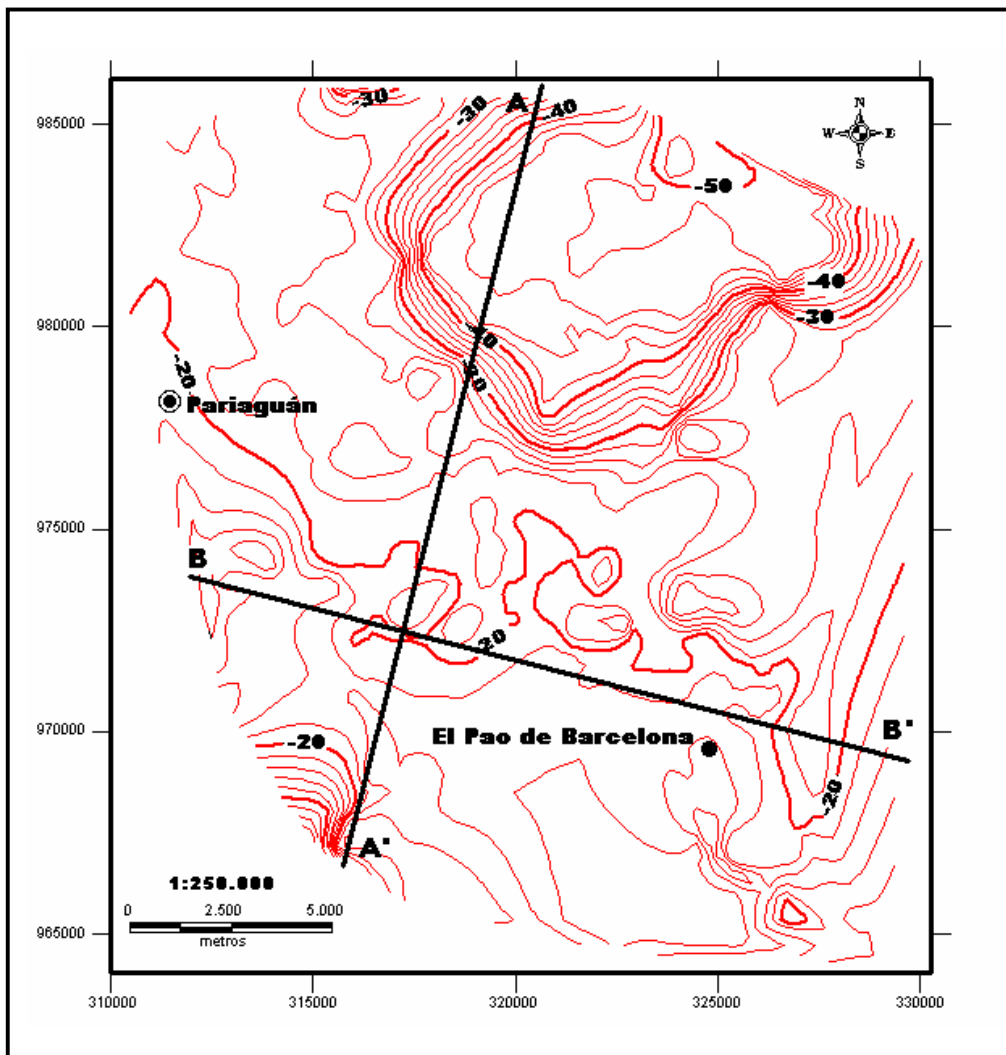


Figura 5.7. Dirección de los transectos seleccionados para construir los modelos gravimétrico-estructurales. Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: REGVEN; Elipsoide: WGS84.

Las densidades utilizadas en el modelado de los transectos fueron las obtenidas de los registros de pozos. De acuerdo con los resultados se utilizó 2.19 gr/cm^3 para la Formación Freites, 2.25 gr/cm^3 para la Formación Oficina, 2.32 gr/cm^3 para la Formación Merecure y 2.45 gr/cm^3 para el Grupo Temblador (Tigre y Canoa). Las profundidades de los topes de estas formaciones se calcularon con la ayuda de las curvas T-Z de los pozos más cercanos o ubicados sobre la dirección de las líneas 2D utilizadas.

Dado que en el Área Mayor de Socororo no existen pozos que hayan perforado las formaciones Hato Viejo y Carrizal no fue posible estimar sus densidades a partir de los registros de pozo. De igual forma era necesario conocer la profundidad del basamento y de la discontinuidad de Mohorovich y las densidades respectivas de los cuerpos de roca asociados a éstos.

En vista de las ideas antes expuestas se utilizó información obtenida de estudios geológico-geofísicos interdisciplinarios realizados en la Cuenca Oriental de Venezuela, con el propósito de conocer la geodinámica, estructura y espesor de la corteza en el límite norte de la Placa Suramericana. Los resultados están basados en datos de sismica profunda y datos de gravedad (Schmitz *et al.* 2005, 2006), adquiridos en dirección perpendicular al límite entre la Placa Caribe y el norte de la Placa Suramericana.

De estas investigaciones se derivó que la profundidad de Moho en la zona es 30 Km y la del basamento cristalino varía de 3 a 6 Km. Las densidades de los cuerpos de roca del Paleozoico (Formaciones Carrizal y Hato Viejo) son en promedio 2.53 gr/cm^3 , por su parte la densidad estimada para el basamento cristalino es 2.80 gr/cm^3 y la del manto se encuentra en 3.00 gr/cm^3 (Schmitz *et al.* 2005, 2006).

Para iniciar el modelado se cargaron los marcadores de los pozos con la finalidad de definir las profundidades de los cuerpos de roca, específicamente de las formaciones Freites, Oficina, Merecure y Grupo Temblador. De igual forma se representaron los sistemas de fallas y geometrías de las formaciones obtenidas de la interpretación sísmica estructural.

Considerando que las secciones sísmicas no aportan información alguna del basamento cristalino sólo se fijó su profundidad de acuerdo con los resultados de los estudios de Schmitz *et al.* (2005, 2006), suponiendo una geometría plana y no deformada. Las Figuras 5.8 y 5.9 presentan los resultados de esta etapa, en ella es posible visualizar como el ajuste de la curva de los valores calculados es inconsistente con la de los valores observados, en el transecto AA' la diferencia entre las curvas es mucho más notoria que en el transecto BB'.

En vista que tanto la profundidad como las densidades de los cuerpos de roca están suficientemente validados a través de los análisis geofísicos y estadísticos realizados, los resultados sugieren que las anomalías gravimétricas de la zona están controladas principalmente por la geometría del basamento cristalino y no por las estructuras y geometría que afectan el espesor de sedimentos. De acuerdo con estas ideas las estructuras geológicas observadas deben extenderse desde las secuencias sedimentarias a mayores profundidades o deben existir estructuras adicionales a las observadas que controlen la geometría del basamento.

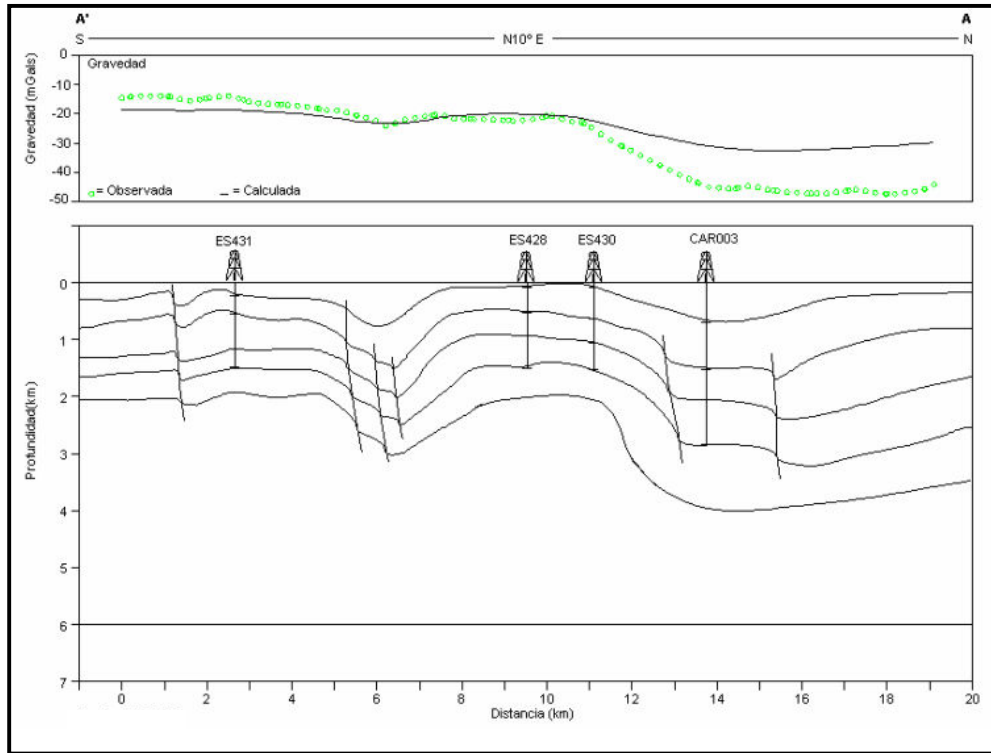


Figura 5.8. Resultado del ajuste de la curva gravimétrica sin modelar el tope del basamento cristalino en el transecto AA'.

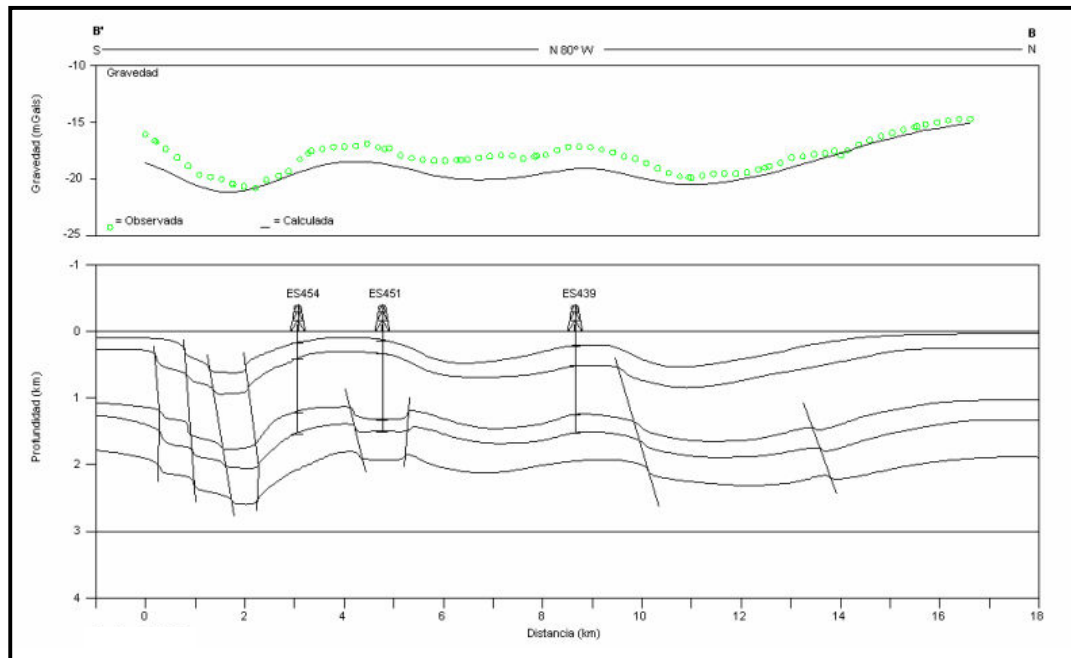


Figura 5.9. Resultado del ajuste de la curva gravimétrica sin modelar el tope del basamento cristalino en el transecto BB'.

Los modelos gravimétrico-estructurales realizados sobre los transectos AA' y BB' mostrados en las Figuras 5.10 y 5.11 son el resultado de la interpretación geofísica de las formaciones Las Piedras, Freites, Oficina, Merecure, Grupo Temblador, Hato Viejo y Carrizal, la geometría del basamento y las densidades que corresponde a cada cuerpo de roca.

En el modelo del transecto AA', como se muestra en la Figura 5.10, es posible observar la disminución del espesor de la Formación Merecure hacia el sur. Este resultado es coherente de acuerdo con los modelos sedimentológicos y estratigráficos propuestos por González y Vázquez (2005), quienes plantean que el espesor disminuye progresivamente de norte a sur hasta acunarse bajo la Formación Oficina. En general todas las formaciones geológicas presentes tienden a disminuir su espesor hacia el sureste considerando el rumbo NO-SE y buzamiento hacia el norte del monoclinal que define a esta zona.

El sistema de fallas normales con rumbo NO-SE se ubica a lo largo del transecto AA', tienen un buzamiento de 80° aproximadamente y con dirección hacia el norte; sin embargo, se puede observar que las fallas que se ubican entre 1 a 7 Km en la escala horizontal de la Figura 5.10 son de mayor extensión, aproximadamente 3 Km de profundidad y se extienden hasta el basamento cristalino. Las fallas que se encuentra en 7, 14 y 16 Km sólo atraviesan las formaciones Freites, Oficina, Merecure y el Grupo Temblador.

Aproximadamente en el Km 11 del transecto AA' se observa una inflexión en la curva que varía de -35 a -55 mGal. Esta inflexión corresponde con la anomalía gravimétrica observada en la Figura 5.1 en toda la zona norcentral y noreste del mapa de Anomalía de Bouguer. Como se evidenció en la Figura 5.8 es la respuesta a una estructura que de acuerdo con Aymard (1980) se denomina Depresión Carrizal.

La estructura es controlada por una falla sin-sedimentaria con buzamiento al norte, inicialmente activa durante el Paleozoico y reactivada a principios del Cretácico como respuesta de regimenes extensivos que controlaron la evolución de las cuencas sedimentarias en Venezuela.

Como se puede observar en el modelo, la distribución de los sedimentos es diferente en el bloque deprimido con respecto al bloque levantado. El espesor de sedimentos del bloque norte supera los del bloque sur en aproximadamente 500 m para la secuencia del Paleozoico (formaciones Hato Viejo y Carrizal) y 1200 m para la secuencia del Grupo Temblador (formaciones Canoa y Tigre). Los espesores aproximados de acuerdo con el modelo final se señalan en la Tabla 15.

Tabla 15. Espesor de las formaciones geológicas de acuerdo con el modelo del transecto AA'. Se indica el rango de variación de los espesores.

Formación	Espesor (pies)
Las Piedras	300-800
Freites	400-900
Oficina	500-1100
Merecure	400-700
Grupo Temblador	400-1600
Carrizal y Hato Viejo	500-1000

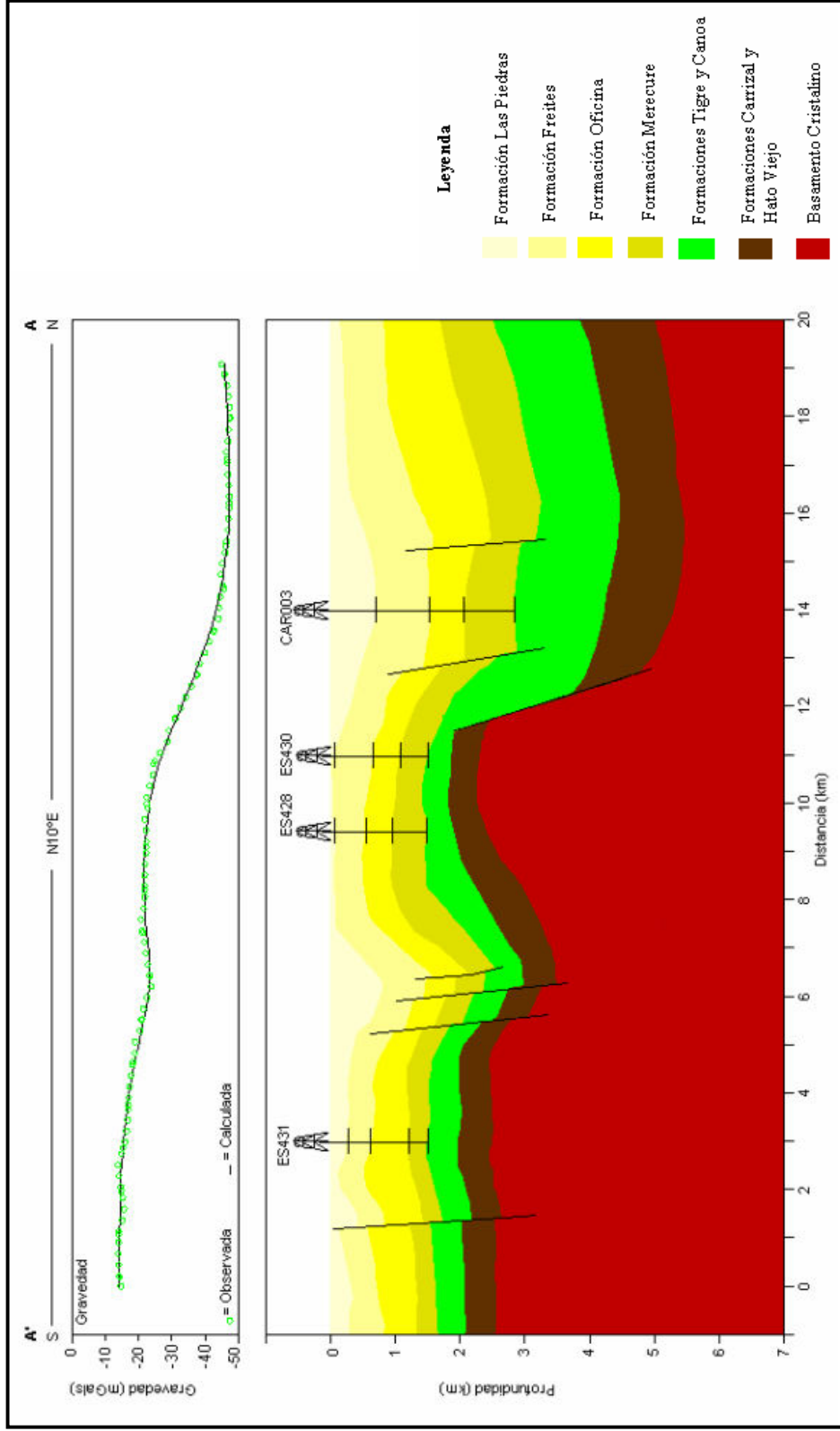


Figura 5.10. Modelo gravimétrico-estructural del transecto AA'.

La Figura 5.11 corresponde al modelo gravimétrico-estructural del transecto BB', en dicho modelo se puede apreciar que la respuesta gravitatoria viene dada por la geometría del basamento y el conjunto de fallas normales que se extienden a lo largo del transecto.

La Formación Oficina presenta el mayor espesor de sedimentos debido al gran espacio generado para acomodar la depositación del Mioceno, en vista de que la cuenca se encontraba formada.

Se identificaron a lo largo del transecto BB' ocho fallas normales, dentro de ellas se encuentran dos sistemas de fallas, el primero con rumbo NE-SO y el segundo con rumbo NO-SE. Las fallas que se ubican de 0 a 3 Km en la escala horizontal de la Figura 5.11 corresponden al primer sistema, se extienden desde la Formación Freites hasta el basamento cristalino con una longitud aproximada de 2,5 Km y de buzamiento 80° hacia el norte. Las fallas que se ubican entre 4 y 15 Km tienen un rumbo NO-SE con buzamientos entre los 70° y 80° hacia el norte, atravesando las formaciones Oficina, Merecure, Grupo Temblador, Carrizal y Hato Viejo hasta cortar el basamento cristalino.

La geometría del basamento cristalino aunado con las fallas normales que se encuentran entre 0 y 3 Km en la escala horizontal de la Figura 5.11, son las causantes de la variación en la Anomalía de Bouguer y que fluctúan entre -16 a -22 mGal. La variación aproximada de los espesores de las formaciones se señala en la Tabla 16.

Tabla 16. Espesor de las formaciones geológicas de acuerdo con el modelo del transecto BB'. Se indica el rango de variación de los espesores.

Formación	Espesor (pies)
Las Piedras	100-200
Freites	50-100
Oficina	800-900
Merecure	300-400
Grupo Temblador	400-500
Carrizal y Hato Viejo	800-900

Las Figuras 5.12 y 5.13 evidencian que la discontinuidad de Mohorovich no afecta el ajuste de la curva de gravedad observada respecto a la calculada, dado que se realizaron cambios a la profundidad y forma de Moho sin obtener alteraciones en la respuesta gravitatoria. Finalmente, la discontinuidad se ubicó a 30 Km de profundidad de acuerdo con Schmitz *et al.* (2005, 2006) asumiendo una geometría plana.

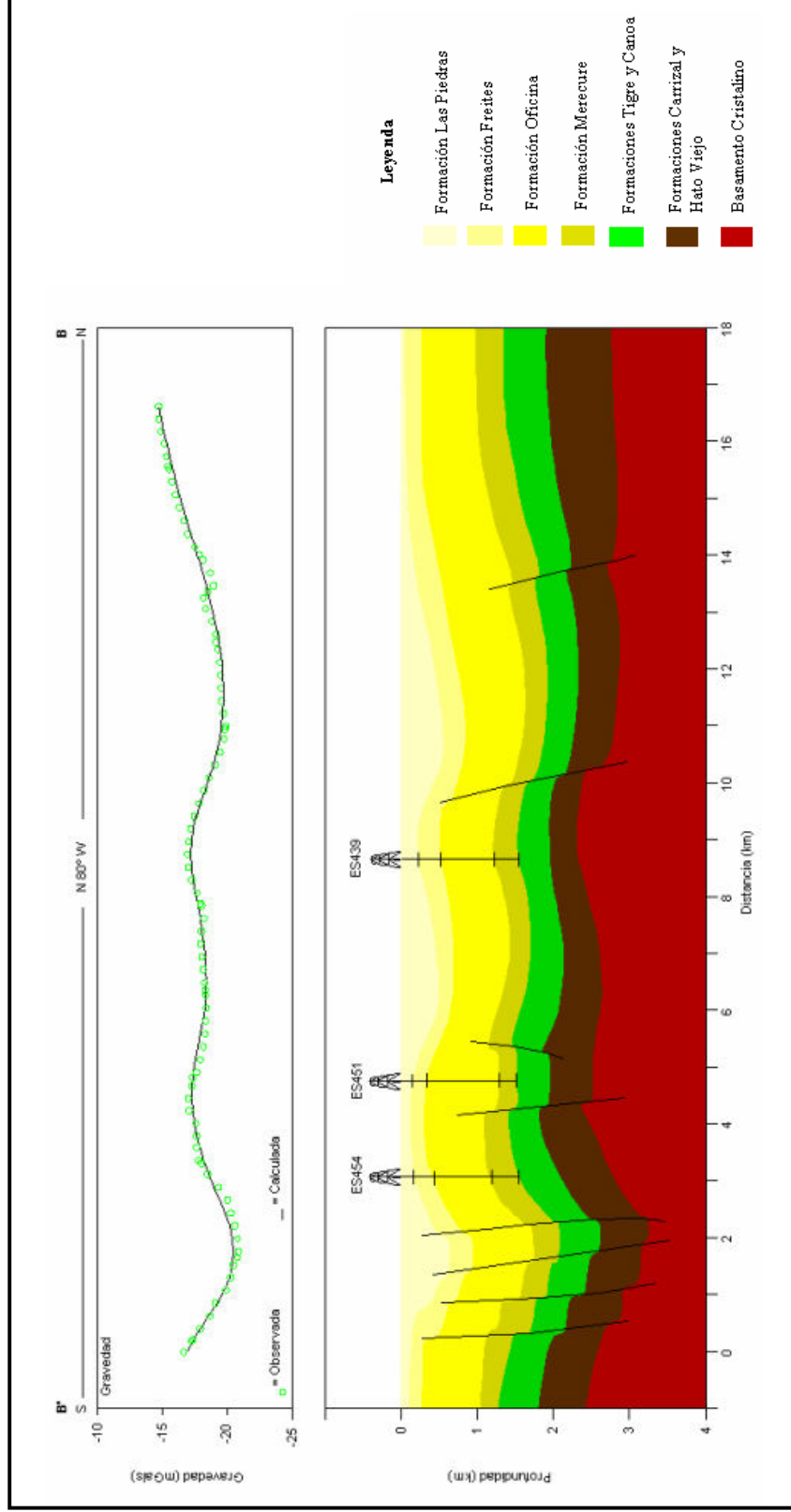


Figura 5.1.1. Modelo gravimétrico-estructural del transecto BB'.

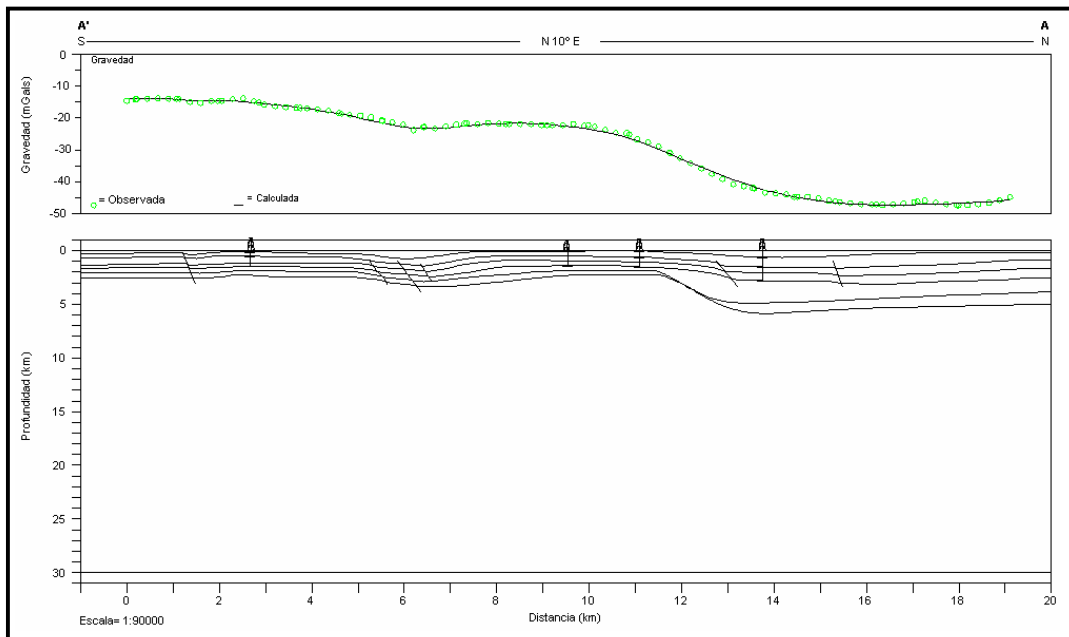


Figura 5.12. Modelo gravimétrico-estructural del transecto AA' desde las secuencias sedimentarias hasta la discontinuidad de Mohorovich.

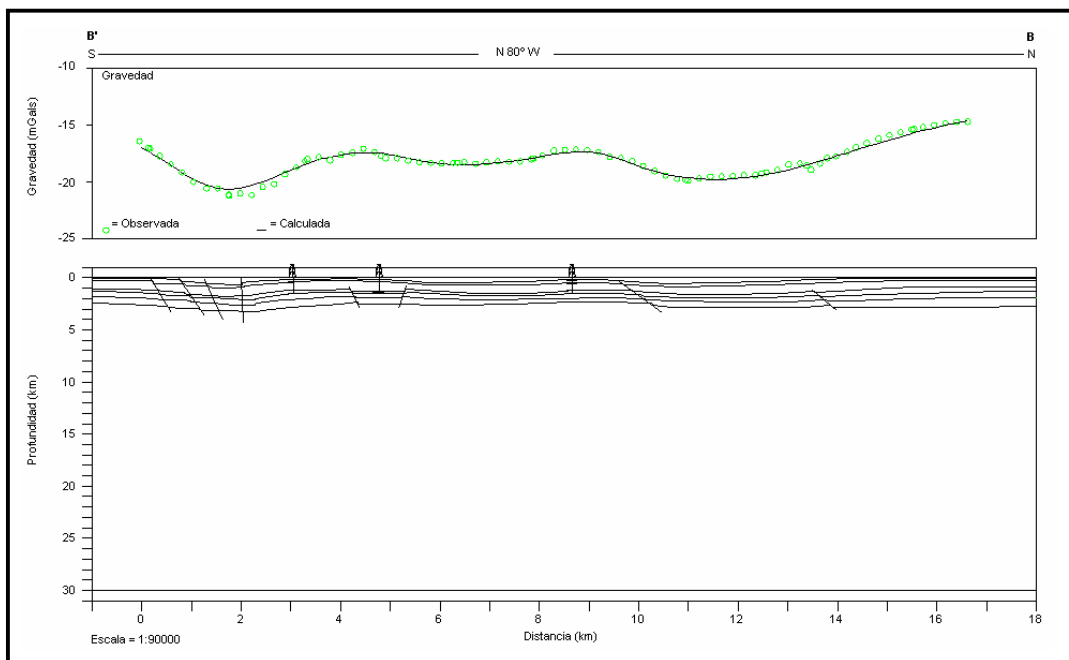


Figura 5.13. Modelo gravimétrico-estructural del transecto BB' desde las secuencias sedimentarias hasta la discontinuidad de Mohorovich.

Los modelos estructurales finales generados a partir de la interpretación integrada, se ilustran en la Figura 5.14 para el transecto AA' y en la Figura 5.15 para el transecto BB'. En estos modelos se puede observar la geometría de las formaciones Las Piedras, Freites, Oficina, Merecure y el Grupo Temblador (Formaciones Tigre y Canoa). Adicionalmente, se muestra la geometría del basamento cristalino y de la sedimentación paleozoica que corresponde a las formaciones Carrizal y Hato Viejo. De igual forma es posible observar las profundidades estimadas y los sistemas de fallas presentes, así como las edades geológicas respectivas a cada formación identificadas de acuerdo con su código geológico.

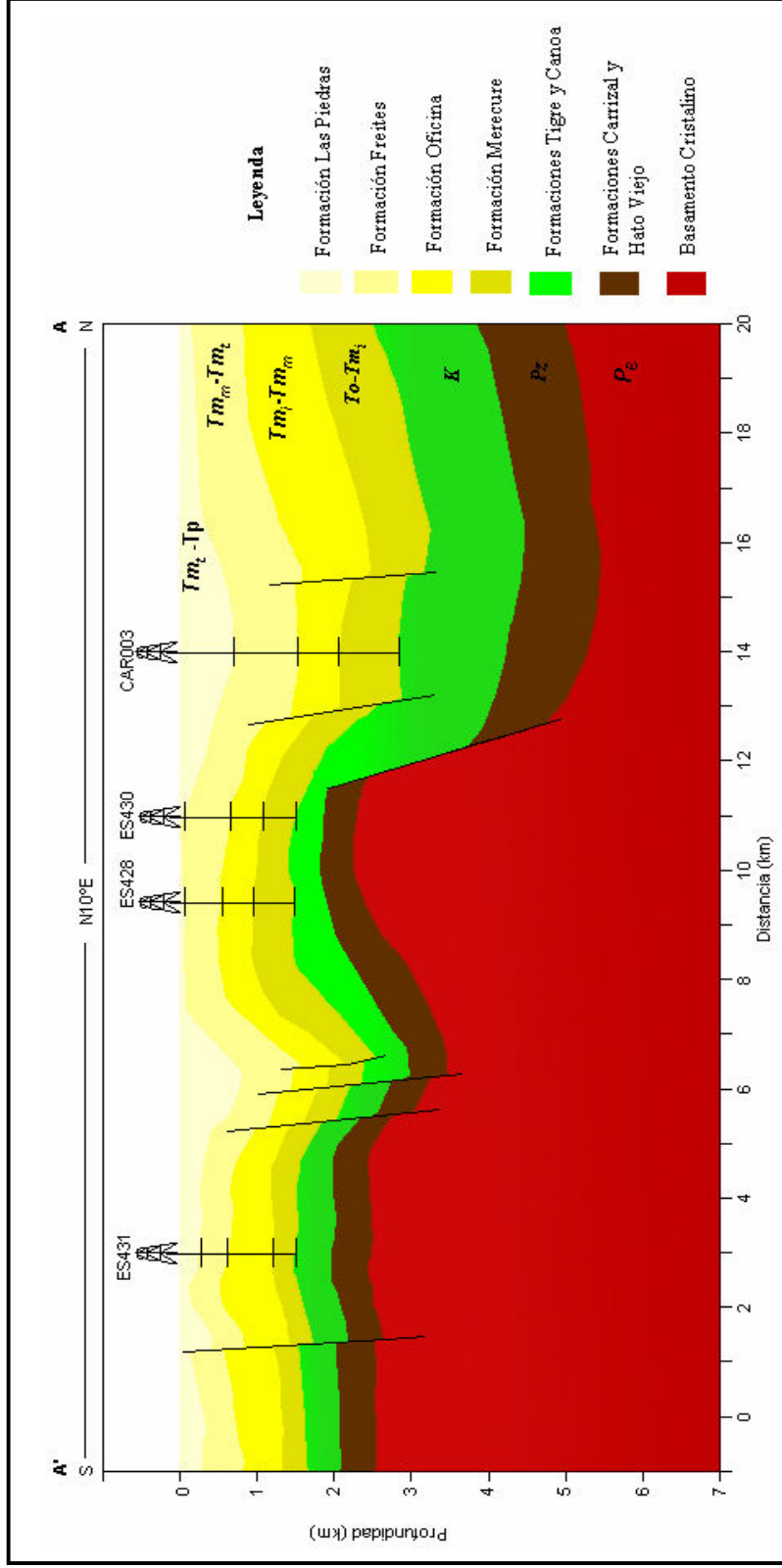


Figura 5.14. Modelo estructural del transecto AA'.

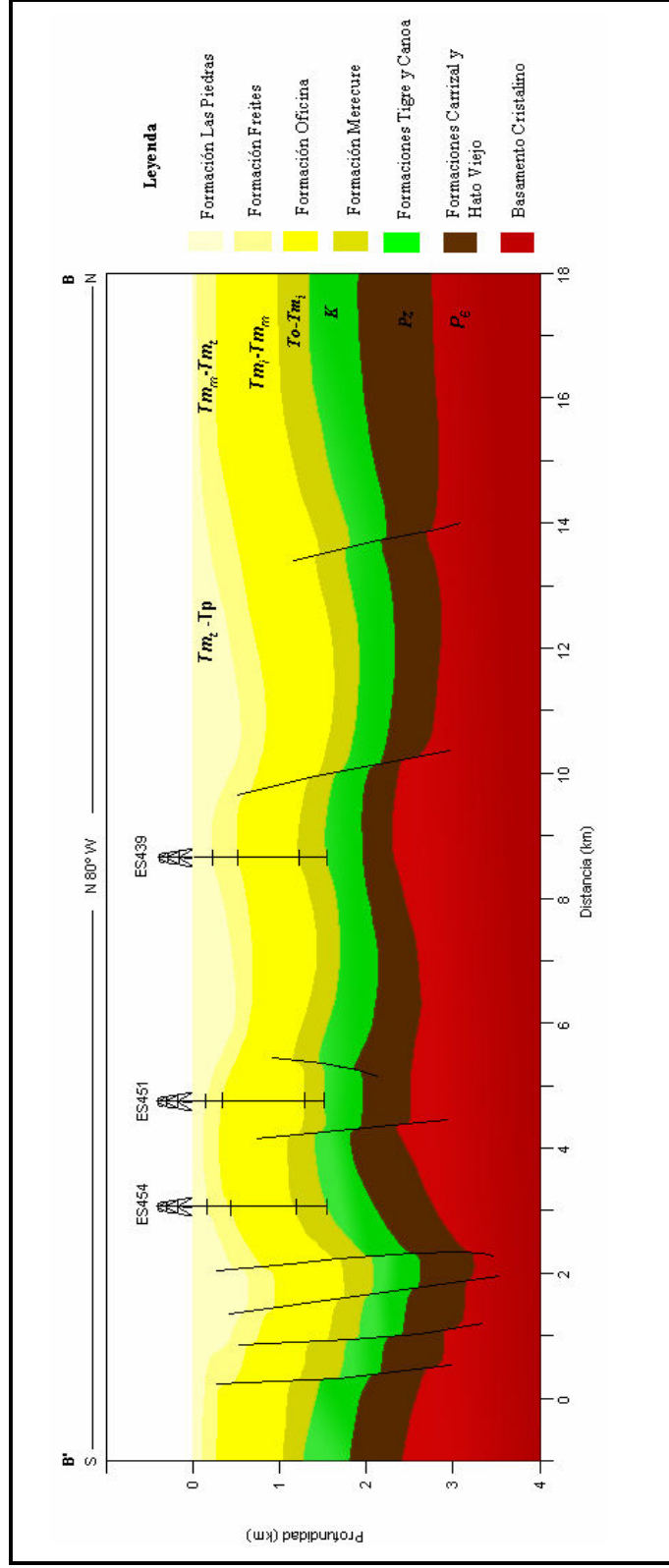


Figura 5.15. Modelo estructural del transecto BB'.

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

De acuerdo con los resultados obtenidos en los modelos gravimétrico-estructurales propuestos a partir de la interpretación integrada de los datos de gravedad, líneas sísmicas 2D y registros de pozos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. Las anomalías gravimétricas en el Área Mayor de Socororo están controladas principalmente por la geometría del basamento cristalino y no por las estructuras geológicas que afectan la geometría de la secuencia sedimentaria.
2. La disminución de las anomalías gravitatorias en la zona noreste responde a la Depresión Carrizal, inicialmente activa durante el Paleozoico y reactivada a principio del Cretácico. La estructura afecta el basamento cristalino y está controlada por una falla sin-sedimentaria con rumbo NO-SE y buzamiento al norte.
3. En el mapa regional de Anomalía de Bouguer se evidencia que la orientación de las curvas isoanómalas es NO-SE en la zona noroeste y NE-SO al sureste de la región estudiada, lo que sugiere una geometría en forma de "C" cuya parte cóncava se encuentra al suroeste.
4. Las anomalías gravimétricas al sureste del Área están controladas por la Falla Cachicamo. El rumbo de esta falla es NE-SO con buzamiento hacia el norte, su salto aumenta con la profundidad en el rango de 90 a 180 pies.
5. El sistema de fallas con rumbo NO-SE son fallas normales verticales a subverticales con un salto de aproximadamente 80 pies.

6. Las densidades de los cuerpos de roca son: Formación Freites $2,19 \text{ gr/cm}^3$, Formación Oficina $2,25 \text{ gr/cm}^3$, Formación Merecure $2,32 \text{ gr/cm}^3$ y Grupo Temblador (Formaciones Tigre y Canoa) $2,45 \text{ gr/cm}^3$.
7. Las formaciones geológicas que constituyen la secuencia sedimentaria disminuyen su espesor hacia el sureste, considerando el rumbo NO-SE y buzamiento hacia el norte del monoclinal fallado que caracteriza a esta zona.
8. La variación de espesores de las formaciones geológicas en dirección N 10° E son: Formación Las Piedras 300-800 pies, Formación Freites 400-900 pies, Formación Oficina 500-1100 pies, Formación Merecure 400-700 pies, Grupo Temblador (Formaciones Tigre y Canoa) 400-1600 pies, Formación Carrizal y Hato Viejo 1000-1500 pies.
9. Los espesores en dirección N 80° W varían de acuerdo con los siguientes rangos de valores: Formación Las Piedras 100-200 pies, Formación Freites 50-100 pies, Formación Oficina 800-900 pies, Formación Merecure 300-400 pies, Grupo Temblador (Formaciones Tigre y Canoa) 400-500 pies, Carrizal y Hato Viejo 800-900 pies.
10. Se recomienda realizar estudios geofísicos y geológicos al noreste del Área Mayor de Socororo para actualizar y mejorar la información existente de la Depresión Carrizal.
11. Finalmente se recomienda procesar e interpretar los datos sísmicos 3D adquiridos en el Área Mayor de Socororo durante el año 2005, con la finalidad de elaborar modelos estructurales 3D que integren los datos provenientes del cubo sísmico con atributos sísmicos y petrofísicos y la gravimetría de la zona.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

CITADAS

AVEDAÑO, R. y S. CÁCERES (2002) **Evaluación del sistema petrolífero del Área Mayor de Socororo, Estado Anzoátegui, Venezuela y elaboración de un modelo geológico, a partir de la integración de métodos geoestadísticos y petrofísicos.** Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

AYMARD, R. (1980) **Geología de la Faja Petrololífera del Orinoco. Una interpretación integrada.** En: MACHADO, V. **Modelo Sedimentológico Estratigráfico de la Secuencia Paleozoico en la Faja Petrolífera del Orinoco, Cuenca Oriental de Venezuela.** Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

CHILES, J. (1999) **Geostatistics modeling spatial uncertainty.** Jhon Wiley & Sons, New York. 691 p.

CRESSIE, N. (1991) **Stadistics for Spacial Data.** Jhon Wiley & Sons, New York. 214 p.

DÍAZ, J. (2002) **Generación de registros sintéticos con base en el análisis de atributos petrofísicos en el Campo Socororo, Estado Anzoátegui.** Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

DOBRIN, M. (1961) **Introducción a la Prospección Geofísica.** Ediciones Omega, Barcelona. 438 p.

- DUSENBURY, N. (1960) **The Stratigraphy of the Cretaceous Temblador Group of the Eastern Venezuela Basin**. Asociación Venezolana de Geología, Minas y Petróleo. 3 (9): 246-257 p.
- FUNKHOUSER, J; C. SASS y D. HEDBERG (1948) **Santa Ana, San Joaquín, Guárico and Santa Rosa oil fields (Anaco fields), central Anzoátegui, Venezuela**. Bulletin American Association of Petroleum Geologist. 32 (10): 1851- 1908 p.
- FREUND, J; F. WILLIAMS y B. PERLES (1992) **Estadística para la Administración con enfoque moderno**. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana. 189 p.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C; J. ITURRALDE DE AROZENA y X. PICARD (1980) **Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas**. Ediciones Foninves, Caracas. 1031 p.
- GONZÁLEZ, J. (2006) **Evaluación de riesgo de licuación de suelos utilizando sísmica de refracción somera en la isla de barrera de la Laguna de Unare, Estado Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- GONZÁLEZ, A. y D. VÁSQUEZ (2005) **Modelo sedimentológico y estratigráfico de las arenas de petróleo y gas pertenecientes a las Formaciones Oficina y Merecure en el Campo Socororo Oeste, Edo. Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

- HEDBERG, D. (1942) **Mesozoic Stratigraphy of northern South American**. Eighth American Scientific Congress, U.S.A. 195-227 p.
- HEDBERG, D. y A. PYRE (1944) **Stratigraphy of northeastern Anzoátegui, Venezuela**. Bulletin American Association of Petroleum Geologist. 28 (1): 1- 28 p.
- HEDBERG, D; C. SASS y J. FUNKHOUSER (1947) **Oil fields of the greater Oficina area, central Anzoátegui, Venezuela**. Bulletin American Association of Petroleum Geologist. 31 (12): 1089- 2169 p.
- HILLA, W. y D. NAVAL (2005) **Interpretación Estructural de las arenas gasíferas F8, I3, J3ML, N2, ROUM y R4L en el Área Mayor de Socororo, Estado Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- LEÓN, M. y J. VIELMA (2006) **Modelo estratigráfico-estructural de la Formación Oficina en el campo Socororo este, Pariaguán, estado Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- MATHERON, G. (1971) **The Theory of Regionalized Variables and its Applications**. En: GONZÁLEZ, J. **Evaluación de riesgo de licuación de suelos utilizando sísmica de refracción somera en la isla de barrera de la Laguna de Unare, estado Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

- MÉNDEZ, O. (1985) **Historia geológica graficada de la Cuenca Oriental de Venezuela**. VI Congreso Geológico Venezolano, Caracas. 1000-1040 p.
- MORALES, E. (2002) **Interpretación estratigráfica del área Socororo Oeste del convenio Socororo, operado por PetroUCV Estado Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- PARASNIS, D. (1970) **Principios de Geofísica Aplicada**. Editorial Paraninfo, Madrid. 208 p.
- PARNAUD, F; I. TRUSKOWSKI; O. GOU; J. GALLANGO; H. PASCUAL y F. ROURE (1995) **Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuelan Basin**. AAPG, Memoria 62: 699-726 p.
- PetroUCV, S.A. (2001). **Plan de Desarrollo del Área Mayor de Socororo 2002-2021**. Caracas: Inédito.
- REINA, J. (2002) **Interpretación sísmica 3D estructural y estratigráfica del Proyecto Socororo al Sur del Estado Anzoátegui**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- RODRÍGUEZ, I. (1974) **Investigación Gravimétrica en la región Noroccidental de Venezuela**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

- RODRÍGUEZ, I. (1983) **La Investigación Gravimétrica en la exploración de plutones graníticos**. Trabajo de Ascenso. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- SÁNCHEZ, F. (1999) **Mediciones de variación de amplitud con la distancia en datos sísmicos terrestres**. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- SCHLUMBERGER, (1972) **Interpretación de Perfiles**. s.e., New York. s.p.
- SCHLUMBERGER, (1980) **Evaluación de Formaciones de Venezuela**. s.e., Venezuela. s.p.
- SCHLUMBERGER, (1997) **Evaluación de Pozos**. s.e., Venezuela. s.p.
- SCHMITZ, M; A. MARTINS; C. IZARRA; M. JÁCOME; J. SÁNCHEZ y V. ROCABADO (2005) **The major features of the crustal structure in north-eastern Venezuela from deep wide-angle seismic observations and gravity modeling**, *Tectonophysics*, 399: 109-124.
- SCHMITZ, M; J. AVILA; M. BEZADA; E. VIEIRA; M. YÁNEZ; A. LEVANDER; C. ZELT; M. JÁCOME y M. MAGNANI (2006) **Cristal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations**. En imprenta.
- SHERIFF, E; L. GELDART y W. TELFORD (1990) **Applied Geophysics**. New York. 772 p.
- SPIEGEL, M. y L. STEPHENS (2002) **Estadística**. Editorial Mc Graw Hill, México. 541 p.

USECHE, D. y G. VILLAMEDINA (2005) **Estudio estratigráfico-sedimentológico en las Formaciones Merecure y Oficina del campo Socororo este, flanco sur, Cuenca Oriental de Venezuela, Edo. Anzoátegui - Venezuela.** Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

YORIS, F y M. OSTOS (2004) **Overview of the southeast Caribbean / South American plate boundary zone.** En imprenta.

APÉNDICE 1

Tabla A1. Estaciones de gravedad utilizadas para la construcción del mapa de Anomalía de Bouguer.
 Proyección: UTM, Huso 20; Datum Geodésico: La Canoa; Elipsoide: SAMD56.

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
1	315307,8	967006,49	-31,87
2	314788,7	967070,3	-41,44
3	315465,12	967988,92	-30,23
4	315099,82	968236,32	-30,18
6	315729,86	985991,37	-39,39
7	314132,29	984185,98	-20,25
8	316061,16	978001,83	-23,68
9	316609,68	977907,35	-22,69
10	317129,87	977874,17	-23,52
11	317679,06	977933,21	-22,94
12	315632,28	977788,75	-22,7
13	315173,83	977852,31	-24,18
14	315047,56	976931,12	-27,22
15	315324,66	977390,75	-20,47
16	314473,81	978500,62	-22,35
17	314776,99	978161,36	-22,44
18	315298,43	978404,76	-21,66
19	315666,27	978740,99	-22,85
20	316156,47	978892,41	-21,72
21	316676,37	979043,71	-23,48
22	317164,92	979072,26	-24,38
23	317684,54	979162,08	-23,41
24	314997,2	979419,9	-22,26
25	314508,24	979299,24	-22,54
26	314018,45	979239,98	-23,37
27	314204,52	979761,51	-22,99
28	314298,06	980252,6	-24,6
29	313620,21	978996,03	-22,69
30	313252,5	978690,45	-23,48
31	312456,15	984930,96	-21,35
32	313006,8	985082,15	-24,09
33	313953,51	985016,32	-23,7
34	313464,63	985141,44	-21,69
35	312179,34	984532,95	-21,42
36	311629,67	984596,88	-22,97
37	311170,16	984414,75	-20,39
38	310650,86	984386,41	-20,6
39	310801,89	983986,2	-20,05
40	313614,24	984188,35	-22,65
41	312633,78	983854,84	-20,51

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalia de Bouguer (mGal)
43	312483,02	984316,43	-21,46
44	315211,3	986116,61	-24,16
45	313711,31	985447,56	-23,9
46	313438,61	985940,34	-22,14
47	311957,9	983028,54	-20,8
48	312112,64	983427,11	-22,28
49	312477,21	983056,78	-22,93
50	313056,57	982746,85	-24,65
51	312938,54	983392,66	-20,99
52	313366,01	983544,22	-23,98
53	313425,35	983052,42	-23,59
54	312933,6	982317,28	-24,64
55	312412,61	982166,15	-23,16
56	311952,94	981953,15	-22,75
57	312380,12	981797,56	-22,97
58	312103	981338,05	-20,7
59	311553,29	981401,97	-20,79
60	311096,27	981526,96	-21,07
61	310784,35	980207,35	-14,9
62	311243,1	980450,99	-17,25
63	311733,45	980632,99	-22,95
64	312131,82	980907,78	-22,2
65	311635,24	979373,76	-19,8
66	311516,5	979866,06	-20,97
67	310964,82	979745,73	-19,09
68	310233,91	980117,76	-21,19
69	321118,39	981573,91	-47,03
70	320901,74	981083,36	-46,04
71	321359,34	980835,59	-46,19
72	321602,32	980558,04	-46,33
73	320592,85	980378,2	-45,75
74	320315,96	979949,29	-45,63
75	321175,52	980805,66	-46,88
76	321459,27	982555,65	-47,21
77	321613,34	983077,12	-47,52
78	322011,61	983351,98	-48,71
79	324364,37	983372,4	-48,74
80	318426,99	981125,04	-45,36
81	319832,72	981118,8	-52,14
82	319406,06	981397,09	-47,5
83	319316,95	981889,21	-46,73
84	318890,17	982136,86	-45,77

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
85	319288,61	982442,34	-46,86
86	319777,51	982563,06	-47,29
87	320267,65	982714,4	-47,39
88	320787,34	982834,99	-46,77
89	321002,48	983233,53	-45,27
90	321431,41	983477,4	-47,11
91	320943,61	983602,42	-46,43
92	320823,95	984155,94	-46,6
93	321008,56	984616	-47,77
94	320581,28	984495	-45,27
95	319922,53	980780,42	-44,41
96	319464,27	980628,93	-45,3
97	319064,73	980077,69	-44,18
99	318429,45	981678,04	-45,08
100	317973,65	982079,45	-45,48
101	319932,71	983084,51	-43,28
102	319659,23	983423,72	-47,75
103	319199,89	983272,13	-46,38
104	316125,37	985651,58	-25,43
105	316735,64	985372,31	-25,67
106	316397	984912,96	-24,07
107	316670,16	984512,45	-24,94
108	316943,34	984111,73	-24,7
109	317010,04	985248,2	-26,2
110	316885,61	984972,25	-24,22
111	317283,77	984970,46	-24,22
112	312943,6	978015,95	-30,08
113	318204,2	985918,72	-26,32
114	318692,8	985978,03	-26,84
115	318599,87	985609,81	-26,46
116	318201,31	985273,6	-25,92
117	317591,46	985399,21	-24,38
118	313053,04	981978,84	-22,71
119	313541,39	981730,73	-22,55
120	314060,16	981636,22	-23,16
121	314548,13	981541,87	-23,6
122	315159,43	981477,6	-24,05
123	315587,86	981598,54	-24,57
124	316077,62	981657,83	-25,27
125	316565,58	981563,5	-23,41
126	317054,11	981591,94	-24,64
127	313634,66	982160,55	-23,29

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
128	314153,42	982065,94	-24,08
129	314642,22	982155,96	-23,87
130	314621,33	984091,49	-23,43
131	315019,65	984366,31	-22,75
132	315476,22	984149,1	-23,15
133	315751,18	983901,99	-22,23
134	315102,41	982246	-23,31
135	315225,5	982706,32	-23,69
136	315624,1	983042,4	-24,92
137	316084,7	983224,59	-23,65
138	322896,91	983071,51	-48,2
139	323353,25	982793,15	-48,3
140	323627,6	982392,48	-48,37
141	323961,34	981991,76	-46,41
142	323867,79	981469,81	-46,84
143	323987,89	981008,43	-46,33
144	324451,46	982143,17	-47,77
145	324666,82	982603,1	-48,91
146	324632,06	981681,53	-47,57
147	324752,04	981189,51	-46,87
148	324719,13	980698,16	-47,25
149	322960,91	983624,22	-47,9
150	323417,65	983437,99	-47,49
151	323754,17	983682,27	-52,23
152	324062,06	984172,55	-54,82
153	323942,1	984664,58	-52,41
154	323760,57	985156,97	-51,16
155	323457,52	985526,92	-51,93
156	322969,74	985651,92	-40,79
157	315650,79	975300,22	-21,65
158	316019,2	975759,34	-21,91
159	316138,14	974806,3	-21,76
160	315587,11	974839,52	-22,58
161	316170,46	975389,91	-21,68
162	316075,71	974622,32	-21,3
163	316657,96	974926,96	-20,47
164	316873,71	975202,51	-20,54
165	317330,13	974923,97	-21,15
166	317881,83	975290,26	-20,52
167	317181,05	975784,9	-22,07
168	317732,05	975997,45	-22,41
169	317698,94	975229,58	-22,58

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
170	317883,19	975597,4	-15,73
171	318068,55	975965,21	-20,74
172	317880,2	974921,52	-19,71
173	318247,35	975104,27	-21,26
174	317389,83	974493,47	-19,55
175	317205,43	974340,77	-17,2
176	318180,19	973599,18	-16,67
177	319860,28	973376,67	-18,96
178	316808,4	974373,18	-20,71
179	317540,7	974032,03	-20,03
180	318151,96	974182,95	-21,99
181	318791,59	973780,74	-20,27
182	319250,35	973778,72	-24
183	319707,76	973469,58	-19,61
184	319887,43	972792,92	-19,84
185	320071,02	972761,25	-21,58
186	319892,41	973929,52	-20,6
187	319894,97	974513,26	-21,86
188	319439,21	974945,39	-22,23
189	319410,7	975467,77	-22,86
190	318053,31	972524,37	-20,58
191	317257,33	972405,02	-20,12
192	317075,65	972620,94	-20,7
193	316648,77	972868,6	-20,61
194	317012,68	972313,86	-20,27
195	317377,83	971790,09	-19,42
196	317803,35	971480,96	-19,29
197	318322,39	971417,18	-18,61
198	317221,76	971084,04	-18,22
199	317221,76	971084,04	-17,33
200	316910,85	969948,66	-15,99
201	317306,56	969609,02	-16,66
202	317059,57	968995,73	-16,15
203	316873,37	968443,54	-16,04
204	317268,41	967950,18	-15,95
205	317786,68	967702,13	-15,5
206	317845,86	967148,87	-13,88
207	318057,43	966717,81	-12,88
208	318484,14	966162,94	-13,08
209	318970,02	965546,43	-11,97
210	318565,7	970955,23	-18,88
211	318716,47	970463,06	-16,13

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
212	318926,55	969694,02	-16,74
213	319598,8	969691,07	-15,59
214	320240,95	969596,15	-16,47
215	320758,94	969286,76	-17,73
216	319322,27	969354,4	-16,36
217	319779,2	968922,28	-16,07
218	320143,72	968490,68	-18,22
219	316813,12	968751,06	-16,01
220	316384,7	968414,96	-17,81
221	316478,76	969028,93	-13,28
222	316626,24	967799,39	-12,86
223	315923,15	967802,51	-14,27
224	315614,24	967128	-13,43
225	316222,31	973208,39	-18,5
226	315888,68	973640,01	-18,58
227	315615,84	974132,75	-20,61
228	315341,78	974594,86	-23,73
229	315039,53	975149,24	-20,3
230	314856,91	975395,81	-20,59
231	315013,57	976224,74	-22,33
232	314923,79	976808,8	-21,04
233	314619,92	977240,31	-21,8
234	314072,09	977488,66	-21,47
235	313553,01	977767,42	-22,26
236	313066,82	978261,27	-21,81
237	312560,7	981120,82	-20,47
238	313048,81	981057,08	-21,77
239	313174,26	981548,14	-23,06
240	313723,85	981699,25	-23,75
243	313051,49	981640,84	-22,63
244	315740,9	981628,6	-24,27
245	316259,67	981534,13	-25,09
246	316718,62	981593,44	-23,99
247	316048,08	982180,22	-23,93
248	316453,88	977262,79	-25,84
249	316866,42	980701,88	-26,45
250	316559,79	980273,13	-26,9
251	316130,79	980029,3	-25,42
252	315701,36	979693,24	-22,8
253	315182,02	979664,94	-22,98
254	314663,09	979728,79	-22,67
255	314111,84	979700,44	-24,02

Continuación Tabla 1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
256	313956,71	979209,62	-22,22
257	313497,83	978935,2	-22,76
258	313438,05	979334,86	-21,52
259	314169,53	978840,01	-22,6
260	314166,89	978256,25	-20,11
261	320376,6	972698,54	-17,21
262	320895,61	972634,79	-19,01
263	322029,51	973305,73	-20,18
264	322184,69	973827,42	-15,3
265	322278,26	974349,15	-17,92
266	321820,18	974504,87	-21,01
267	321270,82	974415,02	-18,91
268	320719,93	974478,8	-18,36
269	314180,16	981174,79	-24,34
270	314335,99	981819,34	-24,22
271	314856,7	982154,99	-22,18
272	315316,64	982429,29	-20,28
273	315164,44	982583,72	-23,43
274	316022,69	983132,85	-23,22
275	316328,04	983039,22	-26,54
276	322822,63	973025,92	-19,56
277	323402,85	972869,7	-20,46
278	322820,78	972595,81	-20,5
279	324256,27	972282,31	-19,64
280	324683,13	972280,49	-17,06
281	325078,65	971633,81	-19,55
282	325812,15	971814,95	-21,91
283	326086,03	971537,3	-21,26
284	326758,62	971626,71	-18,42
285	327127,75	972024,41	-21,85
286	327465,95	972391,61	-19,56
287	324222,98	971698,83	-20,66
288	325720,45	971723,1	-19,17
289	323214,64	971826,02	-21,05
290	322818,92	972165,6	-17,94
291	322785,48	971551,36	-19,89
292	322295,63	971491,98	-17,85
293	321380,62	971833,92	-17,08
294	321229,7	972295,33	-21,51
295	321378,36	971311,68	-17,89
296	321315,45	970758,97	-16,98
297	321313,33	970267,36	-16,5

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
299	320274,67	970517,73	-15,23
300	319876,55	970304,36	-16,01
301	325229,49	971141,56	-19,19
302	325440,99	970679,8	-18,84
303	325774,98	970309,77	-18,65
304	325925,72	969786,78	-17,9
305	325437,99	969973,21	-17,68
306	325929,86	970769,98	-15,44
307	326450,51	970829,17	-16,97
308	325165,02	970465,97	-18,27
309	324796,56	969975,93	-16,45
310	324518,32	969485,62	-14,15
311	324272,11	969025,8	-17,09
312	324300,69	968503,44	-14,54
313	325123,68	967977,71	-14,53
314	324573,41	967949,3	-13,93
315	324307,4	977289,74	-14,86
316	324310,23	970746,1	-17,79
317	324277,2	970223,89	-18,69
318	324245,41	969732,52	-16,17
319	324755,2	967487,67	-10,21
320	324935,77	966995,41	-12,52
321	325270,91	966625,27	-11,83
322	325728,58	966346,95	-11,65
323	326216,35	966160,54	-17,18
324	325197,33	971080,31	-11,22
325	321867,82	971278,82	-18,59
327	322138,24	970202,41	-16,52
328	322166,93	969710,68	-18,13
329	322656,36	969923,58	-13,29
330	323114,05	969921,61	-16,33
331	323604,31	970073,25	-16,5
332	324451,15	967919,06	-13,14
333	326642,96	965820,77	-9,34
334	326855,59	965359,02	-7,45
335	327374,83	965326,23	-10,8
336	327862,86	965201,33	-12,63
337	328780,67	965228,17	-10,38
338	328779,27	964890,3	-12,96
339	328990,46	964336,46	-11,66
340	329448,04	964027,45	-8,69
341	325329,1	966072,03	-18,6

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
342	325113,69	965612,19	-19,84
343	325448,97	965272,8	-19,39
344	325599,98	964811,31	-19,49
345	324478,05	966997,34	-21,43
346	324139,66	966599,41	-19,36
347	323802,36	966201,48	-19,59
348	323585,84	965741,54	-19,41
349	323309,05	965343,35	-17,63
350	322910,38	965007,06	-18,43
351	322511,7	964670,89	-18,51
352	322113,15	964365,35	-15,52
353	323096,05	965712,88	-20,58
354	323404,49	966049,55	-19,93
355	325455,96	966931,72	-22,99
356	326584,55	966589,1	-16,98
357	326891,98	966956,44	-20
358	327199,53	967354,51	-16,3
359	327170,25	967723,26	-20,68
360	327111,8	968215,09	-20,8
361	327265,69	968706,05	-22,29
362	327482,16	969165,89	-25,03
363	327484,47	969718,87	-23,43
364	327119,64	970089	-24,51
365	322862,44	975114,74	-21,37
366	322706,87	974501,04	-21,76
367	322987,46	975790,07	-22,3
368	323386,58	976249,21	-23,48
369	323755,84	976677,73	-23,83
370	324305,55	976859,74	-25,08
371	324885,73	976703,53	-24,81
372	325466,54	976701,05	-25,11
373	325986,67	976913,95	-24,71
374	326567,88	977003,62	-25,74
375	327057,59	977308,9	-25,74
376	327547,03	977552,57	-25,83
377	328067,2	977519,64	-23,57
378	328080,76	973402,86	-23,22
379	328165,54	978932,32	-25,78
380	328014,97	979486,04	-26,13
381	327556,49	979795,21	-26,75
383	326703,13	980105,95	-25,62
384	326307,75	980507	-25,36

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
385	326276,95	980507,13	-24,88
387	330133,47	982119,08	-25,54
391	328504,64	979791,22	-25,3
392	328934,06	980158,04	-25,92
393	329394,15	980493,98	-25,01
394	329791,78	980891,68	-24,98
395	330282,13	981104,64	-26,4
396	330191,61	981289,37	-23,03
397	330254,41	981842,2	-24,56
398	330012,03	982273,32	-30,92
399	329799,61	982765,69	-26,91
400	319444,07	976051,26	-21,14
401	319446,64	976635	-23,7
402	319661,67	977002,8	-22,63
403	320081,51	975157,57	-19,53
404	321267,74	973708,52	-21,97
405	320806,55	973403,28	-20,21
406	322549,71	973518,61	-22,65
407	322948,45	973885,5	-21,71
408	323438,92	974098,4	-20,72
409	323989,65	974249,77	-21,68
410	324608,74	976243,97	-21,05
411	324576,94	975752,6	-19,67
412	326815,2	977739,92	-24,69
413	326511,1	978140,57	-26,21
414	326391,22	978663,43	-26,6
415	325934,41	978849,63	-24,38
416	326028,06	979402,22	-23,9
417	325509	979435,17	-24,91
418	323046,64	975482,57	-19,6
419	322499,7	975945,8	-23,25
420	322011,49	976255,16	-21,76
421	321003	976321,04	-22,2
422	320483,35	976231,07	-20,73
423	322179,99	965839,67	-20,06
424	321811,99	965472,62	-19,9
425	321322,64	965290,36	-18,37
426	324596,28	973325,46	-28,23
427	324231,37	973664,89	-29,53
428	324778,17	972894,67	-27,68
429	325328,63	972984,36	-28,93
430	323984,39	973020,94	-30,83

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
431	322790,1	972626,58	-29
432	321056,25	981451,31	-46,51
433	320839,74	980991,5	-45,16
434	320684,68	980500,67	-43,86
435	320470,5	980071,49	-45,15
436	321489,24	982616,9	-47,73
437	321644,55	983169,22	-47,04
438	324667,22	982695,22	-46,68
439	324572,85	982234,88	-44,32
441	326407,16	982411,39	-49,31
442	326773,99	982286,95	-48
443	326709,39	981580,51	-49,35
444	327076,05	981671,09	-49,93
445	327381,18	981516,29	-49,91
446	327749,71	981791,22	-49,14
447	327751,52	982221,32	-50,63
448	327935,92	982650,65	-43,08
449	327694,09	983204,66	-48,92
450	327448,23	982806,22	-47,41
451	327142,08	982715,39	-48,59
452	327503,45	981300,65	-42,38
453	326739,15	981334,65	-49,44
454	326554,55	981120,31	-49,46
455	320229,81	981117,05	-45,41
456	320291,81	981208,92	-46,12
457	319436,19	981243,44	-45,6
458	319469,02	981704,05	-46,22
460	318889,22	981921,75	-46,21
461	318553,46	981861,86	-45,46
462	318338,57	981770,57	-46,7
463	317848,4	981619,13	-45,86
464	320350,41	980778,53	-44,85
465	320289,65	980717,41	-46,72
466	320653,77	980224,2	-46,4
467	321356,65	980221,12	-44,54
468	320622,45	979855,71	-44,85
470	323687,7	982300,19	-48,26
471	323505,47	982638,86	-49,68
472	323077,48	982609,97	-48,34
473	318892,51	968956,91	-19,64
474	318311,7	968990,2	-16,9
475	317791,82	968869,61	-12,17

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
476	315369,26	973611,71	-13,23
477	314847,77	973368,18	-14,97
478	314237,17	973370,93	-14,64
479	314208,31	973801,2	-14,4
480	313719,55	973742,03	-14,99
481	313168,09	973683,04	-15,34
482	312739,84	973623,6	-15,31
483	312342,1	973502,53	-9,3
484	312800,05	973316,06	-12,41
485	313319,34	973313,7	-13,51
486	313134,62	972853,66	-14,96
487	312826,8	972424,92	-14,85
488	312640,96	971964,88	-11,66
489	313873,33	974171,35	-9,51
490	313538,35	974541,62	-10,4
491	313080,55	974512,84	-11,06
492	312715,17	974729,64	-12,92
493	312348,7	974946,43	-15,28
494	312729,78	971411,46	-14,41
495	312421,94	970982,72	-15,15
496	312695,88	970489,95	-12,5
497	316432,04	972377,94	-20,26
498	316278,16	971917,86	-17,03
499	316152,6	971396,05	-19,08
500	316029,53	970935,83	-15,48
501	316035,29	972226,09	-20,66
502	318574,14	965855,3	-14,27
503	318084,06	965765,31	-13,46
504	317564,56	965736,85	-9,37
505	317075,31	965585,38	-16,68
508	320896,62	979915,89	-49,1
509	321421,99	981326,83	-48,42
510	323866,86	981254,7	-47,49
511	323741,42	980733,11	-46,69
512	324136,95	980116,92	-46,21
513	322885,3	980398,83	-46,33
514	322213,76	980524,63	-46,94
515	321968,09	980187,81	-45,73
516	322272,82	979940,74	-46,01
517	322851,17	979630,98	-41,03
518	321873,96	979788,73	-42,63
519	321841,82	979481,74	-43,57

Continuación Tabla A1

Estación	Longitud	Latitud	Anomalía de Bouguer (mGal)
520	322636,3	979293,92	-43,34
521	322239,18	979541,39	-42,8
522	322237,04	979049,9	-43
523	321202,41	979914,55	-42,77
524	321476,33	979667,59	-44,2
525	320765,36	977827,45	-41,65
526	320707,15	978349,96	-42,88
527	320862,21	978840,78	-41,7
528	321199,72	979300,17	-44,39
529	321600,04	980035,79	-44,74
530	323805,8	981377,84	-47,85
532	324006,26	978120,63	-35,57
533	323210,55	978031,82	-31,42
534	323697,41	977415,35	-30,06
535	323112,89	976557,63	-26,5
536	318226,91	977193,4	-26,73
537	317889,2	976949,14	-24,08
538	317097,28	977475,04	-20,09
539	316578,18	977507,99	-23,05
540	316394,48	977508,82	-24,15
541	315599,13	977512,39	-23,99
542	315140,12	977207,2	-24,09
543	315260,01	976715,15	-23,76
544	315993,63	976681,1	-26,1
545	316543,81	976709,38	-25,33
546	317184,88	976645,02	-24,6
547	318009,67	976579,97	-22,34
548	318589,83	976423,78	-22,4
549	319262,38	976512,93	-18,27
550	321108,81	972326,61	-19,23
551	321567,56	972570,48	-24,85
552	317106,87	972712,93	-13,04
553	316611,05	978214,48	-18,35
554	317499,74	978671,28	-19,63
555	318325,85	978913,47	-22,02
556	317041,3	978734,82	-25,47
557	316460,21	978675,93	-23,8
558	315879,8	978525,02	-23,64
559	315355,61	977667,11	-23,58
560	314241,33	981082,39	-23,83

APÉNDICE 2

Tabla A2. Inventario de las líneas sísmicas 2D disponibles en el Laboratorio de Interpretación del Subsuelo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

LEVANTAMIENTO	LÍNEA SÍSMICA 2D
SOCORORO_77D	S-77D-01DN (02,03,04,05,06,07,08)
SO_77D_1	S-77D-03DV (05,06,07)
LS-80A-1	LS-DV-11 (12,13,14,4,5,6,7)
GR-99-SOC_75_77	S-75A-01A (01B,02A,02B,03,04,05A,05B,06A,06B,09,11,12A,12B,13NA,13NB,13S,14,18,19)
	S-77D-01DV (04,05,06,08,10,11,12)
GO_YOPALES_75A	Y-75A-20-DV (28,29,30)
CARICARI-75A	C-75A-01 (02-19, 21 y 22)
CACHAMA_TASC_91A	CT-91A-01 (03,05,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,26,28)
BUDARE_78_2D	BU-78A-12 (13,14,15,16,17,18,19,20,G,H,I,J,K,L,M,N)
BUDARE_2D_1996	BUD-96-A09 (11,13,15,17)

APÉNDICE 3

Tabla A3. Coordenadas de los pozos utilizados en la investigación.

POZO	LONGITUD	LATITUD
CAR003	321753,40	979825,40
CAR007	321681,60	979430,80
ES401	324778,29	969796,95
ES428	317491,31	974859,75
ES430	320362,10	977286,81
ES431	319324,25	973309,96
ES432	317699,85	974548,82
ES434	316900,68	974554,22
ES439	320695,39	970940,76
ES448	317692,70	975218,92
ES451	325200,02	969919,99
ES454	325936,01	969647,00
ES460	325230,00	969919,00
SOC003	325745,51	969826,33
SOC004	325387,61	969664,09