

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS ESPECTRAL Y MODELADO 3D DE DATOS
GRAVIMÉTRICOS DE LA CUENCA DE CARORA, ESTADO
LARA-VENEZUELA.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Martínez R. Carolina D.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas Junio 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS ESPECTRAL Y MODELADO 3D DE DATOS GRAVIMÉTRICOS DE LA CUENCA DE CARORA, ESTADO LARA-VENEZUELA.

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Michael Schmitz.
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Javier Sánchez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Martínez R. Carolina D.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas Junio 2007

Caracas, Julio, 2007

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la bachiller Carolina Martínez, titulado:

**“ANÁLISIS ESPECTRAL Y MODELADO 3D DE DATOS
GRAVIMÉTRICOS DE LA CUENCA DE CARORA, ESTADO
LARA-VENEZUELA.”**

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

Inírida Rodríguez

Ricardo Alezones

Dr. Michael Smithz

Javier Sánchez

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a muchas personas, ellos han sido mi apoyo, mis héroes, mis hombros y mí día a día, se los dedico muy especialmente por que han estado, están y estarán siempre en mí y les debo lo que soy, cada uno ha contribuido de la alguna manera a formarme como mujer, persona y profesional.

Primeramente se lo debo a mi DIOS por haberme dado la oportunidad de vivir y a mí DIVINO NIÑO JESUS por estar en cada momento de mi vida, a mis padres Carmen Rodríguez e Isidro Martínez por ser mi motivación para ser esto posible, son mi mas grande tesoro, a mi hermana Maria del Carmen por recordarme cada día lo grande que podemos ser “TE QUIERO” a mi hermano adorado mi orgullo y mi dolor de cabeza gracias por estar, los “amo “.

No debe faltar una persona que ha formado parte significativa de mi vida eres la hermana mayor que siempre quise tener (no te moleste por lo de mayor), la distinguida profesora Carolina Pfaff y mi bello sobrino David, gracias amiga por tu apoyo por cada día y por guiarme y orientarme a darme cuenta que si se puede alcanzar las metas, a mis amigos y hermano de escuela y vida Ing. Eduin Amaris (mi guigui) e Ing Oscar Guzmán (mi oscarito) y a Ing Jesús Alberto Moncada por ser un buen amigo, padre y tutor gracias a ti pudo ser realidad. Gracias amigos por enseñarme lo bella que es la amistad.

A mis héroes de esta historia mi tía Luisa por su incansable labor de ser el pilar de toda una familia, eres lo mas bello y grande de la familia a mi tía Elba, por ser ejemplo de humildad amor y solidaridad gracias a dios que te tengo y a mi tía Claret por ser mi ejemplo desde muy niña. A mi familia entera tíos (Nico, Lucas, Franco, Pedro Enrique, Julia, Aleja) primos y sobrino a todos ustedes va dedicado mi trabajo perdón si se me escapa uno...

A mi bella querida y extrañada Mama Elvira, por guiarme y darme la lección de vida más grande que he tenido, el amor por los demás.

A una personita muy especial que partió de este mundo dejando en mi, besos y abrazos por darle gracias por brindarme la oportunidad de amarte y quererte para ti *Dahibb Suárez te extraño..* Y por ultimo a un querido y extrañado personaje eres y serás la alegría picardía que iluminó mi casa, por ser un hombre tan especial gracias por darme el placer y el orgullo de ser tu prima te voy a extrañar toda la vida...*Nicol “TE QUIERO”.*

Carolina Martínez.

AGRADECIMIENTOS

Este humilde agradecimiento va dirigido a mi eterno compañero y amigo que nunca que me ha defraudado a ti mi Dios querido.

A la ilustre y Magna casa de estudio Universidad Central de Venezuela, por haberme permitido estar en sus aulas y dejarme realizar mi sueño de estar allí y formarme como lo que siempre soñé.

A los profesores del departamento de Geofísica, a los profesores Franck Audemard y Franco Urbani por su orientación y valiosa colaboración.

Al Dr. Gustavo Malave por darme la oportunidad de crecer profesionalmente, al Dr. Michael Schmitz y todo el personal de FUNVISIS por hacer que mi estadía allí fuese amena a ustedes mil gracias.

A la profesora Miriam Rodríguez, Albita Terán, y todos los profesores del Departamento de Química Aplicada de UCV.

A la señorita Milangela Barbesí, el señor Hugo Bello, Francisco Araujo y el señor Freddy Fernández (INTEVEP), gracia por su bella y valiosa colaboración.

A mi amiga bella e invaluable la señorita Mónica Paolini y a la Familia Paolini por brindarme su calor de hogar sin conocerme, gracias por confiar en mi.

A mi compañero y amigo mi Fabi Fabi por estar siempre pendiente y no abandonarnos.

A mi querido Monqui, papito y la señorita Irlanda gracias, que dios los Bendiga siempre!!.

A mi bella señora Maria Tesorero y su bella Familia,

A mis compañeros de la UCV por todos los años que compartimos juntos.

A mis Ángeles hermosos que nunca me abandonaron gracias.

Gracias Claudia Quinteros (Klao) por acompañarme.

Al señor Antonio Ugui gracias por ser Profesor y amigo de la escuela y por esas clases magistrales.

Gracias a mi tía Aleja por ser tan incondicional y a mi negra bella (Joana) por estar siempre pendiente de mi.

Gracia muy especialmente a todas aquellas personas que creyeron en mi, por su motivación y apoyo y las que no, por enseñarme que nadie es mejor que nadie y que la humildad es la mejor herramienta para cosechar éxitos!!...

Mil gracias

Martínez R. Carolina D

ANÁLISIS ESPECTRAL Y MODELADO 3D DE DATOS GRAVIMÉTRICOS DE LA CUENCA DE CARORA, ESTADO LARA-VENEZUELA.

Tutor Académico: Dr. Michael Schmitz. Tutor Industrial: Ing. Javier Sánchez Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología Minas y Geofísica (Geofísica). 2007, n° pag. (206).

Palabras Claves: (Gravimetría, Espesor sedimentario, Análisis Espectral, Modelo tridimensional)

Resumen.

En el marco del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Carora, este trabajo tiene como objetivo principal determinar la geometría y profundidad de la cuenca Sabana de Carora, a partir del modelado gravimétrico tridimensional y análisis espectral de los datos.

Como resultado se obtuvo el mapa de anomalías de Bouguer. Las curvas poseen diferentes tendencias: al sur-oeste del mapa poseen una dirección NO-SE mientras que al nor-este su tendencia es NE-SO, ubicando los máximos valores de 48 mGal al noroeste de la zona de estudio en la cercanía de Quebrada Arriba y en la ciudad de Carora, Aregue y Altagracia disminuyendo en dirección NE-SO con un gradiente de 1,5 mGal/km. Se evidencia un mínimo al noroeste del mapa con valores de -25 mGal, en la cercanías de Santa Rita, Burro y Planes de Guayabo el cual correspondiente a la depresión de Diquiva, asociado a los efectos de los sedimentos de la cuenca, un cierre más al oeste el cual corresponde a un máximo que coincide con la terminación de la serranía de Baragua al norte de la cuenca.

Los valores de anomalías de Bouguer fueron procesados a una densidad de referencia de 2,4 gr/cc y llevados a 600 metros sobre el nivel medio del mar, valor de altura máximo donde se encuentra ubicada la cuenca de Sabana de Carora

Se realizó el mapa de espesores de sedimentos. Éstos se encuentran entre 60 y 1200 m aproximadamente, vinculados a la depresión de Diquiva y al frente de corrimiento inverso ubicado al norte de la cuenca Sabana de Carora específicamente en el flanco sur de la serranía de Baragua.

De acuerdo a un análisis estadístico y geoestadístico de la anomalía de Bouguer, los datos presentan un comportamiento normal. El modelo teórico que más se ajusta es el variograma Gausseano, usado principalmente para representar superficies suaves. La roseta de distribución espacial y la elipse de anisotropía muestran que la zona de mayor continuidad espacial tiene una dirección de NE-SO.

El análisis espectral realizado en toda la zona, indica que las fuentes principales de la anomalía gravimétrica se encuentran a 2400, 4000 y 10000 m de profundidad, concordando con los resultados de la deconvolución de Euler realizada en la zona de estudio.

Se realizó un modelo tridimensional basado en modelos bidimensionales orientados NO-SE y dos perfiles longitudinales perpendiculares a la dirección de los mismos. Esta selección fue hecha en base a los principales sistemas geológicos estructurales ubicados en la zona de estudio, en la que se estima una profundidad máxima de 1200 metros.

Estos modelos tienen coherencia con la geología de la zona, datos geofísicos existentes, mapa de espesores de sedimentos, análisis espectral y los resultados de la deconvolución de Euler.

Todos los datos fueron incluidos en el SIG (Sistema de Información geográfica) de FUNVISIS.

ÍNDICE GENERAL

	Pag
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. UBICACIÓN	3
4. JUSTIFICACIÓN	7
5. TRABAJOS PREVIOS	9
5.1 Descripción de modelos geológicos	18
6. SISMICIDAD	21
CAPÍTULO II	22
2. PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA	22
2.1 PRINCIPIO DE LA GRAVIMÉTRIA	22
2.2.1 Ley de atracción gravitatoria de Newton.	22
2.1.2 Aceleración de gravedad	24
2.2 UNIDADES	25
2.3 POTENCIAL GRAVITATORIO	26
2.4 GRAVEDAD DE LA TIERRA	27
2.5 EL GEOIDE	27
2.6 MÉTODO GRAVIMÉTRICO	30
2.7 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA	31
2.7.1 La distribución de la densidad de la tierra y las anomalías globales de la gravedad.	31
2.8 AJUSTES Y CORRECCIONES DEL MÉTODO GRAVIMÉTRICO	34
2.8.1 Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre con la latitud.	34
2.8.1.1 Corrección por latitud	34

2.8.2 Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre con la altitud.	35
2.8.2.1 Corrección por altura o aire libre	35
2.8.2.2 Corrección de Bouguer	36
2.8.2.3 Corrección topográfica	36
2.8.3. Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre con el Tiempo	38
2.8.3.1 Efecto de las mareas.	38
2.8.3.2 Deriva instrumental	39
2.9 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE GRAVEDAD	39
2.9.1 Péndulo:	39
2.9.2 Balanza de torsión	40
2.9.3 Gravímetro	40
2.9.3.1 Gravímetros estables	40
2.9.3.2 Gravímetros inestables	41
2.10 ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS	41
2.10.1 La anomalía de Bouguer (AB)	42
2.11 Estadística y Geoestadística de los datos gravimétricos.	43
2.11.1 Histogramas	44
2.11.2 Variogramas	46
2.11.3 Modelos de Variogramas	48
2.12 Análisis espectral	49
2.13 Deconvolución de Euler	51
2.13.1 Análisis de la deconvolución de Euler	53
CAPÍTULO III	56
3.1 Geología regional	56
3.1.1 TECTÓNICA REGIONAL	56
3.1.1.1 La falla de Boconó	61
3.1.1.2 La falla de Valera	62
3.1.1.3. La falla de Oca-Ancón	62
3.2 Geología estructural local	64
3.2.1 Prolongación del corrimiento Carora-El Tocuyo	65

3.2.2 Falla de Burbusay	65
3.2.2.1 La traza activa de la falla de Burbusay	66
3.2.2.2 Terminación suroccidental de la Sierra de Baragua	66
3.3. Características de los relieves que circundan la cuenca de Sabanas de Carora.	71
CAPÍTULO IV	75
4.1 TRABAJOS PREVIOS A LA ADQUISICIÓN	75
4.2 TRABAJO DE CAMPO	76
4.2.1 Mediciones gravimétricas en zona de la cuenca de sabana de Carora área constituida por los estados: Lara, Zulia, Falcón y Trujillo (regional):	76
4.2.2 Mediciones gravimétricas en zona urbana de la ciudad de Carora:	77
4.3 SOPORTE INSTRUMENTAL	80
4.4 AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS	82
4.4.1.1 Especificaciones	83
4.4.1.3 Corrección de la deriva instrumental (Drift correction).	85
4.4.2 Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-5	87
4.4.1.4 Corrección de la deriva instrumental (Drift correction).	87
4.4.3 Posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700	89
4.5 Adquisición de datos	90
4.5.1 Adquisición gravimétrica.	90
4.5.2 Adquisición topográfica	90
CAPÍTULO V	95
5.1 procesamiento	95
Estimación de densidad	97
5.1.1 Nettleton	97
5.1.2 Parasnis	99
5.1.3 Litología	101
5.1.4 Conversión de velocidades V_p vs densidad	101
5.2 Corrección por mareas y deriva instrumental.	104
5.3 Cálculo de gravedad observada.	105
5.4 Cálculos de anomalías de Bouguer.	107

5.4.2 Corrección de Bouguer	108
5.4.3 Corrección topográfica	108
5.5 Evaluación Estadística y Geoestadística de los Datos Gravimétricos.	116
5.5.1 Análisis Estadísticos de los datos	116
5.5.2 Análisis Geoestadístico	120
5.6 Cálculo de anomalías de Bouguer	126
5.6.1 Bondad de Ajuste y superficies polinómicas	129
5.7. Análisis espectral	135
5.7. Deconvolución de Euler	136
5.8 Modelo Gravimétrico	140
5.8.1 Perfiles 2-D de la cuenca Sabana de Carora.	141
3.5.4. Mapas Isópaco de los sedimentos de la cuenca	146
CAPITULO VI	148
Resultados y Análisis	148
6.2 Mapa de isocorrección topográfica	148
6.3 Análisis estadístico y geoestadístico de los datos gravimétricos.	149
6.4 Mapa de anomalías de Bouguer.	151
6.6. Análisis espectral	153
6.7 Deconvolución de Euler	154
6.8 Modelo Gravimétrico	156
6.8.1 Modelos 2D	157
6.8.2 Mapas Isópacos	157
CAPITULO VII	159
CONCLUSIONES	159
RECOMENDACIONES	162

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag
Figura 1 Mapa de Zonificación Sísmica de Venezuela	2
figura 2 Mapa de la ubicación del área urbana de la ciudad de Carora, municipio Torres, estado Lara.	5
Figura 3 Mapa de la ubicación del área de la cuenca de Sabana de Carora estado Lara Tomado de SIG de Funvisis.	6
Figura 4 Mapa de ubicación de los municipios circundantes al municipio Torres	7
Figura 5 Perfil geológico – estructural de la sección Cabo de San Román – Barquisimeto, estados Falcón –Lara	9
Figura 6 Mapa de Anomalías de Bouguer del occidente de Venezuela	11
Figura 7 Modelo de la corteza propuesto para la COLM realizado en GMSYS	12
Figura 8 Mapa de líneas adquiridas en la campaña abril-mayo 2004, proyectos BOLIVAR-GEODINOS	13
Figura 9 Modelo de velocidades de onda P del perfil en tierra. Líneas negras corresponden a zonas de control	13
Figura 10 Mapa de distribución por rango de períodos. Carora, estado Lara	15
Figura 11 Mapa de isoperíodos. Carora, estado Lara	17
Figura 12 Modelo estructural detalles del corte A-A'	19
Figura 13 Modelo estructural detalles del corte F-F'	20
Figura 14 Sistema de coordenadas geocéntrico de la tierra	24
Figura 15 (a) Representación esquemática de la superficie topográfica, el elipsoide de referencia y el geoide en función de las que se definen: (b) Altura elipsoidal h, elevación sobre el geoide H y ondulación del geoide N.	28

Figura 16 Ondulaciones globales del geoide con una grilla de 15'x15' producida por el Earth Gravitational Model 1996 (Lemoine <i>et al.</i> , 1998). Líneas negras indican costas	29
Figura 17 Principio de Equivalencia	32
Figura 18 Distribución de la gravedad y densidad de la tierra Vs la profundidad	33
Figura 19 Corrección de aire libre.	35
Figura 20 Plantilla para la reducción topográfica.	38
Figura 21 Diferencia entre la AAL y la AB	42
Figura 22 Ejemplo de histogramas de frecuencia con su respectiva curva de probabilidad	44
Figura 23 Ejemplo gráficos de cuartiles de una población de datos.	45
Figura 24 Ejemplo gráficos de cuartiles de una población de datos.	46
Figura 25 Ejemplo de modelo de Variograma mostrando sus parámetros	47
Figura 26 Espectro de Energía	51
Figura 27 Modelo esquemático para interpretación de las fuentes.	54
Figura 28 Diagrama de secuencia para realizar la Deconvolución de Euler con Oasis Monjna	55
Figura 29 Mapa estructural de la parte noroccidental de Sur América	58
Figura 30 Mapa geológico de la transversal de Barquisimeto	59
Figura 31 Mapa de las principales estructuras que circunda el área de estudio.	63
Figura 32 Corte a lo largo del contacto surco de Barquisimeto-Andes Merideños	64
Figura 33 Cartografía neotectónica de la falla de Burbusay, y otras fallas cuaternarias del bloque de Trujillo	67
Figura 34 Mapa Geológico estructural de la cuenca de Sabana de Carora	69
Figura 35 Mapa de ubicación de las estaciones bases presente en el área urbana y cuenca de Sabana de Carora.	77
Figura 36 Mapa de la cuenca de Sabanas de Carora donde se ubican las estaciones ordinarias gravimétricas.	78
Figura 37 Mapa local de ubicación de las estaciones gravimétricas ordinarias en el área urbana de la ciudad de Carora.	79

Figura 38 Imagen de GPS posicionador satelital marca Garmin modelo plus V.	80
Figura 39. Imagen de Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-3	80
Figura 40 Imagen de Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-5.	81
Figura 41 Imágenes de posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700.	81
Figura 42 Deriva instrumental de gravímetro Autograv Scintrex CG-3 ajustada	85
Figura 43 Calibración del gravímetro Autograv Scintrex CG-5.	87
Figura 44 Deriva instrumental de gravímetro Autograv Scintrex CG-5, ajustada (FUNVISIS).	88
Figura 45 Deriva instrumental de gravímetro Autograv Scintrex CG-5, ajustada (INTEVEP).	88
Figura 46 Posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700.	89
Figura 47 Diseño de la red para la adquisición de alturas.	91
Figura 48 Foto tomada durante la adquisición gravimétrica y valores de alturas	91
Figura 49 Mapa topográfico de la cuenca de Sabana de Carora en el occidente de Venezuela	92
Figura 50 Mapa topográfico tridimensional de la cuenca de Sabana de Carora en el occidente de Venezuela.	93
Figura 51 Mapa topográfico del área urbana de Carora municipio Torres..	93
Figura 52 Mapa topográfico tridimensional del área urbana de la ciudad de Carora municipio Torres.	94
Figura 53 Diagrama del procesamiento básico de datos gravimétricos	95
Figura 54 Diagrama esquemático seguido para determinar el valor de densidad de Bouguer.	96
Figura 55 Perfiles Nettleton	97
Figura 56 Mapa de ubicación de los perfiles Nettleton distribuidos en la zona de estudio.	98
Figura 57 Topografía del perfil de Nettleton	100
Figura 58 Curvas de anomalías de Bouguer para distintas densidades	100

Figura 59 Recta para estimar valor de densidad.	101
Figura 60 Tabla de curvas de Drake-Nafe	102
Figura 61 Deriva diurna del día 18 de septiembre de 2005.	105
Figura 62 Mapa de gravedad observada del área cuenca de Sabana de Carora	106
Figura 63 Mapa de gravedad observada del área urbana de Carora Municipio Torres.	106
Figura 64 Mapa de anomalías de aire libre del área cuenca de Sabana de Carora.	108
Figura 65 Mapa topográfico de Venezuela	110
Figura 66 Malla de datos topográficos utilizados para la corrección topográfica..	111
Figura 67 Disposición de estaciones para procesamiento por TERRAIN de Geosoft Inc. V 4.00.03.	111
Figura 68 Diagrama de la corrección topográfica de alturas.	113
Figura 69 Mapa regional de isocorrección topográfica obtenido con el programa TERRAIN de la cuenca Sabana de Carora.	114
Figura 70 Mapa de isocorrección topográfica obtenido con el programa TERRAIN del área urbana de Carora	115
Figura 71 Diagrama del procesamiento avanzado de datos gravimétricos.	116
Figura 72 Histograma de Anomalías de Bouguer.	118
Figura 73 Gráfico Q-Q de Anomalías de Bouguer.	119
Figura 74 Gráfico Detrended Q-Q de Anomalías de Bouguer	119
Figura 75 Diagrama de Boxplot de Anomalías de Bouguer	120
Figura 76 Variograma Modelo Gausseano	122
Figura 77 Variograma Modelo Exponencial	123
Figura 78 Variograma Modelo Esférico.	123
Figura 79 Roseta de anisotropía	124
Figura 80 Elipse de anisotropía para un modelo Gausseano	125
Figura 81 Mapa de Anomalías de Bouguer de la cuenca de Sabana de Carora	128
Figura 82 Mapa de Anomalías de Bouguer del área urbana de Carora	129
Figura 83 Grafica de Bondad de ajuste.	131
Figura 84 Mapa de la componente residual de AB	133

Figura 85 Mapa de la componente regional de AB.	134
Figura 86 Espectro de Energía.	135
Figura 87 Mapa de deconvolución de Euler con Índice Estructural (SI)= 0	137
Figura 88 Mapa de deconvolución de Euler con Índice Estructural (SI)=0.5	138
Figura 89 Mapa de deconvolución de Euler con Índice Estructural (SI)= 1.	139
Figura 90 Sección horizontal de cota $Z=-1$ de ca cuenca de Sabana de Carora.	140
Figura 91 Mapa de anomalías de Bouguer, Arriba: Mapa modelado (Modelled). Abajo: Mapa medido (Measured).	141
Figura 92 Perfil 17 de la cuenca Sabana de Carora.	142
Figura 93 Perfil 18 de la cuenca Sabana de Carora	142
Figura 94 Perfil 22 de la cuenca Sabana de Carora	143
Figura 95 Perfil 23 de la cuenca Sabana de Carora	143
Figura 96 Perfil 23 de la cuenca Sabana de Carora	144
Figura 97 Perfil 26 de la cuenca Sabana de Carora	144
Figura 98 Perfiles longitudinal ubicado al norte.	145
Figura 99 Perfil longitudinal ubicado al sur.	146
Figura 100 Mapa Isópaco de espesores de sedimentos de la cuenca de Sabana de Carora.	146
Figura 101 Modelo tridimensional del basamento de los sedimentos de la cuenca Sabana de Carora.	147

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag
Tabla 1 Tabla esquemática del crecimiento de la población, superficie y densidad poblacional en los años censales 1981-2001.	8
Tabla 2 Tabla esquemática de la tasa crecimiento Poblacional (%) Periodo 1981-2001 municipio Torres y Estado Lara.	8
Tabla 3 Tabla esquemática para la selección del índice estructural (SI).	53
Tabla 4 Cuadro Resumen de las diferentes formaciones incluidas en el área de estudio	70
Tabla 5 Valores de densidad obtenidos mediante los perfiles Nettleton.	98
Tabla 6 Valores de densidad obtenidos mediante el método de Parasnis.	99
Tabla 7 Valores de densidad obtenidos mediante la conversión de velocidades P del modelo de Guédez 2003	103
Tabla 8 Valores de densidad obtenidos mediante la conversión de velocidades p del modelo de Bezada 2005.	103
Tabla 9 Valores de densidad obtenidos mediante las distintas metodologías	103
Tabla 10 Sumario de Estadístico.	117
Tabla 11 Tabla Descriptiva	118
Tabla 12 Parámetros de ajuste de los modelos de Variogramas	121
Tabla 13 Valores estimatorio para ajuste de modelo Teórico.	121
Tabla 14 Estimación de profundidades (m).	136

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

En la prospección geofísica el método gravimétrico es una de las técnicas mayormente utilizadas como complemento de diversos estudios geológicos a diferentes escalas, tanto regionales como locales. En 1949 comenzaron a emplearse en Venezuela los levantamientos gravimétricos por “U.S Coast and Geodetic Survey”, con mediciones pendulares de Caracas a Barcelona.

La dirección de Cartografía Nacional del Ministerio de Obras Públicas y el Servicio Geodésico Interamericano fueron los organismos que establecieron en Venezuela el “Datum Geodésico de control Horizontal de la Red de Triangulación de Primer Orden” en el punto “La Canoa,” ubicado en el estado Anzoátegui (Graterol, 1978).

En los últimos años el método gravimétrico se ha empleado en zonas urbanas, con el fin de reconocer estructuras en el subsuelo, para la microzonificación sísmica, con el fin de localizar cavidades susceptibles de colapsos (Ingeominas, 1997).

Se han desarrollado proyectos que han permitido la evaluación de amenazas sísmicas en las principales ciudades del país como Caracas y Barquisimeto, cuyo propósito fundamental es poseer una visión detallada de los factores geológicos, estructurales, urbanísticos y sociales que puedan intervenir, en el momento de un evento sísmico y de esta manera pronosticar las actividades preventivas necesarias.

El presente estudio contribuye al desarrollo del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Carora, enfocado en el establecimiento de zonas que posean un comportamiento geomecánico similar respecto a la respuesta sísmica (Ingeominas, 1997).; para así lograr generar recomendaciones específicas en el diseño y construcción de edificaciones.

Para el desarrollo de este proyecto es necesario aplicar diversas disciplinas y técnicas en las que se incorporan entre otros estudios el método gravimétrico.

La ciudad de Carora se encuentra ubicada en la región de convergencia entre los sistemas orogénicos de los Andes y la Serranía del Interior. Está delimitada al norte por el sistema de falla de Oca-Acón, al sur-este por el sistema de falla de Boconó y al sur-oeste por la falla de Valera, en el occidente de Venezuela.

La ciudad se encuentra ubicada en una zona con sismicidad moderada, específicamente en la zona 4 según el mapa de zonificación sísmica de Venezuela (Norma COVENIN 1756-98, Rev. 2001 de Edificaciones Sismorresistentes) (figura 1) con aceleraciones máximas en roca de 0.25 g.

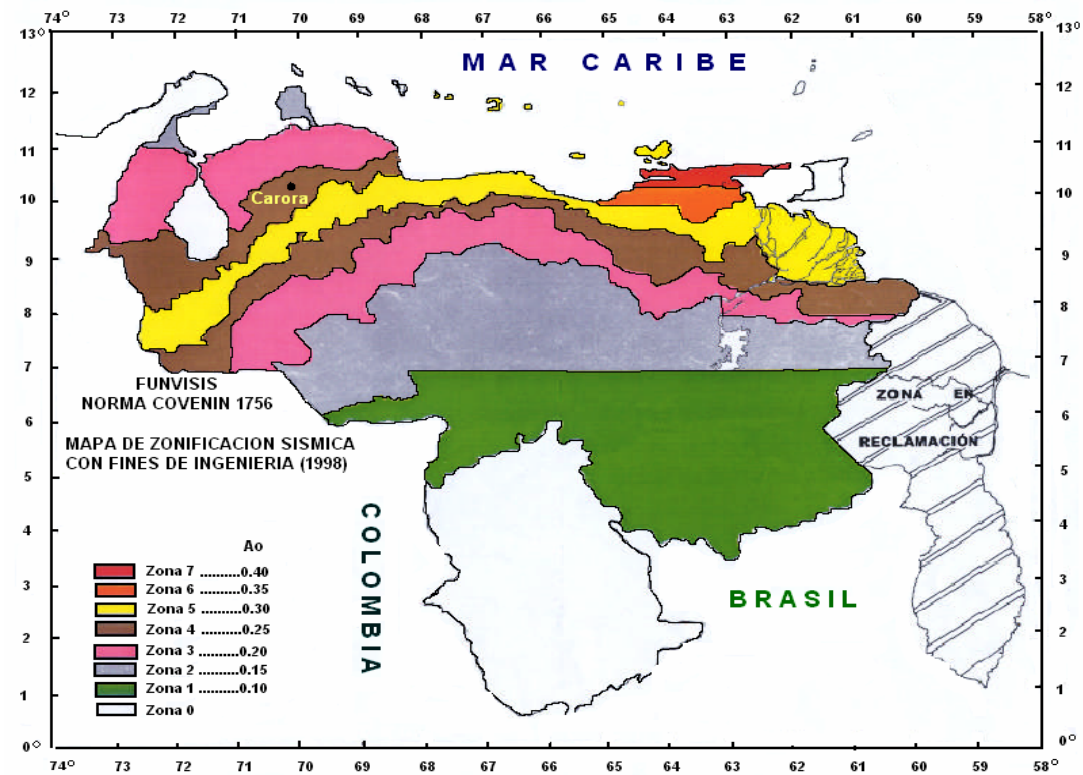


Figura 1 Mapa de Zonificación Sísmica de Venezuela (Modificado de: COVENIN, 1756-2001 de Edificaciones Sismorresistentes 2001).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar la geometría y profundidad de la cuenca Sabana de Carora estado Lara, a partir del modelado gravimétrico tridimensional y análisis espectral de los datos.

2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar la información geológica y geofísica existente.
- Adquirir los datos gravimétricos.
- Procesar los datos gravimétricos adquiridos y recopilados de bases de datos existentes.
- Realizar el análisis estadístico y geoestadístico de los datos.
- Realizar el análisis espectral y deconvolución de Euler de los datos para estimar la profundidad de origen de anomalía.
- Incluir los datos geológicos y geofísicos recopilados y generados, dentro de un Sistema de Información Geográfico (SIG) e incorporarlos en las bases de datos del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Carora.
- Realizar el modelado gravimétrico tridimensional de la zona.

3. UBICACIÓN

La definición del área de trabajo se planteó de la siguiente manera: inicialmente se estableció un área local, que abarca la zona urbana de la ciudad de Carora específicamente parte del municipio Torres del estado Lara, cubriendo una extensión aproximada de 58 km² (figura 2).

Adicionalmente se estableció otra área, definida como área regional o área de la cuenca de Sabana de Carora, puesto que la ciudad se ubica en el extremo sureste de dicha cuenca. Se consideró necesario ampliar el área de trabajo, con el fin de generar un modelo tridimensional de la cuenca y así poder emplearlo para estudios geológicos, estructurales, geotécnicos. Esta área regional incluye parte de los estados: Lara, Zulia, Falcón y Trujillo y cubre una extensión cercana a 16116 km² figura 3.

Para esta área se utilizó base gravimétrica y topográfica del proyecto Tupure-Carora llevado a cabo por FUNVISIS-INTEVEP.

Es importante mencionar que todos y cada uno de los mapas realizados en este trabajo se encuentran referenciados bajo el sistema WGS 84 UTM (Proyección Universal Transversal de Mercator) en el huso horario 19, uno de los tres husos horarios correspondientes a Venezuela, según la Red Geocéntrica Venezolana (apéndice A) (IGVSB 2005).

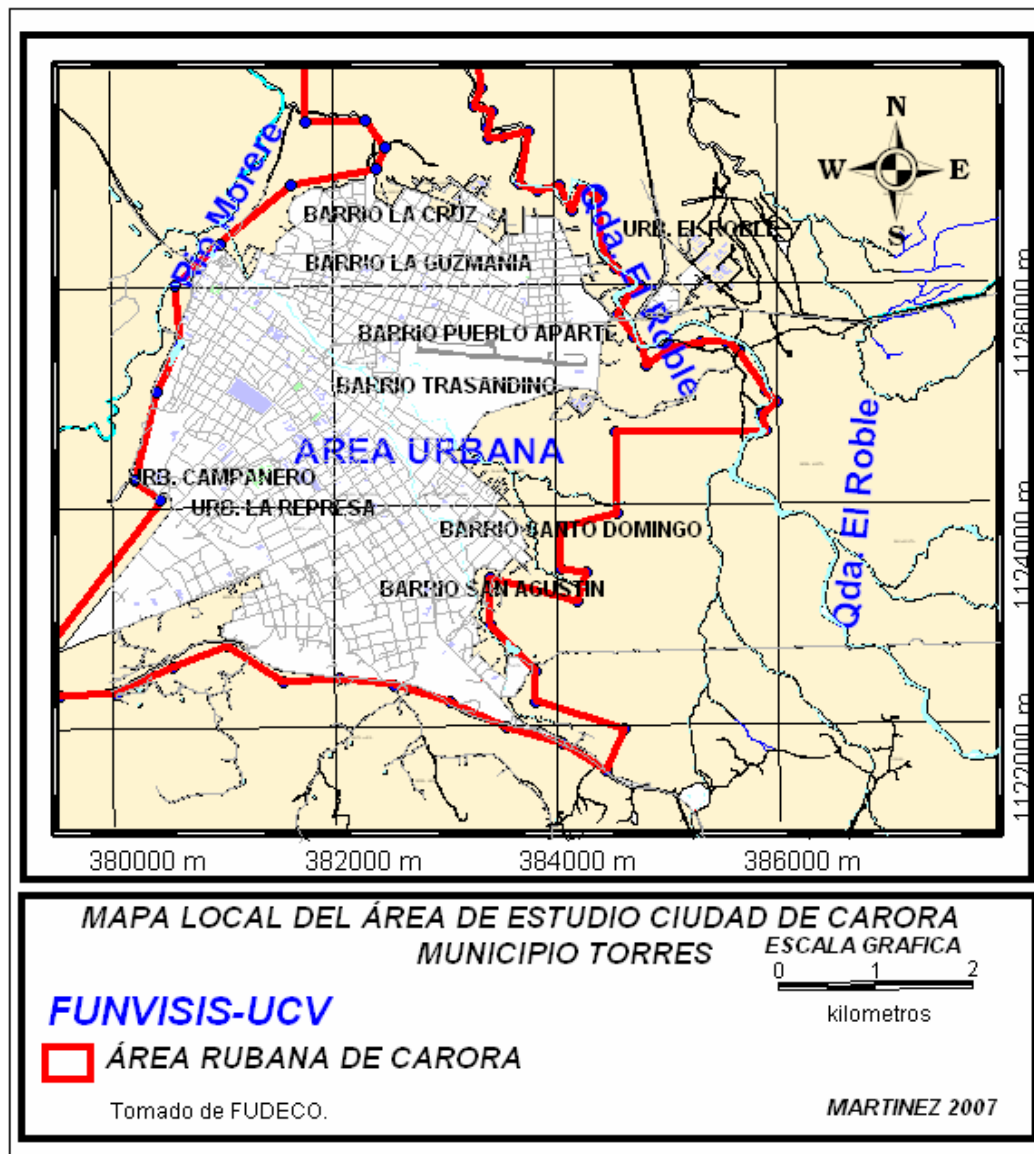


figura 2 Mapa de la ubicación del área urbana de la ciudad de Carora, municipio Torres, estado Lara. (tomado de FUDECO,2004).

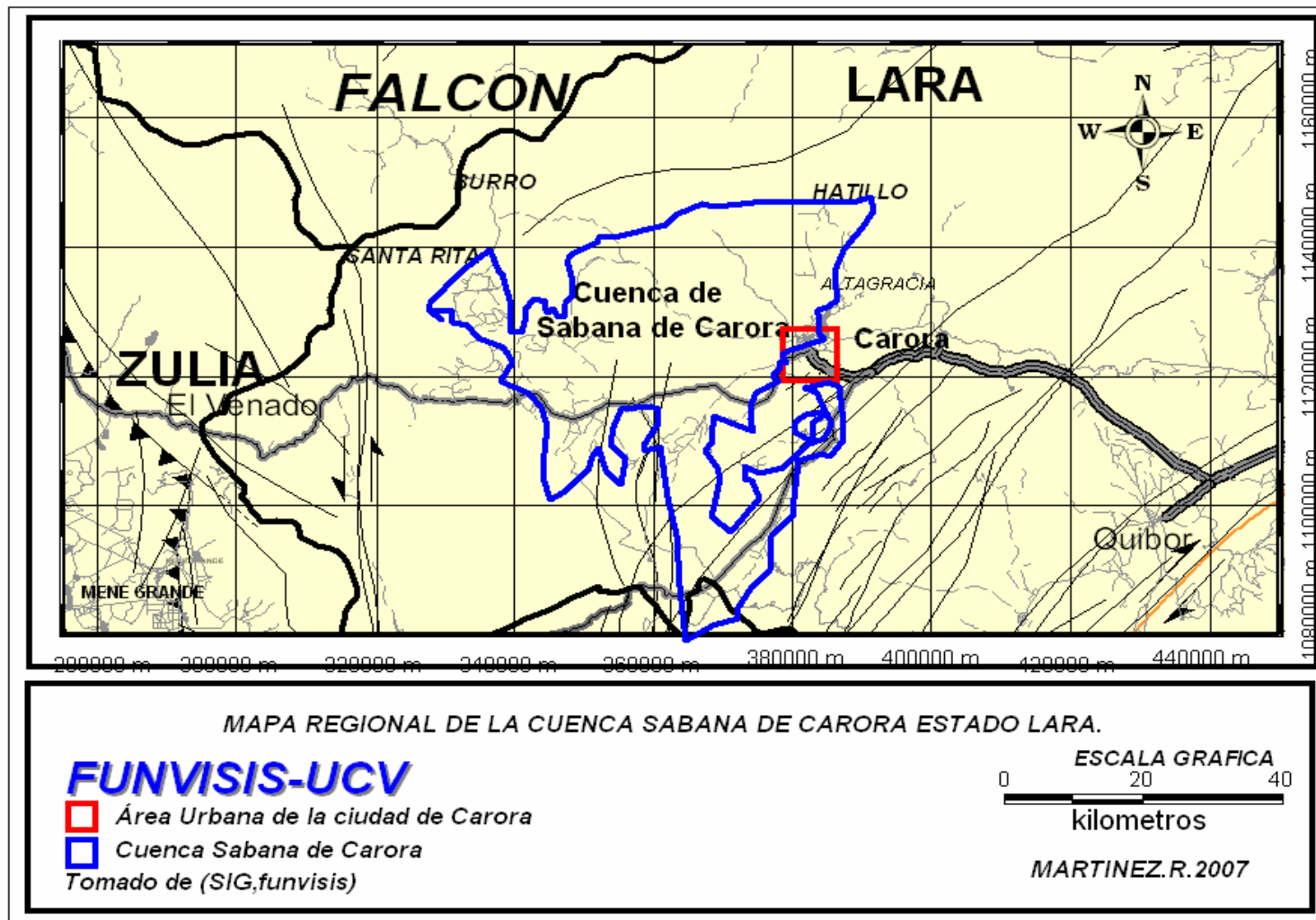


Figura 3 Mapa de la ubicación del área de la cuenca de Sabana de Carora estado Lara Tomado de SIG de Funvisis.

4. JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Carora se encuentra ubicada en la zona de convergencia de los sistemas orogénicos de los Andes y de la Serranía del Interior y está delimitada al norte por el sistema de fallas de Oca-Acón al suroeste la falla de Valera y al sureste por el sistema de fallas de Boconó, sistemas actualmente activos a consecuencia de la colisión de la placa del Caribe y la placa Suramericana en el occidente de Venezuela.

La ciudad de Carora se halla situada en el Municipio Torres en el estado Lara, esta limitada al norte por los municipios Buchivacoa y Dabajuro del estado Falcón, por el Sur con el municipio Morán del estado Lara y el municipio Carache del estado Trujillo, por el este con los municipios Iribarren y Jiménez del estado Lara y por el oeste con los municipios Valmore Rodríguez y Baralt del estado Zulia (figura 4). La ciudad cuenta con relieves aproximadamente entre 100 a 500 m de altura, posee un clima continental estacional y suelos xerosoles (FUDECO, 2004).

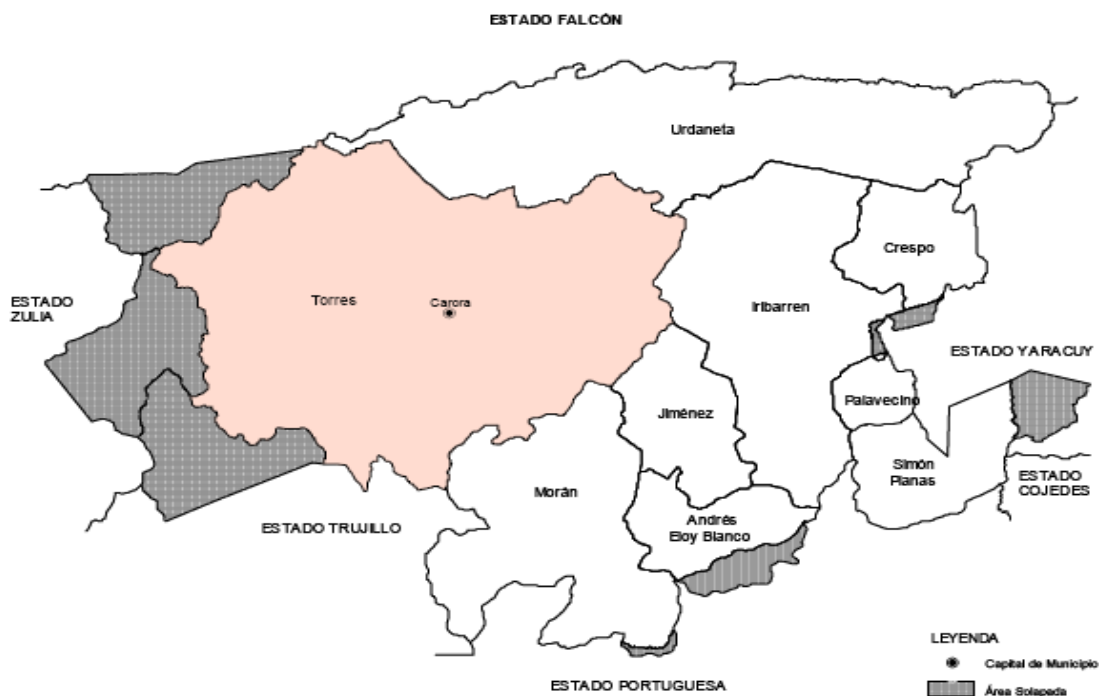


Figura 4 Mapa de ubicación de los municipios circundantes al municipio Torres (tomado de FUDECO, 2004).

En las tablas 1 y 2 se muestra como ha sido el incremento de población, superficie, densidad poblacional y la tasa de crecimiento poblacional del municipio Torres para el periodo de 1981 al 2001, en donde se observa un aumento del número de habitantes y de densidad poblacional en un 36 %.

Tabla 1 Tabla esquemática del crecimiento de la población, superficie y densidad poblacional en los años censales 1981-2001. (Tomado de censo de población y vivienda 1981- 2001. Caracas, Instituto Nacional de Estadística).

Año	Población N° de Habitantes	Superficie km ²	Densidad Poblacional (hab/km ²).
1981	120,925	6,954	17,39
1990	130,151	6,954	20,01
2001	164,045	6,954	23,59

Tabla 2 Tabla esquemática de la tasa crecimiento Poblacional (%) Periodo 1981-2001 municipio Torres y Estado Lara. (Tomado de censo de población y vivienda 1981- 2001. Caracas, Instituto Nacional de Estadística)

Periodo	Tasa de Crecimiento (%)	
	Torres	Lara
1981-1990	1,6	2,6
1990-2001	1,5	2,4

Es importante mencionar que las ondas sísmicas al propagarse a través de un medio blando experimentan variaciones en espacio, amplitud, contenido de frecuencias y duración. A este fenómeno se le conoce como efecto de sitio.

Analizando las estadísticas mostrada ,la ubicación de la ciudad de Carora y el fenomeno de efecto de sitio, se ha considerado necesario ejecutar y definir estrategias para orientar el desarrollo e identificar las correspondientes acciones, programas y proyectos por parte de representantes públicos y privados que determinen el desarrollo de la ciudad de Carora y sus adyacencias. Todo esto contribuye al conocimiento de la respuesta sísmica y de la amenaza existente en la ciudad de Carora.

5. TRABAJOS PREVIOS

Rodríguez y Sousa., (2003) realizaron una interpretación geológica estructural (figura 5) de la cuenca de Falcón a través de la sección Cabo San Román-Barquisimeto, mediante un estudio integrado de geología y geofísica a partir de la realización de varios modelos gravimétricos-magnéticos y estructurales. Los resultados son modelos gravimétricos-magnéticos sugieren un adelgazamiento cortical en el centro de la cuenca de Falcón, diferenciándose ambos modelos en el mejor ajuste para estimar dicho adelgazamiento.

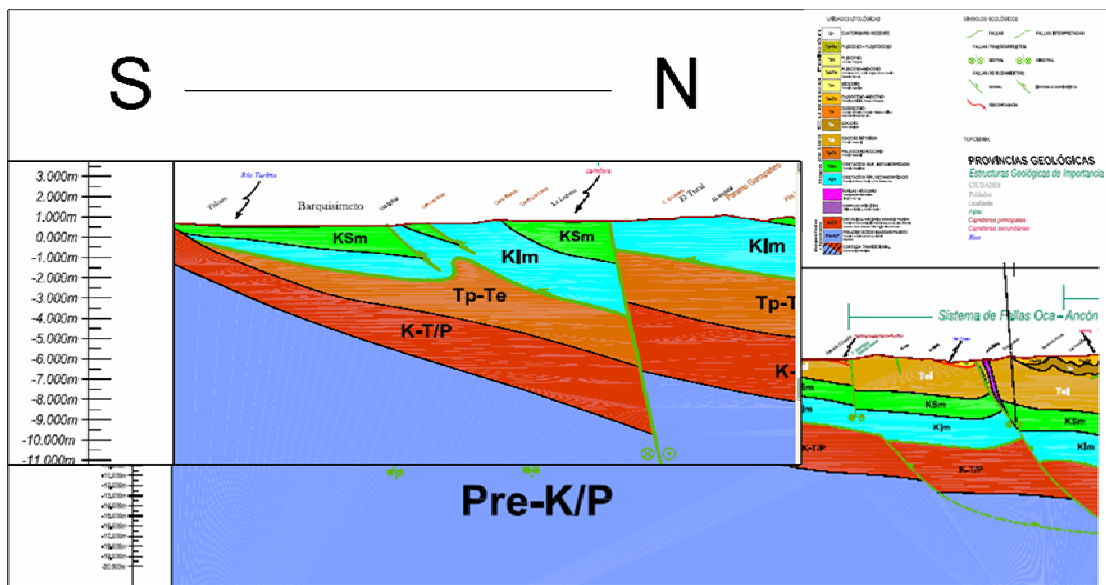


Figura 5 Perfil geológico – estructural de la sección Cabo de San Román – Barquisimeto, estados Falcón –Lara (Tomado de: Rodríguez et al., 2003)

Guédez, (2003) realizó interpretaciones de secciones sísmicas, lo cual permitió identificar varias de las principales fases corticales (P_g , P_M), a partir de los tiempos de viaje de estas fases, y empleando ecuaciones de cálculos aproximados logró estimar valores de profundidad en función del tiempo, distancia y de las llegadas.

Logró modelar tres perfiles con estaciones receptoras en la zona central de Venezuela. En estos modelos estimó que el espesor cortical disminuye hacia el norte de la zona de estudio, encontrándose Moho a profundidades de hasta 40 km en las cercanías de la línea de costa, hasta 25 km al extremo norte, lo que coincide con los modelados gravimétricos existentes en la zona.

Con la finalidad de lograr un mayor control, sobre el modelo cortical y de velocidades de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM) obtenido de la sísmica de refracción, Guédez (2003) realizó la reinterpretación del perfil (figura 6) ubicado en la COLM, (figura 7) con dirección NO-SE, permitiendo definir una corteza con un espesor poco variable a lo largo del perfil. Este espesor varía entre los 42 y 40 km con una leve disminución hacia el norte.

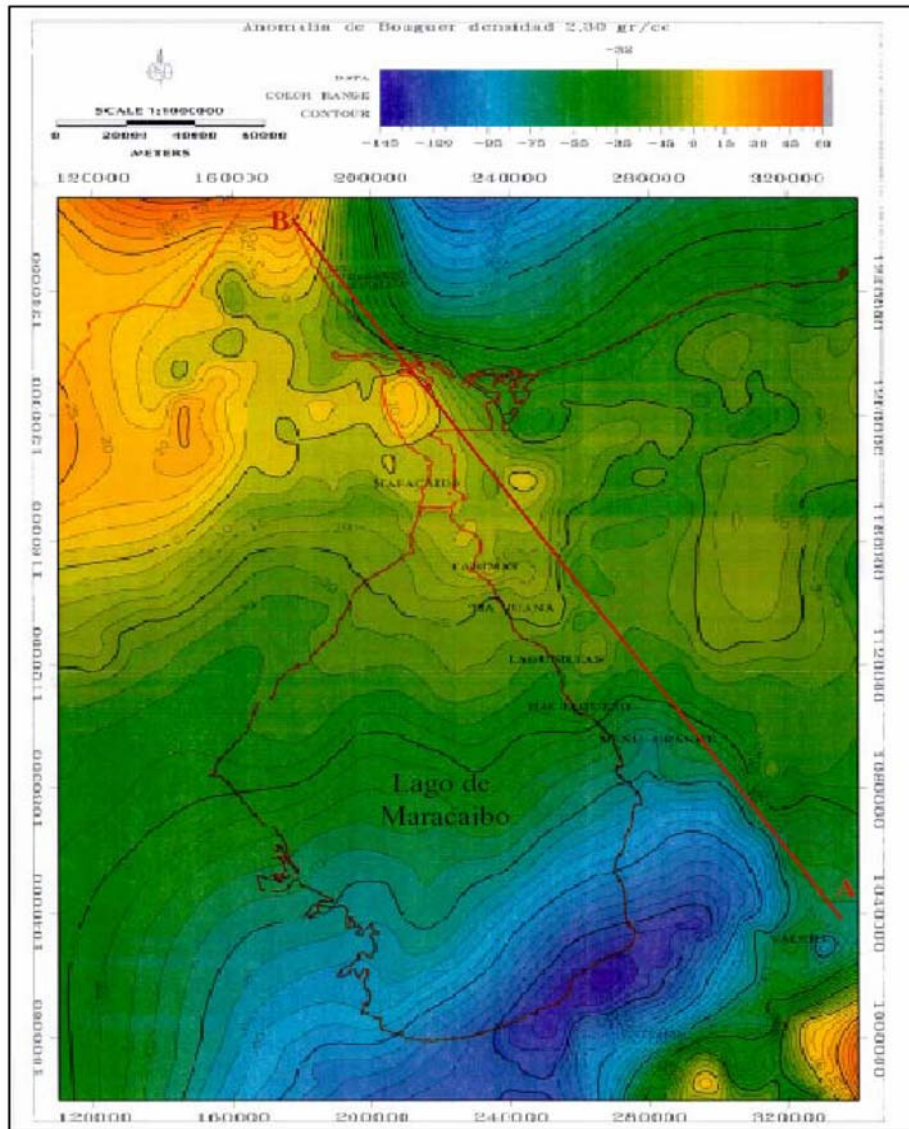


Figura 6 Mapa de Anomalías de Bouguer del occidente de Venezuela (Vale, 2000). Línea A-B ubicación del perfil gravimétrico modelado para la COLM (Tomado de Guédez, 2003).

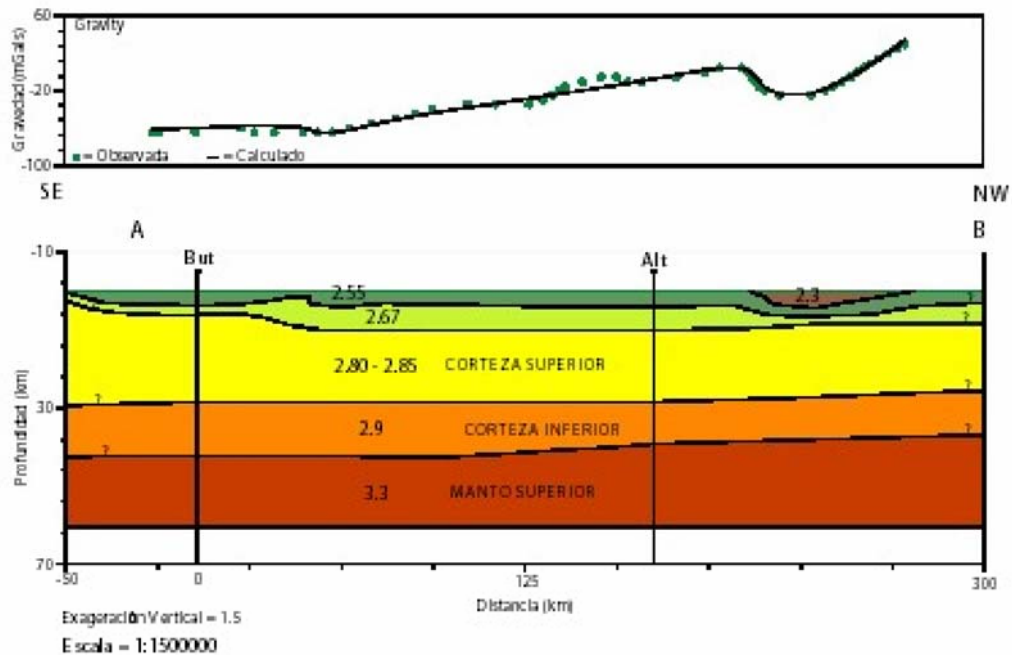


Figura 7 Modelo de la corteza propuesto para la COLM realizado en GMSYS (Tomado de: Guédez, 2003).

Bezada, (2005) realizó estimaciones de los valores de velocidad, densidad y profundidades por medio de la interpretación de las secciones sísmicas ubicadas en toda la parte norte de Venezuela tanto en tierra como en el mar. El modelo principal en tierra muestra un adelgazamiento cortical en el occidente de Venezuela donde la profundidad de Moho se reduce a 27 km al norte de la población de Aracua. La placa subducida muestra un espesor de 11 km y un ángulo de subducción de 6°.

Estas estimaciones fueron realizadas mediante el trazado de un perfil con dirección 70°O (figura 8). Igualmente generó un modelo donde la profundidad de Moho varía desde 25 km al norte de la isla de Aruba, hasta 40 km al sur en Barquisimeto. Así mismo, se observa la presencia de un adelgazamiento cortical en la zona oriental de Falcón, donde la profundidad de Moho alcanza los 27 km; y se obtiene un espesor sedimentario para la cuenca de Falcón de aproximadamente 6 km, en el área (figura 9).

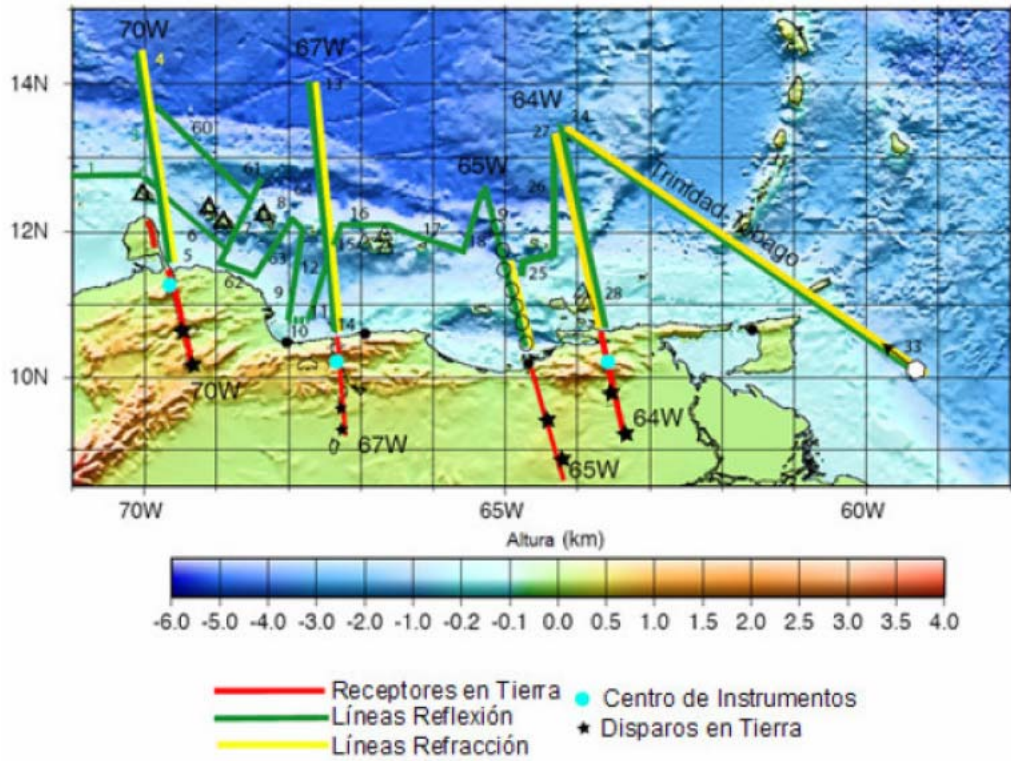


Figura 8 Mapa de líneas adquiridas en la campaña abril-mayo 2004, proyectos BOLIVAR-GEODINOS (Tomado de Bezada, 2005).

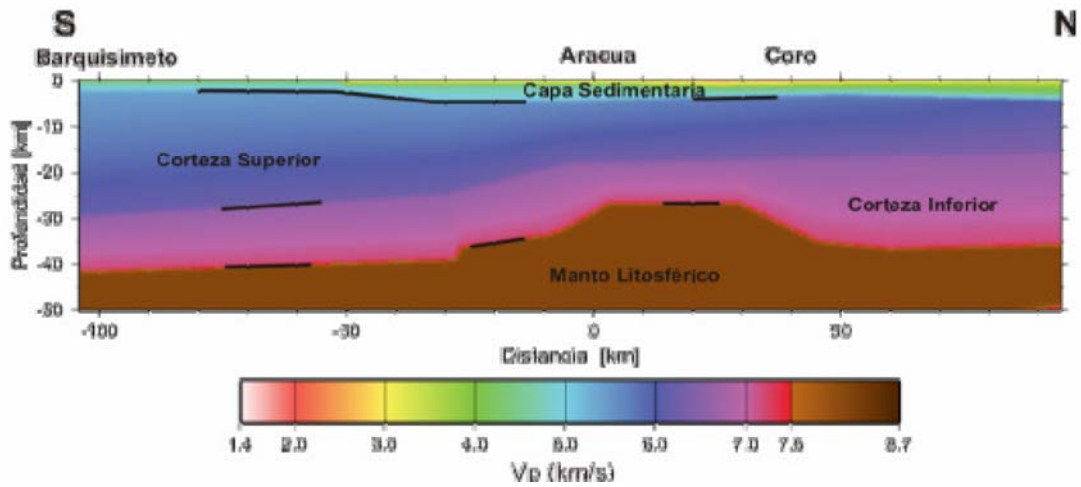


Figura 9 Modelo de velocidades de onda P del perfil en tierra. Líneas negras corresponden a zonas de control (Tomado de Bezada, 2005).

Quijada (2006), en su trabajo realiza una inversión gravimétrica 3-D, en el occidente de Venezuela. Este estuvo dividido en 3 etapas: primero la inversión de la interfase corteza-manto, luego la inversión del tope del basamento de las cuencas sedimentarias en el área y finalmente, una inversión gravimétrica de un volumen de densidad. Este trabajo contribuyó a realizar la comparación y correlación de los diferentes mapas de anomalías de Bouguer (AB) y los mapas de las componentes residuales y regionales del área, también ayudó a poseer una visión un poco más concreta de las diferentes densidades características de la zona y a estimar mediante las descripciones de las interfases, la profundidad cercana del basamento. Discriminó mediante información geológica y geofísica distintos modelos. Esta inversión gravimétrica 3D mostró un adelgazamiento cortical en el oriente de estado Falcón evidenciando inicialmente por Rodríguez y Sousa 2003 y Bezada 2005, éste posee una geometría este-oste haciéndose más angosto hacia el centro del mismo en donde las profundidades mínimas se presentan al sureste de Falcón a unos 25 km. Así mismo estableció el aumento de la profundidades de moho hacia el sur, a 26 km al norte de Aruba, hasta 40 km al norte de estado Barinas en donde su profundidad máxima se presentó debajo de la cuenca de Maracaibo alcanzando 45 km aproximadamente y las máximas de Moho de 40 km al norte del estado Barinas.

Paolini,(2006) desarrolló un análisis de los períodos fundamentales del suelo en la ciudad de Carora, cubriendo un área de 30 km² aproximadamente y utilizando un total de 192 mediciones de ruido ambiental distribuidas en la ciudad de Carora con un espaciamiento promedio de 250 m entre cada estación.

Los mapas de isoperíodos fundamentales (figura 10) obtenidos por Paolini (2006) muestran las variaciones en los períodos a lo largo de la ciudad, logrando identificar las zonas que exhiben los mayores valores, los cuales a su vez están asociadas a los mayores espesores de sedimentos tal como se observa en la cuenca de Caracas (Abeki *et al.*, 1995; Duval *et al.*, 1998; Rocabado, 2000).

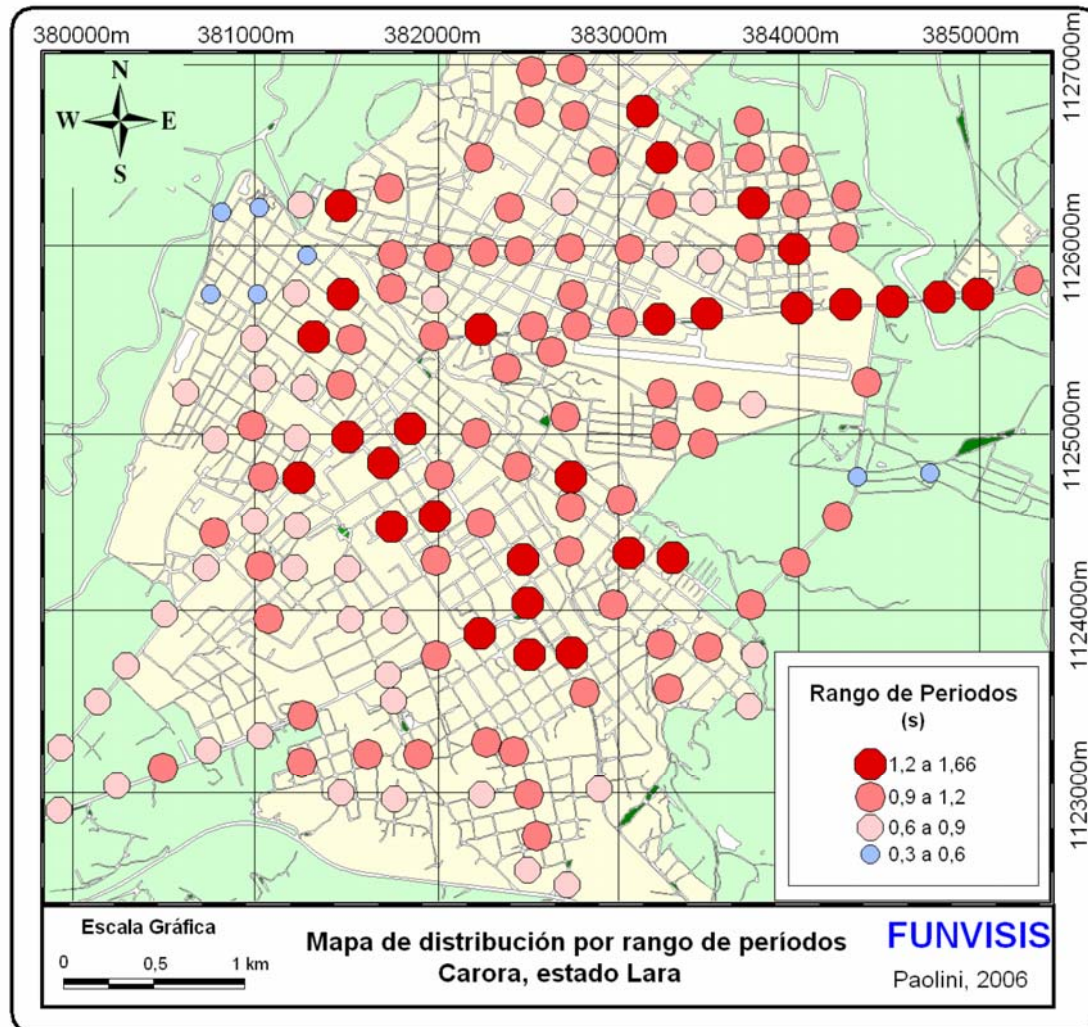


Figura 10 Mapa de distribución por rango de períodos. Carora, estado Lara (Tomado de: Paolini, 2006).

Los mayores períodos (figura 11) se concentran en la región central de la ciudad, cubriendo parte de la Urb. Montesinos, Urb. Francisco de Miranda, Urb. San Agustín y Barrio Brasil; así como también hacia el noreste de la misma, en especial la zona de El Roble y Calicanto. El rango de períodos en este caso, varía entre 1,2 s y 1,6 s. Los menores valores de período se localizan en los extremos laterales del área de estudio, con un rango comprendido entre 0,4 s y 0,75 s, resaltando la zona centro y

barrio El Terminal, ubicado en dirección noroeste y sureste de la ciudad, respectivamente (*op cit*).

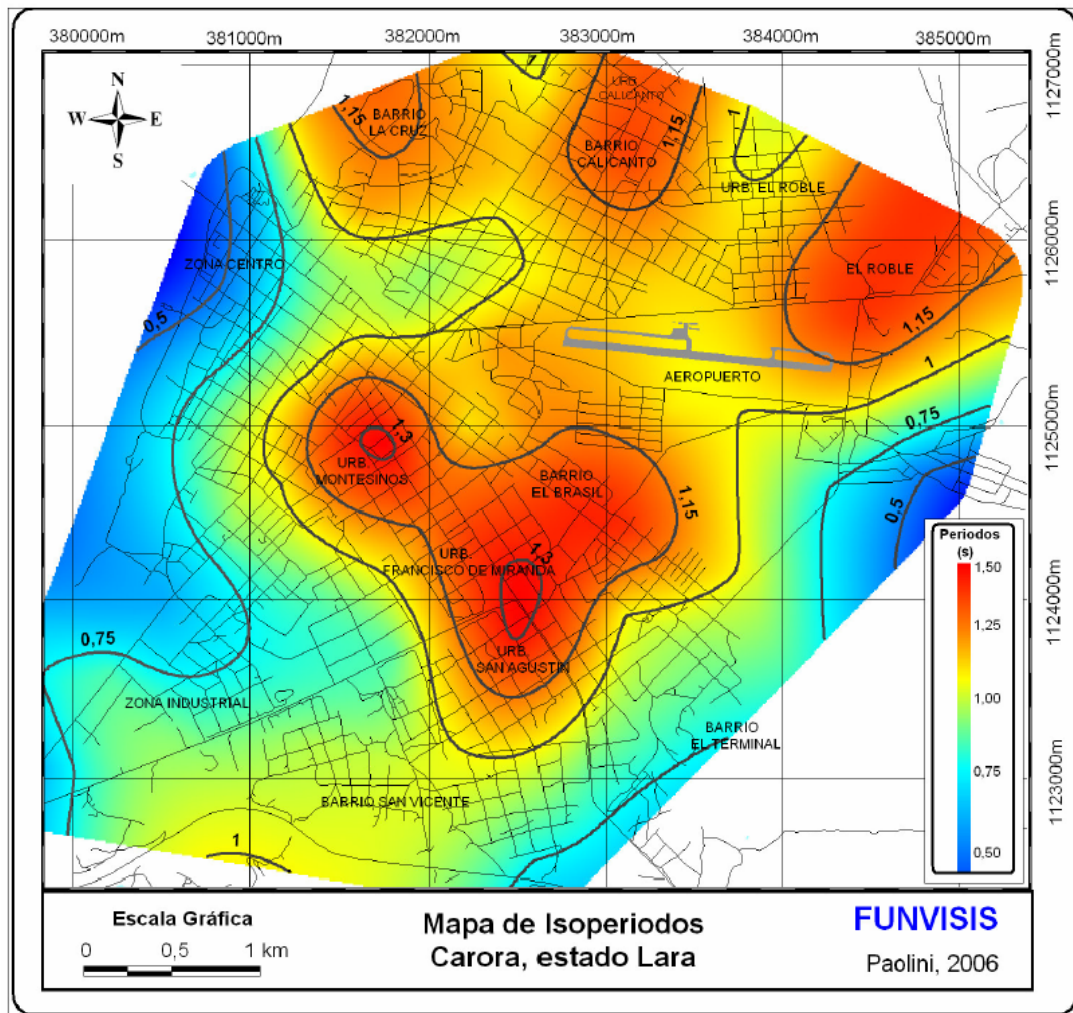


Figura 11 Mapa de isoperíodos. Carora, estado Lara (Tomado de: Paolini, 2006).

Se obtuvo un estimado inicial del espesor de sedimentos en la ciudad de Carora, comprendido entre 50 m y 260 m, aproximadamente, ubicando los mayores espesores en las zonas que comprenden mayor valor de período. Para tal fin, se empleó la relación obtenida a partir de los estudios de microtremores realizados en Caracas (Rocabado, 2000).

5.1 Descripción de modelos geológicos

La ciudad de Carora se encuentra ubicada sobre la secuencia turbidítica sedimentada en el surco de Barquisimeto (formaciones Matatere y Trujillo). Ésta constituye una cuenca flysch desarrollada en el margen meridional de la placa Sudamericana, durante el Paleoceno - Eoceno, producto del emplazamiento de las Napas de Lara (González de Juana *et al.*, 1980). Un evento compresivo de dirección principal E-O, afectó todo el sistema, dando como resultado pliegues con eje en dirección N-S y NNE y fallas de dirección N-S dentro de los sedimentos flysch de la Formación Matatere.

En el área de Carora las estructuras presentes siguen básicamente el mismo patrón de estructuración que la serranía de Trujillo, afectado por dos sistemas de fallas principales: sistema de falla de Valera, dirección N-S, y sistema de falla de Oca - Ancón, dirección E-O (González de Juana *et al.*, 1980).

5.2 perfiles

5.2.1 Perfiles geológicos

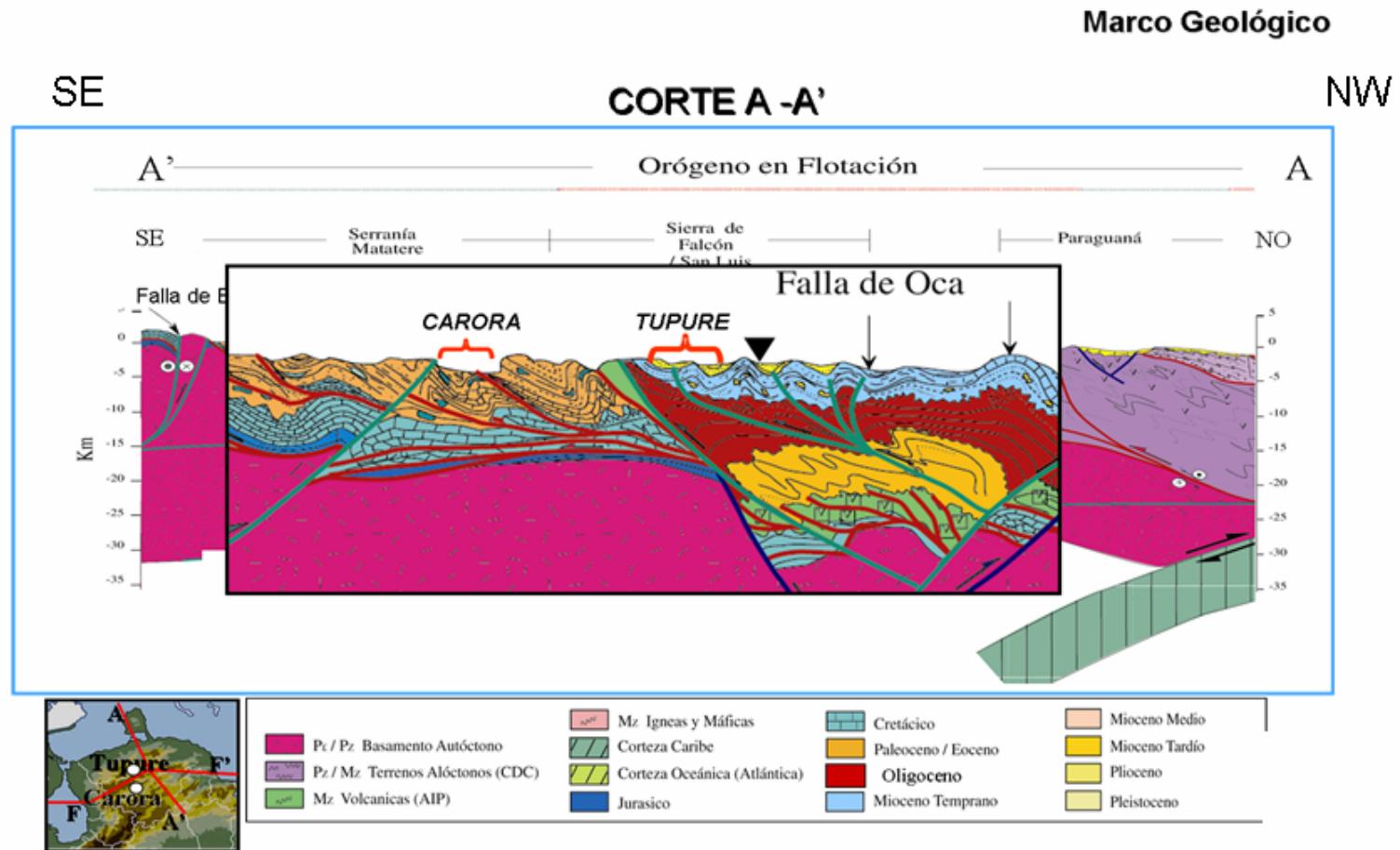


Figura 12 Modelo estructural detalles del corte A-A' (Tomado de PDVSA,2006)

Marco Geológico

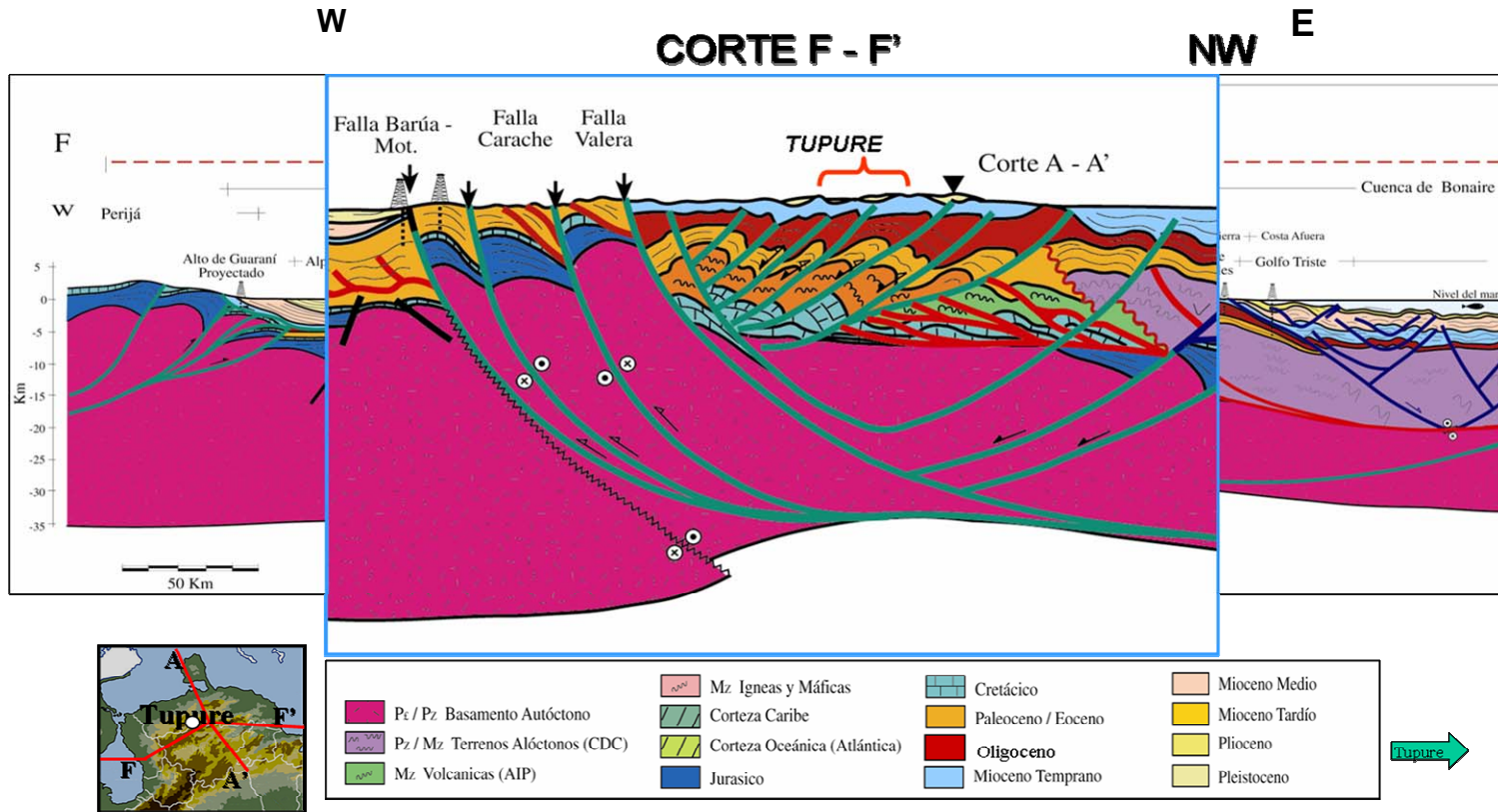


Figura 13 Modelo estructural detalles del corte F-F' (Tomado de PDVSA,2006)

6. SISMICIDAD

A finales del año 1995 en el estado Lara en el occidente de Venezuela, han ocurrido tormentas sísmicas, al sur de la ciudad de Carora, donde fueron reportados tres movimientos sísmicos que fueron sentidos en gran parte de los estados occidentales de país, causando daños de importancia en algunos poblados cercanos al área epicentral, allí se encuentran ubicadas fallas menores de Hato Viejo, al sur, la de Carache, al oeste y la falla de Curarigua, las cuales se asocian con actividad sísmica de importancia (Acosta, 1995).

La geometría actual de la cuenca se encuentra estrechamente relacionada con el tectonismo del área que afectó el conjunto de depresiones como la depresión Carora-Barquisimeto, San Felipe, entre otras; la cual ha estado sometida a esfuerzos de gran magnitud y han originados plegamientos, depresiones y elevaciones de montañas. La depresión de Carora corresponde a una fosa tectónica muy compleja, alargada en sentido este oeste la cual ha sido rellenada durante el transcurso del Cuaternario por espesos sedimentos detríticos depositados por numerosas quebradas y ríos que bajan de los flancos montañosos. El basamento geológico que constituye el fondo de la depresión, aflora en varios sectores en forma de cerros aislados que sobre salen de los sedimentos cuaternarios.

El 29 de diciembre de 1995 un movimiento sísmico de magnitud 5.1 fue sentido en gran parte del occidente de Venezuela, ubicando su epicentro según FUNVISIS, al sur de la ciudad de Carora entre las coordenadas $10^{\circ} 2' N$ y $70^{\circ} 6' O$ a una profundidad de 18.42 km. Este movimiento estuvo enmarcado dentro de una tormenta sísmica que afectó a esta zona, generando alrededor de 350 eventos cuyas magnitudes oscilaron entre 2.0 y 5.1 en la misma escala la cual se le atribuyeron a la falla de Curarigua (Acosta, 1995) ubicada al sur de la depresión Sabana de Carora.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA

La prospección gravimétrica tiene como principio estudiar las variaciones del campo gravitatorio basándose en un campo potencial natural, donde la respuesta generada es la suma de las contribuciones de cada una de las fuentes (Dobrin,1961).

Por ello, como en cualquier técnica de campo potencial, hay una multiplicidad de posibles estructuras que pueden provocar la misma anomalía, según la relación entre los parámetros que afectan al campo analizado. Para evitar o disminuir esta ambigüedad, se requiere la comparación de los modelos obtenidos con información a partir de otras fuentes, como otros métodos geofísicos o información geológica.

Para detallar un poco más sobre la prospección gravimétrica es fundamental consolidar los conocimientos existentes relacionados con los métodos potenciales en el área de la gravimetría (Dobrin,1961).

2.1 PRINCIPIO DE LA GRAVIMÉTRIA

2.2.1 Ley de atracción gravitatoria de Newton.

El principio de la gravimetría se basa en el estudio de las variaciones de la gravedad a partir de las dos leyes de Newton (ec 2.1 y ec 2.3):

1° ley de Newton

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}$$

(Ec 2.1)

donde:

- F : Fuerza entre dos partículas de masas M y m.
- R : Distancia entre los centros de masas de los cuerpos,.
- K,G : Constante gravitatoria universal cuyo valor depende del sistema de medida empleado, la cual tiene un valor medido de $6,672 \times 10^{-8}$ en unidades c.g.s ($6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ en unidades SI).

De allí se obtiene la ecuación ec 2. 2:

$$G = f \frac{m}{r^2} \left(\frac{r}{r} \right)$$

(Ec 2.2)

G es un vector que posee tres componentes en un sistema de coordenadas xyz.
(Götze, *et al.* 2001).

$$\vec{G} = (g_x g_y g_z) T$$

Las medidas tomadas por los gravímetros sólo son la respuesta de la componente vertical de g como se ilustra en la figura 14

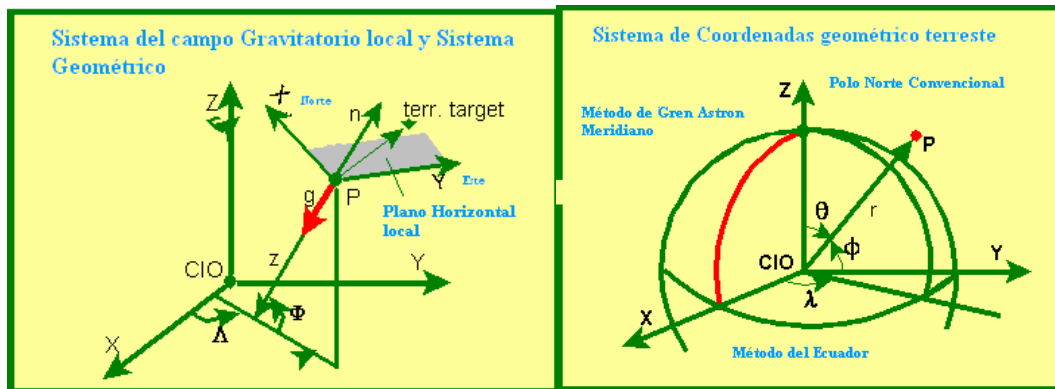


Figura 14 Sistema de coordenadas geocéntrico de la tierra (Tomado de: Götze, et al. 2001).

El objetivo principal de los estudios de gravimetría es medir la atracción gravitacional que ejerce la tierra sobre un cuerpo de masa determinada, dichas mediciones se encuentran alteradas debido a que la tierra no es una esfera perfecta, no se encuentra en reposo, no es homogénea y tiene movimientos de rotación y de traslación, por tanto la fuerza de gravedad que ejerce no es constante. Las medidas gravimétricas en la exploración son la representación de las anomalías en las que entran las densidades de los diferentes tipos de rocas tales como: sedimentos no consolidados, areniscas, sal gema, calizas, granito, entre otras.

2.1.2 Aceleración de gravedad

La fuerza expresada no puede ser determinada de manera independiente. En tal sentido, la fuerza de atracción gravitacional está determinada por unidad de masa donde esta unidad es una masa, ficticia localizada en el punto de medición.

Para determinar esta fuerza se muestra la ecuación 2.3 que corresponde a la segunda ley de Newton:

2^{da} ley de Newton

$$Fg = M_1 \cdot A$$

(Ec 2.3)

donde A es la aceleración de la masa M_1 , causada por la caída libre en el campo gravitacional de la masa M en el cual la aceleración de la gravedad es la ecuación 2.4:

$$A = G \frac{Fg}{M_1} = G \frac{M}{R^2}$$

(Ec 2.4)

donde A se expresa en el sistema cgs en:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ cm/s}^2 & 1 \text{ Gal} \\ 0,001 \text{ cm/s}^2 & 1 \text{ mGal.} \end{array}$$

2.2 UNIDADES

En la gravimetría, la unidad básica de referencia es el Gal ($1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$), en unidades cgs. Dado que en prospección esta unidad es excesivamente grande, se utiliza un submúltiplo, el mGal (10^{-3} Gal equivalente a $1 \times 10^{-3} \text{ cm/seg}^2$), o, más recientemente, el μGal (10^{-6} Gal).

La necesidad de estandarizar las unidades ha llevado a proponer, en el sistema SI, el $\mu\text{m/s}^2$, denominado *unidad gravimétrica*, equivalente numéricamente a 0,1 mGal (1 u.g. : 0,1 mGal, o bien, 1 mGal : 10 u.g.) (Lázaro, 2001).

Sin embargo, esta unidad no se ha implementado, y sigue utilizándose el mGal,

con objeto de unificar los resultados con los mapas regionales.

2.3 POTENCIAL GRAVITATORIO

Dos fuerzas distintas contribuyen al campo gravitatorio de la tierra., en un lugar de la superficie terrestre, la fuerza gravitatoria neta ejercida (GN), se constituye de la fuerza gravitatoria dirigida hacia el centro de la tierra (GT) y la fuerza centrífuga (GC), dirigida perpendicularmente al eje rotativo y hacia afuera con referencia a la tierra, por consiguiente:

$$GN = GT + GC \quad (\text{Ec 2.5})$$

La fuerza centrífuga se calcula de la siguiente manera:

$$GC = m_T \cdot a_c = m_T \cdot \omega^2 \cdot r_T \cdot \text{sen}(n) \quad (\text{Ec 2.6})$$

donde

m_T	Masa de la tierra ($5,97 \times 10^{24}$ kg).
a_c	Aceleración centrífuga.
ω	Velocidad angular de rotación de la Tierra ($7,29 \times 10^{-5}$ rad.s ⁻¹).
n	$90^\circ - \beta$ (β = latitud geográfica).
r_T	Radio de la tierra (6371 km).

Salvo en los polos, donde $a_c = 0 \text{ m/s}^2$ debido a $\beta = 0^\circ$, la fuerza centrífuga actúa en todos los demás lugares de la superficie terrestre y es apreciadamente menor en comparación a GT. Por esto se abrevia la fuerza gravitatoria neta solo con “g”. En la medición de la fuerza gravitatoria neta no se puede distinguir entre GT y GC.

2.4 GRAVEDAD DE LA TIERRA

La prospección de gravedad abarca el estudio del campo gravitacional terrestre, una materia de interés para los geodésicos en función de determinar la forma de la tierra. Dado a que no es perfectamente una esfera homogénea, la aceleración de gravedad no es constante sobre la superficie de la misma. La magnitud de la gravedad depende de 5 factores: latitud, elevación, topografía de terrenos adyacentes, mareas terrestres y variaciones de densidad en el subsuelo.

La exploración gravimétrica estudia las anomalías debidas al último factor, y estas generalmente son mucho más pequeñas que los cambios debidos a la latitud y la elevación, aunque mayores que las debidas a las mareas y (usualmente) a los efectos topográficos (Telford y Geldart 1990).

2.5 EL GEOIDE

La forma teórica de la tierra se describe por medio de la superficie equipotencial normal de ésta, coincidente con la superficie del mar y denominada geoide

En tierra firme se comprende como geoide, la superficie que se asume por el nivel del mar, ubicándose en un canal que atravesaría todo el continente de un océano al otro. El geoide involucra las variaciones del potencial, que se originan por la distribución irregular de las masas, dentro de la corteza terrestre.

La aproximación más sencilla es el esferoide definido por la función esférica.

La forma geométrica de la tierra se aproxima a una esfera y con suficientemente exactitud a un elipsoide de rotación. Las reducciones gravimétricas de los datos gravimétricos observados, se basan en un elipsoide (figura 15) de referencia definido por valores numéricos que especifican el radio ecuatorial de la tierra, el coeficiente de aplanamiento, la masa total de la misma y por el requisito que la superficie del elipsoide sea una superficie equipotencial.

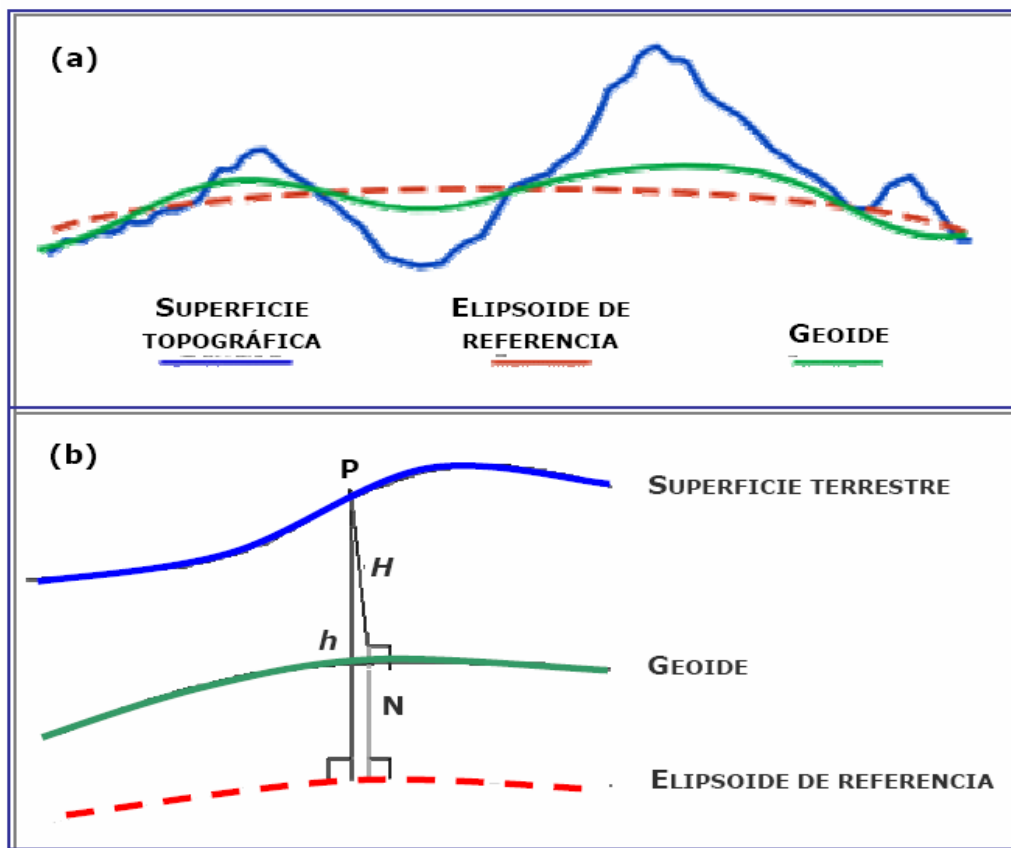


Figura 15 (a) Representación esquemática de la superficie topográfica, el elipsoide de referencia y el geoide en función de las que se definen: (b) Altura elipsoidal h , elevación sobre el geoide H y ondulación del geoide N (Tomado de: Li y Götze, 2001).

Las variaciones entre el geoide (forma teórica) y el elipsoide de rotación se llaman, ondulaciones (figura 16) del geoide y son una medida para la distribución

irregular de las masas con respecto al elipsoide de rotación. Una ondulación del geode positivo indica un exceso de masa en profundidad, una ondulación de geode negativo implica un déficit de masa en el subsuelo. La gravedad normal “ g_0 ” es decir el campo gravitacional normal de la tierra se refiere al elipsoide de rotación.

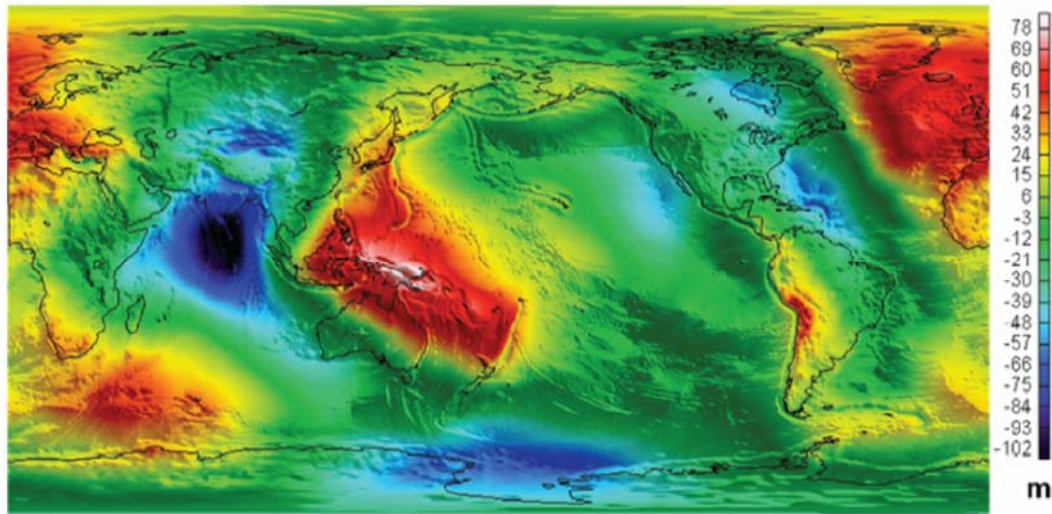


Figura 16 Ondulaciones globales del geode con una grilla de 15'x15' producida por el Earth Gravitational Model 1996 (Lemoine *et al.*, 1998). Líneas negras indican costas (Tomado de Li y Götze, 2001).

Entre las fórmulas internacionales de la gravedad se encuentra la correspondiente al elipsoide de referencia WGS-84, la cual fue adoptada en la Asamblea de la IAG (Asociación Internacional de Geodesia) Con la siguiente fórmula se calcula el valor normal o teórico de la gravedad g_0 en cualquier latitud incluyendo el nivel de referencia utilizado para esta investigación .

$$g_0(WGS - 84) = (9,7803267714 * (1 + 0,00193185138639 * \text{sen}^2\theta) / \sqrt{1 - 0,0669437999013 * \text{sen}^2\theta}) * 100000 - (0,30859 * 600)$$

(Ec 2.8)

2.6 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Los cambios o contraste de densidad laterales en el subsuelo causan un cambio en la fuerza de gravedad en la superficie. La diferencia en intensidad de la fuerza de gravedad de las masas en el subsuelo está supeditada a una mayor fuerza de gravedad relacionada directamente a la masa total de la tierra. De esta forma, dos componentes de las fuerzas de gravedad son medidas en la superficie terrestre, la primera una componente general y relativamente uniforme, y una segunda componente mucho más pequeña que varía con los cambios de densidad. En base a mediciones muy precisas y correcciones para las variaciones en la componente mayor referida a toda la tierra, el método gravimétrico puede detectar cuerpos naturales o hechos por el hombre, variaciones en la profundidad del basamento y estructuras geológicas de interés (American Society of Civil Engineers, 1998).

La prospección gravimétrica se emplea extensamente al resolver los más diversos problemas geológicos y constituye unos de los métodos fundamentales de prospección geofísica en las investigaciones zonales (Mironov, 1977). El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural al igual que el método magnético y algunos métodos eléctricos. El campo de potencial natural observado se compone de los aportes de formaciones geológicas, que conforman a la corteza terrestre hasta cierta profundidad, determinada por el alcance del método gravimétrico (o magnético respectivamente).

Generalmente no se pueden distinguir los aportes a este campo provenientes de una formación o una estructura geológica, de aquellos efectos producidos por otras formaciones o estructuras geológicas, por el método gravimétrico; sólo en casos especiales se puede lograr una separación de los efectos causados por una formación o estructura geológica individual.

Se realizan mediciones relativas, es decir, se miden las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar a otro, puesto que en estas mediciones se puede lograr una precisión satisfactoria más fácilmente en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto. Los datos reducidos apropiadamente reflejan las variaciones en la gravedad, que sólo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación. (Telford *et al.*, 1990).

2.7 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

Según la teoría del potencial siempre existe una cantidad infinita de masas, que causan el mismo campo de gravedad en un punto superficial (figura17). A continuación se presenta como es la distribución de densidad de la tierra.

2.7.1 La distribución de la densidad de la tierra y las anomalías globales de la gravedad.

La relación que existe entre gravedad, densidad, velocidad sísmica, presión, temperatura y profundidad de la Tierra no es simple. A pesar de eso, es posible determinar la densidad:

- A partir de las tablas de Nafe y Drake.
- A partir de las tablas de Wollard.
- Teóricamente con las relaciones entre V y S (ec 2.12, ec 2.13). (Götze, *et al.*, 2001).

$$\text{Ec (2.12)} \quad V_p = \left(\frac{\left(C + 4 \frac{\mu}{3} \right)}{\rho} \right)^{1/2} \quad \text{Ec (2.13)} \quad V_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

donde

C : Módulo de compresión.
 V_s, V_p : Velocidades sísmicas.
 μ : Módulo cizalla.

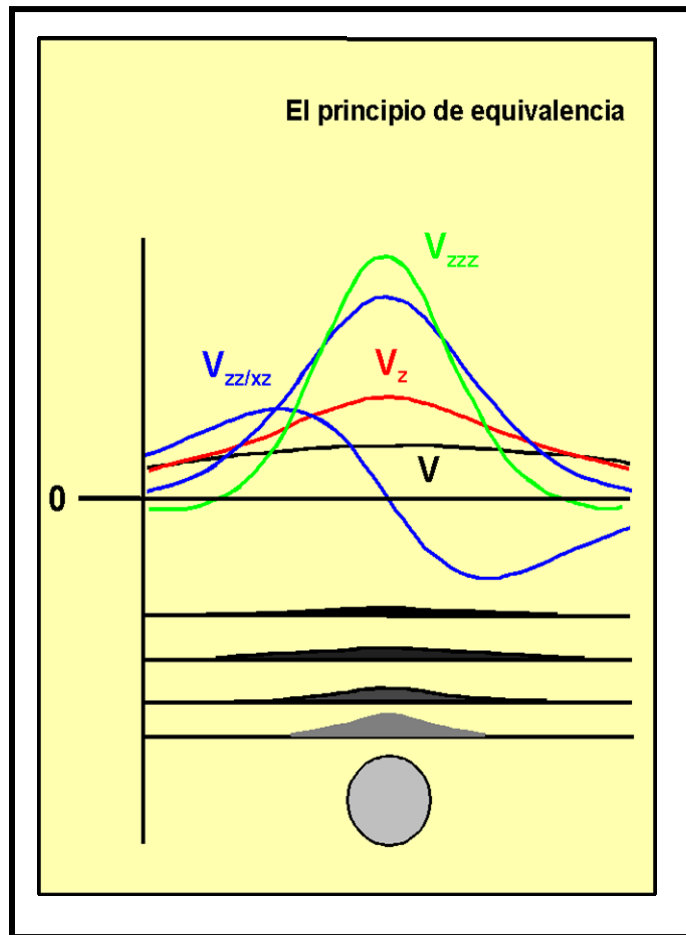


Figura 17 Principio de Equivalencia (Tomado de: Götze, et al., 2001).

Según Brown y Musset (1981) se puede obtener la distribución de densidad de la tierra como sigue:

- Densidad de la corteza variable, depende las rocas corticales;
 PROMEDIO: 2670 kg/m^3
- Densidad del manto superior.

Variable PROMEDIO: 3300 - 3440 kg/m³

- Densidad del manto inferior.

Lento incremento hasta 5000 kg/m³ y un incremento extraordinario en el límite manto/núcleo.

- Densidad del núcleo.

Unos 10000 kg/m³ (externo) unos 12000 kg/m³ (interno).

El conocimiento de esta distribución, es obtenido a partir de velocidades sísmicas figura 18. (Götze, *et al.*, 2001).

Distribución de gravedad y densidad en la Tierra

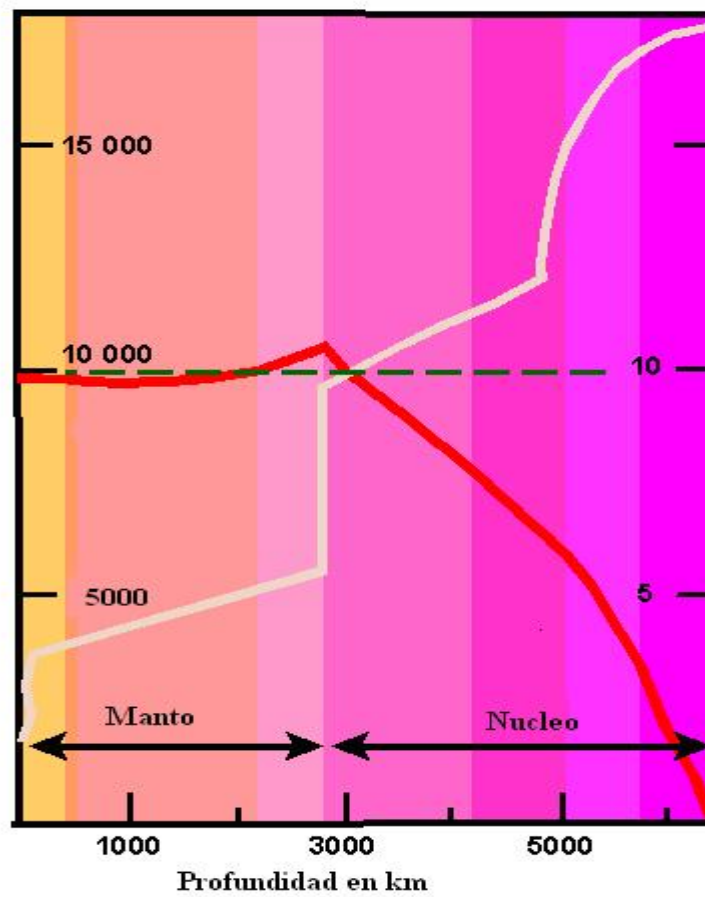


Figura 18 Distribución de la gravedad y densidad de la tierra Vs la profundidad (Tomado de: Götze, *et al.*, 2001).

2.8 AJUSTES Y CORRECCIONES DEL MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Como ya se ha mencionado en reiteradas ocasiones las lecturas gravimétricas están influenciadas por diferentes factores, entre ellos se mencionan: latitud, altitud, topografía de los alrededores, mareas terrestres, deriva instrumental y variaciones de la densidad en el subsuelo, motivo por el cual se deben hacer correcciones para ajustar las lecturas a los valores que deben tener como base a una superficie equipotencial tal como el Geoide (o cualquier superficie paralela a este).

2.8.1 Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre con la latitud.

2.8.1.1 Corrección por latitud

La rotación de la tierra y el ensanchamiento en el ecuador producen un incremento de la gravedad con la latitud, mientras que en el ecuador la aceleración centrífuga es máxima, ésta disminuye hacia los polos, siendo cero en éstos, y por ser esta aceleración opuesta a la aceleración de gravedad, el comportamiento es inversamente proporcional.

La fórmula internacional de gravedad se encuentra la correspondiente al elipsoide de referencia WGS (ec 2.14), la cual fue adoptada en la Asamblea de la IAG (Asociación Internacional de Geodesia) y es la utilizada en este trabajo.

$$g_o(WGS - 84) = (9,7803267714 * (1 + 0,00193185138639 * \text{sen}\theta^2) / \sqrt{1 - 0,0669437999013 * \text{sen}\theta^2}) * 100000 - (0,30859 * NR)$$

(Ec 2.14)

donde:

NR: Nivel de referencia.

2.8.2 Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre con la altitud.

2.8.2.1 Corrección por altura o aire libre

Calculando la anomalía de aire libre ecuación 3.18 no se elimina el efecto de masas y por esto esta anomalía se usa más como base de investigaciones geodésicas. Generalmente no se puede interpretar las anomalías de aire libre geológicamente, pero se puede aprovechar su correlación tan fuerte con la topografía para determinar la densidad de las masas topográficas.

$$A_{\text{Airelibre}} = 0,3086 * (h - NR)$$

(Ec 2.19)

donde

h: Altura de la estación.

NR: Nivel de referencia.

Al efecto de la altura se denomina efecto de aire libre, puesto que las masas de rocas presentes o no presentes entre el nivel de referencia y el nivel de la estación de observación no influyen.

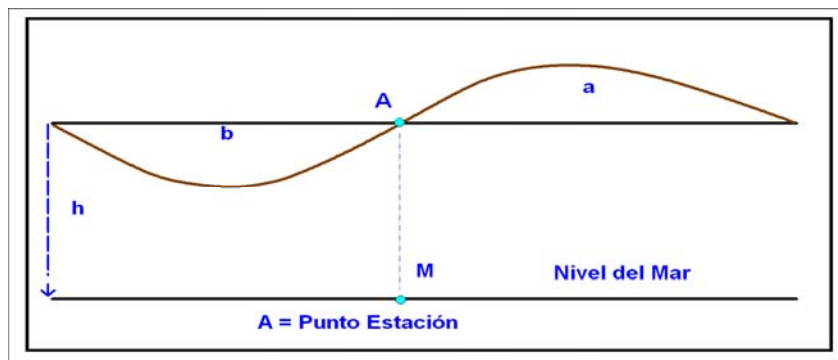


Figura 19 Corrección de aire libre. (Tomado de: Cantos, 1974).

En resumen en la figura 19 muestra la corrección de aire libre debida a la altura h desde la estación A hasta el nivel del mar, y está a una altitud h sobre el nivel del mar está a una distancia h más alejada del centro de la tierra que otra estación que estuviera al nivel del mar.

2.8.2.2 Corrección de Bouguer

Esta elimina el efecto de las masas de rocas ubicadas entre el nivel de referencia y la estación de observación. Las masas de rocas ejercen una atracción gravitatoria extra a una estación de observación situada en una altura mayor a aquella de la estación de base.

El incremento esperado de la atracción gravitatoria debido a las rocas ubicadas entre el nivel de referencia y el nivel de la estación de observación, a menudo se modela utilizando la hipótesis de que se puede aproximar la roca con una losa horizontal de dimensiones infinitas y de densidad uniforme, cuyo piso coincide con el nivel de referencia y cuyo techo está en el nivel de la estación de observación ec 2.17

$$C.Bouguer = 0,04191.(h - N.R).\rho$$

(Ec 2.17)

donde

h : altura en metros m.s.n.m.

$N.R$: nivel de referencia.

P : densidad en g/cm^3

2.8.2.3 Corrección topográfica.

Es una modalidad que toma en cuenta el efecto gravitatorio de las masas por

encima y por debajo del nivel h de la estación, ya que en la corrección de Bouguer se supone que el terreno es horizontal.

El material **a**, ubicado por encima de la estación (figura 19), atrae a la masa puesta en A en el sentido opuesto a la fuerza de la gravedad, mientras el material **b** (por debajo) actuará en sentido contrario. Puesto que el efecto del material del valle **b** habría que restarlo a la corrección de Bouguer y ésta es negativa, la corrección total topográfica irá siempre sumada a la gravedad observada. Esta corrección toma en cuenta el efecto de la topografía alrededor de la estación (Cantos, 1974).

Para hallar esta corrección se debe conocer la topografía alrededor de cada estación. Adicionalmente se emplean unos gráficos ideados por Hayford, Bowie y Hammer, que consisten en una serie de círculos concéntricos (figura 20) alrededor de la estación y divididos en sectores o compartimientos, cada cual con una contribución conocida por unidad de elevación media. Cuanto mayor es la distancia a la estación, mayor es la zona de igual efecto topográfico. La corrección total se obtiene sumando las contribuciones de cada compartimiento hasta una distancia en la que el efecto se hace insignificante (Dobrin, 1961).

Actualmente se utiliza una gran variedad de software especializados para realizar este tipo de corrección.

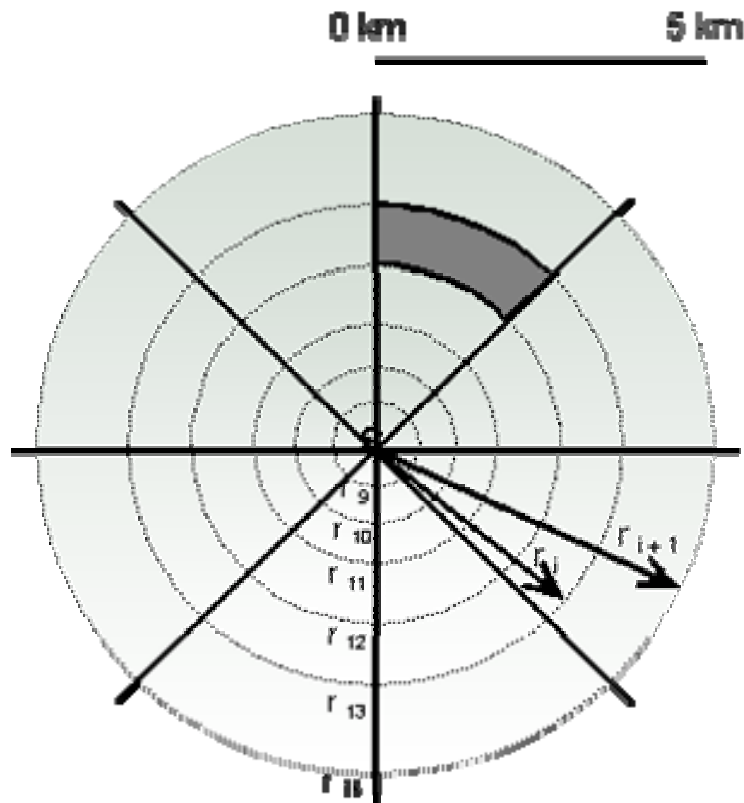


Figura 20 Plantilla para la reducción topográfica. (Tomado de: Götze, et al., 2001)

Los valores de la reducción topográfica dependen mucho del relieve especialmente en los alrededores de la estación. Cuanto más irregular es el relieve, tanto más grande son los valores de la reducción. En el cálculo de la corrección topográfica influye también la densidad del terreno.

2.8.3. Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre con el Tiempo.

2.8.3.1 Efecto de las mareas.

Las atracciones gravitatorias del sol y la luna causan el efecto de las mareas que depende de la posición astronómica de ambos y de la latitud, siendo variable con el tiempo; estas fuerzas producen una pequeña deformación de la superficie marina. Su amplitud máxima puede llegar en total a 0,3 miligales, pero su variación máxima es

solamente de unos 0,05 mGal/hora.

Debido a la alta sensibilidad de los instrumentos de medición de la gravedad aptos para la prospección, estos responden a la atracción gravitatoria del Sol y de la luna y registran estas variaciones periódicas causadas por estos movimientos de la tierra. Estas fuerzas regularmente alzan y bajan las aguas terrestres no rígidas en ciclos mareales previsibles. El ciclo entero de las mareas está caracterizado por variaciones iguales y menores de 0,2 a 0,3mGal. La corrección para la influencia de las mareas se puede realizar recurriéndose a tablas publicadas regularmente y con anticipación para cada año.

2.8.3.2 Deriva instrumental

Cuando se toman mediciones de gravedad por un gravímetro bajo las mismas condiciones y lugar durante un día se obtiene distintas lecturas presentando pequeñas variaciones entre sí. Estas variaciones se deben a los resortes y fibras de torsión no perfectamente elásticos de los gravímetros, al efecto de la temperatura, presión atmosférica y a la influencia de las mareas.

Según (Cantos, 1974) esta deriva está producida principalmente por la fatiga del sistema de muelles, o por las variaciones de temperatura, aunque también existen razones incontroladas.

2.9 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE GRAVEDAD

En la prospección por gravedad se han utilizado tres tipos de instrumentos: el péndulo la balanza de torsión, y el gravímetro.

2.9.1Péndulo:

El péndulo tuvo un uso limitado para la exploración petrolífera hacia 1930.

La medición de gravedad por medio de un péndulo (péndulo de reversión) es un método absoluto.

2.9.2 Balanza de torsión

Ideado en un principio con fines geodésicos hacia comienzos del presente siglo, fue ampliamente utilizado hasta 1935 aproximadamente.

2.9.3 Gravímetro

El gravímetro es un instrumento que mide directamente pequeñas variaciones en la componente vertical de la gravedad. Este instrumento puede determinar diferencias de 0,1 miligales y aún menores. Aunque existen muchas variaciones en los diferentes gravímetros, fundamentalmente ellos se reducen a dos tipos: los estables y los inestables (Dobrin, 1961).

2.9.3.1 Gravímetros estables

Estos gravímetros tienen un solo elemento para contrarrestar la fuerza de gravedad con otra fuerza medible mediante un desplazamiento lineal, angular o eléctrico, que puede amplificarse y leerse directamente. Cualquier cambio en la gravedad se evidencia por el cambio correspondiente a este desplazamiento. Si se trata de un muelle, el cambio se refleja en la modificación de su longitud. La fórmula usual de la fuerza de recuperación de un muelle en tensión es ec 2.18:

$$F = -k(x - x_o) = mg$$

(Ec 2.18)

donde x es la longitud del muelle, x_o su longitud original antes de que se suspendiera de él un peso, y k la constante del muelle. Sabiendo que la masa m es constante, cualquier cambio en g debe originar un cambio proporcionado en su elongación.

Estos pueden ser descritos brevemente como una balanza altamente sensitiva (Parasnis, 1972).

2.9.3.2 Gravímetros inestables

En los gravímetros de tipo inestable, la fuerza de gravedad se mantiene en equilibrio inestable con la fuerza que se le opone. La inestabilidad se provoca por la introducción de una tercera fuerza que intensifica el efecto de cualquier cambio de la fuerza de la gravedad de su valor de equilibrio. Para cambios pequeños de gravedad, la fuerza que actúa por pérdida del equilibrio es proporcional al cambio gravitatorio y actúa en la misma dirección que éste (Dobrin, 1961).

2.10 ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS

Una anomalía se define de forma general como una porción de un levantamiento o cartografiado geofísico que es diferente en apariencia al levantamiento general. Una desviación de la uniformidad; una característica distinguible local en un levantamiento geofísico. El tipo de anomalía depende de las correcciones que se hayan hecho al valor observado. Una anomalía de gravedad se define como el resultado de comparar los valores gravimétricos observados con los valores gravimétricos teóricamente calculados, es decir, como la variación de los valores medidos de la gravedad con respecto a la gravedad normal, después de haber aplicado las correcciones necesarias. La anomalía de aire libre resulta de las correcciones de la influencia de las mareas, de la deriva del instrumento de medición, de la latitud y de la altura. (Reinoza, 2006)

Dependiendo de las reducciones calculadas se definen distintos tipos de anomalías:

2.10.1 La anomalía de Bouguer (AB)

Calculando sustraemos el efecto de todas las masas subyacentes, y por esto la AB solamente refleja el efecto de la distribución irregular de densidades en el subsuelo (figura 21). Esta anomalía generalmente es la base de las investigaciones de la gravimetría aplicada

$$A_{Bouguer} = G_{obsv} \pm C_{al} \mp C_{Bou} + C_{top} - G_{tteo}$$

(Ec 2.20)

donde

G_{obs}	:	Gravedad Observada
C_{al}	:	Corrección Aire Libre
C_{bou}	:	Corrección de Bouguer
C_{topo}	:	Corrección Topográfica
G_{teo}	:	Gravedad Teórica.

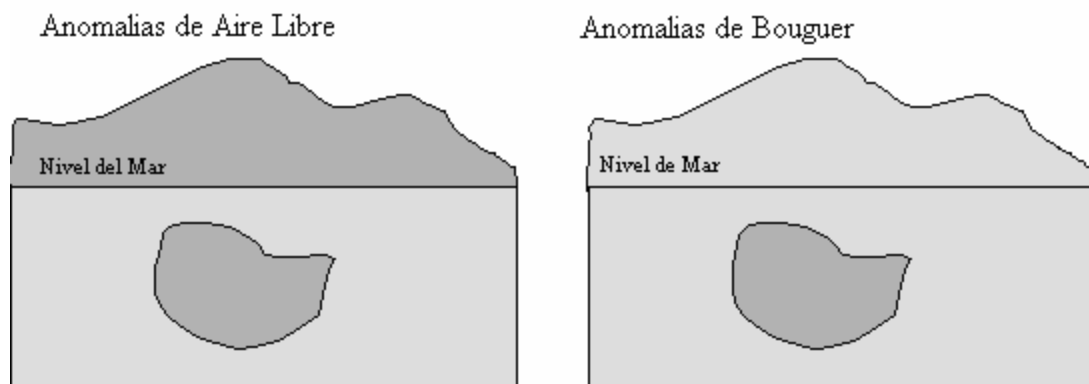


Figura 21 Diferencia entre la AAL y la AB Gris claro: masas eliminadas por las reducciones. Gris oscuro: masas no eliminadas - sus efectos son representados por las anomalías. (Tomado de: Götze, *et al.*, 2001).

2.11 ESTADÍSTICA Y GEOESTADÍSTICA DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS.

En los últimos años la estadística y geoestadística se han considerado herramientas valiosas para combinar con diferentes disciplinas geofísicas y realizar estimaciones meritorias y dar lugar a interpretaciones coherentes.

Es importante combinar estas dos ciencias de manera adecuada ya que cuenta con un reconocimiento en distintas actividades relacionadas con la exploración geocientífica. Como ya se conoce la estadística es una ciencia que tiene como finalidad facilitar la solución de problemas, para lo cual se requiere saber algunas características sobre el comportamiento de algún suceso o evento que permitan conocer o mejorar el conocimiento de ese hecho, e inferir el comportamiento de sucesos iguales o similares sin que estos ocurran. Por otra parte la geoestadística es producto de integración de técnicas estadísticas utilizadas para estimar la variabilidad espacial de los datos y mediante la integración de los resultados obtenidos, se logra generar modelos teóricos de distribución espacial, siendo la técnica de Kriging una de las comúnmente utilizada en este tipo de representaciones.

Estas técnicas describen la autocorrelación espacial entre datos de la muestra y lo utilizan en varios tipos de modelos espaciales. Los métodos geoestadísticos fueron adoptados en ecología (ecología del medio ambiente) y aparecieron recientemente para ser muy útiles en esta nueva área. (Meza, 1999). Esta autocorrelación se genera utilizando correlogramas, funciones de la covariación y variogramas para si poder relacionar la variación espacial entre densidades demográficas con la distancia (Meza 1999).

En la figura 22, se muestra un histograma de frecuencia, con su respectiva curva de probabilidades.

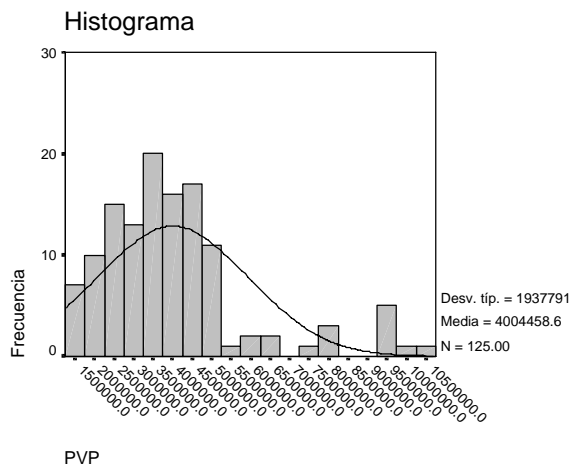


Figura 22 Ejemplo de histogramas de frecuencia con su respectiva curva de probabilidad

2.11.1 Histogramas

Esta es una herramienta utilizada para el análisis de variables con valores adyacentes. No tendría sentido agrupar valores de una variable en que las categorías se hayan asignado arbitrariamente (Meza, 1999).

Otra representación gráfica de gran utilidad es el test grafico de distribución normal.

Este procedimiento trata de estimar si los datos pueden proceder de una distribución de población normal. La figura 23 muestra el gráfico Q-Q (cuartiles reales y teóricos de una distribución normal).

Los cuartiles dividen a la muestra en una serie de grupos de igual tamaño (Meza, 1999). En el se puede observar como los valores se ajustan a una distribución normal teórica que viene representada por una línea recta y los corresponden a las diferentes puntuaciones de los sujetos en la distribución empírica. Si los puntos están próximos a la recta, quiere decir que el ajuste es aceptable y viceversa, cuanto más se alejen éstos de la misma.

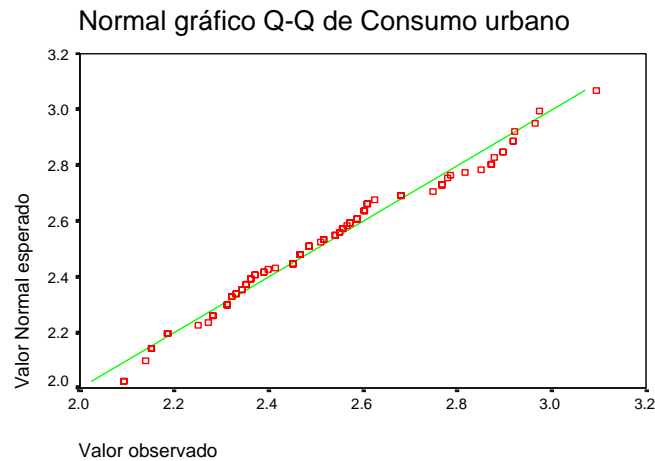


Figura 23 Ejemplo gráficos de cuartiles de una población de datos.

El gráfico que se muestra en la figura 24 representa las desviaciones de los puntos respecto a la recta. Si la muestra procede de una población normal los puntos deben fluctuar alrededor de 0 y sin seguir un patrón determinado. En caso contrario pueden alejarse de la normalidad.

Pero aunque estas dos representaciones gráficas pueden dar una idea aproximada del ajuste o no de los datos, es siempre recomendable llevar a cabo una prueba analítica (Meza, 1999).

Una de las pruebas de mayor uso para determinar si la distribución de una muestra poblacional es normal, es el test de Kolmogorov – Smirnov (K-S) con adaptación Lilliefors, o el test de Shapiro – Will. El estadístico de Shapiro-Wills se utiliza cuando se trabaja con un volumen de muestras mayor de 50.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov se utiliza para determinar el grado de ajuste de unos datos a una distribución normal. Se basa en las diferencias de porcentajes entre la distribución acumulada observada y estos mismos porcentajes para la función de distribución acumulada y que puede ser normal.

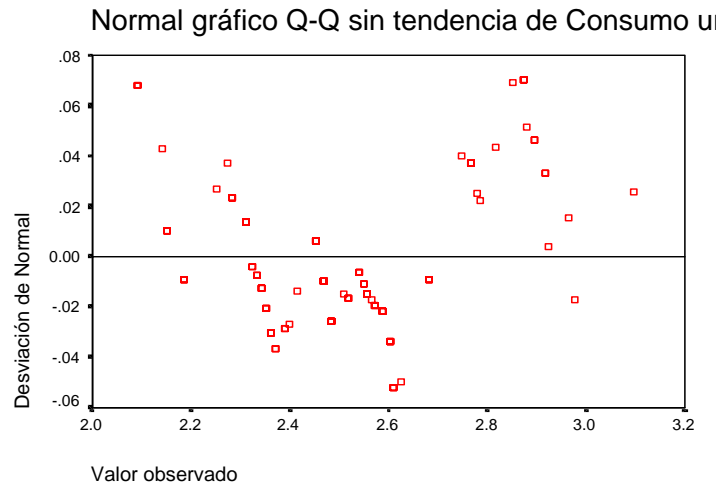


Figura 24 Ejemplo gráficos de cuartiles de una población de datos.

2.11.2 Variogramas

Los variogramas se utilizan para describir la correlación espacial entre los grados de libertad (o cualquier otra característica) de un depósito cualesquiera.

El variograma experimental

Es el variograma que se obtiene de los datos. Es una estimación del variograma local, que se define para un campo geométrico finito y que es cubierto por las muestras.

La interpretación de esta grafica consiste en que la curva del variograma se levanta, hasta nivelarse o estabilizarse alrededor de un cierto valor. Ésta es teóricamente la variación de la muestra (Meza, 1999).

El variograma típico tiene la estructura como se muestra en la figura 25:

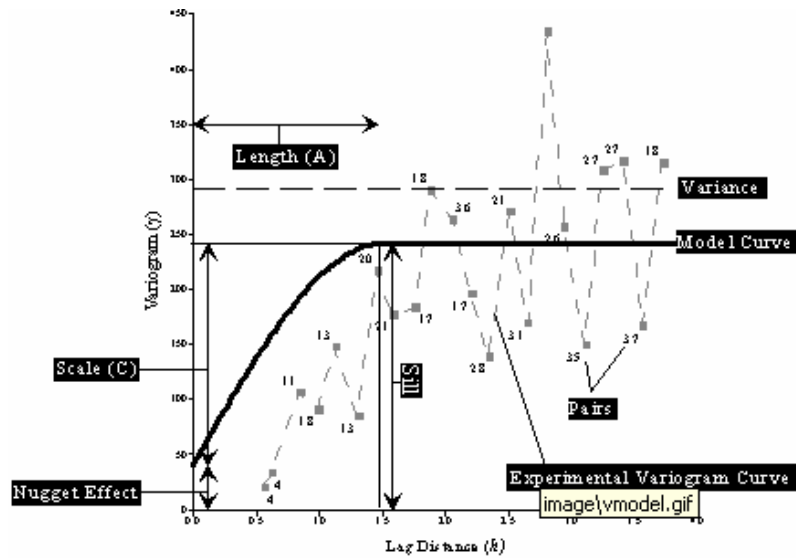


Figura 25 Ejemplo de modelo de Variograma mostrando sus parámetros (Tomado de: Ayuda Surfer 8).

- Efecto pepita (Nugget Effect) de un variograma = $\gamma(\epsilon)$, donde ϵ es una distancia muy pequeña. La interpretación del efecto pepita muestra que la variación al azar pura en la densidad demográfica (ruido blanco) puede estar asociada con el error de muestreo.
- Escala (Scale): es la escala vertical para el componente estructurado del variograma. Cada componente de un modelo del variograma tiene su propia balanza.
- Punto de inflexión (Sill): es la escala vertical total del variograma Lineal, Logarítmico, y Power variograma modelos no tienen un umbral.
- La Longitud (Length): es el rango horizontal del variograma. (Algunos modelos del variograma no tienen un parámetro de longitud; por ejemplo, el modelo lineal tiene una cuesta en cambio).
- Varianza (Variance): es la media desviación de cada valor del valor malo. La variación se indica por la línea horizontal golpeada en el diagrama mostrado anteriormente (Meza, 1999).
- Los Pares (Pairs): representa los medio variograma valoran para el grupo de

pares separado por una distancia especificada (la anchura de retraso). El número adyacente a los símbolos cuadrados el número de pares indica dentro de cada distancia de retraso.

- Curva Ejemplo (Model Curve): las muestras la forma del modelo del variograma.

Curva experimental (Experimental curve): los despliegues los grupos de pares del variograma en una parcela de distancia de la separación contra el variograma estimado (Meza, 1999).

2.11.3 Modelos de Variogramas

2.12.3.1 El variograma esférico este modelo es, hoy en día, el más usado. Este tipo de modelo es propio de campos suaves que poseen pendiente nula cerca del origen (Bosch, 2006).

2.12.3.2 El modelo exponencial es también lineal en el origen, pero alcanza una tendencia asintótica, bien más allá del valor del rango verdadero, este se acerca a la tendencia gradualmente casi siempre sin alcanzarlo. Son independiente y propios de campos que presentan cambios bruscos o texturas rugosas (Bosch, 2006).

2.12.3.2 El modelo Gausseano, es parabólico en el origen (lo que indica continuidad perfecta) y alcanza una tendencia en forma asintótica. También este modelo es propio de campos suaves poseen pendiente nula cerca del origen (Bosch, 2006).

La anisotropía geométrica es probada calculando variogramas en cuatro direcciones, N, E, NE y NO (y verticalmente para kriging 3D). Si la tendencia es anisotrópica entonces allí generalmente existe una disminución del rango perpendicularmente al rango más largo. Esto definiría una elipse de la influencia más bien que un círculo de la influencia para los depósitos isotrópicos. El problema está

definiendo diferencias en rango significativas. Esta decisión es subjetiva, pero los variogramas isotrópicos exhibirían diferencias al azar.

La anisotropía zonal no se puede eliminar por transformaciones de la distancia. En los variogramas esféricos las muestra por encima de la meseta, indican modelos enteramente diversos en las varias direcciones (Meza, 1999).

2.12 ANÁLISIS ESPECTRAL

Este método de análisis espectral permite estimar la profundidad de un cuerpo que origina una anomalía a partir de su respuesta gravimétrica o magnética. El basamento de esta técnica es la aplicación de filtros, en el dominio de Fourier, a una malla de datos en el dominio del espacio para transformarlos al dominio de la frecuencia. Matemáticamente, la Transformada de Fourier en el dominio del espacio se define como la función $f(x,y)$ ec 2.21:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(u, v) e^{i(ux+vy)} dudv \left[\frac{rad}{m} \right]$$

(Ec 2.21)

Siendo su relación recíproca en el dominio de la frecuencia:

$$f(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{i(ux+vy)} dx dy \left[\frac{ciclos}{m} \right]$$

(Ec 2.22)

donde las variables x y y son las direcciones, mientras u y v son los números de onda respectivos.

En el dominio del espacio, las unidades se encuentran en radianes por metro. Al aplicar la Transformada de Fourier y llevar la función al dominio de la frecuencia las unidades quedan expresadas en ciclos por metro.

Dado que el espectro de energía promediado radialmente es una función de onda y se calcula a partir del promedio de la energía en todas las direcciones para un mismo número de onda, el algoritmo del espectro de estos datos puede ser interpretado para determinar la profundidad estadística de los topes de las fuentes usando la relación 2.23

$$\text{Log} = (Er) = 4.\pi.h.r$$

(Ec 2.23)

donde

Profundidad estimada.

La profundidad de un conjunto estadísticos de fuentes viene determinada midiendo la pendiente de la energía del espectro (s) y dividido por 4π ec 2.24

$$H = \frac{-s}{4\pi}$$

(Ec 2.24)

donde

s : la pendiente del logaritmo de espectro

Un espectro de energía típico puede mostrar cuatro partes: una componente de fuente profunda (A), una componente de fuente poco profunda (B), una componente

de fuente somera (C) y una componente de ruido. La figura 26 ilustra la interpretación de un espectro de energía en estas cuatro componentes.

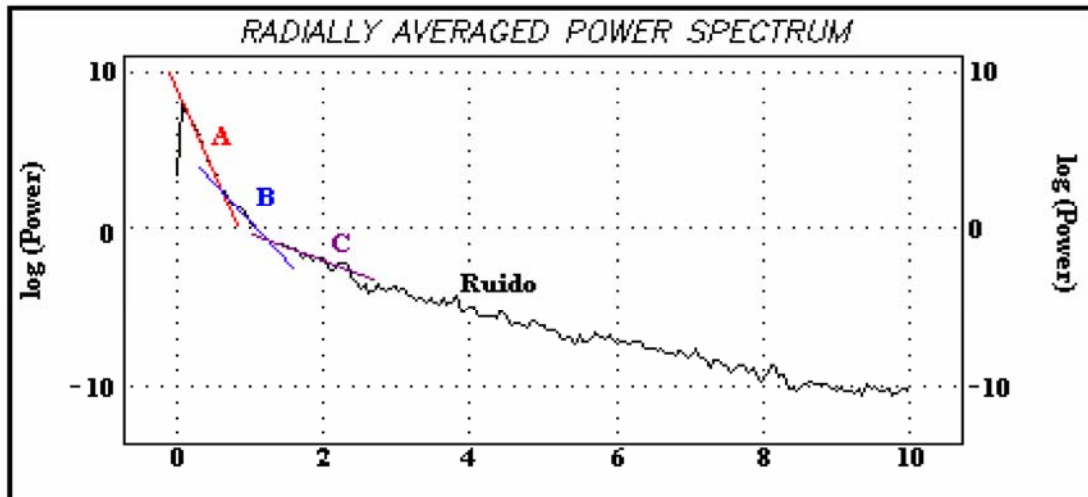


Figura 26 Espectro de Energía

2.13 DECONVOLUCIÓN DE EULER

Se dice que una función tridimensional $f(x,y,z)$ es homogénea de grado n si la función obedece a la siguiente expresión:

$$F(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z)$$

(Ec 2.25)

También, puede mostrarse de la siguiente forma:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \text{ Conocida como la Ecuación de Euler.}$$

(Ec 2.26)

Considerando los datos del campo potencial, la ecuación se puede redefinir como lo muestra la ec 2.27:

$$(X - X_0) \frac{\partial T}{\partial X} + (Y - Y_0) \frac{\partial T}{\partial Y} + (Z - Z_0) \frac{\partial T}{\partial Z} = N(B - T)$$

(Ec 2.27)

donde

(X_0, Y_0, Z_0) es la posición de una fuente magnética cuyo campo total T es medido en (x, y, z) . El campo total tiene un valor regional de B . Se debe tomar en cuenta que N en esta expresión es equivalente a n en la ecuación de Euler.

Los modelos gravimétricos y magnéticos pueden ajustarse fácilmente con la ecuación de Euler (Thompson, 1982). El grado de homogeneidad, N , puede interpretarse como un índice estructural, que es una medida de la proporción de cambio con la distancia de un campo potencial. Un dipolo magnético puntual conformado por $N = 3$ es una masa de gravedad puntual, un polo magnético y una línea de dipolos magnéticos conformado por $N = 2$; es considerada una escollera magnética y una masa de una tubería anómala está conformada por $N = 1$. (Reid. *et al.*, 1990) muestra que un contacto magnético rendirá un índice de 0 con tal de que un desplazamiento A , sea introducido para incorporar una amplitud de la anomalía.

$$A = (X - X_0) \frac{\partial T}{\partial X} + (Y - Y_0) \frac{\partial T}{\partial Y} + (Z - Z_0) \frac{\partial T}{\partial Z}$$

(Ec 2.28)

Dado un conjunto de archivos de datos totales observados, se puede determinar una ubicación de fuente óptima (X_0, Y_0, Z_0) resolviendo las ecuaciones de Euler para un índice dado N , por la inversión de mínimos cuadrados de los datos. El proceso de la inversión puede producir una incertidumbre para cada uno de los parámetros ajustados, y esto puede usarse como un criterio para aceptar o rechazar una solución. Este proceso de la inversión es llamado deconvolución de Euler.

2.13.1 Análisis de la deconvolución de Euler

El objeto de realizar la deconvolución de Euler es producir uno o varios mapas que muestren las ubicaciones y las profundidades de las anomalías de un campo potencial. En las interpretaciones regionales se buscan contactos de fallas, para ello se recomienda usar un índice estructural o “Structure Index” (SI) entre 0 y 1 (0.5) (tabla 3).

La selección de SI se basa en la homogeneidad de la relación de Euler la cual no asume ningún modelo geológico. El grado de homogeneidad (N) ($-n$ en la ecuaciones de Euler) se interpreta como SI (medida de la tasa de cambio con la distancia al campo).

Tabla 3 Tabla esquemática para la selección del índice estructural (SI).

SI	Campo Magnético	Campo Gravimétrico
0.0	Contactos	Diques
0.5	Cambios densos	Cinta
1.0	Diques	Pipa
2.0	Pipa	esferoides
3.0	esferoides	

El índice estructural correcto para una cierta características es el que un grupo de soluciones menos disperso (figura 27). De allí se puede pensar en el SI como control, en el que SI produce el mayor pico de resultados.

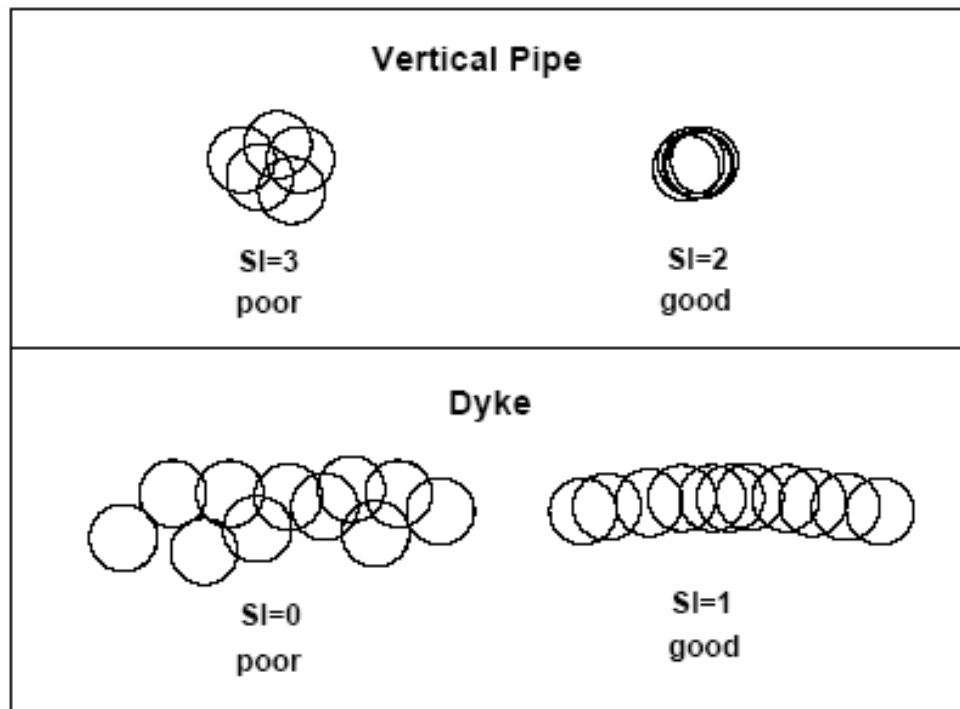


Figura 27 Modelo esquemático para interpretación de las fuentes.

Las soluciones a la derecha representan el SI correcto para un cuerpo en forma de pipa o un dique. Se aprecia que un índice muy pequeño da profundidades muy someras y si es muy alto da profundidades muy profunda. (Reid *et al.*, 1990)

El programa Oasis Montja versión 6.1 incluye en sus aplicaciones la herramienta deconvolución de Euler (Euler 3D deconvolution) de GEOSOFT es el que aplica la deconvolución de Euler seleccionando una ventana cuadrada de datos de un mallado del campo total. Para tener un criterio certero, se puede tomar como un error de profundidad una tolerancia definida (típica del 15%), que está dentro de una distancia limitada de la ventana observada. Las soluciones aceptadas se guardan en un archivo XYZ que puede usarse para imprimir los resultados. Cabe resaltar que la desviación estándar es una medida única de cómo debe ser medido el campo conformado por la ecuación de Euler para un índice dado. Esto asume que el índice escogido es correcto para la fuente del campo observada en la ventana de la muestra,

y que sólo una fuente está produciendo el campo observado en la ventana.

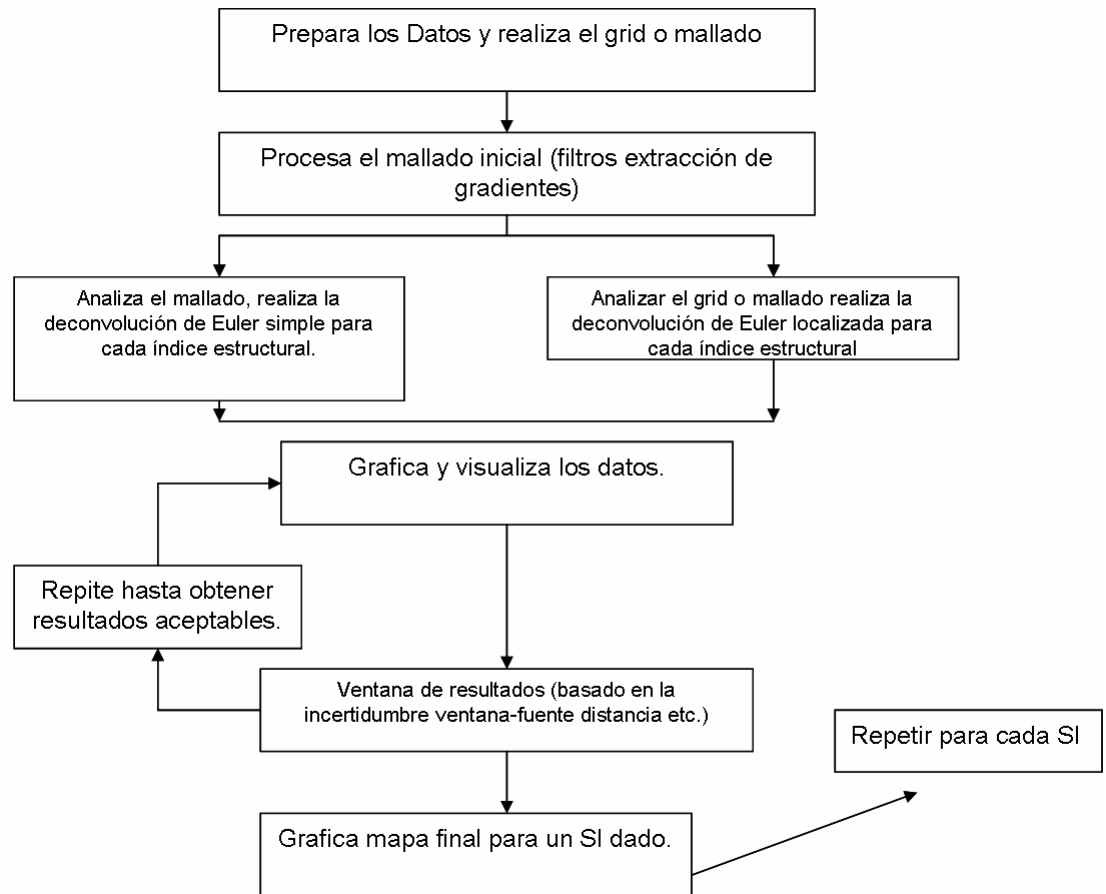


Figura 28 Diagrama de secuencia para realizar la Deconvolución de Euler con Oasis Monjna

En la figura 28 se muestra la secuencia que sigue el programa para generar los mapas de deconvolución de Euler.

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra ubicada en el occidente de Venezuela específicamente en una región definida como “El Triángulo” (Audemard, 1998) delimitada al norte por el sistema de fallas de Oca-Ancón, al oeste por la falla de Valera y al sur-este por el sistema de fallas de Boconó (figura 29). Esta importante región amalgama un conjunto de significativas unidades fisiográficas, a las cuales corresponden grandes unidades geológicas. También se exhiben características estratigráficas y estructurales muy particulares, como consecuencia de que se halla como punto de convergencia de la cordillera de la Costa y los Andes Venezolanos.

Esta región se caracteriza por la presencia de varias depresiones de forma principalmente triangular o irregular entre las que se destaca muy especialmente la depresión de Sabana de Carora, la cual corresponde específicamente al área de estudio, (figura 30).

3.1.1 TECTÓNICA REGIONAL

El occidente de Venezuela se caracteriza por presentar una convergencia oblicua de las placas del Caribe y Suramericana originando una banda de deformación, marcada por cinturones de rocas metamórficas (Napas de Lara).

Dentro de este marco, Stephan (1977) propuso una serie de eventos tectónicos importantes que influyeron en la conformación actual del Surco de Barquisimeto en el estado Lara, generando plegamientos, fallamientos y cabalgamientos en rocas de

edad Cretácicas:

El primer evento fue el de mayor magnitud, consecuencia de la tectónica compresiva que afectó el Cretácico Tardío en la Cordillera de la Costa. Éste está evidenciado por el metamorfismo incipiente presente en la Formación Barquisimeto (Bushman, 1965).

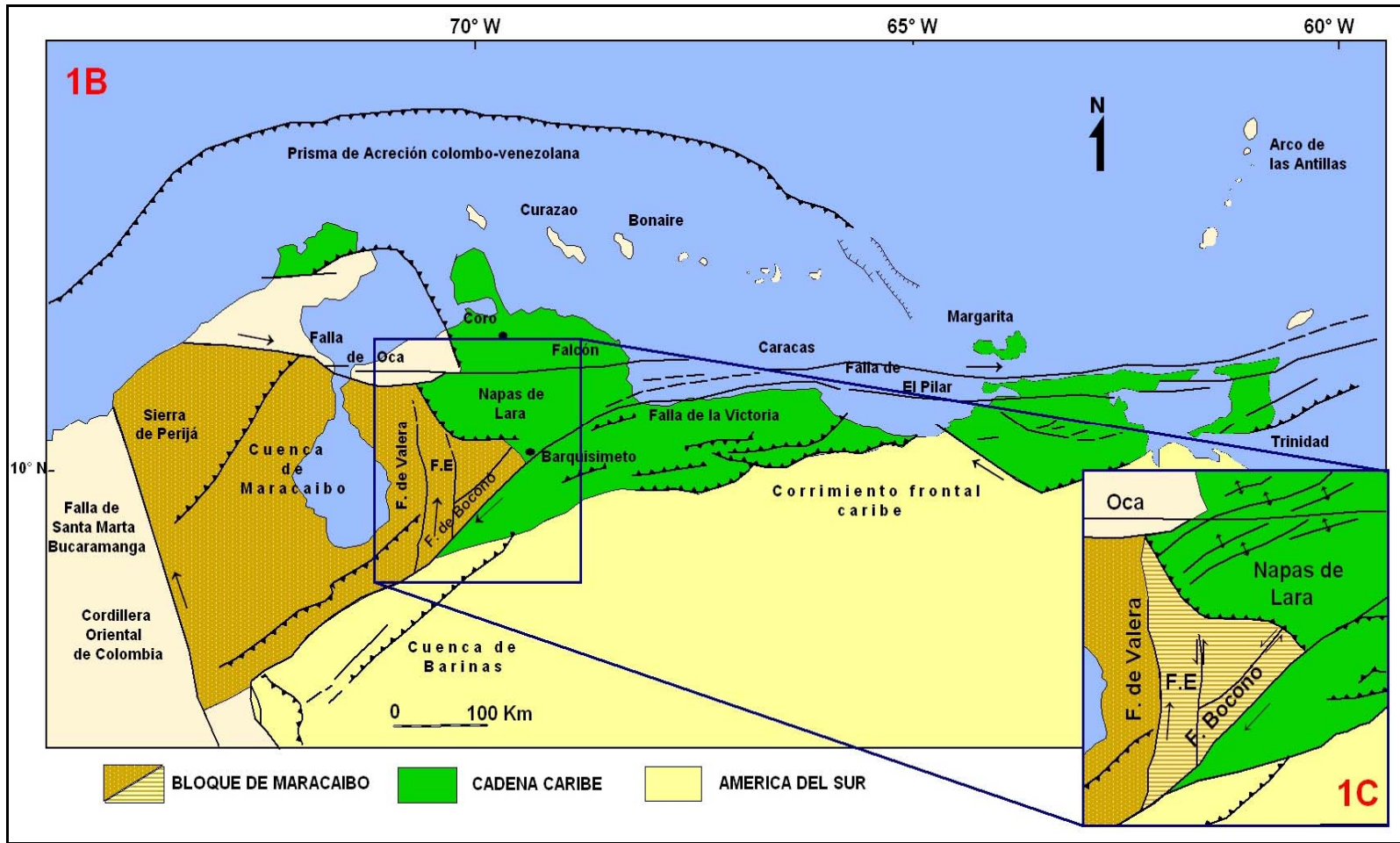


Figura 29 Mapa estructural de la parte noroccidental de Sur América (Modificado de: Stephan, 1982).

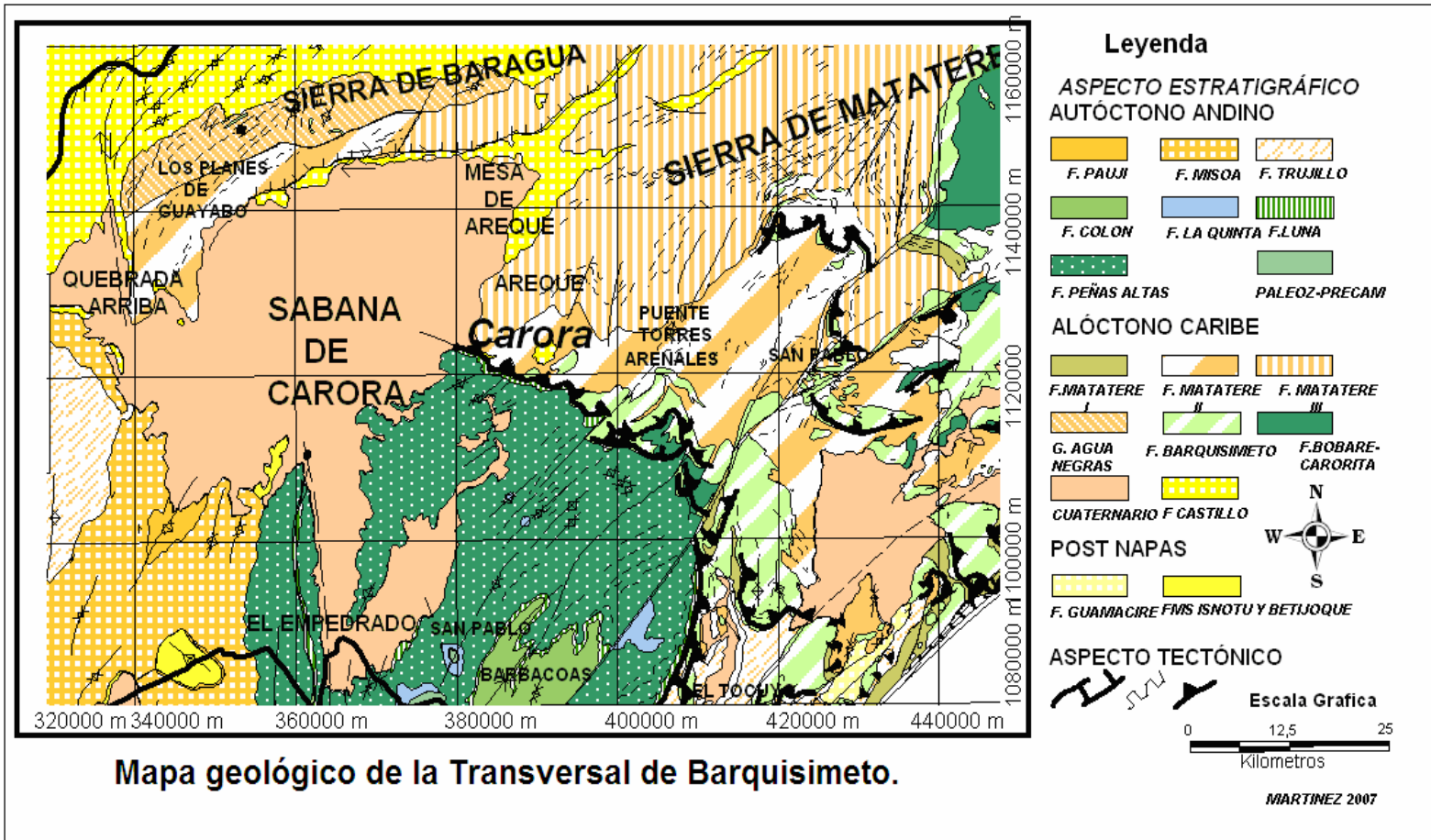


Figura 30 Mapa geológico de la transversal de Barquisimeto (Modificado de: Stephan, 1982).

El segundo evento propuesto, abarca desde el Paleoceno hasta el Eoceno Medio (?), el cual describe la inestabilidad tectónica en los bordes del surco y da lugar al emplazamiento gravitacional de bloques de diversas formas, tamaños y edades y una sedimentación tubidítica de origen tectónico (flycgh).

El tercer evento lo constituye un conjunto de corrimientos de gran magnitud a escala regional definido como las Napas de Lara. (Stephan, 1977) y la acción de una tectónica compresiva en dirección NO-SE y vergencia SE, que conduce a comportamiento de las capas y el plegamiento cerrado, produciendo falla de corrimientos y escamas.

Y un último evento relacionado con fallas verticales de componente dextrales que corta las demás estructuras.

Dentro de estas perspectivas, las estructuras andinas corresponden fundamentalmente a fallas y flexuras dispuesta de forma casi vertical (Stephan, 1977), nacidas en el basamento. Se pueden distinguir dos familias de fallas de direcciones N35° a 55° E, que presentan el rumbo general de los Andes. A lo largo de las estructuras presentes en el sector, existen indicios de una extensión casi NO-SE en el basamento (Graben de San Lázaro) o de movimientos trascurrentes de la falla de Valera. En resumen, las estructuras de los Andes se presume que son fundamentalmente el resultado de movimientos verticales en el basamento, sin embargo, estos movimiento parecen ser una respuesta de la presencia de esfuerzos compresivos horizontales (García, 1977).

Audemard, (1998) menciona que la simple estructuración geológica de la región del triángulo es poco conocida a excepción del ensayo de síntesis e integración geológica regional, a nivel de la transversal de Barquisimeto realizado por Stephan en 1982 (figura 32). Sin embargo, se han realizado algunas menciones muy dispersas y puntuales tales como las de:

Gallardo (1985) en donde hace referencia a la falla de Los Algodones-Siquisique, ubicada al noreste de la cuenca Sabana de Carora, quien establece su

componente transcurrente dextral basado en drenajes desplazados, a las que están asociados facetas triangulares.

Mathieu (1989) describe a la falla sub-meridiana-similar a la falla de Valera conocida actualmente como falla de Burbusay (Audemard, 1998), que controlaría la terminación occidental de la serranía de Baragua situada al norte de la cuenca. Y posteriormente señala que la misma se encuentra enmascarada dentro de la sabana del río Diquiva por los depósitos cuaternarios.

Desde un punto de vista más regional del área, se citan a continuación las estructuras más resaltantes que delimitan a la región de El Triángulo:

3.1.1.1 La falla de Boconó

Es uno de los rasgos geotectónicos más importantes (figura 31) de la parte noroccidental de América del Sur, la cual está caracterizada morfológicamente por una alineación de valles y depresiones lineales (cuencas de tracción), orientados aproximadamente en dirección N45°E. Se extiende por más de 500 km, cruzando en forma oblicua a los Andes merideños y cortando el extremo occidental de las Montañas del Caribe (Cordillera de la Costa y Serranía del Interior). A lo largo de toda su extensión, se observan una o varias trazas activas, denominadas sistema de fallas de Boconó, la cual se caracteriza por escarpes de falla, canales fluviales desplazados, lagunas de falla, lomos de falla y otros rasgos geomorfológicos típicos de fallas rumbo-deslizantes (PDVSA-INTEVEP, 1997).

La falla de Boconó tiene una expresión topográfica muy pronunciada y en la mayor parte de su extensión es una zona de falla y no una falla individual, se encuentra paralela a la parte central de los Andes merideños, el movimiento a lo largo de la falla se refleja en el contraste litológico a través de ella, el desplazamiento de rumbo hacia la derecha se refleja en su efecto sobre rasgos pleistocenos, el rumbo de la falla frecuentemente es desplazado por fallas oblicuas (Rod ,1959).

La orientación transversal de la falla de Boconó con respecto a la cordillera, así

como el hecho de que corta provincias geológicas y tectónicas distintas, es indicio de que esta falla es una estructura externa a los Andes y de que ella se incorporó al límite en el Terciario Tardío. (Cluff y Hansen ,1969).

3.1.1.2 La falla de Valera

Esta importante falla podría alcanzar 220 a 240 km de largo en su extensión total, con una orientación de N30° E al sur de Valera, y una dirección prácticamente N-S (Kehrer, 1925; García *et al.*, 1957).

Su reactivación cuaternaria es compleja, probablemente a consecuencia de la posición oblicua que ocupa en la cordillera andina, y también como resultado de su brusco cambio de orientación al nivel de la ciudad de Valera.

En el segmento de falla situado al norte de la ciudad de Valera y al oeste de la cuenca de Sabana de Carora, presenta diferentes características tectónicas que el segmento ubicado al sur a pesar de encontrarse geográficamente en prolongación uno del otro. Es en particular muy notable la diferencia de régimen de esfuerzos existente entre ambos segmentos norte y sur, ya que el primero es transcurrente en compresión y el segundo transcurrente en tracción.

En el segmento norte, la falla de Valera tiene una orientación general N-S, y su buzamiento es aproximadamente vertical. Su desplazamiento cuaternario es horizontal, de tipo sinistral salvo en los últimos kilómetros de la extremidad Sur, donde se amortigua en fallamiento inverso y plegamiento. Fuera de esta complicación local, se trata de un sistema simple de tramos muy rectilíneos organizados en “échelon”, los cuales son frecuentes a pequeña escala y pueden alcanzar una amplitud de 2 km, en algunos casos (PDVSA-INTEVEP, 1997) (Figura 31).

3.1.1.3. La falla de Oca-Ancón

Este importante sistema de fallas de tipo dextral es de gran extensión en el norte

de Suramérica, extendiéndose desde la costa oeste de Colombia (Santa Marta), pasando por el norte de Perijá, la isla de Toas, norte del estado Zulia, las sierras de Falcón y llegando hasta los valles de Aroa, en donde convergen o se une con el sistema de falla de San Sebastián. Esta sistema de fallas se extiende por mas de 600 km (Audemard, 1996).

La traza de esta estructura suele ser única, bien definida mediante escarpes de fallas presente en las llanura costeras en el estado Zulia, mientras que en Churuguara y Mapararí al sur de estado Falcón su traza de falla empieza a diverger y converger entre si.

Muchos autores señalan que el sistema de falla de Oca-Ancón forma una cola de caballo que busca unirse con otro segmento ubicado más al sureste, continuando hasta los valles de Aroa, deduciendo que la estructura en el subsuelo es una estructura en flor, (Soulas y Giraldo, 1994) (Figura 31).

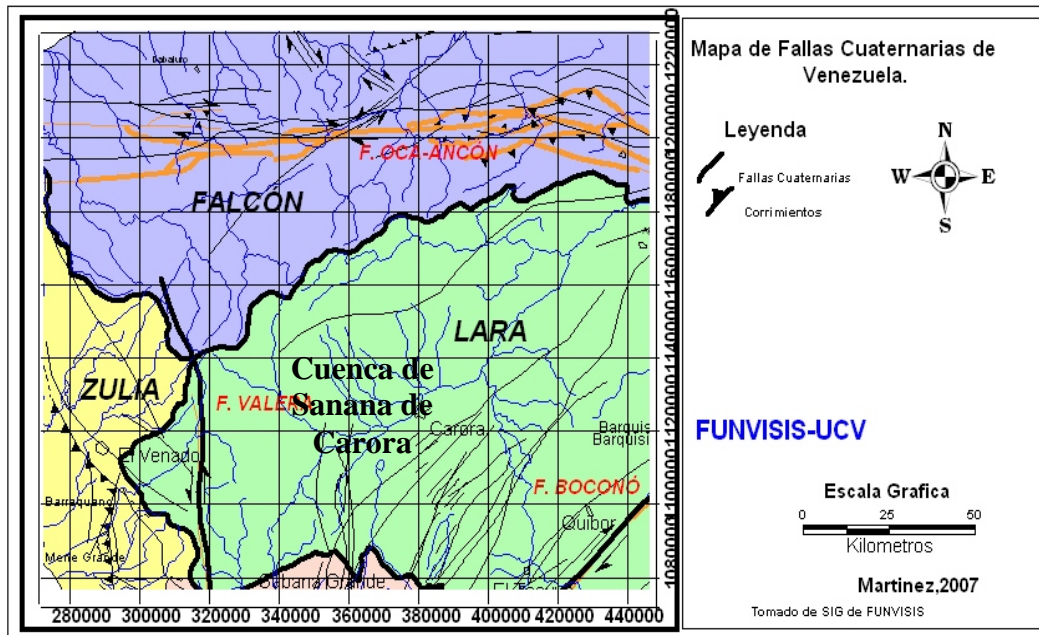


Figura 31 Mapa de las principales estructuras que circunda el área de estudio.

3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

La ciudad de Carora se encuentra ubicada en el borde sureste de la cuenca de Sabana de Carora, específicamente en el municipio Torres del estado Lara.

Entre los rasgos estructurales más importantes se menciona el corrimiento de Carora- El Tocuyo cuya naturaleza del material cabalgando cambia muy poco entre el oeste y el este de la Formación Matatere mientras que entre El Tocuyo y Barquisimeto, el cambio es brusco y ocurre a nivel de la falla de Humacaró (Rod, 1960).

La posición de esta falla juega un papel importante ya que separa a dos dominios con directrices tectónicas diferentes: al oeste entre Carora-Ira las estructuras asociadas con el corrimiento quedan bien preservadas mientras que al este de ella, el conjunto autóctono-alóctono está deformado por estructuras N-S hasta N45°E, ésta última se encuentra en dirección coaxial con respecto a la falla de Boconó

En el sector Carora-Ira el contacto se presenta generalmente muy inclinado (figura 32) aproximadamente 30° a 70° hacia el NE y su traza aparece irregular, siendo consecuencia de que se moldea sobre flexuras anteriores a la cabalgadura o que ha sido afectado por estructuras posteriores.

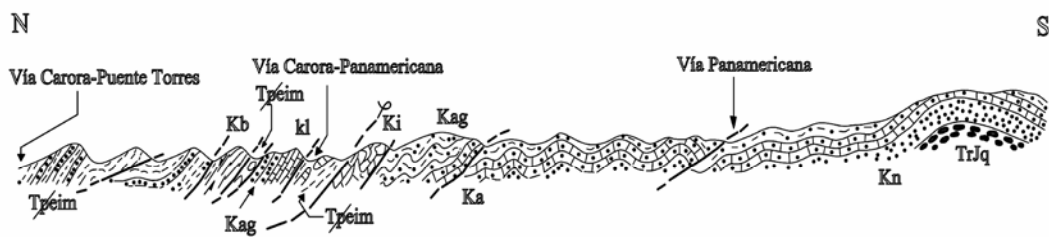


Figura 32 Corte a lo largo del contacto surco de Barquisimeto-Andes Merideños (Modificado de: Stephan, 1982).

3.2.1 Prolongación del corrimiento Carora-El Tocuyo

Hacia el oeste de Carora el corrimiento Carora-El Tocuyo desaparece exactamente por debajo de la Sabana de Carora. Hacia el este choca con la falla de Boconó aflorando del otro lado de la misma en la sierra de Portuguesa (Metz, 1960; Rondon, 1976; Campos *et al.*, 1977).

3.2.2 Falla de Burbusay

En un trabajo reciente realizado (Audemard *et al.*, 2007) plantea teorías en relación a la forma, tipo y estructuras que caracterizan a la falla de Burbusay, el cual describe que se extiende en una dirección norte-sur desde las estribaciones occidentales de la sierra de Baragua hasta la población de Boconó sobre unos 125 km de longitud donde se amortigua contra la falla de Boconó al igual que la falla de Valera.

También describe las similitudes existentes entre la falla de Valera y Burbusay la cual son cada vez más precisas:

1. Su desplazamiento cuaternario horizontal de tipo sinistral.
2. En sus sectores norte-sur ambas fallas tienen asociadas un importante relieve montañoso, lo cual denota la ocurrencia de fuerte transpresión en esos sectores.
3. En sus tramos longitudinales N-S están reunidos por una corta porción de falla oblicua, de aspecto sigmoidal, y de orientación NNO.

Una de sus teorías más significativa en referencia a la falla de Burbusay lo constituye el tramo que cruza la depresión de Carora (figura. 35), entre La estribación SW de la Sierra de Baragua (al SO de Los Chaítos-El Combate) y la Fortaleza (Sabanas de Yaguaragua), donde la falla está totalmente cubierta por los sedimentos

de las Sabanas de Carora, a excepción de los cerritos protuberantes de El Cercado (sector Piedra de Agua, Audemard *et al.*, 2007).

3.2.2.1 La traza activa de la falla de Burbusay

Se considera importante conocer las evidencias geomorfológicas diagnósticas más relevantes a lo largo de esta falla, descritas por (Audemard *et al.*, 1998 y 2007) en sentido norte-sur, así como las observaciones geológicas complementarias e interpretaciones que de ellas se derivan.

3.2.2.2 Terminación suroccidental de la Sierra de Baragua

En la terminación norte, la falla de Burbusay se conecta con un accidente inverso activo de orientación este-oeste y vergencia sur que delimita la depresión de Carora en el norte, donde la Sierra de Baragua cabalga sobre la depresión cuaternaria (figura 33).

Estos autores sugieren que la estructuración de la falla de Burbusay pueda corresponder a una gran rampa lateral, de influencia cortical, lo cual puede ser únicamente evaluado a través de información de subsuelo. Para lograr esta conexión cinemática y mecánica, la falla de Burbusay sufre una doble inflexión, donde los segmentos submeridianos son conectados por un segmento corto de unos 15 km de longitud, de orientación NNO-SSE; presentando la geometría de una curvatura transtensiva, la cual sería responsable de la creación de la depresión del río Diquiva, que es una subcuenca al Oeste de la depresión principal de Sabana de Carora. En consecuencia, la depresión del río Diquiva puede interpretarse como una cuenca “Pull-Apart” en curvatura transtensiva, entre dos segmentos de la falla de Burbusay separados unos 10 km.

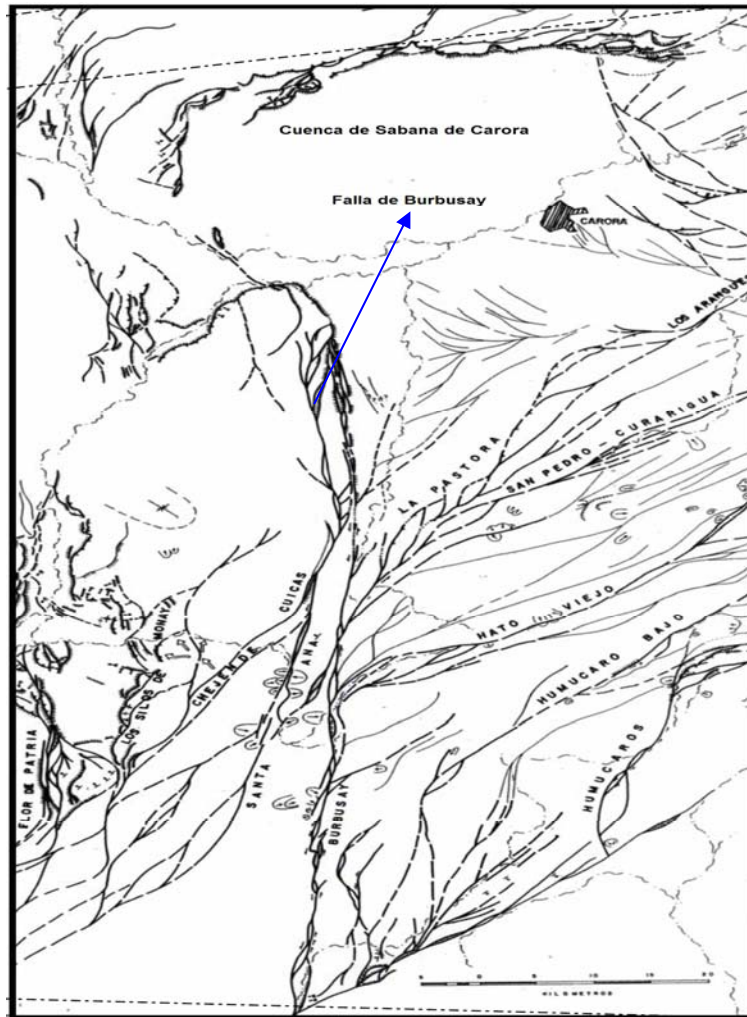


Figura 33 Cartografía neotectónica de la falla de Burbusay, y otras fallas cuaternarias del bloque de Trujillo (Tomado: de Audemard *et al.*, 2007).

Audemard *et al.*, 2007, también mencionan que la falla de Burbusay pierde su expresión morfológica dentro de la depresión de Carora, entre La estribación SO de la Sierra de Baragua (al SO de Los Chaítos-El Combate) y La Fortaleza (Sabanas de Yaguaragua) en el sector El Cercado (sector Piedra de Agua debido a la presencia de un grupo de pequeños cerros protuberantes orientados NNO-SSE, que afloran en El Cercado (al este del Central Azucarero Carora); únicos relieves presentes en la parte central de esta gran depresión semi-árida.

En resumen (Audemard *et al.*, 2007) establecen mediante evidencias geomórficas diagnósticas de actividad cuaternaria, que la falla submeridiana de Burbusay es activa según un movimiento transcurrente sinistral con significativo acortamiento transverso. Describe la falla de Burbusay con una expresión morfológica más nítida y mejor desarrollada que Valera en su desplazamiento en unos 7, a 10 km, sugiriendo que debería ser más rápida que la falla de Valera convirtiéndola en la falla más rápida del triángulo, después de Boconó; lo cual establece que sea la falla de Burbusay la que represente la mayor amenaza para las poblaciones e infraestructura asentadas en esta región del país.

En la figura 34 se muestra el mapa, geológico estructural de un sector del occidente de Venezuela, allí se observa la diferentes formaciones que constituyen el área de estudio, seguidamente se ilustra un cuadro esquemático (tabla 4), en donde aparece de manera sintética los aspectos característicos de cada una de formaciones que integran el área.

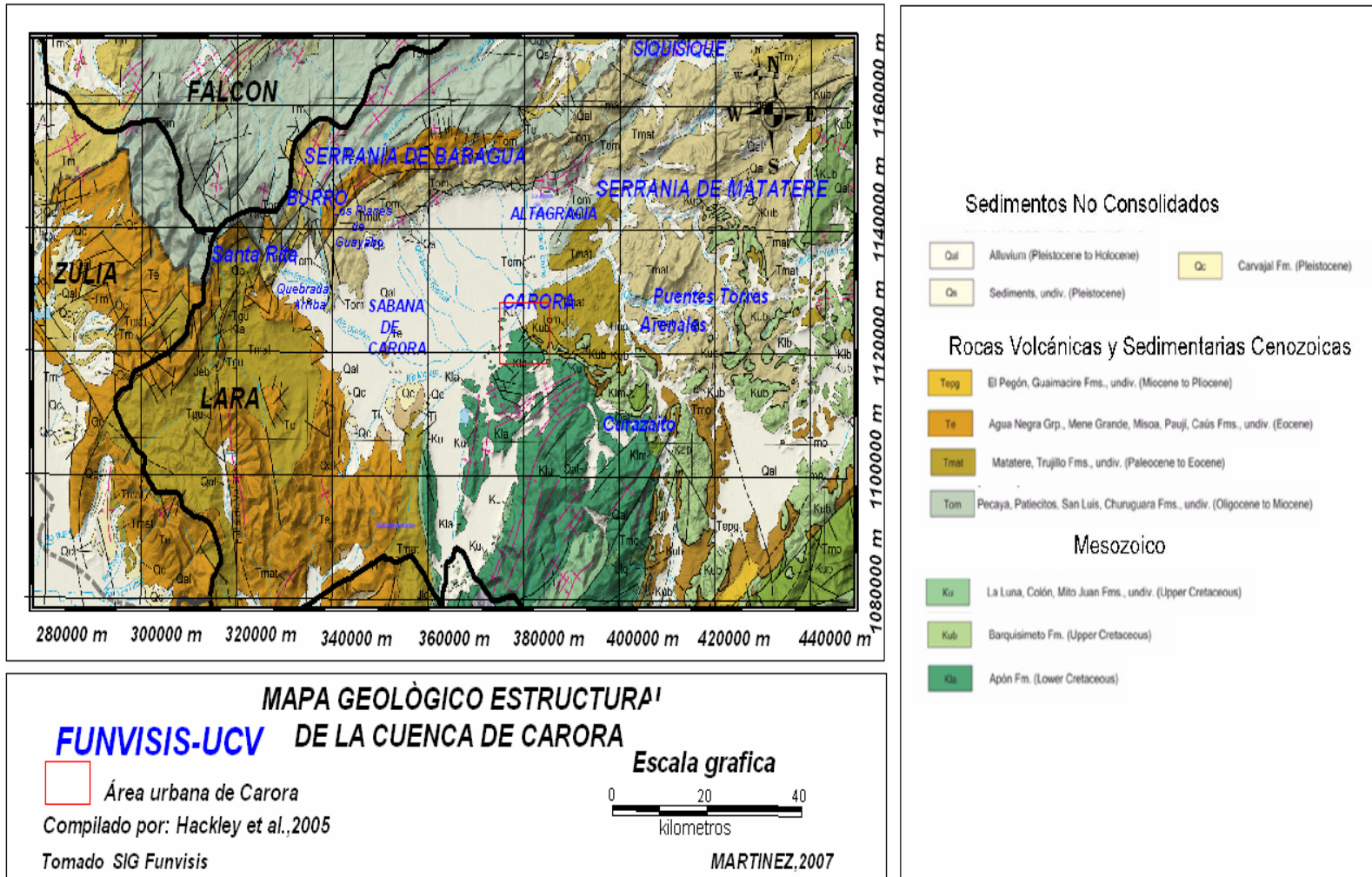


Figura 34 Mapa Geológico estructural de la cuenca de Sabana de Carora (Modificado de: Hackley et al., 2005)..

Tabla 4 Cuadro Resumen de las diferentes formaciones incluidas en el área de estudio (Tomado de Código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela, (Tomado de: Léxico estratigráfico 1997

Edad	Unidad		Descripción Litológica basada en el Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela-PDVSA INTEVEP	Densidad gr/cm ³
	Q	Cuaternario	Aluviones de ambientes de abanicos aluviales y depósitos fluviales corresponder esta al flanco noroeste de la Cordillera Andina donde afloran sedimentos cuaternarios de granulometría más fina de varios metros de espesor; y probablemente de algunas decenas de metros de espesor. Esta sedimentación fina puede ser muy espesa, puesto que nos encontraríamos dentro de la cuenca de tracción del río Diquiva.	2.0
Plioceno	Tepg	Guaimacire	Arenisca de grano fino, de colores gris claro a gris amarillento claro, caliza limolítica marga y lutita arcillosas gris azulado claro. Bushman, 1959,	2,3-2,35 (2,325)
		Isnotu	Predominantemente arcillas (65%), con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerado. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro, corrientemente abigarradas en rojo, púrpura y amarillo y localmente carbonáceas; las arenisca son de color variable, principalmente blancas a gris claro y se presentan en capes de 2 a 3 metros de espesor. Sutton (1946)	2,2
Mioceno	Tom	Castillo,	limolitas y arcillas, de color gris, compactas, masivas; las lutita son fisiles, marrón oscuro, carbonáceas, con delgadas capas de carbón; las arenisca son de grano medio a grueso. La parte superior de la unidad se caracteriza por el predominio de areniscas y conglomerados. Wheeler (1960),	1 2,3-2,35-2,4 (2,35)
Oligoceno				
Eoceno	Te	Grupo AguaNegra, Misoa, Paují.	Grupo Agua Negra: por una secuencia inferior (Formación Santa Rita) de arcilitas arenosas, arenisca, conglomerados y escasas capas de calizas; una secuencia intermedia (Formación Jarillal) de lutita con escasas calizas limosas; una secuencia superior (Formación La Victoria) de litología variada, arenisca, lutita y algunas caliza. (Senn, 1935; Guevara, 1967). Misoa Se encuentran areniscas, limolita y lutitas intercaladas en distintas cantidades, en toda la sección y hacia el este, en la sierra, algunas capas de caliza en la parte-inferior (Garner, 1926) Paují: espesa secuencia de lutitas, claramente diferenciable de las areniscas Las lutitas típicas tienen color gris mediano a oscuro, y son macizas a fisiles y concrecionarias. En estado fresco, son firmes, y frecuentemente exhiben fractura concoidal, pero meteorizan rápidamente a masas blandas y escamosas. En general, hay una virtual ausencia de arenas; una excepción, restringida a la región de Mene Grande, es la Arena de Paují Medio (Middle Paují Sand). Tobler, 1922.	2,3-2,35-2,4- 2,65 (2,425)
	Tmat	Matatere, Tevillo	Matatere: La unidad consiste en una gruesa sección de subiditas, representadas por areniscas variables, desde impure	2,3-2,35 (2,325)

e	o	c			
			Tir	Terciario (rocas extrusivas e intrusivas de máficas a intermedias)	2,7
Cretácico Superior	Ku	La Luna, Colón,	La Luna: Calizas, lutitas y areniscas en menor proporción. Colón: Lutitas microfósilíferas gris oscuro a negras, macizas, piriticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada, Liddle, 1928	2,65-2,3-2,4 (2,45) 2,4 2,3	
	Kub	Barquisimeto	Lutitas, limonita, margas compactadas, fñanitas y calizas, de color gris oscuro a negro en estado fresco y tonos muy claros de gris al meteorizar. Las capas de calizas son muy discontinuas, y se destacan más en la parte inferior de la formación. Los porfidoblastos de pumpellyita y el carácter filítico de algunas capas indican un leve metamorfismo. Von der Osten y Zozaya 1957	2,4-2,65	
Cretácico Inferior	Kpa	PeñasAltas	Aguasuelos (<i>op. cit.</i>) describen en la sección una unidad inferior compuesta predominantemente de cuarzoarenitas gris claras, de grano fino, sacaroideas a friables, con algunas intercalaciones de calizas masivas gris oscuras, afaníticas y fosilíferas que alternan con calizas grises coquinoideas y lutitas negras micro-laminadas.	2,5	
	Klb	Bobare	La unidad consiste esencialmente de areniscas cuarzosas y lutitas Bellizzia y D. Rodríguez G., 1966,	2,3-2,35 (2,325)	
Jurásico	Jlq	La Quinta	En el estado Trujillo, Tremaria (en Schubert, 1986) describió una secuencia puramente clástica.	2,35	

3.3. Características de los relieves que circundan la cuenca de Sabanas de Carora.

La depresión o Sabana de Carora está caracterizada por una topografía muy llana de geometría triangular con ápice hacia el sur y por la presencia de depósitos aluviales cuaternarios provenientes de los relieves circundantes como son: Serranías de Baragua al norte, Serranía de Matatere al S.E y la serranía de Ziruma-Trujillo al oeste. Los depósitos cuaternarios más antiguos están ubicados generalmente en sus márgenes y muy particularmente en el sector de Sabanas de Yaguaragua (ubicadas al OSO de Burere), en San Francisco (sector NO de la depresión de Carora) y en los cerros del sector El Cercado (en las cercanías a la central azucarero Carora). Es drenada esencialmente por el río Morere y sus afluentes de margen izquierda de dirección NO-SE; a su vez afluentes el río Tocuyo igualmente en su margen izquierdo.(Audemard, 1998).

La depresión de Sabana de Carora se encuentra circundadas por serranías de diversas orientaciones las cuales son: La serranía de Baragua y Ziruma-Trujillo, así como las vertientes norte de las estribaciones septentrionales de los Andes Venezolanos. En el interior de la región definida anteriormente como “el triángulo” ocasionalmente se presenta serranías intercaladas entre dos o más depresiones entre las que se encuentra las serranías de Bobare y Matatere. La parte central de esta región se caracteriza por la presencia de relieves más bajos, de morfología algo más redondeada y que aparentan estar parcialmente “inundados” por los depósitos cuaternarios continentales circundantes lo cual sugiere la ocurrencia de tasas de actividad tectónica relativamente bajas. (Audemard ,1998).

Los relieves del triángulo más significativos que circundan a la región de Sabana de Carora son:

3.3.1 La serranía de Baragua

Se extiende al norte de Sabana de Carora tiene, una dirección preferencial en sentido este-oeste y esta esencialmente constituida por secuencia alóctonas, identificadas como Formación Matatere y Grupo Agua Negras de edad eocena, y autóctonas del margen sur de la cuenca de Falcón de edad miocena (Formación Castillo). Todo esta estructurado en un gran anticlinorio con dirección este-oste con flanco sur volcado, la porción interna esta constituida por las Napas eocenas, sobre las cuales suprayace en discordancia a las unidades miocenas marinas en su flanco norte (Mathieu, 1989).

3.3.2 La serranía Matatere

Estos relieves internos al triángulo, se encuentran subparalelos a la serranía de Bobare, que separan las depresiones de Carora, Santa Inés y Duaca exponiendo las rocas alóctonas de la Formación Matatere de edad cretáceo superior-eoceno medio y a la Formación Barquisimeto del cretáceo superior.

La zona SE del triángulo corresponde al flanco norte de la cadena andina venezolana, donde se encuentran expuestas rocas de diferentes tipos litológicos y de un amplio espectro de edades.

De manera muy general, se puede subdividir la zona central de relieves bajos parcialmente inundados por depósitos cuaternarios en dos tipos:

- Las estribaciones sur de la serranía de Matatere, las cuales se encuentra ubicadas esencialmente al norte de la carretera Carora-Barquisimeto corresponde a la de formación Matatere.
- El sector entre las poblaciones de Carora-Curarigua-Pie de Cuesta, que se encuentra conformado por la Formación Peñas Altas del cretáceo medio. Esta misma unidad litoestratigráfica asociadas con las formaciones La Luna y Colón, conforman lo esencial del relieve dentro de la poligonal formada por San Pedro, Humocaró, Tocuyo y Curarigua cuya expresión topográfica aumenta en dirección a los Andes. (Audemard, 1998).

3.3.3 La serranía Ziruma-Trujillo

Es la responsable de que la red de drenajes del triangulo drene al mar Caribe aunque existen ríos que por su proximidad descorrespondería vertir hacia el lago de Maracaibo. Posee una orientación preferencial norte-sur se extiende a ambos lados de

la falla de Valera al oeste del triángulo. El volumen montañoso de la serranía esta esencialmente constituido por rocas paleógenas (Paleógeno-Eoceno) autóctonas, de la cuenca del Lago de Maracaibo: Formación Trujillo, Misoa, Paují. (Audemard, 1998).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 TRABAJOS PREVIOS A LA ADQUISICIÓN

Antes de iniciar la adquisición de datos gravimétricos, se realizó una primera etapa de revisión bibliográfica donde se obtuvo material impreso y cartográfico, relacionado a las áreas de estudio y adicionalmente se alcanzó conocimientos de diversas técnicas para ser empleadas en el desarrollo de este proyecto. Se elaboró la logística y planificación de las salidas de campo.

Primeramente, se verificó la ubicación de la zona de estudio georeferenciándola en un sistema de información geográfico (SIG), técnica que permitió generar una red (grid) para la visualización y adquisición de las estaciones gravimétricas ordinarias viables a medir (apéndice B, figura B.1). También permitió conocer las estaciones bases incluidas en el área de estudio, allí se comprobó la integración en el levantamiento de 16 estaciones bases (BM) donde se identificaron por información de los servicios del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, los valores de gravedad y coordenadas de las estaciones (BM) de Carora, Quibor, Quebrada Arriba, y Bobare, entre otras (croquis de ubicación de estaciones bases incluidas en el apéndice B), el resto de los valores de gravedad de las estaciones bases se estableció mediante el amarre las mismas, estos valores se aprecian en la tabla 7 junto a sus respectivas coordenadas.

4.2 TRABAJO DE CAMPO

Se generaron dos campañas de adquisición, la primera de ellas fue realizada por el personal de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) e INTEVEP-PDVSA en diversas jornadas durante el periodo 09/2005 al 06/2006, donde se cubrió una extensión aproximada de 16116 km.², el cual corresponde al área regional o área de la cuenca de Sabana de Carora que abarca parte de los estados: Lara, Falcón, Zulia y Trujillo ubicados en el occidente de Venezuela. La segunda campaña de adquisición fue llevada a cabo por la colaboración de personal de FUNVISIS (Ing. Jesús Alberto Moncada) cubriendo una extensión cercana a 58 m², el cual constituye el área urbana de la ciudad de Carora, cumpliendo así uno de los objetivos de este trabajo, el cual fue densificar con mediciones gravimétricas la ciudad.

4.2.1 Mediciones gravimétricas en zona de la cuenca de sabana de Carora área constituida por los estados: Lara, Zulia, Falcón y Trujillo (regional):

Por las dimensiones del área de la cuenca de Sabana de Carora, se consideró tomar lecturas gravimétricas con un espaciamiento entre 1 a 2 km, de manera de poder estimar, que estructura regional se encuentra incluida en la zona de estudio.

La adquisición de los datos se llevó a cabo tomando lecturas de gravedad, altura y coordenadas correspondientes a las estaciones ordinarias y realizando paralelamente su respectivo amarre a la estación base más cercana. Se levantaron un total de 915 estaciones ordinaria con 16 estaciones bases distribuidas en toda la zona. En la figura 35 se aprecia un mapa de la ubicación de estaciones bases presente en el área de estudio.

4.2.2 Mediciones gravimétricas en zona urbana de la ciudad de Carora:

La adquisición en el área local se llevó a cabo en la ciudad de Carora estado Lara, específicamente en el municipio Torres, con un total de 86 estaciones ordinarias medidas con un espaciamiento promedio de 500 m entre cada estación. Se realizaron mediciones de gravedad, altura y coordenadas de cada estación. Se utilizó la estación base ubicada en el aeropuerto de Carora (9001) con coordenadas en UTM E 383152 N 1125703 y valor de gravedad 978071 mGal según IGVS B.

El total de número de estaciones ordinarias tanto del área urbana como la región de Sabana de Carora es de 1014 estaciones.

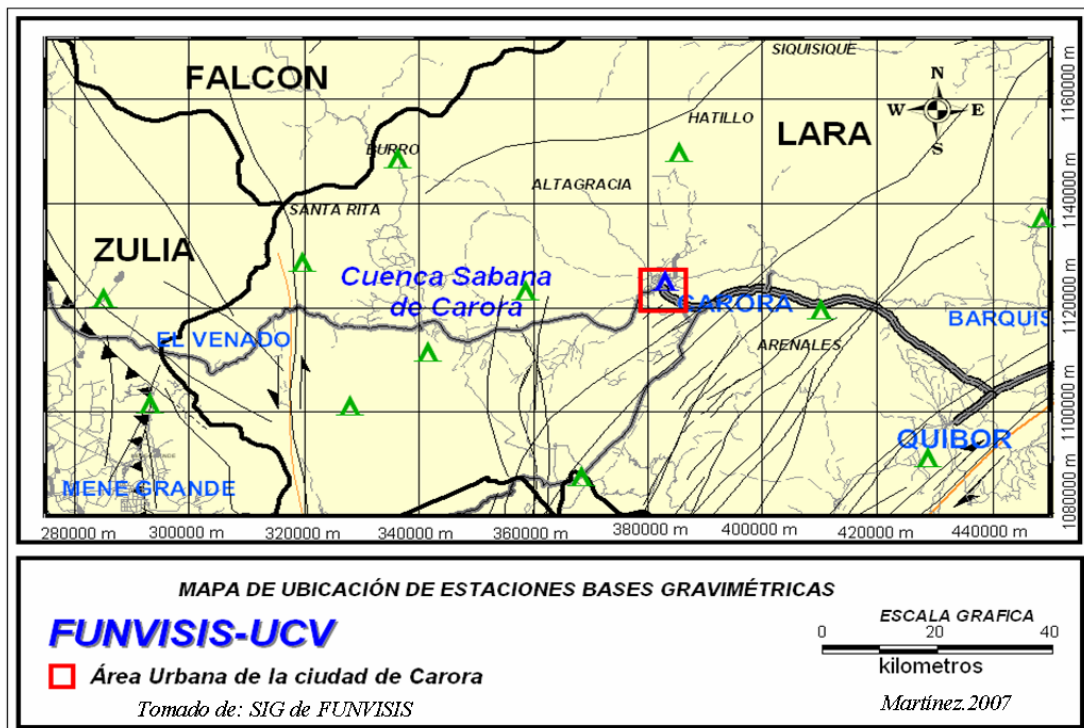


Figura 35 Mapa de ubicación de las estaciones bases presente en el área urbana y cuenca de Sabana de Carora.

La figura 36 muestra un mapa regional de ubicación de la totalidad de las estaciones (1014), las representadas con un símbolo de color rojo muestra los datos gravimétricos proporcionadas por FUNVISIS, (adquisición de FUNVISIS) y las verdes, adquiridas para densificar la ciudad de Carora (adquisición 2006).

Posteriormente se muestra en la figura 37 un mapa local del área urbana de Carora donde se visualizan las estaciones adquiridas en este trabajo.

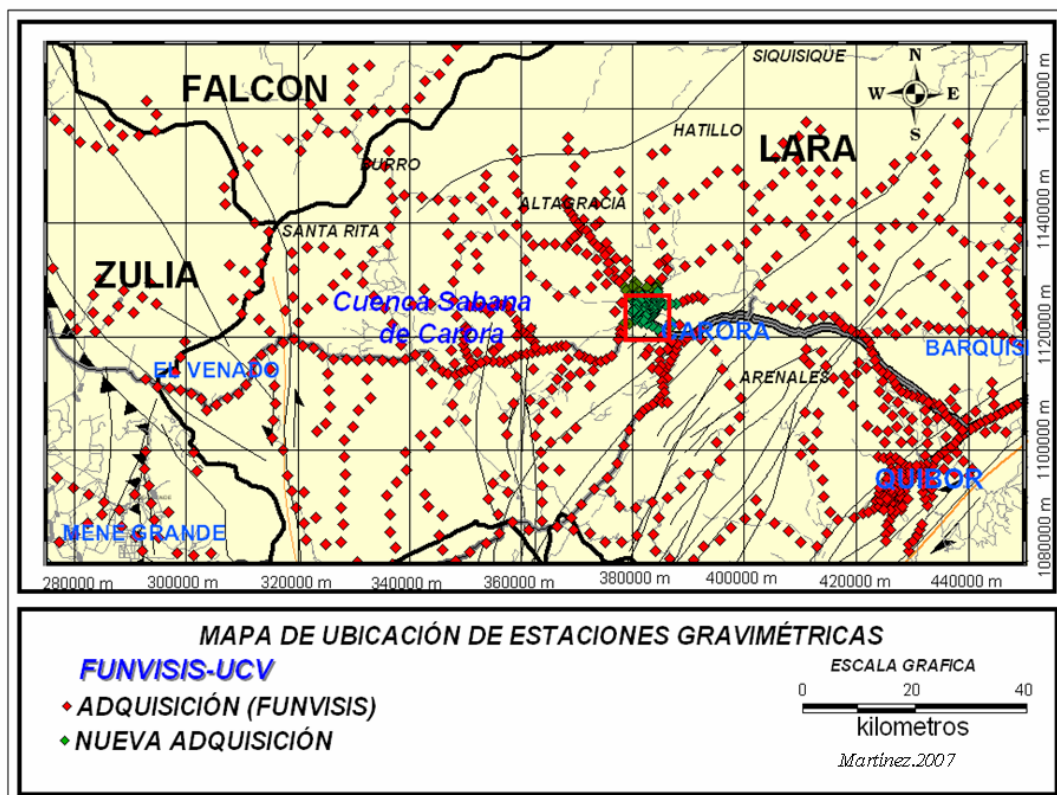


Figura 36 Mapa de la cuenca de Sabanas de Carora donde se ubican las estaciones ordinarias gravimétricas.

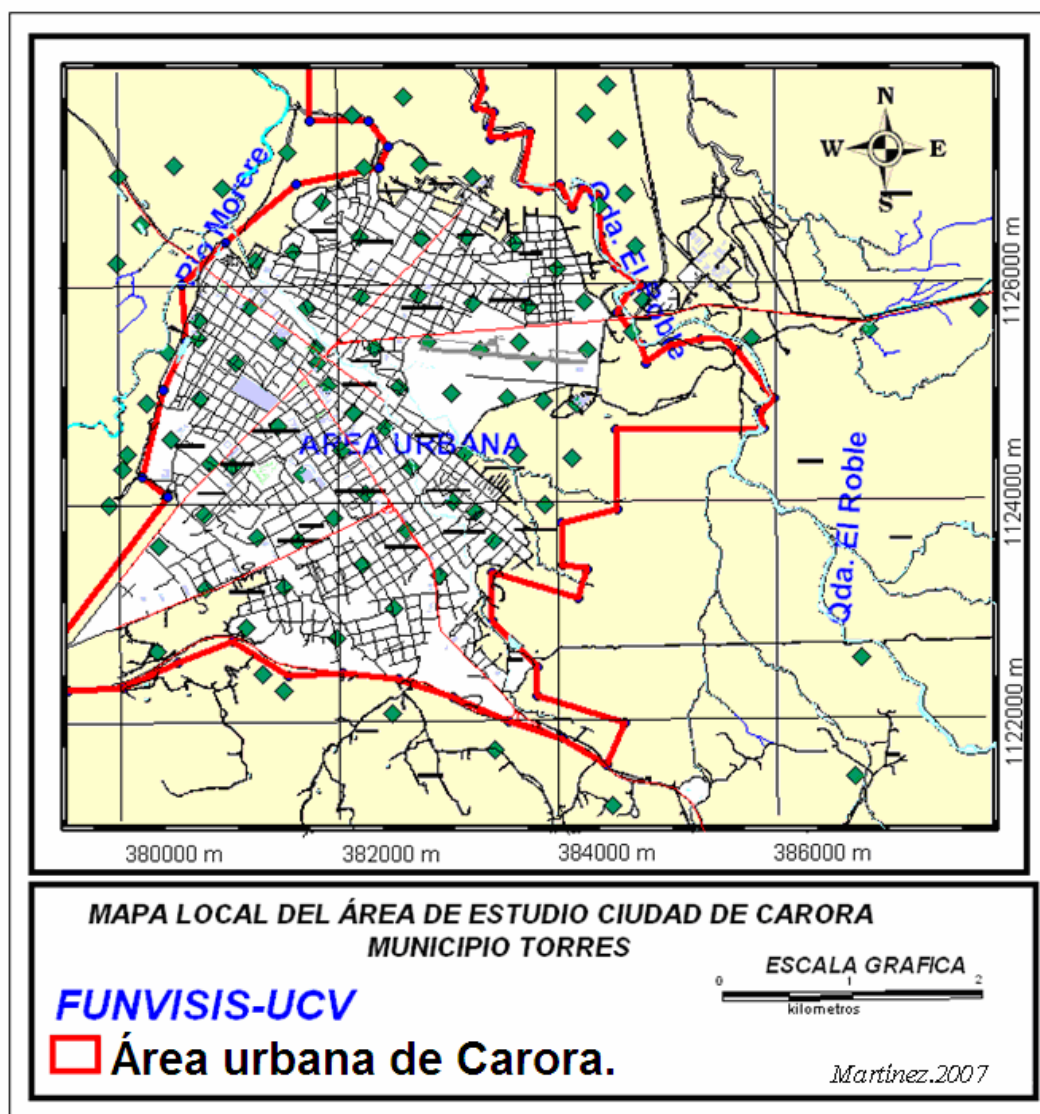


Figura 37 Mapa local de ubicación de las estaciones gravimétricas ordinarias en el área urbana de la ciudad de Carora.

4.3 SOPORTE INSTRUMENTAL

4.3.1 Equipos

Los equipos e instrumentos utilizados para la adquisición fueron proporcionados por FUNVISIS, DHN (Departamento de Hidrografía Nacional de la Armada) e INTEVEP los cuales se desglosan a continuación:

- GPS Posicionador satelital marca Garmin modelo plus V con un error de ± 10 m (figura38).



Figura 38 Imagen de GPS posicionador satelital marca Garmin modelo plus V.

- Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-3. Tiene un rango de medición por encima de 7000 mGal y una resolución de lectura de 0,005 mGal, con una baja deriva instrumental de 0,02 mGal por día. (figura 39)



Figura 39. Imagen de Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-3 Izquierda: vista superior. Derecha: vista lateral.

- Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-5. Tiene un rango de medición por encima de 7000 mGal y una resolución de lectura de 0,001 mGal. (figura 40)



Figura 40 Imagen de Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-5. Izquierda: vista lateral. Derecha: vista superior.

- Posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700 con un error inferior de los 20 cm. figura. 41).



Figura 41 Imágenes de posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700.

4.3.2 Soporte Cartográfico

- Mapas topográficos de la ciudad de Carora a escala 1:5000. (*f fuente de:* Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar)
- Mapas Geológico estructural de Venezuela (*f fuente de:* Hackley *et al.*, 2005).
- Mapas de vialidad de Venezuela a escala 1:100000 (*f fuente de:* SIG, FUNVISIS).
- Mapas urbanos del municipio Torres estado Lara a escala 1:50000. (*f fuente de:* oficina de catastro de la alcaldía del municipio Torres, 2004).
- Mapas de estructuras de la región de Carora a escala 1:10000 (*f fuente de:* FUDECO (fundación para el desarrollo de la región centro occidental de Venezuela ,2004).
- Mapas hidrológicos de la región de Carora a escala 1:10000. (*f fuente de:* FUDECO, 2004).

4.4 AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Se realizó la calibración y ajuste de los gravímetros AUTOGRAV Scintrex CG-3 y CG-5 y de los instrumentos utilizados en la adquisición, para verificar el funcionamiento de los mismos.

4.4.1 Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-3

Uno de los equipos principales para la adquisición fue el gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-3 (figura 39) perteneciente a DHN el cual posee un rango de medición por encima de 7000 mGal y una resolución de lectura de 0,005 mGal, lo que permite que el gravímetro sea utilizado para estudios a gran escala regionales o geodésicos.

4.4.1.1 Especificaciones.

Las medidas exactas son tomadas presionando simplemente una tecla. El gravímetro toma una lectura promedio de una serie de muestras obtenidas continuamente. La lectura se despliega directamente en la pantalla de cristal líquido en unidades de mGal, guardándose ésta en la memoria del disco duro del equipo para luego ser utilizada a través de un computador para su procesamiento.

Al preparar el gravímetro para una lectura, el sensor de inclinación electrónico proporciona la mayor exactitud y es más fácil de operar que los niveles de burbuja convencionales. La excelente protección del gravímetro permite trabajar con distintos cambios de temperatura y presión atmosférica. Esto se logra por la estabilización en la cámara de vacío. El rango de operación se encuentra entre -40°C a $+45^{\circ}\text{C}$ ($+35^{\circ}\text{C}$ optativos o $+55^{\circ}\text{C}$) permitiendo al operador usar el gravímetro en distintos ambientes.

Por ser el sensor hecho de cuarzo fundido no-magnético, el gravímetro no es afectado por las variaciones del campo magnético.

La baja deriva es el resultado de lo extremadamente estable que opera el sistema elástico del cuarzo en el ambiente. Éste permite predecir con precisión el término de larga deriva del sensor y con una corrección en el software de tiempo real se reduce en menos de 0,02 mGals por día. Las especificaciones de la calibración y principio del gravímetro se detallan en el apéndice B.

4.4.1.2 Ajuste de la deriva del gravímetro Autograv Scintrex CG-3

IMPORTANTE: Siempre se debe verificar primero y ajustar si es necesario la compensación de temperatura antes de ajustar la corrección de la deriva del instrumento.

1. Después de ajustar la compensación de temperatura, se presiona cualquier tecla para desplegar en la pantalla del equipo como está nivelado el mismo, es decir las inclinaciones X e Y (apéndice B).
2. Se nivela el instrumento (usando los procedimientos de arreglo de trípode) dentro de un rango de -10 a +10 arcsegundos aproximadamente ambos ejes.
3. Se coloca en modo cíclico (CYCLING) y se presiona la tecla comenzar (Start) para que inicie a tomar lecturas.
4. El gravímetro toma automáticamente una lectura una vez cada 600 segundos, en este caso se programó para que lo hiciera cada 900 segundos (15 minutos), guardándose estos datos en un archivo.
5. Después de aproximadamente 24 horas, se detiene con la tecla detener (Stop) del equipo el ciclo de lectura.
6. A través del ajuste (setting) del equipo se obtiene la salida de los resultados para así entonces empezar a realizar los cálculos. (Moncada, 2005).

En la figura 42 se observa que la deriva instrumental corregida a través del cálculo de la tendencia ($\text{Drift}=0,0077 \text{ mGal/día}$) se encuentra por debajo en comparación a los parámetros del manual del equipo ($0,02 \text{ mGal/día}$).

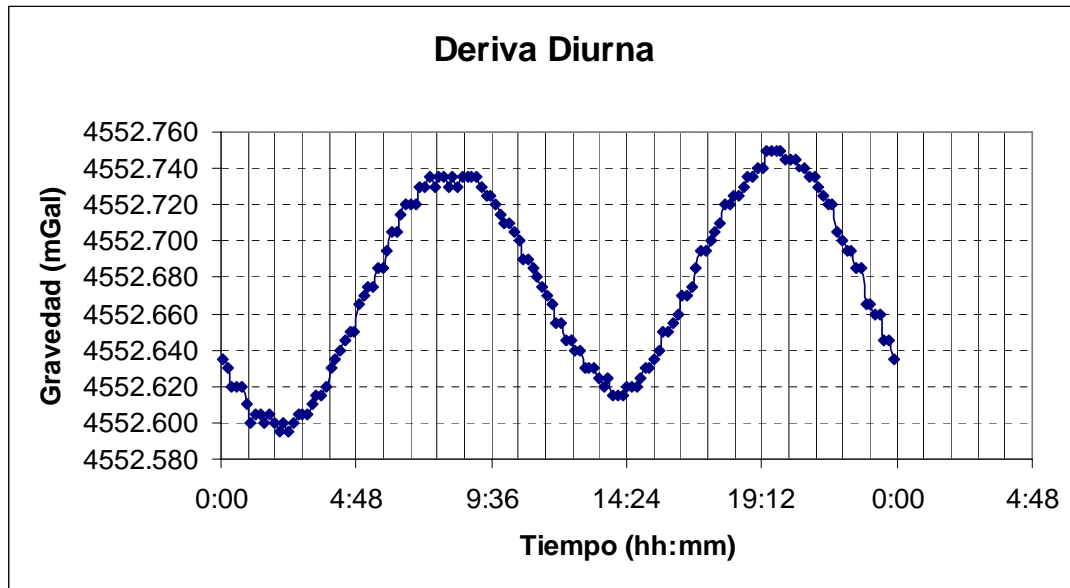


Figura 42 Deriva instrumental de gravímetro Autograv Scintrex CG-3 ajustada

4.4.1.3 Corrección de la deriva instrumental (Drift correction).

Durante el primer mes de funcionamiento del instrumento, se debe verificar la corrección de la deriva una vez por semana.

Después de un periodo de cuatro semanas, se debe verificar la corrección de la deriva una vez por mes o más tiempo dependiendo de las características individuales del instrumento.

Nota: Si un instrumento se ha apagado durante varias semanas (nunca debe hacerse sin una razón válida), él mismo debe ponerse a punto como si fuera nuevo.

En todo caso, la corrección de la deriva debe verificarse en intervalos no mayores de tres meses. La corrección de deriva no debe ajustarse en todas las estaciones a ser medidas durante un estudio de campo, sino tomar las medidas de la deriva obtenida de una estación base.

La deriva corregida para el gravímetro SCINTREX CG-3 de fecha 18 de septiembre de 2005 es de 0,5166.

Este resultado se obtuvo haciendo los cálculos de acuerdo con las fórmulas indicadas en la sección de ajuste de corrección de la deriva del manual del instrumento.

$$\text{Drift}' = \text{Drift} + \frac{R2 - R1}{T2 - T1} \text{ donde:}$$

Drift': nueva constante de corrección de deriva.

R1 y R2: lecturas de gravedad en mgal.

T1 y T2: lecturas de tiempo correspondiente al tiempo que se obtuvo las lecturas R1 y R2.

Para el gravímetro CG-3., los cálculos fueron los siguientes:

$$R2 = 4543,370 \text{ mgal} \quad ; \quad T2 = 08:53:31 \text{ del } 10/09/2005$$

$$R1 = 4543,040 \text{ mgal} \quad ; \quad T1 = 08:53:31 \text{ del } 09/09/2005$$

$$\text{Drift} = 0,1866 \text{ del día } 23/08/2005.$$

$$R2 - R1 = 0,33 \text{ mgal} \quad ; \quad T2 - T1 = 24 \text{ horas} = 1 \text{ día}$$

$$\text{Drift}' = 0,1866 + \frac{0,33 \text{ mGal}}{1 \text{ día}} = 0,5166 \text{ mGal} / \text{ día}$$

La corrección de deriva corrige la relajación de tensión en el sistema elástico. Puede haber una cantidad pequeña de deriva adicional inducida por el transporte y manejo, pero no debe pensarse que la corrección de la deriva la elimina ya que generalmente no es constante y depende de las condiciones del transporte.

4.4.2 Gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-5

4.4.1.4 Corrección de la deriva instrumental (Drift correction).

Otro de los equipos principales para la adquisición fue el gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-5 (figura 43) perteneciente a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), el cual posee un rango de medición por encima de 7000 mGal y una resolución de lectura de 0,001 mGal.



Figura 43 Calibración del gravímetro Autograv Scintrex CG-5.

En la figura 44 y 45 se aprecia las graficas de deriva instrumental del CG-5 realizadas por FUNVISIS e INTEVEP.

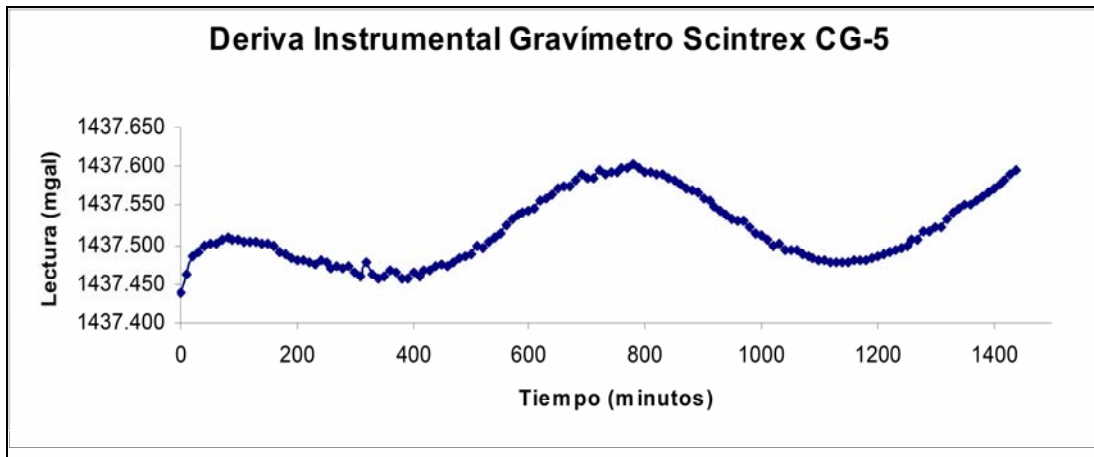


Figura 44 Deriva instrumental de gravímetro Autograv Scintrex CG-5, ajustada (FUNVISIS).

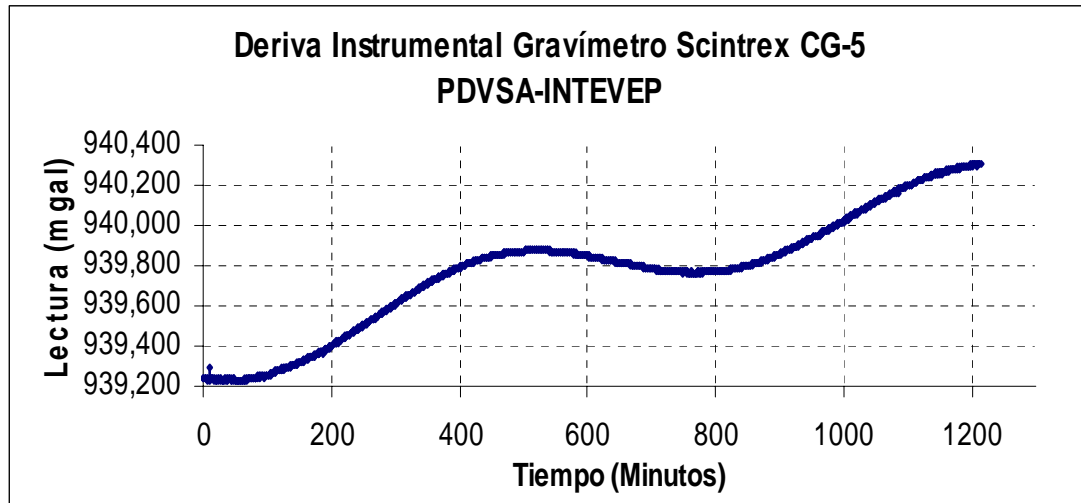


Figura 45 Deriva instrumental de gravímetro Autograv Scintrex CG-5, ajustada (INTEVEP).

Para el gravímetro CG-5., los cálculos fueron los siguientes:

$$R2 = 1437,595\text{mgal} \quad ; \quad T2 = 08:57:19\text{del } 10/09/2005$$

$$R1 = 1437,438 \text{ mgal} \quad ; \quad T1 = 08:57:19\text{del } 09/09/2005$$

$$\text{Drift} = 2,035 \text{ del día } 29/09/2005.$$

$$R2 - R1 = 0,157 \text{ mgal} \quad ; \quad T2 - T1 = 24 \text{ horas} = 1 \text{ día}$$

$$\text{Drift}' = 2,035 + \frac{0,157\text{mGal}}{1\text{día}} = 2,192\text{mGal} / \text{día}$$

4.4.3 Posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700.

4.4.3.1 Características del equipo de posicionamiento global

El sistema GPS 4700 de Trimble perteneciente a INTEVEP-PDVSA (figura 46), está diseñado para proporcionar posicionamiento a nivel centimétrico para topografías cinemáticas en tiempo real (RTK) y post-proceso: (Estático y en Tiempo real.). Este sistema es un motor GPS de baja latencia y de rápida actualización que maneja un paquete cinemático en tiempo real. Las ventajas y especificaciones del posicionador se detallan en el apéndice B.



Figura 46 Posicionador Satelital Diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700.

4.5 Adquisición de datos

En el presente estudio se divide la adquisición en dos partes diferentes:

- Adquisición gravimétrica.
- Adquisición topográfica.

4.5.1 Adquisición gravimétrica.

Consistió en el levantamiento de una red constituida por 914 estaciones gravimétricas ordinarias perteneciente al proyecto Tupure-Carora, adquiridas por FUNVISIS-INTEVEP, en el área comprendida entre los estados Zulia, Lara, Falcón y Trujillo (área regional), con un espaciamiento aproximado de 2000, 1000 m .

En la segunda campaña se adquirieron un total de 86 estaciones gravimétricas ordinarias en el área urbana de Carora (área local) municipio Torres, cuyo objetivo fue densificar el área urbana de la ciudad de Carora (figura 36 y 37).

Los datos fueron incorporados a la red gravimétrica nacional mediante su ajuste a través de BM de gravedad y cotas localizadas en las áreas de estudio.

4.5.2 Adquisición topográfica

Antes de salir al campo a tomar las lecturas se planificó un esquema o diseño de las posible alturas a medir. Posteriormente se estableció el rango de precisión para las coordenadas finales. Seguidamente fue necesario diseñar una red con las posibles mediciones adicionales por encima y más allá del mínimo absoluto requerido. Este tipo de red (figura 47) incluye un número óptimo de puntos conocidos, con tantos nudos cruzados y mediciones repetidas como sea posible planificar.

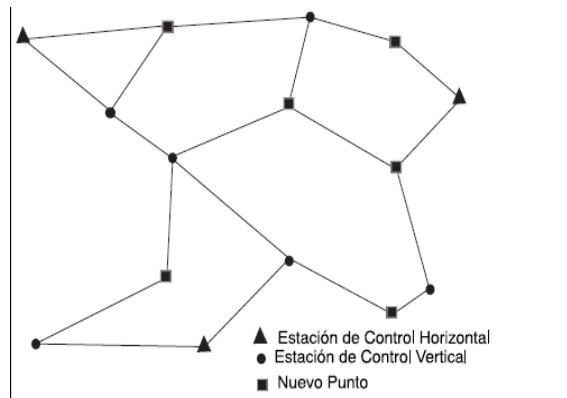


Figura 47 Diseño de la red para la adquisición de alturas (Tomado de: Manual de TRIMBLE, 1998).

El levantamiento topográfico regional o en el sector Sabana de Carora se llevó a cabo paralelamente durante la adquisición gravimétrica (figura 48) por medio de un posicionador satelital diferencial Trimble Modelo 4700. Esta adquisición forma parte del proyecto Tupure-Carora desarrollado por FUNVISIS-INTEVEP.



Figura 48 Foto tomada durante la adquisición gravimétrica y valores de alturas

En las figuras 49 y 51 se observa el mapa topográfico correspondiente a la región de Sabana de Carora y al área urbana de la ciudad respectivamente elaborado con las alturas adquiridas por Funvisis e Intevep en las zonas de estudio. En las figuras 50 y 52 se aprecian mapas tridimensionales de las áreas de estudio.

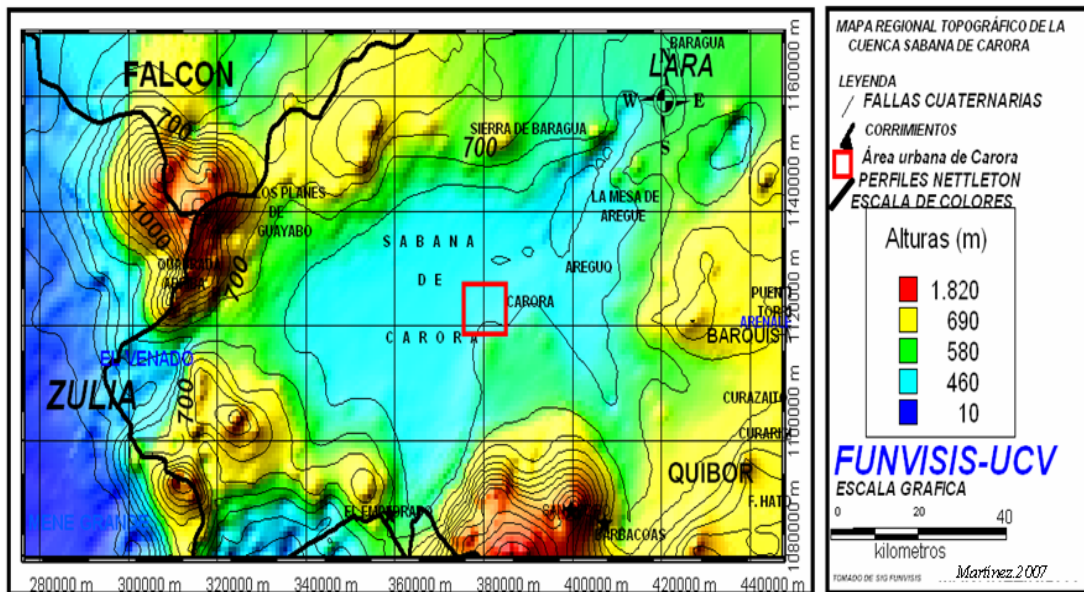


Figura 49 Mapa topográfico de la cuenca de Sabana de Carora en el occidente de Venezuela (realizado con las alturas proporcionadas por INTEVEP).

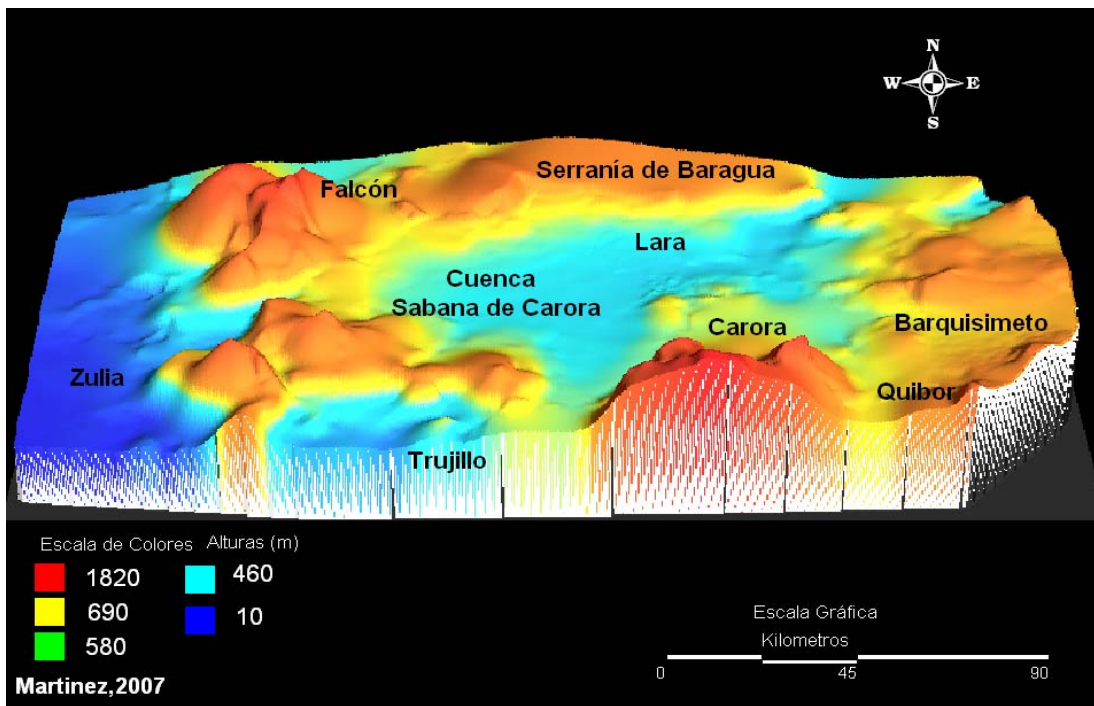


Figura 50 Mapa topográfico tridimensional de la cuenca de Sabana de Carora en el occidente de Venezuela.

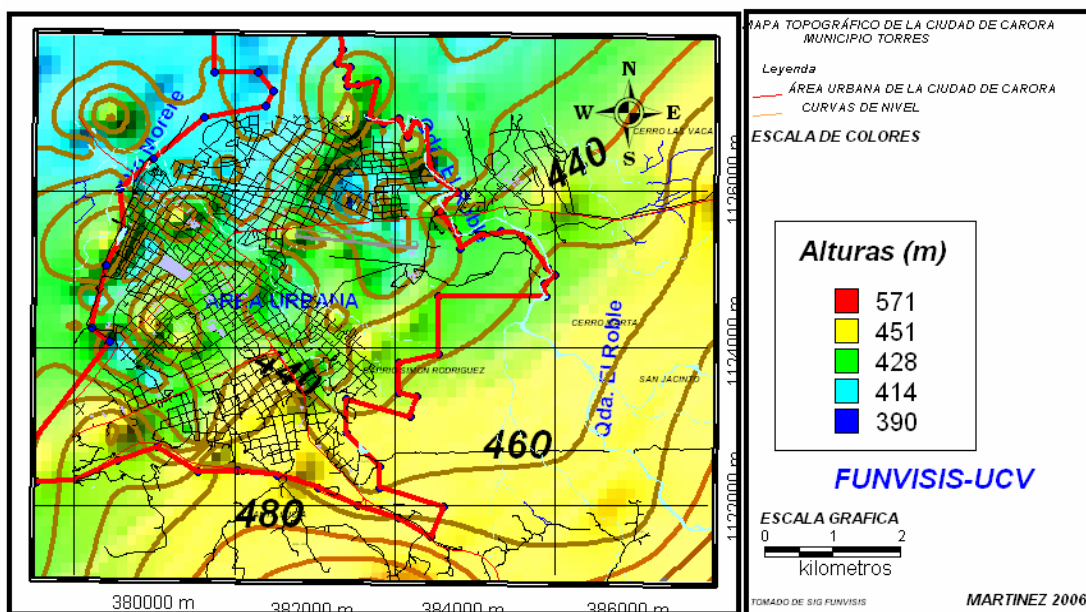


Figura 51 Mapa topográfico del área urbana de Carora municipio Torres.(realizado con las alturas propocionadas por INTEVEP).

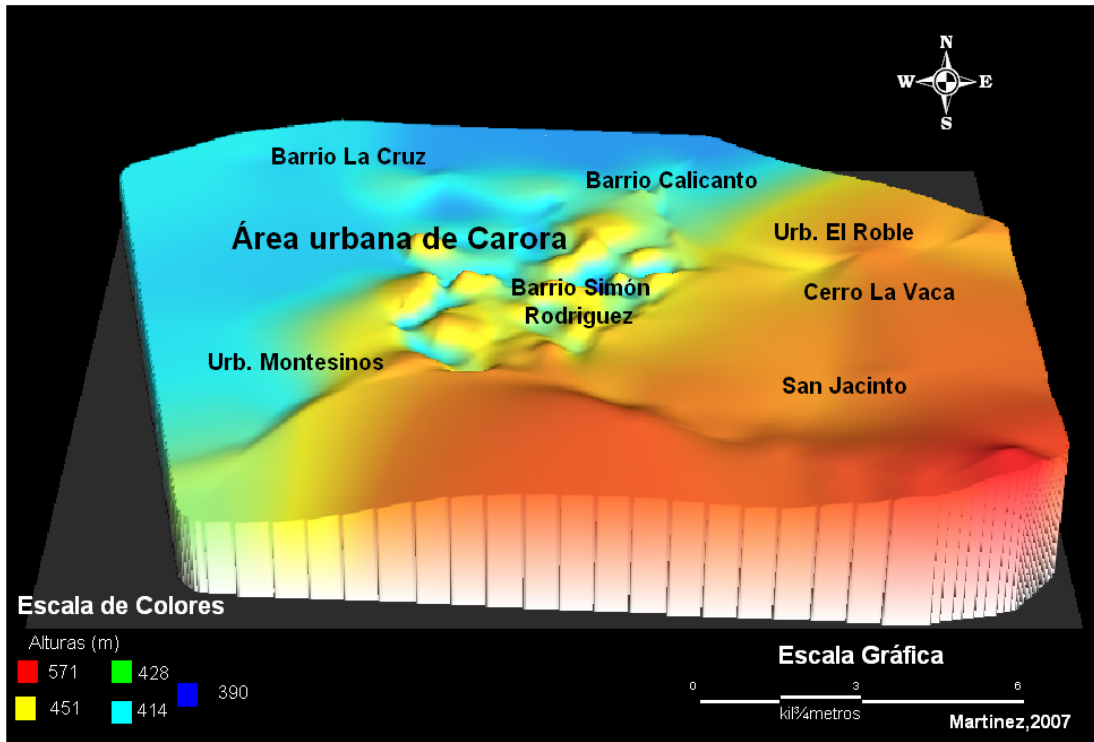


Figura 52 Mapa topográfico tridimensional del área urbana de la ciudad de Carora municipio Torres.

CAPÍTULO V

5.1 PROCESAMIENTO

El procesamiento establecido para tratar los datos se muestra en los diagramas de las figuras 53 y 71, éste se muestra en dos fases: la primera un procesamiento estándar o básico (figura. 53), realizado en una hoja de cálculo de Excel, en donde se aplican diferentes ajuste y correcciones como: corrección por deriva, calculo de gravedad observada, aire libre y corrección topográfica. Una segunda fase en donde se utilizan programas para realizar análisis estadístico y geoestadístico, análisis espectral y deconvolución de Euler estos dos últimos análisis permite estimar valores de profundidad

Fase 1 Procesamiento Básico o estándar.

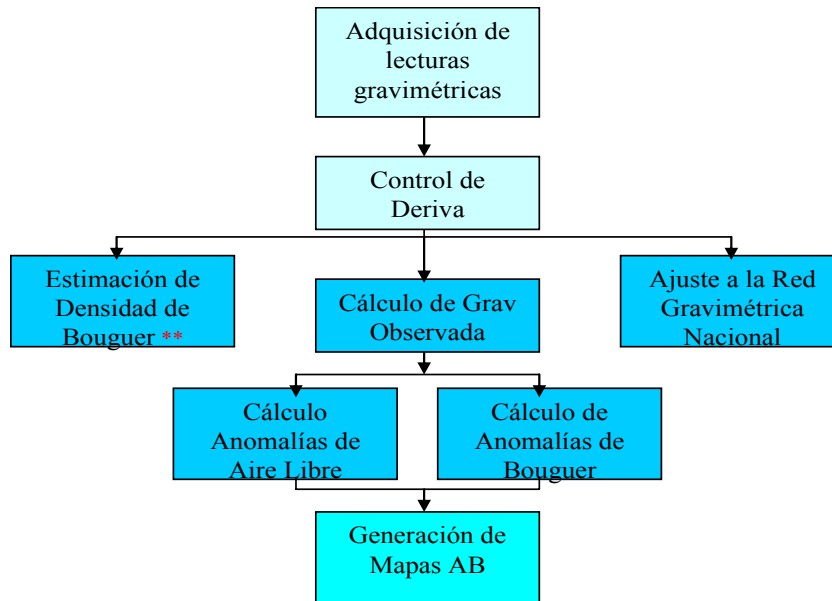


Figura 53 Diagrama del procesamiento básico de datos gravimétricos (** se detalla más adelante).

En la primera fase se involucran todos los datos adquiridos, aplicando correcciones, para obtener de manera cuantitativa los valores de anomalías de Bouguer (AB).

Las primeras correcciones realizadas fueron: el control de deriva, mareas y el cálculo de gravedad observada, con este último ajuste se incorpora los valores de gravedad a la red gravimétrica nacional.

Luego para lograr estimar los valores de anomalías de Bouguer (AB), fue necesario establecer primeramente el valor de densidad de Bouguer. Este valor fue determinado aplicando diversas metodologías como perfiles Nettleton, Parasnis, análisis litológico y mediante conversiones de velocidades vs densidades (figura 54):

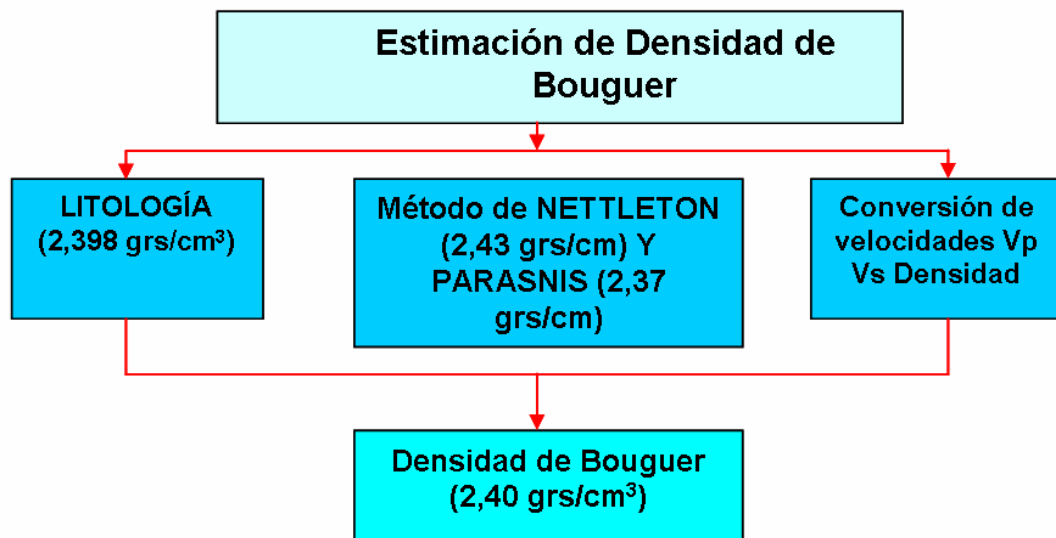


Figura 54 Diagrama esquemático seguido para determinar el valor de densidad de Bouguer.

Estimación de densidad

5.1.1 Nettleton

La primera técnica empleada para conocer este valor de densidad fue el método de Nettleton, que consiste en realizar perfiles gravimétricos a lo largo de una desigualdad topográfica, construyendo perfiles de los valores observados, el efecto gravitatorio debido a esta desigualdad, se calculó en cada punto de observación a lo largo del perfil. Este cálculo se realiza para diferentes densidades y se considera el valor de densidad para el cual el accidente topográfico es mínimo (figura 55).

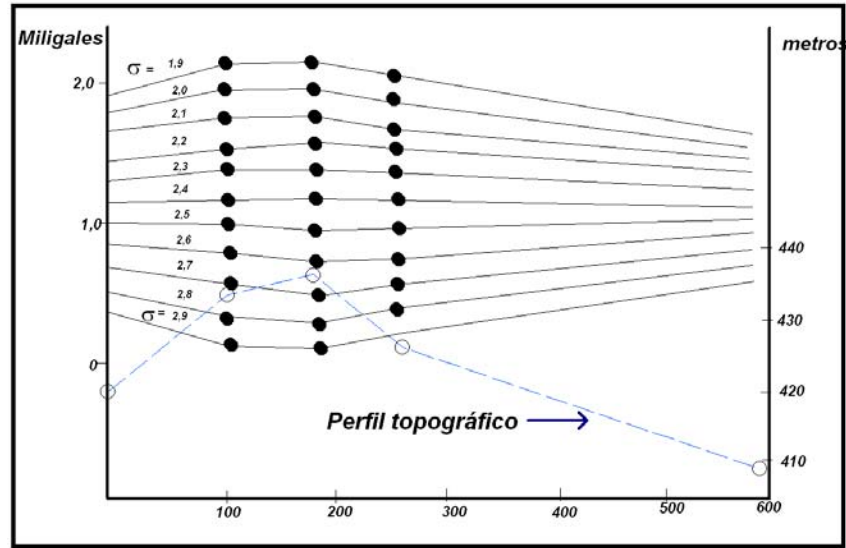


Figura 55 Perfiles Nettleton (tomado de Cantos ,1974).

Con esta técnica se generaron 6 perfiles Nettleton distribuidos en toda el área, el promedio de estos cálculos determinó un valor de densidad de 2,44 grs/cm³ (tabla5).

Tabla 5 Valores de densidad obtenidos mediante los perfiles Nettleton.

Perfil	Densidad (grs/cm ³)	Consideración
1	2,43	tomados
2	2,42	tomados
3	2,40	tomados
4	2,42	tomados
5	2,41	tomados
6	2,55	tomados
Promedio	2,44 (grs/cm³)	

. En la figura 56 se presenta un mapa con la ubicación de los perfiles realizados.

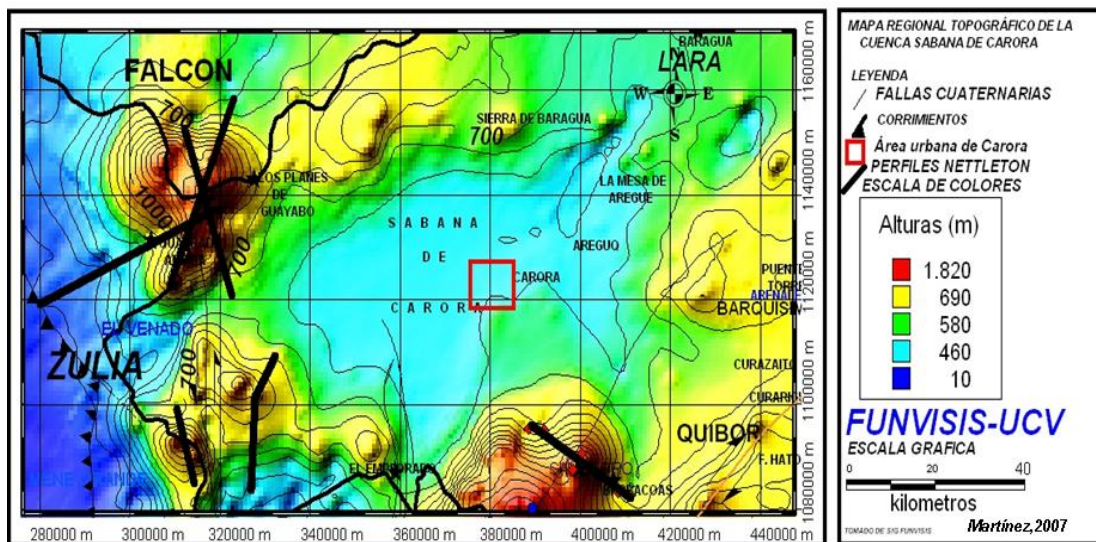


Figura 56 Mapa de ubicación de los perfiles Nettleton distribuidos en la zona de estudio.

5.1.2 Parasnis

Bajo las mismas consideraciones topográficas y geológicas se aplicó el método de Parasnis, en cual consiste en la estimación del valor de la pendiente la cual correspondería al el valor aproximado de densidad de Bouguer. (Tabla 6).

Tabla 6 Valores de densidad obtenidos mediante el método de Parasnis.

Perfil	Densidad (grs/cm³)	Consideración
1	2,41	tomados
2	2,30	tomados
3	2,28	tomados
4	2,30	tomados
5	2,33	tomados
6	2,60	tomados
Promedio	2,37 (grs/cm³)	

En las figura 57, 58 y 59 se muestra el perfil topográfico, el grafico resultante de la aplicación de Nettleton y Parasnis respectivamente, de uno de los seis perfiles establecidos para cada valor de densidad.

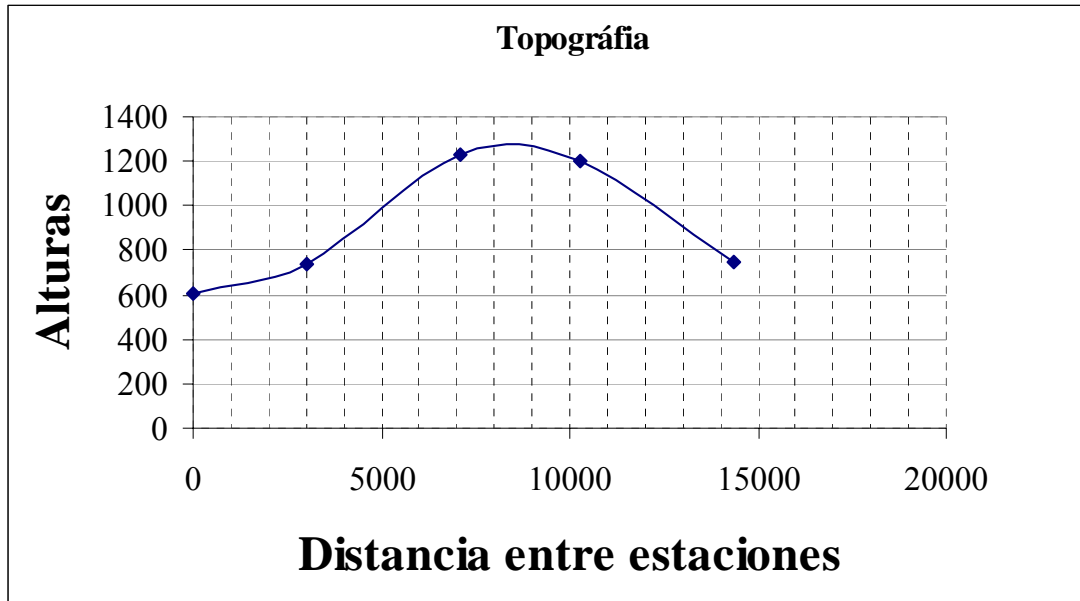


Figura 57 Topografía del perfil de Nettleton

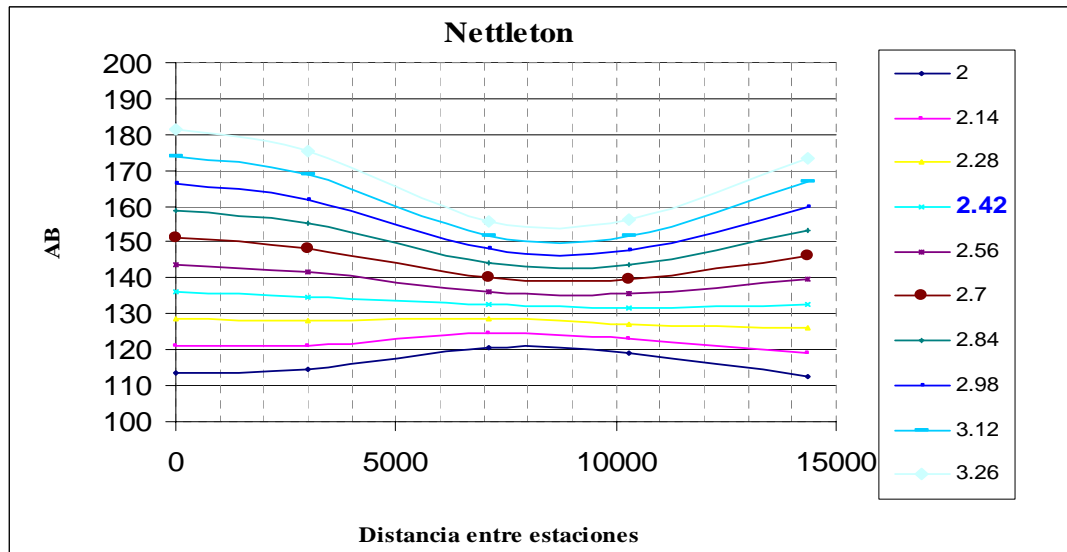


Figura 58 Curvas de anomalías de Bouguer para distintas densidades

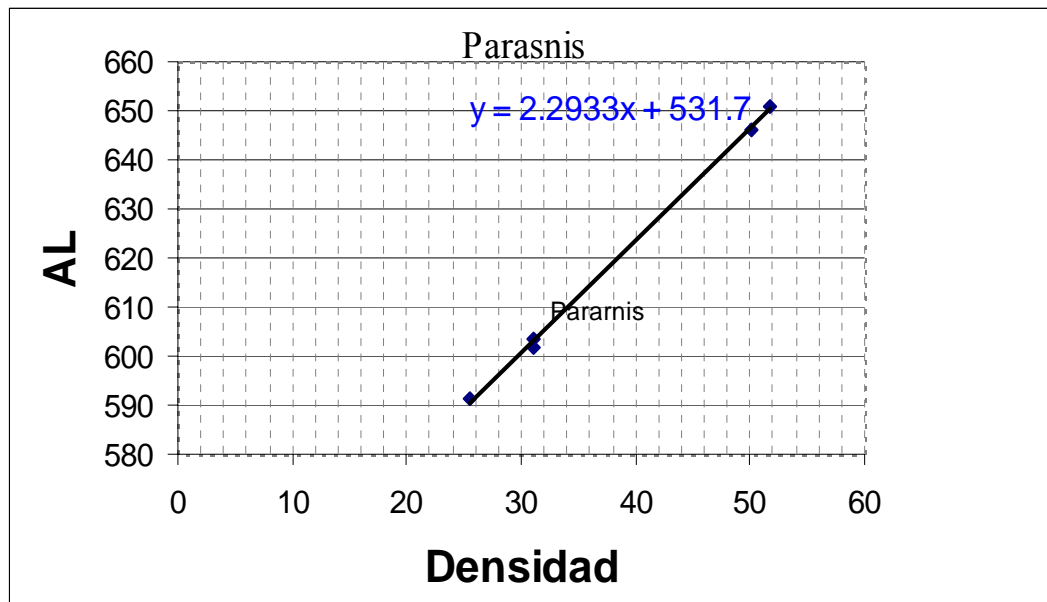


Figura 59 Recta para estimar valor de densidad.

5.1.3 Litología

La tercera metodología empleada para conocer este valor fue mediante la geología de la zona, se realizó un análisis exhaustivo y detallado de la litología que constituye las diferentes formaciones incluidas en el área de estudio, análisis que determinó un valor de densidad estimado de $2,398 \text{ grs/cm}^3$ (apéndices C cuadro esquemático para determinar densidad).

5.1.4 Conversión de velocidades Vp vs densidad

Para lograr estimar el valor de densidad de referencia para realizar el modelo, se utilizó la tabla de conversión de curvas de Drake-Nafe (figura 60) utilizando los modelos de velocidades de onda p establecido por Guédez 2003 y Bezada 2005.

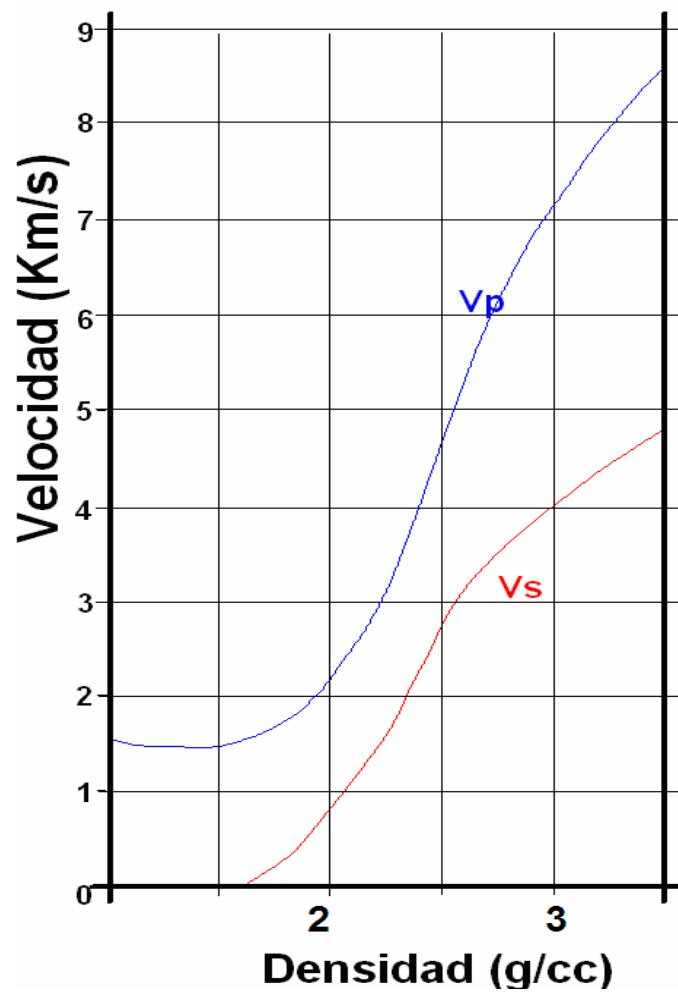


Figura 60 Tabla de curvas de Drake-Nafe (Bezada,2005)

Haciendo la conversión de los valores de velocidad de la onda p obtenidos por Guédez y Bezada se logran conocer un valor apropiado de densidad para incluirlo en modelado gravimétrico estos valores se presentan en las tablas 7 y 8 respectivamente.

Tabla 7 Valores de densidad obtenidos mediante la conversión de velocidades p del modelo de Guédez 2003

Capa	Profundidad (Km)	Velocidad (km/seg) (promedio)	Densidad estimada grs/cm ³
Superficie	-3.5	3,65	2,5
Corteza Superior	-10-12	5,91	2,7
Corteza Inferior	-42	6,65	2,8
Manto	>-42	8,1	3,4

Tabla 8 Valores de densidad obtenidos mediante la conversión de velocidades p del modelo de Bezada 2005.

Capa	Profundidad (Km)	Velocidad (km/seg) (promedio)	Densidad estimada grs/cm ³
Superficie	-3.5	3,5	2,33
Corteza Superior	-10-12	5,8	2,79
Corteza Inferior	-42	6,9	2,85
Manto	>-42	8,1	3,30

Del promedio de los valores estimados de los perfiles Nettleton, Parasnis, geología y conversión de velocidades Vp vs densidad se estableció que la densidad de Bouguer para realizar el procesamiento de los datos fue 2,40 grs/cm³ (tabla 9).

Tabla 9 Valores de densidad obtenidos mediante las distintas metodologías

Densidad (grs/cm ³)	Metodología
2,37	Parasnis
2,39	Geología
2,43	Nettleton.
2,41	Conversión Vp
2,40 (grs/cm³)	

Partiendo de las estimaciones realizada se estableció como valores de densidad de referencia para realizar el modelo gravimétrico 2,40grs/cm³.

En otro orden de ideas ya es conocido que la densidad de Bouguer es uno de los parámetros más importante a la hora de procesar y estimar los valores de anomalías de Bouguer, por esa razón se debe ser preciso y seguro a la hora de estimar este valor.

Bajo las consideraciones antes expuestas se precisó que el valor de densidad de referencia utilizado en el procesamiento de los datos es de $2,40 \text{ gr/cm}^3$ valor representativo de la litología presente en el área d estudio.

El nivel de referencia es necesario precisarlo dependiendo del alcance del estudio. En esta investigación se utilizaron dos niveles de referencia: 1890 m para un estudio regional y 600 m que corresponde al valor de cota más alto presente en la cuenca de Sabana de Carora para conocer geometría forma y profundidad de la misma, este datum permitirá establecer un modelo cercano a la cuenca de Sabana de Carora y estimar su espesor de sedimentos.

5.2 CORRECCIÓN POR MAREAS Y DERIVA INSTRUMENTAL.

El efecto de la atracción gravitatoria del sol y de la luna producto de los movimientos de la tierra o efecto lunisolar, fue corregido de manera predeterminada por los propios instrumentos puesto que los gravímetros Autograv Scintrex CG-3 y CG-5 incluye en su software aplicaciones para hacer la corrección de mareas una vez hecha la lectura de la estación. Éste fue programado de manera previa basándose en los días de campaña predestinados a elaborara la adquisición.

Para corregir la deriva instrumental o la diferencia que existe entre lecturas realizadas en una misma estación en un cierto intervalo de tiempo causada por variaciones del sistema mecánico del equipo, fue a través de un control de deriva diurna mediante una estación fija ubicada en el Departamento de Sismología de FUNVISIS – Caracas-Venezuela.

El control de deriva figura 61 para el gravímetro Autograv Scintrex CG-3 y CG-5 se llevó a cabo el día dieciocho (18) de septiembre de 2005 tomando lecturas cada 15 minutos

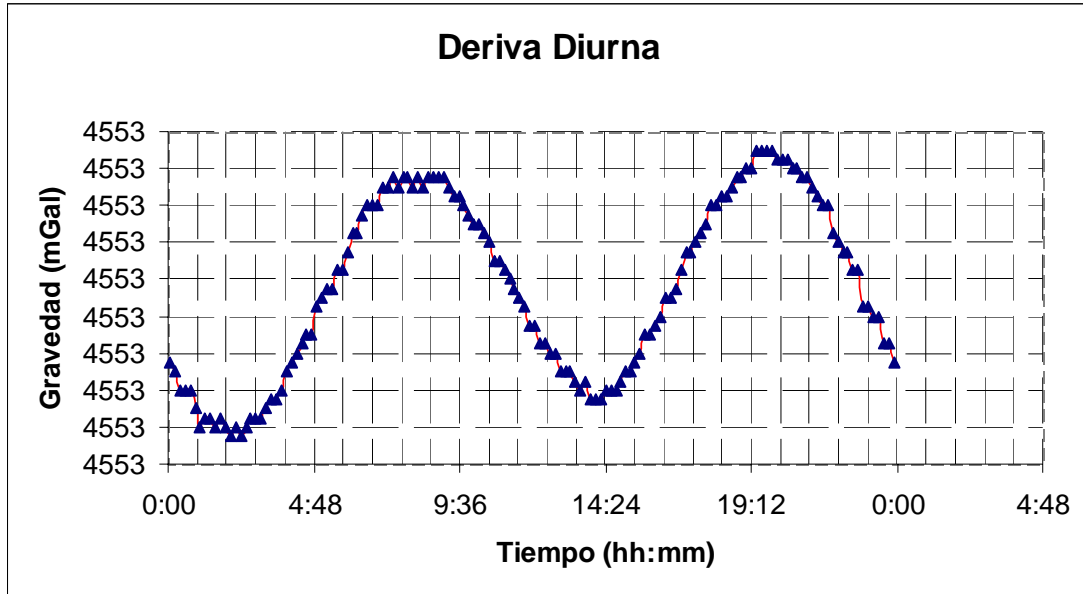


Figura 61 Deriva diurna del día 18 de septiembre de 2005.

5.3 Cálculo de gravedad observada.

Para el cálculo de la gravedad observada se utilizó la relación 5.1

$$G_{obs} = (Valor_{(mGal)} - Valor_{(Base)}) + C.Mareas + C.Deriva + Gabs_{(base)} \quad (\text{Ec 5.1})$$

donde:

- Gobs : gravedad observada de la estación.
- Valor_{mgales} : lectura en miligales de la estación.
- Valor_(Bases) : lectura en miligales de la estación base.
- CM : corrección por mareas.
- CD : corrección por deriva instrumental.
- Gabs_(Base) : gravedad absoluta de la estación base.

En las figuras 62 y 63 se ilustran mapas de los valores de gravedad observada obtenidos con la relación 5.1

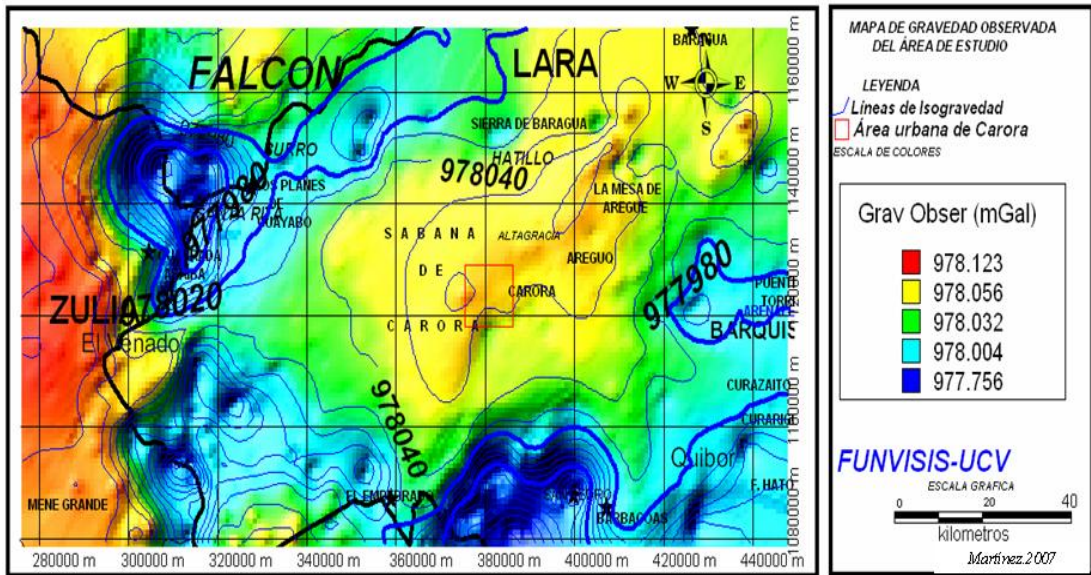


Figura 62 Mapa de gravedad observada del área cuenca de Sabana de Carora

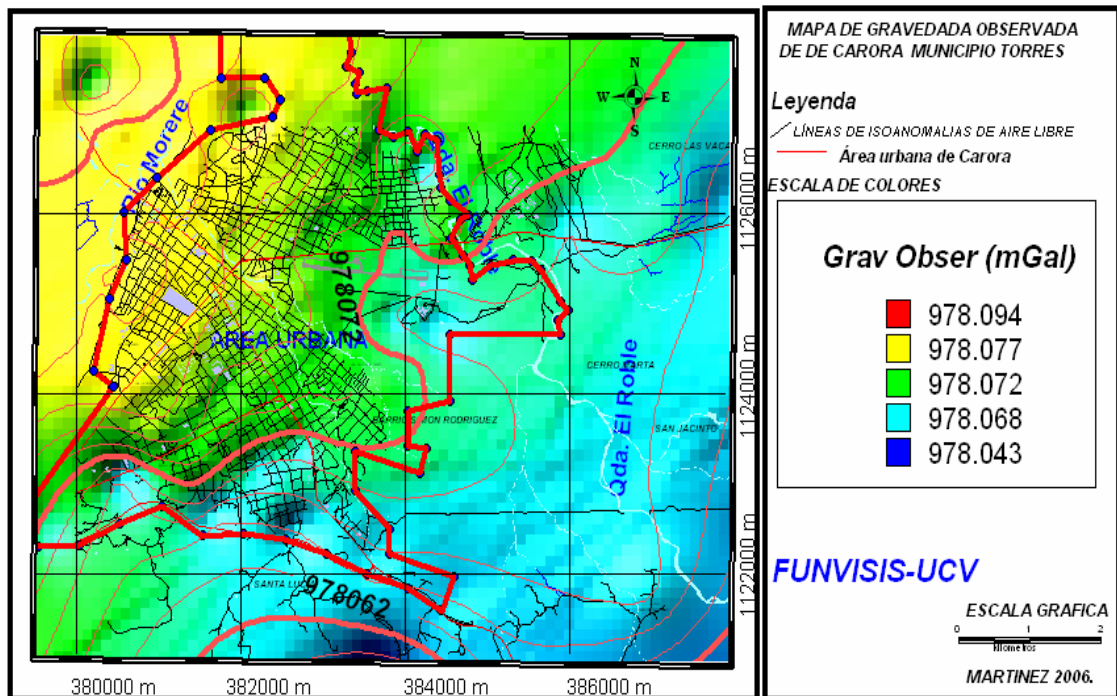


Figura 63 Mapa de gravedad observada del área urbana de Carora Municipio Torres.

5.4 Cálculos de anomalías de Bouguer.

Para generar los valores de anomalías de Bouguer primeramente fue necesario estimar los valores de las distintas correcciones y ajusta la a corrección topográfica.

5.4.1 Cálculo de la corrección de aire libre.

Esta se genera mediante la relación 5.2

$$C_{Airelibre} = 0,3086 * (h - NR) \quad (\text{Ec 5.2})$$

donde:

NR: Nivel de referencia.

Donde h es la diferencia entre la altura sobre el nivel medio del mar de la estación y los niveles de referencia utilizados, (1890 y 600) m metros sobre el nivel medio del mar.

Esta corrección considera el efecto que tiene la altura de la estación respecto al nivel de referencia sobre el valor de gravedad leído, es decir contrarresta el efecto de la variación vertical de la gravedad observada sobre la estación, esta corrección se ajusta con la expresión 5.2

En las figuras 64 se aprecia un mapa de las anomalías de aire libre a manera ilustrativa.

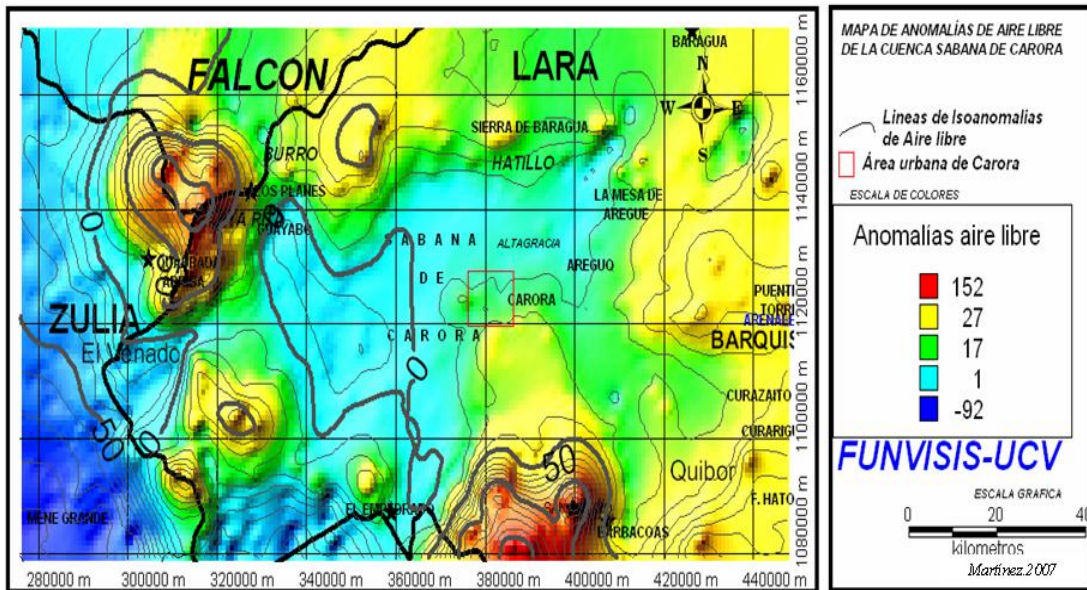


Figura 64 Mapa de anomalías de aire libre del área cuenca de Sabana de Carora.

5.4.2 Corrección de Bouguer

Esta corrección toma en cuenta el efecto de atracción que ejercen las masas situadas entre el nivel de referencia y el punto de observación.

$$C_{Bouguer} = 0,04191 \cdot \rho \cdot h$$

(Ec 5.3)

5.4.3 Corrección topográfica

Para generar esta corrección se realizó en dos etapas:

5.4.3.1 Primera Etapa

Para generar la corrección topográfica se utilizó el programa TERRAIN el cual requiere la adecuación y preparación preliminar de archivos antes de incluirlos en el programa.

Para el área que abarca la cuenca de Sabana de Carora se adquirieron los valores de alturas correspondientes a cada una de estaciones levantadas con posicionador satelital diferencial (GPSD) marca TRIMBLE modelo 4700, los datos obtenidos fueron tomados de modo estático y RTK. Su procesamiento se basó en incluir los valores obtenidos (estático) al modulo de procesamiento Trimble Geometric Office, al cual arrojó valores de alturas con tendencia absoluta. Los valores adquiridos en tiempo real (RTK) no fue necesario aplicarles ningún procesamiento puesto que se le atribuye como valor absoluto la lectura obtenida en el instante.

5.4.3.2. Segunda Etapa

Para la zona de estudio se utilizó una red (grid) (figura 65) master topográfica de Venezuela, donde se incluyó el área de estudio de aproximadamente 16116 km^2 , con una extensión aproximada de 210 km hacia el norte, 300 km al oeste, 870 km al este y 1000 km al sur. Se dividió la zona en recuadros de la misma dimensión y de esta manera se extrajo las coordenada y alturas, de cada punto que conforma el grid master o mallado en un archivo con extensión txt. (figura 66)

Paralelamente se generó otro archivo de texto constituido por las estaciones gravimétricas adquiridas conformado por valores de coordenadas (longitud y latitud), altura, y nombre de cada estación con extensión xyz. Ambos archivos el grid master, como el de las estaciones adquiridas se adicionó a un archivo texto con extensión xyz.

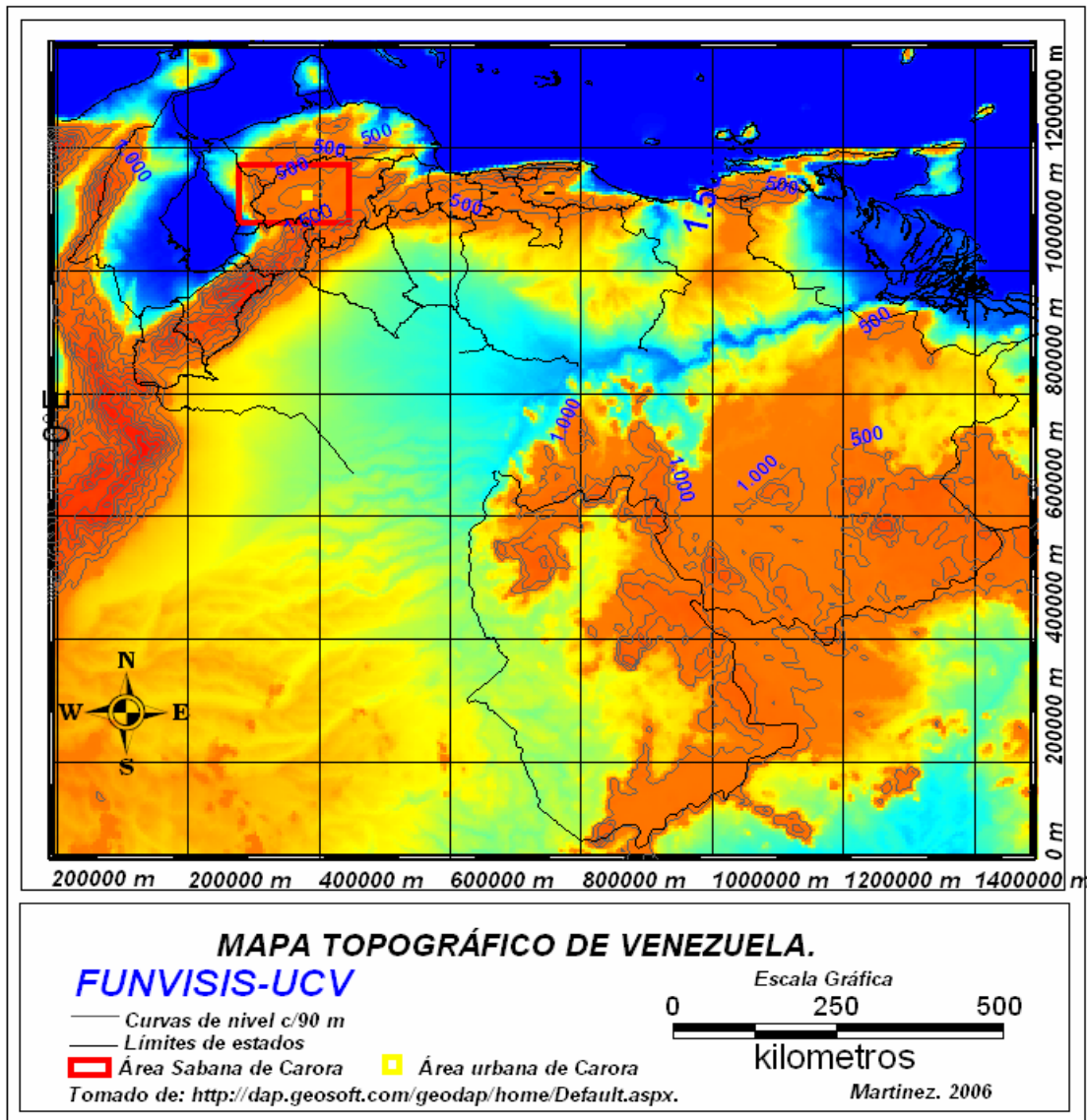


Figura 65 Mapa topográfico de Venezuela utilizado para realizar la corrección topográfica.

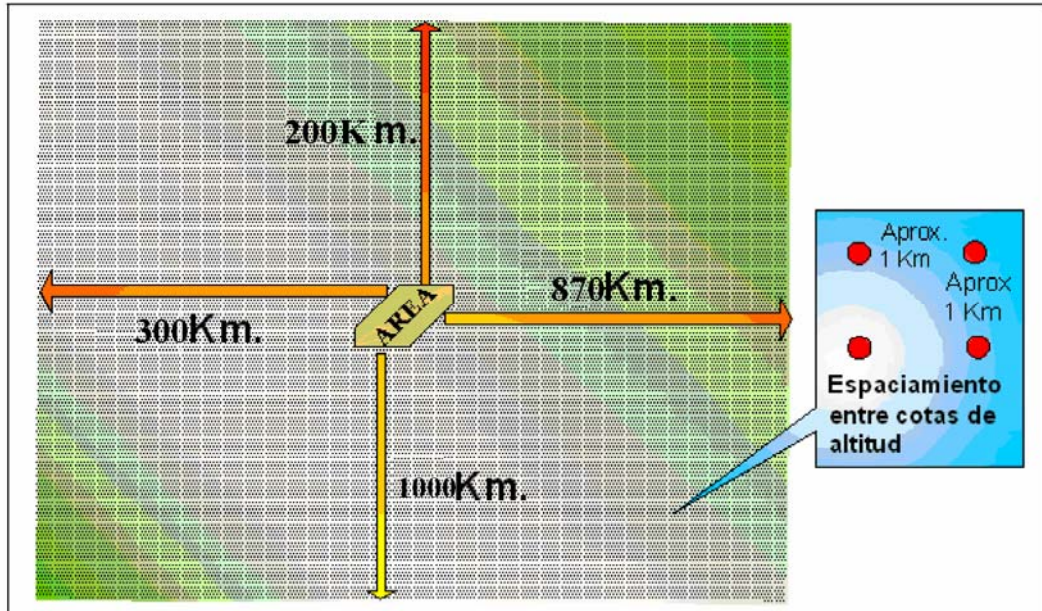


Figura 66 Malla de datos topográficos utilizados para la corrección topográfica. (Reinoza, 2006).

Esta información es suministrada al programa Terrain de Geosoft Inc. V 4.00.03, el cual realiza la corrección topográfica según sus rutinas internas que se describen a continuación.

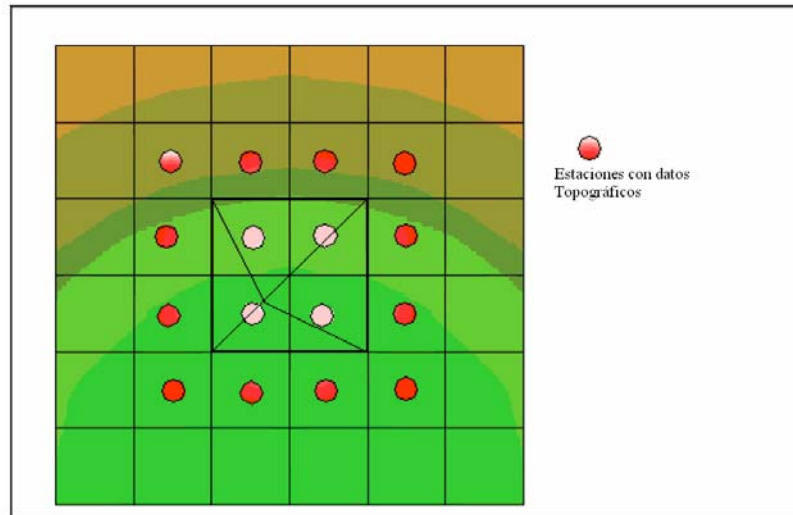


Figura 67 Disposición de estaciones para procesamiento por TERRAIN de Geosoft Inc. V 4.00.03.

Para cada estación (●), el programa TERRAIN calcula una corrección cerca de la estación, basada en cuatro secciones triangulares mostradas (figura 67).

Cada sección triangular define una superficie entre la estación de gravedad y la elevación promedio diagonal a cada esquina, que es a su vez un promedio de cuatro celdas adyacentes de la malla. De esta manera, la ubicación de una estación de gravedad nunca puede ser cerrada a $\frac{1}{2}$ celda de la malla ni hacia el borde de la región de corrección. Esto minimiza el error debido a las diferencias entre las elevaciones de la malla y la verdadera elevación de la estación (Moncada, 2005).

A una distancia de 8 celdas de la estación, el efecto del terreno es calculado usando la aproximación de cuadrados al prisma de Nagy (1966) para cada punto de la malla. Más allá de 8 celdas, se utiliza la aproximación cilíndrica a un cuadrado descrito por Kane (1962). También se usa, para mejorar la eficacia, duplicar el tamaño de cada celda del prisma, y más allá de 16 celdas se dobla de nuevo a 16 celdas, y así sucesivamente. Al procesar los datos de un archivo de datos crudos, el TERRAIN agrega la columna de corrección de terreno al archivo de datos crudos. El TERRAIN aplica la corrección a archivos con extensiones `.xyz` y genera como salida un archivo `.DAT` (Moncada, 2005).

En la figura 68 se aprecia un esquema de la rutina seguida para elaborar la corrección topográfica.

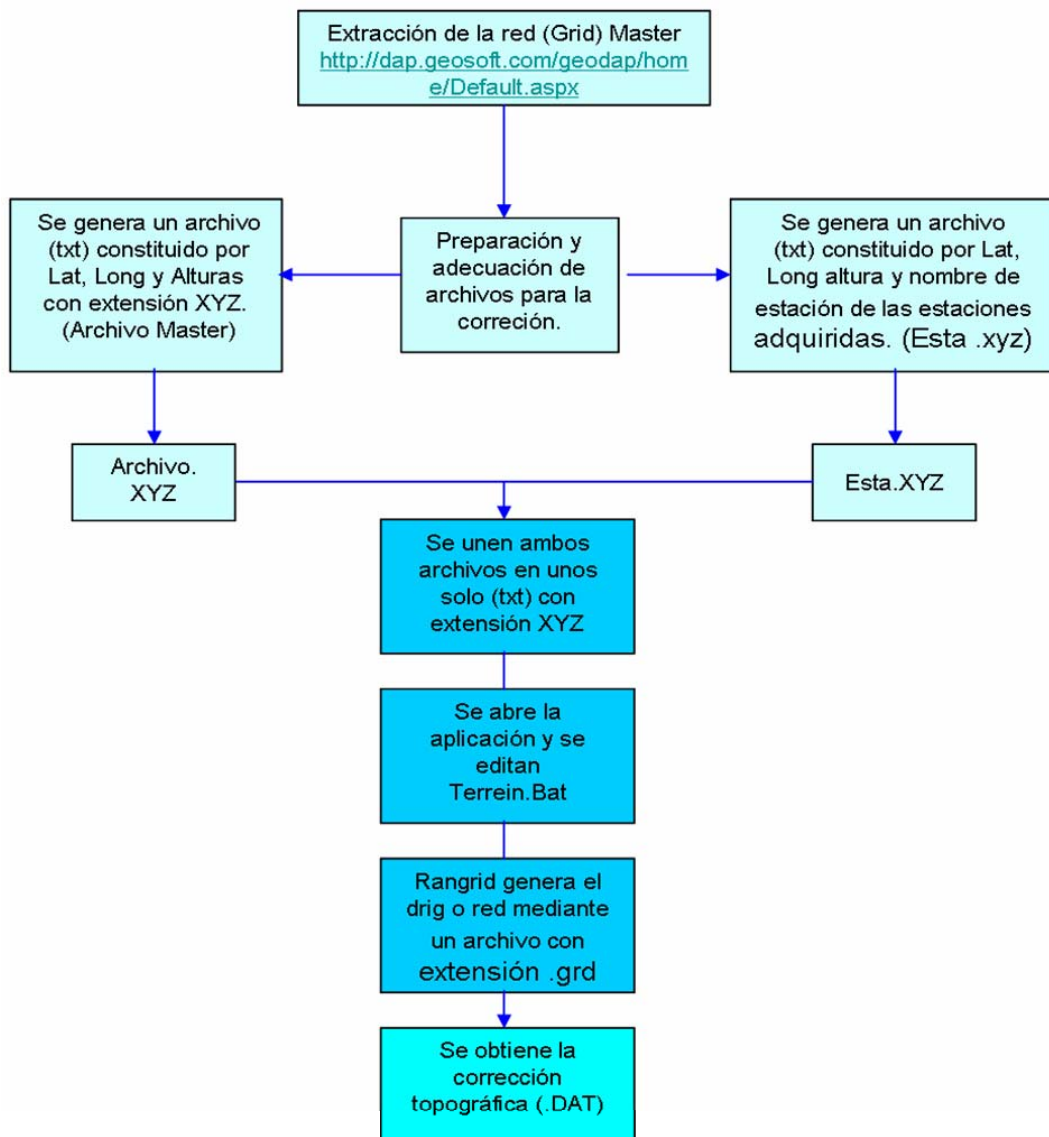


Figura 68 Diagrama de la corrección topográfica de alturas.

Posteriormente los resultados son anexados a la hoja de cálculos utilizada para realizar los cómputos de las anomalías de Bouguer (AB). En la figura 69 y 70 se muestran los mapas de isocorrección topográfica con datos generados del procesamiento con el programa Terrain del área de la cuenca de Sabana de Carora como del área urbana de la ciudad respectivamente.

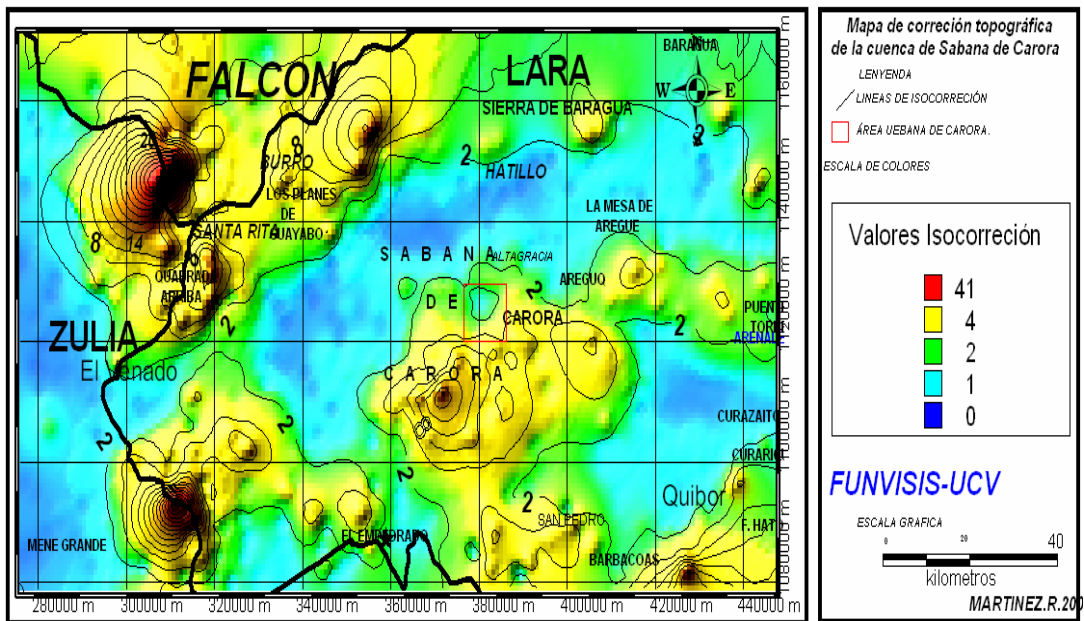


Figura 69 Mapa regional de isocorrección topográfica obtenido con el programa TERRAIN de la cuenca Sabana de Carora.

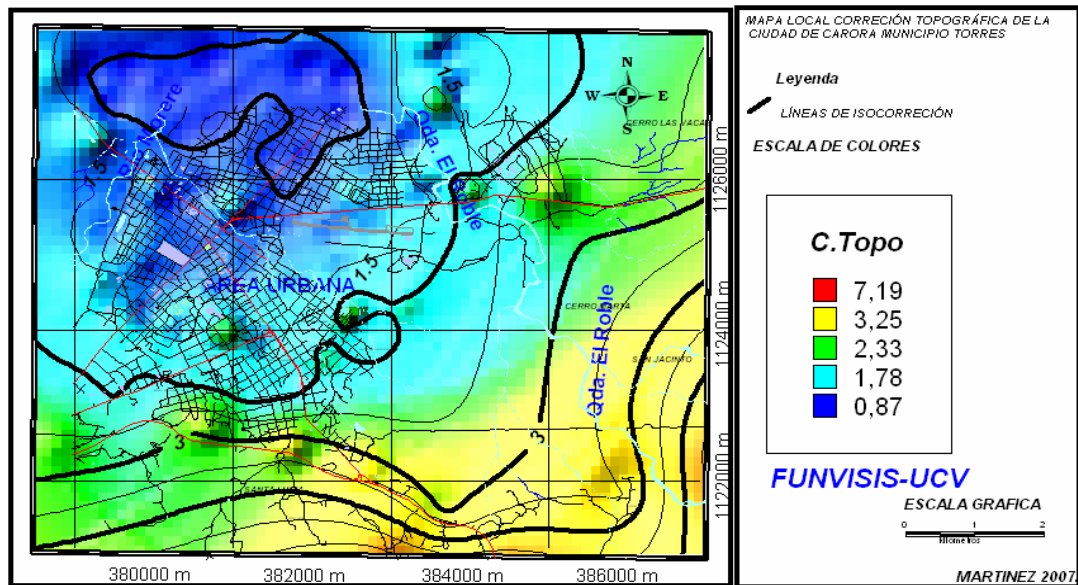


Figura 70 Mapa de isocorrección topográfica obtenido con el programa TERRAIN del área urbana de Carora

Fase 2 Procesamiento Avanzado Cualitativo

En la segunda fase se realizó el análisis cualitativo y cuantitativo de los datos de gravedad así como la estimación de origen de anomalías mediante el análisis espectral y el método de deconvolución de Euler

En la figura 71 se observa de manera esquemática la secuencia del proceso al cual se sometieron los valores de AB.

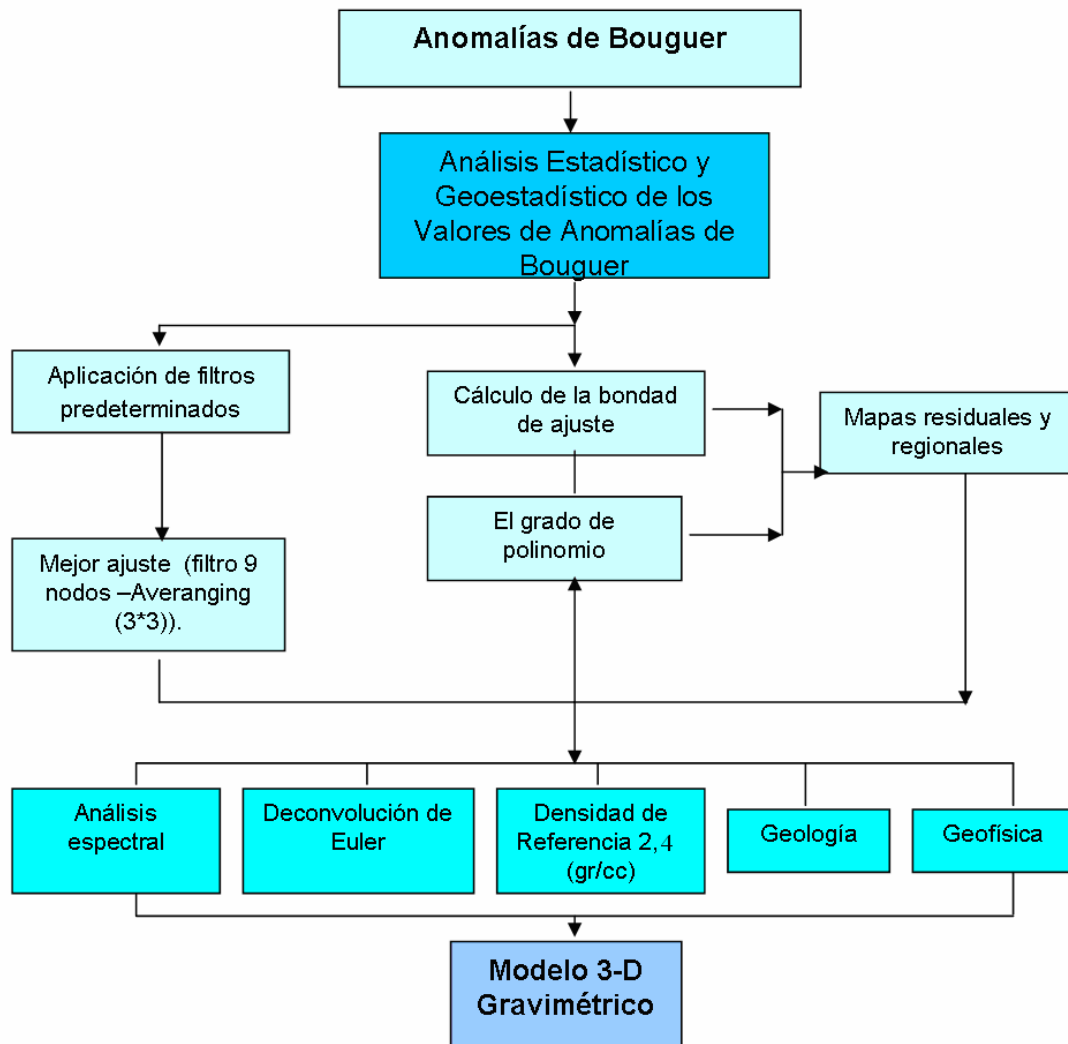


Figura 71 Diagrama del procesamiento avanzado de datos gravimétricos.

5.5 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA Y GEOESTADÍSTICA DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS.

5.5.1 Análisis Estadísticos de los datos

Con objeto de conocer cómo es la variación espacial de los datos, se realizó el análisis estadístico y geoestadístico de los datos de Anomalías de Bouguer (AB). En

la tabla 10 se presenta un resumen de la cantidad de estaciones considerada para este análisis estadístico.

A continuación se presenta un análisis clásico (tabla 11) y pruebas no paramétricas realizadas para un total de 1001 valores de anomalía de Bouguer (AB), a través del programa SPSS Versión 10.0 (Statistical Package for Social Sciences) con la finalidad de cuantificar la calidad de datos gravimétricos.

Se presenta los resultados de la evaluación estadística de AB donde se muestran los valores de las medidas de variables cuantitativas, medidas de posición y dispersión para estos datos ya procesados. El número de datos procesados fue de 1001, con un rango de variación de 144,379 mGals entre un mínimo de -31,718 mGal y un máximo de 55,307 mGal. En las figuras 72 73 74 75 se observan las gráficas correspondientes a: histogramas de frecuencia, gráfico Q-Q, Detrended Q-Q y Diagrama de Boxplot de anomalías de Bouguer.

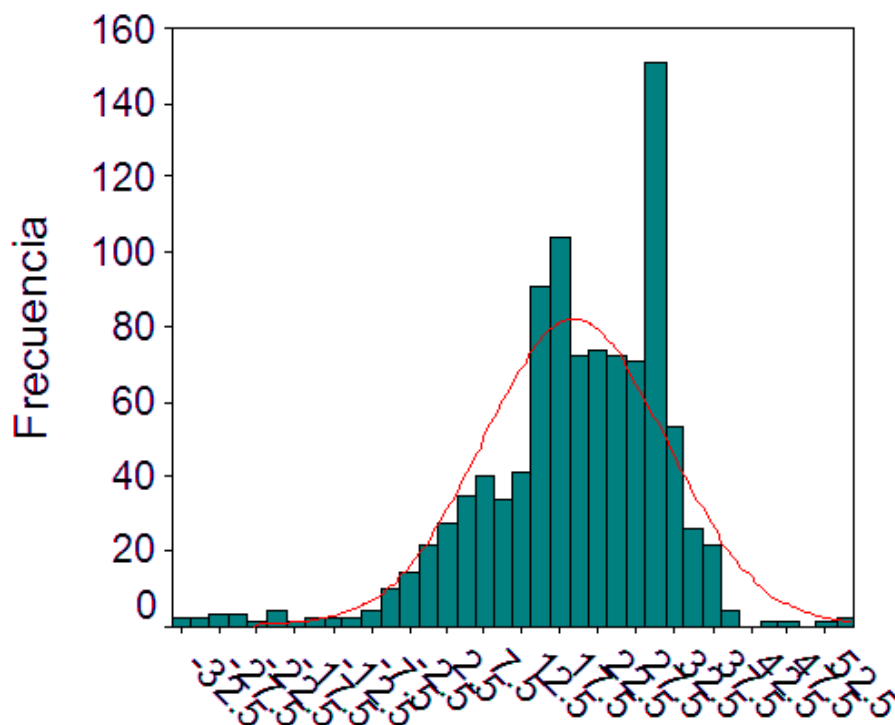
Tabla 10 Resumen de Estadístico.

	Casos				Total	
	Válidos		Perdidos			
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
AB	1001	100%	0	0%	1001	100%

Tabla 11 Tabla Descriptiva

AB	Modalidad	Valor
	Media	19,391
	Error estándar de Media	0,381
	Mediana	20,342
	Moda	-31,718*
	Desviación Estándar	12,015
	Varianza	144,379
	Rango	87,026
	Valor Mínimo	-31,718
	Valor Máximo	55,307
	Suma	19275,43

*a Excite múltiples moda.



Anomalías de Bouguer (mGal)

Figura 72 Histograma de Anomalías de Bouguer.

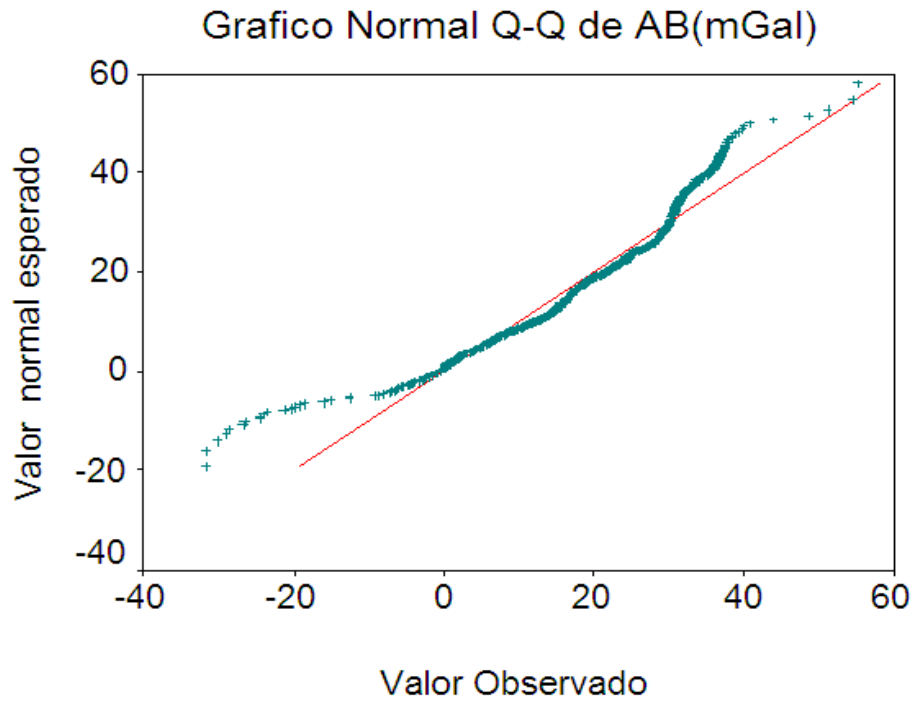


Figura 73 Gráfico Q-Q de Anomalías de Bouguer.

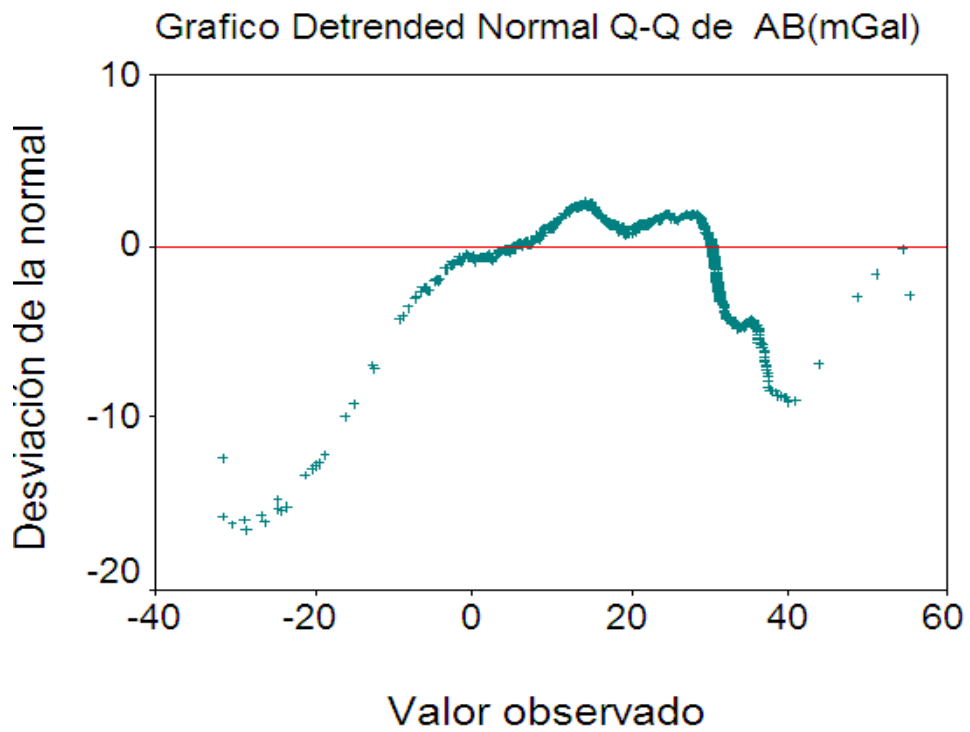


Figura 74 Gráfico Detrended Q-Q de Anomalías de Bouguer

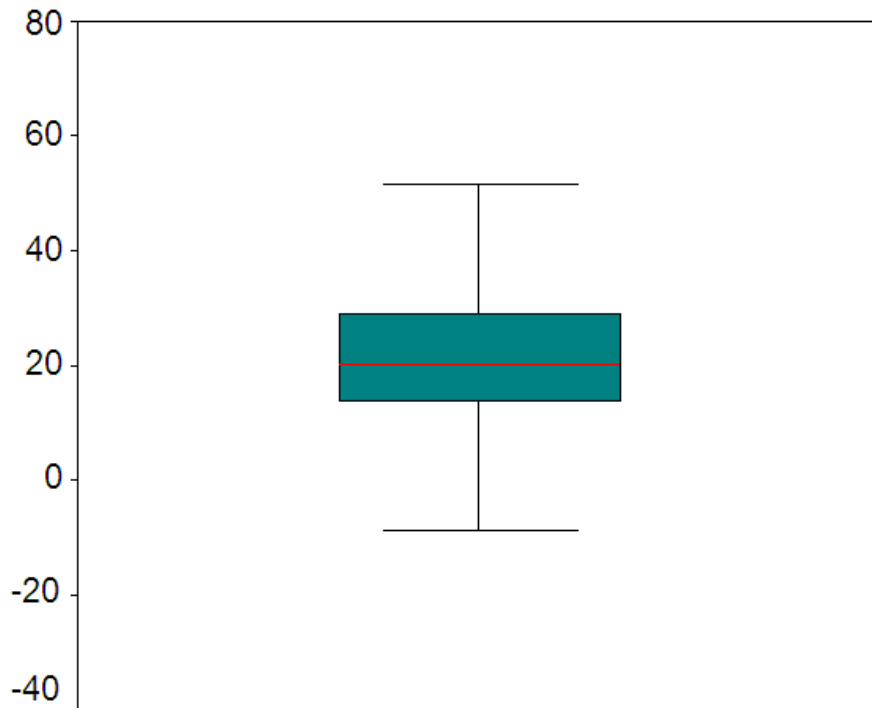


Figura 75 Diagrama de Boxplot de Anomalías de Bouguer

5.5.2 Análisis Geoestadístico

Para este análisis se utilizó GRIDSTAT 98-1CS versión demo el cual permitió la construcción de variogramas, elipses de anisotropía entre otras. En la tabla 12 se aprecia los valores de cada uno de los parámetros obtenidos por el Gridstat 98-1CS.

Este programa fue proporcionado por el Ing geofísico Antonio Ugui perteneciente al departamento de Geofísica de la Universidad Central de Venezuela.

Tabla 12 Parámetros de ajuste de los modelos de Variogramas arrojados por el Gristad 98-1CS.

Modelo	Cra	CRv	Azimut	Error
Esférico	2,856	2,4+06	134	161,06
Exponencial	2,857	1,6+06	139	163,02
Gausseano	2,857	3,2 E+06	127	251,42

La tabla 13 muestra los resultados del ajuste de los datos con los variogramas: Esférico, Gausseano y Exponencial.

Tabla 13 Valores estimatorio para ajuste de modelo Teórico.

Modelo	Cra	CRv	Azimut	Error	aniso	ángulo	Escala	Longitud
Esférico	2,856	2,4+06	134	161,06	2	30	130	75000
Exponencial	2,857	1,6+06	139	163,02	2	35	125	100000
*Gausseano	2,857	3,2 E+06	127	251,42	2	37	127	35000

Los variograma proyectan de manera matemática la variabilidad espacial de los datos.

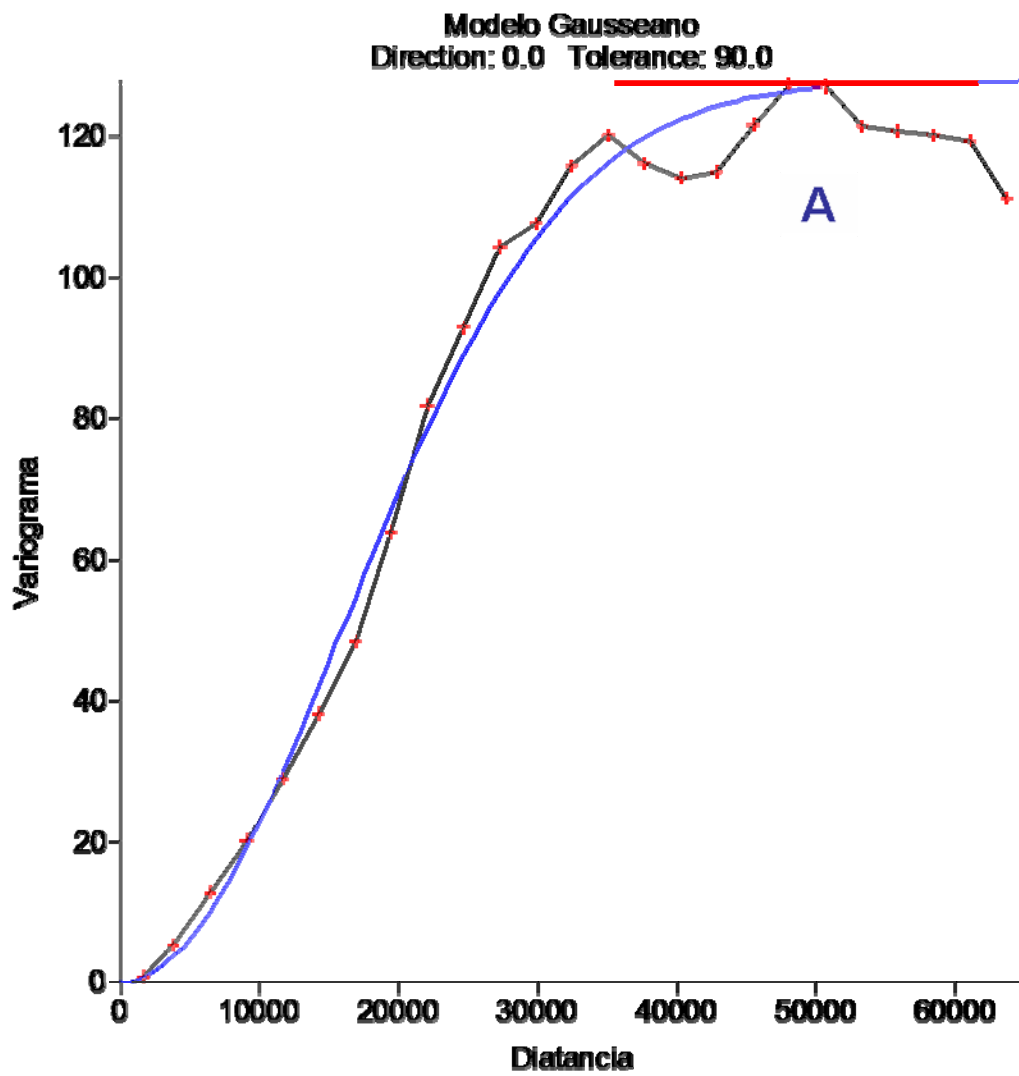


Figura 76 Variograma Modelo Gausseano

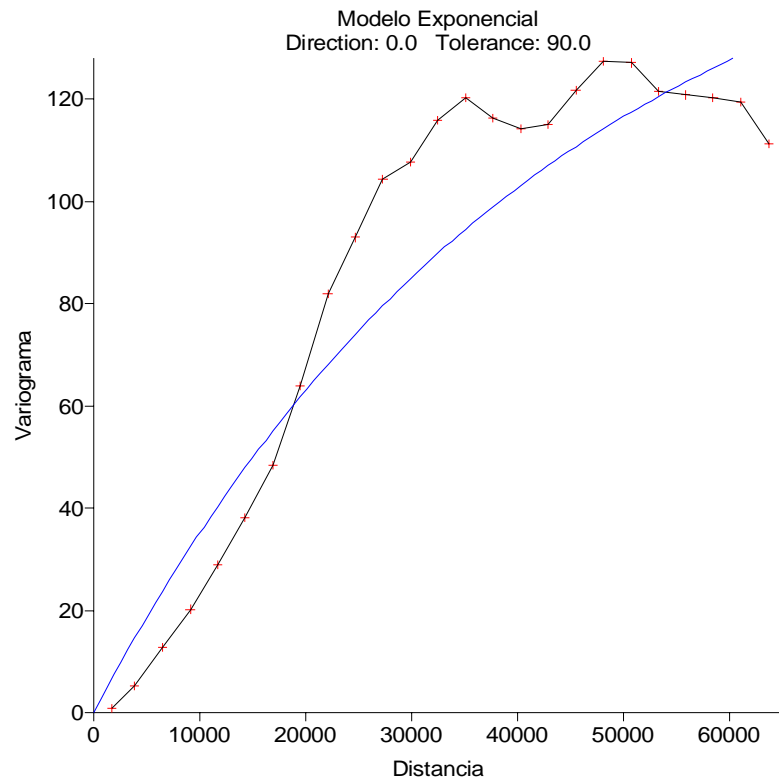


Figura 77 Variograma Modelo Exponencial

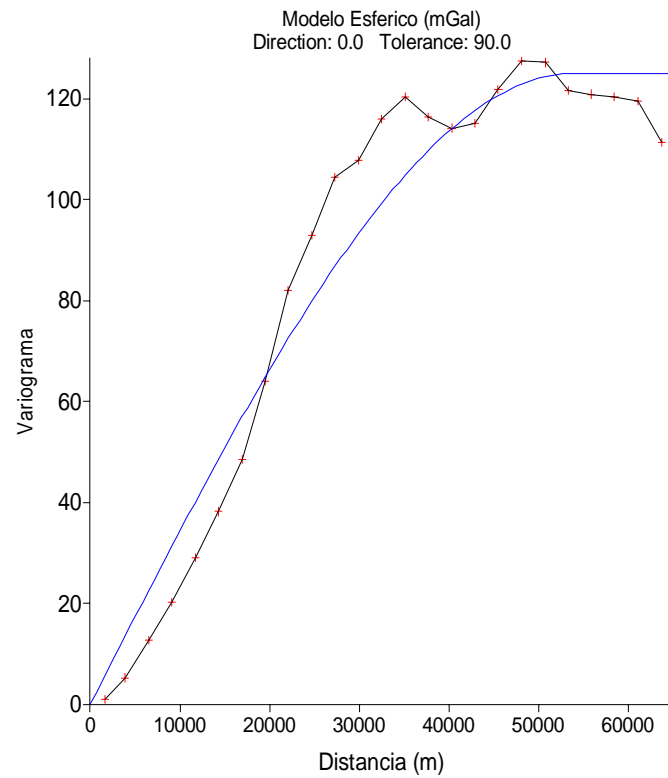


Figura 78 Variograma Modelo Esférico.

Como se aprecia en las figuras 76,77 y 78 de los tres modelos teórico planteados el que se mas ajusta a la distribución de los valores de AB es el modelo Gausseano (figura 76).

En la figura 79 se observa la elipse de anisotropía para el modelo gausseano

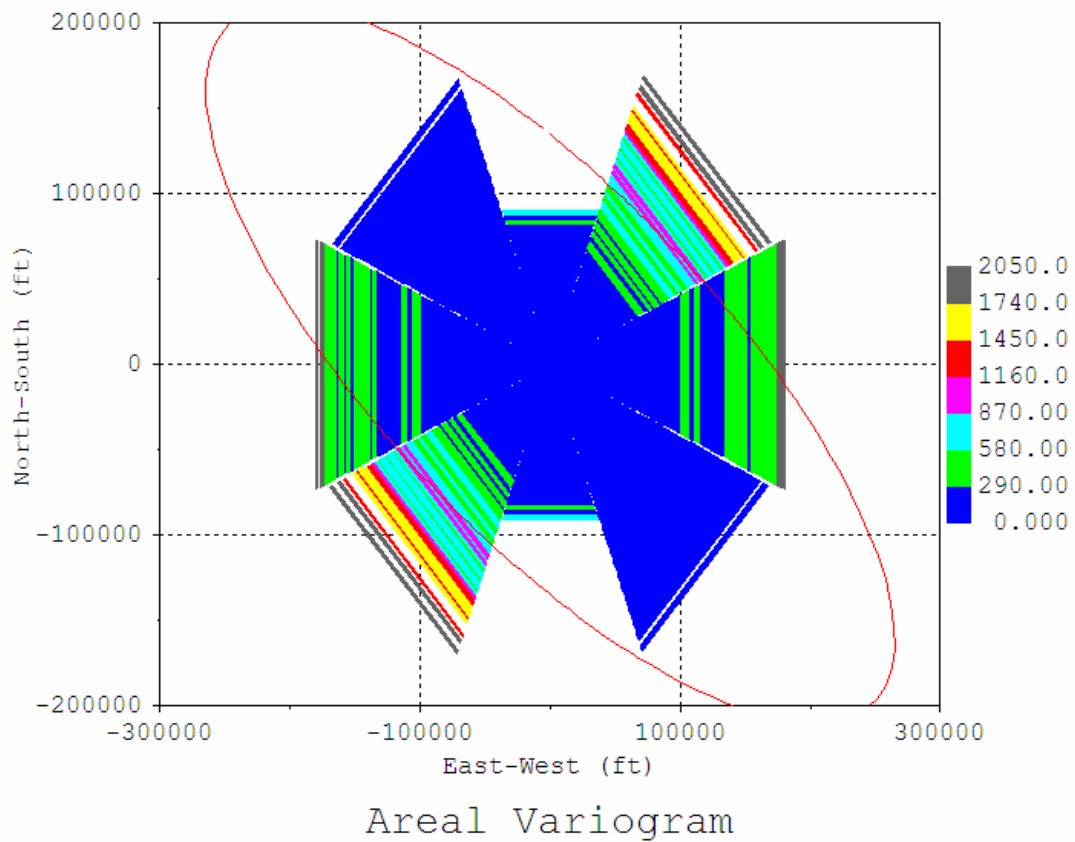


Figura 79 Roseta de anisotropía

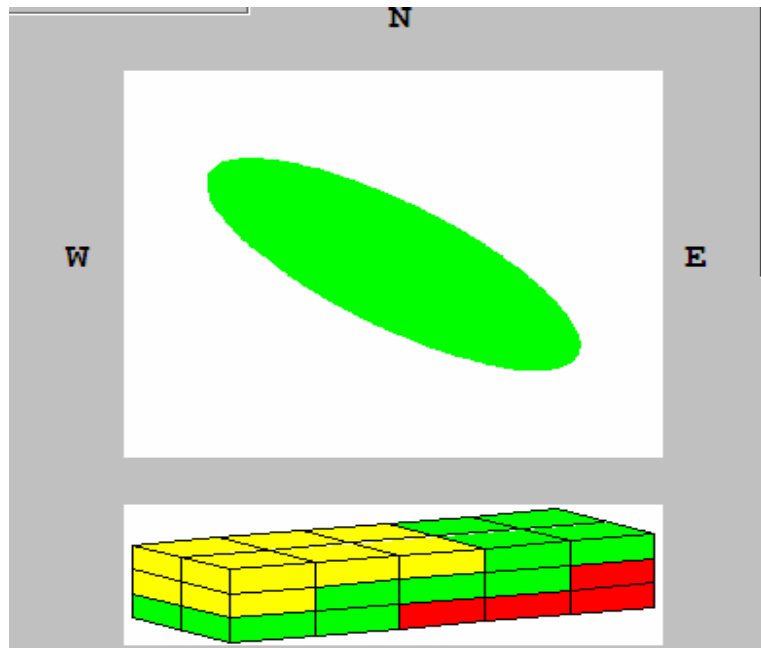


Figura 80 Elipse de anisotropía arrojada por el Gristad 98-1CS para un modelo Gausseano

Una vez establecido el modelo teórico de distribución espacial de los datos emplearon diferentes modalidades de filtros con el fin remover las bajas frecuencias de las lecturas de AB aplicando convolución lineal a los valores de (AB) el cual se encuentran predefinidos en el paquete de Surfer.

Todos los filtros de convolución lineal calculan la media ponderada de nodos vecinos de entrada de la cuadrícula (the neighboring input grid nodes.) La única diferencia entre los diferentes tipos de filtros de convolución lineal es el tamaño, la forma del vecindario y el peso específico usado. Los filtros pasa-bajo también conocidos como filtros de suavizado remueven las altas frecuencias.

En el apéndice E se encuentra mayores especificaciones los filtros predeterminados en el paquete de Surfer 8.

Una vez que se obtiene AB filtrado y los parámetros estadísticos y geostatísticos se genera mapa de AB utilizando Surfer 8 y sus aplicaciones. Para

generar este mapa de anomalías de Bouguer se empleó el método de Kriging, el cual utiliza un modelo estadístico de variograma para la obtención de datos, calcula los pesos que se darán a cada punto de referencia usado en la valoración mapas de isolíneas de Bouguer, el mismo fue incluido dentro de un SIG.

Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Este método genera mapas visualmente atractivos a partir de datos irregularmente espaciados. El Kriging tiende a sugerir direcciones, así que puntos que poseen valores alejados de la tendencia, pueden ser conectados en vez de ser aislados en pequeños contornos.

Una vez establecido el modelo teórico de distribución espacial de los datos y la aplicación de diferentes filtros, se efectuó la construcción del mapa de anomalías de Bouguer.

5.6 CÁLCULO DE ANOMALÍAS DE BOUGUER

Para el cálculo de las anomalías de Bouguer se realizaron el ajuste siguiente: cálculo de gravedad observada, corrección de aire libre, corrección de Bouguer y corrección topográfica.

La densidad de referencia para el cálculo, generación de los mapas de anomalía de Bouguer y modelo gravimétrico fue $2,40 \text{ gr/cm}^3$, valor representativo del promedio del material rocoso ubicado en el área de estudio, valor promedio obtenido por diferentes metodologías para la estimación de este valor. El nivel de referencia utilizado en este trabajo fue 600 m.s.n.m. punto de referencia en dirección Z negativo de donde se comenzará a modelar la cuenca, con el fin de conocer geometría, forma y profundidad de la cuenca de Sabana de Carora.

Para obtener los valores de anomalía de Bouguer (AB) se toma en cuenta la diferencia que existe entre la gravedad observada absoluta (Gobs) y la gravedad teórica (Gteo), en cada una de las estaciones. Para ello se necesita realizar una

secuencia de ajuste y correcciones que ya se han realizado con anterioridad de acuerdo a la relación 6.1:

$$A_{Bouguer} = G_{observ} \pm C_{al} \mp C_{Bou} + C_{top} - G_{Teo}$$

(Ec 5.4)

donde

Gobsev	Gravedad observada
Cal	Corrección aire libre
CBou	Corrección de Bouguer
Ctop	Corrección topográfica
GTeo	Gravedad teórica.

En la figura 81 y 82 se muestra el mapa de AB correspondiente de la cuenca de Sabana de Carora y de la ciudad de Carora respectivamente.

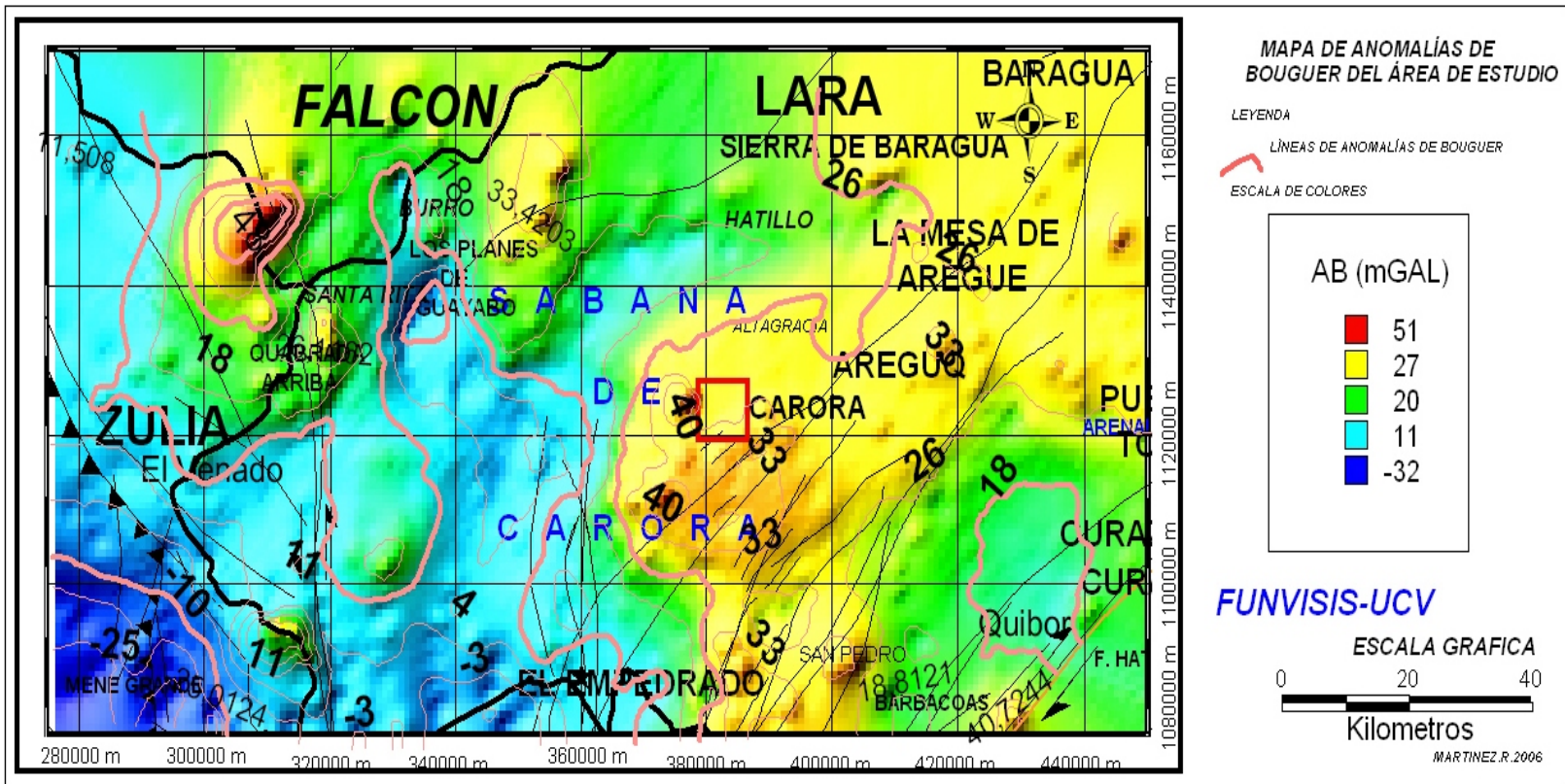


Figura 81 Mapa de Anomalías de Bouguer de la cuenca de Sabana de Carora

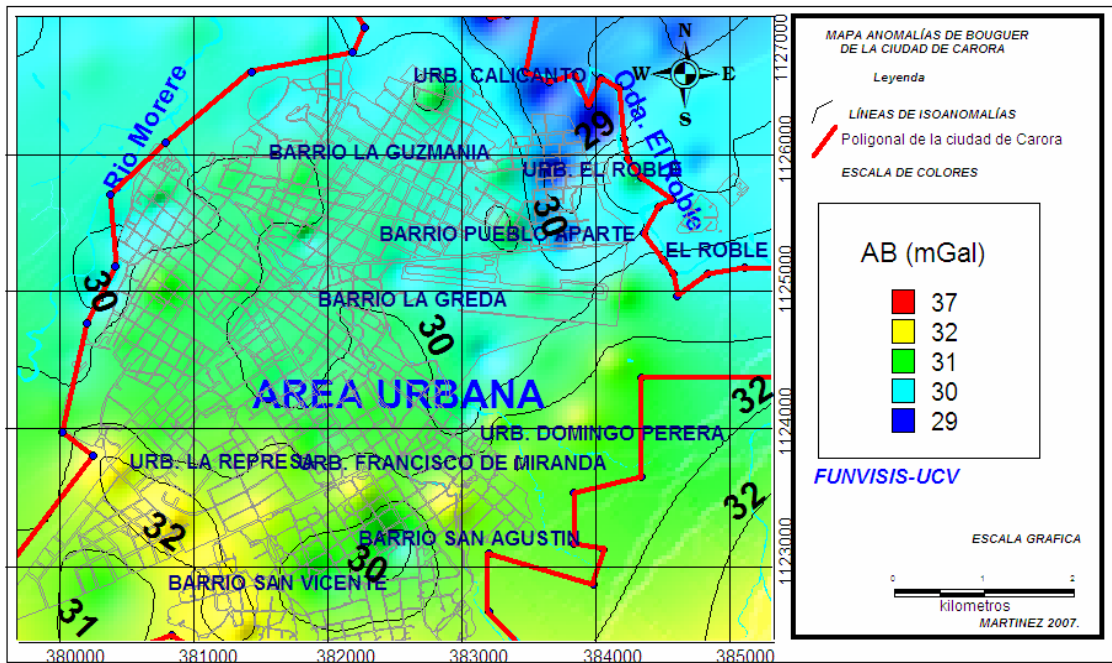


Figura 82 Mapa de Anomalías de Bouguer del área urbana de Carora

5.6.1 Bondad de Ajuste y superficies polinómicas.

Las anomalías magnéticas y gravimétricas totales son la representación de la adición de dos tipos de contribuciones productos de diferentes fuentes, una regional y otra residual.

Dependiendo del alcance de los estudios se realiza una separación regional – residual con el objetivo de destacar o filtrar las anomalías de interés. Para estudios regionales, el análisis e interpretación se puede efectuar con la componente del campo total, debido que la contribución de la componente residual es insignificante, ya que esta anomalía regional corresponde a altas amplitudes y representan estructuras de la corteza terrestre.

Ahora bien para estudios de tipo local, se considera la componente residual del campo con menos amplitud y extensión. Esta componente esta relacionada con efectos o estructuras cercanas a la superficie.

Por lo expuesto anteriormente se considera prudente realizar esta separación para evitar que la interpretación sea afectada o influida por efectos o amplitudes que no sea de interés.

Para realizar la separación regional-residual existen numerosos métodos la cual consiste en ajustar los datos de las anomalías de Bouguer a una superficie matemática.

Para iniciar el proceso de interpretación se observa cual es la tendencia regional de las superficies, la cual consiste en seleccionar la superficie de tendencia que mas se adapte a los valores de anomalías de Bouguer, para ello se considera una serie de parámetros estadísticos que permitan asegurar la confiabilidad del ajuste desde el punto de vista analítico pero también debe tener significado geológico.

Una vez obtenidas la superficie de tendencia, a través del método de regresión polinómicas, se define el grado del polinomio que mejor ajuste a los datos aplicando la formula estadística de la Bondad de Ajuste.

A través de este método se realizó una grafica de coeficiente de determinación contra grado de polinomio calculando las superficies polinómicas de primero a sexto orden.

La formula para el cálculo de la bondad de ajuste viene expresada por (Davis, 1973):

$$100\%.R^2 = \left(\frac{SS_R}{SS_T} \right)$$

(Ec.5.5)

$$SS_R = \sum \hat{Y}^2 - \frac{\left(\sum \hat{Y} \right)^2}{n}$$

(Ec.5.6)

$$SS_T = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}$$

(Ec.5.7)

donde

Y: Valor de Anomalías de Bouguer total de cada estación.

\hat{Y} : Valor de Anomalías regional de cada estación.

En la figura 83 se observa un gráfico de valor de coeficiente de determinación contra grado del polinomio, en la posición que la tangente a la curva alcanza cero (0) grados con la horizontal se selecciona el grado polinómico respectivo.

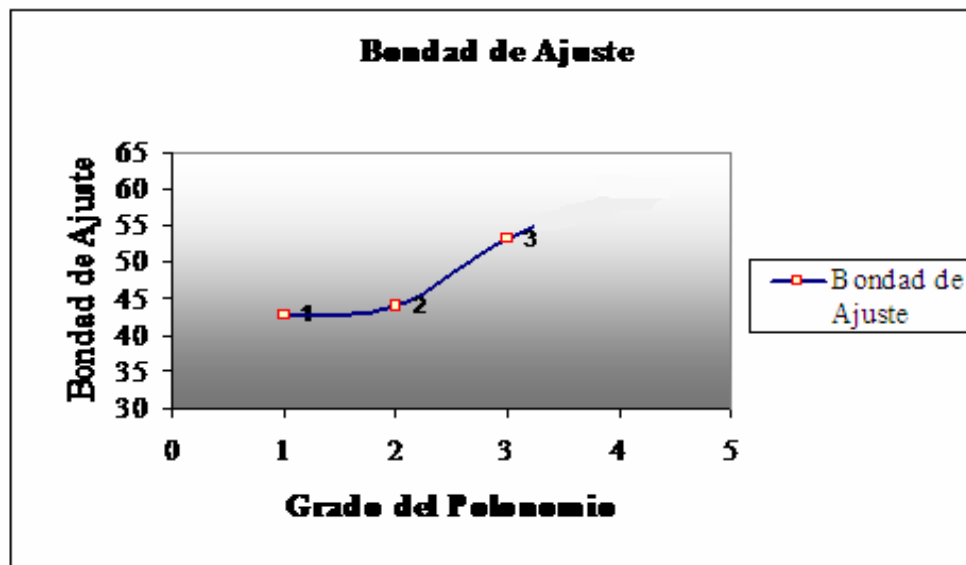


Figura 83 Grafica de Bondad de ajuste.

En el apéndice se muestran los mapas realizados para cada grado de polinomio utilizado para el cálculo de la bondad de ajuste. En la grafica de la figura 83 se observa que el grado del polinomio es el que corresponde al grado 3, debido a que es el modelo matemático que mejor se ajusta a los valores de AB.

Luego mediante una regresión polinomial se construye los mapas de la componentes regional y residual para la región de la cuenca de Sabana de Carora (figuras 84 y 85).

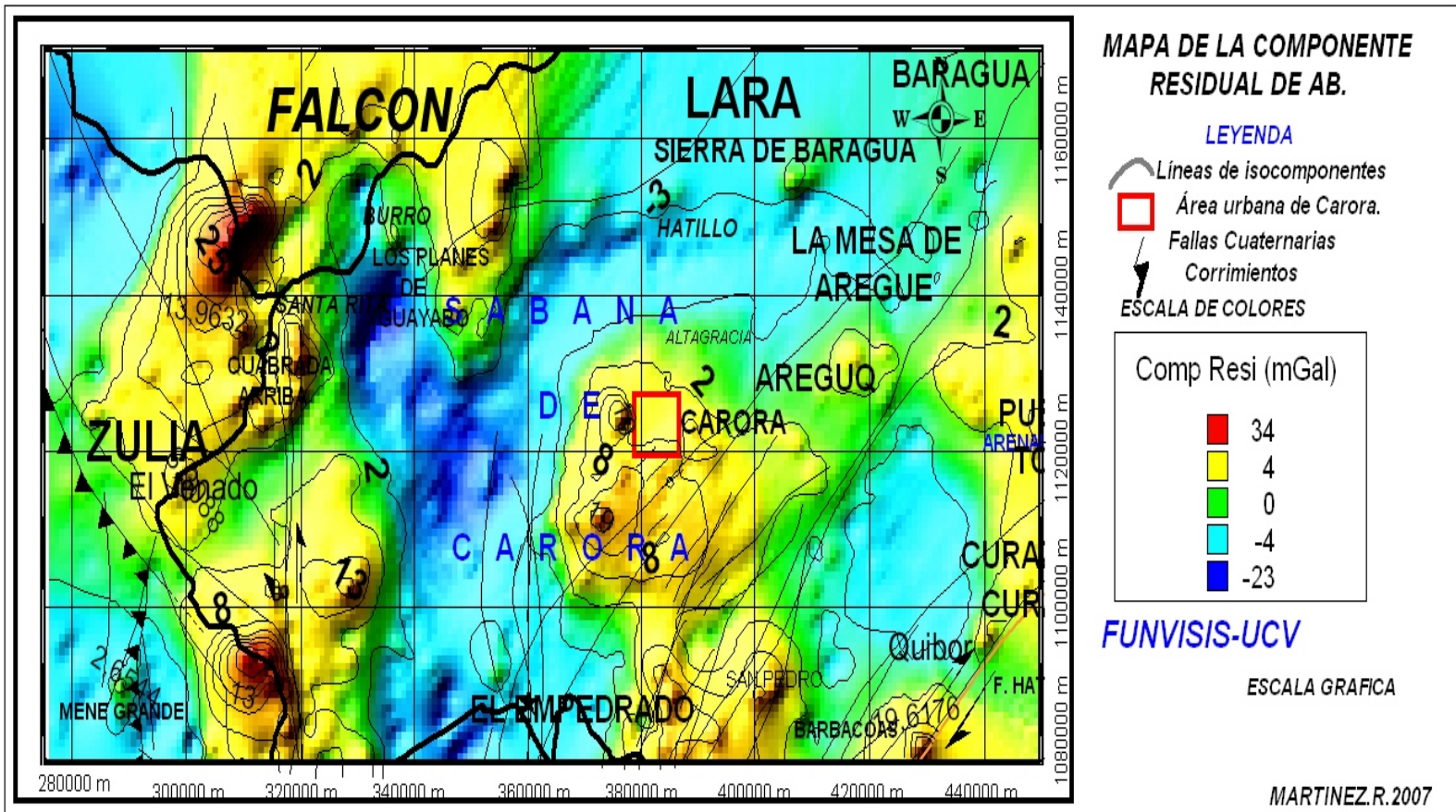


Figura 84 Mapa de la componente residual de AB

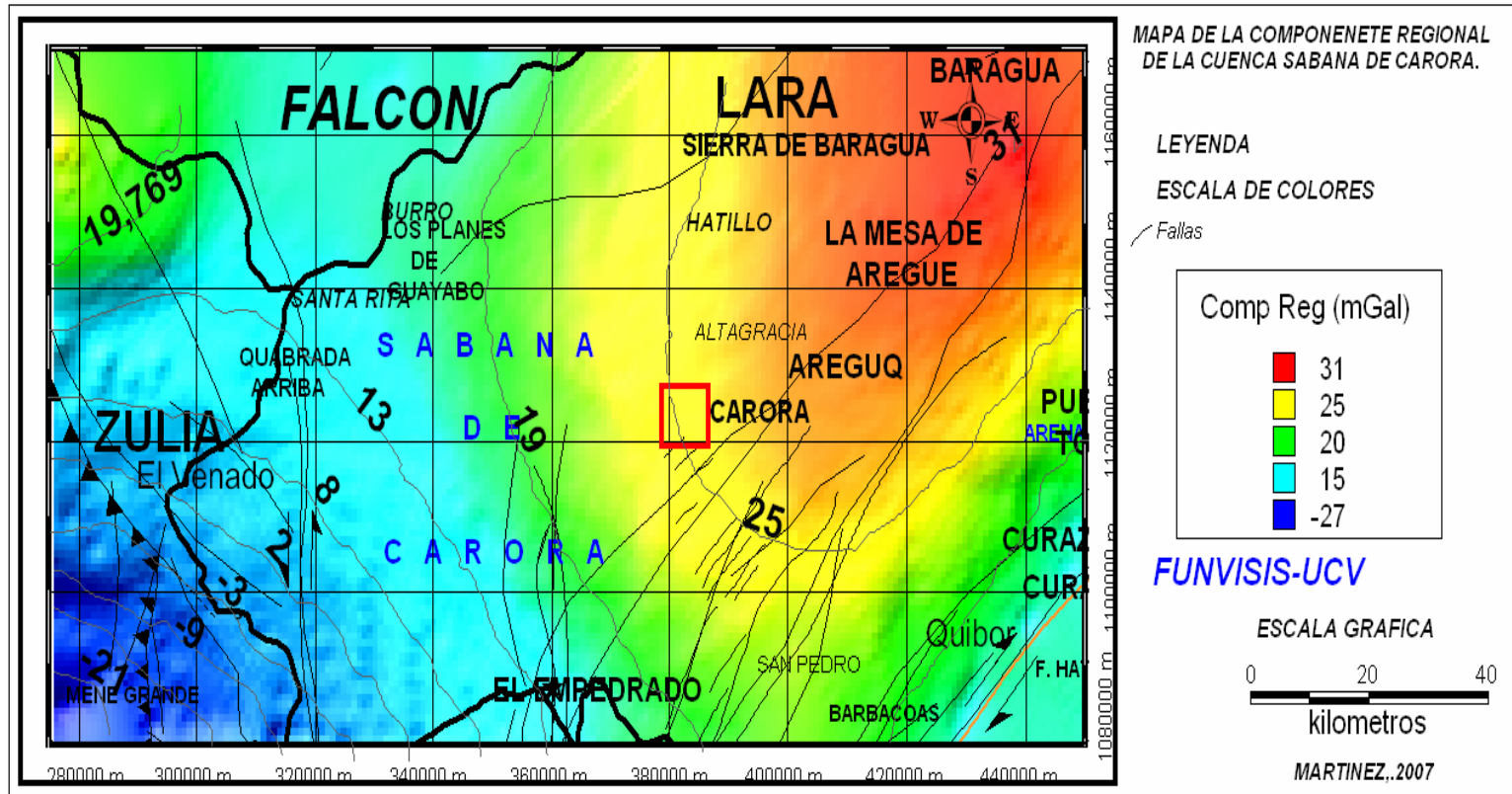


Figura 85 Mapa de la componente regional de AB.

5.7. ANÁLISIS ESPECTRAL

El programa Oasis Montja versión 6.1 incluye en sus aplicaciones la herramienta MAGMAP (2S-FFT) de GEOSOFT utilizada para realizar el análisis espectral de la anomalía de Bouguer. Este programa aporta como resultado el gráfico como se muestra en la figura 86, donde se observa el espectro de energía promediado radialmente (Radially Averaged Power Spectrum), el cual se usa para calcular las pendientes (S) según los cambios en la curva, y la curva de profundidades estimadas (Depth Estimate). Las mayores profundidades corresponden a fuentes profundas y las menores a fuentes someras.

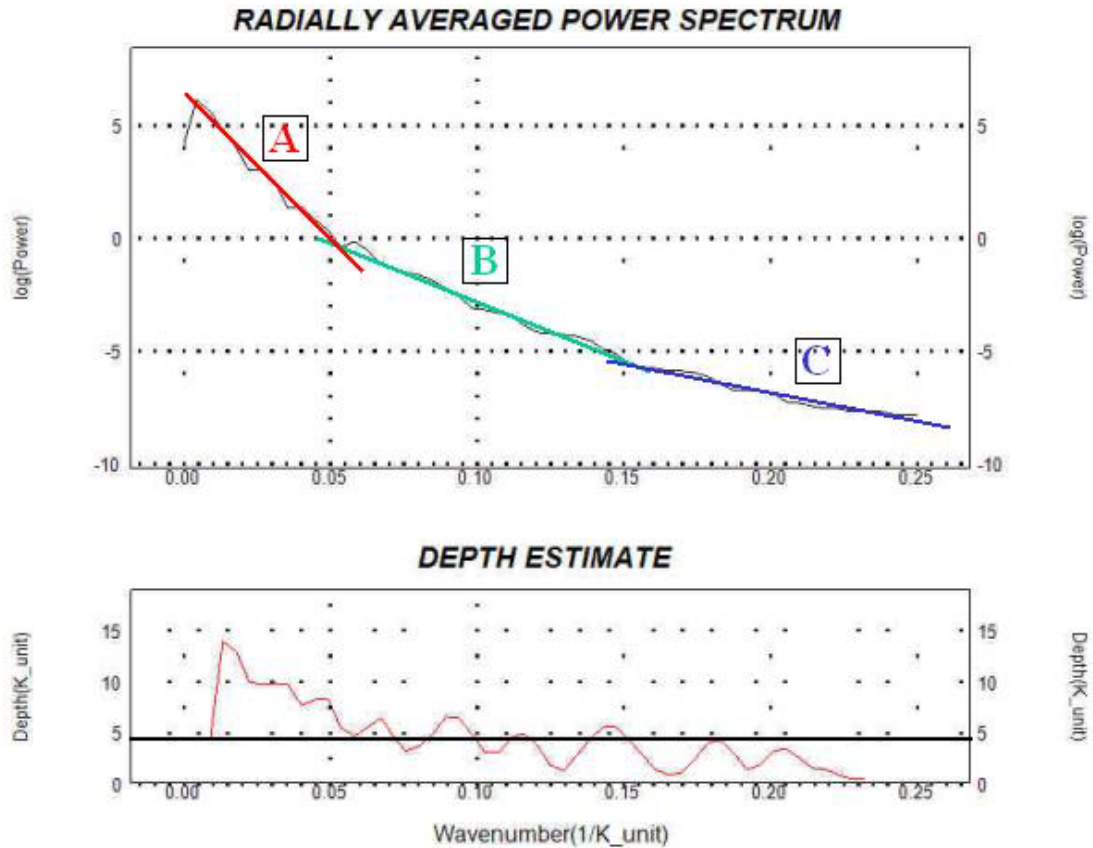


Figura 86 Espectro de Energía.

En la tabla 14 se presentan los valores de profundidad estimada por este análisis espectral

Tabla 14 Estimación de profundidades (m).

Fuente	Estimación	Profundidad estimada (m)
1	Profunda	-9952
2	Intermedia	-3980
3	Somera	-2388
4	Promedio	-5000

5.7. DECONVOLUCIÓN DE EULER

El programa Oasis Montja versión 6.1 incluye en sus aplicaciones la herramienta deconvolución de Euler (Euler 3D deconvolution) de GEOSOFT es el que aplica la deconvolución de Euler seleccionando una ventana cuadrada de datos de un mallado del campo total y el índice estructural apropiado para estima las profundidades de la estructuras que generan las anomalías. Las soluciones aceptadas se guardan en un archivo XYZ que puede usarse para imprimir los resultados. En las graficas 87, 88 y 89 se aprecian los mapas correspondientes a la deconvolución de Euler para índices estructurales 0, 05, y 1 respectivamente

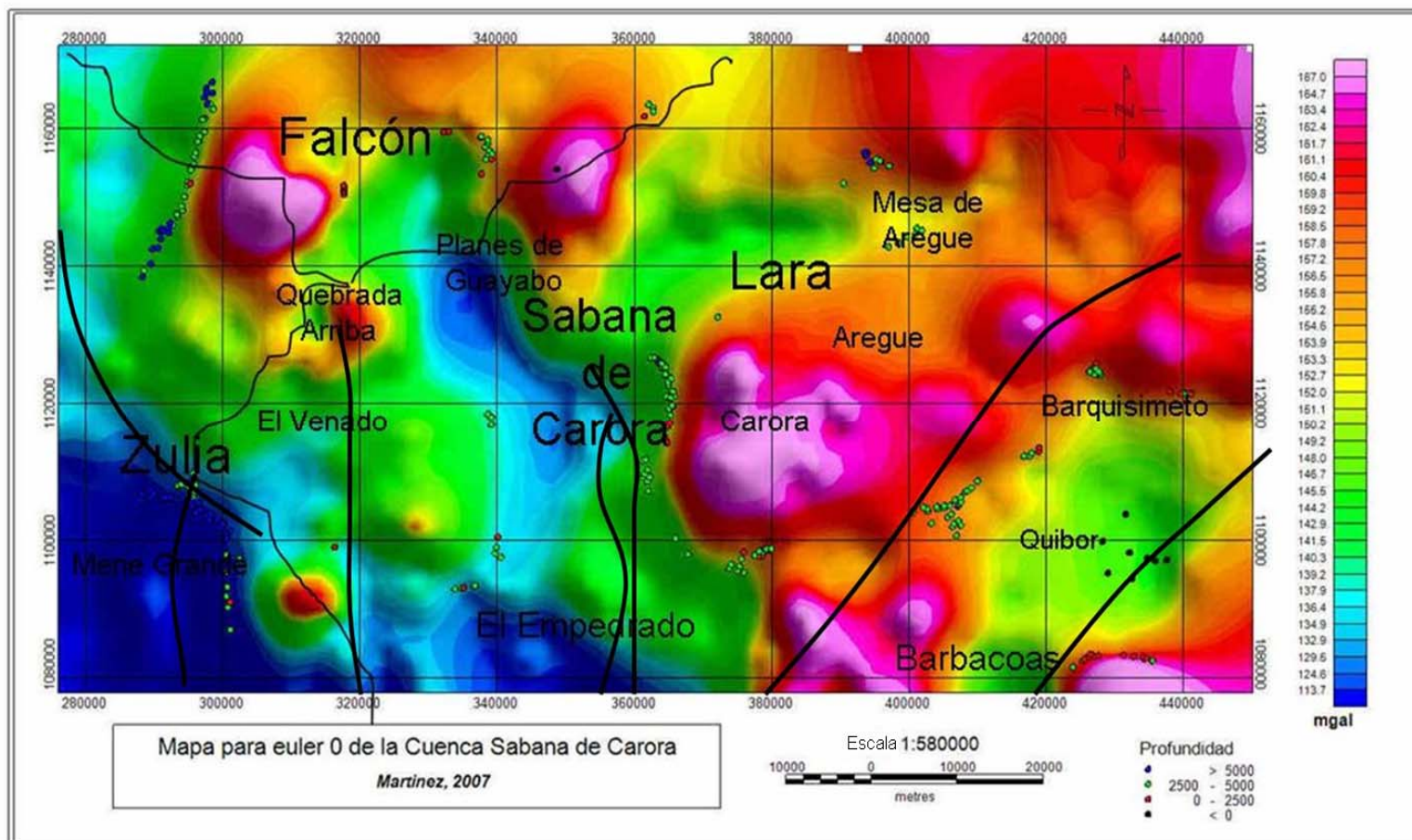


Figura 87 Mapa de deconvolución de Euler con Índice Estructural (SI)= 0

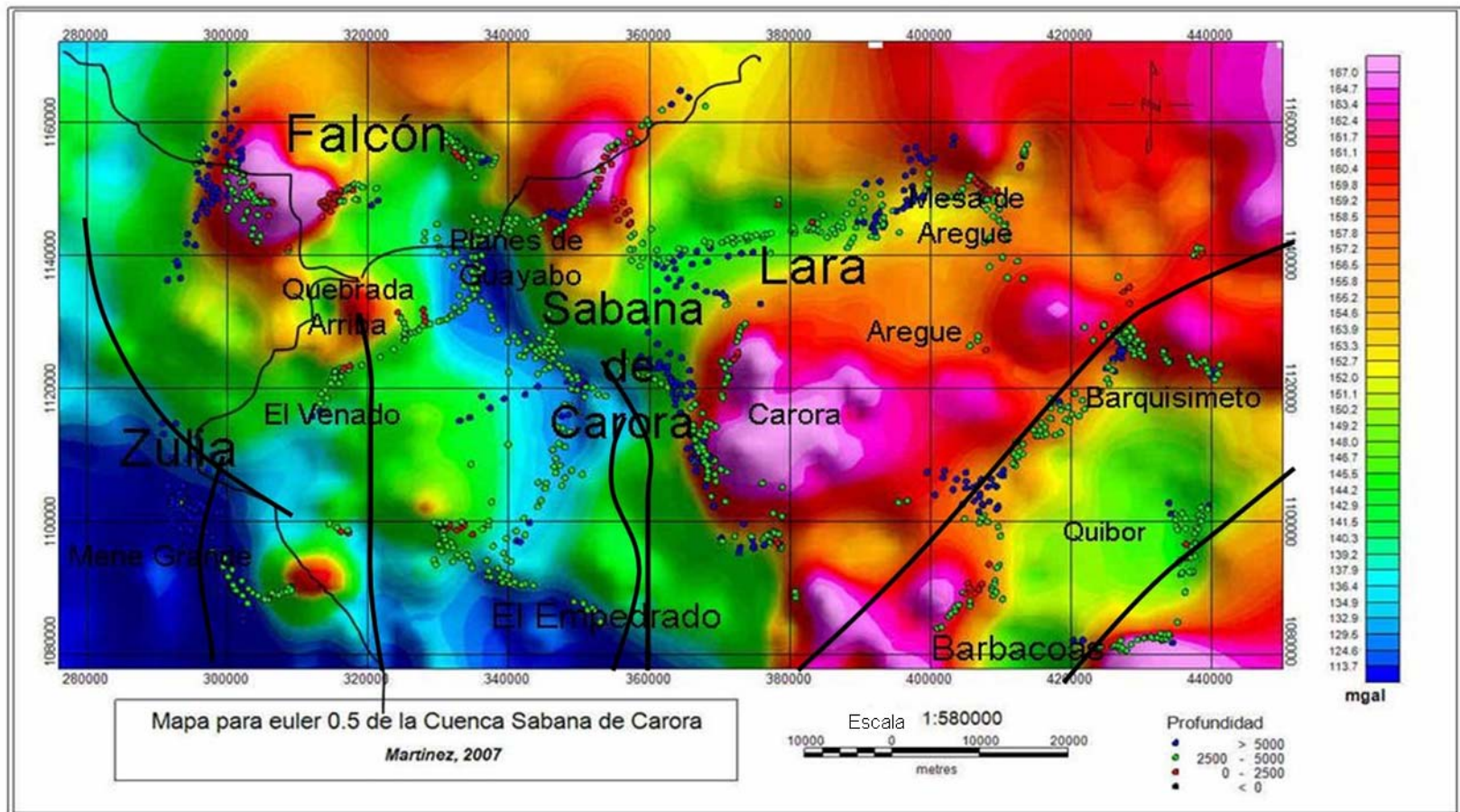


Figura 88 Mapa de deconvolución de Euler con Índice Estructural (SI)=0.5

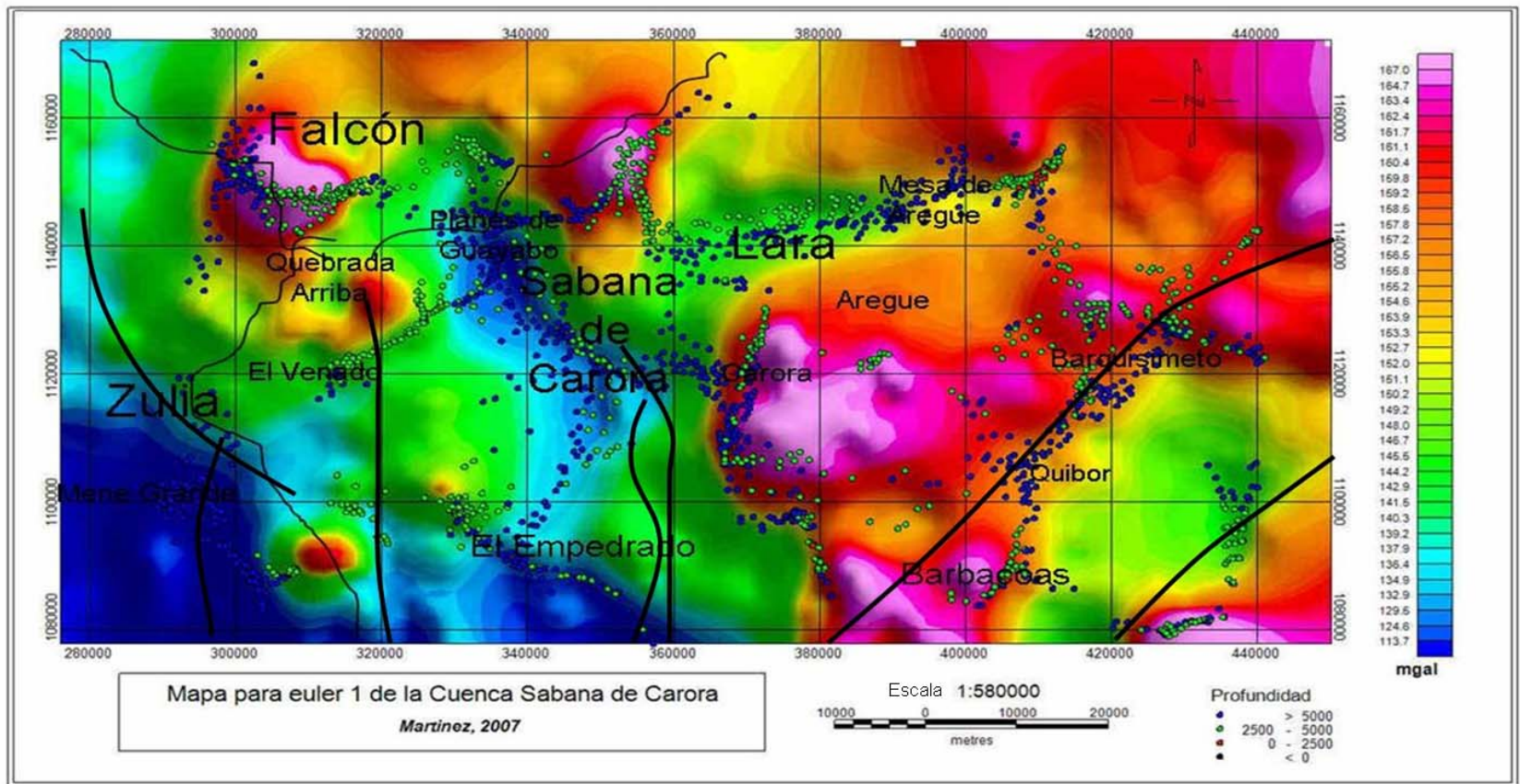


Figura 89 Mapa de deconvolución de Euler con Índice Estructural (SI)= 1.

5.8 MODELO GRAVIMÉTRICO

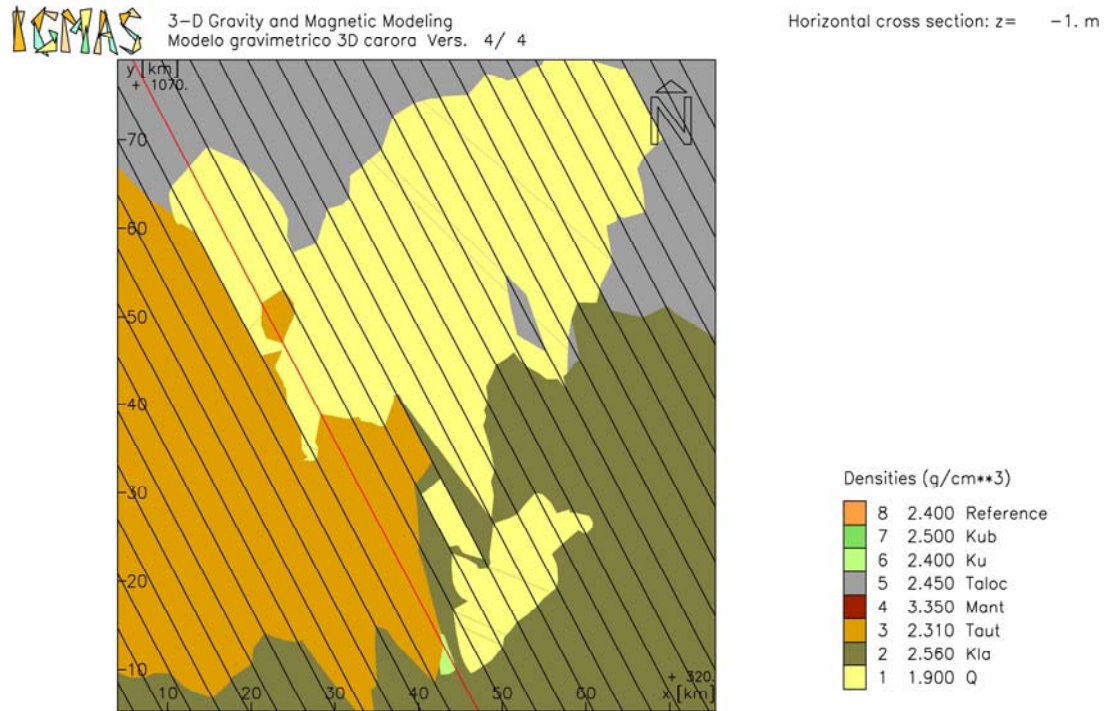


Figura 90 Sección horizontal de cota $Z=-1$ de ca cuenca de Sabana de Carora.

En la figura 90 se muestra un plano horizontal a -1 metro de profundidad del nivel de referencia de 600 m.s.m.m y una densidad de referencia de 2,4 gr/cc.

En la figura 91 se muestran los mapas de anomalías de Bouguer modelado y medido obtenidos con el programa IGMAS. La similitud entre ambos está determinada por el ajuste entre las curvas observada y calculada de anomalía, que genera cada plano que conforma parte del modelo 3D. Se observan los mínimos valores al este del área, aumentándole manera gradual de los valores en mGal hacia la parte inferior de l mapa.

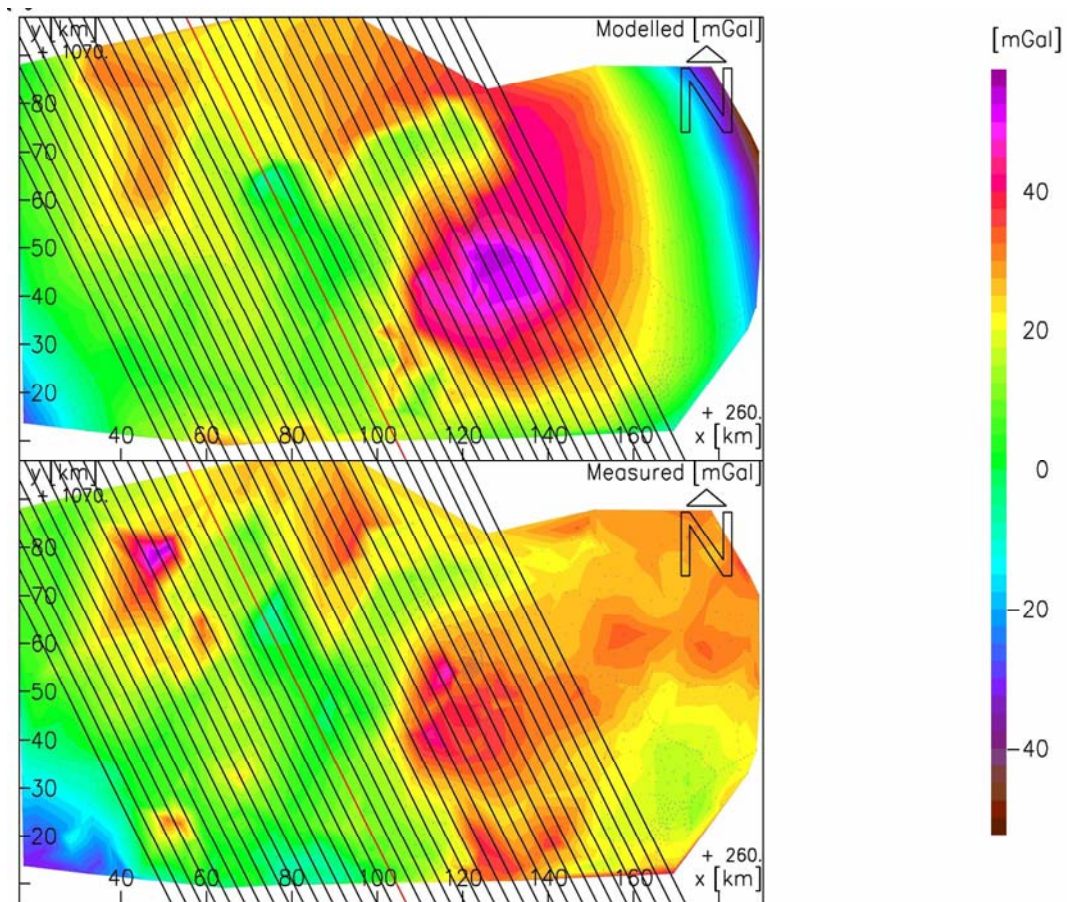


Figura 91 Mapa de anomalías de Bouguer, Arriba: Mapa modelado (Modelled). Abajo: Mapa medido (Measured).

5.8.1 Perfiles 2-D de la cuenca Sabana de Carora.

El modelo 3D esta definido por una serie de planos verticales separados a una distancia de 3 km. En la figura 91 se observa la disposición de los perfiles propuestos que conforman el modelo con una dirección de $N 30^{\circ} 0'$. Se definieron 37 planos los cuales pueden representan secciones 2D. El objetivo es lograr el mejor ajuste entre las curvas de anomalías de Bouguer medidas y la curva calculada al interactuar con la forma y disposición de las unidades que conforman el subsuelo

La ubicación y sentido de los planos se determino de acuerdo a la disposición de

las unidades, estructuras geológicas presentes en l área y la complejidad de la zona, cabe destacar que siempre se conservó el paralelismo de los mismos

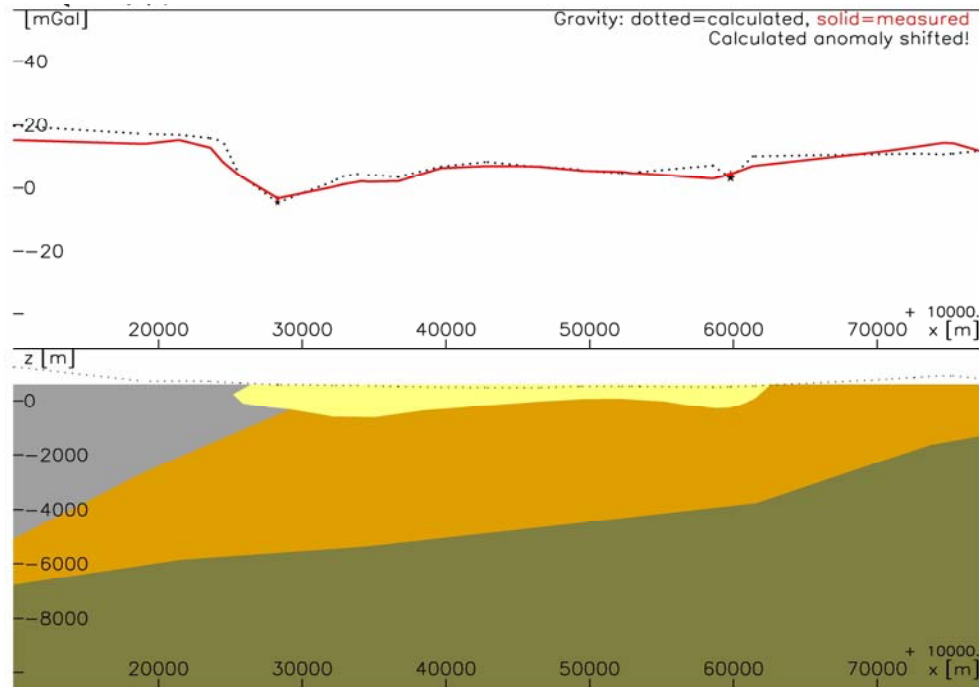


Figura 92 Perfil 17 de la cuenca Sabana de Carora.

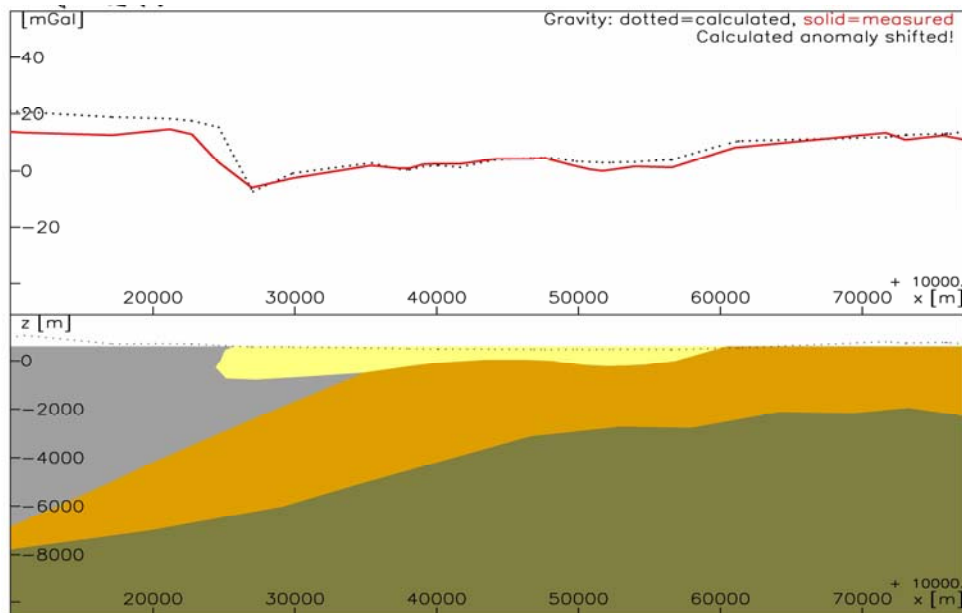


Figura 93 Perfil 18 de la cuenca Sabana de Carora

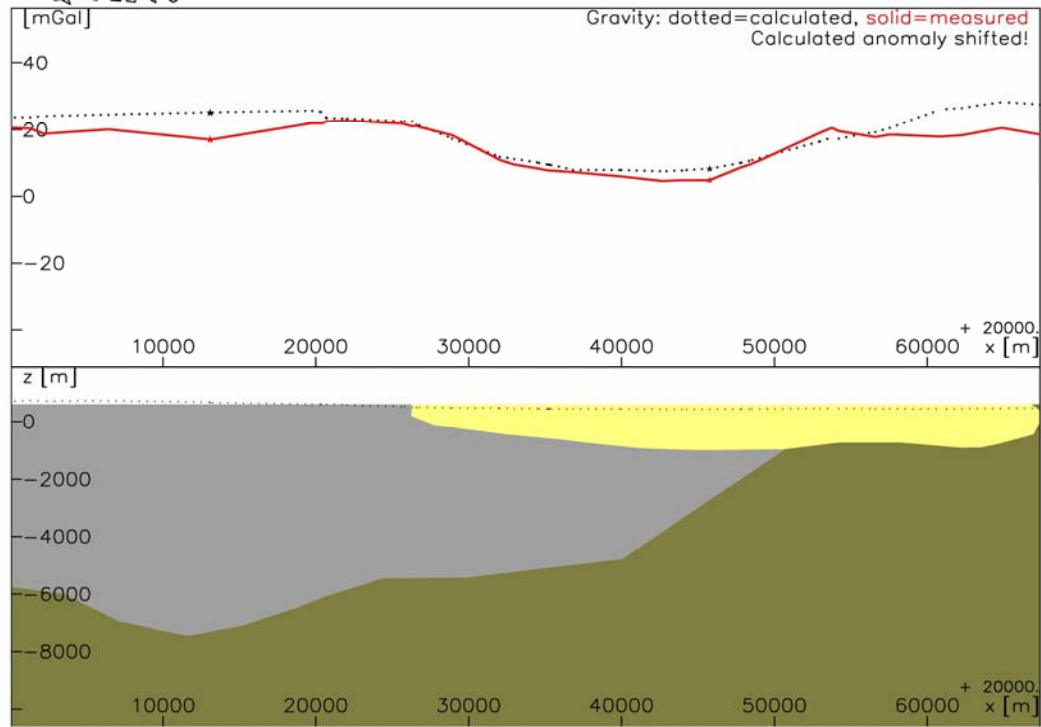


Figura 94 Perfil 22 de la cuenca Sabana de Carora

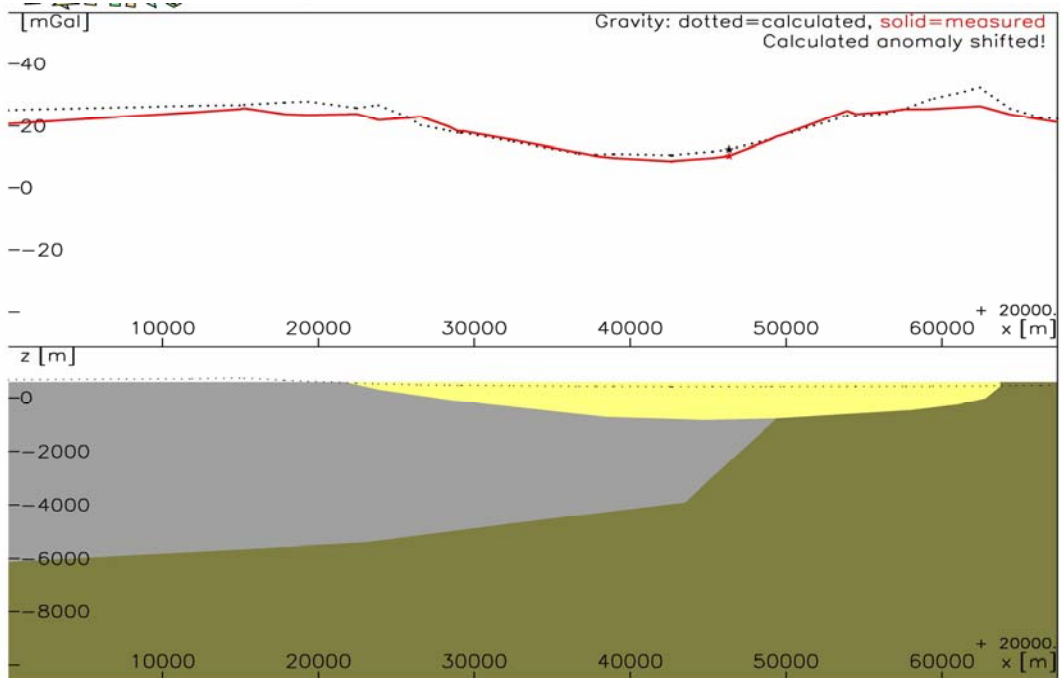


Figura 95 Perfil 23 de la cuenca Sabana de Carora

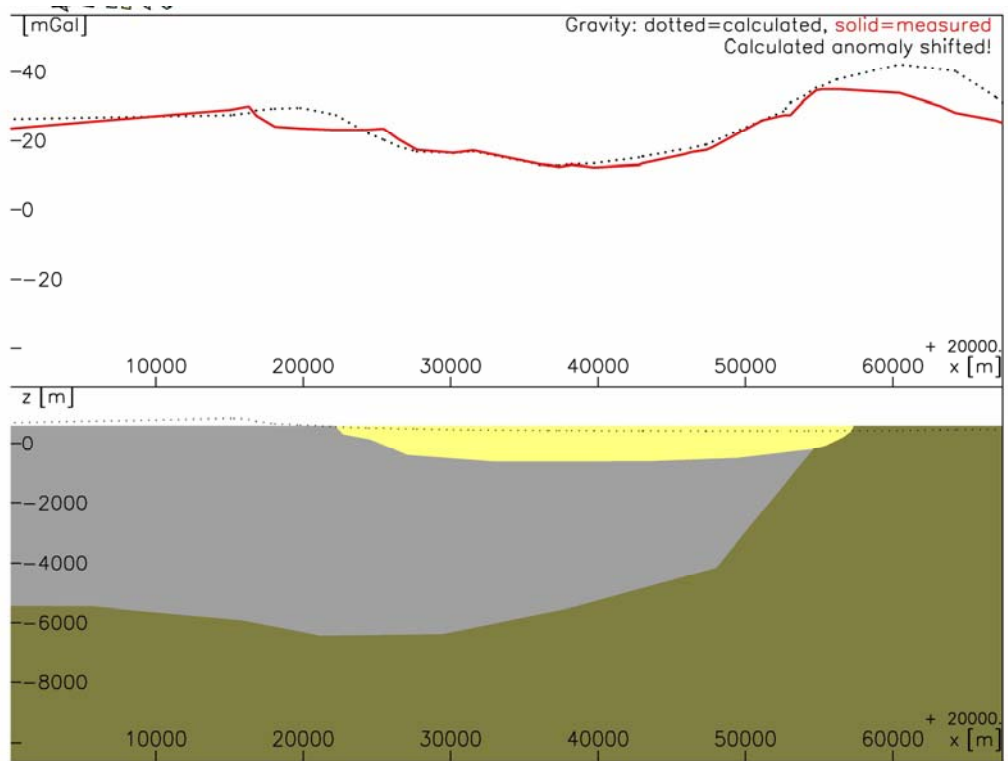


Figura 96 Perfil 23 de la cuenca Sabana de Carora

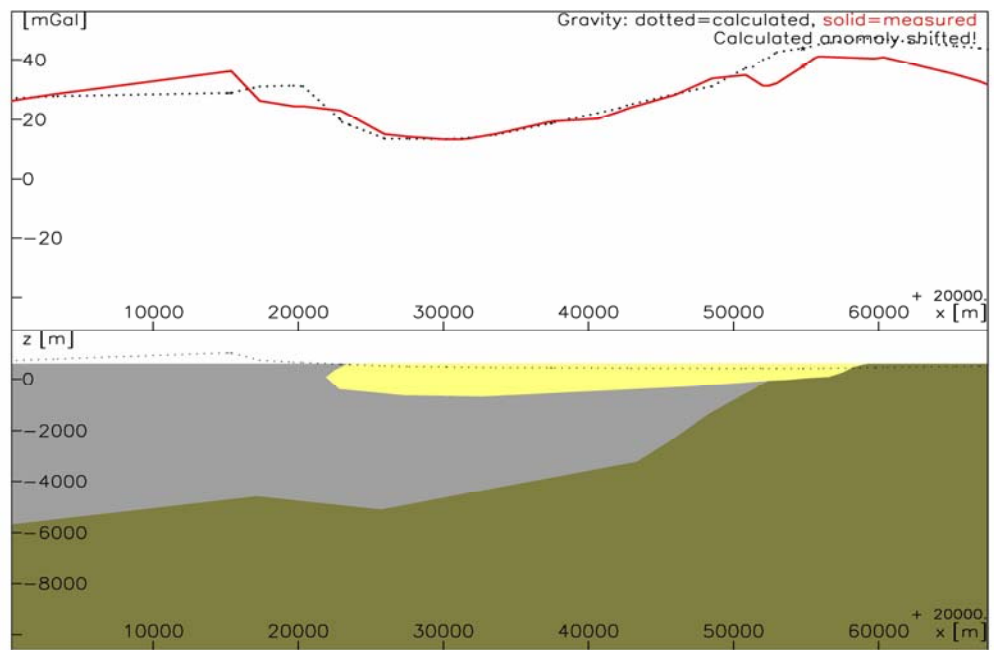


Figura 97 Perfil 26 de la cuenca Sabana de Carora

El programa IGMAS permite visualizar cortes verticales del modelo 3D, en cualquier dirección, lo cual se considera una valiosa herramienta a la hora de interpretar los resultados. En la figura 98 y 99 se presenta dos perfiles con orientación NE-SO el primero corresponde al perfil ubicado mas al norte de la cuenca y el segundo mas al sur .En la figura 101 se observa un modelo tredimensional de la cuenca Sabana de Carora.

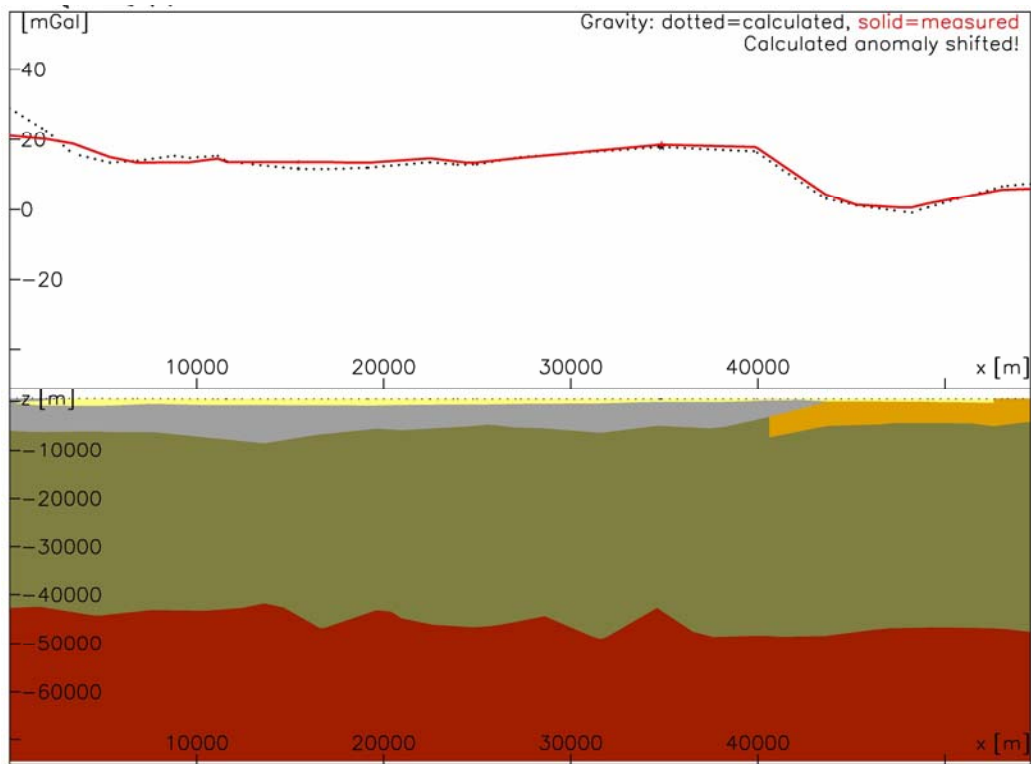


Figura 98 Perfiles longitudinal ubicado al norte.

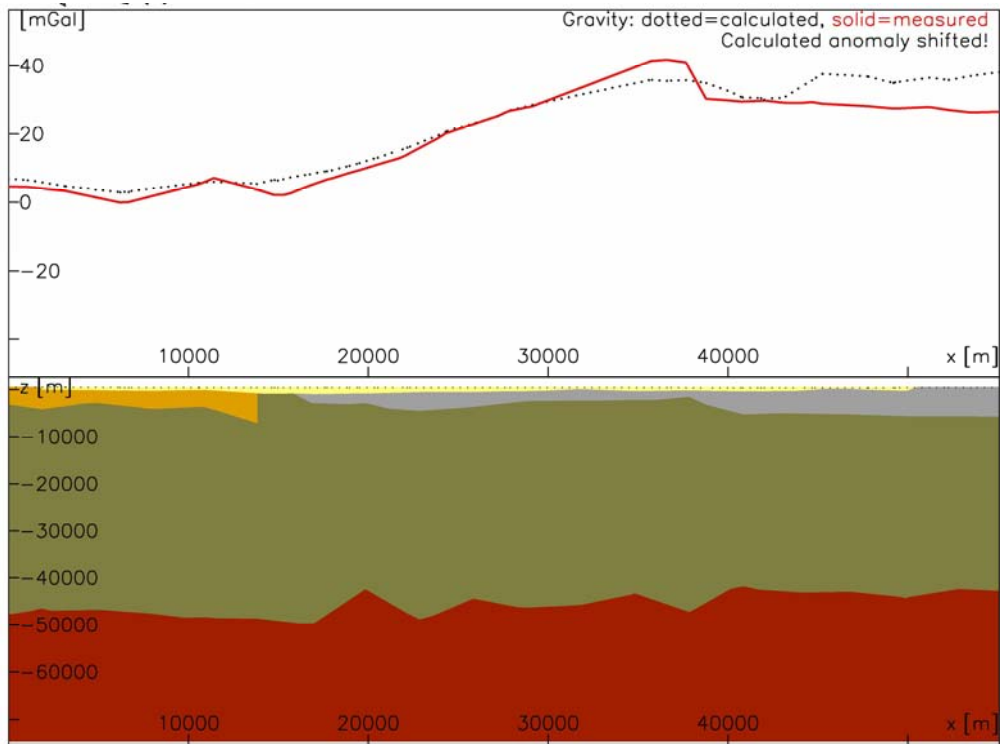


Figura 99 Perfil longitudinal ubicado al sur.

3.5.4. Mapas Isópaco de los sedimentos de la cuenca

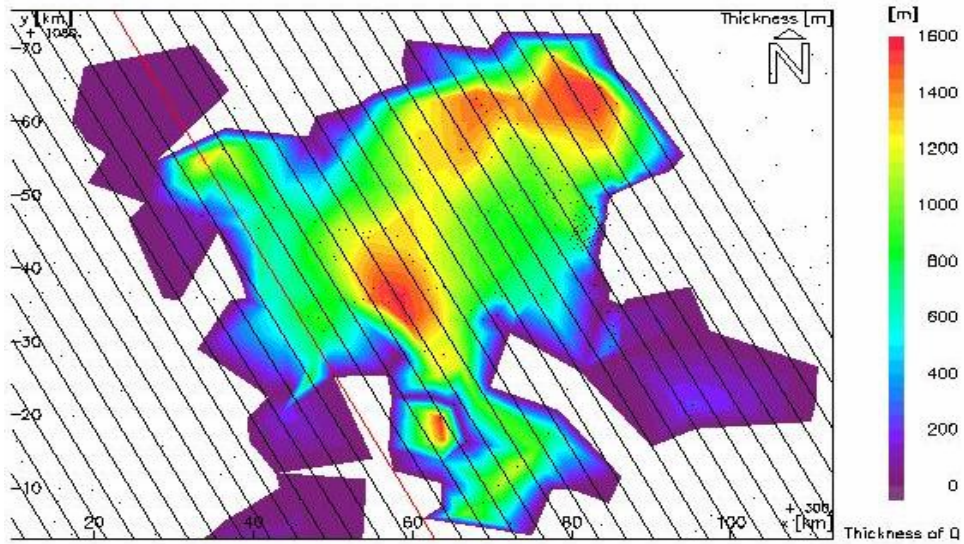


Figura 100 Mapa Isópaco de espesores de sedimentos de la cuenca de Sabana de Carora.

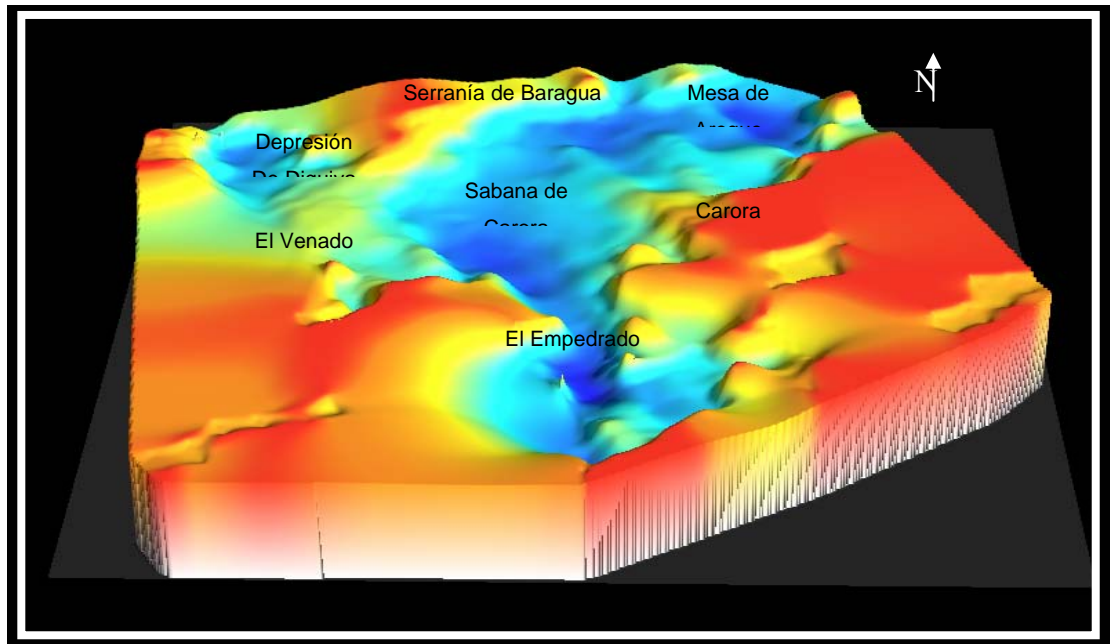


Figura 101 Modelo tridimensional del basamento de los sedimentos de la cuenca Sabanas de Carora.

CAPITULO VI

RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.2 Mapa de isocorrección topográfica

6.2.1 Mapa isocorrección topográfica de la cuenca de Sabana de Carora

Hacia el norte de la zona de estudio (figura 68), se observa que las curvas de isocorrección topográfica poseen una tendencia $N65^{\circ} E$ aproximadamente, controladas por la cercanías de la serranía de Baragua, presentando valores altos de corrección topográfica de 40 mGal en las proximidades de Santa Rita, Planes de Guayabo, El Burro y Quebrada Arriba.

Al suroeste se aprecia que la tendencia de estas líneas es próxima a $N30^{\circ}O$, relacionado a la serranía Ziruma-Trujillo con valores próximos a 30 mGal. Los altos valores de corrección se atribuyen a altos topográficos presentes en el área de estudio con un gradiente de 0,9 km/mGal disminuyendo de norte a sur sentido NO-SE.

En la parte central, oeste y sureste del mapa se aprecia valores bajos de corrección topográfica, correspondientes a bajos topográficos presentes en la zona. Estos valores se encuentran cerca de las poblaciones de Altagracia, Hatillo y Mesa de Areque, en la parte central del mapa, justo en donde se ubica la cuenca de Sabana de Carora entre las coordenadas UTM E 280000-420000 y N 1120000-1160000, con valores cercanos a 1 y 0 mGal, así como al oeste del mapa con valores 0 mGal en la cercanías del El Venado y al sur-este en las poblaciones de Quibor y Curazaito.

6.2.2 Mapa isocorrección topográfica de la ciudad de Carora

En el mapa de la figura 69 se observa que al noroeste las curvas de isocorrección topográfica tienen una tendencia O-E con valores bajos a 0,87 mGal debido a la presencia de la depresión de Sabanas de Carora ubicada al norte de la ciudad en las cercanías del río Morere, Urb Calicanto y el Barrio Paraíso con un gradiente de 0,75 km/mGal incrementándose de norte a sur en sentido NO-SE.

Al sur del mapa se mantiene la tendencia de las líneas de isocorrección O-E pero se incrementa el valor de corrección a 5 mGal en las cercanías de Quebrada El Roble y San Jacinto. Este mapa evidencia claramente la ubicación de la ciudad de Carora en el borde sur-este de la depresión de Sabanas de Carora ubicada al norte de la ciudad, la cual corresponden valores bajos de corrección topográficas, esto podría corresponder inclusive a zonas de inundación ya que en la zona se ubican las vertientes de la quebrada El Roble y el río Morere entre otras.

6.3 Análisis estadístico y geoestadístico de los datos gravimétricos.

6.3.1 Análisis estadístico de los datos gravimétricos de la cuenca de Sabana de Carora.

Luego de realizar el análisis estadístico de los valores de anomalías de Bouguer, se determinó como medidas de concentración que el promedio aritmético es de 19,391mGal (media), 20,342mGal (mediana) y -31,718 mGal (moda) la similitud entre la media y la mediana indican que los datos tienden a poseer una distribución normal.

También se determinó (Tabla 9) que el valor de varianza es de 144,379 mGal y desviación estándar es de 12,015 mGal la cual es espacialmente dependiente de la geología y extensión de área, a su vez revela como fue la distribución de muestreo en el área de estudio.

El histograma de la frecuencia de los valores de AB se presenta en la figura 71 en el se observa una distribución de los datos con dos modas cercanas a los valores 17,5 mGal y 27,5 mGal, esto puede ser representativo de que en el área de estudio predominan dos dominios lo cual resulta coherente debido a la geología de la zona y se visualiza en los mapas de la componentes regional y residual de AB.

Para el grafico Q-Q mostrado en la figura 72 en la parte central de la recta de 45° se observa como los valores se ajustan a la distribución normal teórica representada por la línea recta, es decir, que su ajuste es aceptable, mientras que en los extremos de se visualiza que la población se aleja de la distribución normal esto es causado por los efectos de bordes

Ahora para el grafico de Detrended Q-Q de Anomalías de Bouguer mostrado en la figura 73, se observa que en la parte central las desviaciones de los puntos respecto a la recta preceden a una distribución normal ya que estos se encuentran muy cercanos a la línea 0 mientras que en los extremos por efectos de borde se alejan, comportamiento similar al de la figura 72. En ambos gráficos se observa que la mayor concentración de población se ubica entre los valores de -10 y 40 mGal por lo que se puede interpretar que existe un buen ajuste en la mayoría de la población lo cual significa que se encuentra bajo una distribución normal.

Como se aprecia en las figuras 75, 76 y 77 de los tres modelos teórico planteados el que más se ajusta a la distribución de los valores de AB es el modelo Gausseano (figura 75) en donde alcanza su punto de inflexión o meseta en el punto A con un rango de 5 km este valor indica la distancia máxima en donde existe mayor varianza en los valores de anomalías de Bouguer, este valor de varianza corresponde a 130 mGal.

El Variograma indica una tendencia Gausseana donde se puede interpretar, que la variación de las anomalías de Bouguer con respecto a la distancia considerando todas las direcciones, es muy lento, es decir que a grandes distancia hay pocos cambios en los valores de AB.

En la figura 78 y 79 se observa la elipse de anisotropía construida para la distribución de los valores de AB.

Los ejes de la elipse de anisotropía permiten establecer la dirección en que varía las anomalías de Bouguer (AB) en función de la distancia. Para este caso el eje mayor establece la menor variabilidad de (AB) con respecto a la distancia mientras que en sentido NO-SE, el eje menor indica que en dirección NE-SO la existe la menor variabilidad de estos valores.

La elipse de Anisotropía correspondiente modelo Gausseano, donde el eje mayor representa la zona de menor continuidad espacial de los datos y el eje menor la dirección de anisotropía espacial.

6.4 Mapa de anomalías de Bouguer.

6.4.1 Mapa de anomalías de Bouguer de la cuenca de Sabana de Carora

En el mapa de anomalías de Bouguer (AB) (figuras 80) se observa que las curvas describen dos orientaciones preferenciales, al sur-oeste del mapa las líneas tienen una tendencia NO-SE, mientras que al noreste del mismo, la tendencia de las líneas posee un sentido NE-SO. Los valores altos de AB se ubican en la parte central específicamente en el área de la ciudad de Carora, Mesa de Areque, Areque y Barbacoas con un valor cercano a lo 40 mGal y un gradiente suave de 1,75 mGal/km disminuyendo en sentido SO-NE hasta llegar a -25 mGal. Los mismo valores se localizan y los bajos en la zona sur-oste del mapa en la inmediaciones del El Empedrado, El Venado y Mene Grande con un gradiente de 1,25 km/mGal disminuyendo en sentido NE-SO.

En la zona noroeste se observa un cierre isoanómalo cerca de la población de Santa Rita con valores cercanos a 48 mGal. El cual puede estar asociado a la presencia de un alto topográfico y al contraste en la litología de la zona.

Se aprecia claramente la presencia de dos rangos enmarcados por valores altos y bajos de Anomalías de Bouguer, esto es consecuencia a la presencia de grandes cuerpos, estructuras y cambios de densidad presentes en la litología de la zona de estudio, los altos valores corresponden a material rocoso más denso como las rocas cretácicas ubicadas debajo y en el sentido sur-este de la cuenca de Sabanas de Carora, en las

inmediaciones de la ciudad de Carora, Arenales y Areque en la parte central del mapa.

Los valores bajos de Anomalías de Bouguer (AB) describen claramente la presencia de una cuenca entre las coordenadas UTM E 320000–360000 y N 1100000-1140000, ubicada en la parte central de mapa entre las poblaciones de Quebrada Arriba, El Venado y Planos de Guayabo, esta depresión esta controlada por la falla de Burbusay descrita como una falla submeridiana de componente horizontal sinistral y fuertemente transpresiva, la cual se extiende en dirección norte-sur desde las estribaciones occidentales de la sierra de Baragua hasta la población de Boconó sobre unos 125 km de longitud. Esta estructura de tipo flor positiva controlaría la forma y geometría de esta cuenca, generando una cuenca de tipo "Pull Apart" (cuenca de tracción) debido a un salto hacia la izquierda de la traza de la falla, responsable localmente de la transtensión entre, dos segmentos de la falla de Burbusay separados unos 10 km, controlando la depresión del río Diquiva (Audemard *et al.*, 2007).

6.5 Mapas de la componente regional y residual de anomalía de Bouguer correspondiente a la cuenca de Sabana de Carora.

6.5.1 Mapas de la componente residual

En el mapa de la componente residual (figura 83) de orden 3, las curvas de isoanomalías muestra diversas tendencias, al igual que el mapa de anomalías de Bouguer, al este del mapa su dirección preferencial es en sentido E-O con un valor mínimo de -3 mGal y un máximo de 20 mGal disminuyendo en sentido S-N con un gradiente 0,62 km/mGal. Al oeste de mapa se aprecia que las líneas poseen una dirección preferencial de N-S. Se resaltan los cierres anómalos presente en el mapa de AB, la cuenca de tipo "Pull Apart" en el área de la cuenca de Sabana de Carora, y la presencia de cuerpos con grandes contrastes de densidades.

Esta tendencia de la isolíneas E-O, la parte centro-norte de la cuenca de Sabana de Carora en la cercanía de Mesa de Areque, coincide con la presencia de un presunto frente de corrimiento inverso que también es observado en el mapa de AB, (figura 80)

(Urbani, 2007 comunicación personal).

6.5.2 Mapas de la componente regional.

En el mapa de la componente regional (figura 84) de orden 3, se observan dos tendencias de las curvas de AB, al este del mapa la dirección preferencial es N70°|E con valores máximos de 31 mGal y un gradiente de 0,2 mGal/km disminuyendo en sentido SO-NE. En el lado oeste de mapa el sentido preferencial de las curvas es NO-SE con un gradiente suave de 0,5 mGal/km disminuyendo en el mismo sentido. Adicionalmente se aprecia la dirección y sentido de la variación de las anomalías de Bouguer establecidos por la elipse de anisotropía realizada con el Gridstat, donde el eje menor de la elipse representado en dirección NE-SO indico mayor variabilidad en los valores de AB, mientras que el eje mayor NO-SE indico el menor contraste.

6.6. Análisis espectral

La figura 85 muestra el espectro de energía se observa tres rectas (A, B y C) de ajuste entre la frecuencia y la energía correspondiente a las fuentes principales de la anomalía gravimétrica. De acuerdo a los cálculos realizados en los apéndices se encuentra a 2388 m de profundidad el origen de anomalía gravimétrica más somera (Recta C), que se presume es causado con la presencia de rocas cretácicas de la Formación Peñas Altas al sur de la cuenca de Sabana de Carora. Esta anomalía pudiera esta ubicada en el basamento ígneo metamórfico según las profundidades estimadas en el mapa de Foster D.Smith. Más profundo, a 3980 m aproximadamente (Recta B), se encuentra la segunda fuente de anomalía, la cual se presume que seria el contacto entre el basamento ígneo metamórfico y el basamento cristalino. Por último la tercera fuente de anomalía se halla a unos 9952 m (Recta A) se puede asociar a la presencia de la discontinuidad de Försch, la cual es una discontinuidad sísmica irregular dentro de la corteza continental superior, ubicada aproximadamente a unos 8 a 11 km de profundidad (De acuerdo a definiciones establecidas en la siguiente dirección electrónica

<http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~nicolas/geoglos/letrae.shtml>).

6.7 Deconvolución de Euler

Al igual que el análisis espectral la deconvolución de Euler proporciona información acerca de donde puede estar originándose una posible fuente de anomalía gravimétrica.

De acuerdo con lo observado en el mapa de la deconvolución de Euler con índice estructural (IE) = 0 (figura 86) de la cuenca de Sabana de Carora, se nota la presencia de pocos puntos generadores de anomalías de color verde indicando una fuente generadora a una profundidad intermedia estimada entre 2500 y 5000 m este punto se ubica en las cercanías de la ciudad de Carora y El Empedrado.

En la figura 87 correspondiente al mapa de la deconvolución de Euler con índice estructural (IE) = 0.5, predominan en casi todo el mapa fuentes anómalas intermedias (puntos verdes) ubicados a una profundidad próxima a 2500 a 5000 m. Se observa especialmente la secuencia de punto ubicados al norte del mapa en sentido este-oeste, que podría revelar la presencia de unas estructuras activa como un frente de corrimiento inverso cercano a Mesa de Areque (Audemard *et al.*, 2007) teoría adicionalmente planteada por Urbani.

También en sentido perpendicular se aprecia una alineación de puntos paralelos a la geometría de la cuenca presuntamente de tipo “Pull Apart”, ubicada en la parte central del mapa, donde se ubican las fuentes anómalas intermedia (puntos verdes) localizadas a una profundidad estimada de 2500 y 5000 m, esta alineación en sentido NO-SE puede atribuirse a la continuación de la falla de Burbusay por debajo de los sedimentos cuaternarios de la cuenca de Sabana de Carora, donde dicha falla controla la terminación de la serranía de Baragua (Audemard *et al.*, 2007).

En el sureste y noroeste de mapa también se localizan fuentes anómalas intermedias. Las primeras se pueden atribuir a la falla de Hato Viejo localizada en las cercanías de Barquisimeto con un rango de profundidad estimada entre 2500 y 5000 m

y un sentido próximo a N50°E, las segundas fuentes se visualizan como una alineación ubicada al oeste y perpendicular a la alineación de la falla de Burbusay puede ser atribuida a estructuras asociadas a la esta falla.

Las fuentes ubicadas al noroeste del mapa corresponden a fuentes anómalas profundas localizadas a una profundidad estimada mayor a los 5000 metros. A su vez se visualizan puntos de color azul correspondientes a fuentes generadoras más profundas en un rango mayor a los 5000 m ubicados en la cercanía de la ciudad de Carora y Mesa de Areque.

En la figura 90 correspondiente al mapa de la deconvolución de Euler con índice estructural (IE) = 1 donde se observa el incremento de fuentes anómalas profundas (puntos azules) en las cercanías de Mesa de Areque en sentido este-oeste a una profundidad estimada superior a los 5000 m. También se muestran mayor cantidad de fuentes anómalas más profundas (puntos azules) alineados en dirección de la cuenca de tipo “Pull Apart”, en la cercanía de Quebrada Arriba donde se confirma la eventual continuación de la falla de Burbusay por debajo de la Cuenca de Sabana de Carora (Audemard *et al.*, 2007).

Así mismo se aprecia el aumento de fuentes anómalas más profundas en el sur-este del mapa, en donde confirma la presencia de la falla de Hato Viejo en la adyacencia de Barquisimeto.

Siguiendo la secuencia de las fuentes anómalas localizadas de los tres mapas (figura 86, 87 y 88) se observa claramente la presencia de tres importantes anomalías asociadas a estructuras que controlaría la tectónica de la zona: la falla de Burbusay, ubicada al sur del mapa, con sentido N-S donde indica la posible continuación de la falla de Burbusay por debajo de la cuenca de Sabana de Carora controlando la forma y geometría de la cuenca ubicada en el noroeste de la cuenca de Sabanas de Carora, la cual se presume que es una cuenca “Pull Apart” y controlaría la terminación de la serranía de Baragua y sería la responsable de la transtensión entre dos segmentos de esta falla controlando la depresión del río Diquiva, donde a su vez se estimaría que se encuentra el mayor espesor de sedimentos (Audemard *et al.*, 2007)

La segunda correspondería a un frente de corrimiento inverso activo ubicado seguidamente a la cuenca de tipo “Pull Apart”, ubicado al norte de la cuenca de Sabana de Carora cerca de Mesa de Areque, Planos de Guayabo y Quebrada Arriba, donde se presume que dicha estructura se solapa sobre los sedimentos del Cuaternario, generando un posible basculamiento por gravedad y estimado que allí se encuentra la parte más profunda de la cuenca, es decir, el mayor espesor de sedimentos (Urbani,2007 comunicación personal). Y por ultimo podría estimar la profundidad de la falla de Curarigua al sureste de la cuenca de Sabana de Carora en las adyacencias de Barquisimeto la cual es una falla de tipo transcurrente dextral, la cual posee antecedentes de tormentas sísmicas en el año 1995.

6.8 Modelo Gravimétrico

En la figura 89 se muestra un plano horizontal a $Z=-1$ metro de profundidad del nivel de referencia de 600 m.s.m.m y una densidad de referencia de 2,4 gr/cc, con la disposición de las unidades en superficie y sus respectivas densidades. Para realizar el modelo se discretizó el área de estudio como lo propuso en su trabajo Stephan, 1985, donde se estableció para las formaciones Paují, Misoa, Trujillo, Valle Hondo, Ranchería, Humocaró, Quebrada Arriba ($T_{auto}=2,31$ grs/cc), Colón, la Luna ($K_u=2,5$ grs/cc) Peñas Altas($K_{la}=2,56$ grs/cc) como Terciario y Cretácico Autóctono Andino mientras que el Terciario Alóctono Caribe esta constituido por las formaciones: Matatere, Aguas Negras, Acarigua, Barquisimeto ($k_{ub}=2,4$ grs/cc) Bobare Carorita ($T_{aloc} = 2,45$ grs/cc) y los aluviones ($Q=1,9$ grs/cc). Para cada unidad se establecieron valores de densidades correspondientes a su litología y extraídos del análisis geológico.

6.8.1 Modelos 2D

En las figuras a la 91 y 92 se observan modelos bidimensionales donde se describen cuatro cuerpos que se describen de mayor a menor: K1a (2,56 gr/cc) que forma parte del Cretácico autóctono presente en la zona de estudio, continúa el Terciario autóctono (Taut) cuya densidad es de 2,31, luego continúa el Terciario alóctono (Taloc=2,45), y por último se observa los sedimentos pertenecientes a el cuaternario.

A medida que se avanza en sentido noreste, el Terciario autóctono va desapareciendo mientras que se comienza a aparecer el Terciario alóctono, se presume que el contacto entre estos dos dominios se encuentra por debajo de los sedimentos de la cuenca de Sabana de Carora. Es por ello que en los primeros planos específicamente en el 14-15 se ve en nacimiento de la cuenca haciéndose más profunda a unos pocos metros entre los planos 17-18 y 20-21 donde se presume que alcanza su máximo espesor cercano a los 800 metros. A medida de que se avanza hacia el este la cuenca se hace menos profunda.

En otro orden de ideas también se observa un contacto entre dos dominios al norte de los perfiles se presume que se ubica al pie de montaña de la serranía de Baragua y que se pudiera interpretada como un frente de corrimiento inverso que se monta sobre los sedimentos de la cuenca al norte de la cuenca.

6.8.2 Mapas Isópacos

Se generó un mapa de espesores de sedimentos, donde se presume que su mayor espesor se ubica en la depresión de Diquiva al noroeste de la cuenca de Sabana de Carora y al norte de la cuenca. Se aprecia que este cuerpo posee forma triangular, también se observa que la profundidad de la cuenca disminuye en la cercanía de la ciudad de Carora alcanzando un espesor cercano a los 60 metros y aumenta hacia la población del Empedrado.

La variación de los espesores es de 0 a 1200 metros., encontrándose los máximos valores al noreste la depresión de Diquiva, al norte de la cuenca y en la parte central de la cuenca. Los espesores de sedimentos aumentan considerablemente desde el sureste hasta el centro de la terraza y cercanías del Venado.

Se piensa que toda esta estructura es dominada tectónicamente por la falla de Burbusay y la serranía de Baragua, que al parecer es la responsable de controlar la forma de la cuenca generando un frente inverso activo ubicado al norte de la cuenca (comunicación personal Audemard *et al.*, 2007).

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

Una vez cumplidas con todas las etapas de adquisición, procesamiento y análisis de resultados de los valores de anomalías de Bouguer (AB) de la cuenca de Sabana de Carora se presentan las siguientes conclusiones:

- Mediante la etapa de la adquisición, procesamiento y análisis de resultado se obtuvieron los mapas de Anomalía de Bouguer, componentes residuales y regionales para un total de 1014 estaciones ordinarias con un espaciamiento entre 1 a 2 km en el área de la cuenca de Sabana de Carora y de 500 metros en el área urbana de la ciudad de Carora con la utilización de un total de 16 estaciones bases
- Se utilizó un valor de densidad de Bouguer de $2,4 \text{ g/cm}^3$ y un nivel de referencia de 600, metros valor de cota máximo ubicado en la cuenca de sabana de Carora.
- Con los valores obtenidos de Anomalías de Bouguer se realizó un análisis estadístico y geoestadístico donde se determinó para el primero, que el promedio aritmético es de 19,391mGal (media), 20,342mGal (mediana) y-31,718 mGal (moda), donde la similitud entre la media y la mediana indican que los datos tienden a poseer una distribución normal, los gráficos Q-Q y Detrended Q-Q de anomalías de Bouguer señalan también que los datos poseen esta distribución. Adicionalmente la varianza de estos valores esta en 144,379 mGal y desviación estándar en 12,015 mGal, donde esta última es espacialmente dependiente de la geología y extensión de área. Para el análisis geoestadístico se determinó que el modelo teórico que mejor se ajusta a la distribución de los valores de AB es el modelo Gausseano, la cual se puede interpretar que la variación de las anomalías de Bouguer con respecto a la distancia (considerando todas las direcciones), es muy lento, es decir, que a grandes distancia hay pocos cambios en los valores de AB. La distancia máxima es de 5 km para un valor de varianza de 130 mGal., de

los puntos desviados de modelo, puede ser atribuidos a los efectos de bordes presentes en área.

- En el mapa de anomalías de Bouguer (AB) se observan dos orientaciones preferenciales para la isolíneas y dos dominios caracterizados por valores altos y bajos de AB. Los valores altos de AB se ubican la ciudad de Carora, Mesa de Areque, Areque y Barbacoas cercanos a 40 mGal con un gradiente suave de 1,75 mGal/km los valores bajos se ubican en la cercanías Quebrada Arriba, El Burro, Planos de Guayabo, el Venado y El Empedrado, con un gradiente de 1,25 km/mGal disminuyendo en sentido NE-SO.
- Los valores de AB correlacionan con los contrastes de densidades presentes en la zona más que con los altos y bajos topográfico. En él se aprecia claramente la presencia de dos rangos enmarcados por valores altos y bajos de anomalías de Bouguer, consecuencia a la presencia de grandes cuerpos, estructuras y cambios de densidad presentes en la litología de la zona de estudio, los altos valores corresponden a material rocoso más denso como las rocas cretácicas de la Formación Peñas Altas y remanente de la formaciones Misoa, La Quinta y rocas Paleozoicas-Precámbricas ubicadas al sureste de la cuenca de Sabanas de Carora, en las inmediaciones de la ciudad, Arenales y Areque en la parte central del mapa, mientras que los valores bajos son atribuidos a rocas de tipo sedimentario presentes en la depresión de Diquiva en la cercanías de Quebrada Arriba, El Venado y Planos de Guayabo. Esta depresión esta controlada por la falla de Burbusay descrita como una falla submeridiana de componente horizontal sinistral y fuertemente transpresiva, la cual se extiende en dirección norte-sur. Esta estructura de tipo flor positiva controlaría la forma y geometría de esta cuenca, generando una cuenca de tipo “Pull Apart” debido a un salto hacia la izquierda de la traza de la falla, responsable localmente de la transtensión entre dos segmentos de la falla de Burbusay separados unos 10 km, controlando la depresión del río Diquiva (Audemard *et al.*, 2007).
- Los mapas de las distintas componentes de AB tanto residual como regional de

orden 3, describen claramente la presencia de estos dos dominios y direcciones preferenciales de las distintas estructuras presentes en el área de estudio como son la depresión de Diquiva y el frente de corrimiento inverso ubicado al norte de la cuenca de Sabana de Carora en la cercanía de Mesa de Areque. Se presume que dichas estructura se solapa sobre los sedimentos del Cuaternario, generando un posible basculamiento por gravedad y estimado que allí se encuentra la parte mas profunda de la cuenca, es decir, el mayor espesor de sedimentos (Urbani, 2007 comunicación personal).

- Con el análisis espectral se determinaron profundidades de cuerpo generadores de anomalías presente en la zona, la mayor profundidad de 10 km fue atribuida a la discontinuidad de Försch, las profundidades intermedias y someras fueron atribuidas a fuentes generadoras ubicadas en le basamento ígneo metamórfico (según mapa de profundidades de Foster D.Smith), donde se estima que el basamento ígneo metamórfico puede ubicarse a una profundidad mayor de 5000 metros en la cercanías de de depresión de Diquiva y de 2000 metros cerca de la ciudad de Carora.
- A partir del modelado gravimétrico tridimensional se determinó un espesor máximo de los sedimentos 1200 metros en la depresión de Diquiva, al noroeste de la cuenca de Sabana de Carora y los mínimos al sureste en la cercanía de la ciudad de Carora, Areque. Con espesores cercanos a los 60 metros, correlacionado bien con las estimaciones de Paolini,2006)
- Para fines del modelado se consideraron principalmente tres unidades geológicas, un cuerpo de densidad $2,31 \text{ g/cm}^3$ correspondiente a la serie (Taut) autóctona, (Taloc) la alóctono de densidad $2,45 \text{ g/cm}^3$ y los aluviones Q de densidad $1,90 \text{ g/cm}^3$. También se considero un nivel de referencia de 600 metros y una densidad de refee4ncia de $2,4 \text{ g/cm}^3$ la cual corresponde con la litología presente en el área.
- Diversas estructuras controlan forma y geometría de la cuenca de Sabana de

Carora. La falla de Burbusay cuya estructura corresponde a ser una falla de tipo normal positiva la cual es la responsable de generar una cuenca de tipo “Pull Apart” en la terminación de la serranía de Baragua al norte de la cuenca, ubicándose allí el mayor espesor de sedimento de la cuenca. La otra estructura que controla la cuenca es la serranía de Baragua, puesto que en el flanco sur de ella, se ubica un posible frente e corrimiento inverso, la cual es responsable de que la serranía se solape sobre los sedimentos, haciendo como un basculamiento y ocasionando allí un gran depósito de sedimentos

RECOMENDACIONES

En base a los resultados y conclusiones de este estudio se recomienda lo siguiente:

- Integrar los resultados obtenidos en este estudio con otros métodos geofísicos y geológicas, para así logra disminuir el porcentaje de incertidumbre en relación a los espesores de sedimentos ubicados en la cuenca de Sabana de Carora.
- Promover la ejecución de perforaciones que permitan establecer una correlación entre los resultados de dichos pozos y lo inferido por los métodos geofísicos y geológicos.
- Se sugiere realizar mediciones de ruido sísmico ambiental en toda la cuenca, ya que estas contribuirían de manera significativa a la estimación de espesores a través de los periodos fundamentales,
- Promover el proyecto de microzonificación sísmica a las distintas poblaciones ubicadas en la cuenca, área cercanas y en las principales ciudades del país, para adoptar la aplicación de la (Norma COVENIN 1756-98, Rev. 2001 de Edificaciones Sismorresistentes) y establecer direcciones de desarrollo de dichas ciudades.
- Adicionalmente promover, inculcar y sugerir la cultura sísmica a los diferentes niveles, esto sería una valiosa herramienta a la hora de una eventualidad sísmica.

- Se recomienda precisar muy bien el nivel de referencia y la densidad, son parametros bien importantes a la hora de obtener los valores de anomalías de Bouguer, adicionalmente la aplicación de geoestadística.
- Se recomienda lo entes públicos y privados la implementación de la norma (Norma COVENIN 1756-98, Rev. 2001 de Edificaciones Sismorresistentes), en aquellas áreas donde el espesor de sedimento sea significativo, para disminuir la amenaza del efecto de sitio.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **Acosta , J 1995** Tormenta sísmica en Carache, Trab esp de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo no publicado, Universidad de Loa Andes.
- **Audemard, F. (1998)** AUDEMARD, F. A. (Coord.). 1998. Estudio de Neotectónica y Geología de Fallas Activas del Triángulo de Fallas de Boconó, Oca-Ancón y Valera (Proyecto *INTEVEP 97-018*) FUNVISIS. Informe inédito para INTEVEP. 138 p + anexos.
- **American Society of Civil Engineers (1998)**. Geophysical exploration for engineering and enviromental investigations. Estados Unidos: ASCE Press.
- **Abeki, N., Enomoto, T., Guevara, T. Y Villegas, Z. (1995)**. Fundamental concept for seismicmicrozonation and preliminary surveys of microtremor observatiois in Caracas Cumana city, Venezuela. ii coloquio internacional sobre “microzonificación sísmica” reunión de cooperación iberoamericana. Cumana, Venezuela, 12 al 16 de junio.
- **Bezada, M. (2005)** Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramérica, región occidental de Venezuela (estados Falcón y Lara). Trab esp de grado para optar al título de Ingeniero Geofísico no publicado, Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- **Bushman, 1965**. BUSHMAN, J. R. 1965. Geología del Área de Barquisimeto, Venezuela. *Bol. Geol.* 6(11): 3-113.
- **Cantos, F. (1974)**. Tratado de Geofísica Aplicada. España: Litoprint
- **COVENIN (2001)**. Norma 1756-1:2001. Edificaciones sismo-resistentes. Fondonorma, Caracas.
- **Duval, A., Mendoza, J., Méneroud, J., Prida, F., DeSantis, F., Singer, A. y Vidal, S. (1995)**. Experimental Microzonation in Venezuela. Fifth International Conference on Seismic Zonation (Vol. III). Nice, Francia. Octubre 17 al 19 de 1995. EERI. pp. 2227-2234.
- **FUDECO (2004)** (fundación para el desarrollo de la región centro occidental de

venezuela) Dossier municipio Torres estado Lara.

- **Evanoff, J. y otros (1959).** Bloque de rocas antiguas incrustados en sedimentos del Terciario inferior en la cuenca de Lara bol. geol., Caracas vol 5 n° 10 p 67-80.
- **García Jarpa, R., et al (1977).** Guía de la Excursión # 6: Cordillera de Los Andes y Surco de Barquisimeto. V Congreso Geológico Venezolano.
- **Guédez, R (2003)** Estudio cortical en el área centro-norte y noroccidental de Venezuela a partir de datos de sísmica de refracción Trab esp de grado para optar al título de Ingeniero Geofísico no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas
- **González de Juana C., Iturralde J. y Picard X, 1980,** Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. ediciones foninves. caracas, Venezuela.
- **Götze, H S. Schmidt y T. Damm.** curso intensivo sobre "Procesamiento y Modelado de Campos Potenciales FUNVISIS, Febrero – Marzo , 2001.
- **Graterol. V. (1978)** Gravimetría en Venezuela. Caracas: Ministerio de Energía y Minas Volumen XIII número 24.
- **Dobrin, M. (1961).** *Introducción a la prospección geofísica.* Nueva York: McGraw Hill
- **Hecht, J. (2004).** Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental y gravimétricos del Municipio Zamora (Guatire) Estado Miranda. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geofísico no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- **IGVSB, (2005)** Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar Ministerio del Ambiente Curso integral de GPS Instructor Ing. José Napoleón. 2005.
- **INGEOMINAS y Universidad de los Andes (1997).** Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Bogotá, Colombia. 130 p.
- **Mironov, V. (1977).** *Curso de prospección gravimétrica.* Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- **Moncada, J. (2005).** *Modelado gravimétrico del basamento del Municipio Libertador, distrito metropolitano de Caracas.* Trabajo especial de grado para optar al

título de Ingeniero Geofísico no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- **Parasnis, D. (1972).** *Principles of applied geophysics.* (6^a ed). Londres: Chapman and Hall LTD.
- **Paolini, M. (2006)** Análisis de los períodos fundamentales del suelo en la ciudad de Carora, municipio torres, estado lara. trab esp de grado para optar al título de ingeniero geofísico no publicado, universidad Simón Bolívar, caracas.
- **PDVSA, 2006** Congreso Bolivariano de Geología, Manifiesto de Falcón, Cartegena 2006 (Presentación).
- **Quijada, M. (2006).** Inversión gravimétrica 3D en el noroccidente de Venezuela y zonas costa afuera. Trab esp de grado para optar al título de Ingeniero Geofísico no publicado, Universidad Simón Bolívar , Caracas
- **Reid A B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I.W., 1990** Magnetic interpretation en three dimensions using Euler Deconvolution vol 55 , pp 80-91
- **Renz, O. (1955)** Submarine sliding in western Venezuela. aapg, bull vol 39, n° 10, p 2053 -2067.
- **Renz, o. (1959)** Estratigrafía del Cretaceo en Venezuela occidental m.m.h, bol geol., vol v, n° 10 p 3-48.
- **Rocabado, V. (2000).** Períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Caracas a partir de mediciones de ruido ambiental. Tesis (Ingeniero Geofísico). Caracas, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. 82 p.
- **Rod, E. (1959)** Formación Capacho en Trujillo septentrional y en Lara suroccidental. bol geol., Caracas vol 5 n° 10 p 49-66.
- **Rod, e. (1960)** Cross section Montevideo to Humocaro- Bajo, Barbacoas área, Lara avgnp.bol inf. vol. 3 n°6 p 163-164.
- **Rodríguez J. y Sousa J. C., 2003,** Estudio geológico-estructural y geofísico de la sección cabo San Román-Barquisimeto, estados Falcón y Lara. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.

- **Reinoza, C 2006**, Modelado Geofísico del basamento del área metropolitana de la ciudad de Mérida estado Mérida. trabajo especial de Grado. Universidad de Los Andes -Mérida. Venezuela.
- **Stephan, j. f. (1977)** El contacto cadena Caribe – andes merideños entre Carora y El Tocuyo (Edo. Lara): observaciones sobre el estilo y la edad de las deformaciones Cenozoicas en el occidente venezolano. v congreso geológico venezolano. Caracas, Venezuela.
- **Stephan, J. (1982)** Evolución géodynamique du Caraibe; Andes et chaine Caraibe sur la Transversale de Barquisimeto (Venezuela). Thèse d’Etat, Paris, 512 p.
- **Telford, W. y Geldart, L. (1990).** *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- **Thompson, D T., (1982)** EULSPH A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data, vol 47,pp 31-37
- **De Marco, R (2004)** Caracterización Geofísica de la Terraza Aluvial de Barquisimeto Estado Lara, integración de Ruido sísmico ambiental, Refracción y gravimetría
- **Sánchez, J. (2001).** Modelaje Gravimétrico del Basamento de la Cuenca de Los Palos Grandes. Trab. Esp de G, Dep de Geof. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 94 p.
- **Lázaro R. (2001)** Prospección Gravimétrica en zonas urbanas: aplicación al estudio del subsuelo de la ciudad de Barcelona .Trab de de doctorado en Ciencias Geológicas Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica de la Universidad de Barcelona 1997.

Apéndice A

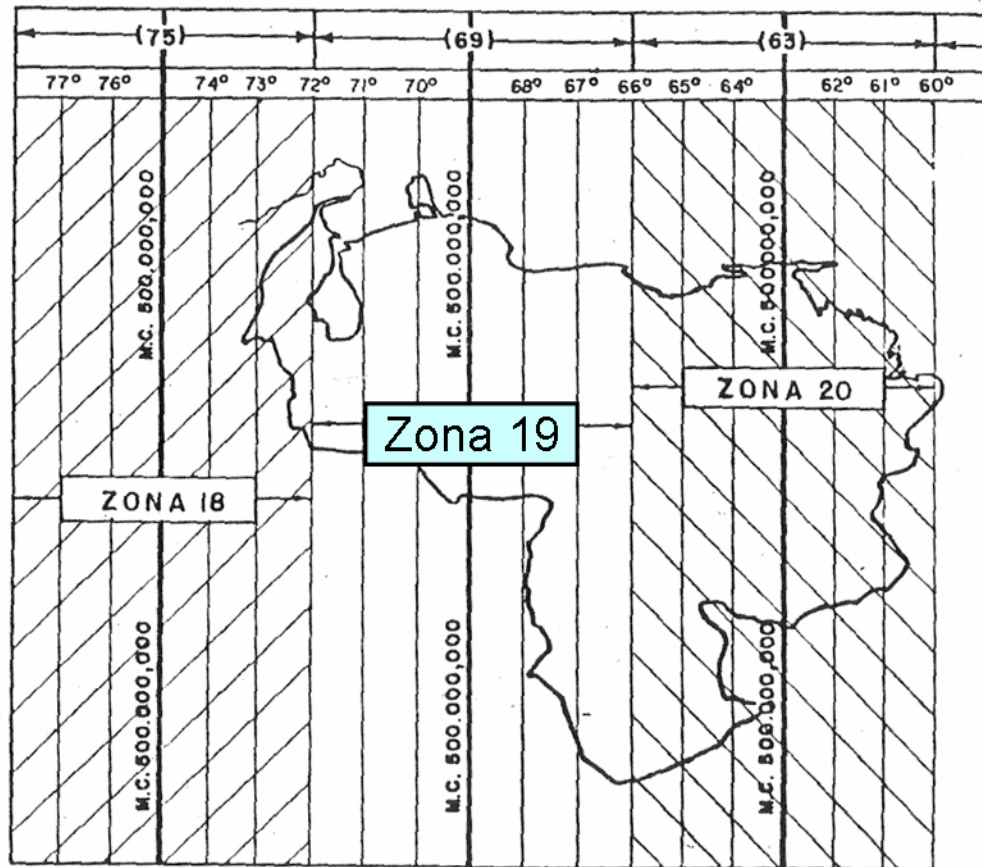


Figura 1 Husos horarios Correspondientes a Venezuela (Tomado de IGVSb 2005).

A.1 Proyección Universal Transversal de Mercator

Características

- Se considera a la tierra como un elipsoide de rotación
- El elipsoide es tangente interiormente a un cilindro, cuyo eje está situado en el plano del Ecuador
- Divide a la tierra en 60 husos iguales de 6° de amplitud
- Se recomienda para la representación de casi todas las partes de Globo terrestre, hasta $\pm 80^\circ$ de latitud.

- El origen de coordenadas es la intersección del Meridiano Central del huso con el Ecuador.
- Por definición c, cada zona UTM tiene como bordes o tiene como límites dos meridianos separados 6°.
- La línea central de una zona UTM siempre se hace coincidir con un meridiano del sistema geodésico tradicional, al que se llama MERRIDIANO CENTRAL. Este meridiano central define el origen de la zona UTM.
- Cuando se considera la orientación norte-sur, una línea de una zona UTM coincide con los meridianos de las coordenadas angulares solo en el meridiano central.

A.1.1 Central Geodésico Nacional:

1.- PSAD 56 (La Canoa).

2.- REGVEN (Vigente).

El primero control geodésico nacional establecido fue PSAD 56- La Canoa establecido en el estado Anzoátegui en el año 1949, estuvo vigente hasta el año 1999. Estuvo establecido por métodos geodésico convencionales, se encuentra vigente para otros países suramericanos

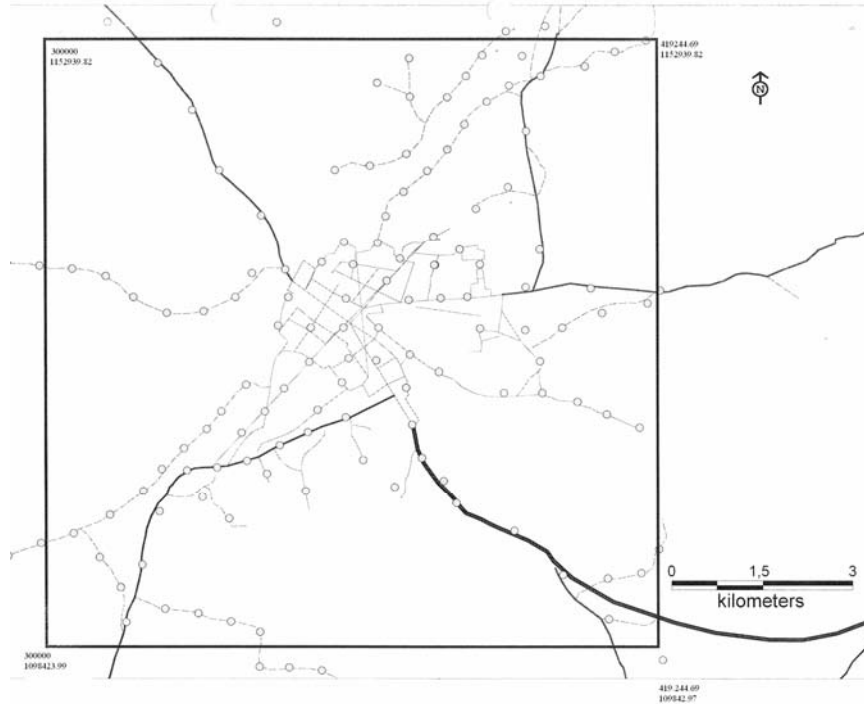
El segundo REGVEN (Red Geodesica Nacional Venezolana) se encuentra vigente desde el año 1999 establecido por métodos modernos.(IGVS 2005).



Mapa de Venezuela correspondiente a la Red Geocentrica Venezolana (Regven).

Apéndice B

B.1 Red o malla diseñada con las posible estaciones gravimétricas a medir.



- Posibles estaciones gravimétricas a medir

Figura B.1 Mapas de ubicación de las posibles estaciones gravimétricas ordinarias en el área de estudio.

B.2 Ubicación de estaciones bases ubicada dentro del área de estudio.

- Estación Base **Quibor**

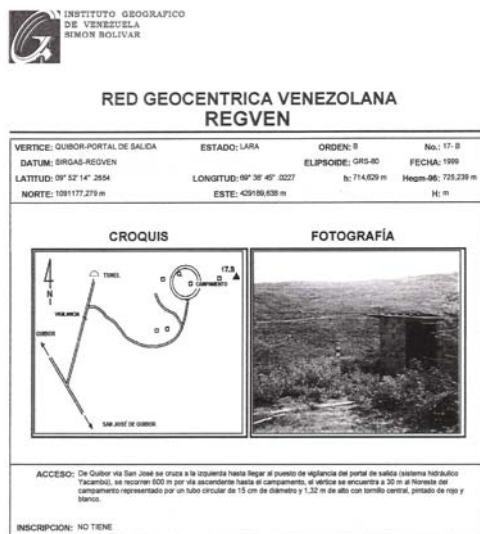


Figura B.2 Croquis de ubicación de la estación base Quibor.

- Estación Base Quebrada Arriba.

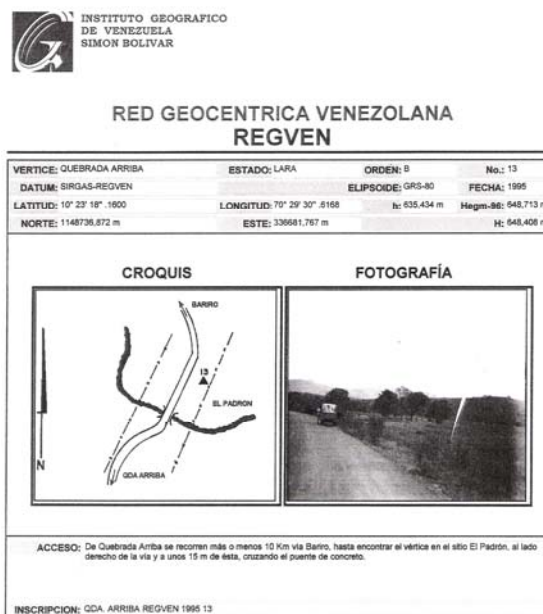


Figura B.3 Croquis de ubicación de la estación base Quebrada Arriba.

- Estación Base **Bobare**.

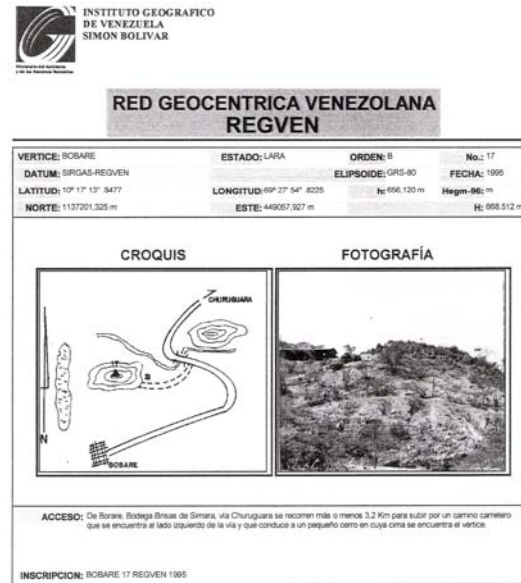


Figura B.4 Croquis de ubicación de la estación base Bobare.

- Estación Base **Carora**

048471**CARORA**10.18167-70.06667938.71 978071.070 100

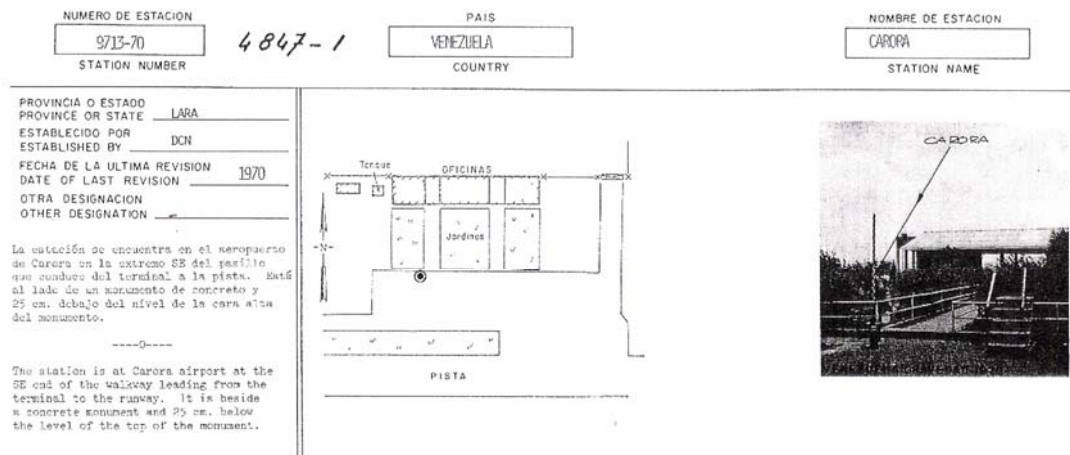


Figura B.5 Croquis de ubicación de la estación base Carora.

- Estación Base **Coro**.

001202CORO11.41667-69.6766716.25978220720

NUMERO DE ESTACION 9701-70 STATION NUMBER	0120-2	PAIS VENEZUELA COUNTRY	NOMBRE DE ESTACION CORO STATION NAME
--	---------------	-------------------------------------	---

PROVINCIA O ESTADO PROVINCE OR STATE <u>FALCON</u> ESTABLECIDO POR ESTABLISHED BY <u>DCN</u> FECHA DE LA ULTIMA REVISION DATE OF LAST REVISION <u>1970</u> OTRA DESIGNACION OTHER DESIGNATION _____		
--	--	--

La estación está en un jardín ubicada al costado E del aeropuerto y a 4.75 m. al NE del centro de la entrada a las oficinas de la Jefatura del mismo. Está al lado de un monumento de concreto de forma rectangular que sobresale 50 cm. del nivel del terreno. La estación está a 10 cm. debajo del nivel de la placa en el monumento.

-----E-----

The station is at Coro airport at a flower bed on the E side of the terminal and 4.75 m. NE from the center of the entrance to the Airport Authority offices. It is beside a rectangular concrete monument which protrudes 50 cm. above ground. The station is 10 cm. below the level of the plaque on the monument.

VENEZUELA GRAVEDAD 1970

Figura 6 Croquis de ubicación de la estación base Coro.

B.3 Principio de funcionamiento del gravímetro AUTOGRAV de Scintrex.

El principio de funcionamiento del gravímetro Autograv Scintrex CG-3 (figura 33) está basado en un sistema elástico de cuarzo fundido. La fuerza gravitatoria en la masa de prueba es equilibrada por un resorte y una fuerza restauradora electrostática relativamente pequeña. La posición de la masa es alterada por un cambio en la gravedad monitoreándose en un transductor capacitivo de desplazamiento. Un circuito de regeneración automático aplica un voltaje de DC a las placas del condensador produciendo una fuerza electrostática en la masa, que lo devuelve a una posición nula. Se convierte el voltaje de regeneración en una medida del valor relativo de gravedad en el sitio de lectura, la señal digital es transmitida al sistema de adquisición de datos del instrumento por procesar para ser visualizado y almacenado.

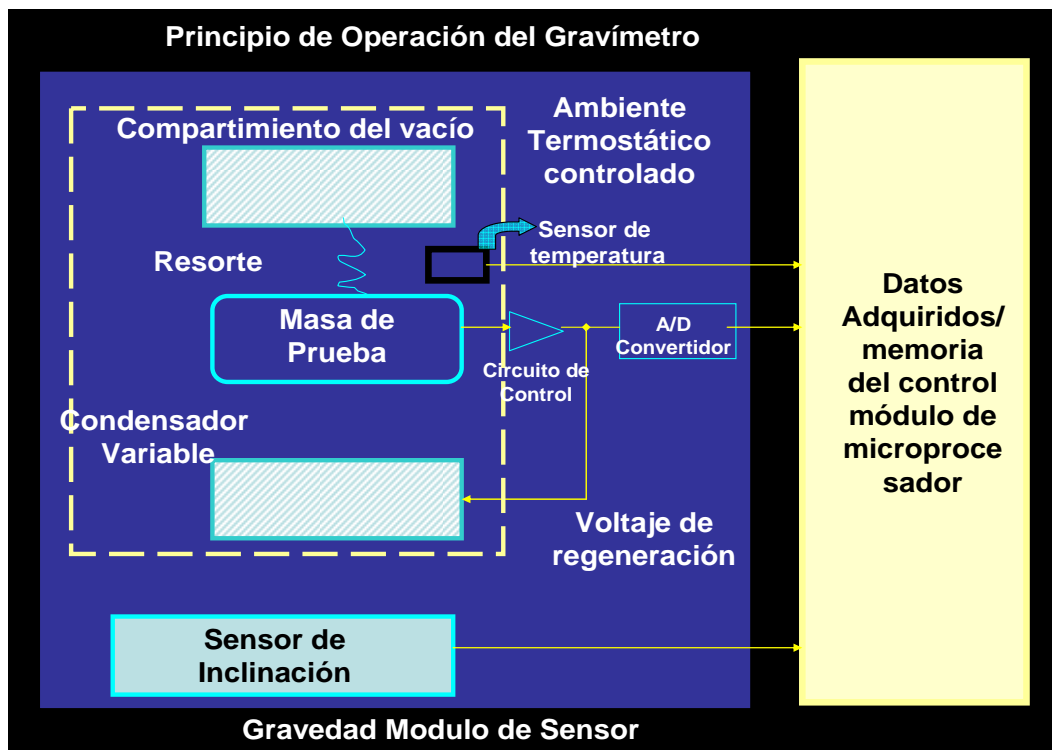


Figura. 33 Principio de funcionamiento del gravímetro Autograv Scintrex CG-3
(Tomado de: Autograv CG-3/3M Manual.)

B.3.1 Calibración del gravímetro AUTOGRAV Scintrex CG-3.

La calibración del equipo (figura 34) fue hecha al inicio de la adquisición de los datos; su principal objetivo fue verificar y ajustar el instrumento para el buen funcionamiento del mismo. Hay algunos parámetros del instrumento que periódicamente deben ser verificados y ajustados siendo éstos:

- La compensación de temperatura (Temperature compensation).
- La corrección de Inclinación (Tilt correction).
- La corrección de la deriva (Drift correction).



Figura. 34 Calibración del gravímetro Autograv Scintrex CG-3

Al utilizar el gravímetro por primera vez, o después de que se ha apagado durante 48 horas, deben realizarse los pasos siguientes y los períodos de espera:

- Conectar el cable de alimentación de la fuente al gravímetro, el cual permitirá empezar a poner estable el equipo y cargar la batería.
- El período de precalentamiento comienza después de haberse conectado el cable de alimentación al equipo y requiere un tiempo de 4 horas para alcanzar la temperatura de operación.
- Para el período de estabilización, el instrumento requiere un tiempo de 48

horas después de que se conecta el cable de alimentación de la batería. Se puede inicializar el software restableciendo el tiempo y fecha, además de borrar la memoria y preparar los parámetros.

- Se verifica y ajusta la compensación de temperatura después de que el instrumento se estabilice.
- Se verifica y ajusta la corrección de deriva después de que la compensación de temperatura se ha verificado (o ajustado si es necesario). Este procedimiento involucra el funcionamiento del gravímetro durante aproximadamente 24 horas en el modo de cíclico (Cycling).

B.3.2 Compensación de temperatura (“temperature compensation“)

La compensación de temperatura debe verificarse y ajustarse (sí se requiere) antes de la corrección de la deriva. La razón de la deriva de la cámara de temperatura es el envejecimiento lento del termistor. Los termistores son usados por el sensor de estabilización térmica para el monitoreo y la compensación de la temperatura de la cámara. Se debe verificar la compensación de temperatura si el instrumento no ha sido utilizado por más de dos horas y también periódicamente durante los funcionamientos en el campo.

El rango de temperatura debe estar comprendido entre de $-1.0 \text{ mK} < \text{TEMP} < +1.0 \text{ mK}$. Es aconsejable reajustar la lectura y compensarla antes de finalizar el rango a ser alcanzado.

Se realizó un levantamiento de monitoreo de temperatura donde los valores conseguidos se encuentran fuera del rango recomendado. Por lo cual se realizó el ajuste del equipo: Se niveló el gravímetro y se removió la tapa protectora, se ajusto el potenciómetro fino colocando el valor de temperatura en cero (figura.4.6). Se esperó que se estabilizara el gravímetro y se procedió a normalizar la tapa protectora.

```

-----
SCINTREX v5.2          AUTOGRAV / Field Mode          R5.35
Line: 0.  Grid: 1.  Job: 1.  Date: 05/09/18  Ser No: 322752.
Operator: C.Martinez
GREF.: 0. mGals          Tilt x sensit.: 250.
GCAL.1: 6272.193        Tilt y sensit.: 250.7
GCAL.2: 0.              Deg.Latitude: 10.
TEMPCO.: -0.1352 mgal/mk  Deg.Longitude: -70.
Drift const.: 0.5166     GMT Difference: -4.hr
Drift Correction Start Time: 08:18:02  Cal.after x samples: 999
Date: 05/09/19          On-Line Tilt Corrected = "*"
-----
Station Grav. SD. Tilt x Tilt y Temp. E.T.C. Dur # Rej Time
9004.E 4496.070* 0.013 -1. -2. -0.51 60 0 09:33:34
3.1E 4512.990* 0.030 -1. -2. -0.50 60 0 10:38:31
3.2E 4512.365* 0.019 3. -1. -0.51 60 0 10:52:55
3.3E 4510.630* 0.044 4. 4. -0.49 60 0 11:02:55
3.4E 4509.160* 0.039 -4. 2. -0.48 60 1 11:09:50
3.5E 4507.130* 0.024 -1. -0. -0.48 60 0 11:19:11
3.6E 4504.780* 0.036 -8. 1. -0.48 60 0 11:40:59
3.7E 4502.725* 0.014 -3. 1. -0.47 60 0 11:49:18
3.8E 4502.765* 0.020 -3. 0. -0.45 60 0 12:02:27
9004.E 4496.080* 0.034 17. -3. -0.42 60 3 12:16:51
9004.E 4496.020* 0.013 1. -5. -0.33 60 0 13:48:06
3.7.1E 4502.710* 0.056 -2. 5. -0.30 60 1 14:02:00
3.8.1E 4502.790* 0.029 -1. 2. -0.21 60 0 14:10:11
3.9E 4504.070* 0.019 -0. 0. -0.22 60 0 14:18:07
3.10E 4506.115* 0.019 5. 2. -0.27 60 0 14:30:32
3.11E 4502.705* 0.020 -0. -3. -0.28 60 0 14:37:08
3.12E 4499.760* 0.021 2. -1. -0.29 60 0 14:43:39
3.13E 4498.660* 0.028 -5. 2. -0.26 60 0 14:51:49
3.14E 4499.765* 0.046 1. 1. -0.26 60 0 15:01:58
-----

```

Figura 4.6 (26) Compensación de Temperatura del gravímetro Autograv Scintrex CG-3, ajustada

B.3.3 Corrección de inclinación (“tilt correction”)

La condición de ajuste de inclinación perfecta es la coincidencia de cero inclinación (tilts) del instrumento, definida por la lectura digital y las burbujas niveladas referidas a la horizontal, mostradas por el máximo sensor de salida. Al lograr estas condiciones, se debe ajustar el sensor de inclinación en la posición cero además de la sensibilidad del sensor de inclinación. El sensor de inclinación es un ajuste del hardware mientras la sensibilidad de sensor de inclinación se ajusta vía el teclado.

Los sensores de inclinación se ajustan durante la fabricación del instrumento (Scintrex S.A), además son muy estables bajo condiciones de operación normal. Sólo necesitan ser verificados cada dos meses aproximadamente. El ajuste de los sensores de inclinación a cero se realizó de la siguiente manera:

Los errores ceros Xe y Ye son medidos y ajustados en un eje de tiempo arrancando con el eje X.

B.3.4 Midiendo el error X_e

1. Sé inicializa el sistema con los siguientes parámetros.

Tabla 4.2 Parámetros para el cálculo del error X_e

Parámetro	Estado
Modo	Campo
Tiempo de lectura	120
Corrección del tilt	Activado
Corrección de marea	Activado
Auto rechazo	Activado
Stop: err. < lim	Desactivado

2. Colocar el gravímetro en el trípode en un lugar donde el suelo esté sólido (concreto preferiblemente). Un suelo de madera o alfombra no es conveniente.
3. Presionar la tecla Start y los valores de INCLINACIÓN (Tilts) aparecerán en la pantalla.
4. Ajustar el trípode hasta $X = 150 \pm 10$ y $Y = 0 \pm 5$.
5. Esperar por 5 minutos y anotar el valor exacto (X_1) como lo muestra la pantalla.
6. Tomar una lectura y grabar lo leído como R1.
7. Se cambia el ajuste girando el tornillo delantero del trípode en sentido contrario a las agujas del reloj hasta $X = -150 \pm 10$ y si es necesario ajustar los tornillos traseros hasta que $Y = 0 \pm 5$.
8. Esperar por 5 minutos y anotar el valor exacto (X_2) como lo muestra la pantalla.
9. Tomar nuevamente la lectura y se graba lo leído como R2.
10. Se calcula el error usando la ecuación 4.1:

$$X_e = \frac{R_2 - R_1}{X_1 - X_2} \times 43386$$

(Ec 4.1)

donde X_1 , X_2 y X_e están en unidades de arco segundo y R_1 , R_2 están en miligales.

Si $X_e \neq 0$, debe hacerse un ajuste fino en el gravímetro para que las lecturas no niveladas se compensen correctamente. Para realizar el ajuste debe seguirse las siguientes instrucciones: Dejar el instrumento en $X = X_2$, $Y = 0$.

1. Remover la cara principal del equipo.
2. Presionar la tecla Start para poner el instrumento en el modo AJUSTE.
3. Chequear los valores de INCLINACIONES (Tilts) y si es necesario colocar $Y = 0 \pm 2$ y $X = X_2 = -150 \pm 10$. No se debe ajustar X_2 al valor anterior.
4. Ajustar el sensor de inclinación X con el potenciómetro de ajuste hasta que se observe que el valor de inclinación X en la pantalla cristal líquido sea $X_2' = X_2 + X_e$. La sensibilidad del potenciómetro es aproximadamente 2.5 arcsec/vuelta. La lectura del contador se incrementa en el sentido de las agujas del reloj.
5. Se debe repetir la medida de X_e y hacer otro ajuste si es necesario.

Para el error Y_e se realiza el mismo procedimiento que se hizo para X_e , dejando a $X = 0 \pm 2$ hasta que el valor de Y_e se anule. La sensibilidad del sensor de inclinación no fue necesario ajustarla.

Tabla 4.3 Corrección del sensor de inclinación X (Tilt X) Autograv Scintrex CG3

Intento	R1	X1	R2	X2	Xe	XP2
1	4552.69	156	4552.635	-150	-8	-158
2	4552.65	154	4552.625	-151	-4	-155
3	4552.64	153	4552.625	-157	-2	-159
4	4552.6	150	4552.645	-158	6	-152
5	4552.6	149	4552.645	-156	6	-150
6	4552.595	152	4552.625	-151	4	-147
7	4552.615	154	4552.61	-154	-1	-155
8	4552.605	154	4552.62	-157	2	-155
9	4552.59	150	4552.625	-150	5	-145
10*	4552.605	154	4552.605	-152	0	-152

Valor ajustado del sensor de Inclinación X

Tabla 4.4 Corrección del sensor de inclinación Y (Tilt Y) Autograv Scintrex CG-3.

Intento	R1	Y1	R2	Y2	Ye	YP2
1	4552.57	-154	4552.6	154	-4	150
2	4552.59	-153	4552.585	152	1	153
3*	4552.59	-152	4552.59	152	0	152

* Valor ajustado del sensor de Inclinación Y.

B.5 Ventajas principales en el uso del posicionador:

- El GPS proporciona resultados en un sistema de coordenadas mundiales unificado.
- El GPS es más rápido que los métodos convencionales.
- Aumento considerable en la precisión y calidad de los datos adquiridos.
- La precisión del GPS sufre poca degradación por causa de los agentes atmosféricos (lluvia, nieve, temperaturas altas o bajas o humedad).
- Los resultados del GPS son digitales y se transfieren fácilmente a los sistemas GIS o de cartografía.
- Reducción hasta de un 50% del tiempo (hora hombre) en comparación con levantamientos tradicionales.
- Posibilidad de actualización de bases de datos de manera rápida y confiable.

Esta herramienta, también es útil en otras actividades como la ubicación de pozos, menes, puntos de tiros en transectas sísmicas y en otras actividades

El equipo se calibró para realizar levantamientos geológicos de superficie con el uso permitiendo la reducción de tiempo en el orden de un 50% en la adquisición de datos, con la ventaja adicional de permitir el modelaje topográfico y geológico 2D/3D de los datos

Cuadro esquemática

(*) Los datos de densidad en g/cm^3 están basados en las siguientes fuentes:

Areniscas y conglomerados brechoides 2,3 (Mironov, 1977).

Areniscas 2,35, Lutitas 2,40 (Telford,1990)

Gravas 2,24 (Prinz,1991)

Calizas 2,46-2,84 (<http://www.computerhuesca.es/~fvalles/tabldensi.htm>
consultado el 30.08.06)

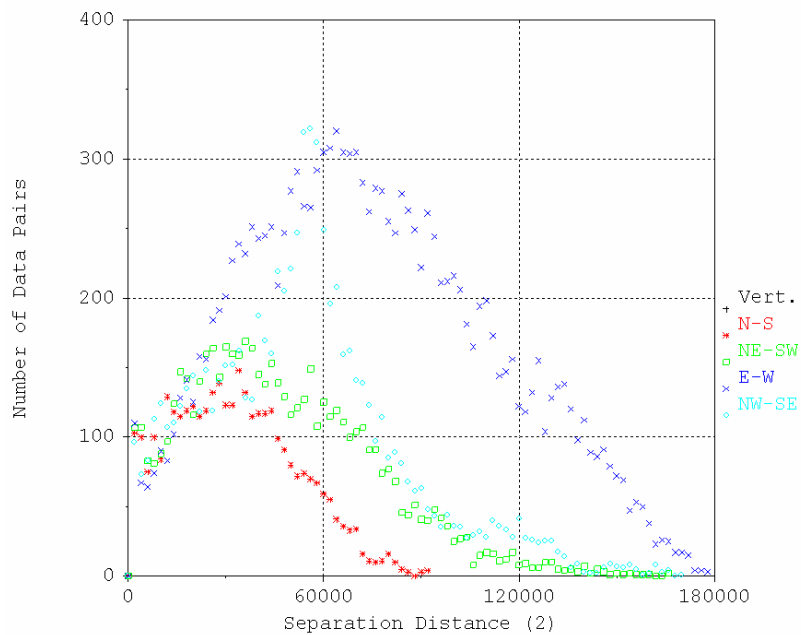
Formación La Quinta 2,35 (Reinoza, 2006)

Rocas ultramáficas sin alterar 2,8 (Tzvetkov, A. Nikova,L.,(2003)

(**) En paréntesis se muestra la densidad promedio de las rocas que conforman la
unidad geológica.

Información recopilada por: Ing. Carlos E. Reinoza Gómez.

Apendice E



All Variograms (Number)

Varograma Omnidireccional para los valores de AB.

E.1 Filtraje

Todos los filtros de convolución lineal calculan la media ponderada de de nodos vecinos de entrada de la cuadrícula **the neighboring input grid nodes**. La única diferencia entre los diferentes tipos de filtros de convolución lineal es el tamaño y la forma del vecindario y el peso específico usado. Considere el cálculo del grid de salida en una fila r y una columna c, usando un filtro de convolución lineal con un vecindario de altura S y ancho T:

$$\text{Numerador} = \sum_{i=-\lfloor \frac{S}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{S}{2} \rfloor} \sum_{j=-\lfloor \frac{T}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{T}{2} \rfloor} \begin{cases} 0 & \text{Si } Z(r+i, c+j) \text{ es cero} \\ W(i, j)Z(r+i, c+j) & \text{otra manera} \end{cases}$$

$$\text{Denominador} = \sum_{i=-\lfloor \frac{S}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{S}{2} \rfloor} \sum_{j=-\lfloor \frac{T}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{T}{2} \rfloor} \begin{cases} 0 & \text{Si } Z(r+i, c+j) \text{ es cero} \\ W(i, j) & \text{otra manera} \end{cases}$$

Donde $W(i,j)$ son los pesos definidos por el filtro específico. El valor del nodo del grid de salida es entonces:

E.1 DEFINICIÓN DEL FILTRO A USAR

Hay Dos tipos de filtros: Filtro pasa-bajo y el filtro general definido por el usuario. Con estos filtros se puede especificar el alto y ancho del vecindario.

E.1.1 FILTRO PASA-BAJO:

Este tipo de filtros remueve el ruido de altas frecuencias dando como resultado una cuadrícula mas suavizada. Hay cuatro tipos de estos filtros. En cada uno es

posible especificar el tamaño del vecindario. Tanto el alto como el ancho del vecindario filtrado deben ser positivos. Sea el alto S y el ancho T,

- En el filtro “*Moving Average*” (mxn) los pesos son todos iguales a uno.

$$W(i, j) \quad \forall_i = -\left[\frac{S}{2}\right], \dots, \left[\frac{S}{2}\right] \quad \forall_j = -\left[\frac{T}{2}\right], \dots, \left[\frac{T}{2}\right]$$

Con el filtro “*Distance Weighting* (mxn)” los pesos caen al incrementar la distancia. La distancia en la función de peso es:

$$W(i, j) = \left(1 - \max\left(\frac{2|i|}{S+1}, \frac{2|j|}{T+1}\right) \right)^p \quad \forall_i = -\left[\frac{S}{2}\right], \dots, \left[\frac{S}{2}\right] \quad \forall_j = -\left[\frac{T}{2}\right], \dots, \left[\frac{T}{2}\right]$$

Donde p es la potencia. La potencia más alta es el que cae más rápidamente con la distancia. El resultado son líneas de contorno en rectángulos concéntricos.

- Con el filtro “*Inverse Distance* (mxn)” los pesos caen al incrementar la distancia.

Con un vecindario de alto S y ancho T, la función es:

$$W(i, j) = \begin{cases} W_c & \text{Si} & i=0 \text{ y } j=0 \\ \left(\frac{1}{i_2 + j}\right)^{p/2} & \text{otra manera} & \forall_i = -\left[\frac{S}{2}\right], \dots, \left[\frac{S}{2}\right] \quad \forall_j = -\left[\frac{T}{2}\right], \dots, \left[\frac{T}{2}\right] \end{cases}$$

Donde W es la específica “*Central Weight*” y p es la potencia La potencia más alta es el que cae más rápidamente con la distancia. El resultado son líneas de contorno en círculos concéntricos.

- Con el filtro “*Gaussian Low-pass* (mxn)” los pesos caen al incrementar la distancia Con un vecindario de alto S y ancho T, la función es:

$$W(i, j) = \exp\left(-\alpha\left(\left(\frac{i}{S}\right)^2 + \left(\frac{j}{T}\right)^2\right)\right) \quad \forall_i = -\left[\frac{S}{2}\right], \dots, \left[\frac{S}{2}\right] \quad \forall_j = -\left[\frac{T}{2}\right], \dots, \left[\frac{T}{2}\right]$$

Donde α es el valor α Alpha (positivo). El parámetro controla cuan rápido los pesos caen con la distancia. El resultado son líneas de contorno en elipses concéntricas

General User-defined Filter

Este filtro permite especificar el alto y el ancho del vecindario y hacer cualquier combinación de pesos. La caja en la parte inferior derecha del dialogo muestra el tamaño del vecindario, basado en el número de filas y columnas. Presione sobre una celda en la caja para cambiar el peso de los nodos.

La matriz de la cuadrícula puede ser seleccionada y copiada usando ctrl.+C. Esto permite definir una matriz usada como base y luego puede ser modificada.

Filtros predefinidos:

Son una larga colección de filtros 3X3 definidos en las referencias.

- Filtros pasa-bajo: también conocidos como filtros de suavizado. Estos filtros remueven las altas frecuencias.
- Filtro pasa-alto: Tienden a remover las variaciones de fondo y enfatizarse en los detalles locales.
- *Order 1 Derivative Filters*: usados para conseguir bordes horizontales y verticales.
- *Order 2 Derivative Filters*: son otro conjunto de filtros de aumento de orillas.
- *Shift and Difference Filters*: son dos operadores diferenciales lineales horizontals y verticals.

- *Gradient Directional Filters*: calcula y retorna la derivada direccional.
- *Embossing Filters*: Identifica los bordes y los alinea en cada una de las 8 direcciones de la brújula.