

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN LA REGION DE LOS LLANOS CENTRO OCCIDENTALES

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Dianeidy P., Gil M.
Para optar por el título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, noviembre del 2014.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN LA REGION DE LOS LLANOS CENTRO OCCIDENTALES

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Nuris Orihuela.

TUTOR INDUSTRIAL: Prof. Michael Schmitz.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Dianeidy P., Gil M.
Para optar por el título de
Ingeniero Geofísico

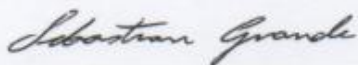
Caracas, noviembre del 2014

Caracas, noviembre de 2014.

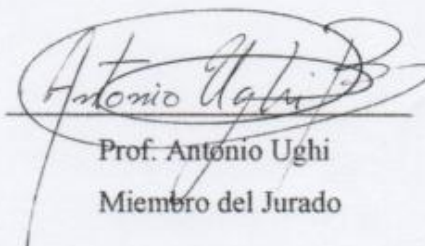
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la bachiller Dianeidy de la Paz Gil Marquez, titulado:

**“ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN LA
REGIÓN DE LOS LLANOS CENTRO OCCIDENTALES”**

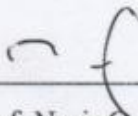
Considerando que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Sebastián Grande
Miembro del Jurado



Prof. Antonio Ughi
Miembro del Jurado



Prof. Nuris Orihuela
Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso mi guía principal, a quien dedico este proyecto. Para ti la gloria.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela quien me brindó la oportunidad de desarrollarme académicamente.

A todos mis profesores quienes me formaron a lo largo de este camino, y haciéndole un apartado especial a la profesora Nuris Orihuela, a quien le debo la realización de este trabajo académico, para ella toda mi gratitud y admiración.

A todo el personal de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas por permitirme colaborar en dos oportunidades con su extraordinaria labor, muy especialmente agradezco al Dr. Michael Schmitz, al Ph. D Javier Sánchez y al Ing. José Cruces, gratifico enormemente su comprensión y paciencia, mis respetos siempre.

A mis compañeros y amigos de estudio, a los que le debo muy buenos momentos e increíbles anécdotas, a sus familiares quienes también pasaron a ser parte de la mía.

A mis dos tesoros, mis Padres Rafael A. Gil y Paula B. Márquez De Gil, a quienes les debo todo lo bueno, todo el éxito y todas las maravillas que he consignado a lo largo de mi vida, a mis hermanos Rafael E. Gil, M., y Daniel E. Gil, M., y con mucho amor y cariño a Diana del C. Gil, M eres mi ejemplo en todo momento, segunda madre, amiga y hermana.

Por último, y no menos importante, a mi compañero sentimental y de vida Oscar J. Utrera, L., Gracias por tu paciencia, ayuda y comprensión, sin ti, no hubiera sido posible, para ti mis respetos y admiración; a una personita que llego muy recientemente a mi vida, pero han transformado mi mundo en muchos colores, Oscar Manuel Utrera Gil, te amo en grande hijo.

Me disculpo por los malos tiempos, me gustaría brindarles en todo momento lo mejor de mí. A todos Gracias, que la vida nos permita reencontrarnos para fomentar agradables momentos.

Dianeidy P. Gil M.

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN LA REGION DE LOS LLANOS CENTRO OCCIDENTALES

**Tutor Académico: Prof. Nuris Orihuela. Tutor Industrial: Prof. Michael Schmitz.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Año 2014.**

Resumen: Este trabajo tiene por objeto la adquisición y procesamiento de estaciones gravimétricas en los Llanos Centro Occidentales, específicamente en los estados Cojedes, Portuguesa, Guárico, Apure y Barinas. La ventana de trabajo se ubica entre los paralelos 70° y 66° W, y los meridianos 6° y 10° N. A partir de los mapas de anomalías generados y el análisis espectral de la zona, se plantea una caracterización geológica del área de estudio. Este estudio abarca dos etapas, la primera corresponde a la adquisición de los datos, donde se levantaron 474 estaciones gravimétricas. La segunda etapa corresponde al procesamiento de los datos, la cual contempla las correcciones gravimétricas, para proceder al cálculo de la anomalía de Bouguer. El mapa de anomalía de Bouguer resultante, muestra una variabilidad geológica en el área de estudio, con un amplio espectro de magnitudes gravimétricas que varía entre -63,50 mGal a 16,9 mGal. Sus gradientes regionales, permiten identificar la existencia de tres dominios. Un primer dominio, con magnitudes positivas ubicadas hacia la parte centro-este del mapa, asociado a cuerpos geológicos de alto contraste de densidades, donde la exposición en superficie de uno de estos cuerpos evidencia la presencia de altos de basamento (alto de El Baúl). Un segundo dominio con magnitudes negativas (-63,5 a -40,9 mGal) ubicado hacia la parte noroeste, caracterizado por la presencia de espesas secuencias sedimentarias, que evidencian la existencia de un volumen rocoso de contraste de densidades negativo, asociado al Piedemonte Andino. Un tercer dominio, con magnitudes intermedias entre -37,2 a -0,3 mGal, asociado a la cuenca Barinas-Apure. El análisis espectral del mapa de anomalía de Bouguer, permitió identificar la existencia de cuatro discontinuidades, dos profundas relacionadas a las discontinuidades de Mohorovicic y de Conrad, con profundidades promedio de 30,13 km y 14,74 km, respectivamente. Dos someras: una, relacionadas a una discontinuidad intra-Paleozoica con profundidades que varían desde 5,37 a 2,16 km; y la segunda referida al tope Pre-Cretácico, con profundidades que oscilan entre 3,23 km hasta 0,93 km, delimitando la geometría del depocentro para la Cuenca Barinas-Apure.

Palabras Claves: Adquisición, Anomalía de Bouguer, Procesamiento, Gravimetría.

ÍNDICE

CAPITULO I	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. El Problema de la investigación.....	2
1.2. Objetivos.	2
1.2.1. Objetivo general.	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Ubicación del Área de Estudio.....	3
CAPITULO II.....	5
2. GEOLOGÍA REGIONAL	6
2.1. Geología de los Llanos Centro Occidentales de Venezuela.....	6
2.2. Estructuras Geológicas presentes en los Llanos Centro-Occidentales.	11
2.2.1. Cuenca Barinas-Apure.....	11
2.2.2. Estratigrafía de la cuenca Barinas-Apure.	13
2.2.3. Alto de El Baúl.	14
2.2.4. Basamento.	16
CAPITULO III	21
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1. Métodos Gravimétricos.....	22
3.2. Fundamentos.	22
3.3. Ley de Gravitación Universal.	23
3.4. Correcciones Gravimétricas.....	24
3.4.1. Variaciones de la gravedad en la superficie terrestre con respecto al tiempo.....	24
3.4.2. Variación de la gravedad en la superficie terrestre con respecto a la Altura.....	25
3.4.3. Gravedad Teórica	27
3.4.4. Corrección atmosférica.....	28

3.5.	Anomalías Gravimétricas.....	28
3.5.1.	Anomalía de Aire Libre.....	28
3.5.2.	Anomalía de Bouguer.....	29
3.6.	Separación Regional-Residual	29
3.7.	Análisis espectral	30
3.8.	Análisis estadístico.....	30
3.8.1.	Estadística.....	31
3.8.2.	Estadística descriptiva	31
3.8.3.	Media aritmética o media	31
3.8.4.	Mediana	31
3.8.5.	Medida de asimetría.....	32
3.8.6.	Varianza.....	32
3.8.7.	Desviación estándar.....	33
3.8.8.	Diagrama de caja	33
3.8.9.	Histograma de frecuencia	33
CAPITULO IV		34
4.	ADQUISICIÓN GRAVIMÉTRICA	35
4.1.	Uso del Equipo.....	35
4.2.	Parámetros de adquisición.....	36
4.3.	Adquisición del dato gravimétrico.	37
4.4.	localización de las estaciones gravimétricas.	42
4.5.	Sistema vertical.	45
CAPITULO V.....		46
5.	PROCESAMIENTO.....	47
5.1.	Control de calidad de los datos adquiridos.	47
5.1.1.	Deriva Diurna.	47
5.1.2.	Corrección por Mareas.	48
5.1.3.	Deriva Mensual.....	50
5.1.4.	Calibración Vertical.....	52
5.1.5.	Calibración horizontal entre estaciones bases.	54
5.1.6.	Control de calidad de las mediciones GNSS.	56
5.2.	Procesamiento de datos.	57

5.3. Deriva Instrumental.....	60
5.4. Gravedad Corregida.	60
5.5. Gravedad absoluta.....	60
5.6. Anomalía de Bouguer.	62
5.6.1. Cálculo de la corrección aire libre (H_c).....	62
5.6.2. Cálculo de la corrección topográfica.	63
5.6.3. Cálculo de la corrección Bouguer (C_B).	63
5.6.4. Cálculo de la gravedad teórica (G_{teo}).	64
5.6.5. Cálculo de la corrección atmosférica (A_c).	64
5.6.6. Cálculo de la anomalía de Bouguer (A_b).	64
5.7. Anomalía de aire libre.....	65
5.7.1. Cálculo de la anomalía de aire libre (A_{al}).....	65
5.8. Aplicación de Filtros.	67
5.9. Análisis Estadístico.	68
5.10. Procesamiento de las Mediciones <i>GNSS</i>	70
CAPITULO VI	72
RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	72
6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	73
6.1. análisis estadístico.....	73
6.2. mapas de alturas.	77
6.3. mapa de gravedad observada.	79
6.4. mapas de correcciones gravimétricas.....	79
6.5. mapa de anomalías de aire libre.....	85
6.6. mapas de anomalías de Bouguer	86
6.7. Análisis Espectral.....	91
6.8. aplicación de filtros.	102
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
8. BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Mapa de ubicación de los Llanos Centro Occidentales de Venezuela.....	4
Figura 2. 1. Distribución de las rocas jurásicas de Venezuela,	7
Figura 2. 2. Distribución de facies sedimentarias dominantes durante el Neocomiense-Albiense.	7
Figura 2. 3. Distribución de facies sedimentarias dominantes durante el Cenomaniense-Campanéense (Cretácico Tardío).	8
Figura 2. 4. Distribución de facies sedimentarias durante el Mastrichtiense (Cretácico Tardío)	9
Figura 2. 5. Frente de deformación Caribeña en Venezuela Occidental.	10
Figura 2. 6. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela (Cuenca de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental) durante el Mioceno-Plioceno.....	10
Figura 2. 7. Cuencas petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus provincias sedimentarias.....	11
Figura 2. 8. Sección Estructural NO-SE de la Cuenca Barinas-Apure (Modificado de Parnaud, et al, 1995).	13
Figura 2. 9. Cuadro de Correlación para la Cuenca Barinas-Apure (Kiser, 1989). Tomado Léxico Estratigráfico de Venezuela.	14
Figura 2. 10. El macizo de El Baúl localizado al norte del Escudo de Guayana, entre las cuencas sedimentarias Apure-Barinas y la Oriental de Venezuela..	15
Figura 2. 11. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Suramérica	18
Figura 4. 1. Gravímetro Scintrex Autograv CG-5.	36
Figura 4. 2. Mapas de la zona de estudio, indicando las rutas propuestas para la adquisición de datos gravimétricos.....	37
Figura 4. 3. Filigrana de las bases gravimétricas correspondientes a la zona 1 del proyecto GIAME.	38
Figura 4. 4. Mapas de la zona de estudio indicando las adquisiciones gravimétricas de las campañas 1, 2 y 3.	42
Figura 4. 5. Equipos geodésicos empleados y sus características.	43
Figura 4. 6. Relación entre altura elipsoidal y altura ortométrica. (Tomado de: http://kartoweb.itc.nl/geometrics/Bitmaps/relationships.gif)	45
Figura 5. 1. Curva de gravedad relativa Vs el tiempo de medición, para el cálculo de la deriva diurna.	48
Figura 5. 2. Marea con GMT -4 Vs Tiempo de medición.	49
Figura 5. 3. Marea calculada por el gravímetro CG-5, serial: 081240482 Vs el tiempo de medición.	50
Figura 5. 4. Curvas de gravedad dada por el equipo (Rojo), marea calculada por el equipo(Azul) y la curva de marea dada por el servidor(Amarillo).....	50
Figura 5. 5. Deriva mensual del gravímetro Scintrex serial: 40482. (A) correspondiente a mediciones respecto a la base de Calabozo. (B) Correspondiente a la base de papelón. ..	52
Figura 5. 6. Gráfica de Calibración vertical donde se muestra la tendencia del gravímetro 40482. (González & Sánchez 2012)	53
Figura 5. 7. Gráfica de diferencia de lecturas obtenidas en relación a la ecuación de Moritz 1980. (González & Sánchez 2012)	54
Figura 5. 8. Gráfica de los resultados obtenidos con diferentes gravímetros. (González & Sánchez 2012)	55
Figura 5. 9. Secuencia de procesamiento de los datos.....	58
Figura 5. 10. Diagrama de programas empleados y su utilidad.	59

Figura 5. 11. Importar los datos al programa oasis.	66
Figura 5. 12. Proyeccion de los datos.....	66
Figura 5. 13. Elaboracion de los mapas.....	67
Figura 6. 1. Histograma de frecuencia.....	74
Figura 6. 2. Probabilidad normal Q – Q.	75
Figura 6. 3. Probabilidad normal sin tendencia.	76
Figura 6. 4. Diagrama de caja.....	77
Figura 6. 5. Altura elipsoidal (A) y altura Ortométrica (B). Los puntos grises representan los puntos de medición.	80
Figura 6. 6. Mapa de gravedad observada. Los puntos grises representan los puntos de medición.	81
Figura 6. 7. Mapa de la corrección topográfica. Los puntos grises representan los puntos de medición.....	82
Figura 6. 8. Mapas de Corrección atmosférica (A), corrección de Bouguer (B) y corrección por altura (C). Los puntos grises representan los puntos de medición.	84
Figura 6. 9. Mapa de Anomalía de aire libre. Los puntos grises representan los puntos de medición.....	85
Figura 6. 10. Distribución de los datos integrados. Puntos verdes adquisiciones gravimétricas integradas y las estrellas rojas ubican la disposición de los pozos petroleros.	88
Figura 6. 11. Mapa de anomalía de Bouguer integrando estaciones gravimétricas en el estado Apure y Guárico. La numeración corresponde a los sectores concéntricos, los puntos grises representan las estaciones medidas, las líneas negras simbolizan la delimitación geográfica de los estados y en líneas color gris el sistemas de fallas de la base FUNVISIS <i>et al.</i> (2000).	90
Figura 6. 12. Mapa integrado que muestra la ubicación relativa del graben de Apure- Mantecal y su relación con el mapa de anomalía de Bouguer. Las estrellas rojas ubican el posicionamiento de los pozos petroleros y los círculos rojos señalan la cercanía del pozo 21 al sector concéntrico [1] y la culminación del graben de Apure-Mantecal cercano al sector concéntrico [5].	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. 13. Espectro de poder promediado radialmente obtenido a partir del cálculo hecho sobre la anomalía de Bouguer de los Llanos Centro Occidentales.	92
Figura 6. 14. Interpretación del espectro de poder de los datos gravimétricos de los Llanos Centro Occidentales.....	93
Figura 6. 15. Separación de los espectros de potencia. Cuadro amarillo área del Piedemonte Andino, cuadro azul área de los Llanos Centro Occidentales y el cuadro rojo área de El Baúl.	94
Figura 6. 16. Espectro de potencia del Piedemonte Andino.....	95
Figura 6. 17. Interpretación del espectro de potencia de Piedemonte Andino.	95
Figura 6. 18. Espectro de potencia de los Llanos Sur Occidentales.	96
Figura 6. 19. Interpretación del espectro de potencia de los Llanos Sur Occidentales.	96
Figura 6. 20. Espectro de potencia de El Baúl.....	97
Figura 6. 21. Interpretación del espectro de potencia de El Baúl.	97
Figura 6. 22. Esquema de distribución de las profundidades.	100
Figura 6. 23. Mapa de anomalías de Bouguer regional calculado a través del filtro paso- banda.....	103
Figura 6. 24. Espectro de potencia del mapa de anomalías de Bouguer regional. Eje horizontal número de onda (k) y el eje vertical logaritmo neperiano (ln (p)).	104

Figura 6. 25. Mapa de anomalías de Bouguer residual calculado a través del filtro paso-banda.....	105
Figura 6. 26. Espectro de potencia del mapa de anomalías de Bouguer residual. Eje horizontal número de onda (k) y el eje vertical logaritmo neperiano (ln (p)).	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1. Bases gravimétricas de zona 1.....	39
Tabla 4. 2. Bases gravimétricas suministradas por PDVSA Biellovenezolana.	40
Tabla 4. 3. Monumentos REGVEN.....	40
Tabla 4. 4. Datos de vinculación del Datum ITRF2008.	43
Tabla 5. 1. Valores presentado por el gravímetro CG-5, Serial: 40482.	47
Tabla 5. 2. Muestra datos de referencia de las bases gravimétricas utilizadas.	55
Tabla 5. 3. Estaciones de observación empleadas para el control de calidad de las mediciones estático rápido.....	56
Tabla 5. 4. Diferencias de coordenadas.....	57
Tabla 5. 5. Datos de la base de Santa Inés.....	59
Tabla 5. 6. Gravedades absolutas obtenidas, con el uso de los 3 gravímetros CG-5.	61
Tabla 5. 7. Gravedades absolutas suministradas por PDVSA.	61
Tabla 5. 8. Cantidad de datos integrados.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. 9. Resumen del procesamiento de los casos.	69
Tabla 5. 10. Resumen de parámetros descriptivos de los datos de anomalía de Bouguer. ..	69
Tabla 6. 1. Total de datos en el proyecto.....	86
Tabla 6. 2. Datos de los pozos suministrados.....	87
Tabla 6. 3. Profundidades calculadas (Km).....	92
Tabla 6. 4. Profundidades de las diferentes zonas de transición de cada una de las estructuras geológicas presentes en el área dada en Km.	99

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

❖ *El problema de la investigación*

❖ *Objetivos*

❖ *Justificación*

❖ *Ubicación del área de estudio*

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

El borde noroeste del continente suramericano constituye una zona de elevada complejidad tectónica como consecuencia de la separación de Pangea y la posterior interacción de la placas de Nazca y Caribe con la Placa Suramericana. Esto ha generado que el noroccidente de Venezuela presente evidencia de estos eventos tectónicos, con la existencia de áreas con mezclas de estilos estructurales extensivos y compresivos SCHLUMBERGER (2014). Los estudios regionales de exploración de hidrocarburos han propuesto numerosos modelos geológicos y de evolución tectónica para la región; todos con necesidad de ser validados con conocimientos geológicos y geofísicos. Es así, como a través de la gravimetría, se busca definir las estructuras geológicas tanto regionales como locales que pudieran estar presentes en el área de los llanos Centro Occidentales de Venezuela.

Así mismo, el continuo avance de la tecnología y los nuevos conocimientos asociados a metodología y parámetros de adquisición, abren la posibilidad de un estudio para la región occidental de Venezuela, esta propuesta se plantea a través del desarrollo del proyecto GIAME donde este trabajo se concentra como un aporte a esta labor, dándole como resultados una caracterización geológica profunda de la región Centro Occidental venezolana, a través de la adquisición de una base de datos gravimétricas con la cual se plantea el cálculo de la anomalía de Bouguer, con el propósito de generar mapas de anomalía tanto regionales como residuales que permitan por sus características espectrales ser asociadas a estructuras geológicas del subsuelo.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. Objetivo general.

Adquisición y procesamiento de estaciones gravimétricas en los estados Apure, Barinas, Cojedes, Guárico y Portuguesa correspondiente a los llanos Centro Occidentales del país.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Adquirir una red de estaciones bases gravimétricas en los puntos de control geodésicos venezolanos priorizando estaciones gravimétricas previamente levantadas.
- Realizar la adquisición de datos correspondiente a la red de estaciones gravimétricas ordinarias sobre la vialidad de los estados Cojedes, Portuguesa, Guárico, Apure y Barinas e integrado con mediciones sobre red geodésica nacional.
- Calcular la anomalía de Bouguer para la región de los llanos Centro Occidentales.
- Caracterizar cualitativamente el comportamiento de las anomalías gravimétricas.
- Desarrollar el análisis espectral de la zona en estudio.
- Elaborar una caracterización geológica profunda de acuerdo a las anomalías gravimétricas presentes en el área.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

El estudio permitirá actualizar y homologar el banco de datos gravimétricos del occidente del país, que servirá como estudio base o de aportes al proyecto de Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME), llevado a cabo por diferentes instituciones del estado.

A partir de estos resultados y la integración con otros estudios geológicos y geofísicos, se pueden generar beneficios de interés para el Estado venezolano, tal como la verificación y actualización de la red gravimétrica nacional y la ampliación del conocimiento en cuanto a las estructuras geológicas presentes en los llanos Centros Occidentales de Venezuela.

1.4. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Este trabajo comprende el estudio de una zona de los llanos Centro Occidentales venezolanos (Figura 1. 1), basado en la adquisición gravimétrica de los estados Cojedes, Portuguesa, parte de Guárico, este de Apure y el este de Barinas, ubicada entre los paralelos 70°y 66°W, y los meridianos 6° y 10° N.

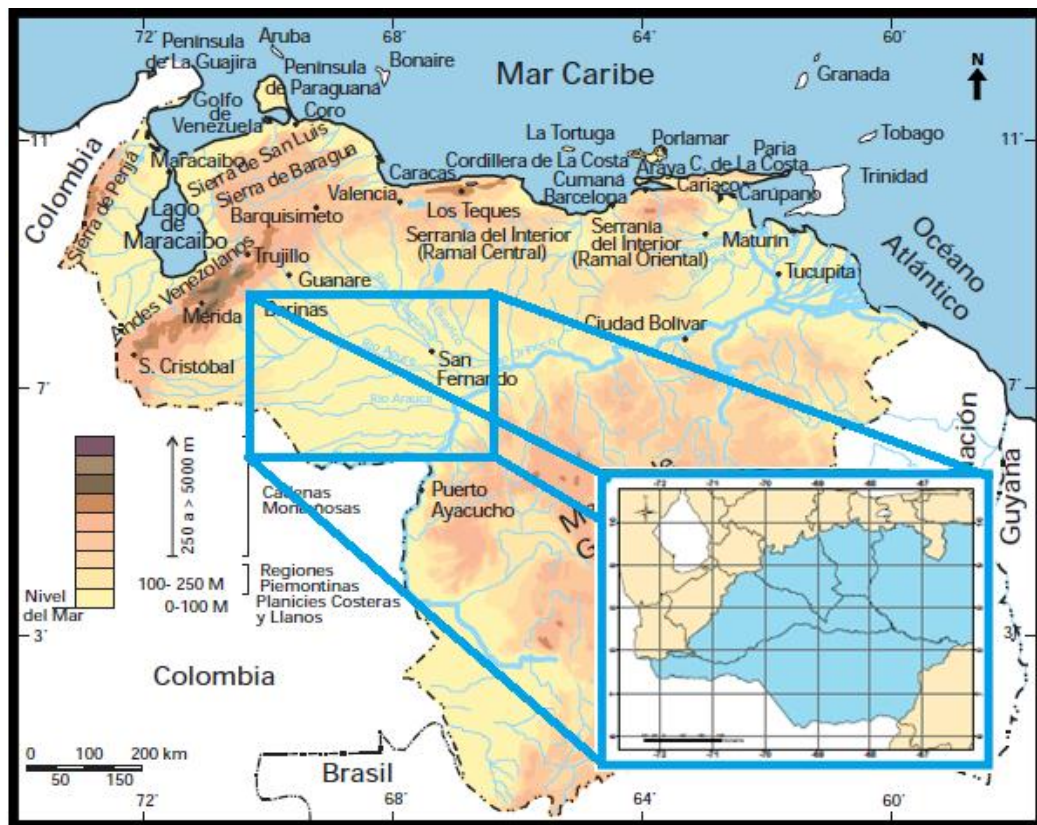


Figura 1.1. Mapa de ubicación de los Llanos Centro Occidentales de Venezuela.

CAPITULO II

GEOLOGÍA REGIONAL

❖ *Geología de los llanos Occidentales de Venezuela*

❖ *Principales estructuras geológicas presentes en
los Llanos Centro Occidentales*

❖ *Basamento*

2. GEOLOGÍA REGIONAL

2.1. GEOLOGÍA DE LOS LLANOS CENTRO OCCIDENTALES DE VENEZUELA.

Los llanos venezolanos es una de las regiones más extensas de Venezuela, ocupando el segundo lugar después de la región de Guayana, con una superficie aproximada de 300.000 km². Es un relleno sedimentario que se extiende desde el estado Delta Amacuro, en su parte oriental y termina en el estado Apure en su parte más occidental, pasando por los estados: Monagas, Anzoátegui, Guárico, Cojedes, Portuguesa y Barinas.

Los llanos Occidentales constituyen una provincia con extensas superficies de suave relieve (50-200 metros sobre el nivel del mar) en el centro del país, ubicada entre los sistemas montañosos de la Cordillera de la Costa y Los Andes al Norte y Noroeste, el río Orinoco al sur y Sureste, que se extiende hasta Colombia en dirección suroeste. Corresponde a una extensa cuenca de relleno de sedimentos que abarca desde el Mesozoico con la deposición de los clásticos basales de la Formación Río Negro, de edad Cretácico Temprano, rellenando los surcos de dirección SW-NE generados durante la fragmentación de Pangea (Figura 2. 1); pasando por la creación de un margen pasivo, que domina el borde occidental de Venezuela desde el Cretácico Medio hasta el Paleoceno, donde una espesa secuencia de sedimentos carbonáticos y clásticos cubre el basamento ígneo del Cratón de Guayana y sectores aislado de los grábenes de edad jurásica. Finalizando con un margen colisional, donde el paso de la Placa Caribeña, así como, el choque de la placa de Nazca contra la placa Suramericana, durante el Mioceno hasta el Reciente, trajo como consecuencia el levantamiento de los Andes, y con ello, la sedimentación de un conjunto de molasas.

Durante el Cretácico Temprano, el occidente de Venezuela estaba constituido por una amplia plataforma continental que se extendió sobre los estados Zulia, Falcón y el golfo de Venezuela, plataforma que permitió la precipitación de los carbonatos del Grupo Cogollo. Hacia el sur, y sobre los estados Táchira, Mérida, Trujillo, Barinas, Cojedes y Apure, un sistema fluvio-deltaico produjo un importante volumen de sedimentos arenosos en la costa, nombrados como la Formación Aguardiente (Figura 2. 2) (González de Juana *et. al.*, 1980).

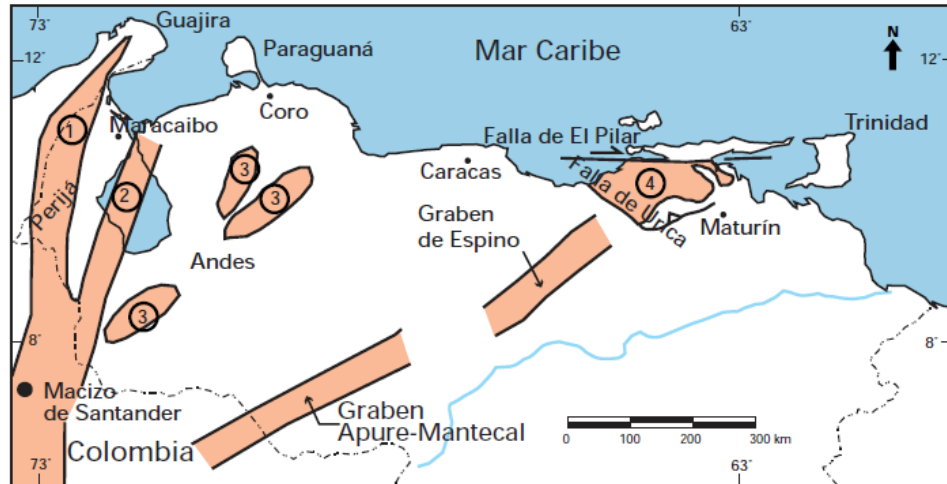


Figura 2. 1. Distribución de las rocas jurásicas de Venezuela, mostrando que las mismas se encuentran aflorando en la Sierra de Perijá (1), como parte del basamento en el subsuelo de la Cuenca de Maracaibo (2), en los Andes (3), en el subsuelo de las cuencas de Barinas-Apure y Oriental (grábenes de Apure-Mantecal y Espino) y han sido interpretadas como involucradas en profundidad en los corrimientos de la Sierra del Interior (4). Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

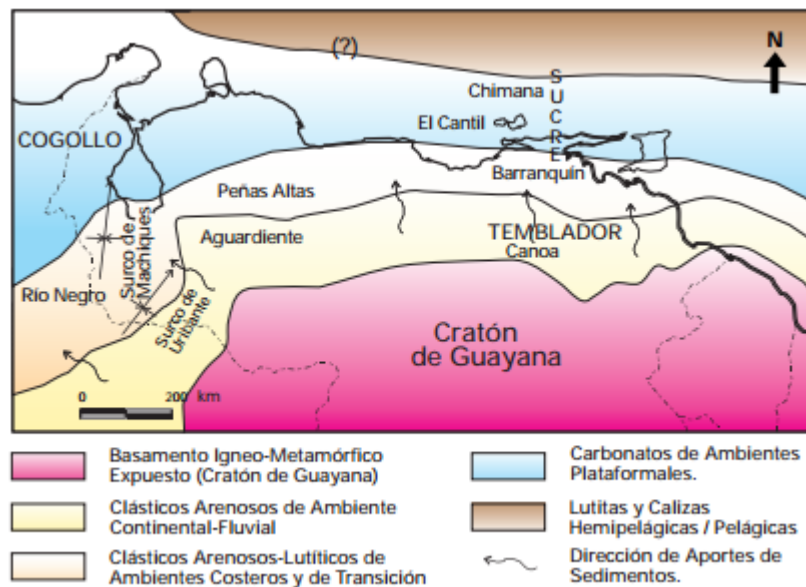


Figura 2. 2. Distribución de facies sedimentarias dominantes durante el Neocomiense-Albiense (Cretácico temprano) al Norte del Cratón de Guayana. Se indican unidades típicas de dicha asociación de facies. Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

Yoris y Ostos en WEC (1997), describen un período de máxima subsidencia de la cuenca que ocurre durante el Cenomaniense; una secuencia de lutitas carbonosas fue depositada en todo el borde occidental del país (formaciones La Luna y Navay). Hacia el continente, sobre los estados Barinas, Apure y Guárico, se observa como los ambientes sedimentarios varían desde transicional hasta continental, con la depositación de la Formación Escandalosa (Figura 2. 3). Un evento regresivo es definido en la región durante el Maastrichtiense, donde depósitos arenosos y limolíticos son sedimentados (formaciones Quevedo y Burgüita) (Figura 2. 4).

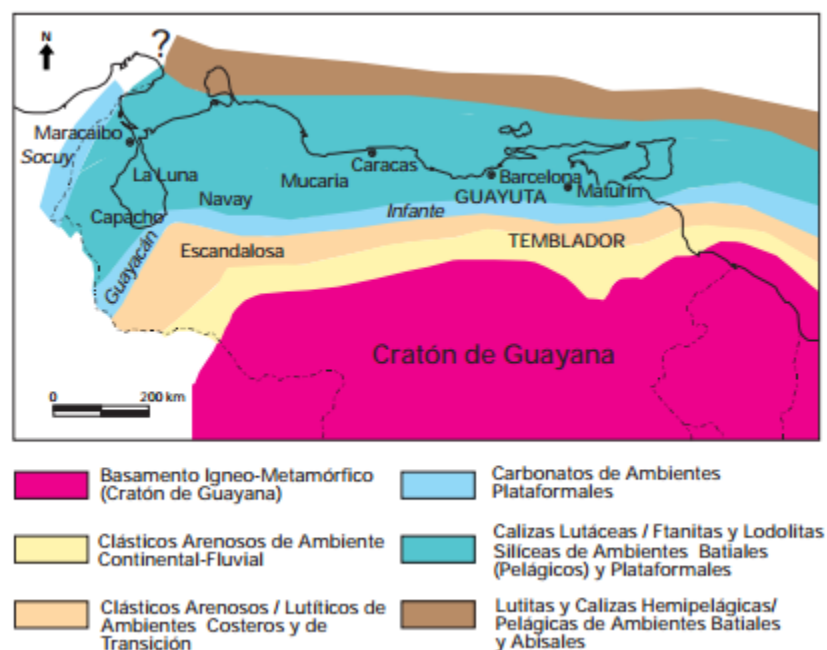


Figura 2. 3. Distribución de facies sedimentarias dominantes durante el Cenomaniense- Campanéense (Cretácico Tardío) al norte del Cratón de Guayana. Se indican las unidades típicas de dichas asociaciones de facies. Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

Para inicios del Cenozoico, el choque de la placa de Nazca e inicio del movimiento de la placa Caribe, hace que este margen pasivo vaya cambiando a un margen colisional transpresivo (Figura 2. 5); la carga tectónica generada por el emplazamiento de material cortical sobre el continente genera una cuenca de antepaís que sirve de depocentro a sedimentos turbidíticos en la región de los llanos (formaciones Trujillo, Morán, Barquisimeto y Guárico) (González de Juana, 1980).

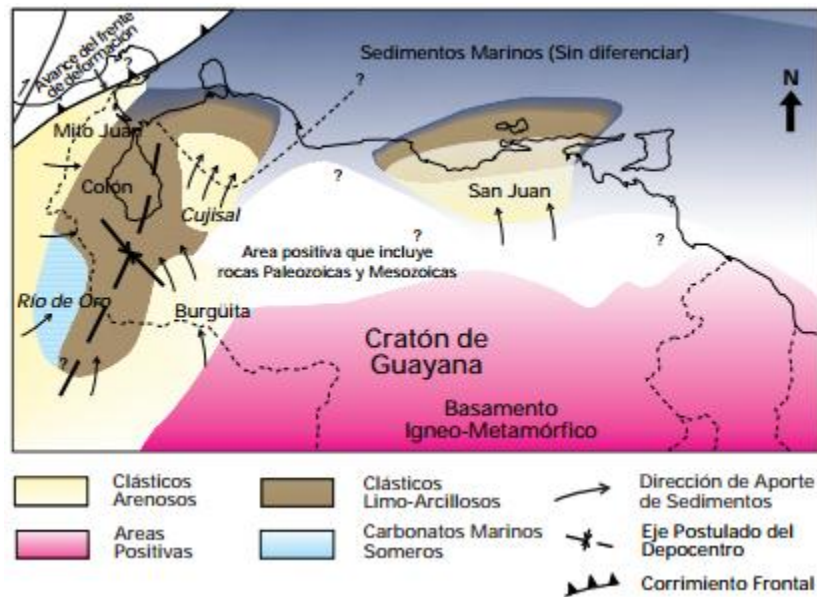


Figura 2. 4. Distribución de facies sedimentarias durante el Mastrichtiense (Cretácico Tardío) al norte del Cratón de Guayana. Se indican unidades típicas de dichas asociaciones de facies. Nótese que el eje del depocentro de Venezuela Occidental se alinea sub paralelamente al frente de deformación al oeste de Venezuela, el cual es una consecuencia de la colisión entre las placas de Nazca y Suramérica.
Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

Durante el Oligoceno, la región de estudio estaba dominada por un sistema deposicional complejo de ambientes de transición y marino-costeros que permitió la sedimentación de las formaciones Gobernador, Masparrito, Humocaró, Quebrada Arriba y Guafita. Para el Mioceno (Figura 2. 6) se inicia el levantamiento de los Andes Venezolanos, rasgo de gran importancia que sirve de separación entre las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure; este levantamiento genera la sedimentación de importantes espesores de molasas en la región de los llanos, las formaciones Parángula y Río Yuca son características de estos ambientes. Por último, y hasta la actualidad, la cuenca está siendo cubierta por sedimentos no consolidados provenientes de las zonas altas (Yoris y Ostos en WEC, 1997).

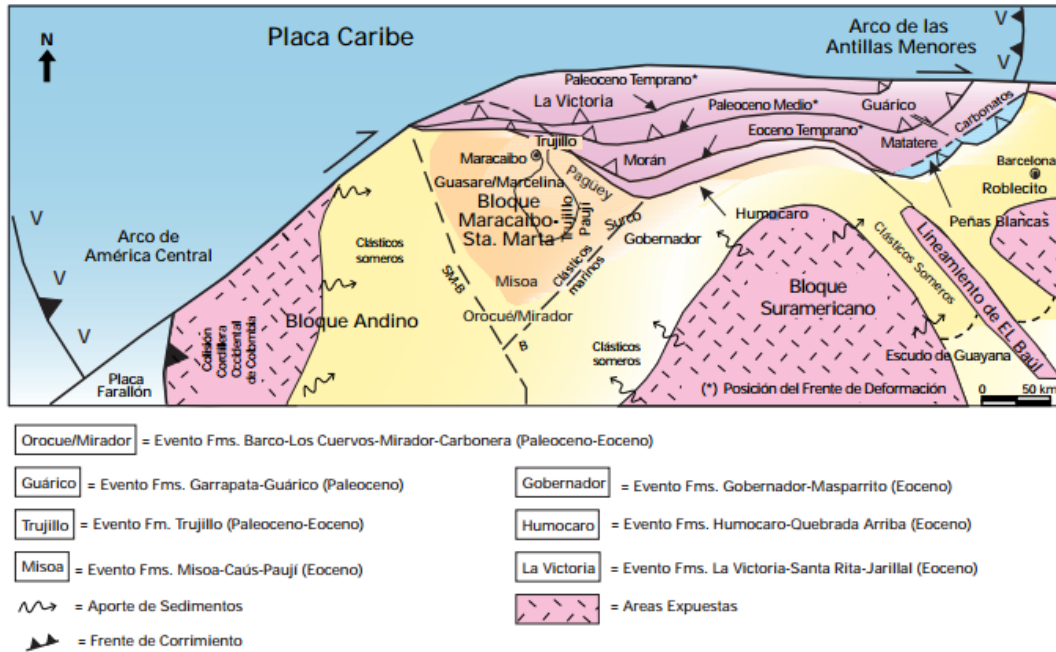


Figura 2. 5. Frente de deformación Caribeña en Venezuela Occidental. Migración del frente de deformación hacia el Sur, donde se la carga tectónica genera una cuenca flexural que permite la depositación de sedimentos turbidíticos y de flysh (Fms. Matatere, Barquisimeto, Guárico). Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

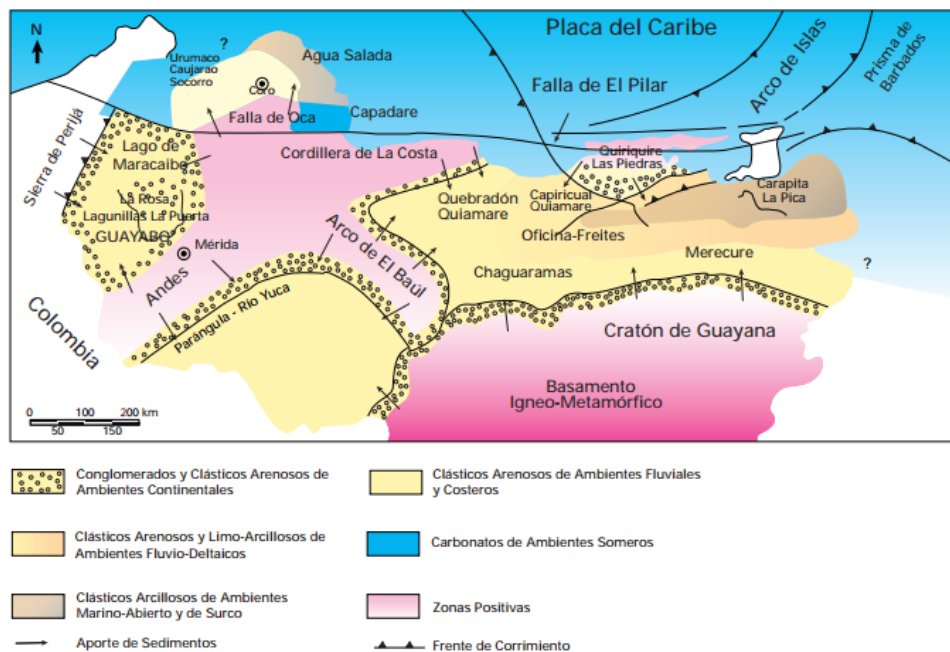


Figura 2. 6. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela (Cuenca de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental) durante el Mioceno-Plioceno. Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

2.2. PRINCIPALES ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES EN LOS LLANOS CENTRO OCCIDENTALES.

2.2.1. Cuenca Barinas-Apure.

En la zona de estudio, se ubica la cuenca petrolífera de Barinas-Apure (Figura 2. 7), situada específicamente al suroeste de la República, limita al noroeste con los Andes venezolanos, al sur-este con el Escudo de Guayana, al este con el Arco del Baúl y al suroeste con los llanos Orientales de Colombia, los cuales constituyen una prolongación de la cuenca. (Ponce, 2011).



Figura 2. 7. Cuencas petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus provincias sedimentarias. Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

La depresión estructural que caracteriza la Cuenca Barinas- Apure se extiende desde la antifosa andina al noreste hasta las planicies situadas entre los ríos Apure y Arauca al sureste, donde se le resta importancia comercial debido al poco espesor de la columna sedimentaria ($\pm 5000'$) cerca de la zona de fallas de Mantecal, al poco espesor de las formaciones cretácicas y la erosión prácticamente total de la sedimentación de edad Eoceno, González de Juana (1980). Esta depresión tiene forma de media luna, una dirección suroeste-noreste y se extiende desde la depresión de Ciudad Bolivia, donde la profundidad del basamento se ha estimado en $15.000'$ (4.572 m), hasta la nariz de Nutrias, donde el basamento se encuentra a $6.500'$ (1.981 m); esta media luna está cortada al noreste

por el sistema de fallas de corrimientos marginales del flanco sur-andino, y más hacia el norte y noreste por los corrimientos frontales del Sistema Montañoso del Caribe.

La geometría de la cuenca se observa en la Figura 2. 8. En su flanco sur, las curvas estructurales a diversos niveles conservan cierto paralelismo ajustado a la forma de la depresión. En la parte central del área, se reconoce un alto basamento identificado como reflejo de Arco de Mérida por varios autores, Feo Codecico (1984). Este alto todavía se observa en el tope del Cretácico y más atenuado, en forma de declive suave hacia el norte-noreste, sobre curvas estructurales en el tope del Eoceno. Este mismo autor indica que su interpretación morfotectónica en fotos aéreas convencionales e imágenes de satélites, se proyecta muy tenue y localmente el alto, a lo largo de su traza sobre la superficie de la cuenca. El flanco sur sufrió deformaciones muy suaves a lo largo de su historia a partir del Cretácico y no muestra mayormente efectos compresivos; sus estructuras son principalmente fallas normales de rumbo este-oeste, norte y noreste, que ocasionan levantamientos menores y bloques ligeramente arqueados entre ellas. Se considera que en este flanco de la cuenca, ocurrieron levantamientos recurrentes durante el Paleoceno-Eoceno inferior, en el Eoceno superior y durante el levantamiento principal de Los Andes (González de Juana, 1980). Ahora bien, el flanco norte de la cuenca, mucho más inclinado, se desarrolla principalmente en el piedemonte suroriental de la cordillera de los Andes de Mérida. En él, se conocen pliegues mejor conformados, como lo son el anticlinal de Barinitas, que muestra sedimentos de edad Eoceno en su cresta y presenta declive hacia el noreste, el anticlinal de Quebrada Seca. Su extremo está cortado por la falla La Soledad (González de Juana, 1980).

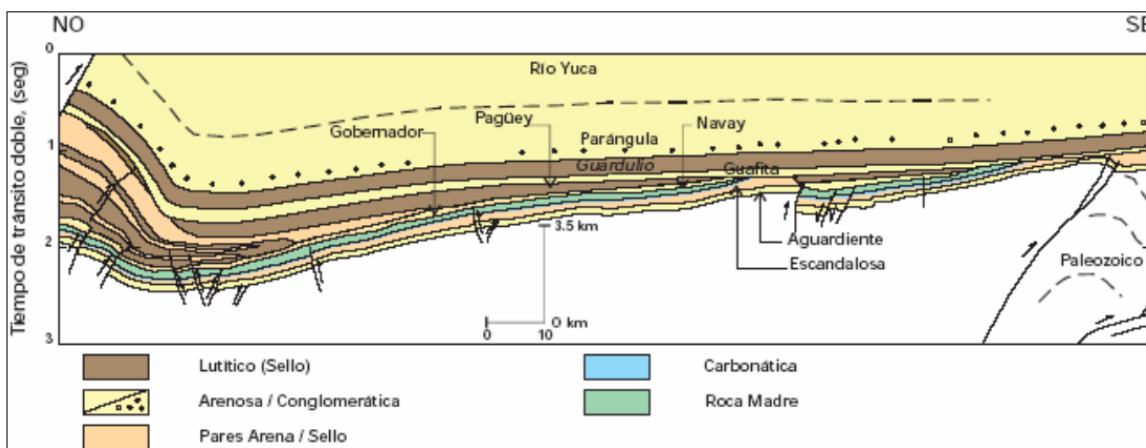


Figura 2. 8. Sección Estructural NO-SE de la Cuenca Barinas-Apure (Modificado de Parnaud, et al, 1995). Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

2.2.2. Estratigrafía de la cuenca Barinas-Apure.

La Cuenca de Barinas-Apure se ubica al sur-sureste del sistema montañoso de los Andes. La roca madre por excelencia es la Formación Navay de edad Cretácico Tardío, cuyas facies son equivalentes laterales a la Formación La Luna. Se han encontrado rocas madre de importancia secundaria en el Grupo Orocué (Formación Los Cuervos), pero ésta sólo habría generado hidrocarburos en los depocentros más profundos, asociados con la acumulación de grandes espesores de molasa por el levantamiento andino. Las principales rocas reservorio clásticas son las formaciones Escandalosa, Burgüita (Cretácico), Grupo Orocué (Paleoceno), Mirador-Guafita (Miembro Arauca, Eoceno-Oligoceno). El reservorio carbonático más relevante lo constituyen las calizas con porosidad secundaria del Miembro Guayacán (Caliza “O”) de la Formación Escandalosa. Los sellos regionales más importantes son los intervalos lutíticos de las Formaciones Burgüita (Cretácico Tardío), Pagüey (Eoceno) y Guafita (Miembro Guardulio).

En los campos petrolíferos explorados, se describe un ambiente de sedimentación interpretado como fluvio-deltaico con fuerte influencia litoral: canales distributarios sobre depósitos de barra de desembocadura con retrabajo y redistribución litoral. El eje de su mejor desarrollo como roca reservorio cruza el área en dirección suroeste a noreste (Yoris y Ostos en WEC, (1997).

A continuación se muestra las principales unidades estratigráficas presentes en la cuenca, descrita en orden estratigráfico (Figura 2. 9):

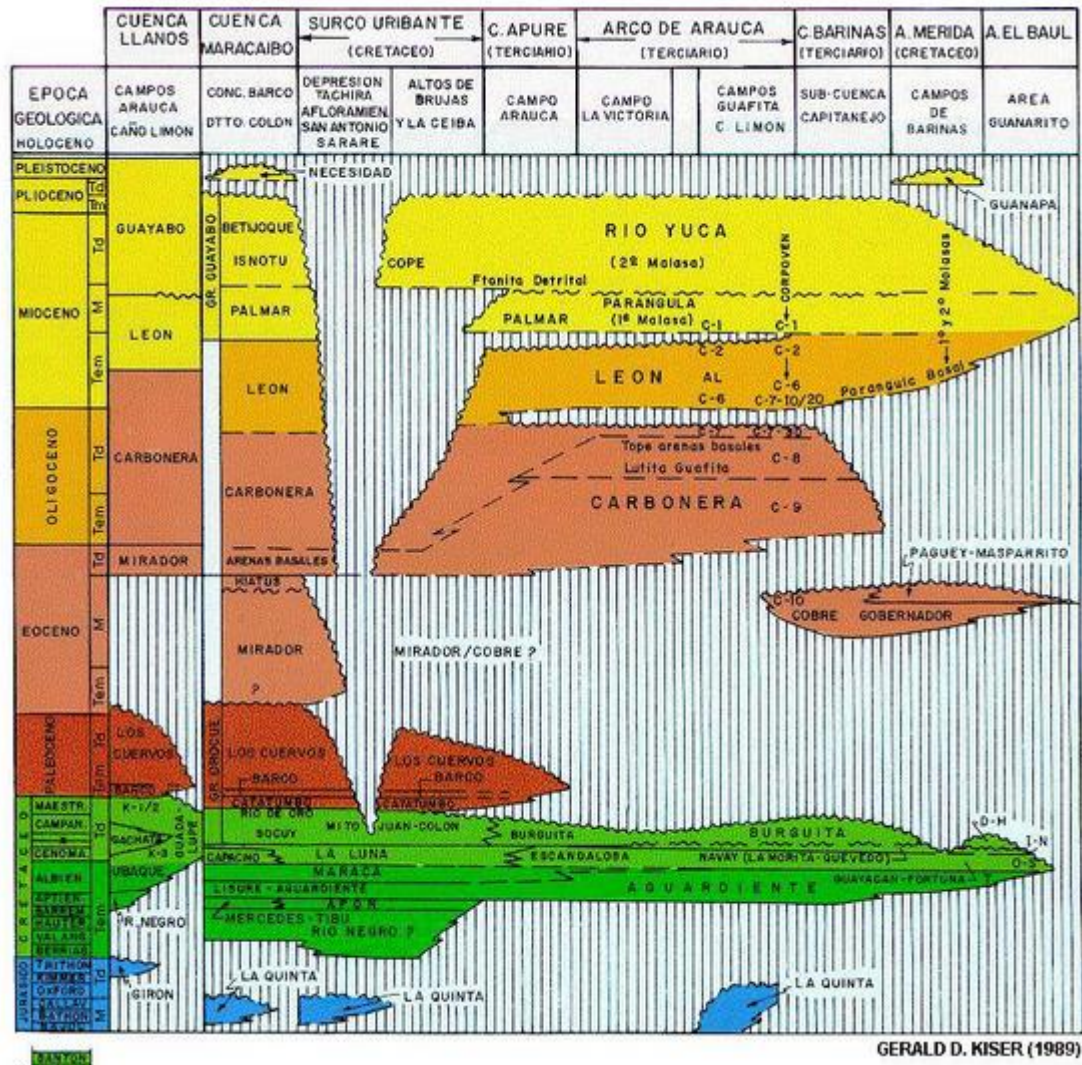


Figura 2. 9. Cuadro de Correlación para la Cuenca Barinas-Apure (Kiser, 1989). Tomado Léxico Estratigráfico de Venezuela.

2.2.3. Alto de El Baúl.

En los alrededores de la población de El Baúl, en el estado Cojedes, se levanta una zona montañosa con elevaciones cercanas a los 400 m aproximadamente, donde afloran rocas ígneas y metamórficas que han sido conocidas y estudiadas desde las primeras exploraciones del área por parte de los geólogos petroleros (Bellizzia *et al* 1960, Kiser y Bass, 1985, etc.); dichas elevaciones se encuentran en medio de los Llanos venezolanos, al

sureste de San Carlos en el pie de los Andes y al noreste del río Orinoco (Figura 2. 10). Este alto ha sido relacionado genéticamente con el Escudo de Guayana; sin embargo, dataciones U-Pb en zircón con el método SHRIMP-RG de cinco muestras arrojaron nuevas edades, lo cual le asigna características más afines a la geología de los Andes de Mérida, que al escudo de Guayana, comportándose como un alto estructural del basamento y no como un arco como se interpretó previamente (Viscarret, *et al.* 2012).

Kiser y Bass (1985) realizaron un trabajo de interpretación de datos aeromagnéticos, entre los años 1981 y 1982, donde indican la orientación noroeste-sureste del basamento magnético del Arco de El Baúl, hasta los 2000 pies de profundidad, cubriendo un área de 23000 km² (100 x 230 km), que se extiende desde el Escudo de Guayana hasta la península de Paraguaná.

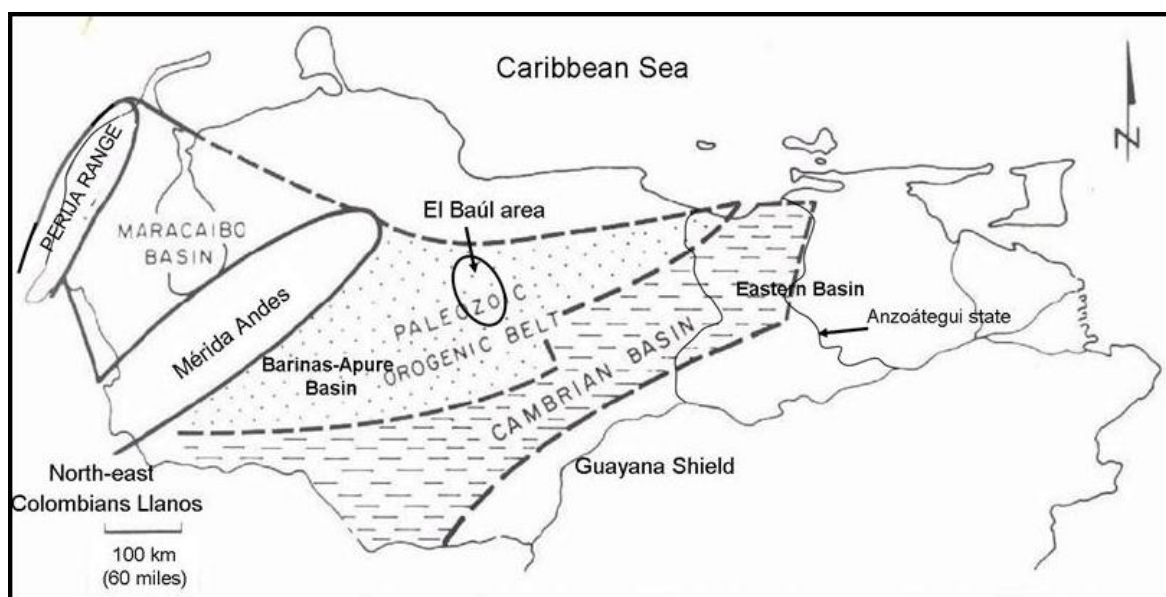


Figura 2. 10. El macizo de El Baúl localizado al norte del Escudo de Guayana, entre las cuencas sedimentarias Apure-Barinas y la Oriental de Venezuela. Tomado de Feo-Codecico *et al.*, (1984).

Sin embargo, esta idea se ha ido desapareciendo con los trabajos de exploración petrolera (e.g.: SMITH 1980, FEO-CODECIDO *et al.* 1984, BLIN 1989, BLIN *et al.* 1989), quienes mencionan la cuenca sedimentaria de Guarumen, que interrumpe la continuidad en el subsuelo del presunto “Arco”. Esta información ha sido reforzada hoy en día, por

estudios independientes de gravimetría y magnetometría satelital realizados por Orihuela *et al.* (2011a, b) quienes confirman que el Macizo de El Baúl, es la cúspide expuesta de un alto estructural de basamento con forma de domo de aproximadamente 200 km de diámetro (Viscarret, *et al.* 2012).

La evolución tectónica del alto de El Baúl se centra en la posibilidad de haber sido un centro de vulcanismo durante el Pérmico, según la evidencia del Grupo Guacamayas (Viscarret, *et al.*, 2012), lo cual en sí, sugiere un relieve estructural cuya orientación es desconocida; mapas isópacos regionales del Cretácico (Formaciones. Aguardiente y Escandalosa en Barinas; Canoa, La Cruz e infante en Guárico) muestran adelgazamiento en el área de El Baúl, lo cual indica cierta elevación estructural de este alto durante el Aptiense-Albiense, aunque es cuestionable si el alto estaba o no, por encima del nivel del mar (Kiser y Bass, 1985).

La ausencia de sedimentos de edad Cretácico Tardío, Paleoceno y Eoceno, más la discordancia angular del Cretácico por debajo del Terciario, indican un levantamiento pronunciado y profunda erosión a principios del Terciario. Los mapas isópacos de las formaciones La Pascua/Roblecito, junto con su litología de ambiente marino profundo, comprueban que la transgresión marina del Eoceno superior/Oligoceno cubrió el área de El Baúl. Sin embargo, el acuñaamiento de las formaciones Roblecito y La Pascua coincide con el alto en el área de Machete, reflejando allí la presencia del alto. El ciclo sedimentario del Terciario más joven, inició su fase regresiva a principios del Mioceno, representado por las areniscas y arcillas neríticas a fluviales de la Formación Chaguaramas. (Kiser y Bass, 1985).

2.2.4. Basamento.

El basamento cristalino que pudiera tener presencia en la zona puede tener influencia de tres provincias:

- Cratón precámbrico (1900 a 730 M.a.):

Los terrenos precámbricos en Venezuela, se encuentran aflorando en todos los cinturones montañosos venezolanos y en el Escudo de Guayana o Macizo Guayanés. En

Figura 2. 11 se indican los terrenos precámbricos venezolanos; están incluidos aquellos ubicados al norte del río Orinoco, y que actualmente se encuentran bajo porciones de corteza paleozoica adosadas a la placa Suramericana en las diversas colisiones que ocurren entre los 570 y los 245 Ma. Estos terrenos también constituyen parte del basamento de las cuencas sedimentarias al sur de la falla de Apure. Debido a los procesos tectónicos sufridos por el norte de la placa Suramericana a lo largo de su historia, los cuerpos precámbricos aquí son de dos clases: alóctonos y autóctonos. Los terrenos autóctonos se localizan en el Escudo de Guayana y como basamento de las cuencas paleozoicas a cenozoicas al sur de la falla de Apure. En el Escudo de Guayana, estos terrenos autóctonos se discriminan en dos provincias: Cuchivero y Roraima. La misma discriminación al norte del Escudo en las cuencas petrolíferas, no se puede realizar debido a la escasa información disponible. Los terrenos alóctonos iniciaron su adosamiento a Suramérica durante el Paleozoico Temprano (Orogénesis Caledoniana: 570-385Ma); incluyen rocas que afloran en los alrededores de las ciudades de Mérida y San Cristóbal. Posteriormente ocurrió la sutura del alóctono al Paleozoico Superior, durante la Orogénesis Hercinica (385-245 Ma); dicho alóctono incluyó terrenos proterozoicos, entre los cuales solo se ha determinado la edad de las rocas granulíticas de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). La última Colisión tuvo su inicio a finales del Mesozoico (Cretácico); dentro de este alóctono se han reconocido rocas de edad mezoproterozoico (augengneis de Peña de Mora) en los alrededores de Caracas.

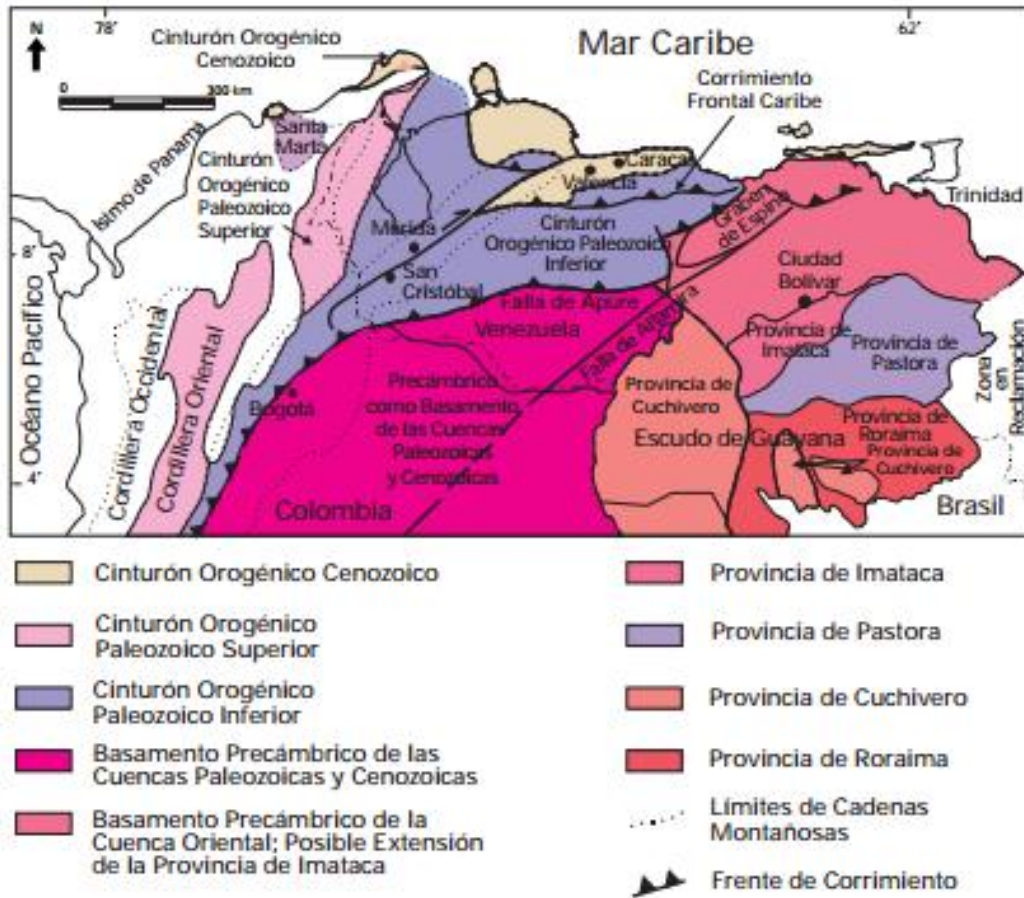


Figura 2. 11. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Suramérica, en los cuales hay rocas precámbricas. Dichos terrenos fueron suturados secuencialmente al norte de Suramérica durante el Ordovícico-Silúrico (Orogénesis Herciniana) y desde finales del Mesozoico hasta el presente. Tomado en Yoris y Ostos en WEC (1997).

- Basamento Paleozoico (500 – 175 m.a.):

Las rocas de edad Paleozoica se encuentran en varias regiones principales, las cuales se agrupan geológicamente como terrenos autóctonos o alóctonos a Suramérica. El terreno autóctono se encuentra en el subsuelo de la cuenca Oriental y en la de Barinas-Apure al sur de la Falla de Apure. Las rocas paleozoicas de dicho terreno son principalmente "capas rojas" que marcan la separación de Gondwana (Suramérica y África actuales, unidas), evidenciada en la secuencia Jurasica (Formación La Quinta) preservada en depresiones estructurales en dichas cuencas. Los terrenos alóctonos se pueden discriminar por la edad en la que fueron adosados tectónicamente al norte de Suramérica.

Así existen los terrenos alóctonos que se suturaron durante el Paleozoico Temprano, otros que lo hicieron durante el Paleozoico Tardío y por último los que se incorporaron a partir de finales del Mesozoico. Los terrenos donde hay rocas paleozoicas y que se adosaron en el Paleozoico Temprano, se reconocen ahora como parte del basamento de los terrenos incorporados durante la historia tectónica del Caribe, como el constituyente del cinturón orogénico del Paleozoico Inferior al norte de la Falla de Apure y como parte del basamento de los Andes y de la cuenca del Lago de Maracaibo. Se reconocen rocas paleozoicas representativas de este terreno alóctono en los Andes, donde afloran rocas ígneas graníticas y rocas sedimentarias (Ordovícico -Silúrico), de ambientes de plataformas y marinos profundos. Asimismo, en el subsuelo del Lago de Maracaibo este terreno está representado por rocas metasedimentarias ordovícicas, que también afloran en los Andes. Los terrenos alóctonos de edad devónica, que se adosaron a Suramérica en el Paleozoico Superior, están ahora aflorando en la Sierra de Perijá.

Como parte de la historia de la acreción del alóctono del Paleozoico Superior contra el Inferior (previamente suturado), se reconocen rocas graníticas producto de la subducción por debajo del borde norte de la Placa Suramericana; entre dichas rocas son de mencionar las de la región de El Baúl de edad Pérmico y las de Edad Carbonífero que se encuentran en el subsuelo de las cuencas: Oriental, Barinas-Apure y Maracaibo. Las rocas sedimentarias del cinturón adosado incluyen secuencias de edad Carbonífero y Pérmico tanto en la Sierra de Perijá como en los Andes.

- Basamento Mesozoico (128 – 66 m.a.):

La presencia del Triásico en Venezuela carece de evidencias concretas. De la parte más antigua del Jurásico (208-181 Ma), la única evidencia se tiene en las Volcánicas de la Ge (Perijá) y en las Volcánicas de El Totumo en Perijá y a todo el proceso de expansión que estuvo relacionado a la apertura del golfo de México o Proto-Caribe.

En Venezuela, la rotura o "rifting" del Pangea (súper continente que reunía las masas continentales de América, Europa y África actuales) produjo varias estructuraciones importantes que posteriormente influyeron en la evolución de las cuencas sedimentarias venezolanas. Dentro de Venezuela continental, la apertura del Proto-Caribe indujo el

desarrollo de valles de extensión o grábenes con una tendencia noreste, en los que incluyen los grábenes de Apure-Mantecal y Espino, así como también los grábenes de los Andes y Perijá, y el ubicado en el Lago de Maracaibo. Se ha postulado la existencia de rocas jurásicas en las partes más profundas de la Serranía del Interior de Venezuela Oriental, involucradas en la deformación misma, debido a la clara continuación de las tendencias de los grábenes de Apure-Mantecal y Espino; sin embargo, hasta el momento no se ha podido comprobar dicha existencia.

Todos estos grábenes fueron rellenados durante el Jurásico por sedimentos continentales tipo "capas rojas", volcánicas de diversas índoles y eventualmente clásticos y calizas de invasiones marinas, existiendo evidencia de ello en las penínsulas de La Guajira (grupos Cojoro y Cocinas) y Paraguaná (Formación Pueblo Nuevo), en la Formación La Quinta de Venezuela Occidental e incluso en el subsuelo de la Cuenca Oriental de Venezuela (Formación Ipire en el Graben de Espino).

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

❖ *Métodos Gravimétricos*

❖ *Fundamentos*

❖ *Ley de gravitación universal*

❖ *Correcciones Gravimétricas*

❖ *Anomalías Gravimétricas*

❖ *Separación Regional-Residual*

❖ *Análisis espectral*

❖ *Análisis estadístico*

3. MARCO TEÓRICO

3.1. MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS.

La geofísica estudia la Tierra en su composición y dinámica, sobre la base de medidas de tipo físico que normalmente se realizan desde la superficie del planeta. Cuando este estudio tiene que ver con áreas relativamente pequeñas y profundidades que no sobrepasen máximo unos pocos kilómetros, para obtener un fin económico inmediato, se habla de geofísica aplicada, y el conjunto de métodos para obtener ese fin constituyen la prospección geofísica. Se puede inferir información sobre la composición del subsuelo mediante algún parámetro físico medido en superficie, que puede ser la velocidad de una onda, o variaciones del campo gravitacional producidas por diferencias de densidad, o la intensidad de una corriente asociada a la mayor o menor facilidad de propagación de las cargas eléctricas.

Los métodos ofrecen una forma de obtener información detallada acerca de las condiciones del suelo y rocas del subsuelo. Esta capacidad de caracterizar rápidamente las condiciones del subsuelo sin perturbar el sitio ofrece el beneficio de costos más bajos y menos riesgo, dando mejor entendimiento general de las condiciones complejas del sitio.

3.2. FUNDAMENTOS.

Los métodos gravimétricos entran dentro del grupo de los métodos potenciales de la geofísica y se caracterizan por el estudio de las variaciones en el campo gravitacional de la tierra. En menor escala, los cambios en dicho campo se deben a la presencia de cuerpos con densidades que contrastan con el medio en el cual se encuentran (Telford *et al.*1990).

Para poder aplicar un método geofísico en una prospección, es necesario que se presenten dos condiciones importantes: (1) que existan contrastes significativos, anomalías que se pueden detectar y medir; (2) que estos contrastes se puedan correlacionar con la geología del subsuelo.

3.3. LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL.

Comúnmente dicha ley se enuncia de la siguiente manera: todo cuerpo en el universo atrae a otros cuerpos con una fuerza que es directamente proporcional al producto de la masa de los cuerpos e indirectamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los mismos. La dirección de esta fuerza es a lo largo de la línea que los une (Ecuación 1). (Serway, 1998).

$$F = G ((m_1 \times m_2)/r^2) \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo F la magnitud de la fuerza gravitacional sobre cualquier cuerpo, m_1 y m_2 las masas de los cuerpos, r la distancia entre ellos y G es una constante fundamental denominada constante de gravitación universal (Ecuación 2).

$$G = 6.673 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

La aceleración de m_2 debido a la presencia de m_1 , puede ser calculada dividiendo F por m_2 , resultando:

$$F = (G * m_1)/r^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

A partir de esto se tiene la aceleración de gravedad por unidad de masa m_1 . Si m es la masa de la tierra y r el radio de la misma, la aceleración de gravedad de la tierra viene dada por:

$$g = (G * M_T)/R^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

La aceleración de gravedad fue medida por primera vez por Galileo con su famoso experimento en Pisa, Italia. En honor a Galileo la unidad de aceleración de gravedad, 1cm/s^2 , es llamado Gal. (Telford, 1995).

Las pequeñas variaciones registradas en la gravedad se dan como resultado de las características de la tierra, la cual tiene una distribución de densidades que varía en el interior del planeta. Estas variaciones de gravedad son utilizadas por la geofísica para poder interpretar las diferentes relaciones de densidades de las estructuras en el subsuelo. En

geofísica la unidad de aceleración conocida es el Gal, y las mediciones gravimétricas son generalmente expresadas en mGal ($1 \cdot 10^{-3} \text{cm/seg}^2$).

El valor de la gravedad de un punto cualquiera de la superficie terrestre depende de la latitud, la altitud, los efectos de marea, la topografía y de la distribución de densidades superficiales, se busca cauterizar los factores que hacen que la gravedad varíe.

La prospección gravimétrica abarca el estudio del campo gravitacional terrestre, una materia de interés para los geodestas en función de determinar la forma de la tierra. Como la tierra no es perfectamente una esfera homogénea, la aceleración de gravedad no es constante sobre la superficie de la misma. La exploración gravimétrica entonces estudia las anomalías debidas a la distribución de densidades y estas anomalías generalmente son mucho más pequeñas que los cambios debidos a la latitud y la altitud, aunque mayores que las debidas a las mareas o (usualmente) a los efectos topográficos (Telford *et al.*, 1990).

3.4. CORRECCIONES GRAVIMÉTRICAS.

Los datos gravimétricos brutos son afectados por una amplia variedad de fuentes de amplitudes, periodos y longitudes de onda variable que generalmente ocultan las variaciones gravimétricas de interés geológico y geofísico. Como resultado de esto las mediciones en campo son procesadas para minimizar estos efectos. Estos procesos de conversión son comúnmente conocidos como reducciones o correcciones de la data gravimétrica.

3.4.1. Variaciones de la gravedad en la superficie terrestre con respecto al tiempo.

- **Deriva Instrumental**

Dado que el gravímetro es sumamente sensible a las vibraciones, este realiza varias mediciones en un corto tiempo y arroja un valor promedio de dichas lecturas, a esto se le llama deriva instrumental. Las variaciones son causadas por diferentes motivos, entre ellos los cambios de temperatura en el ambiente o por la inelasticidad de las piezas mecánicas del equipo (Lowrie, 2007).

$$Deriva = \frac{Lectura_{inicial (Base)} - Lectura_{final (Base)}}{T} \text{Ecuación 5}$$

Donde T es el tiempo transcurrido de la adquisición en minutos.

Así la lectura corregida por deriva de cada estación viene dada por la Ecuación 6.

$$Lectura_{Estación Corregida} = Lectura_{Estación} + Deriva * t \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde t es el tiempo entre la lectura inicial (Estación Base) y la lectura tomada de cada una de las estaciones. Luego de realizar esta corrección se observa como las medidas en una misma estación a diferentes horas son iguales.

- **Efecto de las mareas**

Un efecto que en muchos casos no es tomado en cuenta, es la atracción causada por el sol y la luna. Los gravímetros utilizados son tan precisos que son capaces de registrar los efectos causados por el cambio de posición de estos astros con un rango de hasta 0,3 mGal (Telford, 2004). Esta corrección se puede calcular por medio de distintos algoritmos computacionales que arrojan estas variaciones para un lugar y una fecha específica.

3.4.2. Variación de la gravedad en la superficie terrestre con respecto a la Altura.

Como las observaciones se hacen sobre la superficie terrestre con una altura h sobre el nivel del mar, se deben estudiar las variaciones de la gravedad respecto a la altitud. Esto da lugar a tres correcciones: corrección de aire libre, corrección de Bouguer y la corrección topográfica; permitiendo reducir la gravedad observada al nivel de referencia o altura de las estaciones.

- **Corrección Aire Libre**

Históricamente, la corrección de altura se conoce como la corrección de aire libre y se basa en la elevación por encima del geoide. Actualmente, según Hinzen *et al.* (2005), las normas revisadas utilizan el elipsoide como el punto de referencia vertical en lugar del

nivel del mar. Convencionalmente, se utiliza la fórmula de aproximación de primer orden, (Ecuación 7), para esta corrección.

$$Cal = 0.3086 * h \text{ mGal} \text{ Ecuación 7}$$

Si se tiene al elipsoide GRS80 como referencia la fórmula (Ecuación 8) de segundo orden es:

$$Cal = -(0.3087691 - 0.0004398 \sin^2 \varphi)h + 7.2125 \times 10^{-8} h^2 \text{ mGal} \text{ Ecuación 8}$$

Donde la altura h es la altura elipsoidal en metros y el efecto de la gravedad en mGal. En función de la latitud, la diferencia entre el primer orden y de segundo orden de corrección puede ser tan grande como varios miligales a alturas de varios miles de metros.

- **Corrección de Bouguer**

La corrección de Bouguer (CB) representa la atracción gravitatoria de la capa de la tierra entre el punto de referencia vertical, es decir, el elipsoide, y la estación. Esta corrección, en mGal, tradicionalmente (Ecuación 9) se calcula suponiendo que la tierra entre el punto de referencia vertical y la estación puede ser representado por una losa horizontal infinito con la siguiente ecuación, (Mohry Taylor, 2001).

$$CB = 0.04191 * \rho_B * h \text{ mGal} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde: h = Altura. ρ_B = Densidad de Bouguer.

En el procedimiento revisado, para tener en cuenta el efecto de la curvatura de la tierra, la ecuación losa horizontal se sustituye por la fórmula de un casquete esférico de radio de 166,7 kilómetros, estos cambios se ven reflejados en la ecuación 10.

$$C_B = 2\pi G \sigma (\mu h - \lambda R) \text{ mGal} \text{ Ecuación 10}$$

Donde μ y λ son coeficientes adimensionales definidos por LaFehr (1991b).

R es el radio de la tierra ($R_0 + h$) en la estación donde R_0 es el radio medio de la tierra, h es la altura sobre el elipsoide, y σ es la densidad del material el casquete esférico. El efecto gravitacional del casquete esférico es más pequeño que el generado al asumir una losa horizontal.

- **Corrección Topográfica**

Para aceptar que por debajo de las estaciones actúa la atracción de una masa homogénea de debe aplicar la corrección topográfica, la cual permite compensar la atracción gravitacional que proviene de las masas irregulares por encima o por debajo de la estación y permite nivelar la topografía (Lowrie, 2007). Para poder aplicar esta corrección, se necesita información detallada de la topografía alrededor de cada punto de medición, en la actualidad se utiliza una gran variedad de software especializados para realizar este tipo de corrección.

Debido a que los relieves altos, al contener mayor masa, disminuyen la gravedad medida en las estaciones y que los puntos cercanos a los valles registran baja fuerza de atracción, por falta de masa, esta corrección siempre se suma.

3.4.3. Gravedad Teórica

La altura de una estación referida a un elipsoide de referencia genera un efecto no deseado sobre la gravedad teórica, la cual, toma en consideración la masa, la forma y la rotación de la tierra. Este efecto puede ser calculado por la formula Somigliana (1930), que relaciona el efecto de la latitud sobre la superficie elipsoidal y el efecto de altura sobre la altitud observada.

$$g_T = g_e \frac{(1 + k \sin^2 \varphi)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \text{Ecuación 11}$$

Donde el GRS80 referido al elipsoide tiene los siguientes valores; $g_e = 978032,67715$ mGal; $k = 0,001931851353$; $e^2 = 0.0066943800229$.

Los nuevos estándares usan las fórmulas de aproximación de segundo orden para las diferencias entre la gravedad teórica a una altura elipsoidal h , no a una altura ortométrica H y la gravedad sobre la superficie elipsoidal. Dependiendo de la latitud, las diferencias en las estimaciones de las fórmulas de primero y segundo orden, pueden ser tan grande como diferentes miligales a alturas con diferencias de miles de metros (Xiong Li, *et al.* 2006).

3.4.4. Corrección atmosférica

El efecto gravitatorio de un modelo de masa atmosférica sobre una estación puede ser calculado con un error de 0.01 mGal a alturas superiores a los 10 km con la ecuación 12, Donde la gravedad está dada en mGal y la altura en m. Este efecto puede ser restado de la gravedad teórica o añadido a la gravedad observada porque el elipsoide de referencia toma en consideración esta masa, sin medir su efecto gravitatorio, asumiendo que la atmósfera consiste de una cubierta esférica homogénea (Xiong Li, *et al.* 2006).

$$g_{atm} = 0.874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2 \text{Ecuación 12}$$

3.5. ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS

Las anomalías son la diferencia entre la gravedad observada corregida para variaciones temporales y la gravedad teórica. Diferentes tipos de anomalías reflejan las variaciones en los componentes utilizados de la definición de la gravedad modelada de la estación. Los modelos cambian dependiendo del uso de la anomalía en los estudios geofísicos (Xiong Li, *et al.* 2006).

3.5.1. Anomalía de Aire Libre

La anomalía de aire libre (ecuación 13) representa la diferencia entre la gravedad observada y el modelo teniendo en cuenta la gravedad teórica debido al elipsoide GRS80 y el efecto atmosférico en toda la ubicación de la estación. Esta anomalía se usa con frecuencia en el modelado e interpretación de mapas de las zonas marinas y sin variaciones significativas batimétricas (Xiong Li, *et al.* 2006).

$$A_{al} = G_{obs} \pm C_{AL} - G_{Teo}(\text{mGal}) \text{ Ecuación 13}$$

Dónde: G_{Obs} = Gravedad observada. C_{AL} = Corrección aire libre. G_{teor} = Gravedad teórica.

3.5.2. Anomalía de Bouguer

La anomalía de Bouguer (ecuación 14) representa la diferencia entre la gravedad observada y el modelo teniendo en cuenta la gravedad teórica debido al elipsoide GRS80 y el efecto atmosférico, además elimina los efectos esféricos y de los modelos de terreno (Xiong Li, *et al.* 2006). Estas diferencias surgen debido a que la densidad en el interior de la tierra no es totalmente homogénea

$$AB = G_{obs} \pm C_{AL} \mp C_B + C_T - G_{Teo}(\text{mGal}) \text{ Ecuación 14}$$

Dónde: G_{Obs} = Gravedad observada. C_{AL} = Corrección aire libre. G_{teor} = Gravedad teórica. C_B = Corrección de Bouguer. C_{topo} = Corrección topográfica.

3.6. SEPARACIÓN REGIONAL-RESIDUAL

La presencia de una gravedad anómala indica la existencia de un cuerpo o estructura con densidad anómala. La señal de la anomalía es igual que la del contraste de densidad (diferencia entre la densidad del cuerpo y del material que lo rodea) y muestra si la densidad del cuerpo es superior o inferior que la de contraste. La apariencia de la curva de anomalía gravimétrica se ve afectada por las dimensiones, el contraste de densidad y la profundidad del cuerpo anómalo (Lowrie, 2007).

La extensión horizontal de una anomalía frecuentemente es llamada longitud de onda aparente y corresponde a la medida de su profundidad. Un cuerpo profundo y grande genera una longitud de onda larga (anomalía regional), mientras que un cuerpo pequeño y somero es responsable de producir una longitud de onda corta (anomalía local o residual).

Las anomalías regionales son producto de contraste de densidad profundos presentes en la corteza o el basamento y permiten un conocimiento a gran escala de la

estructura de la corteza debajo de los mayores rasgos geográficos, como cordilleras montañosas, crestas oceánicas y zonas de subducción. Por otro lado las anomalías residuales son debidas a masas anómalas someras que pueden ser de interés exploratorio y para su correcta interpretación es esencial tener conocimiento de la geología local (Lowrie, 2007). La suma de estas anomalías da como resultado la anomalía de Bouguer (ver ecuación 15).

$$A_B = A_{Reg} + A_{Res} \text{ Ecuación 15}$$

3.7. ANÁLISIS ESPECTRAL

El análisis espectral proveniente de métodos potenciales terrestre, es una herramienta que se utiliza para determinar las diferentes longitudes de onda que permitan establecer la profundidad de las fuentes detectadas; es por ello que, se calcula el espectro de potencia (o energía) promediado radialmente, cuyo resultado presenta un gráfico donde se muestra en el eje horizontal el número de onda (k) y en el eje vertical el logaritmo neperiano de la potencia ($\ln(P)$). Cada tramo lineal define intervalos de frecuencia en el espectro, correspondiendo a una fuente que genera una anomalía, de manera tal que la pendiente de la recta está directamente relacionada con la profundidad de dicha fuente, se determina mediante la ecuación: *profundidad* = $m/(4*\pi)$; donde m representa la pendiente de la curva. (Spector & Grant, 1970). Este concepto fue generalizado a datos gravimétricos por (Dimitriadis, *et al.* 1989)

Los valores originados al realizar el cálculo del espectro de potencia son funciones del número de onda y de la localización de los topes o límites de las estructuras que la generan, por lo tanto, la densidad de un cuerpo analizada por medio de la transformada de Fourier, permite determinar la máxima amplitud del espectro de energía del mismo, la cual es asociada al tope del cuerpo que la genera.

3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La geoestadística consiste en la aplicación de una serie de métodos estadísticos y probabilísticos con el fin de conocer y caracterizar los fenómenos relacionados a las

geociencias y obtener la autocorrelación espacial o temporal de los datos. Su principio se basa en una realidad que nos muestra similitud estadística en pares de valores y el interés en representar dicha variabilidad, surge porque nos permite hacer estimaciones del valor de la variable en los puntos que nos interesen dentro del dominio.

3.8.1. Estadística

Es el conjunto de procedimientos y técnicas empleadas para recolectar, organizar y analizar datos, los cuales sirven de base para tomar decisiones en las situaciones de incertidumbre que plantean las ciencias sociales o naturales.

3.8.2. Estadística descriptiva

Se refiere a la recolección, presentación, descripción, análisis e interpretación de una colección de datos, esencialmente consiste en resumir estos con uno o dos elementos de información (medidas descriptivas) que caracterizan la totalidad de los mismos. La estadística descriptiva es el método que permite obtener de un conjunto de valores, resultados descriptivos sobre sí mismos.

3.8.3. Media aritmética o media

La media describe el centro de una distribución. Para hallar la media de un conjunto de observaciones, se suma sus valores y se divide por el número de observaciones. Si las n observaciones son $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, su media se expresa a través de la ecuación 16 (Moore, 2000).

$$\bar{X} = \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)}{n} \text{ Ecuación 16}$$

3.8.4. Mediana

La mediana M , es el punto medio de una distribución, es decir, es el número tal que la mitad de las observaciones son menores y la otra mitad mayores. Para hallar la mediana de una distribución (Moore, 2000):

- Ordena todas las observaciones de la mínima a la máxima.
- Si el número de observaciones n es impar, entonces la mediana M es la observación central de la lista ordenada. Halla la posición de la mediana contando $\frac{n+1}{2}$ observaciones desde el comienzo de la lista.
- Si el número de observaciones n es par, la mediana M es la media de las dos observaciones centrales de la lista ordenada. La posición de la mediana se halla, otra vez, contando $\frac{n+1}{2}$ observaciones desde el comienzo.

3.8.5. Medida de asimetría

Con este tipo de medidas se pretende saber si los datos se distribuyen de forma simétrica respecto a un valor central, o si por el contrario su distribución es asimétrica. Para definir una distribución simétrica necesitamos indicar cuál es el centro de simetría, y la media parece el mejor candidato. Por lo tanto, se dice que una distribución de frecuencia es simétrica respecto de la media, si para cada valor de variable, existe con la misma frecuencia equidistante respecto de la media (Sarabia y Sáez, 2007). La ecuación 17 la describe.

$$g_1 = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{x})^3) n_i}{N}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{x})^2) n_i}{N} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{Ecuación 17}$$

3.8.6. Varianza

La varianza S^2 de un conjunto de observaciones es la suma de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones respecto a su media dividido por $n-1$. Algebraicamente la varianza de n observaciones $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, se muestra en la ecuación 18.

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{x})^2 + (X_2 - \bar{x})^2 + (X_3 - \bar{x})^2 + \dots + (X_n - \bar{x})^2}{n-1} \quad \text{Ecuación 18}$$

3.8.7. Desviación estándar

También conocida como error típico. Es la raíz cuadrada de la varianza S^2 y se define a través de la ecuación 19. (Moore, 2000)

$$S = \sqrt{\frac{(X1-\bar{x})^2 + (X2-\bar{x})^2 + (X3-\bar{x})^2 + \dots + (Xn-\bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación 19}$$

3.8.8. Diagrama de caja

Muestra gráficamente los cinco números resumen (observación mínima, el primer cuartil, la mediana, el tercer cuartil y la observación máxima). Donde el lado superior e inferior de la caja corresponde a los cuartiles, el segmento inferior a la mediana y los extremos de los segmentos perpendiculares a los lados superior e inferior de la caja corresponden a los valores máximos y mínimo, respectivamente.

3.8.9. Histograma de frecuencia

Es una representación gráfica que se utilizan para variables continuas o para variables discretas, con un gran número de datos que se han agrupado en clases. Las frecuencias se presentan por medio de áreas donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Normalmente, en el eje vertical se encuentra la frecuencia, y en el eje horizontal los valores de las variables y se construye dibujando sobre cada intervalo un rectángulo de área proporcional a la frecuencia absoluta correspondiente a dicho intervalo. Si las longitudes de los intervalos no son iguales, cada rectángulo tendrá una altura igual a la densidad de frecuencia. Si por el contrario, las longitudes de los intervalos son iguales, se utiliza como altura la frecuencia absoluta n_i (Sarabia y Sáez, 2007).

CAPITULO IV

ADQUISICIÓN

❖ Uso del equipo.

❖ Parámetros de adquisición.

❖ Adquisición del dato gravimétrico.

❖ Localización de las estaciones gravimétrica

4. ADQUISICIÓN GRAVIMÉTRICA

4.1. USO DEL EQUIPO.

El Autograv es un gravímetro automatizado basado en un microprocesador, que tiene un rango de medida de 8000 mGal, y una resolución de 0.001 mGal, lo cual, le permite a el instrumento ser utilizado tanto en investigaciones detalladas de campo (microgravimetría) como en investigaciones de escala regional. (Figura 4. 1, Scintrex CG-5)

Su uso se inicia con un sistema de nivelación, basado en un trípode que encaja en tres orificios que están en la parte inferior del equipo, permitiendo una mayor estabilidad a la hora de hacer la medición, de igual forma el gravímetro presenta un menú de nivelación, permitiendo que el procedimiento se lleve a cabo a través de la pantalla donde se representa un nivel digital.

La temperatura del sensor se mantiene estable debido a la protección que posee el equipo, lo cual hace que el aparato no se vea afectado por los cambios de temperatura ambiental y de la presión atmosférica (su temperatura de operación varía entre -20°C y 45°C), así mismo, su sistema de cuarzo no magnético permite que el equipo no se vea afectado por las variaciones del campo magnético terrestre.

La baja deriva que sufre el instrumento se debe a la estabilidad que posee el ambiente operativo del sistema elástico del mismo cuarzo, además que por ser un sensor tan estable le permite al software predecir la próxima deriva y corregirla. Este equipo presenta además de su alta precisión, un menú de preparación donde se puede activar la corrección por marea y la corrección topográfica (esta última corrección no estará activa, para el desarrollo del trabajo emplearemos otra técnica de corrección), el corrector de nivelación y el filtro sísmico que corrige automáticamente el error en las mediciones producido por vibraciones presentes en el campo de adquisición.



Figura 4. 1.Gravimetro Scintrex Autograv CG-5.

El gravímetro posee una antena GPS que permite dar una coordenada y la altura de la estación medida, que para efectos de esta investigación no se usó. Para el procesamiento de los datos se empleara equipos geodésicos de medición.

4.2. PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN.

El uso del Autograv CG-5 en la adquisición, se llevó a cabo con mediciones gravimétricas de 3 minutos, dando un total de tres medidas gravimétricas por estación (en el caso de la adquisición de bases correspondían a 5 minutos), a parte de un rango de tiempo óptimo para la nivelación y estabilización del equipo.

El lapso de cierre en la estación base se establece para este proyecto, en un tiempo de 3 a 4 horas, en caso de tener problemas de vialidad o cuyos trayectos fueran demasiados extensos.

Las bases empleadas están ubicadas en los puntos de control de la Red Gravimétrica Nacional y monumentos REGVEN, tomando como base de primer orden, la base de

gravedad absoluta de Santa Inés en Caracas, con el valor reportado por Drewes *et al.* (1991).

4.3. ADQUISICIÓN DEL DATO GRAVIMÉTRICO.

Para la adquisición gravimétrica se diseñaron las rutas de vialidad que corresponderían a la movilización del equipo GIAME-gravimetría (Figura 4. 2).

A través de estas rutas propuestas se realiza el levantamiento gravimétrico de toda la zona, la cual corresponde a los Llanos Centro Occidentales de Venezuela.

Las fases de adquisición se iniciaron con el levantamiento de las estaciones bases gravimétricas, que se desarrollaron del 01 al 09 de abril del 2013 (Figura 4. 3).

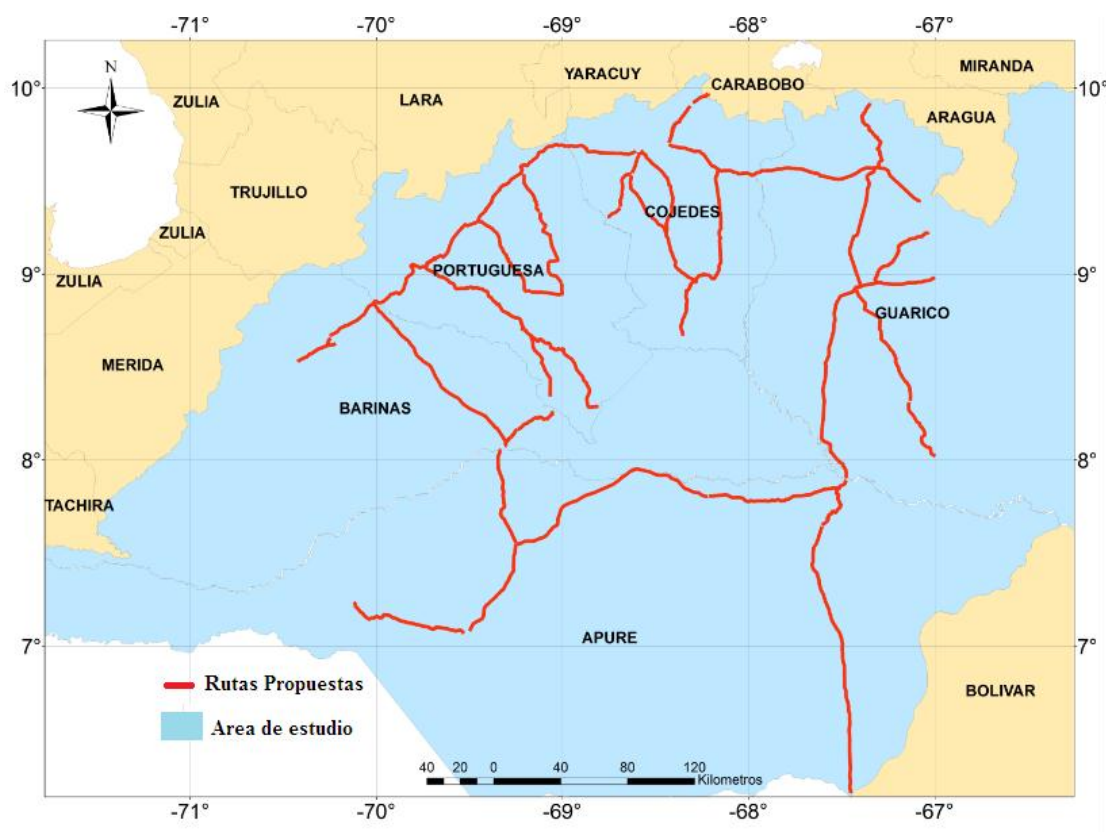


Figura 4. 2. Mapas de la zona de estudio, indicando las rutas propuestas para la adquisición de datos gravimétricos.

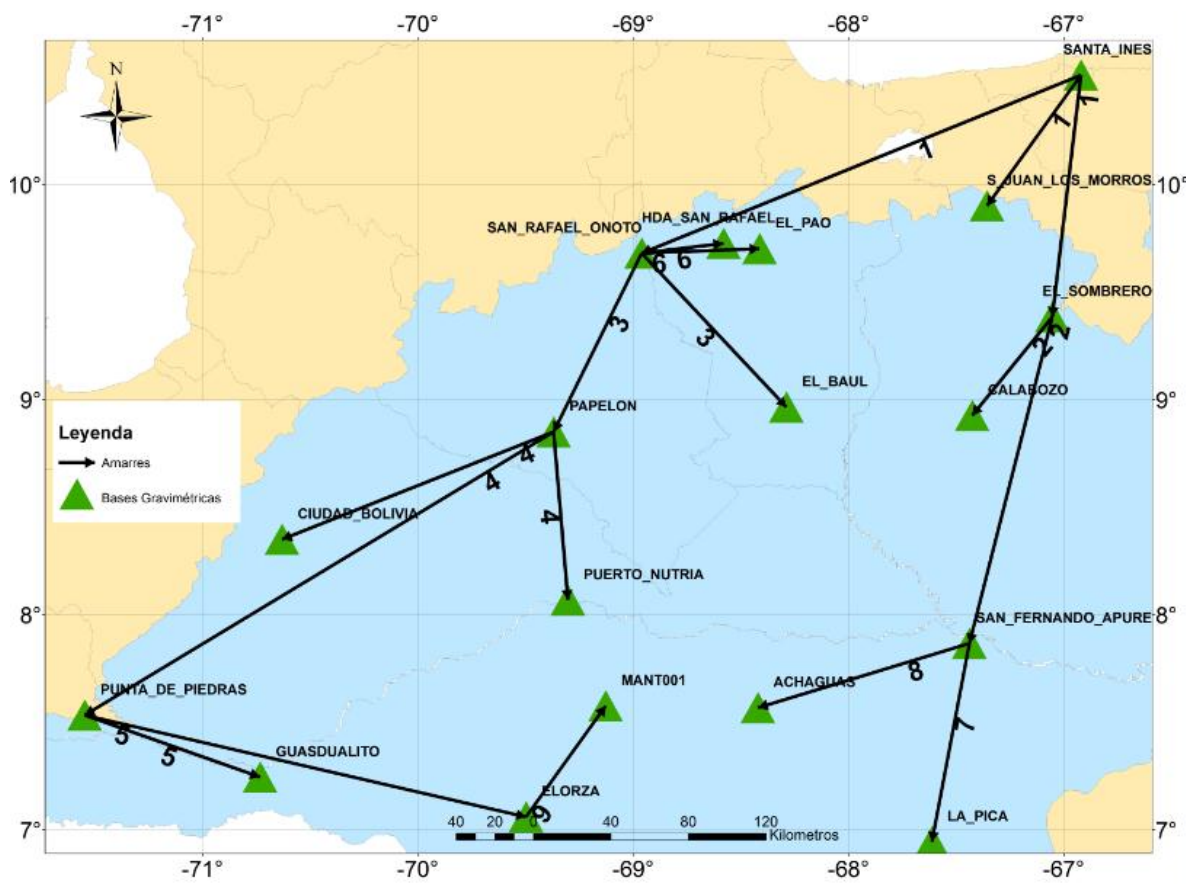


Figura 4. 3. Filigrana de las bases gravimétricas correspondientes a la zona 1 del proyecto GIAME.

Para esta primera fase se levantaron 12 estaciones gravimétricas tomando como base de primer orden para su amarre, la estación gravimétrica de Santa Inés en Caracas (de numero 9700013).

Para realizar el levantamiento de estas bases gravimétricas se contó con el apoyo de 3 gravímetros Scintrex CG-5 propiedad de PDVSA Servicio (seriales: 40412, 40460 y 40482), cada uno se presentó en condiciones idénticas (iguales: parámetros de adquisición, mismos lugares de medición, el mismo procesamiento, filtrado y el mismo software interno), con los cuales se empleó el método de medición simultánea (en cada una de las bases), lo que facilita los recorridos, puesto que las mediciones con los 3 equipos al mismo tiempo, equivalen a hacer tres corridos con un solo gravímetro para garantizar tres circuitos gravimétricos.

Este método de trabajo se ha reportado en otras investigaciones, Debeglia y Dupont (2001), donde se realizaron mediciones con dos gravímetros Scintrex y cuyos resultados arrojaron similitudes en cuanto a: los mismos efectos de variación en las mediciones, valores estándares similares, reacciones idénticas a terremotos, entre otros factores, lo cual indican que las mediciones con gravímetros diferentes, pero bajo las mismas condiciones de empleo garantizan resultados análogos entre ellos.

A lo largo de la adquisición se levantaron otras bases gravimétricas, estas realizadas sólo con un equipo gravimétrico, el 40482 (este mismo aparato se usó para el levantamiento de las estaciones ordinarias); lo que suma un total de 15 bases levantadas por el equipo GIAME zona 1 (Tabla 4. 1).

Tabla 4. 1. Bases gravimétricas de zona 1

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (m)	Gravedad Absoluta (mGal)	Estado
9700013	Santa Inés	10,51	-66,922	914,16	978051,043	Caracas
9701013	San Juan de los Morros	9,902	-67,358	428,00	978068,600	Guárico
9702013	El sombrero	9,385	-67,055	158,00	978131,798	Guárico
9703013	San Rafael de Onoto	9,681	-68,961	138,00	978104,383	Cojedes
9704013	Calabozo	8,927	-67,427	98,00	978154,149	Guárico
9705013	San Fernando	7,867	-67,440	48,00	978123,473	Apure
9706013	Papelón	8,851	-69,370	106,00	978108,468	Portuguesa
9707013	El Baúl	8,965	-68,289	138,00	978168,479	Cojedes
9708013	Puerto Nutrias	8,068	-69,304	79,00	978111,489	Barinas
9709013	Punta de piedras	7,533	-71,548	175,59	978001,321	Táchira
9710013	Elorza	7,060	-69,499	84,32	978065,888	Apure
9711013	Guasualito	7,245	-70,734	119,56	978069,502	Apure
9712013	Ciudad Bolivia	8,350	-70,632	222,00	978029,003	Barinas
9713013	El Pao	9,703	-68,414	179,50	978107,951	Cojedes
9714013	Hacienda San Rafael	9,728	-68,581	142,04	978104,915	Cojedes
9715013	La Pica	6,944	-67,614	35,95	978068,685	Apure

A estas 15 estaciones se le suman 2 bases gravimétricas (Mantecal y Achaguas), suministradas por PDVSA (Informa Mantecal 07G 2D 3C, Vol.III), la cuales sirvieron de apoyo en la región de Apure (Tabla 4. 2).

Tabla 4. 2. Bases gravimétricas suministradas por PDVSA Bielovenzolana.

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (m)	Gravedad Absoluta (mGal)	Estado
9716013	Achaguas	7,568	-68,422	61,00	978109,592	Apure
9717013	MANT001	7,576	-69,129	70,70	978113,079	Apure

Luego se procedió a la adquisición de estaciones ordinarias, dichas mediciones se ejecutaron cada 3 km de distancia en las rutas en dirección norte-sur y de 6 a 8 km en las rutas de dirección este-oeste, se tenía un tiempo determinado de 3 horas entre la apertura y el cierre de las mediciones dependiendo de las condiciones de acceso de la vía y el rendimiento. Para abarcar todas las rutas propuestas en el proyecto, se realizaron 3 campañas de adquisición:

La primera del 23 de abril del 2013 al 08 de mayo del 2013 en la cual, se obtuvo un total de 87 estaciones gravimétricas (de la estación 9000 a la estación 9087), con apertura y cierre en las bases de: San Juan de los Morros, Calabozo, El Sombrero y San Fernando de Apure. Se realizaron medidas en los puntos de control REGVEN (Tabla 4. 3).

Tabla 4. 3. Monumentos REGVEN.

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (m)	Gravedad (mGal)
9011	Palenque	8,15350267	66,9125348	95,70	978153,479
9015	GUA656	9,221934	67,033879	94,00	978154,149
9016	Parcela 180	8,77405158	67,5402025	64,30	978131,238
9027	GUA2404	8,02188889	67,0927778	54,00	978133,301
9030	Perico	8,12814953	67,0754191	30,96	978143,816
9083	Parapara	9,70536969	67,2893956	194,32	978120,538
9087	Gran estación	9,37737928	67,0528405	128,95	978133,953

Seguidamente se inicia la segunda campaña gravimétrica del 06 de junio al 25 de junio del 2013, en la cual se obtuvieron 250 estaciones gravimétricas (de la estación 9088 a la estación 9338) con apertura y cierre en las bases de: El Sombrero, San Carlos, El Pao, San Rafael de Onoto, Hacienda San Rafael, El Baúl, Papelón y Puerto Nutrias.

Por último, se realiza la tercera campaña gravimétrica que inicio el 30 de julio al 10 de agosto del 2013, en la cual se adquirieron 136 estaciones gravimétricas (de la estación 9339 a la estación 9474) con apertura y cierre en las bases de: San Fernando de Apure, Puerto de Nutrias, Elorza, Guasqualito y La Pica.

El total de las tres campañas de adquisición realizadas a la fecha, deja un saldo de 474 estaciones gravimétricas distribuidas en los Llanos Centro Occidentales de Venezuela (Figura 4. 4).

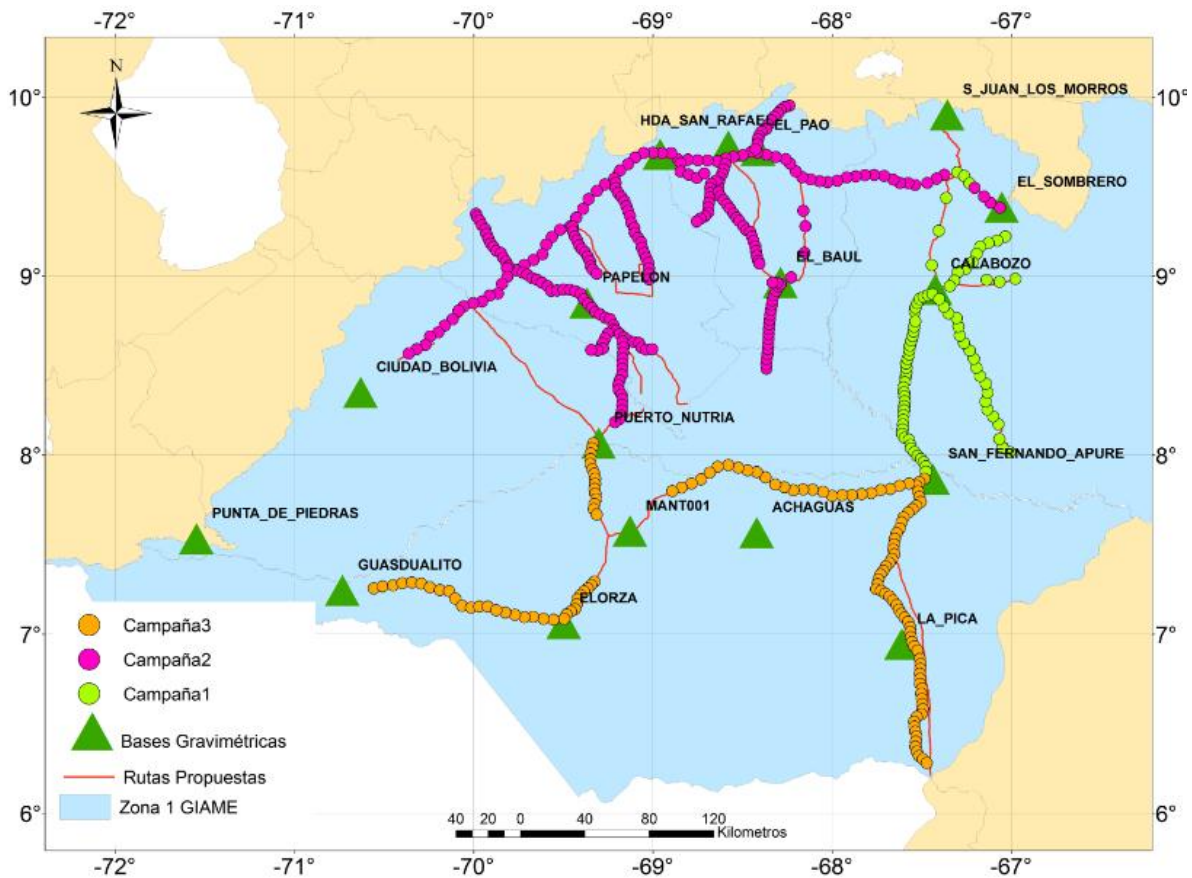


Figura 4. 4. Mapas de la zona de estudio indicando las adquisiciones gravimétricas de las campañas 1, 2 y 3.

4.4. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES GRAVIMÉTRICAS.

Además de las mediciones gravimétricas cada estación debe contar con su posicionamiento preciso, para lo cual se llevaron a cabo simultaneas mediciones, basadas en el uso del sistema satelital GNSS (Sistema Global de Navegación Satelital), sobre cada estación gravimétrica a fin de determinar sus coordenadas, empleando equipos y software GNSS de última generación (Figura 4. 5). Las operaciones estuvieron a cargo del servicio Geodésico de PDVSA Servicios Petroleros.



Figura 4. 5. Equipos geodésicos empleados y sus características.

La actual tendencia mundial del uso de los sistemas GNSS trae consigo la utilización de *Sistemas de Referencia Geocéntricos* asociados a elipsoides globales como es el caso de WGS84 o el sistema ITRS (Sistema de Referencia Terrestre Internacional), el cual es materializado en nuestro continente mediante el Datum SIRGAS.

La Tabla 4. 4 señala los parámetros empleados para vincular el Datum geodésico al Datum ITRF2008.

Tabla 4. 4. Datos de vinculación del Datum ITRF2008.

Parámetros	Características
Elipsoide	GRS80
Semi-eje mayor(a)	6378137 m
Achatamiento(f)	1/298,257222101

Proyección cartográfica	UTM
Huso	19N
latitud de origen (φ_0)	00° 00' 00" N
Longitud origen (λ_0)	69° 00' 00" W
Falso Este (FE)	500.000m
Falso Norte (FN)	0 m
Factor de escala (K)	0.9996

En 2002 se adoptó el ITRF como realización del WGS84, y en consecuencia, las coordenadas que se derivan actualmente de posicionamiento GNSS son, *coordenadas ITRF* y no *coordenadas WGS-84*. Esto significa que hoy día, cuando se mide con la técnica satelital GNSS suele afirmar que las soluciones de coordenadas están referidas al Datum ITRF actual.

El Datum ITRF2008 es la última solución (disponible desde mayo del 2010), en cuanto a sistema de referencia se refiere, establecido por Asociación Internacional de Geodesia (IAG, por sus siglas en ingles) y mantenido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencias (IERS, por sus siglas en ingles). El mismo se puede asumir que es compatible con el Datum SIRGAS-REGVEN (Datum oficial en Venezuela que está vinculado al ITRF94, época 95.4) pero poseen diferencias estrictas en cuanto a las realizaciones de los marcos de referencia y a la época de la materialización.

Dado que en Venezuela convergen (se encuentran) las placas del Caribe y Sur América, existiendo entre las dos una amplia zona de deformación que atraviesa el país a lo largo de las fallas geológicas de Boconó, San Sebastián y el Pilar, la dinámica tectónica genera variaciones anuales en las coordenadas geodésicas de las estaciones pasivas REGVEN. Por esta razón, se decidió no usar como sistema de referencia SIRGAS-REGVEN, ya que las diferencias con respecto al marco ITRF actual está en el orden de los $\pm 20\text{-}40$ cm. Adicionalmente, el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB),

mediante el *Plan Geodésico Nacional*, tiene contemplado la actualización, densificación y establecimiento del control geodésico nacional.

4.5. SISTEMA VERTICAL.

Para el levantamiento de las estaciones se utilizó la técnica satelital GNSS, las alturas provenientes de esta técnica están referidas a un elipsoide de referencia. Para llevar estas alturas de carácter geométrico a un carácter físico, o lo que es igual, para transformar las alturas elipsoidales a alturas ortométricas, referidas al Nivel Medio del Mar (NMM), se debe usar un Modelo Geoidal.

El modelo matemático empleado para las respectivas transformaciones se define a continuación:

$$H = h - N$$

Dónde: H = altura ortométrica (Empleada posteriormente en el cálculo de la corrección topográfica); h = altura elipsoidal, y N = ondulación o altura geoidal (Figura 4. 6).

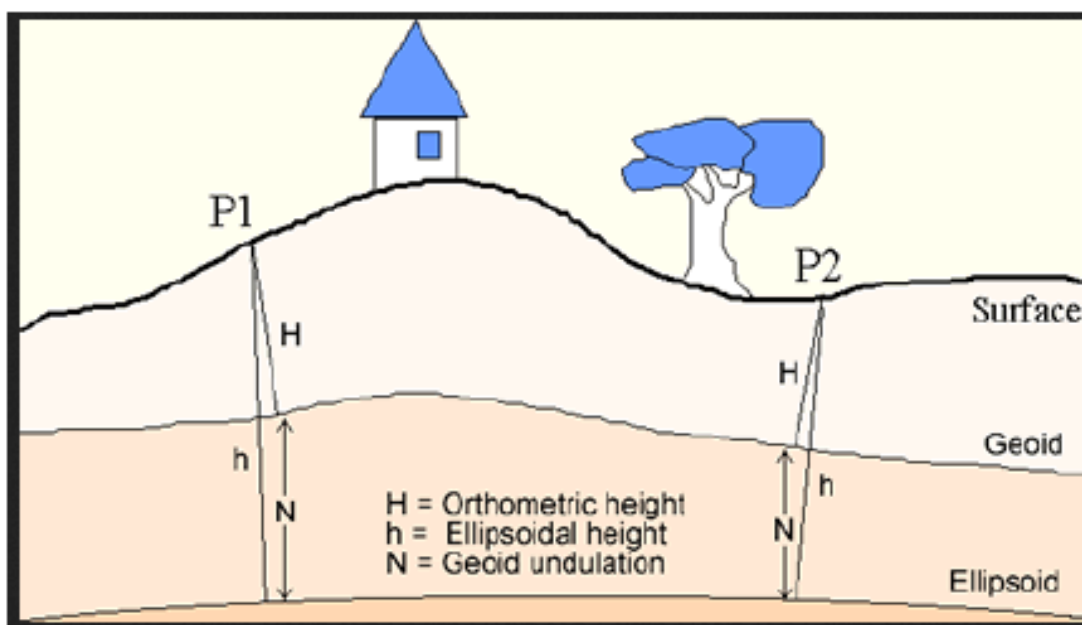


Figura 4. 6.Relación entre altura elipsoidal y altura ortométrica. (Tomado de: <http://kartoweb.itc.nl/geometrics/Bitmaps/relationships.gif>)

CAPITULO V

PROCESAMIENTO

- ❖ *Control de calidad*
- ❖ *Procesamiento de datos*
 - ❖ *Deriva instrumental*
 - ❖ *Gravedad corregida*
 - ❖ *Gravedad absoluta*
 - ❖ *Anomalía de Bouguer*
 - ❖ *Anomalía de aire libre*
 - ❖ *Análisis estadístico*
- ❖ *Procesamiento de las mediciones GNSS*

5. PROCESAMIENTO

5.1. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS ADQUIRIDOS.

Para garantizar un buen estudio gravimétrico, es necesario establecer algunos parámetros de adquisición que conlleven a una medición gravimétrica de buena calidad y un control geodésico con altos estándares, a continuación se presentaran los estudios previos del equipo para la toma del dato gravimétrico, todos estos estudios cotejados de acuerdo a las sugerencias del fabricante.

5.1.1. Deriva Diurna.

El 25 de abril del 2013 en la ciudad de Calabozo estado Guárico se inició la prueba de deriva diurna, iniciándose a las 05:36:11 y culminándose a las 17:35:53 (12 horas continuas de medición), para iniciar esta prueba el equipo presentó los Tilt entre 0,2 y 2, una desviación estándar menor a 0,1 y una temperatura sin cambios significativos a lo largo de la jornada, es necesario resaltar que se presentaron perturbaciones ambientales, producto del ruido cultural local, causantes del aumento de los Tilt a lo largo de la jornada de medición (Tabla 5. 1).

Tabla 5. 1. Valores presentado por el gravímetro CG-5, Serial: 40482.

			Estadística		
	Gravedad	SD	TILT X	TILT Y	TIDE
Máximo	4318,378	0,021	38,8	-16	0,198
Mínimo	4318,246	0,008	0,2	-2	-0,1
Promedio	4318,312	0,015	19,5	-9,0	0,049

Una vez culminada las mediciones para la deriva diurna se procedió al cálculo de la curva de gravedad vs el tiempo de medición (Figura 5. 1), lo que arrojó una curva de tipo sinusoidal con valores de gravedad que se muestran en ascenso.

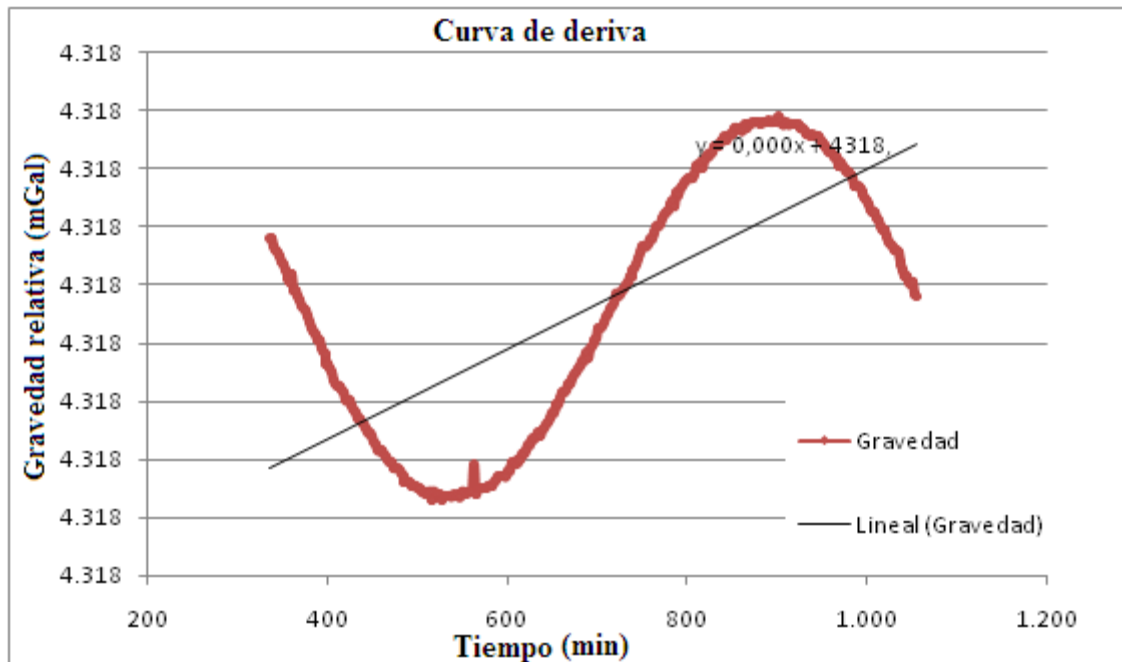


Figura 5. 1. Curva de gravedad relativa Vs el tiempo de medicion, para el calculo de la deriva diurna.

5.1.2. Corrección por Mareas.

El gravímetro CG-5 de la Scintrex incorpora dentro de su menú de opciones, una aplicación que permite hacer de forma automática, la corrección por mareas a las mediciones gravimétricas; dichas mediciones son validadas recurriendo a tablas publicadas regularmente y con anticipación para cada año por instituciones, como el programa Canadiense MEG SYSTEMS LTD.

Estas mediciones publicadas se concentran en la generación de tablas de correcciones de marea, que están espaciadas cada 10 minutos, donde el usuario define una fecha de inicio y la hora y el número de días que siguen, hasta un máximo de 10 días. El algoritmo utilizado es el de Longman, IM (1959), fórmulas para calcular la aceleración de marea debido a la luna y el sol. <http://www.megsystems.ca/webapps/tidecorr/tidecorr.aspx>

Con el programa canadiense se generó las tablas de marea, correspondiente al día 25 de abril del 2013, con una latitud de 8,6 y una longitud de -67,2 ambas coordenadas

pertenecientes a la ciudad de Calabozo estado Guárico, lugar donde se llevó a cabo la deriva instrumental de este equipo.

Con la tabla, se procedió a graficar la marea Vs tiempo, obteniéndose la curva de marea de la Ciudad de Calabozo (Figura 5. 2); posteriormente, se grafica la marea calculada por el gravímetro CG-5, serial: 081240482 (Figura 5. 3). Obsérvese que para cada hora, ambas mediciones presentan la misma curva, lo que comprueba el correcto funcionamiento del equipo para la corrección de la marea (Figura 5. 4). Por último, se muestra la curva de gravedad medida por el gravímetro empleado, con la corrección de marea incorporada.

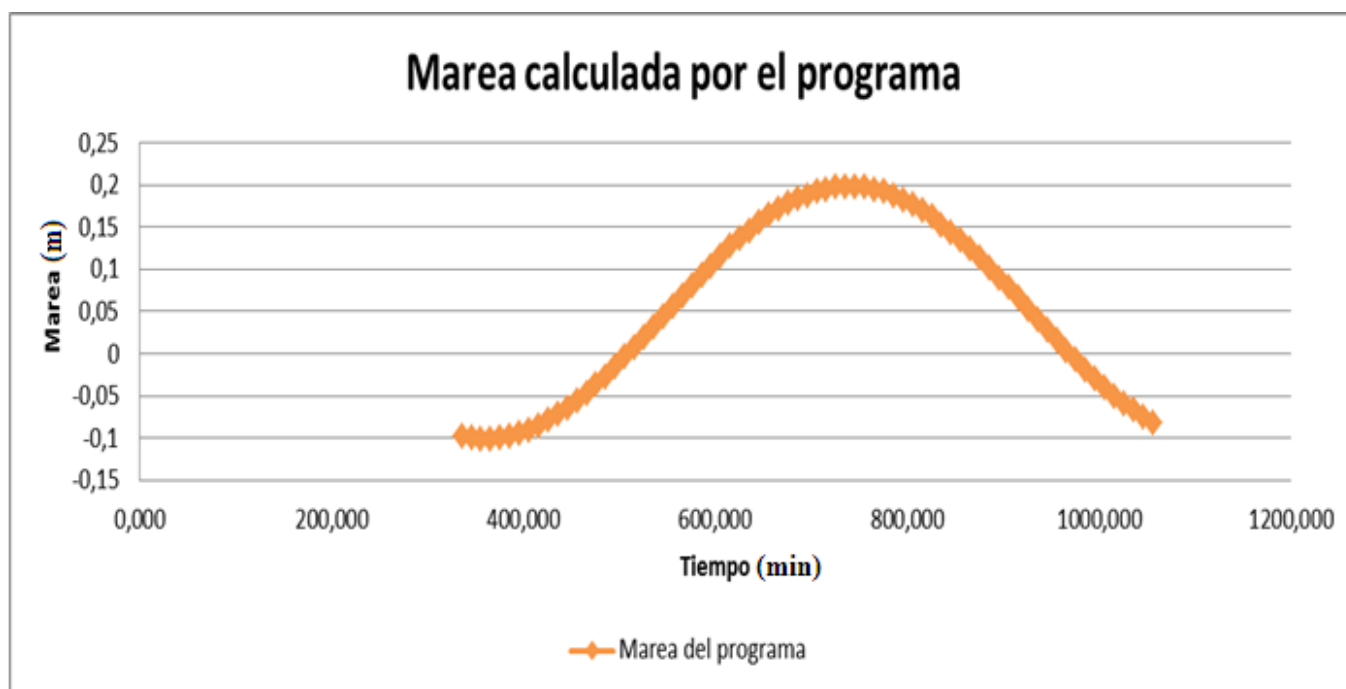


Figura 5. 2. Marea con GMT -4 Vs Tiempo de medición.

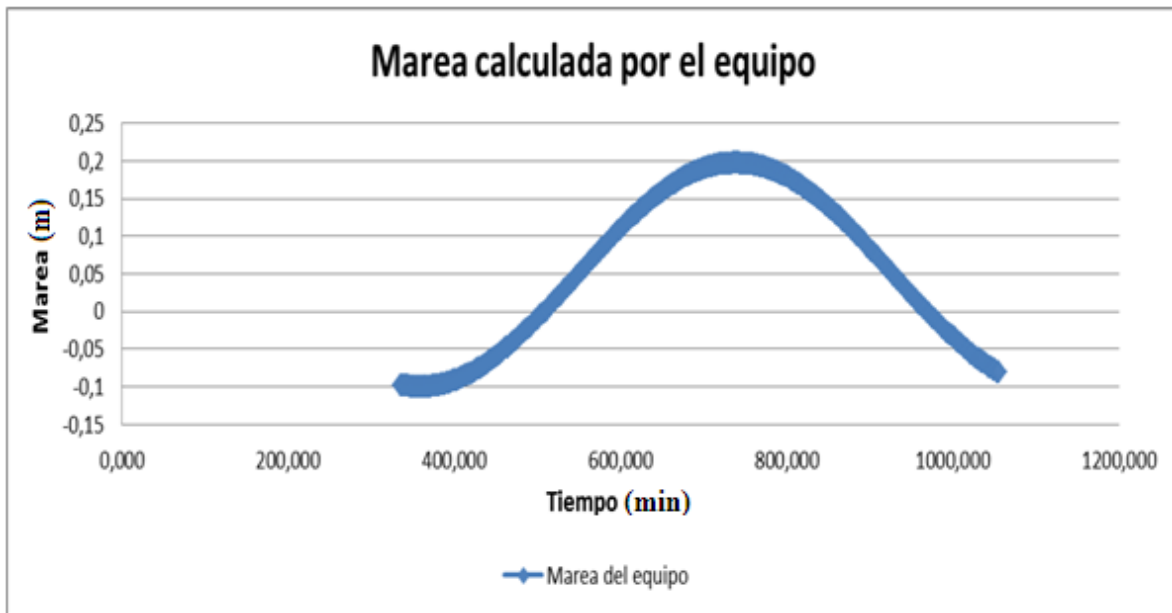


Figura 5. 3.Marea calculada por el gravímetro CG-5, serial: 081240482 Vs el tiempo de medición.

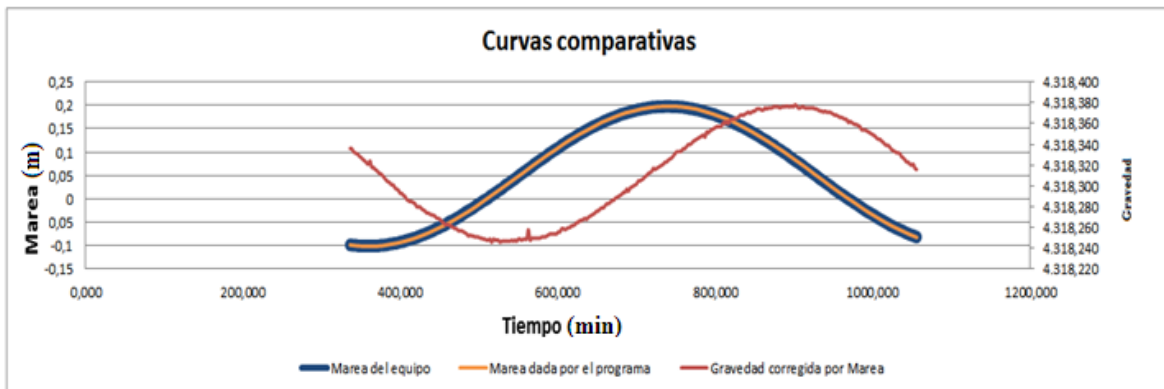


Figura 5. 4. Curvas de gravedad dada por el equipo (Rojo), marea calculada por el equipo (Azul) y la curva de marea dada por el servidor (Amarillo).

5.1.3. Deriva Mensual.

Para el cálculo de la deriva mensual, se tomó la base con mayor empleo a lo largo de las campañas gravimétricas, las cuales fueron, la base ubicada en la plaza Bolívar de Calabozo estado Guárico y la base ubicada en la plaza de Papelón en el estado Portuguesa, con 10 circuitos de medición entre los días 26/04 al 01/05 del 2013 en el caso de la Figura 5. 5A y del 17 al el 23 de junio del 2013 en el caso de la Figura 5. 5B.

Aunque el gravímetro es un instrumento simple y relativamente estable, produce deriva, es decir, las lecturas tienden a variar levemente con el pasar del tiempo; considerando su sensibilidad, el gravímetro es afectado por variaciones de temperatura y por fatiga de los mecanismos internos. Una manera de observar esta conducta, es analizando repetidas mediciones en una misma estación, en este caso las bases mencionadas; en intervalos de tiempo parecidos.

Las distintas mediciones realizadas en la estación base se grafican con respecto al tiempo transcurrido (en deriva mensual con respecto a la fecha). La deriva en el caso de la base de papelón presenta una tendencia paralela, es decir, por cada día de medición su comportamiento tiende a ser similar lo que indica estabilidad en el tiempo.

La misma observación se realizó para la base de Calabozo en el estado Guárico pero esta presentó un cambio brusco en el comportamiento estudiado, este salto entre los días 27 a 29 de abril se le atribuye mecanismo interno, específicamente enfriamiento del termo producto de la descarga del equipo gravimétrico.

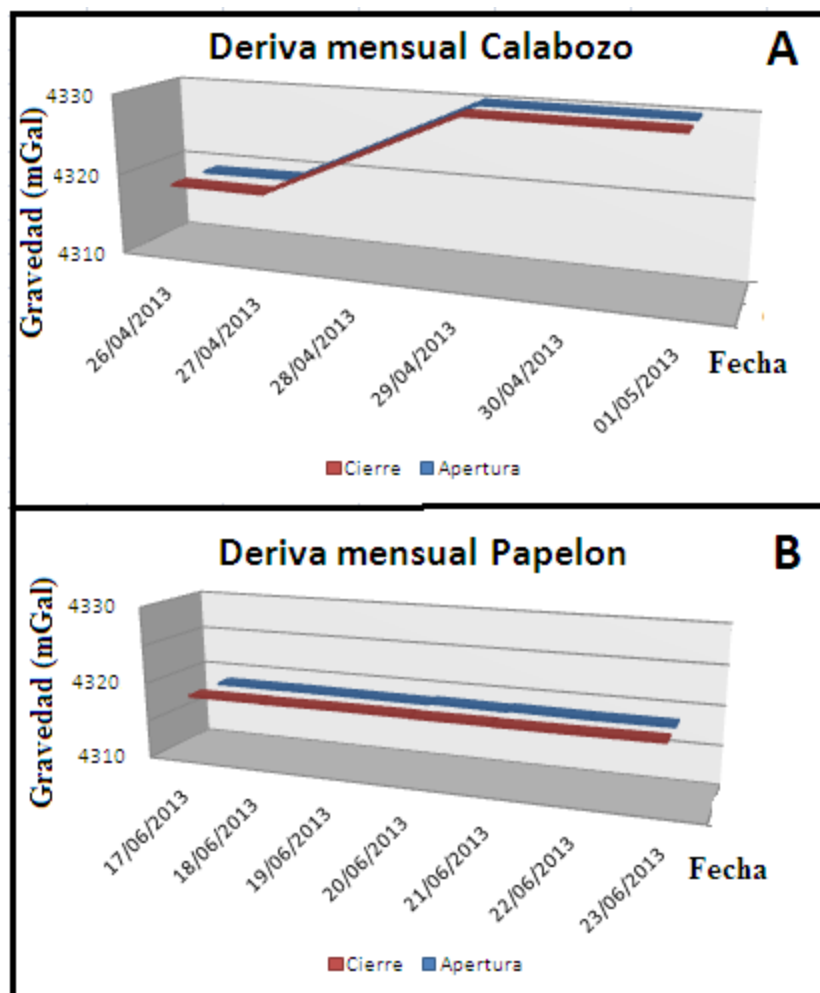


Figura 5. 5. Deriva mensual del gravímetro Scintrex serial: 40482. (A) correspondiente a mediciones respecto a la base de Calabozo. (B) Correspondiente a la base de papelón.

5.1.4. Calibración Vertical.

La prueba de calibración vertical se llevó a cabo el día 13 de noviembre en las escaleras de emergencia de la Facultad de Arquitectura, de la Universidad Central de Venezuela de Caracas.

Se siguió el procedimiento estándar, tomando en cada piso las lecturas de gravedad relativa, los datos fueron corregidos, por deriva y marea. En la Figura 5. 6, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones realizadas, mostrando en general la tendencia esperada de acuerdo a la ecuación de Moritz *et al.* 1980 (Ecuación adecuada según El sistema de referencia geodésico, basado en la teoría del elipsoide equipotencial geocéntrico,

la cual contiene los valores más apropiados en los cálculos geodésicos y geofísicos) (Figura 5. 7).

Los resultados muestran las gravedades dentro del rango de dispersión en relación al desarrollo de la calibración vertical.

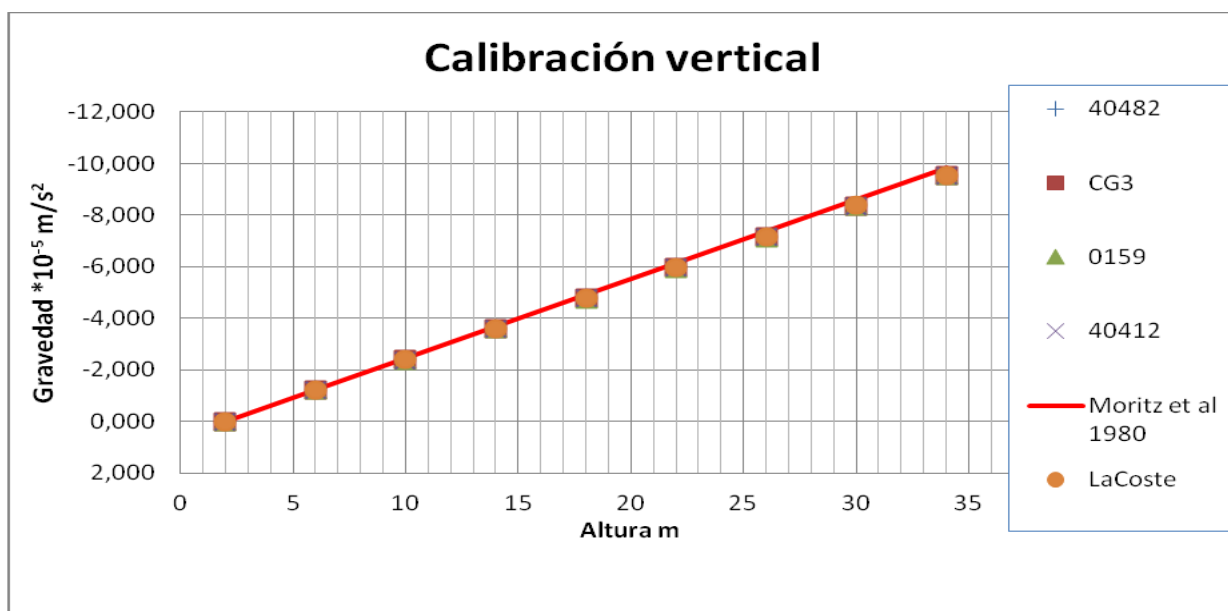


Figura 5. 6. Grafica de Calibración vertical donde se muestra la tendencia del gravímetro 40482. (González & Sánchez 2012)

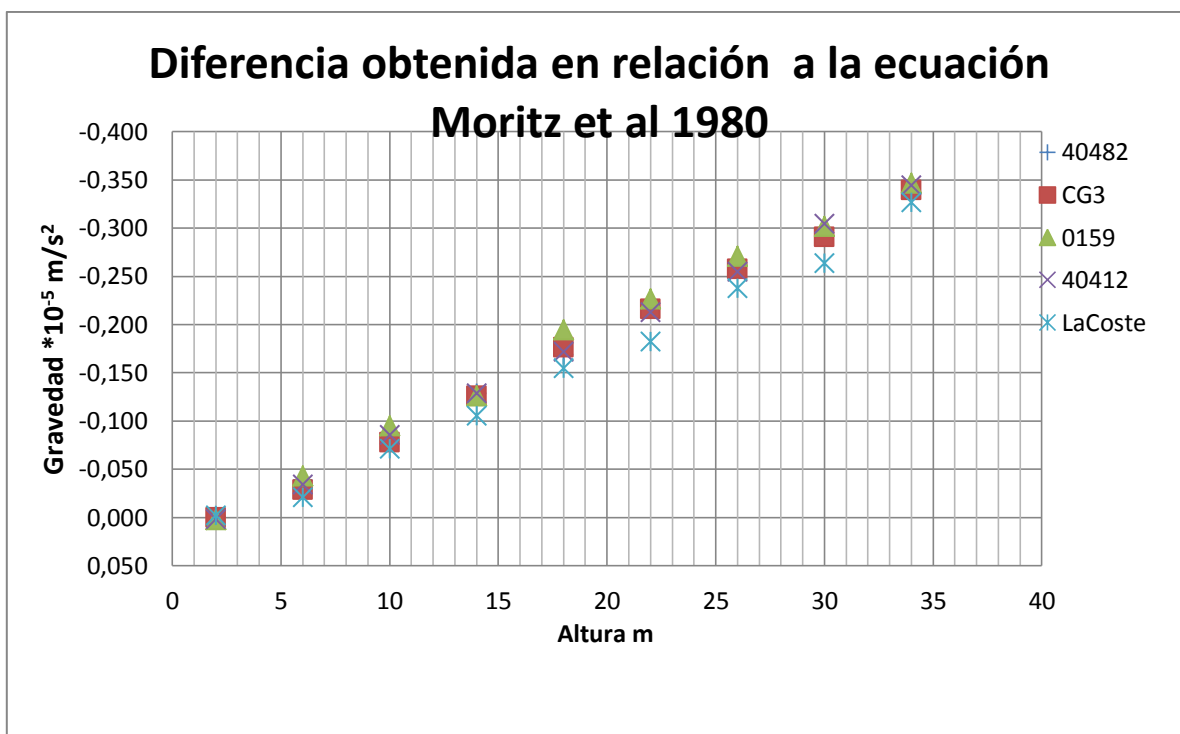


Figura 5. 7. Gráfica de diferencia de lecturas obtenidas en relación a la ecuación de Moritz 1980. (González & Sánchez 2012)

Los resultados obtenidos por los equipos, en la estación gravimétrica Santa Inés, fue un valor promedio de 978051.060 ± 0.010 mGals, resultando ser una estimación muy aproximada al cálculo publicado por Moritz *et al.* 1980 sobre mediciones de estaciones de la red gravimétrica nacional de Venezuela.

5.1.5. Calibración horizontal entre estaciones bases.

Para seguir con los estudios enmarcados dentro de lo que describe como control de calidad, se realizó una prueba de calibración, que consistió en medir con diferentes gravímetros (entre ellos el gravímetro 40482), la gravedad de Santa Inés, cuya gravedad es conocida y documentada por diferentes autores.

En esta sección se procedió a realizar las medidas entre estaciones bases gravimétricas siguiendo los circuitos Cagigal- Santa Inés- Cagigal (Tabla 5. 2), los circuitos se realizaron dos veces con cada gravímetro.

Tabla 5. 2. Muestra datos de referencia de las bases gravimétricas utilizadas.

Nombre	Latitud_grados	Longitud_grados	h_m	Gravedad_mGal
Cajigal	10.51	-66.930	1042.00	978024.695 ±0.07
Santa Inés	10.51	-66.922	914.16	978051.020± 0.1

La respuesta conseguida en la mayoría de los gravímetros se dispone dentro del rango reportado en la Red Gravimétrica Nacional para la base Santa Inés (Santa Inés) (978051.020 ±0.100 mGal). Al realizar una observación, notamos una tendencia promedio de la gravedad observada determinada para Santa Inés, cuyo valor es muy aproximado al reportado en el trabajo presentado por Drewes *et al.* (1991), siendo este 978051.043 ±0.08.

Estos resultados permiten: 1) mostrar el buen funcionamiento de los equipos. 2) comprobar que los valores de gravedad corregida (gCorr) están dentro de los valores determinados para Santa Inés. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

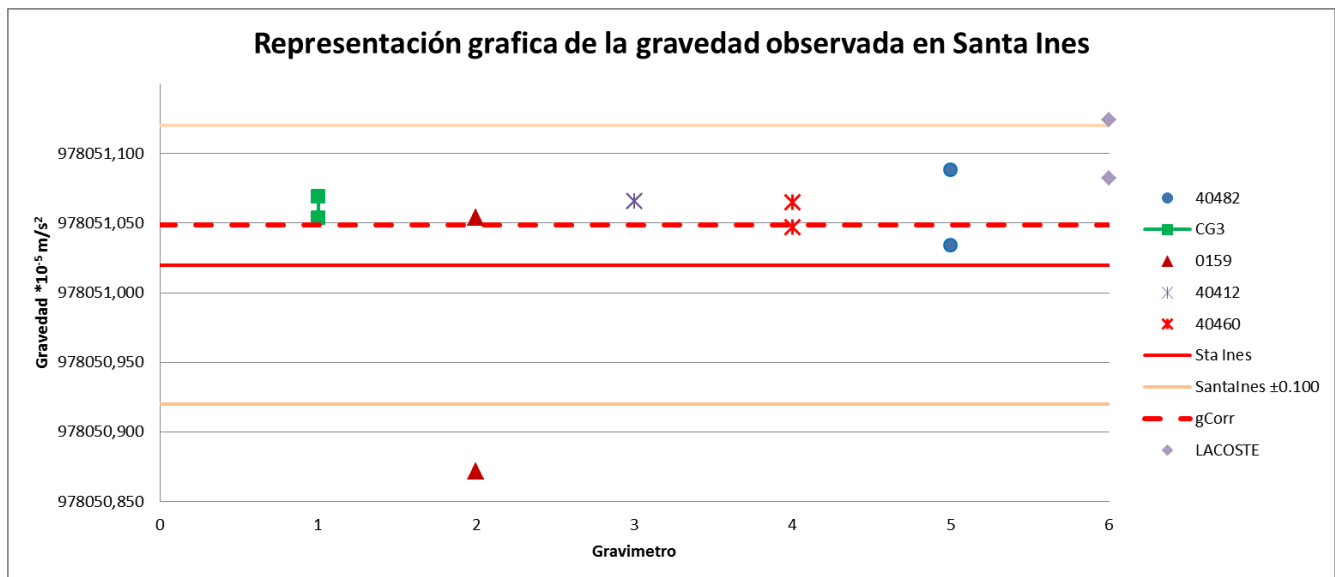


Figura 5. 8. Gráfica de los resultados obtenidos con diferentes gravímetros. (González & Sánchez 2012)

5.1.6. Control de calidad de las mediciones GNSS.

El control de calidad de las mediciones en cualquier trabajo de producción o investigación es fundamental, ya que es la única manera de comprobar que los resultados que se están obteniendo son óptimos y se encuentran dentro de las tolerancias especificadas en el proyecto.

Entre los requerimientos del proyecto para las mediciones geodésicas se debe garantizar que las coordenadas finales tengan una calidad mejor a 1 m. Para ello, se realizaron medición estática rápido bajo los parámetros establecidos sobre estaciones REGVEN cuyas coordenadas están bien definidas y ubicadas cerca de los circuitos (Tabla 5. 3).

Tabla 5. 3. Estaciones de observación empleadas para el control de calidad de las mediciones estático rápido.

Puntos con coordenadas conocidas-REGVEN				
Nombre	Este (m)	Norte (m)	h (m)	Exactitud ITRF 94 95,4
AMUAY	370551,877	1299470,54	7,828	REGVEN ORDEN B (± 2 cm)
GUAFILLA	408082,676	992780,997	142,105	REGVEN ORDEN C (± 5 cm)

La estación AMUAY ubicada en el estado Falcón pertenece al marco de referencia nacional que materializa a REGVEN y está clasificada por el Instituto Geográfico Simón Bolívar como orden B, lo cual indica que su calidad está en el orden de los ± 2 cm. La estación GUAFILLA (GUAF) ubicada en Portuguesa pertenece también a REGVEN y está clasificada como orden C, ± 5 cm.

Previo a la comparación entre las coordenadas medidas en el proyecto y las conocidas REGVEN fue necesario realizar la actualización de coordenadas o transformación al ITRF y a la época de referencia deseada. Esto debido a que las coordenadas de los vértices REGVEN están referidas al ITRF 94 época 95.4 y las medidas están en el ITRF 08 época 13.5.

Realizadas la correspondiente actualización de coordenadas se procedió a la comparación de las mismas (tabla 5.4), las cuales, presentaron diferencias de coordenadas dentro del promedio de 0.25 m para la componente este y de 0.29 para la componente norte ambas dentro de la tolerancia establecida para el proyecto.

Tabla 5. 4.Diferencias de coordenadas

Diferencias de coordenadas			
Nombre	DE(m)	DN(m)	Dh(m)
AMUAY	-0,261	-0,167	0,102
GUAFILLA	-0,246	0,292	0,029

Adicionalmente se tomaron algunas observaciones procesadas de modo diferencial con el LGO y se enviaron al CRSR-PPP, los resultados arrojados también cumplieron con las tolerancias exigidas.

En general, la calidad final de las coordenadas siempre fueron mejor a ± 1 m en un 95% de las estaciones levantadas. El 5% de las mediciones está fuera de las tolerancias establecidas debido a las obstrucciones en las observaciones por alta vegetación y líneas eléctricas en las vías.

5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS.

El procesamiento de los datos gravimétricos se inicia con la descarga de los archivos. A continuación la Figura 5. 9 muestra esquemáticamente como se llevó a cabo este proceso. De igual forma, se requirió la ayuda de diferentes herramientas computacionales, la Figura 5. 10 ejemplifica alguna de ellas.

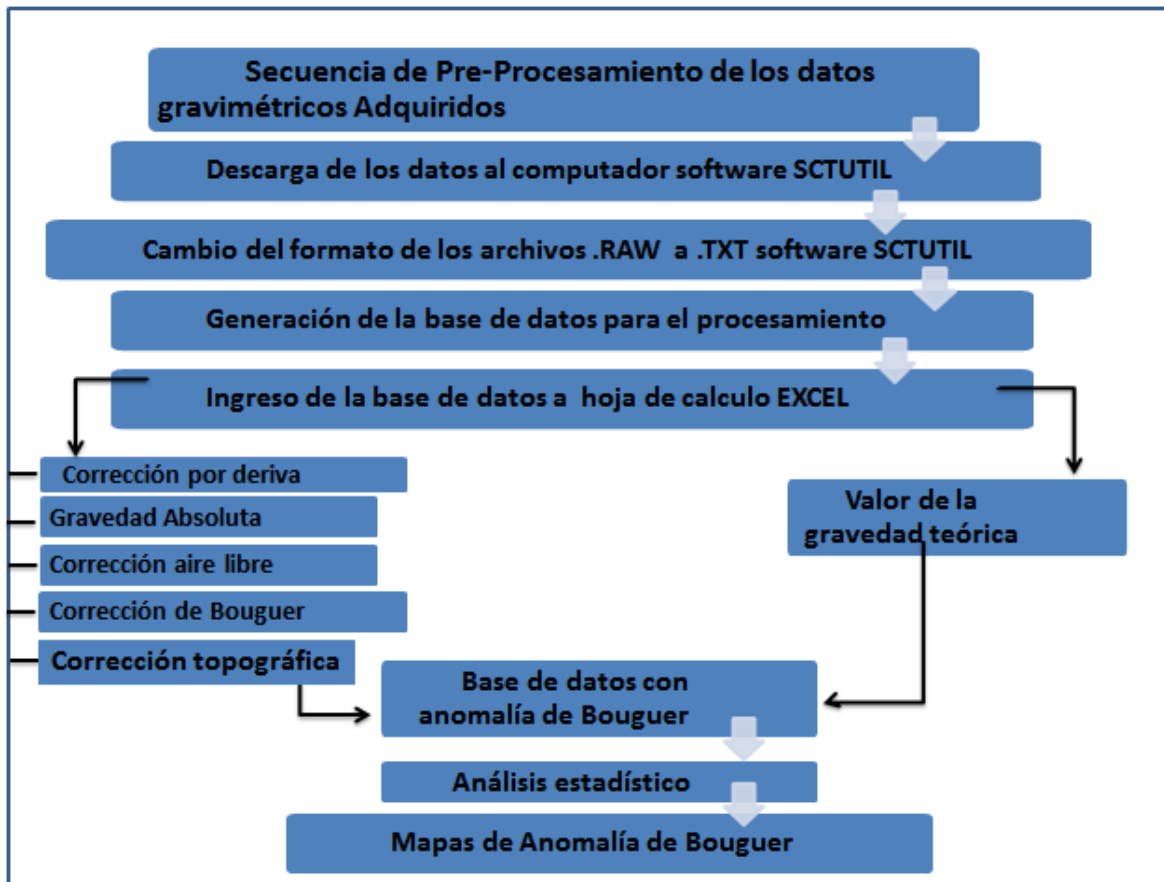


Figura 5. 9. Secuencia de procesamiento de los datos.

Una vez obtenido el dato gravimétrico, con todos los ajustes previos del control de calidad, se procede a la descarga y organización del mismo, todo esto con la ayuda del software SCUTIL y la herramienta computacional Microsoft Excel 2010.

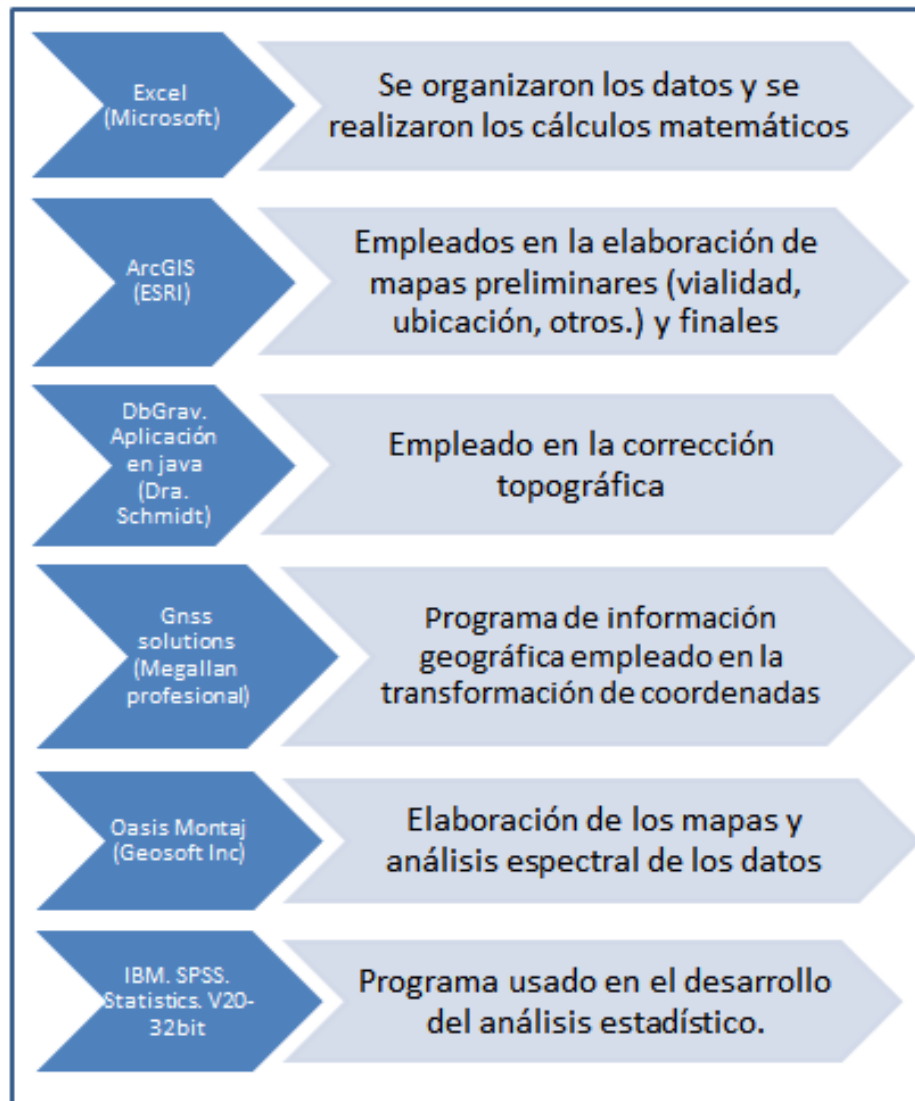


Figura 5. 10. Diagrama de programas empleados y su utilidad.

Seguidamente, se desarrollan cálculos asociados a la distribución del error de la deriva instrumental, para luego corregir la gravedad y por último, se amarran los datos por circuito de medición, a una gravedad absoluta conocida de primer orden, en este caso se tiene la de Santa Inés (Tabla 5. 5).

Tabla 5. 5. Datos de la base de Santa Inés.

Nombre	Latitud (grados)	Longitud (grados)	H (m)	Gravedad (mGal)
Santa Inés	10.51	-66.922	914.16	978051.043 ±0.08

5.3. DERIVA INSTRUMENTAL.

Haciendo uso de la ecuación 5, se presenta el siguiente cálculo de muestra de la deriva instrumental, correspondiente al levantamiento del día 01/04/2013 cuyo circuito se contempló entre: Santa Inés- San Juan- El Sombrero- Santa Inés.

$$\text{Deriva} = (4202,159 - 4202,128) / -641,833 = \mathbf{-0,0000493898}$$

5.4. GRAVEDAD CORREGIDA.

Una vez obtenida la deriva instrumental, se procede a corregir la lectura haciendo uso de la ecuación 6, la cual se ejemplifica a continuación:

$$\text{Lectura}_{\text{Estación Corregida}} = 4217,267 + (-236,217) * (-0,0000493898) = \mathbf{4217,279}$$

5.5. GRAVEDAD ABSOLUTA.

Para obtener la gravedad absoluta de una estación, en este caso para la base de El Sombrero, se prosigue con el amarre gravimétrico, el cual consiste en determinar un delta de la gravedad corregida y luego compensar el déficit (sumar o restar dicho delta) ya sea por encima o por debajo a la gravedad a la cual se esté amarrando (San Inés), dependiendo de la variación gravimétrica. Ejemplo:

Con un delta de gravedad corregida de 80,738 se le suma a la gravedad absoluta de Santa Inés 978051,043 mGal para compensar el error presentado debido a la variación de las medidas a través de la jornada de medición, obteniéndose un valor de: 978131,781 mGal para la gravedad de El Sombrero, esto con el gravímetro 40482.

La gravedad absoluta será el promedio de las gravedades arrojadas por cada gravímetro (Tabla 5. 6) o por cada circuito, ejemplo: con el gravímetro 40482 se obtuvo para la base de El Sombrero el siguiente valor de gravedad: 978131,781 mGal, con el gravímetro 40460 se obtuvo una medición de 978131,803 mGal y con el gravímetro 40412 se obtuvo la medición de 978131,810 mGal, cuyo promedio arrojó un valor de gravedad absoluta de 978131,798 mGal. Este mismo procedimiento se empleó para el cálculo de todas las bases

gravimétricas levantadas en el proyecto, a excepción de las suministradas por PDVSA (Tabla 5. 7).

Una vez obtenida las gravedades absolutas para las bases, se procede a ejecutar estos mismos procedimientos para cada uno de los circuitos correspondientes a las estaciones ordinarias adquiridas en campo.

Tabla 5. 6. Gravedades absolutas obtenidas, con el uso de los 3 gravímetros CG-5.

Código	Nombre	Tipo	Latitud	Longitud	Altura (m)	Grav. Absoluta	Estado
9700013	Santa Inés	RGNV70	10,51	-66,922	914,16	978051,043	Caracas
9701013	San Juan de los Morros	RGNV70	9,902	-67,358	428,00	978068,600	Guárico
9702013	El sombrero	RGNV70	9,385	-67,055	158,00	978131,798	Guárico
9703013	San Rafael de Onoto	RGNV70	9,681	-68,961	138,00	978104,383	Cojedes
9704013	Calabozo	RGNV70	8,927	-67,427	98,00	978154,149	Guárico
9705013	San Fernando	RGNV70	7,867	-67,440	48,00	978123,473	Apure
9706013	Papelón	RGNV70	8,851	-69,370	106,00	978108,468	Portuguesa
9707013	El Baúl	RGNV70	8,965	-68,289	138,00	978168,479	Cojedes
9708013	Puerto Nutrias	RGNV70	8,068	-69,304	79,00	978111,489	Barinas
9709013	Punta de Piedras	RGNV70	7,533	-71,548	175,59	978001,321	Táchira
9710013	Elorza	RGNV70	7,060	-69,499	84,32	978065,888	Apure
9711013	Guasdalito	RGNV70	7,245	-70,734	119,56	978069,502	Apure
9712013	Ciudad Bolívar	RGNV70	8,350	-70,632	222,00	978029,003	Barinas
9713013	El Pao	RGNV70	9,703	-68,414	179,50	978107,951	Cojedes
9714013	Hacienda San Rafael	RGNV70	9,728	-68,581	142,04	978104,915	Cojedes
9715013	La Pica	RGNV70	6,944	-67,614	35,95	978068,685	Apure

Tabla 5. 7. Gravedades absolutas suministradas por PDVSA.

Código	Nombre	Tipo	Latitud	Longitud	Altura (m)	Grav. Absoluta	Estado
9716013	Achaguas	SIRGAS REGVEN	7,568	-68,422	61,00	978109,592	Apure
9717013	MANT001	SIRGAS REGVEN	7,576	-69,129	70,70	978113,079	Apure

Luego de obtener las gravedades observadas de las 474 estaciones ordinarias, adquiridas a lo largo de las 3 campañas gravimétricas correspondientes al proyecto GIAME en ejecución, se procede al cálculo de la anomalía de Bouguer empleando las ecuaciones de segundo orden.

Como un aporte del desarrollo de este trabajo, se dispuso integrar datos gravimétricos de otras campañas, impulsadas por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y Petróleos de Venezuela, Sociedad Anónima (PDVSA). De ellas se obtuvieron ubicación (longitud y latitud), altura y gravedad observada de cada punto de medición (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); a partir de esta información, se inicia el cálculo de la anomalía de Bouguer.

5.6. ANOMALÍA DE BOUGUER.

El cálculo de la anomalía de Bouguer se realizara bajo un nuevo procedimiento de reducción, que incorpora los resultados a los estándares de las bases de datos de gravedad internacional, lo que mejora la precisión y utilidad de la geofísica respecto a las anomalías de gravedad.

Los cambios en los procedimientos de reducción minimizan los errores atribuibles al terreno, curvatura de la tierra, los gradientes verticales de gravedad, efectos de masa atmosférica, y las diferencias entre la gravedad y el datum normal de la estación. Su uso consistente mejora la exactitud y la precisión de anomalías de la gravedad, especialmente en sus componentes de longitud de onda larga. La diferencia más significativa en los procedimientos revisados es el uso del elipsoide como el datum vertical y no a nivel de mar utilizada convencionalmente. Esto conduce a aminorar, las diferencias en los valores absolutos de anomalías, que pueden causar confusión con los datos de gravedad anteriores.

5.6.1. Cálculo de la corrección aire libre (Hc).

Haciendo uso de la ecuación 8 y con la herramienta computacional Excel 2010, se lleva a cabo el cálculo de la corrección aire libre, para la estación 9001, obteniéndose:

$$Hc=((0,3087691-(0,0004398*((\text{SENO}(\text{RADIANS}(9,222512972)))^2)))*199,609)+7,2125*(10^{-8})*(199,609^2)$$

Hc=-61,632

5.6.2. Cálculo de la corrección topográfica.

Las medidas de gravedad observadas en campo se encuentran afectadas por la influencia de las elevaciones y depresiones presentes en la topografía, cercanas a la estación gravimétrica en medición.

La corrección topográfica es la encargada de corregir los efectos causados por estas variaciones en el terreno; para ello, se contó con la herramienta computacional DbGrav (Aplicación en JAVA). Este programa requiere como datos de *entrada* un modelo topográfico regional, el cual se usó los Modelos Digitales de Elevación (*Digital Elevation Model, DEM*), generados de la Misión Topográfica del Radar *Shuttle* (*Shuttle Radar Topography Mission, SRTM*) con resolución de 90m (SRTM DEM 90m), el cual fue obtenido a través de la página de internet del Servicio de Investigaciones Geológicas de los Estados Unidos (*U.S. Geological Survey, U.S.G.S.*); y un modelo de topografía local, el cual fue aportado por el levantamiento de las estaciones gravimétricas de este proyecto.

Ambos archivos deben ser llevados a la aplicación de Java, las mismas deben estar referidas a alturas ortométricas; mediante la aplicación del software *GNSS solution*, se hizo posible la conversión de alturas de elipsoidales a ortométricas, en el caso de la topografía local, puesto que ya los archivos SRTM DEM 90 están referidos a ese sistema.

Esta aplicación, lee los datos de gravedad y sus coordenadas de un archivo .TXT, y carga los datos topográficos de un archivo de extensión .GRD, el cual es creado por el programa *Surfer*. Con estos dos archivos, genera otro archivo de salida con extensión .TXT, que incluirá los datos de corrección batimétrica y topográfica a los datos de gravedad original.

5.6.3. Cálculo de la corrección Bouguer (C_B).

Haciendo uso de la ecuación 10, con una densidad representativa de $2,67 \text{ Mg/m}^3$ y con la herramienta computacional Excel 2010, se lleva a cabo el cálculo de la corrección de Bouguer, para la estación 9001, obteniéndose:

$$C_B = 2 * 3,14 * 2670 * 6,6725985 * 10^{(-11)} * ((-3,133E-05 * 199,61) - (3,2 * (6371000 + 199,61)))$$

$$C_B = 22,6141777$$

5.6.4. Cálculo de la gravedad teórica (Gteo).

Haciendo uso de la ecuación 12 y con la herramienta computacional Excel 2010 se realiza el cálculo de la gravedad teórica para la estación 9001, obteniéndose:

$$G_{teo} = 978032,67715 * \frac{(1 + 0,001931851353 * \sin^2(9,222512972))}{\sqrt{1 - 0,0066943800229 * \sin^2(9,222512972)}}$$

$$G_{teo} = 978165,31 \text{ mGal}$$

5.6.5. Cálculo de la corrección atmosférica (Ac).

Haciendo uso de la ecuación 13 y con la herramienta computacional Excel 2010, se lleva a cabo el cálculo de la corrección atmosférica, para la estación 9001, obteniéndose:

$$Ac = (0,874) - (((9,9) * (10^{-5})) * 199,609) + ((3,56) * (10^{-9}) * (199,609^2))$$

$$Ac = 0,854$$

5.6.6. Cálculo de la anomalía de Bouguer (Ab).

Haciendo uso de la ecuación 15 y con la herramienta computacional Excel 2010, se lleva a cabo el cálculo de la anomalía de Bouguer de segundo orden, para la estación 9001, obteniéndose:

$$Ab = 978127,028 + (-61,632 - 22,614 + 0,093 + 0,854) - 978165,31$$

$$Ab = 1,682 \text{ mGal}$$

5.7. ANOMALÍA DE AIRE LIBRE.

5.7.1. Cálculo de la anomalía de aire libre (Aal).

Haciendo uso de la ecuación 14 y con la herramienta computacional Excel 2010, se lleva a cabo el cálculo de la anomalía de Aire Libre, para la estación 9001, obteniéndose:

$$Aal = 978127,028 + -61,632 + 0,854 - 978165,31$$

$$Aal = 24,203 \text{mGal.}$$

Una vez obtenida la Anomalía de Bouguer, se cargan los datos en el software Oasis Montaj (Figura 5. 11), estos datos deben contener el nombre de la estación, las coordenadas (longitud y latitud) y los valores de la Ab, los cuales deben presentar formato .TXT. Estos datos, deben ser incorporados en el archivo DATABASE del Oasis, para poder iniciar la creación de *GRIDs* o mallados. Como la adquisición de los datos se realizó de manera aleatoria siguiendo rutas de vialidad y no tendencias lineales, se emplea el algoritmo de interpolación que cubre tanto adquisiciones aleatorias como líneas, en este caso *Curvatura Mínima*, la cual, genera una superficie análoga a una placa delgada y elástica que pasa por cada uno de los puntos. La base de su funcionamiento es la repetición del mallado, por medio de una ecuación independiente de iteraciones hasta que el mallado se suaviza lo más posible. Cada iteración es un mallado creado. Un parámetro importante para la realización de un mallado es el intervalo de muestreo, que se basa en la teoría de Nyquist, la cual establece que la información completa de la señal original está descrita por la serie total de muestras que resultaron del proceso de muestreo, es decir, para representar una señal original es necesario representar el intervalo de muestreo original como tal. De esta manera para crear un mallado que no perturbe la información original, es necesario crear la celda en base a un intervalo de muestreo que obedezca a la fórmula de $N=1/2d$ donde **d** es el tamaño del intervalo de muestreo.

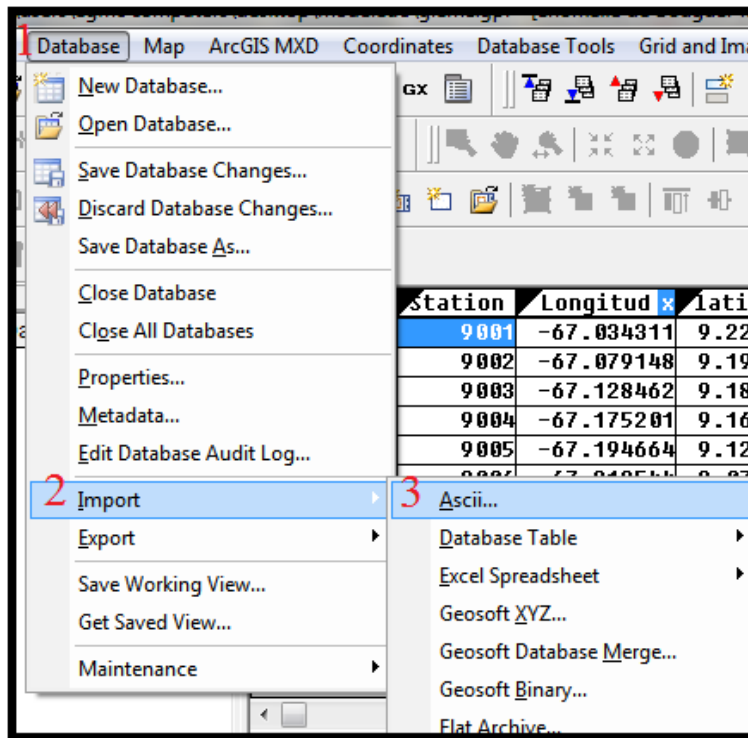


Figura 5. 11. Importar los datos al programa Oasis.

Para elaborar los Grid, se siguen los comandos de COORDINATES – SET CURRENT X,Y,Z COORDINATES, y en la ventana de: SET CURRENT X,Y CHANNELS se indica en que orden deben ubicarse las coordenadas, seguidamente se vuelve a los comandos de COORDINATES – SET PROJECTION y alli se aplica el orden de proyeccion en la cual debera coordinarse el grid (Figura 5. 12).

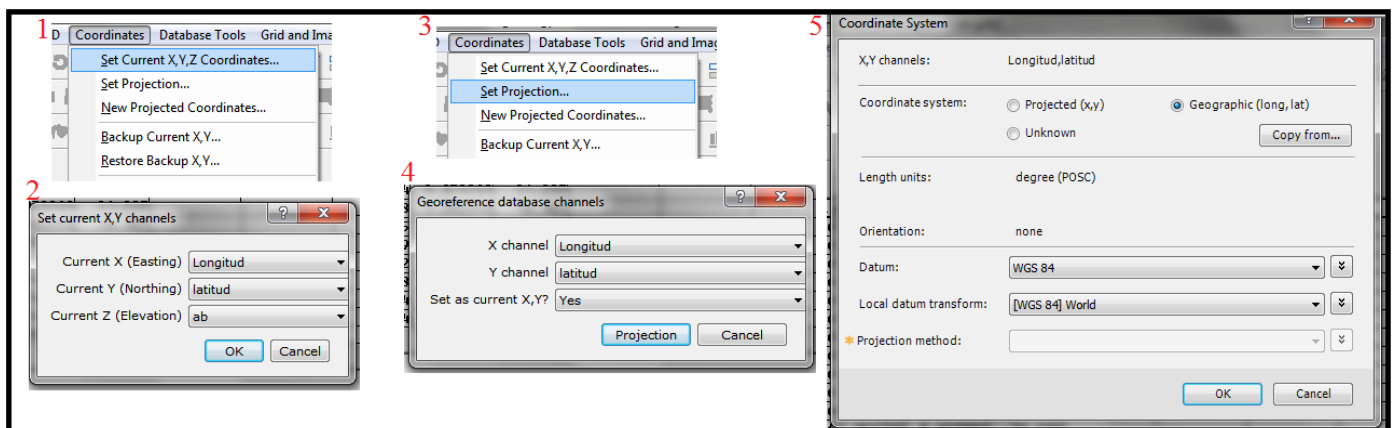


Figura 5. 12. Proyeccion de los datos.

Luego de proyectar los datos al sistema de coordenadas deseado, se procede a desarrollar el grid con los comandos de GRID – MINIMUM CURVATURE e inmediatamente se visualiza el grid del mapa de anomalía de Bouguer. Para incorporarle formato a las coordenadas, escala, y norte se usan los comandos de MAP TOOLS – BASE MAP –DRAW BASE MAP y seguidamente se obtendra un mapa de anomalías de Bouguer; si se desea visualizar leyenda y las estaciones adquiridas se recurre al paso 5 de la Figura 5. 13.

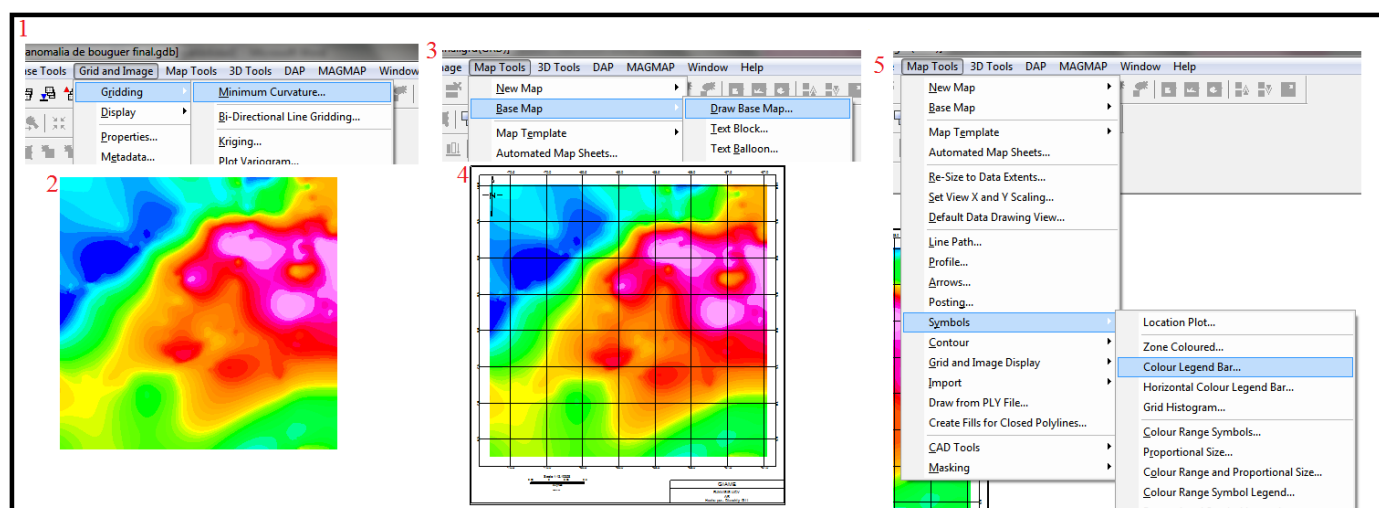


Figura 5. 13. Elaboracion de los mapas.

5.8. APLICACIÓN DE FILTROS.

Luego de obtener la Anomalía de Bouguer (AB) y con la finalidad de interpretar los resultados obtenidos en un contexto geológico, se procede con el uso de herramientas computacionales que permitan resaltar los rasgos visualización y faciliten una interpretación de los datos, estas se basan en la separación o realce de las anomalías según la posible fuente que los genera.

Se realiza la remoción de las tendencias regionales del mapa en el dominio del espacio, complementando y expandiendo los espacios interpolados en el mallado con valores armónicos, adecuando las dimensiones de la información a un sistema operable por la transformada de Fourier, transformando del dominio del espacio al dominio del número de

ondas. Se empleó el uso de los filtros, seguidamente el programa realiza la transformada inversa de Fourier, donde los filtros son nuevamente llevados al dominio del espacio, para finalmente reponer los datos filtrados al tamaño original de la malla y restaurar la tendencia regional del mapa final.

Dentro de los mapas de anomalía de Bouguer se presentan un conjunto de señales provenientes de diversas fuentes geológicas, algunas a gran escala y otras a pequeños rasgos, ambas observables a través de la gravimetría.

DERIVADA DIRECCIONALES

Las derivadas verticales y horizontales realzan y ayudan a mejorar la visualización de señales provenientes de fuentes que pueden ser delimitadas dimensiones en profundidad y extensión lateral. Las señales de este tipo de fuentes suelen ser opacadas por el efecto ocasionado por otras fuentes de mayores extensiones y espesores en profundidad, ubicados a mayores profundidades. Esto se traduce en el realce en el mapa de anomalías de la señal de fuentes más pequeñas y someras, lo cual ayuda al delineamiento y definición de estas estructuras menores.

Bajo este principio, se decidió realizar el filtrado de los mapas de Anomalías de Bouguer aplicando derivadas direccionales en dirección vertical, generando los mapas de primera y segunda derivada vertical, por medio del uso del módulo MAGMAP del programa Oasis Montaj, versión 1.0.1, bajo el procedimiento descrito en la sección 4.3.1.

5.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

El análisis estadístico de los datos pretende describir la totalidad de una población de datos, partiendo de la selección de una muestra, a la cual se le aplicarán medidas de tendencia central, medidas de dispersión, histogramas de frecuencias y gráfico normal Q-Q; estos son puntos representativos de una distribución, que ayudarán a ubicarlos dentro de una escala de medición, su valor radica en anticipar el comportamiento de la población a partir de una muestra. Los datos adquiridos y procesados, fueron analizados mediante el

software especializado *Statistical Package for Science (SPSS)* versión 20, con la finalidad de examinar la calidad de la población y resumir toda la información registrada.

La Tabla 5. 8 muestra el total de datos analizados en la población; 453 datos, 21 menos de la totalidad de la data adquirida, puesto que se hizo una discriminación por estaciones gravimétricas con alturas fuera de tolerancia (precisión mayor a 1 m). Dentro de los datos analizados, todos se presentaron como válidos, puesto que ninguno presentó anomalía respecto a la totalidad de los datos muestreados; así mismo, la Tabla 5. 9 resume los parámetros calculados para dicha serie de valores.

Tabla 5. 8. Resumen del procesamiento de los casos.

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
AB	453	100,00%	0	0,00%	453	100,00%

Tabla 5. 9. Resumen de parámetros descriptivos de los datos de anomalía de Bouguer.

Descriptivos				Estadístico	Error típ.
AB	Media			-16,898	1,15332
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior		-19,1645	
		Límite superior		-14,6314	
	Media recortada al 5%			-16,5423	
	Mediana			-11,363	
	Varianza			602,552	
	Desv. típ.			24,54694	
	Mínimo			-72,74	
	Máximo			30,63	
	Rango			103,37	
	Amplitud intercuartil			37,24	
	Asimetría			-0,321	0,115
	Curtosis			-0,873	0,229

5.10. PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES GNSS.

El objetivo fundamental de las mediciones GNSS es determinar, de manera precisa, la posición horizontal y vertical de las estaciones gravimétricas ordinarias. La exactitud requerida para el posicionamiento en sus tres componentes (N,E,h) $\pm 1\text{m}$ de precisión.

La selección de los métodos de medición empleados en el proyecto, se realizó en base a la disponibilidad de equipos GNSS y personal disponibles en la Gerencia al momento de la adquisición de los datos del proyecto, de manera tal, que permitiera cumplir con las especificaciones requeridas para este trabajo. Para los puntos a procesar vía web aplicando la metodología del Posicionamiento de Punto Preciso (PPP), a través del servicio CSRS – PPP, se consideró un tiempo de observación 15 minutos correspondientes a las mediciones tomadas en la zona 1. Los servicios de procesamiento de datos GNSS vía Web (SPGW), son herramientas de procesamiento dispuestos de forma gratuita y de acceso libre en Internet. Estos servicios se presentan bajo páginas Web específicas, estructuradas generalmente por tres partes fundamentales, las cuales son: un buscador Web estándar para descarga directa o transferencia FTP de los archivos de observación, orbitas y datos del reloj de los satélites, un software científico de procesamiento GNSS y un programa servidor, el cual sirve de interface al software de procesamiento para preparar los datos resultantes y los envía a una cuenta de correo electrónico suministrada por el usuario del servicio.

Los SPGW utilizan productos de redes de observación permanentes, como es el caso de la red mundial de estaciones del Servicio GNSS Internacional (IGS) o redes de magnitud regional, cuyos datos estén disponibles en la Web. Por esta razón, todos los SPGW refieren sus resultados, generalmente, al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF), en sus diferentes realizaciones y bajo la época en la cual se realizó la medición. Dentro de los SPGW existe un grupo que lleva a cabo el procesamiento de los datos bajo la técnica de Posicionamiento de Punto Preciso (PPP). La metodología PPP se caracteriza por llevar a cabo posicionamientos precisos a partir de los datos de un solo receptor GNSS. El *Canadian Geodetic Service of Natural Resources*, como proveedor del *Canadian Spatial Reference System (CSRS)*, tiene a disponibilidad pública el servicio en línea para los usuarios del GPS. CSRS - PPP (CSRS – Posicionamiento de Punto Preciso) el cual permite

a los usuarios del GNSS en Canadá y en el extranjero, obtener posicionamiento preciso a partir de mediciones provenientes de un solo receptor.

La precisión resultante puede acercarse al GNSS diferencial, pero sin la necesidad de tener acceso o procesar datos adquiridos simultáneamente en una estación base o asegurar que las coordenadas de esta se encuentren correctamente referidas. *CSRS - PPP* puede procesar observaciones de receptores GNSS de una o dos frecuencias que operen, bien sea en modo estático o un modelo cinemático. Sin punto de comparación con el uso de órbitas GNSS emitidas, esta aplicación puede mejorar los resultados en un factor de 2 a 100, según el equipo de los usuarios, la dinámica y la duración de la observación durante el período de sesiones. Todas las estaciones ordinarias medidas en la zona 1 fueron procesadas con el servicio canadiense *CSRS-PPP*. Para ello, en primera instancia, se generaron los correspondientes archivos RINEX de las observaciones, luego fueron enviados al portal del servicio de procesamiento. Al llegar el reporte con el resultado para cada estación, se extrajeron las coordenadas definitivas, para luego chequear los RMS finales en la solución de las coordenadas y se verificaba si se habían rechazados algunas épocas (y su porcentaje) así como también los RMS a priori de la solución. Obtenidas las coordenadas precisas para cada estación medida, se procedía a generar los archivos ASCII de las coordenadas tanto elipsoidales como UTM, posterior se generaron los archivos en formato shape correspondientes utilizando la plataforma ArcGIS 9.2

CAPITULO VI

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

- ❖ *Análisis estadístico*
- ❖ *Mapas de alturas*
- ❖ *Mapas de gravedad observada*
- ❖ *Mapas de correcciones gravimétricas*
- ❖ *Mapas de anomalía de Bouguer GIAME*
- ❖ *Mapa de anomalía de Bouguer integrado*
- ❖ *Aplicación de filtros*

6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

El análisis estadístico de los valores de anomalía de Bouguer revela que el histograma de frecuencia (Figura 6. 1), muestra en su eje horizontal, los valores de anomalías de Bouguer representados en mGal, donde se observa un valor mínimo de -72,74 mGal y un valor máximo 30,63 mGal. Con una separación de cada cuatro (4) mGal, da un total de 27 intervalos distribuidos en todo el histograma de frecuencia, cuyas características principales son:

- La frecuencia más significativa se encuentra ubicada en el intervalo representado por los valores que oscilan alrededor de -0,4 mGal.
- Se observa una población unimodal.
- La media de -16,9 mGal se encuentra cerca del centro -20,0mGal, lo que infiere que la población se encuentra distribuida normalmente.
- La desviación típica, oscila alrededor de (24,55) no muy cercano a cero, por lo que se puede presumir que los valores presentan una dispersión de moderada a alta.
- El histograma presenta un salto de alta frecuencia concentrado entre los valores de -0,8 a 0,4 mGal lo que indica un área de valores gravimétricos elevados dentro de la población de muestreo, estos intervalos de frecuencia, es propia de una conducta atípica que pudiera estar asociada a la presencia de cuerpos geológicos de altas densidades en esta zona.
- Se presenta una tendencia de frecuencia similar oscilante entre -12 y -60 mGal, indicando que la distribución tiende a ser mayormente negativa.

El histograma de frecuencias refleja que la mayor población de los datos presenta valores negativos, lo que nos permite inferir que nuestra área de interés está asociada a una zona continental con una ausencia importante de densidad. La dispersión que presenta los datos, reflejados en la desviación estándar, indica la heterogeneidad de la región, constituida por una variación de cuerpos rocosos de diferentes composiciones litológicas.

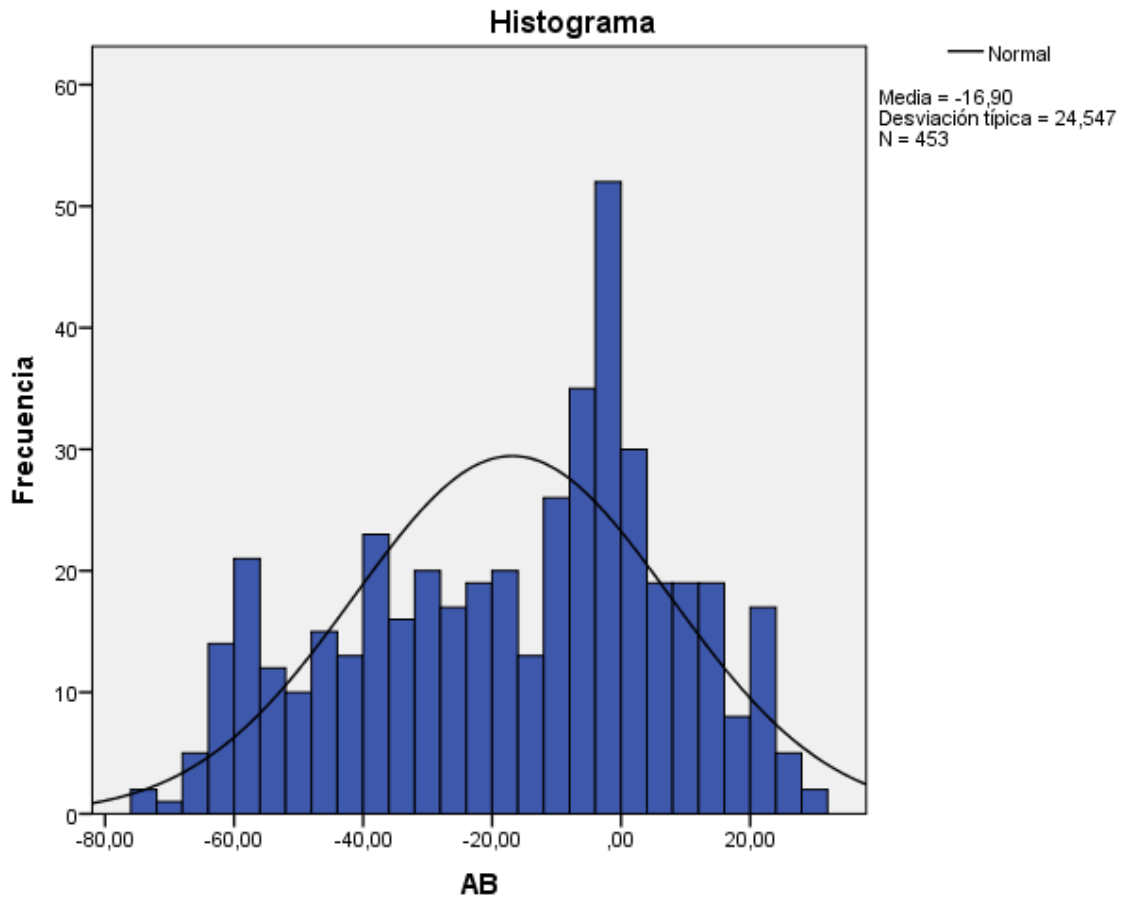


Figura 6. 1. Histograma de frecuencia.

En la Figura 6. 2, Se presenta la prueba de probabilidad normal Q – Q con tendencia normal de valores teóricos esperados, cuya gráfica confronta las proporciones acumuladas de una variable, con las de una distribución normal; la cual, tiene en el eje horizontal, los valores de la variable anomalía de Bouguer (mGal) versus los valores esperados bajo la hipótesis de distribución normal, en el eje vertical. Si la variable seleccionada coincide con la distribución de prueba, los puntos se concentran en torno a una línea recta. Los valores arrojados por el set de datos, deberían estar situados sobre la recta que pasa por el origen con pendiente igual a 1; la cual no se cumple para este caso, a excepción de dos puntos que la cruzan la cercano a los valores de -25.0 mGal y 10 mGal; sin embargo, el resto de los datos aunque no están sobre esta línea, se muestran muy cercanos, con lo cual se podría decir, que los datos presentan una distribución con comportamiento normal.

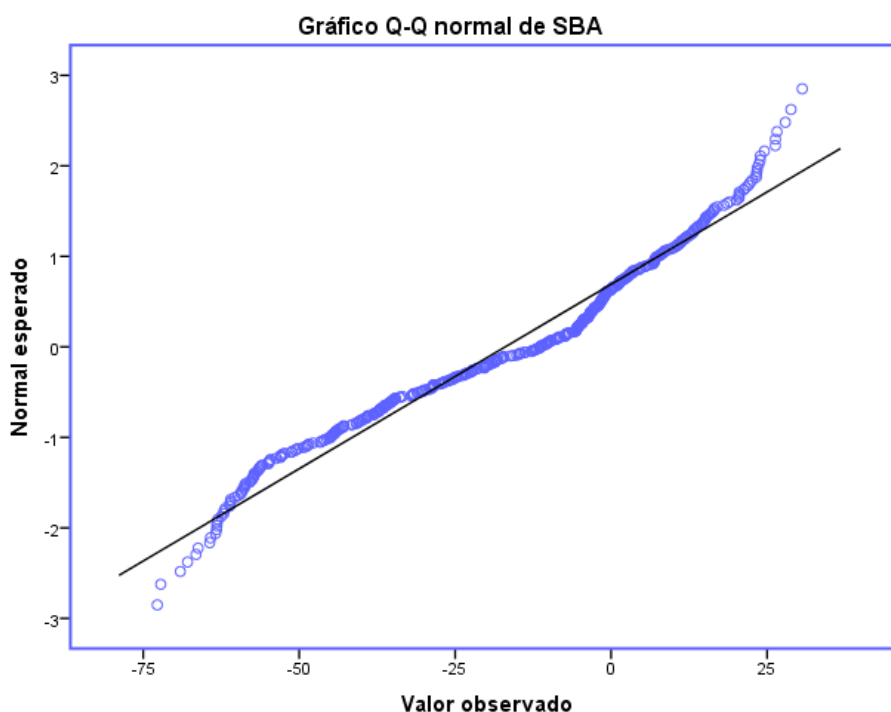


Figura 6. 2. Probabilidad normal Q – Q.

En la Figura 6. 3, se puede observar el gráfico de la probabilidad normal sin tendencia, la cual muestra en el eje horizontal los valores de anomalía de Bouguer (mGal), versus las desviaciones de la recta del gráfico de probabilidad normal, en el eje vertical; cuyos valores para una distribución normal, deben ser menores que uno. Los puntos se sitúan alrededor de la línea horizontal.

Tanto en la Figura 6. 2 como en la Figura 6. 3, se aprecia que en los puntos -25,0 mGal y 10 mGal coinciden, lo que demuestra que la distribución de los datos de anomalía de Bouguer se comporta de manera normal.

El diagrama de caja (Figura 6. 4) nos indica que los valores son asimétricos pues su línea divisora no se encuentra a la mitad de la misma, se observa que el porcentaje mayor de la población muestreada representa números negativos, ningún valor presenta cambios respecto a sus homólogos al encontrarse todos dentro del diagrama. Lo cual, permite inferir, al igual que el diagrama de frecuencia que la zona corresponde a una corteza de afinidad

continental, donde es muy evidente la presencia de unidades litológicas con bajos valores de densidad, y puede ser relacionado con espesas secuencias sedimentarias.

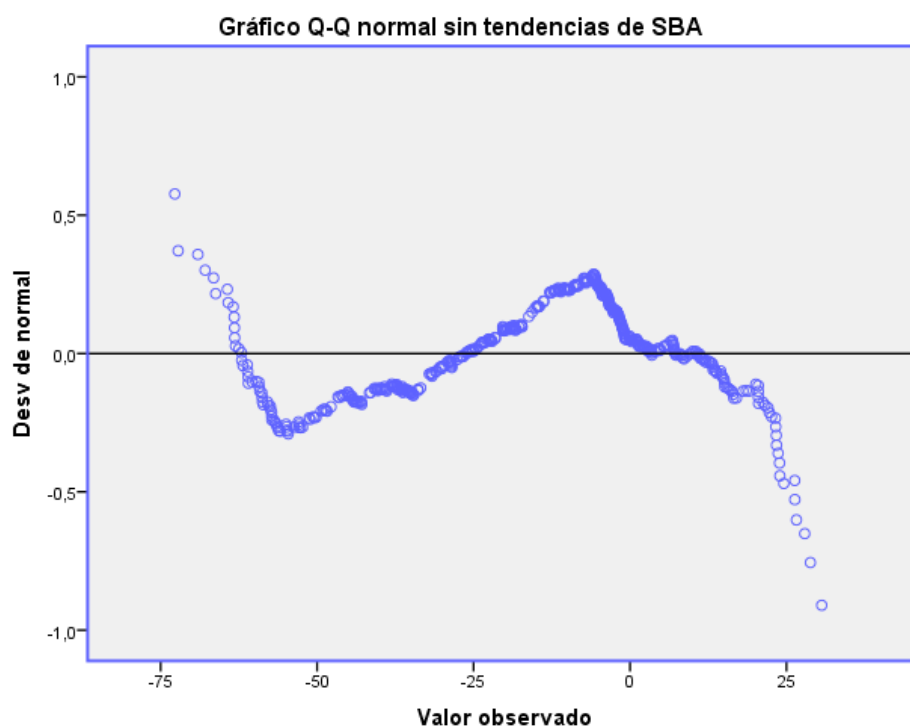


Figura 6. 3. Probabilidad normal sin tendencia.

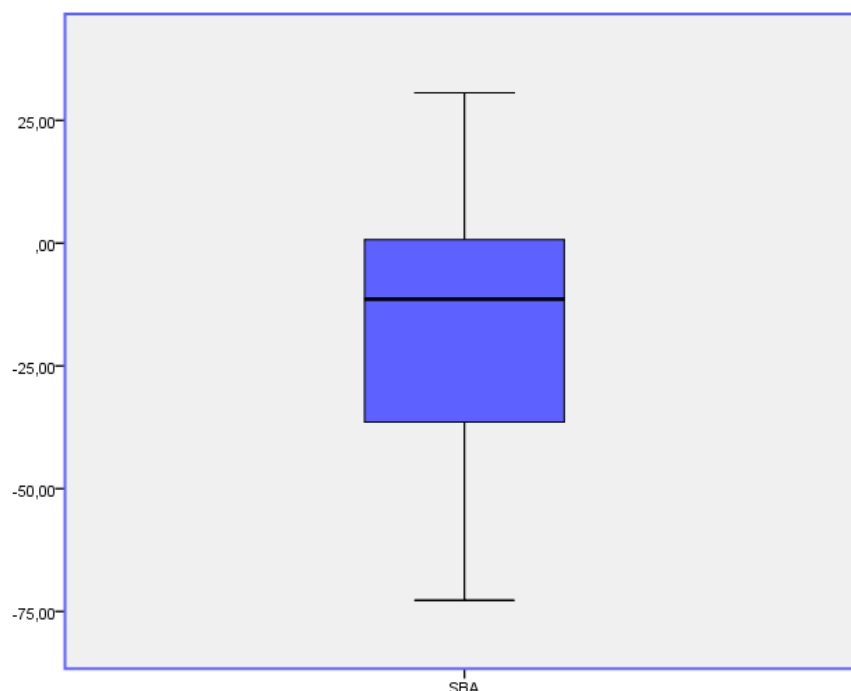


Figura 6. 4.Diagrama de caja.

6.2. MAPAS DE ALTURAS.

Las alturas tanto elipsoidales como ortométricas, referidas en la Figura 6. 5, tienen por objetivo validar la ubicación de las estación gravimétrica adquirida durante la fase de campo, que permita la identificación de estaciones gravimétrica con mediciones de datos erróneas. La eliminación de estos datos evita la incorporación de errores en la interpretación, permitiendo así, la definición e identificación, de manera confiable, de las estructuras geológicas presente en el subsuelo.

Ambos mapas presentan alturas muy similares, situación esperada, ya que los dos resultados buscan indicar la altura de las estaciones gravimétricas adquiridas, una midiendo respecto al elipsoide y la otra midiendo respecto al modelo geoidal usado, pero los dos en busca de caracterizar la morfología de la superficie terrestre.

En los mapas se observa, que las alturas más bajas se encuentran en la parte central-este específicamente entre las coordenadas de latitud $8,5^{\circ}$ a $7,0^{\circ}$ y longitud -68.0° a -67.0° con alturas de 33,6 en el mapa elipsoidal y 45,5 en el mapa ortométrico, mientras que las alturas más elevadas se presentan en las áreas cercanas a la Cordillera de los Andes,

alcanzando valores que oscilan entre los 187,1 m a 484,1 m en el caso de la elipsoidal y entre los 199,9 m a 491, 5 m en el caso de la ortométrica. Es importante notar, que la mayor parte del terreno estudiado presenta alturas que oscilan entre los 50 m y los 100 m, característicos de la región de Los Llanos. Los mapas muestran hacia la parte sur una tendencia muy lineal que se le atribuye principalmente a la interpolación propia del software matemático empleado.

De igual manera, se realizó la validación de los datos topográficos levantados durante la fase de campo; esto, con la finalidad de dar un soporte más claro a los datos empleados en el desarrollo de la anomalía de Bouguer. Para esto, se aplicaron los siguientes criterios:

1. **Eliminación de las estaciones gravimétricas cuyas alturas presenten una diferencia cercana a los 5 metros, entre las alturas medidas en campo y el modelo digital de terreno.** Esto con el objetivo de tener precisión en la ubicación espacial del punto y tener confiabilidad sobre las correcciones por altura y por topografía al momento de elaborar el cálculo de anomalía de Bouguer para la zona. Se plantean 5 metros, debido a dos premisas: en primer lugar, mediciones de validación demostraron que el modelo digital de elevación (SRTM90) presenta resoluciones de 3 a 5 metros en áreas de topografía plana, pero puede disminuir hasta 90 metros en áreas de topografía abrupta, y en segundo lugar, se tomó en consideración, que la zona de estudio abarca, tanto la región de Los Llanos como el Piedemonte Andino.
2. **Estaciones gravimétricas que presenten posicionamiento fuera de tolerancia,** es aquellas estaciones cuya posiciones presentaron una precisión mayor a 1 m (tolerancia establecida para la zona en las especificaciones del proyecto), debido a las obstrucciones en las observaciones por alta vegetación y líneas eléctricas en las vías.

Tomando en consideración los criterios antes descritos, se eliminaron alturas que alteraran el posicionamiento de las estaciones y por ende puedan perturbar los resultados de los otros cálculos.

Una vez, realizada la discriminación por altura, se procede al cálculo de la gravedad observada, lo que permite visualizar el comportamiento de las gravedades en el área de estudio.

6.3. MAPA DE GRAVEDAD OBSERVADA.

La Figura 6. 6 muestra el mapa de gravedad observada de la zona de estudio, elaborado con 453 estaciones gravimétricas evaluadas y adquiridas en el proyecto GIAME; el cual se extiende desde las coordenadas 6,5° y 10° de latitud norte hasta los -70,5° y -67,0° de longitud oeste. La gravedad más baja se presenta en el borde noroeste del mapa con un valor de 978009,306 mGal, mientras que en dirección norcentral y noreste se caracteriza por gravedades intermedias que van de 978062,271 mGal a 978094,576 mGal. El área central-este, se distingue por presentar valores de gravedad cercanas a los 978161,393 mGal, reflejando una variación aproximada de 152 mGal, lo que se considera como una variación significativa en el valor de la gravedad en toda el área de trabajo. Toda esta variación en la magnitud de la gravedad, sugiere una zona de estudio correspondiente a una zona heterogénea por la presencia de diferentes cuerpos geológicos con variaciones importantes en sus densidades.

6.4. MAPAS DE CORRECCIONES GRAVIMÉTRICAS.

El mapa de corrección topográfica mostrado en la Figura 6. 7, considera la atracción de las masas situadas por encima de la estación de medición, así como también, corrige las depresiones situadas por debajo del nivel cercana a la estación en cuestión. Este mapa refleja que las mayores variaciones se concentran hacia el noroeste del mapa (8,56 m), sobre la cordillera de los andes, seguido de variaciones hacia la parte central-este cercanos a los 2 m, asociado a la existencia de lomas aisladas en los límites entre los Estados Guárico y Cojedes, el resto de las alturas que van desde el Piedemonte de la cordillera y hacia el sur del mapa, no presentan una diferencia abrupta entre ellas, puesto que van de -0.06 a 0.60 m en su mayoría (se tornan bastante cercanas), propia de una zona de Los Llanos cuya topografía no presenta mayores variabilidades.

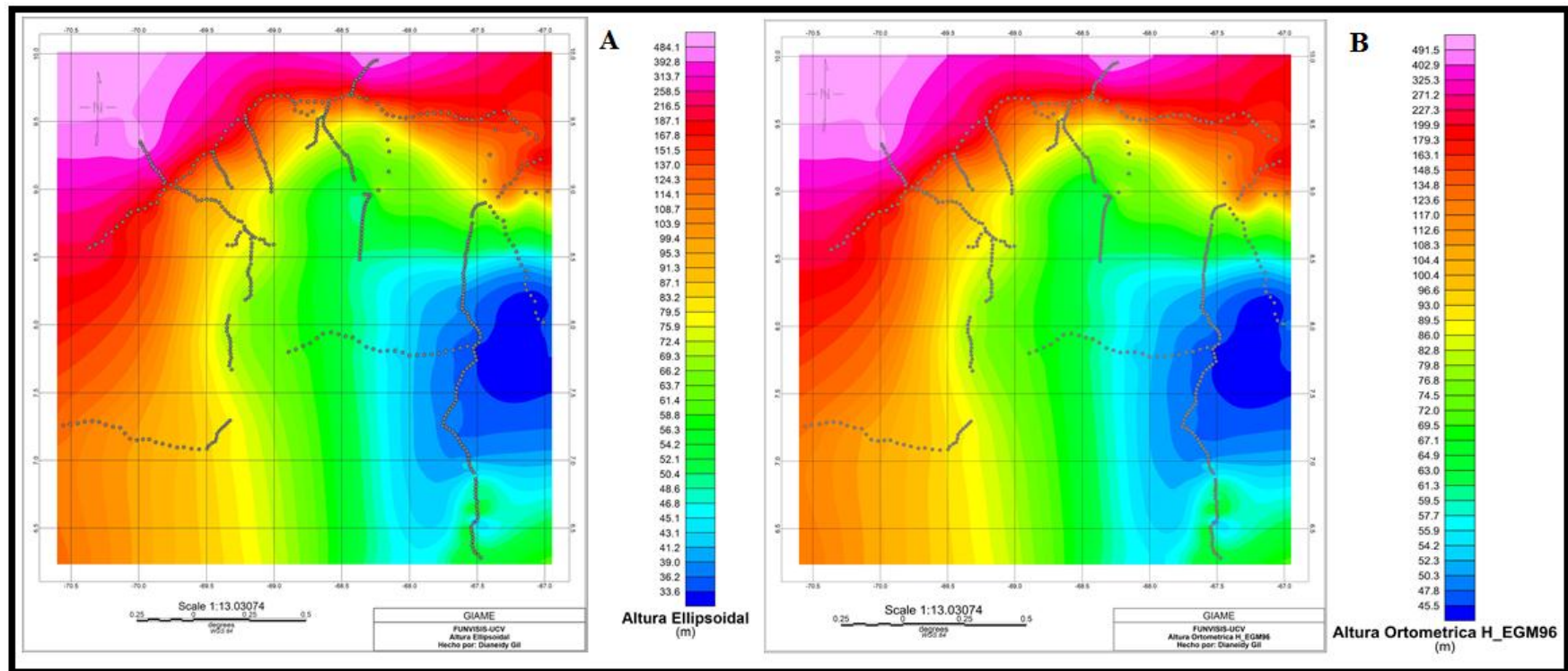


Figura 6. 5. Altura elipsoidal (A) y altura Ortométrica (B). Los puntos grises representan los puntos de medición.

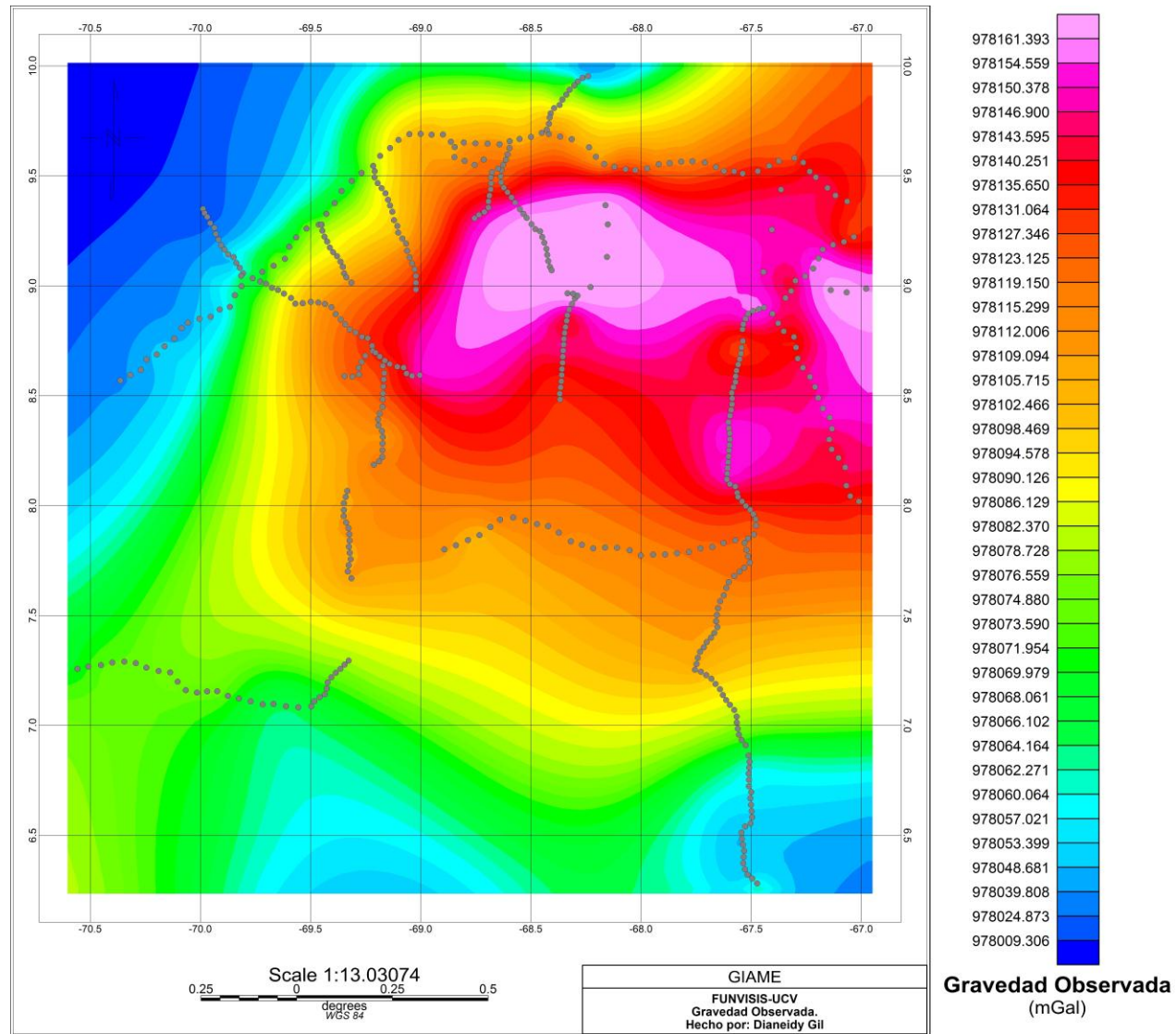


Figura 6. 6. Mapa de gravedad observada. Los puntos grises representan los puntos de medición.

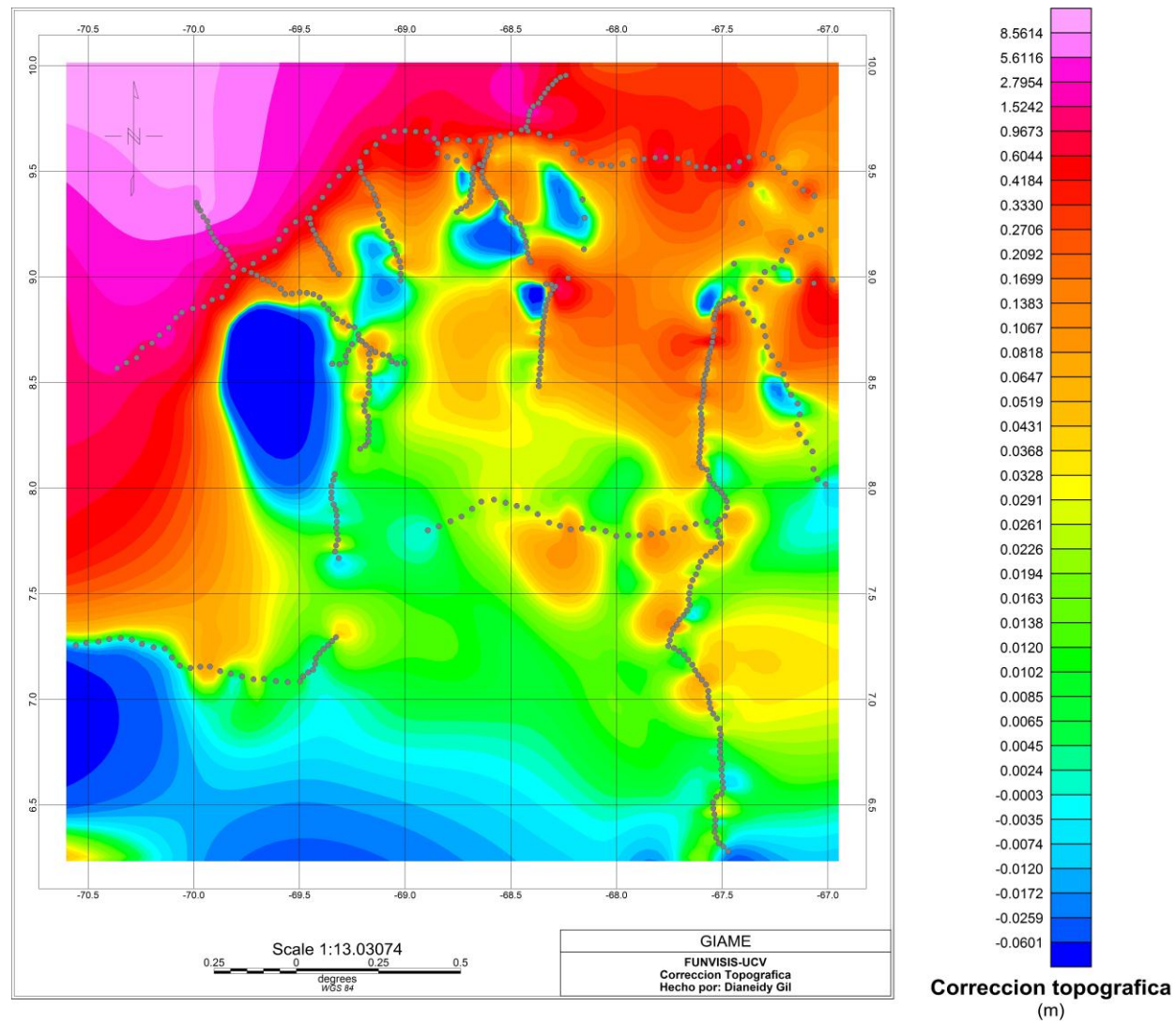


Figura 6. 7. Mapa de la corrección topográfica. Los puntos grises representan los puntos de medición.

La Figura 6. 8 muestra como es el comportamiento de las correcciones aplicadas a el cálculo de la anomalía de Bouguer, comenzando por el mapa de corrección atmosférica, cuyo modelo de masa atmosférica sobre una estación se puede calcular con la exactitud 0,01 mGal hasta una altura de 10000 m con la ecuación empleada (Wenzel, 1985). Este mapa, señala como se concentra los cambios atmosféricos a diferentes alturas, tal es el caso de la zona del Piedemonte andino que presenta los menores efectos atmosféricos con unos 0.827 mGal, mientras que la más alta es de unos 0.871mGal hacia la parte central- este del mapa. Caso totalmente opuesto, se visualiza en los mapas de correcciones de Bouguer y altura, siendo estas últimas correcciones, calculadas con respecto al nivel de referencia y no al nivel de la estación.

La corrección de Bouguer y la corrección por altura aplicadas al área de estudio (Figura 6. 8), se muestran muy similares (sin hacer énfasis en la escala) aunque ambas representan correcciones gravimétricas diferentes. Al realizar la corrección por altura, solo se está corrigiendo el cambio de altura entre las estaciones y la superficie de referencia, sin tomar en consideración la composición del material que existe entre esta separación. Para tomar en cuenta la atracción que producen estos cuerpos, se aplica la corrección de Bouguer, la cual, elimina cualquier material rocoso por encima del nivel del mar; es por ello que, para el área de los Andes, específicamente el Piedemonte Andino, se toman los valores más elevados de estas correcciones (Bouguer 54,783mGal y Altura 149,487 mGal) mientras que los valores intermedios se concentran en el resto del mapa con excepción del área central-este que presenta los valores más bajos (Bouguer 3,804mGal y Altura 10,361 mGal).

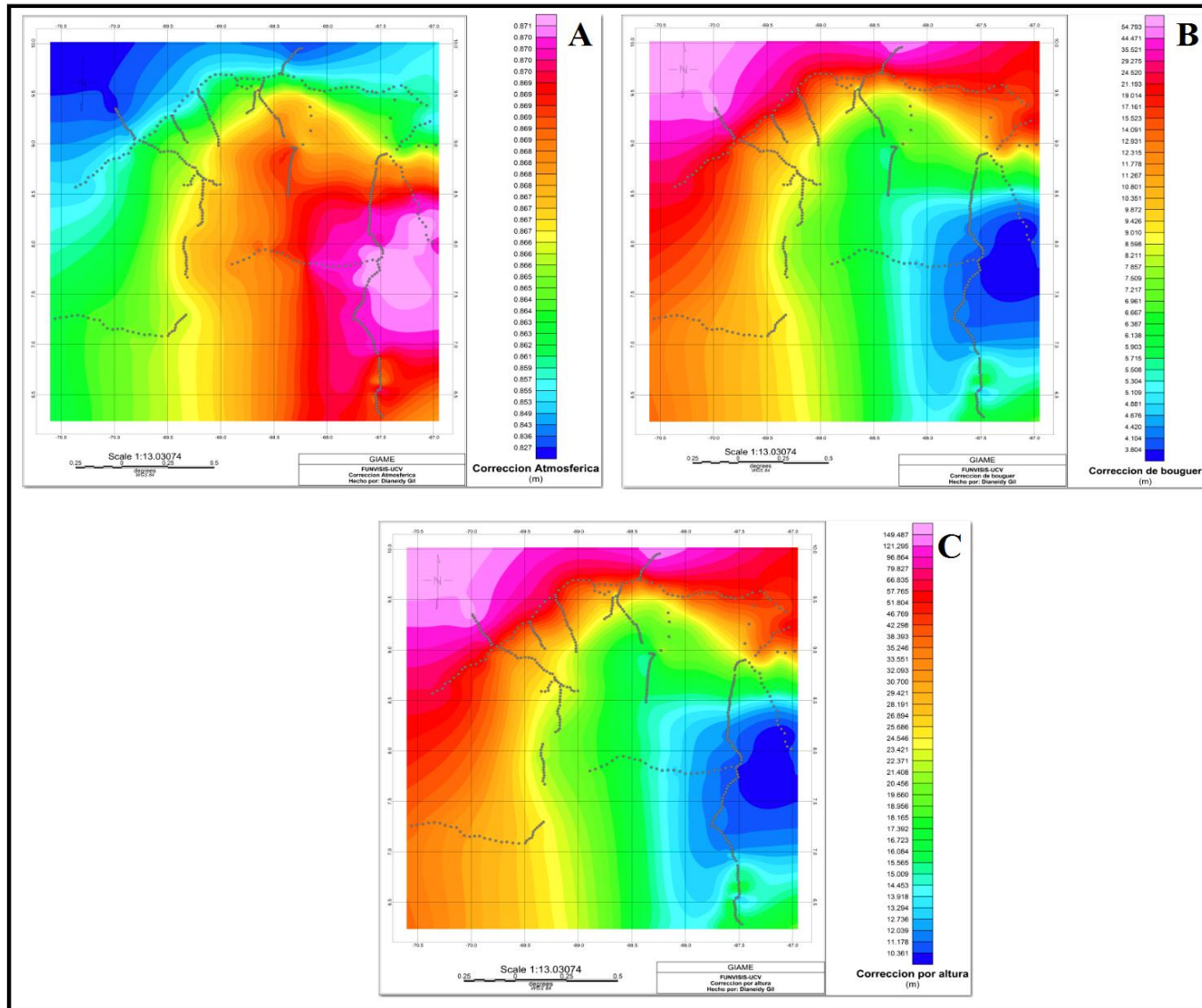


Figura 6. 8. Mapas de Corrección atmosférica (A), corrección de Bouguer (B) y corrección por altura (C). Los puntos grises representan los puntos de medición.

6.5. MAPA DE ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE

El mapa de anomalía de aire libre (Figura 6. 9) presenta valores que varían desde los -41,974 mGal hasta un máximo de 24,228 mGal, algunas de las estructuras que se encuentran representadas en estas anomalías son los Andes, y la zona de El Baúl principalmente, destacando esta última, por sus cierres puntuales y en algunos casos concéntricos ubicados en la parte central-este del mapa.

En general, el mapa de anomalías de aire libre no aporta información en términos interpretativos, más allá de delinear adecuadamente las variaciones topográficas, puesto que el factor dominante en esta anomalía es la contribución de la elevación y la batimetría (donde fuere el caso), la cual enmascara otros efectos relacionados con la gravedad.

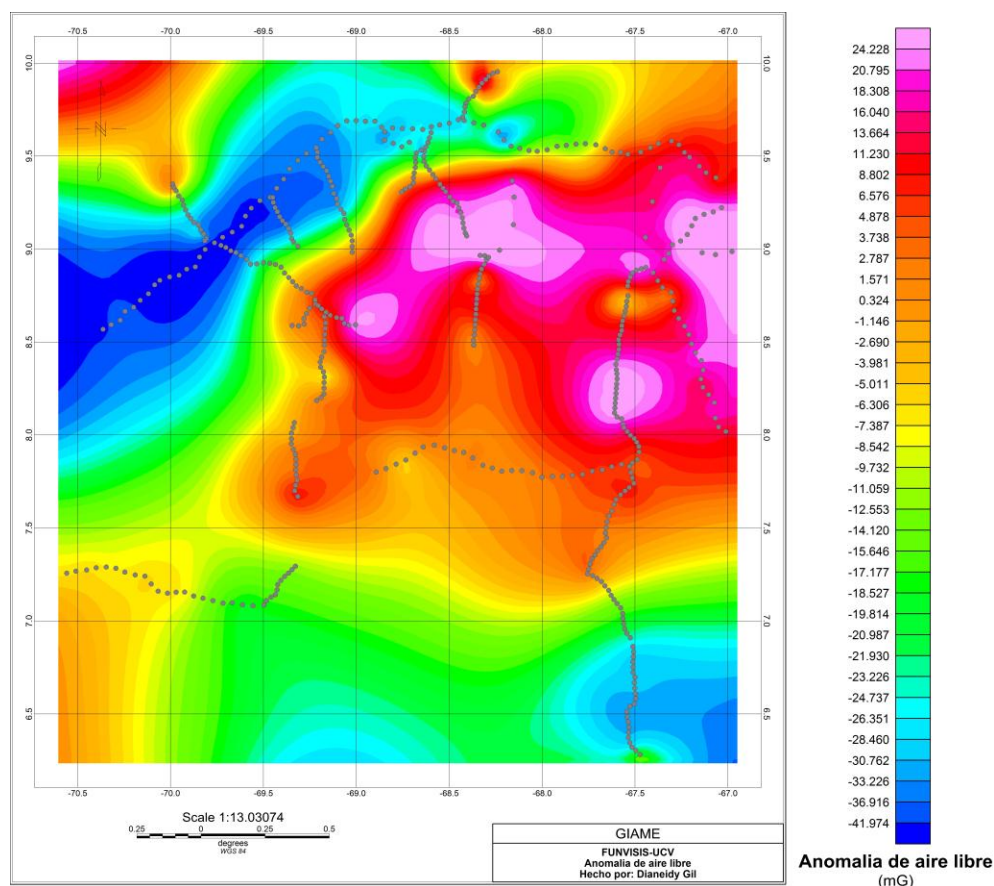


Figura 6. 9. Mapa de Anomalía de aire libre. Los puntos grises representan los puntos de medición.

6.6. MAPAS DE ANOMALÍAS DE BOUGUER

Para elaborar el mapa de anomalía de Bouguer, se integraron datos de estudios geofísicos anteriores, entre ellos 247 estaciones gravimétricas adquiridas en proyectos llevados a cabo por FUNVISIS y PDVSA servicios, en el área de Apure (Mantecal) y en la región Central de Venezuela (Perfiles), con la finalidad de mejorar la cobertura del área de trabajo y obtener una mayor visualización gravimétrica del subsuelo; y 40 datos de pozos ubicados en el área comprendida entre el Piedemonte Andino y parte de los Llanos Sur Occidentales, con la finalidad de validar las profundidades estimadas para el basamento, obtenida a partir del desarrollo de los análisis espectrales.

La Tabla 6. 1 indica el total de los datos gravimétricos incorporados en los Llanos Centro Occidentales. La Tabla 6. 2 indica las coordenadas y la profundidad del basamento en los pozos integrados, es importante mencionar, la ausencia de pozos hacia la parte oriental de la zona de estudio, esto responde a que estos pozos no penetraron el tope del basamento durante su perforación (Figura 6. 10).

Tabla 6. 1. Total de datos en el proyecto.

Proyecto	Cantidad de datos
GIAME	453
Mantecal	169
Perfiles	78
	700

Tabla 6. 2.Datos de los pozos suministrados.

N° de Pozo	Campo	Norte	Este	MD (m)
1	SILVESTRE	924516,99	397119,00	3167,44
2	SILVESTRE	924176,99	392370,02	3113,47
3	SILVESTRE	920175,00	395465,00	3111,38
4	MAPORAL	931051,00	394197,00	3239,88
5	BORBURATA	953165,04	381801,03	3801,68
7	BORBURATA	940584,00	355460,00	3955,46
8	LAS LOMAS	954456,00	348240,00	3842,79
9	CUTUFITO	793715,38	178888,75	6144,31
10	LA VICTORIA NORTE	805717,92	236526,47	3486,53
11	GUAFITA	775957,81	274029,78	2688,39
12	GUAFITA	779301,00	280000,00	2738,48
13	GUAFITA	774260,37	275312,63	2795,39
14	GUFITA	779283,51	283020,70	2927,46
15	GUAFITA	774703,64	276449,43	2913,70
16	GUAFITA	773361,60	276147,26	2954,51
17	GUAFITA NORTE	796897,00	277196,00	2943,31
18	AMPARO	791200,00	304500,00	2676,86
19	APURE	846856,16	386824,76	2625,09
20	APURE	800039,49	335916,14	2363,53
21	APURE	872950,15	459196,28	1911,35
22	BARRANCAS	975215,19	377758,03	3456,08
23	BUM-BUM	905062,97	324091,63	4269,09
24	CAIPE	942254,48	389180,95	3616,58
25	CALZADA	889883,98	368464,19	2741,41
26	CALZADA	881489,22	366188,81	3012,72
27	CALZADA	882330,17	360244,11	3392,13
28	CANO LIMON	767327,19	264801,16	3075,57
29	CAPITANEJO	877691,92	297316,73	4616,83
30	CANDELARIA	929532,40	385926,10	3323,31
31	CONSO	920686,27	481145,26	2169,26
32	CONSO	923983,95	455815,58	2331,56
33	CONSO	924789,97	477515,82	2006,66
34	CURBATÍ	946626,08	319363,44	1335,84
35	GAVILANCITO	940664,29	359499,59	3748,09
37	LECHOZOTE	903407,62	357237,69	3252,78
38	LECHOZOTE	906563,53	351138,42	3561,74
39	NUTRIAS	893540,28	465223,39	2143,07
40	SOCOPO	882873,17	322030,04	4297,71

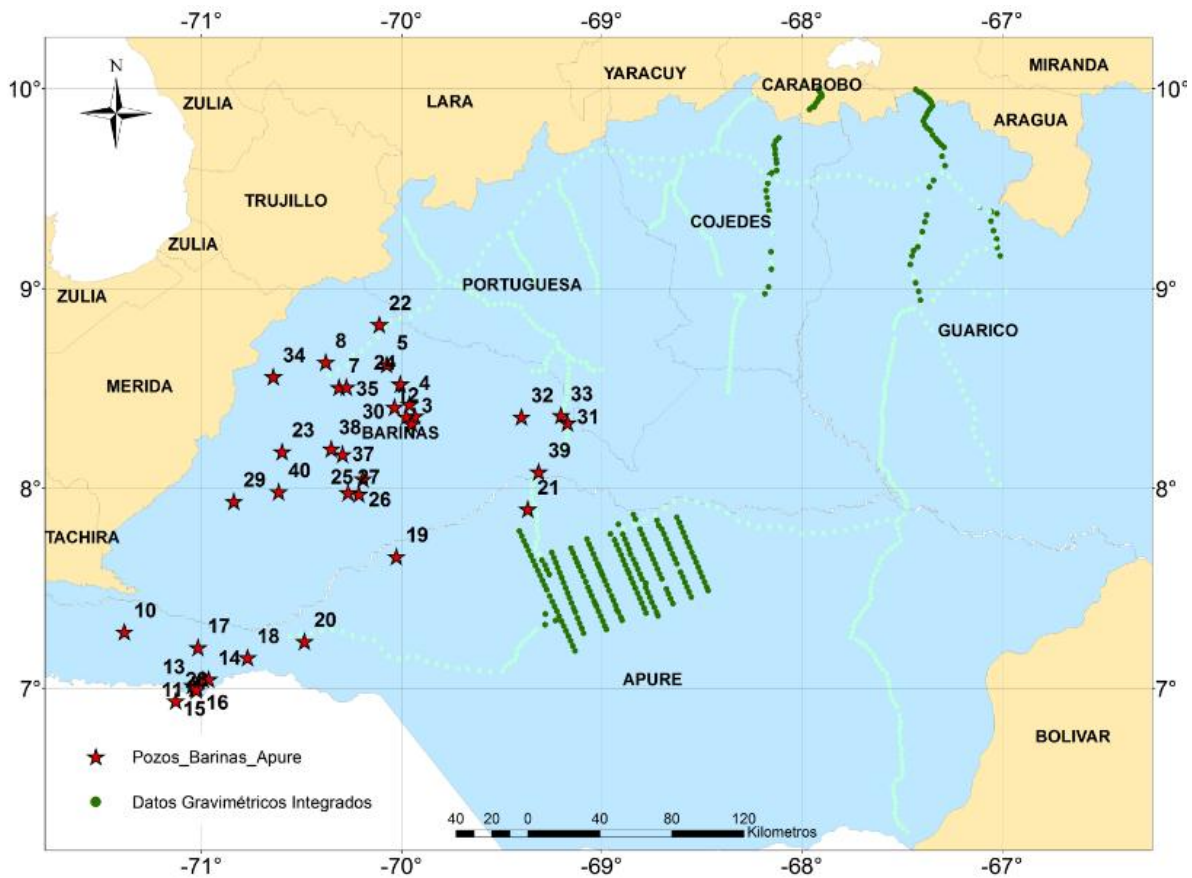


Figura 6. 10. Distribución de los datos integrados. Puntos verdes adquisiciones gravimétricas integradas y las estrellas rojas ubican la disposición de los pozos petroleros.

El mapa de anomalía de Bouguer (Figura 6. 11) muestra una variabilidad geológica en el área de estudio, con un amplio espectro de magnitudes gravimétricas que varían entre -63,50 mGal a 16,9 mGal, abarcando desde las latitudes 10,0 N hasta 6,0 N y las longitudes -70,5 E hasta -67,0 E. Los gradientes regionales presentes en el mapa, permiten identificar la existencia de tres dominios principales.

Un primer dominio con magnitudes positivas ubicadas hacia la parte centro-este del mapa, asociado a cuerpos geológicos de altas densidades. Se definen sectores concéntricos que presentan máximos valores de anomalía de Bouguer (0,3 a 16,9 mGal), ubicadas entre las coordenadas ^[1](7,6 N;-69,1 E), ^[2](8,5 N;-69,0 E), ^[3](9,0 N;-68,7 E), ^[4](9,0 N;-67,5 E) y ^[5](8,3 N;-67,5 E); uno de estos cuerpos concéntricos corresponde al alto del Baúl^[3], el cual está evidenciando por la exposición en superficie de rocas de edad Paleozoica; las otras entidades, corresponden a cuerpos geológicos que muestran comportamiento similar a la

del alto del Baúl, donde la perforación de un pozo petrolero en esta región (Pozo N° 21), está ubicando al tope de basamento a una profundidad de 1911 m, lo que estaría validando la existencia de, al menos, otro alto de basamentos en la región^[1], los cuales no se encuentran aflorando por encontrarse cubiertos por sedimentos recientes.

Un segundo dominio con magnitudes negativas (-63,5 a -40,9 mGal) ubicado hacia la parte noroeste del mapa entre las latitudes 10,0 N a 8,0 N y las longitudes -70,5 E a -69,0 E, asociado al Piedemonte Andino; esta área está caracterizada por la presencia de secuencias de rocas sedimentarias de gran espesor, que evidencian la existencia de un cuerpo rocoso de baja densidad. En esta área, se puede observar fallas de acomodación vinculada al sistemas de fallas de Boconó, que causan la subsidencia de bloques rocosos aislados, los cuales permiten generar espacio para la depositación de sedimentos; este sistema escalonado esta evidenciado por numerosos pozos petroleros perforados en la zona, los cuales ubican al tope de basamento en un rango entre 3000 y 4000 m de profundidad.

Por último, y correspondiendo a un tercer dominio, se encuentra la cuenca Barinas-Apure, definida entre las latitudes 6,5 N a 7,5 N y las longitudes -70,5 E a -67,0 E, con magnitudes intermedias entre -37,2 a -0,3mGal.

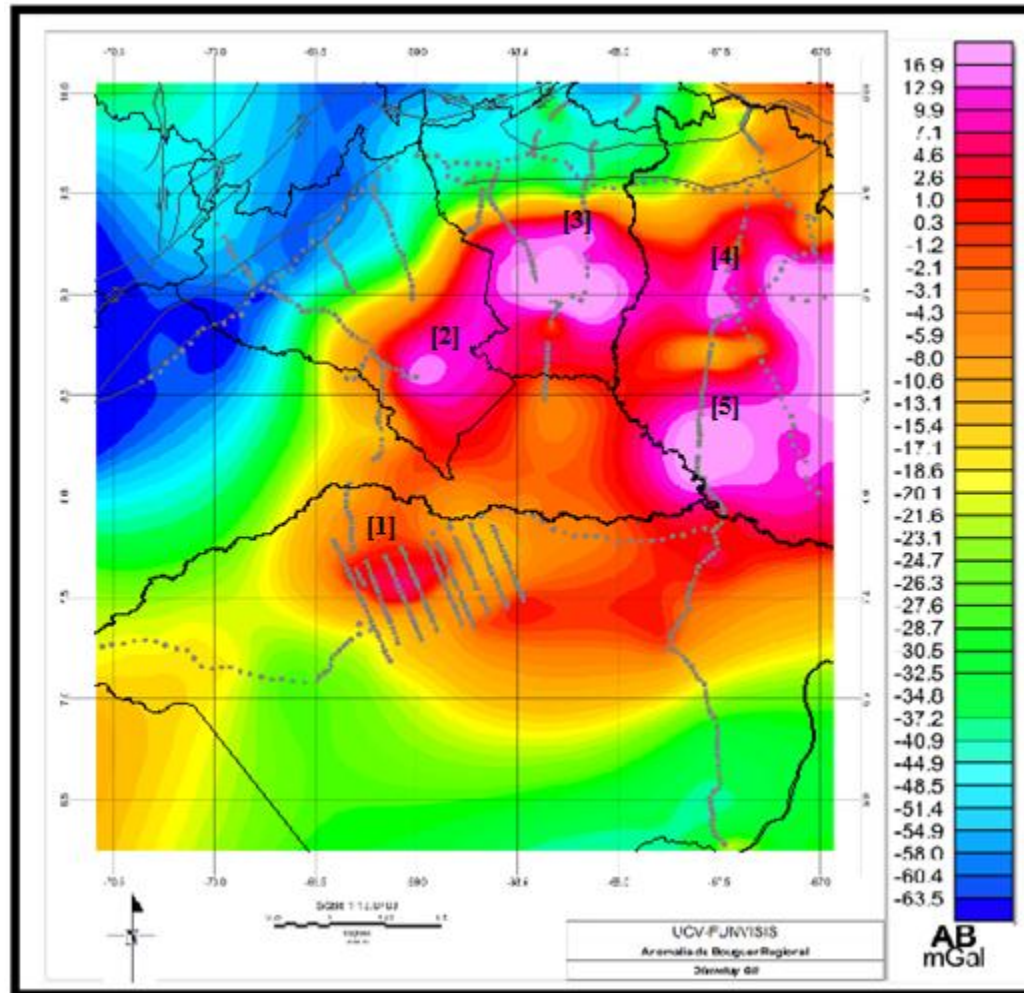


Figura 6. 11. Mapa de anomalía de Bouguer integrando estaciones gravimétricas en el estado Apure y Guárico. La numeración corresponde a los sectores concéntricos, los puntos grises representan las estaciones medidas, las líneas negras simbolizan la delimitación geográfica de los estados y en líneas color gris el sistemas de fallas de la base FUNVISIS *et al.* (2000).

6.7. ANÁLISIS ESPECTRAL

El análisis espectral proveniente de métodos potenciales terrestre, es una herramienta que se utiliza para determinar las diferentes longitudes de onda que permitan establecer la profundidad de las fuentes detectadas. Este método se aplicó a toda el área de los Llanos Centro Occidentales, con la finalidad de determinar las diferentes profundidades de las principales discontinuidades presentes en el subsuelo; entre ellos: Discontinuidad de Mohorovicic (Zona de transición localizada entre la corteza y el manto terrestre situada a una profundidad aproximada de 35 km), Discontinuidad de Conrad (Zona de transición localizada entre la corteza continental superior (de composición granítica) y la corteza continental inferior (composición basáltica), a una profundidad media de unos 15 km; y el basamento cristalino de la cuenca, todos de gran importancia para definir el modelo geológico regional del área. A continuación sus resultados:

El espectro de potencia generado para toda la zona (Figura 6. 12 y Figura 6. 13), indica que las longitudes de onda correspondientes a las anomalías de carácter regional o profundo se asocian a valores que van entre $k = 0 \text{ rad/km}$ a $k = 0,02 \text{ rad/km}$; en este intervalo, se establece la interface que corresponde a una profundidad promedio de 30,13 km asociada la discontinuidad Mohorovicic. Existe una segunda interfase profunda asociada a longitudes de onda que van de los $k = 0,02 \text{ rad/km}$ a $k = 0,03 \text{ rad/km}$ y de profundidad 14,74 km, atribuida a la interface intracortical o discontinuidad de Conrad. Para fuentes intermedias los valores de longitud oscilan entre $k = 0,03 \text{ rad/km}$ a $k = 0,9 \text{ rad/km}$ y se obtienen dos interfaces, la primera a 5,12 km atribuida a la profundidad promedio de la interface intra-basamento y la segunda a 2,60 km que se asocia al tope pre-cretácico. Luego de los $k = 0,9 \text{ rad/km}$ se establece como ruido espectral (Tabla 6. 3).

Tabla 6. 3. Profundidades calculadas (Km).

Zonas de transición 	Profundidades 	
	Llanos Centro Occidentales	
	-30,13008333	Mohorovicic
	-14,74042405	Conrad
	-5,123321528	Interface intra-Basamento
	-2,60538812	Tope Pre-Cretacico

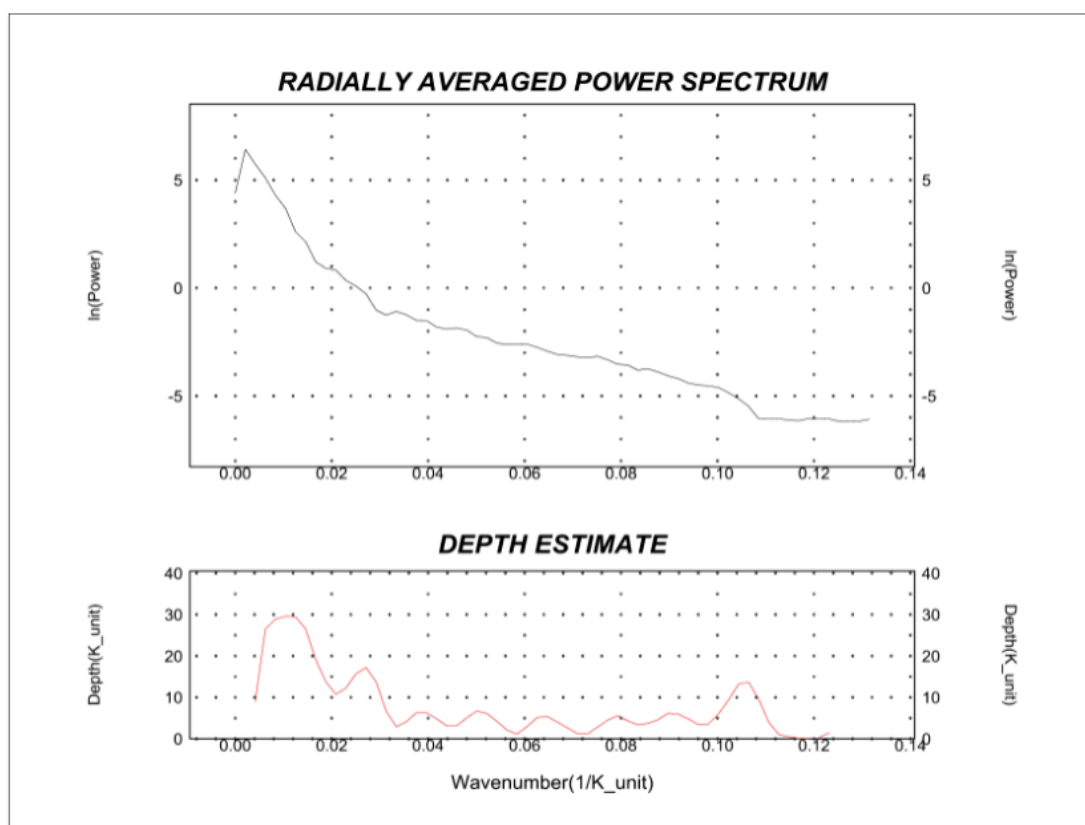


Figura 6. 12.Espectro de poder promediado radialmente obtenido a partir del cálculo hecho sobre la anomalía de Bouguer de los Llanos Centro Occidentales.

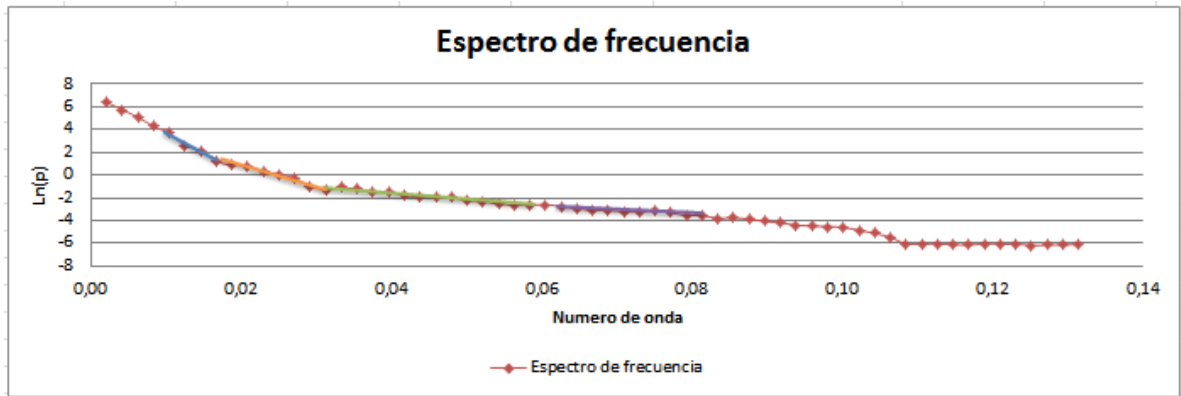


Figura 6. 13. Interpretación del espectro de poder de los datos gravimétricos de los Llanos Centro Occidentales.

Dentro del mapa de anomalía de Bouguer, se hace énfasis en tres áreas cuyo comportamiento resulta de interés para analizar, por la disposición espacial de las anomalías (Figura 6. 14). A las mismas se le calculó el espectro de potencia.

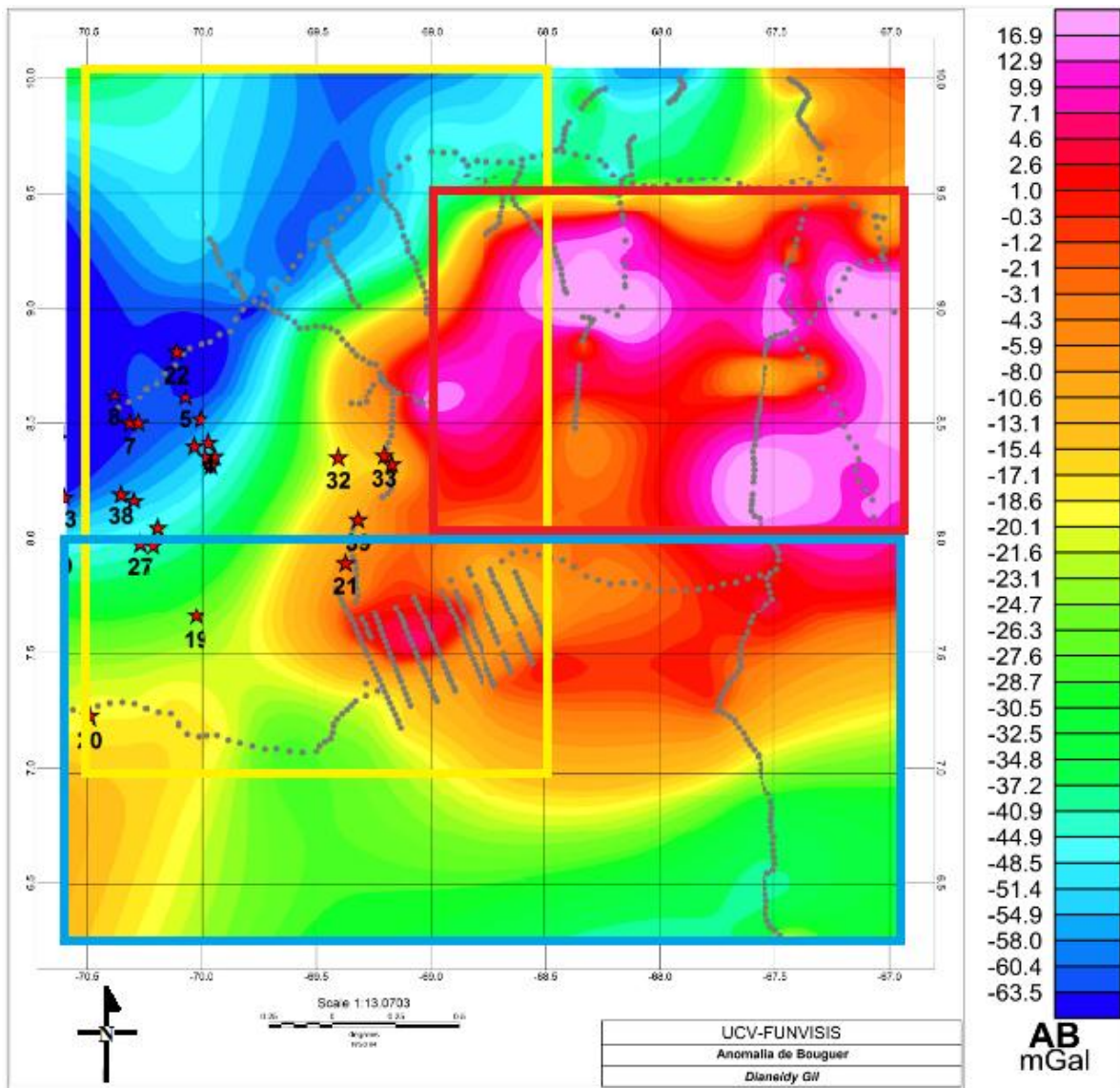


Figura 6. 14. Separación de los espectros de potencia con la ubicación de los pozos que validan algunas de las profundidades obtenidas. Cuadro amarillo área del Piedemonte Andino, cuadro azul área de los Llanos Centro Occidentales y el cuadro rojo área de El Baúl.

A continuación los resultados de cada uno de los espectros realizados:

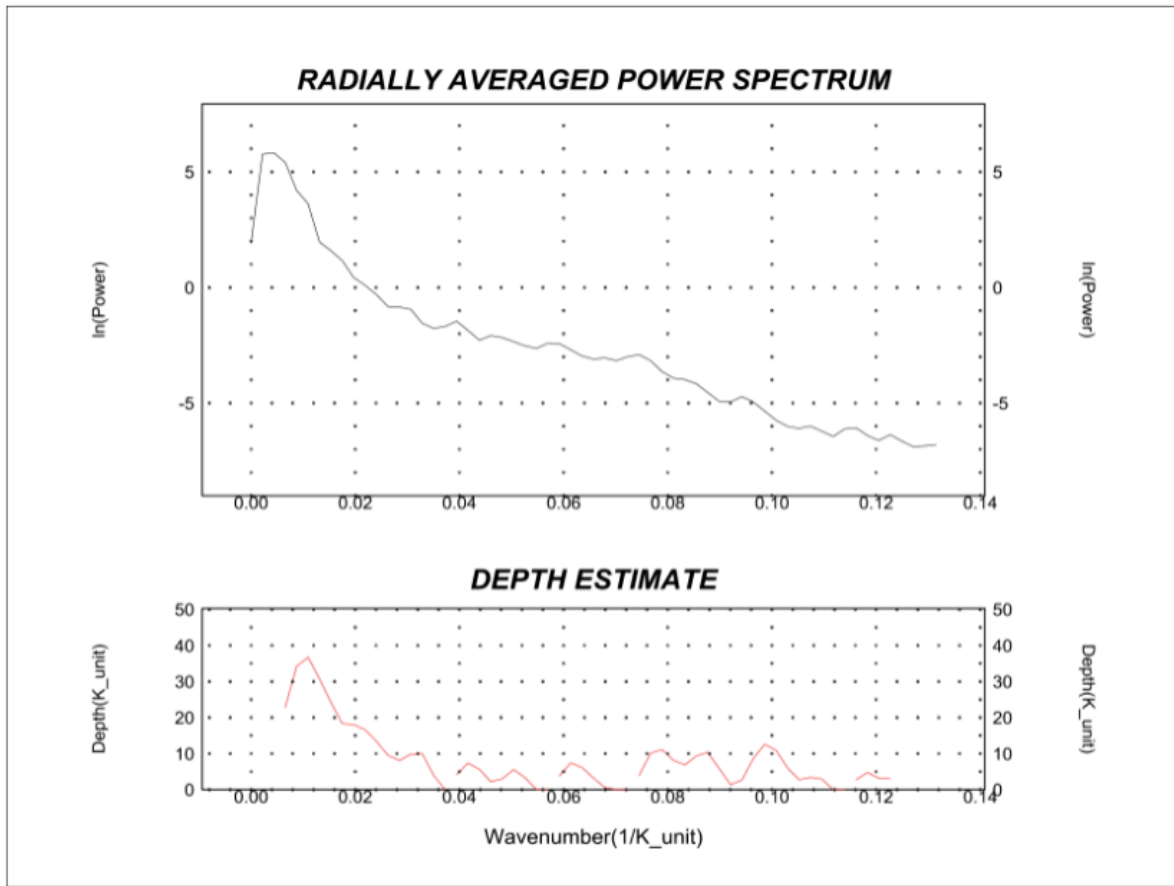


Figura 6. 15. Espectro de potencia del Piedemonte Andino.

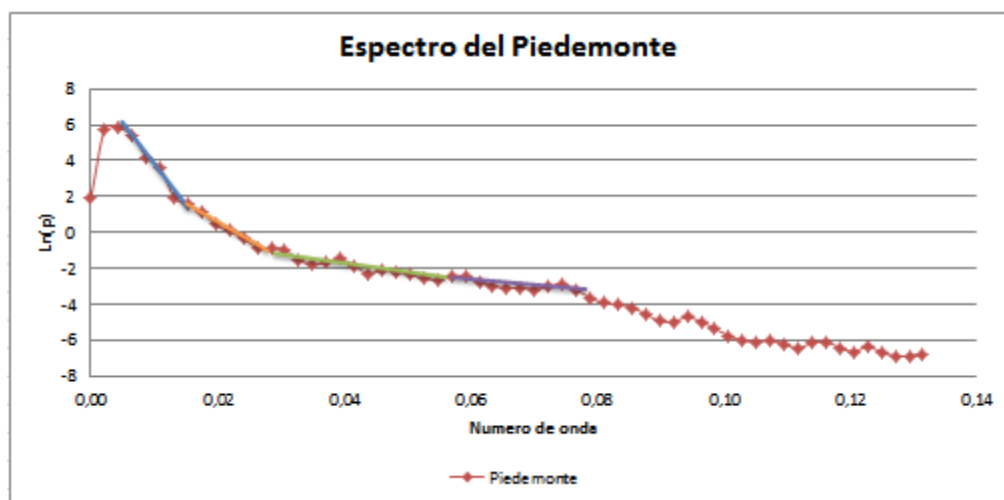


Figura 6. 16. Interpretación del espectro de potencia de Piedemonte Andino.

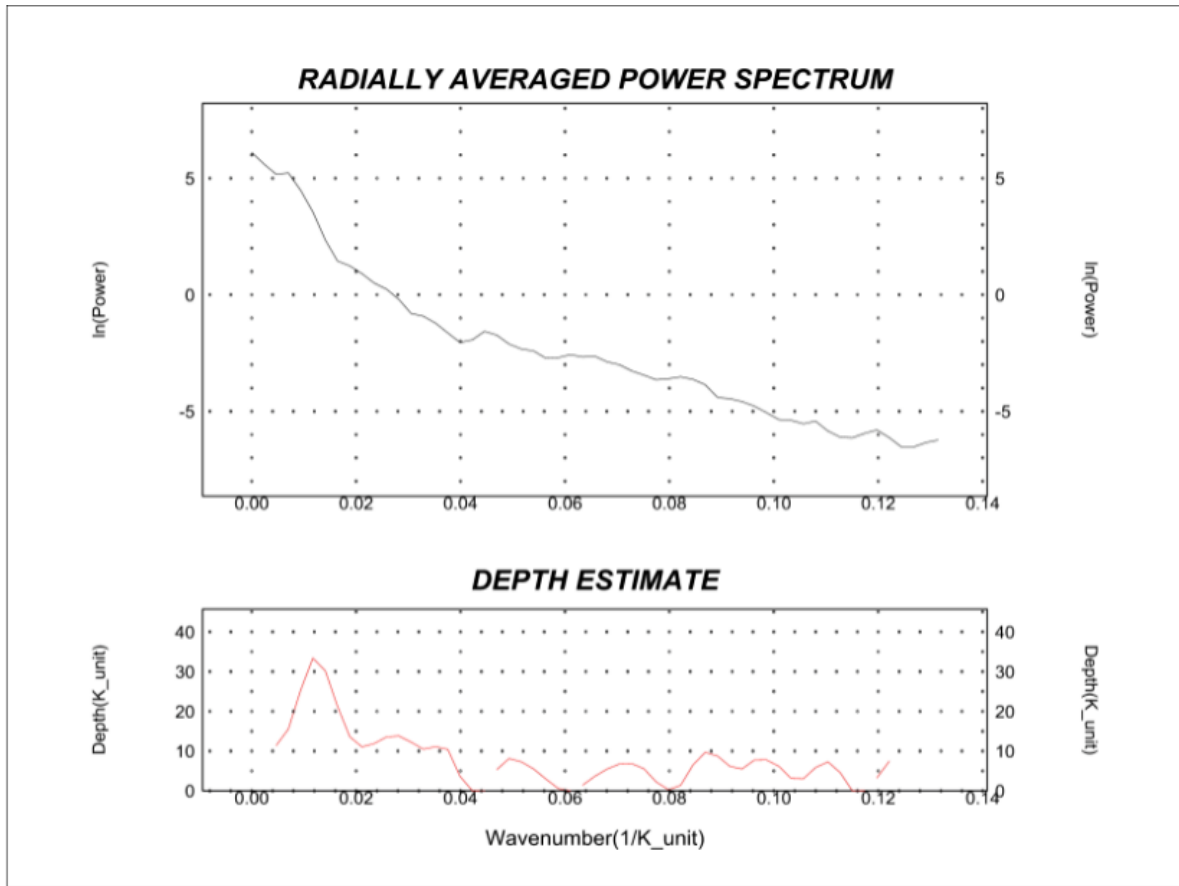


Figura 6. 17. Espectro de potencia de los Llanos Sur Occidentales.

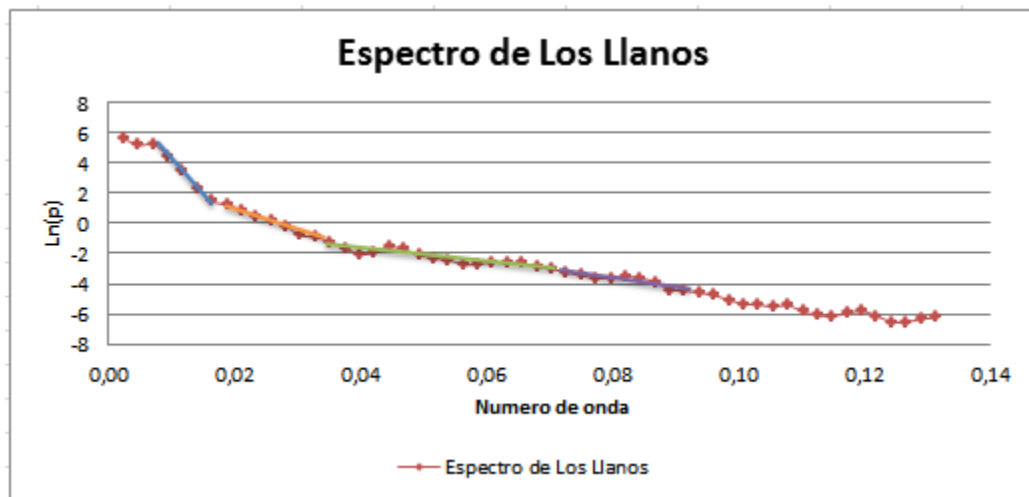


Figura 6. 18. Interpretación del espectro de potencia de los Llanos Sur Occidentales.

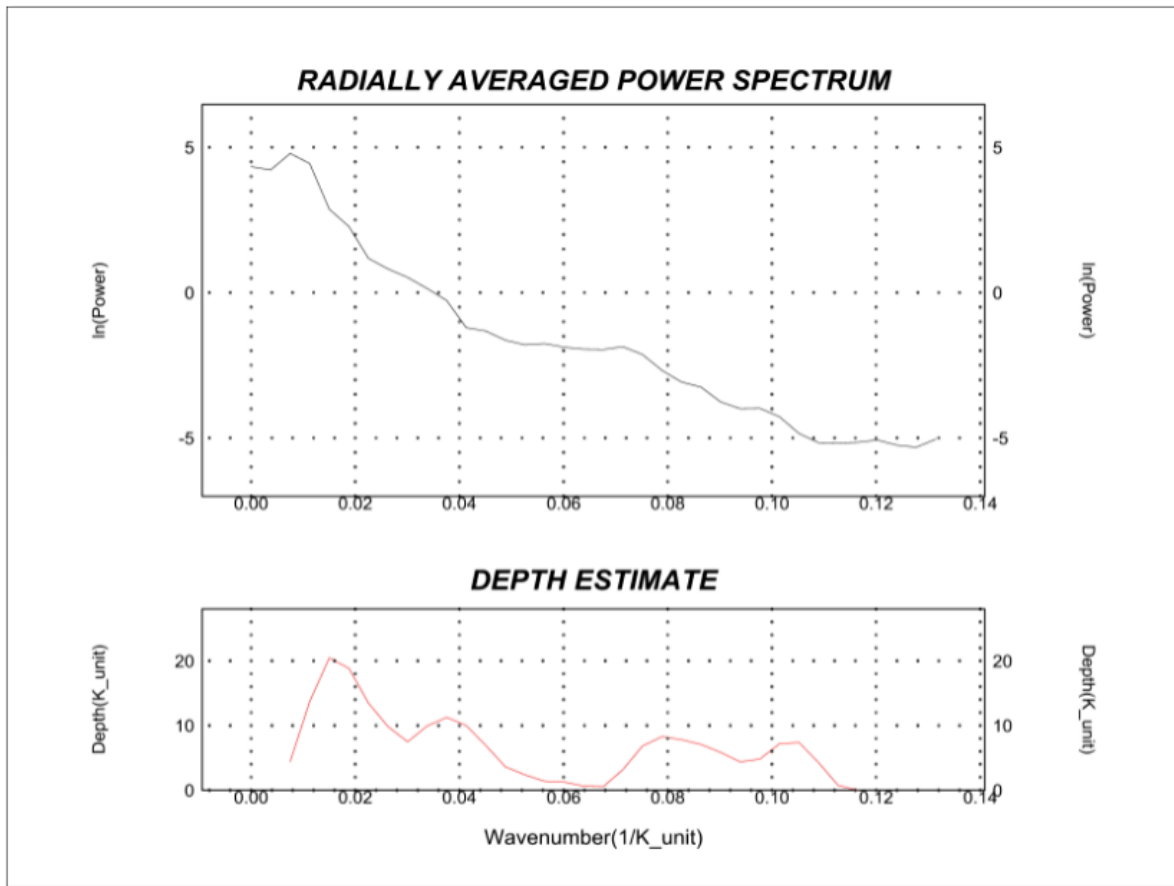


Figura 6. 19. Espectro de potencia de El Baúl.

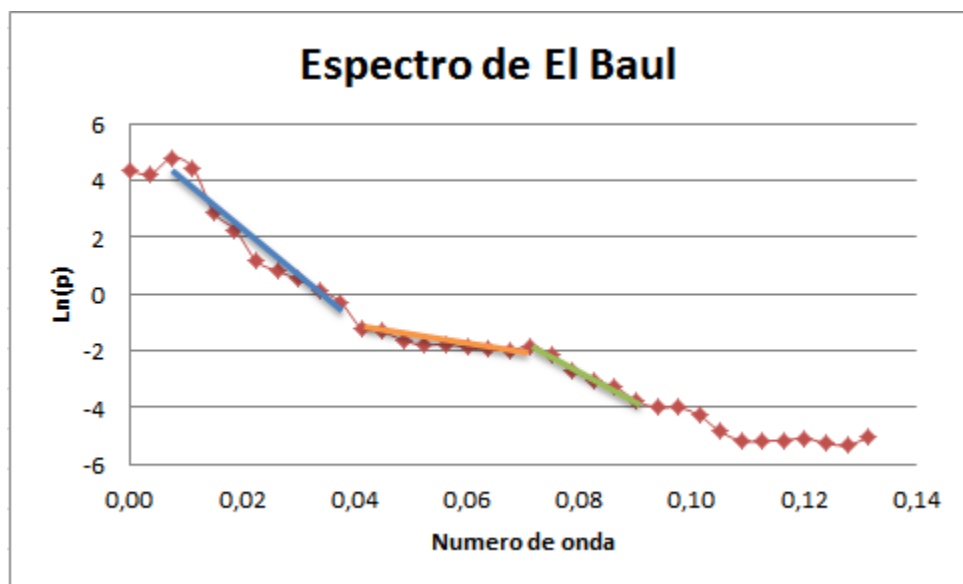


Figura 6. 20. Interpretación del espectro de potencia de El Baúl.

La distribución de las anomalías de Bouguer y la sectorización de las subáreas, a las cuales se le generó cada uno de los espectros, en el área de los Llanos Centro Occidentales; permitió generar resultados que pudieran plantear una correlación directa con la geología descrita para esta área, determinando que cada zona subdividida del mapa tiene una correspondencia directa con algunas estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, la cuales han sido descrita en diferentes textos (González de Juana *et al*, 1980, Viscarret *et al*, 2012, entre otros). Las profundidades de las discontinuidades asociadas a la sectorización del mapa de anomalía de Bouguer se presentan en la Tabla 6. 4.

Desde la Figura 6. 15 hasta la Figura 6. 20, se muestra que las áreas de las ventana de los Llanos Sur Occidentales y Piedemonte Andino superan en extensión a la ventana de trabajo de El Baúl, producto de que sus anomalías se encuentran concéntricamente sectorizadas. El alcance obtenido con la dimensión de la ventana de El Baúl solo reflejo 3 discontinuidades, las cuales se asociaron a la discontinuidad de Conrad a 12,83km, la discontinuidad intra-basamento a unos 2,61 km y la tercera profundidad asociada al tope pre-cretácico a 0,93 km, sin poder estimar la discontinuidad de Mohorovicic.

Los estudios previos de esta área, plantea las profundidades de las zonas de transición muy cercanas a las estimaciones obtenidas en estos cálculos. Si bien se esperaba identificar la discontinuidad de moho en cada uno de los espectros calculados, definiéndola como la discontinuidad de mayor profundidad (logro no alcanzado en su totalidad); se identificó un comportamiento acorde a lo que se esperaría tener en el subsuelo de esta área. Según el principio de isostasia, una mayor carga litosférica implica una mayor raíz en profundidad, por lo tanto tenemos un Piedemonte Andino con profundidades de 33,34 km y unos Llanos Sur Occidentales con menores profundidades (32,85km), por encontrarse este último, más alejado de la geología andina. Una situación similar a estos dos objetivos, se pudiera presentar entre Los Llanos y El Baúl. El Baúl forma parte de un cinturón pericratónico Paleozoico de rocas ígneas y metamórficas, con características afines a la geología de los Andes.

La profundidad del basamento estimado para las regiones del Piedemonte y parte de los Llanos, se encuentra validada por las perforaciones de pozos petroleros en esta región,

lo cual permite validar el proceso metodológico empleado en la definición de esta discontinuidad, por ende, permite establecer una alta certidumbre en las estimaciones de las profundidades para las otras discontinuidades. La Tabla 6. 4 y la Figura 6. 21 muestran la distribución de las profundidades para cada una de las discontinuidades e interfaces obtenidas.

Tabla 6. 4. Profundidades de las diferentes zonas de transición de cada una de las estructuras geológicas presentes en el área dada en Km.

Zonas de transición	Profundidades		
	Piedemonte	Llanos Sur Occidentales	El Baúl
	Mohorovicic	-33,336285	-32,84861666
	Conrad	-15,2116488	-13,32095105
	Interface intra-Basamento	-5,3719106	-4,439310095
	Tope Pre-Cretacico	-3,23116177	-2,442245488
		-0,93568673	

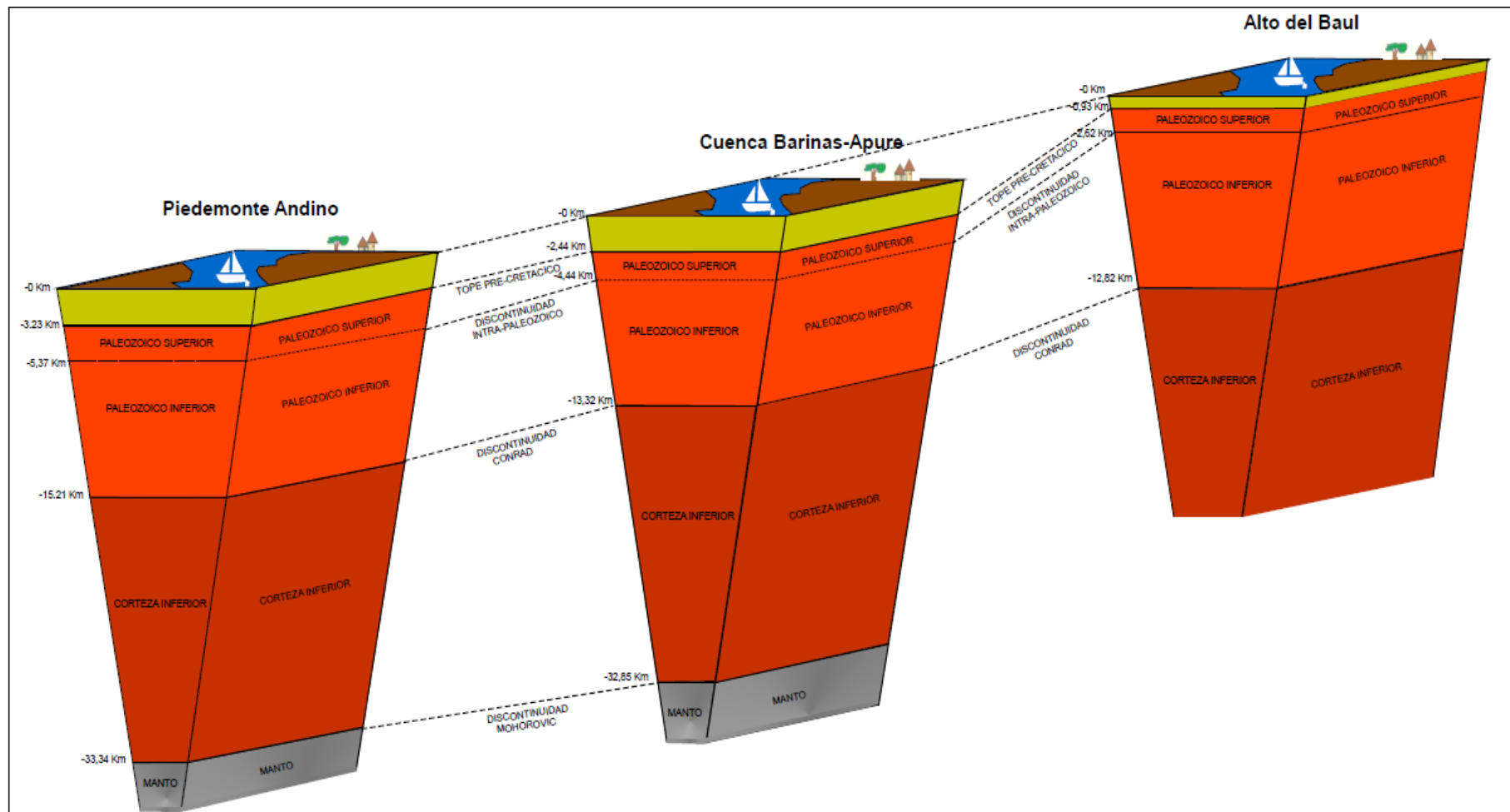


Figura 6. 21. Esquema de distribución de las profundidades.

6.8. APLICACIÓN DE FILTROS.

Generalmente, las anomalías de carácter regional se manifiestan en señales con longitud de onda larga, observables a grandes distancias, mientras que las anomalías locales se manifiestan en señales de longitud de onda corta, observadas localmente. Con la aplicación del filtro de separación regional y el filtro de separación residual, se tienen mapas que realzan, a detalle, cada uno de estos aspectos.

La Figura 6. 22 muestra el carácter regional del mapa de anomalía de Bouguer (-63,5 a 16,5 mGal); el cual, se muestra muy similar al mapa de anomalía de Bouguer integrado (-63,5 a 13,2 mGal), con una mejor definición de los contornos de los cuerpos allí delineados. Nótese que ambos mapas abarcan casi en su totalidad los mismos valores en migales, que representan las anomalías gravimétricas. En la Figura 6. 23, Se visualiza el espectro de potencia calculado al mapa de anomalía de Bouguer regional, reflejando que las longitudes de ondas varían entre $k = 0$ y $k = 0,03$ rad/km, lo cual permite evidenciar el carácter regional de este mapa y comprueba la correcta aplicación del filtro.

La Figura 6. 24, muestra el mapa de anomalías de Bouguer residual, este mapa posee una carga espectral significativa, por lo cual, se le aplicó el filtro de la derivada vertical de segundo orden, que ayudó a mejorar la visualización de señales provenientes de fuentes que pueden ser de limitadas dimensiones en profundidad y extensión lateral. La Figura 6. 25, que muestra el análisis espectral del mapa de anomalía de Bouguer residual; donde se puede observar las longitudes de onda que varían entre 0,03 y 0,09 rad/km (espectro), lo cual produce variaciones gravimétricas en el mapa residual que varían entre -0,0034 a 0,00046 mGal. La magnitud de estas variaciones, podrían sugerir que el mapa residual está reflejando, de forma muy somera, las estructuras geológicas presentes en el mapa de anomalía de bouguer, como son: Piedemonte Andino hacia la zona suroeste del mapa, seguidamente se observa el graben Apure-Mantecal (posiblemente triásico-jurásico) en dirección suroeste-noreste. Al noroeste de mapa, entre los estados Portuguesa y Cojedes se representa la subcuenca de Guarumen (depocentro activo durante el Eoceno-Oligoceno), hacia la parte sur del mapa se encuentra la cuenca Barinas-Apure, ambas cuencas se ven separadas por el alto del El Baúl, en el estado Cojedes ubicado en la parte central-este del

mapa. Lo que evidencia que la mayor parte de la zona se comporta de manera constante en cuanto a las magnitudes de densidad de los cuerpos geológicos de carácter locales. Esta interpretación está en consonancia con el dominio regional que presenta la señal gravimétrica.

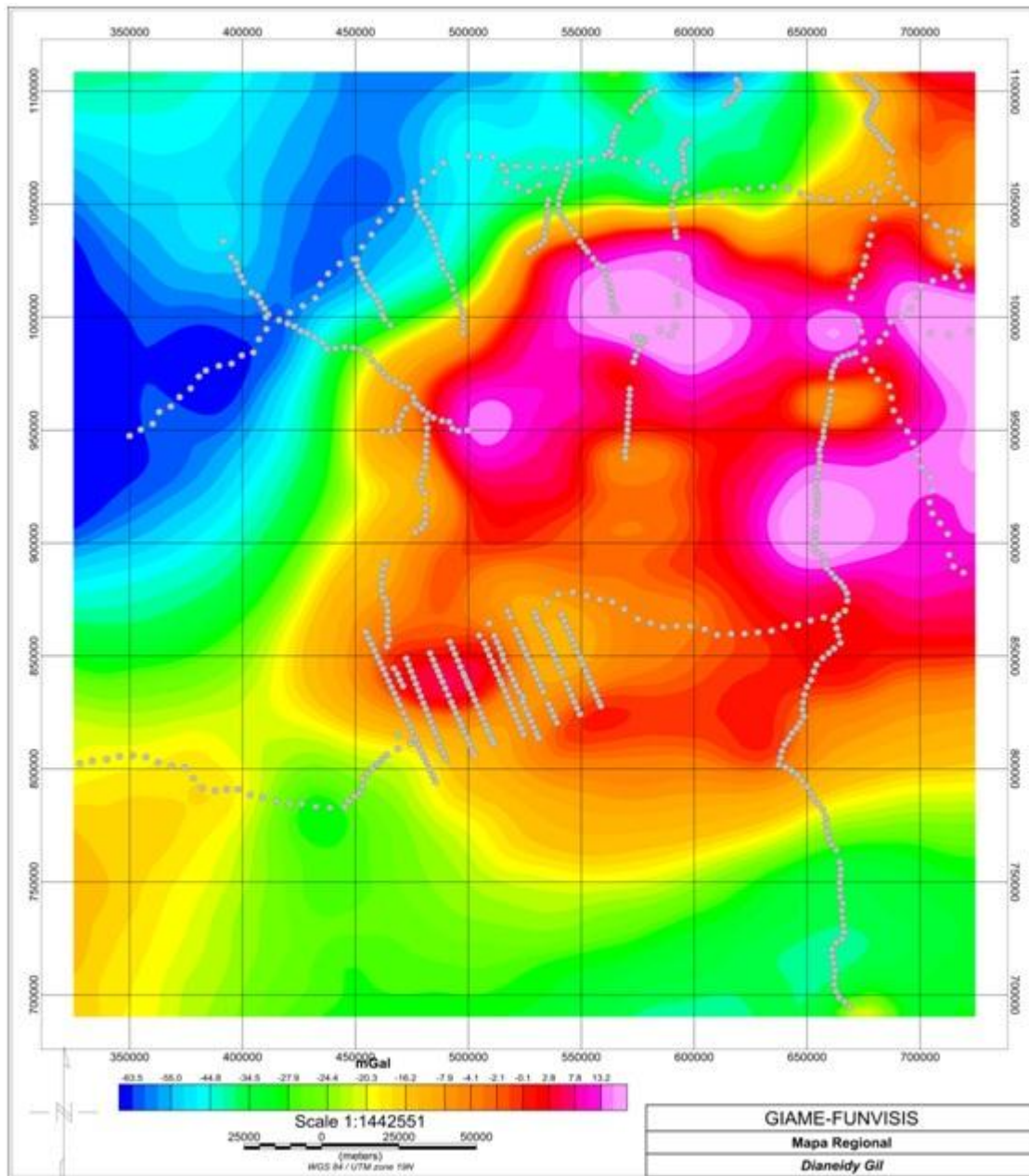


Figura 6. 22. Mapa de anomalías de Bouguer regional calculado a través del filtro paso-banda.

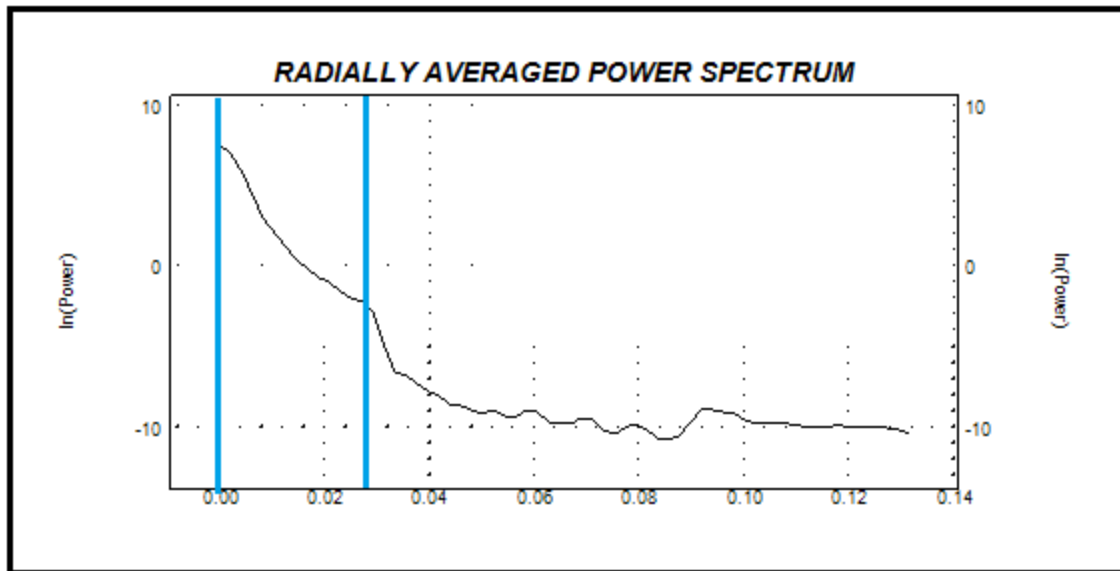


Figura 6. 23. Espectro de potencia del mapa de anomalías de Bouguer regional. Eje horizontal número de onda (k) y el eje vertical logaritmo neperiano ($\ln(p)$).

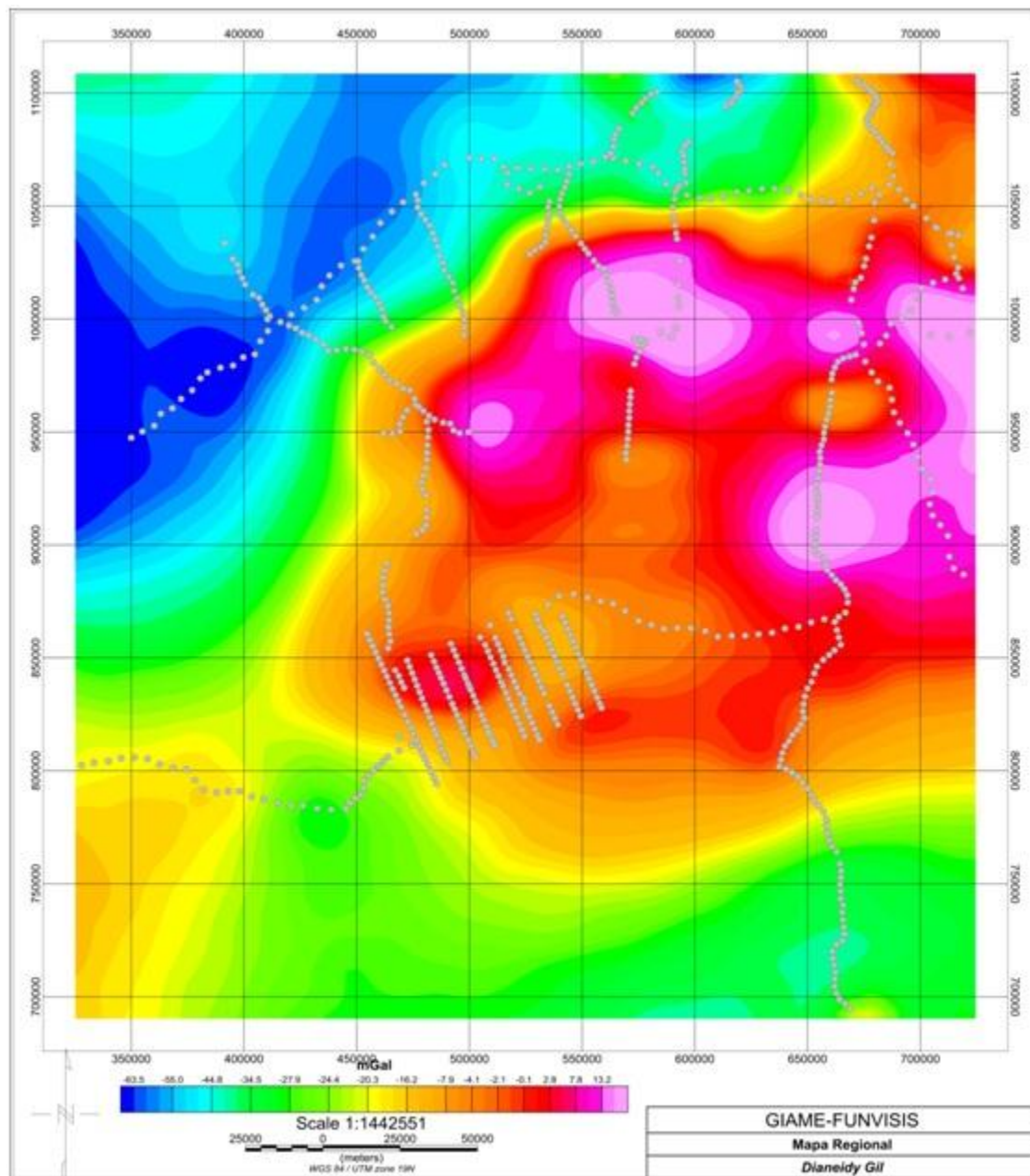


Figura 6. 24. Mapa de anomalías de Bouguer residual calculado a través del filtro de derivada vertical de segundo orden.

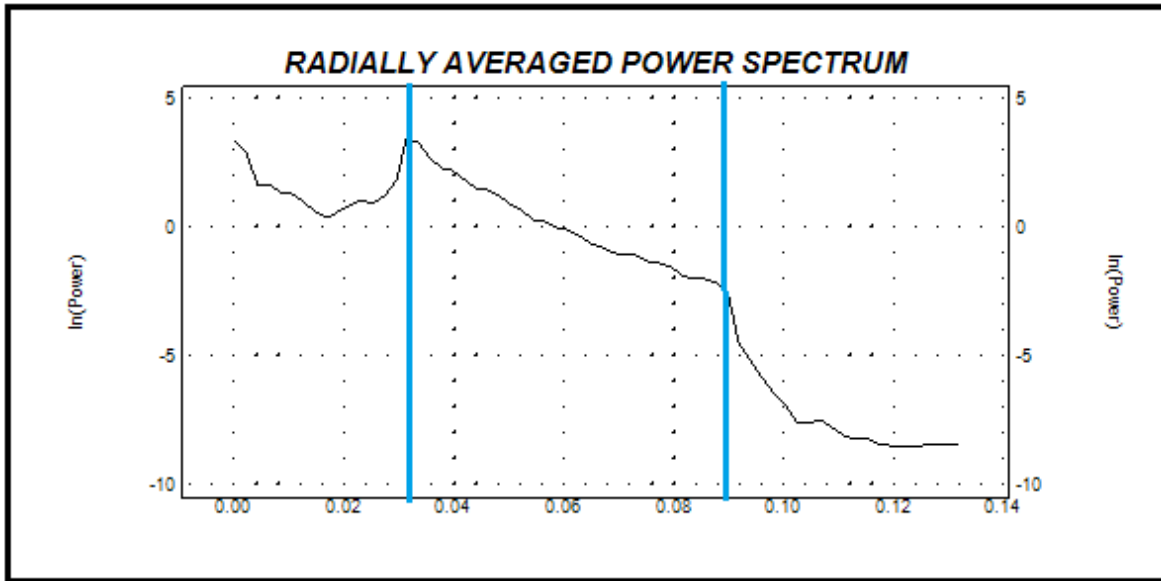


Figura 6. 25. Espectro de potencia del mapa de anomalías de Bouguer residual. Eje horizontal número de onda (k) y el eje vertical logaritmo neperiano ($\ln(p)$).

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizada la adquisición de los datos en campo, el procesamiento de estos e interpretación de los resultados, en conjunto con todo el material bibliográfico recopilado, se concluye que:

- El mapa de anomalía de Bouguer muestra una variabilidad geológica en el área de estudio, con un amplio espectro de magnitudes gravimétricas que varían entre -63,50 mGal a 16,9 mGal. Sus gradientes regionales, permiten identificar la existencia de tres dominios principales. Un primer dominio, con magnitudes positivas ubicadas hacia la parte centro-este del mapa, asociado a cuerpos geológicos con contraste de densidades positivo, lo que evidencia la presencia de altos de basamento (alto de El Baúl). Un segundo dominio con magnitudes negativas (-63,5 a -40,9 mGal) ubicado hacia la parte noroeste, esta área se caracteriza por la presencia de acumulaciones sedimentarias de gran espesor, que evidencian la existencia de un volumen rocoso con contraste de densidad negativo asociado al Piedemonte Andino. Un tercer dominio, con magnitudes intermedias entre -37,2 a -0,3 mGal, asociado a la cuenca Barinas-Apure.

Los análisis espectrales del mapa de anomalía de Bouguer realizados para cada uno de los cuerpos geológicos descritos, arrojaron una discontinuidad de Mohorovicic entre 33 y 32 km; mientras que la discontinuidad de Conrad varió entre los 15 a los 12,8 km.

- Se definió una discontinuidad intra-paleozoico, la cual se ubica a 5,37 km hacia el Piedemonte, a 4,44 km hacia los Llanos Sur Occidentales y 2,61 km para El Baúl; esto es cónsono con la discontinuidad cortical definida por Martínez (2012), quien la asocia a la transición Cámbrico-Paleozoico Superior.

- El tope del Pre-Cretácico en la zona del Piedemonte Andino, de acuerdo al análisis espectral, se encuentra a 3,23 km, mismo valor que se obtiene de promediar los topes calculados a partir de los datos pozos suministrados. Los Llanos Sur Occidentales presentan el tope Pre-Cretácico a 2,44 km, en acuerdo con los datos de

pozos proveídos, los cuales indicaron que este tope se encuentra a profundidades entre 2,6 y 2,3 km. En la zona de El Baúl, los análisis espectrales definieron este tope a una profundidad promedio de 0,93 km, que aunque, no presente pozos dentro del área, la ubicación del pozo más cercano a los altos gravimétricos, similares al alto del Baúl, señala un tope a 1,9 km, evidenciando la proximidad de estos cuerpos a superficie. La disposición de los valores obtenidos, definen la geometría del depocentro de la cuenca Barinas-Apure.

- El filtrado de las anomalías de Bouguer fue aplicado para obtener la separación regional y residual, lo que permitió el realce de cada uno de estos aspectos individualmente y a detalle. Se observó un mapa regional con características similares al mapa de anomalía de Bouguer inicial, lo que evidencia una señal gravimétrica dominada mayormente por tendencias de carácter regional. El mapa residual presento una carga espectral importante, lo que resalta la influencia de la geología somera. Se realizó un análisis espectral a los mapas de anomalía de Bouguer regional y residual con la finalidad de comprobar la correcta aplicación de los filtros. Indicando que las mayores profundidades asociadas a anomalías regionales, corresponden a longitudes de ondas entre $k = 0$ y $k = 0,03$ rad/km; mientras que las longitudes de onda que se encuentran entre $k = 0,03$ rad/km y $0,09$ rad/km se pueden asociar a las menores profundidades afectadas por eventos superficiales.

- Como recomendación de esta investigación, se puede mencionar la realización de modelados gravimétricos que soporten las interpretaciones obtenidas del mapa de anomalía de Bouguer; incorporar la información proveniente de perfiles de sismica de refracción profunda, que ayuden a definir el límite entre el dominio del basamento Paleozoico y Pre-Cámbrico, lo que podría contribuir a la definición de la posible existencia de secuencias Jurásicas, Triásicas, e inclusive del Paleozoico Inferior, así como, de mayor información de pozos, para caracterizar, con mejor confiabilidad, la morfología del basamento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ✓ **Arráiz, P. y Dinis, D. (2008).** Interpretación integrada del macizo ígneo – metamórfico de la región El Baúl – estado Cojedes. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.55-99.
- ✓ **Blin, B., E. Cabrera Y J.F. Stephan. (1989).** Evolución geológica Oligoceno-reciente de la cuenca de Guarumen. Memoria VII Congreso geológico Venezolano, Barquisimeto, 1989. 2:663-672.
- ✓ **Debeglia, N. y Dupont, F. (2001).** Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics*. 50, 435-454.
- ✓ **Dimitriadis G, Tselentis, G., Thanassoula, K. (1989).**A basic program for 2-D spectral analysis of gravity data y source-depth estimation *Computers & Geosciences*. 13, 5, 549-560.
- ✓ **Drewes, H., Torge, W., Roder, R. H. (1991).**Absolute and relative gravimetric surveys of national and geodynamic networks in Venezuela. *Journal of South American Earth Sciences*. 4, (4), 273-286.
- ✓ **Feo-Codecico, G. y Foster, S. (1984).** Basement and Paleozoic rock of the Venezuelan Llanos Basins. *Geological Society of America, Memoir* 162. 175-187.
- ✓ **FUNVISIS, USGS, INTEVEP & PDVSA (2000).** *Map of quaternary faults of Venezuela*, Escala 1:2.000.000; Data compilada por: Audemard, F; Digitalizado por: Cox, J. & Dart, R.; Coordinado por: Machette, M.; como parte del Programa Internacional de la Litósfera, grupo de trabajo II-2.
- ✓ **González R. y Sánchez J (2012).** Informe técnico de inicio de actividades previas al desarrollo de la adquisición gravimétrica del proyecto GIAME. Pág. 5-14.
- ✓ **González de Juana, C; Iturralde de Arozena, J. & Picard Cadillat, X. (1980).** *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas* 1era Edición. Editorial Foninves, Caracas

- ✓ **Hinze, W. y Aiken, C. (2005).** New standards for reducing gravity data Geophysics: The North American gravity database. *Geophysics*.70, (4), 125–132.
- ✓ **Kiser, G. y I. Bass (1985).** La reorientación del Arco El Baúl y su importancia económica. VI Congreso Geológico Venezolano, pág. 5122-5135.
- ✓ **Kiser, G. D., (1989).** Relaciones Estratigráficas de la Cuenca Apure/Llanos con áreas adyacentes, Venezuela suroeste y Colombia Oriental. Sociedad Venezolana de Geología. 77pp.
- ✓ **Kiser, G. D., (1997).** Nuevas contribuciones a la geología de la cuenca Barinas-Apure y se frente de montañas.
- ✓ **LaFehr, T. R., (1991b).** An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction. *Geophysics*, 56, 1179–1184p.
- ✓ **Longman, I. M. (1959).** “Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun,” *J. Geophys. Res.*, 64. 2351-2355.
- ✓ **Lowrie, W. (2007).** Gravity the figure of the Earth and geodynamics (Second ed., pp. 43-99) *Fundamentals of Geophysics*. New York, Cambridge University Press.
- ✓ **Magellan.(2006).** ProMark 3, Reference Manual. Estados Unidos.
- ✓ **Martínez, Y. (2012).** Caracterización geológica mediante la integración de información geofísica del sector Mantecal- La Estacada, Estado Apure. Trabajo Especial Grado, EGMYG, UCV- Inédito. 87-122.
- ✓ **Mohr, P. J. y Taylor, B. N.(2001).**The fundamental physical constant. *Physics Today*. 54, 6–16.
- ✓ **Moritz, H. (1980).** Geodetic Reference System 1980. *Bulletin Géodésique*, 54, 395±405.
- ✓ **Moore, D. S. (2000).**Descripción de las distribuciones con numerous (segunda edición). Barcelona, España.
- ✓ **Orihuela, N, García, A. Y Tabare, T, (2011a).** Mapa de gravedad absoluta y de anomalía gravimétrica de Venezuela derivado de datos satelitales. *Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas*, 26 (I).

- ✓ **Orihuela, N, García, A, Garzón, Y. González, J. Y Tabare, T. (2011b).** Mapa de anomalía magnética de Venezuela derivado de los datos satelitales. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas, 26 (I).
- ✓ **Parnaud Y, Gou Y, Pascual J, Truskowski I, Galango O, Passalacqua H. (1995).** Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuela Basin. En Tankard A, Suarez S, Welsink H (Eds.) Petroleum Basins of south America. AAPG Mem. 62: 741-756.
- ✓ **Ponce, J. (2011).** Los llanos Venezolanos. Consultado el 30 de marzo del 2013. <http://josevargasponce.wordpress.com/2011/05/08/el-llano-venezolano/>.
- ✓ **Sarabia, J. M., y Saez, M. P. (2007).** Curso básico de estadística para economía y administración de empresas (segunda edición). Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- ✓ **Scintrex Limited. (2012).** *CG-5 Scintrex Autograv™ System Operation Manual*. Canada: SCINTREX Limited.
- ✓ **Serway, R. (1998).** Física. Tomo I. James Madison University. Cuarta Edición. Mcgraw-Hill. 540 P.
- ✓ **Smith, F. (1980).** El basamento y las rocas paleozoicas en la parte norte de Venezuela. Caracas. Corpoven S. A. Reimpreso en: Geos, UCV Caracas, 40 (2009): 109-110, 73p; en CD, 2010.
- ✓ **Somigliana, C. (1930).** Geofisica — Sul campo gravitazionale esterno del geoide ellissoidico: Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti. Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, **6**, 237–243.
- ✓ **Spector, A. y Grant, F. (1970).** Statistical Model for Interpreting Aeromagnetic Data. Geophysics, 35,(2),293-302.
- ✓ **Telford, W. N., Geldart L.P., y Sheriff, R.E. (1990).** Applied Geophysics Cambridge University Pres. Londres. Tercera Edición.
- ✓ **Viscarret, P., Urbani, F., Wright, J. (2012)** Una nueva geocronología del macizo del Baúl, estado Cojedes, Venezuela. Tesis Doctoral, EGMYG, UCV. En Geos 42:1-14.

- ✓ **Yoris, F. & Ostos, M.** Evaluación de Pozos, Capitulo 1: Geología de Venezuela. En WEC (1997). Schlumberger Oilfield Services.
- ✓ **Wenzel, H., 1985,** Hochauflosende Kugelfunktionsmodelle fur des Gravitation spotential der Erde [1]: Wissenschaftliche arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universitat Hannover, **137**.
- ✓ **Xiong Li, et, al. (2006).** The quest for perfect gravity anomaly, first Edition. New calculation standards. Estados Unidos. SEG