

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO.

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO DE LA
REGIÓN NORTE DEL ESTADO AMAZONAS MEDIANTE EL
MODELADO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO USANDO
DATOS SATELITALES.**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Luis M. Castro C.
para optar al título de
Ingeniero Geofísico.

Caracas, 2015.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO.

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO DE LA
REGIÓN NORTE DEL ESTADO AMAZONAS MEDIANTE EL
MODELADO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO USANDO
DATOS SATELITALES.**

TUTOR ACADÉMICO: INÍRIDA RODRÍGUEZ.
COTUTOR ACADÉMICO: SEBASTIÁN GRANDE.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Luis M. Castro C.
para optar al título de
Ingeniero Geofísico.

Caracas, Octubre de 2015.

Caracas, 3 de Noviembre 2015.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica; para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el BR. Luis M. Castro C., titulado:

**“CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO DE LA
REGIÓN NORTE DEL ESTADO AMAZONAS MEDIANTE EL
MODELADO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO USANDO
DATOS SATELITALES.”**

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

Prof. Mariano Arnaiz
Jurado

Prof. Janckarlos Reyes
Jurado

Prof. Inírida Rodríguez Millán
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios,

A mis padres,

En especial a mi maravillosa madre,

A mis abuelos, a mis tíos, a mi hermosa familia,

A esta extraordinaria tierra que me vio crecer.

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por permitirme estudiar en sus aulas y enriquecerme como persona.

A la facultad de ingeniería y a la escuela de Geología, Minas y Geofísica por cada uno de los conocimientos adquiridos.

A mi tutora, la profesora Inírida Rodríguez Millán por creer en mí y darme la oportunidad de aprender un poco más acerca de la Geofísica.

A mi cotutor, el profesor Sebastián Grande por su valiosa ayuda en relación a la geología de la región.

Al profesor Mariano Arnaiz y su excelente disposición a ayudarnos para resolver diversos problemas con el procesamiento.

Al profesor Ricardo Alezones, como un ejemplo constante de figura íntegra y comprometida con los estudiantes que hacen vida en la escuela.

A mis compañeros de clase y amigos quienes siempre estuvieron presentes para brindar apoyo cuando lo necesité.

A mi mamá por el interés constante, impulso que me permitió resolver cada uno de los inconvenientes surgidos.

A todos y cada uno, gracias.

Luis Manuel Castro Carapaica

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO DE LA REGIÓN
NORTE DEL ESTADO AMAZONAS MEDIANTE EL MODELADO
GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO USANDO DATOS SATELITALES.

RESUMEN

Tutor Académico: Inírida Rodríguez M.

Cotutor Académico: Sebastián Grande

Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas Y Geofísica.

Palabras claves: Gravimetría satelital, magnetometría satelital, modelos geológicos, anomalía de Bouguer, anomalía magnética, modelos estructurales, deconvolución de Euler, deconvolución de Werner, Amazonas (estado).

La Geofísica permite caracterizar diferentes zonas del planeta según criterios físicos y geológicos, por medio de diferentes métodos; dos de los más usados son la gravimetría y la magnetometría. Mediante el presente trabajo se realizó un estudio al área Norte del estado Amazonas, Venezuela; específicamente entre las longitudes 68° - 65° W y las latitudes 6° - 4°. Esto se hizo mediante diferentes bases de datos, cada una con diferente resolución. La más representativa para anomalía de Bouguer arrojó valores en la zona de 45 a -150 mGal con un gradiente aproximado de 1,76 mGal/km y una orientación de contornos de N20°E. Dicha anomalía permite interpretar mediante comparación directa con la geología de la zona, estructuras como bloques de granito, plutones, material sedimentario y dos grandes valles de rift que atraviesan la zona. A su vez el rango de la anomalía magnética se encuentra entre -139 y 102 nT exhibe zonas con alto contenido magnético hacia el norte, contrario a lo observado en la sección sur donde los cerros del grupo Roraima tienen un contenido muy bajo de magnetización remanente.

Por otra parte las deconvoluciones de Euler y Werner probaron ser una herramienta útil en la determinación de estructuras y cambios de las mismas en profundidad; permitiendo ver claramente los grabens de Casiquiare al suroeste, Suapure en el centro de la región y Ventuari al este. Por último los modelos del subsuelo realizados a través de perfiles de las anomalías, constituyen una base para reconstruir la historia de la región, ya que permiten establecer profundidades y formas asociadas a las unidades presentes así como una aproximación al cambio que ocurre en la corteza terrestre conforme aumenta la profundidad.

INDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
INDICE	vii
INDIDE DE FIGURAS	xi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Zona de estudio	3
1.3 Alcance	4
1.4 Trabajos previos.....	4
CAPÍTULO II	6
MARCO GEOLÓGICO	6
2.1 Marco tectónico	6
2.2 Escudo de Guayana.....	7
2.3 Geología regional de la zona.....	8
2.3.1 Provincia de Imataca.....	8
2.3.2 Provincia de Pastora.....	9
2.3.3 Provincia de Cuchivero	10
2.3.4 Provincia de Roraima.....	10
2.5 Geología local de la zona	11
2.6 Intrusiones en el escudo de Guayana	16
2.7 Mapa geológico de la zona.....	18
2.7 Depósitos minerales en la región	20
CAPÍTULO III	21
MARCO TEÓRICO	21

3.1 Gravedad.....	21
3.1.1 Leyes de Newton:.....	21
3.2 Estructura de la Tierra y principales discontinuidades	22
3.2.1 Mohorovicic.....	22
3.2.2 Repetti.....	23
3.2.3 Gutenberg.....	23
3.2.4 Wiechert-Lehmann.....	23
3.2.5 Conrad.....	23
3.2 Gravimetría	23
3.3 Anomalía de Bouguer	24
3.3.1 Corrección de aire libre.....	24
3.3.2 Corrección de Bouguer	25
3.3.3 Corrección topográfica.....	25
3.3.4 Corrección por latitud	27
3.4 Magnetismo.....	28
3.4.3 Campo total.....	29
3.5 Anomalía magnética	31
3.5.1 Susceptibilidad magnética.....	31
3.6 I.G.R.F	32
3.7 Filtrado de datos.....	32
3.7.1 Separación Regional – Residual	32
3.7.2 Derivadas direccionales	33
3.7.3 Cosenos direccionales:.....	33
3.7.4 Reducción al Polo y al Ecuador:	33
3.8 Espectro de potencia	34
3.9 Deconvolución	34
3.9.1 Deconvolución de Euler.....	34
3.10.2 Deconvolución de Werner	35
3.11 Modelos de datos satelitales.....	36
3.11.1 EGM2008.....	37
3.11.2 WGM2012	37
3.11.3 GGMplus.....	38
3.11.4 EMAG2.....	38

3.12 Modelos o perfiles del subsuelo	39
CAPÍTULO IV	40
MARCO METODOLÓGICO	40
4.1 Esquema general de trabajo	40
4.2 Investigación bibliográfica.....	40
4.2 Creación de la base de datos	41
4.3 Análisis estadístico.....	41
4.4 Cartografiado de anomalías	42
4.4.1 Importar datos	42
4.4.2 Crear mapas	42
4.4.3 Espectro de potencia	43
4.4.4 Filtrado.....	43
4.4.5 Deconvolución de Euler.....	43
4.4.6 Deconvolución de Werner	44
4.4.7 Perfil de subsuelo	44
CAPÍTULO V.....	45
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	45
5.1 Estudio de parámetros estadísticos	45
5.2 Análisis estadístico GGMplus.....	45
5.3 Análisis estadístico Emag2	48
CAPÍTULO VI.....	52
ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
6.1 Espectros de potencia.....	52
6.1.1 Espectro de potencia ABAE	52
6.1.2 Espectro de potencia UCSD.....	53
6.1.3 Espectro de potencia GGMplus	54
6.1.4 Espectro de potencia Emag2	56
6.2 Topografía.....	57
6.3 Anomalía de aire libre.....	59
6.4 Anomalía de Bouguer	62
6.5 Anomalía regional de Bouguer	66
6.6 Anomalía residual de Bouguer.....	67
6.7 Derivada direccional de la anomalía de Bouguer	68

6.8 Anomalía magnética, base de datos ABAE, modelo Emag2	69
6.9 Campo geomagnético de referencia internacional o IGRF	71
6.10 Anomalía regional magnética, base de datos ABAE, modelo Emag2	72
6.11 Anomalía residual magnética, base de datos ABAE, modelo Emag2	73
6.11 Derivada direccional, base de datos ABAE, modelo Emag2	74
6.12 Reducción al Ecuador y al Polo magnético	75
6.13 Deconvolución de Euler.....	77
6.14 Deconvolución de Werner	81
6.15 Modelado estructural en base a perfiles de la zona.....	83
6.15.1 Modelos regionales de la zona.	85
6.15.2 Modelos totales de la zona	86
CAPÍTULO VII	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
7.1 Conclusiones.....	90
7.2 Consideraciones generales	91
7.3 Recomendaciones	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
APENDICE.....	98

INDIDE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Mapa de Venezuela, región del estudio se encuentra dentro del cuadrado.3

Figura 2. 1 Mapa del continente Suramericano y consideraciones geológicas asociadas. Tomado de Barrios (1985).	7
Figura 2. 2 Escudo de Guayana. Modificado de Yanez (1984).	8
Figura 2. 3 Provincias geológicas del Escudo de Guayana Venezolano. Modificado de Gamero (2009). En rojo se encuentra la zona estudiada	12
Figura 2. 4 Provincias geocronológicas estructurales del Amazonas, Barrios et al., (1985). En rojo se encuentra la zona estudiada por el presente trabajo.	13
Figura 2. 5 Diferentes dominios presentes en el estado Amazonas. Modificado de Barrios et al. (1985). La región en estudio está delimitada por el rectángulo rojo.	14
Figura 2. 6 Valles de Rift del estado Amazonas. Modificado de Soares (1985).	16
Figura 2. 7 Diques de Diabasa en el escudo de Guayana. Modificado de Gomez, (2015).	17
Figura 2. 8 Mapa geológico detallado de la zona de estudio.	18
Figura 2. 9 Leyenda del mapa geológico.	19
Figura 2. 10 Mapa metalogénico de Venezuela, Bellizzia et al., (1980).	20

Figura 3. 1 Esquemmatización de la placa de Bouguer para un volumen cilíndrico. Geosoft (2007).	25
Figura 3. 2 Formas de calcular la corrección topográfica. Modificado de Lowrie (2007).	26
Figura 3. 3 Elementos del campo magnético. Nettleton (1971).	30

Tabla 3. 1 Elementos del campo magnético.	35
---	----

Figura 4. 1 Etapas de la investigación.	40
---	----

Tabla 5. 1 Población estudiada, base de datos GGMplus.	46
Tabla 5. 2 Estadísticos descriptivos base de datos GGMplus.	46
Tabla 5. 3 Prueba de Kolmogorov, base de datos GGMplus.	47
Tabla 5. 4 Población estudiada, base de datos Emag2.	49
Tabla 5. 5 Estadísticos descriptivos base de datos Emag2	49

Tabla 5. 6 Prueba de Kolmogorov, base de datos Emag2. _____	50
Figura 6. 1 Espectro de potencia, base de datos ABAE. _____	53
Figura 6. 2 Espectro de potencia, base de datos UCSD. _____	54
Figura 6. 3 Espectro de potencia, base de datos GGMplus. _____	55
Figura 6. 4 Espectro de potencia, base de datos Emag2. _____	56
Figura 6. 5 Topografía, base de datos ABAE. _____	57
Figura 6. 6 Topografía, base de datos UCSD. _____	58
Figura 6. 7 Topografía, datos tomados del modelo SRTM. _____	59
Figura 6. 8 Anomalía de aire libre, base de datos ABAE. _____	60
Figura 6. 9 Anomalía de aire libre, base de datos UCSD. _____	61
Figura 6. 10 Anomalía de aire libre, base de datos GGMplus. _____	62
Figura 6. 11 Anomalía de Bouguer, base de datos ABAE. _____	63
Figura 6. 12 Anomalía de Bouguer, base de datos UCSD. _____	64
Figura 6. 13 Anomalía de Bouguer, base de datos GGMplus. _____	65
Figura 6. 14 Anomalía Regional de Bouguer, base de datos GGMplus. Por continuación analítica hacia arriba a 70 km. _____	66
Figura 6. 15 Anomalía Residual de Bouguer, base de datos GGMplus. Para regional por continuación analítica hacia arriba a 70 km. _____	68
Figura 6. 16 Derivada direccional, base de datos GGMplus. _____	69
Figura 6. 17 Anomalía Magnética, base de datos Emag2. _____	70
Figura 6. 18 Campo geomagnético de referencia internacional. _____	71
Figura 6. 19 Anomalía Regional Magnética, base de datos Emag2. Por continuación analítica hacia arriba a 100 km. _____	72
Figura 6. 20 Anomalía Residual Magnética, base de datos Emag2. Para regional por continuación analítica hacia arriba a 100 km. _____	73
Figura 6. 21 Derivada direccional magnética, base de datos Emag2. _____	74
Figura 6. 22 Filtro de reducción al Ecuador, base de datos Emag2. _____	75
Figura 6. 23 Filtro de reducción al Polo, base de datos Emag2. _____	76
Figura 6. 24 Deconvolución de Euler aplicada a datos gravimétricos. _____	78
Figura 6. 25 Deconvolución de Euler aplicada a datos magnéticos. _____	79
Figura 6. 26 Deconvolución de Euler 3D aplicada a datos de anomalía de Bouguer. _____	80
Figura 6. 27 Deconvolución de Werner, perfil Este – Oeste. _____	81
Figura 6. 28 Deconvolución de Werner, perfil N45°E. _____	82
Figura 6. 29 Ubicación de perfiles sobre anomalía de Bouguer. _____	83
Figura 6. 30 Ubicación de perfiles sobre anomalía magnética. _____	84
Figura 6. 31 Anomalía gravimétrica y rasgos estructurales de la región estudiada. _____	84
Figura 6. 32 Modelo geológico – estructural, perfil Este Oeste. El símbolo amarillo representa el punto de corte entre los perfiles. _____	88
Figura 6. 33 Modelo geológico – estructural, perfil Norte 45° Este. El símbolo amarillo representa el punto de corte entre los perfiles. _____	89

Tabla 6. 1 Estimación de profundidades, base de datos ABAE.	53
Tabla 6. 2 Estimación de profundidades, base de datos UCSD.	54
Tabla 6. 3 Estimación de profundidades, base de datos GGMplus.	55
Tabla 6. 4 Estimación de profundidades, base de datos Emag2.	56
Tabla 6. 5 Parámetros de los modelos.	85
B. 1 Histograma de frecuencias - Base de datos ABAE.	101
B. 2 Diagrama de caja y bigotes - Base de datos ABAE.	101
B. 3 Histograma de frecuencias - Base de datos UCSD.	102
B. 4 Diagrama de caja y bigotes - Base de datos UCSD.	102
C. 1 Mapas de anomalía regional de Bouguer por superficies polinómicas.	103
C. 2 Mapas de anomalía regional de Bouguer por continuación analítica hacia arriba. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: regionales a 40, 50, 60 y 70 km.	104
C. 3 Mapas de anomalía regional magnética por continuación analítica hacia arriba. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: regionales a 50, 60, 70, 80, 90 y 100 km.	105
D. 1 Modelo regional, perfil Este Oeste.	106
D. 2 Modelo regional, perfil Norte 45° Este.	107

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la Geofísica, como ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista de sus propiedades físicas, se ha intentado caracterizar el subsuelo de diferentes regiones del planeta a través de múltiples métodos. Para el caso de Venezuela se busca delimitar en primera instancia el comportamiento regional del territorio para posteriormente mediante métodos de detalle, conocer la distribución de posibles zonas de prospección, dado que la búsqueda y explotación de minerales constituye parte importante de la actividad económica del país; por esto es necesario optimizar las labores de exploración y explotación. Sin embargo la región Sur del país, específicamente el Escudo de Guayana (estados Bolívar y Amazonas) y parte de los llanos occidentales se encuentran sin estudio geofísico alguno o con poca información detallada de índole geológico-estructural en comparación con los estados al Norte y Occidente de Venezuela. Siendo esta región rica en fauna y elementos naturales, es importante tener un conocimiento bastante preciso de la región a fin de no afectar los parques naturales presentes como es el caso del macizo Cuao-Sipapo, el parque nacional Yapacana y demás tepuyes encontrados a lo largo del territorio del estado.

Por ello mediante los métodos gravimétricos y magnéticos se podrá establecer un contraste del comportamiento de la zona y así delimitar estructuras, procesos y tipo de rocas presentes. Usando sensores remotos, que obtengan datos a través de satélites, es posible entonces hacer estudios exploratorios a un bajo costo de operación y así crear un modelo de la región con un buen nivel de detalle sin necesidad de tomar mediciones propiamente en el lugar. Una vez obtenidos estos datos y usando las anomalías de Bouguer y magnética se generarán distribuciones del comportamiento regional de la región así como modelos integrados producto de perfiles de anomalía en porciones de la zona en estudio.

Este proyecto toma una muestra del territorio de tres grados de longitud y dos de latitud, la cual se podrá enlazar posteriormente con diferentes proyectos y así tener un catálogo completo de la estructura del subsuelo del estado Amazonas, para posteriormente enlazarlo con demás regiones del país. Todo ello a través de los modelos de gravedad y magnetismo generados con bases en datos recolectados por diferentes misiones espaciales como las emprendidas por los satélites GOCE, GRACE, CHAMP, entre otros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Caracterizar de forma geológica y estructural el subsuelo de la región Norte del estado Amazonas mediante el modelado gravimétrico y magnético usando datos satelitales.

1.1.2 Objetivos específicos

- Organizar una base de datos detallada de la zona como contribución al estudio gravimétrico y magnético del estado Amazonas.
- Analizar el comportamiento del subsuelo de la zona a través de mapas de anomalía de Bouguer y sus variantes.
- Determinar la estructura del subsuelo a partir de mapas de anomalía magnética y sus respectivos atributos.
- Integrar los resultados obtenidos al procesar los datos de la zona usando datos gravimétricos y magnéticos.
- Generar un perfil del subsuelo asociado a la ventana asignada para el análisis detallado de la región.

1.2 Zona de estudio

Este estudio comprende la región Norte del estado Amazonas, específicamente entre las coordenadas 4° – 6° N y 68° – 65° W. Con un añadido de 15 minutos en todas las direcciones para correcciones de borde e interpolación de los datos. El área a caracterizar se compone principalmente de rocas ígneas que comprenden las provincias geológicas de Parguaza y Cuchivero, metamórficas Pastora y sedimentarias Roraima.

En cuanto a la distribución geográfica de la región de estudio ésta comprende los municipios Atures, Autana, Manapiare, Atabapo y el borde Norte del Alto Orinoco para el estado Amazonas, así como las fronteras con los municipios Cedeño (al Norte) y Sucre (al Este) para el estado Bolívar. De igual forma existe una franja al Oeste de la región la cual pertenece al Departamento de Guanía en Colombia. Por el lado Este la zona colinda con el estado de Roraima perteneciente a Brasil.

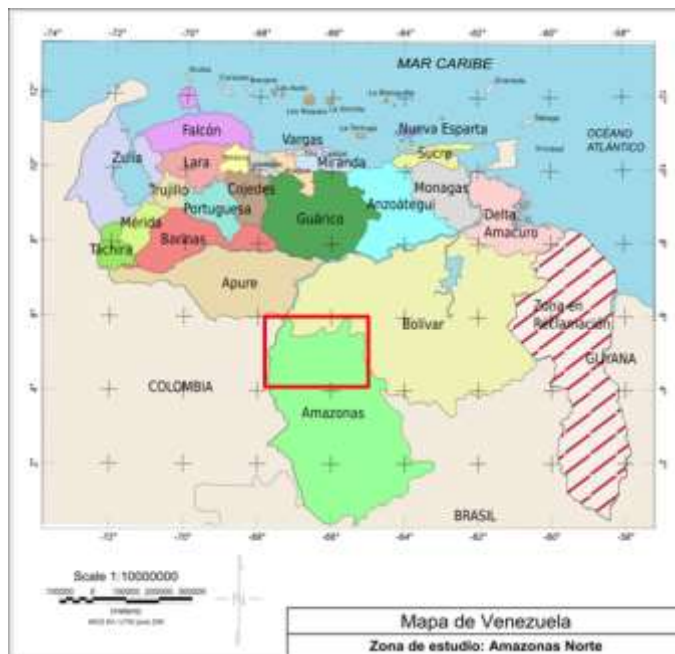


Figura 1. 1 Mapa de Venezuela, región del estudio se encuentra dentro del cuadrado.

1.3 Alcance

Mediante este proyecto se pretende contribuir al conocimiento de la geología del estado Amazonas como un primer paso para la caracterización estructural de todo el territorio venezolano con el objeto de delimitar zonas de interés geológico y de posible prospección de recursos naturales. Esto se realizará a través de las bases de datos de ABAE (Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales), UCSD (Universidad de California en San Diego por sus siglas en inglés) y GGMplus (Global Gravity Model) elaborado por la Universidad de Curtin en Australia junto con la Universidad Técnica de Munich en Alemania. Con lo cual se tienen cuatro bases de datos, tres para anomalía gravimétrica y una para anomalía magnética.

1.4 Trabajos previos

El estado Amazonas ha sido poco estudiado desde el punto de vista geofísico; en el caso de la región Norte existen varios trabajos que pueden mencionarse como son Sierra (2002) ubicado al Sur de Puerto Ayacucho en donde se hizo una reinterpretación de datos aeromagnéticos combinada con información gravimétrica para generar un modelo de la zona, así como Erasmo (2002) quien realizó un estudio similar al sur-este de San Fernando de Atabapo.

Por otra parte ligados a este estudio se encuentran los trabajos de Wendel (2013) al Este de la Serranía La Neblina y Rangel (2014) en la región de San Carlos de Río Negro del estado Amazonas los cuales caracterizaron la zona mediante datos gravimétricos y magnéticos obteniendo diferentes fuentes anómalas a 5, 10 y 22 km de profundidad con un estimado del manto a 42 km con base en el estudio sísmico realizado por Chalbaud (2000).

De igual forma el trabajo de Kusnir (2015) sirve como cotejo de la profundidad y geometría de las estructuras encontradas en el presente proyecto; el mismo estimó

fuentes anómalas a 6 y 20 km así como múltiples intrusiones en la zona, delimitando el manto a igual profundidad que los trabajos antes mencionados.

Por último los trabajos de Lozano (2004), Morgado (2004) y Pérez (2004) constituyen una importante fuente de información por encontrarse sobre el cratón de Guayana, donde la profundidad del manto se estima entre 37 y 40 km. En dichas zonas se observa la presencia de múltiples estructuras encontradas también al Oeste del Escudo. De forma general toda la región presenta gran fallamiento e intrusiones.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Marco tectónico

Los diversos procesos y eventos que afectaron a la Tierra al momento de su creación y posterior a esta dieron lugar a una estructura interna compuesta por un núcleo, el manto y la corteza; esta última se subdivide en grandes trozos de material rocoso denominado placas tectónicas, las cuales poseen una rata de movimiento asociado así como interacción entre ellas, responsable en muchos casos de una sismicidad asociada. Los episodios donde la corteza tuvo un mayor crecimiento están asociados a orogénesis de gran magnitud, durante la creación de supercontinentes (Pangea, Gondwana, entre otros). Estimados hace 2.7 (Kenorlandia), 1.9 (Columbia), 1.0 (Rodinia) y 0.2 (Gondwana) Ga, según Mendoza (2012).

Una descripción general de todo el continente suramericano (figura 2.1) muestra diversas áreas cratónicas como el cratón Amazónico y el de San Francisco, fajas móviles asociadas al territorio de Brasil, coberturas precámbricas, cadenas andinas en la parte oeste del continente que lo recorren de norte a sur y diversas cuencas esparcidas en la región (Amazonas, Paraíba, Paraná). Venezuela se encuentra entre las placas Caribe (al norte) y la placa suramericana, donde la primera se encuentra en subducción por debajo de la segunda. La región en estudio está directamente sobre el Escudo de Guayana, al sur del país.



Figura 2. 1 Mapa del continente Suramericano y consideraciones geológicas asociadas. Tomado de Barrios (1985).

2.2 Escudo de Guayana

Los cratones constituyen las raíces de los continentes, o las partes más antiguas de los mismos que no han sufrido importante deformación desde el precámbrico, donde procesos como la orogénesis o la subsidencia no son observados. Un cratón puede presentar escudos, donde aflora directamente material del precámbrico; así como una plataforma o parte más estable que se encuentra cubierta por sedimentos más recientes de escaso espesor. Las rocas pertenecientes a la era Precámbrica se encuentran principalmente en dos grandes bloques, los escudo de Guayana y africano, los cuales en épocas anteriores formaron parte de continentes ya disgregados, como Gondwana.



Figura 2. 2 Escudo de Guayana. Modificado de Yanez (1984).

El Escudo de Guayana (figura 2.2) el cual se extiende por gran parte del norte de Suramérica, tiene forma oval y constituye una de las zonas con material arqueano y proterozoico, donde se observa gran diversidad de facies (ígneas, sedimentarias y metamórficas). El mismo se divide en múltiples provincias cuya superficie en Venezuela constituye cerca de 430000 km², distribuidos entre los estados Amazonas, Bolívar y el sur de Delta Amacuro, desde el río Orinoco hasta la serranía la Neblina en Amazonas y Santa Elena de Uairén en Bolívar.

2.3 Geología regional de la zona

Con base en la petrología a gran escala de la región, el Escudo ha sido dividido en cuatro provincias mayores las cuales serán descritas a continuación.

2.3.1 Provincia de Imataca

Ubicada al norte del estado Bolívar (figura 2.3), con rumbo E-NE, abarca un área variable entre los 70 y 150 Km², extendiéndose desde el Caura hasta Delta Amacuro. Está compuesta de material metasedimentario como granulitas plagioclásicas,

notables intercalaciones de gneises máficos y félsicos, cuarcita, mármol e intrusiones de granito y diques de diabasa. Posee un contacto superior discordante con el material de la provincia de Pastora y su contacto inferior se desconoce aun cuando se especula que haya formado parte del basamento de la secuencia supracortical de los cinturones de rocas verdes, Kalliskoski, (1965 a y b). Se correlaciona con las granulitas y gneises del Grupo Kanukú en Guyana, con las granulitas del río Falsino y con el Grupo Adampada-Fallawatra en Brasil, con las granulitas y rocas asociadas de las montañas Bakhuys (Surinám) y con la Serie Isla de Cayena de la Guayana Francesa. Por medio de datación radiométrica con el método de Rb/Sr se determinó que el material tiene entre 3000 y 3400 Ma, siendo el material más antiguo encontrado en el Escudo de Guayana. Además la zona tiene importantes depósitos de hierro y menores yacimientos de caolín, manganeso y bauxita.

2.3.2 Provincia de Pastora

Se encuentra al sur y este de la Provincia de Imataca y abarca desde el río Paragua hasta la frontera con Guyana; está formada por una secuencia supracortical de rocas verdes ubicada preferentemente en zonas sinclinales entre domos graníticos, Sierra (2002). Está compuesta por unidades de rocas volcánicas máficas a intermedias divididas en una sección inferior y una superior respectivamente. El grupo inferior incluye a la formación El Callao compuesta por una serie de metalavas basálticas almohadilladas y la formación Cicapra de esquistos anfibolíticos con presencia de tobas, grauvacas y sills máficos. Mientras que el grupo superior delimitado por la formación Yuruarí incluye rocas sedimentarias de grano grueso con estratificación delgada y metalavas dacíticas con cristales de feldespato y cuarzo. Toda la provincia exhibe esporádicamente granitos jóvenes. El contacto inferior es siempre concordante con las rocas graníticas del Complejo de Supamo, del cual se observan algunas intrusiones. Es correlacionable con la formación La Cuaima y el Grupo Caroní. A través de diferentes métodos, entre ellos el de U-Pb (Menéndez, 1994), se establece una edad de entre 2050 y 2300 Ma para la unidad. Tiene importantes recursos auríferos y de metales base como Cu, Pb, Zn y Mn.

2.3.3 Provincia de Cuchivero

Se encuentra al occidente del escudo venezolano y abarca el NE del estado Amazonas y afloramientos al sur, así como gran parte del estado Bolívar. Está constituida mayormente de rocas plutónicas donde predominan los granitos calco-alcalinos, así como rocas meta-volcánicas félsicas y meta-sedimentarias; presenta sills, diques de diabasas y vetas pegmatíticas. Según Mendoza (2012), las provincias Imataca y Pastora, poseen un contacto discordante y de falla con Cuchivero, citado como Frente Tectónico del Caura. De forma detallada esta provincia está compuesta por diversas asociaciones como Cedeño (Granito de Santa Rosalía y Granito de Guaniamito), donde el material es de grano fino a grueso, macizo y con débil foliación, se diferencian ya que el primero es más rico en cuarzo y pobre en feldespato potásico, el segundo a su vez posee desarrollo de gneisoidad. Como facie transicional de dicha secuencia se encuentra el granito de San Pedro. Por otra parte se encuentran las volcánicas de Caicara compuestas de una secuencia de rocas extrusivas ácidas que afloran en la región noroeste del estado Bolívar, las mismas se encuentran en contacto intrusivo con la asociación Cedeño. Por último la asociación Suapure compuesta por los granitos del Parguaza y de Los Pijiguaos; ambos de roca maciza y de grano grueso en donde varía el color, tintes rosados y opacos respectivamente, así como la textura (rapakivi o con forma de ojos para Parguaza). En cuanto a la edad de esta provincia se han realizado diferentes dataciones por los métodos de K/Ar Olmeta (1968), Rb/Sr Hurley et al. (1968) y Moreno et al. (1977) que lo sitúan entre 1100 y 1800 Ma, estando asociada a los eventos Orinoquense y Transamazónico.

2.3.4 Provincia de Roraima

Abarca la parte central del estado Bolívar y zonas dispersas del estado Amazonas debido a la erosión. Está compuesta principalmente de material sedimentario perteneciente al Grupo Roraima, el cual para el estado Bolívar se divide de abajo hacia arriba en las formaciones Uairén, Cuquenán, Uaimapué y Matatuí. En el estado Amazonas no ha podido diferenciarse claramente hasta la fecha. La litología consiste

básicamente de conglomerados, areniscas, cuarcitas, tobas volcánicas silicificadas y rocas arcillosas de ambientes fluvio-transicionales. Los contactos inferiores encuentran discordantemente rocas volcánicas erosionadas y meteorizadas así como intrusiones de sills de diabasa y sus diques satélites (Bellizzia, 1957). Se correlaciona con las formaciones Roraima en Guyana y Surinam, al igual que la formación Urupi en Brasil. Su edad ha sido determinada por diversos estudios Snelling et al. (1969), Gansser, (1974), y oscilan entre 1350 y 1700 Ma, donde los sedimentos se hacen más jóvenes en sentido oeste-este. Destacan conglomerados al este del Escudo que son fuente de diamante y oro aluvial. Como información adicional, esta provincia forma altiplanicies del orden de kilómetros, denominadas tepuyes o cerros, con altitudes que sobrepasan los 2000 m. Los sills intrusivos en Roraima, han sido datados por el metodo de U/Pb en circón/ badeleyita, en 1797 +/- 7 Ma de modo que la roca caja de Roraima en la SE de Bolívar, NE de Brasil y Guyana tiene al menos 1800 Ma.

2.5 Geología local de la zona

La zona de estudio presenta una geología compleja caracterizada mayormente por la presencia de material granítico, donde el Granito del Parguaza, las provincias de Cuchivero y Roraima, todas proterozoicas son las que poseen una mayor extensión (figura 2.3), por otra parte sedimento del cuaternario, pequeñas intrusiones ígneas y material metamorfozido son apreciables en la región; todo esto tiene influencia en la respuesta de las propiedades gravimétricas y magnéticas de la zona con lo cual se podrá caracterizar en profundidad la distribución de las estructuras.

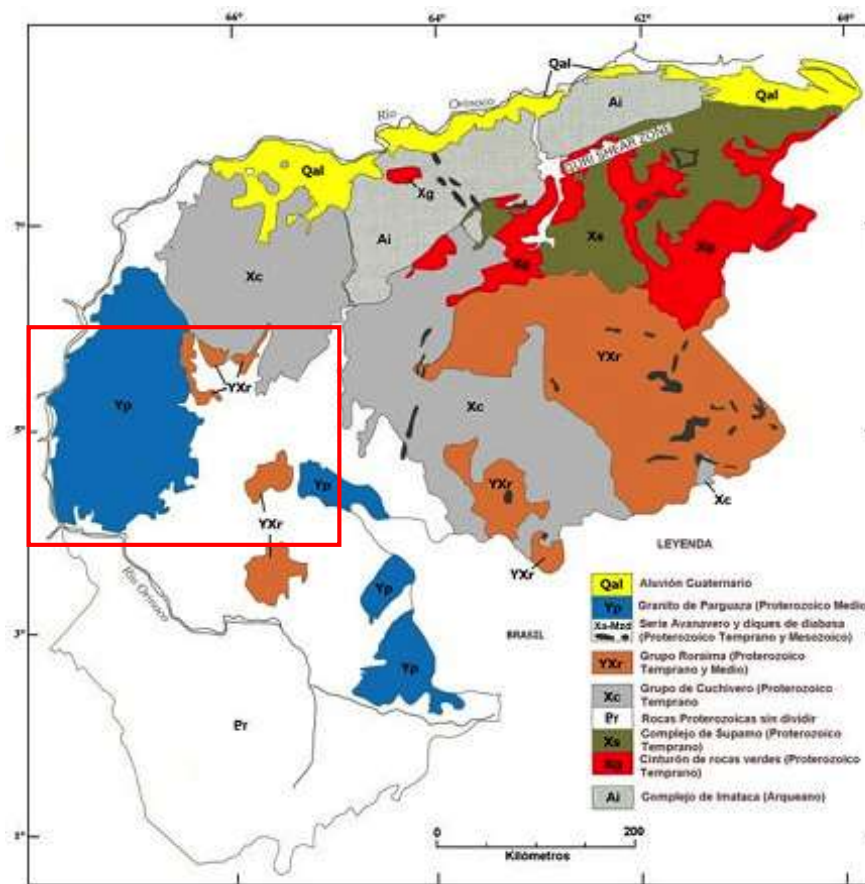


Figura 2. 3 Provincias geológicas del Escudo de Guayana Venezolano. Modificado de Gamero (2009).

En rojo se encuentra la zona estudiada

De forma detallada la región exhibe a rasgos generales en la parte oeste la presencia del Granito del Parguaza en su totalidad, seguida de sedimento en la parte central y material granítico al este. El Grupo Roraima aparece en diversos puntos como el macizo Cuao-Sipapo y demás tepuyes de la zona. Cuchivero domina la parte norte siendo difícil diferenciar otros dominios.

Desde el punto de vista estructural el cratón Amazónico se originó a partir de un núcleo antiguo central por medio de la acreción lateral de diversos cinturones móviles marginales. Por lo cual la región está conformada por granitoides mencionados anteriormente los cuales son producto de grandes eventos geotectónicos, plutones, macizos alcalinos, intrusiones básicas y material sedimentario del precámbrico (Barrios, 1985). Debido al alto nivel de complejidad estructural y litológica (figura

2.4) que con el paso del tiempo ha moldeado la región, se pueden diferenciar dos zonas o dominios, nombrados Ventuari y Casiquiare (figura 2.5). De igual forma se observa una tercera zona al sur de nombre Siapa con características similares a las de Casiquiare.

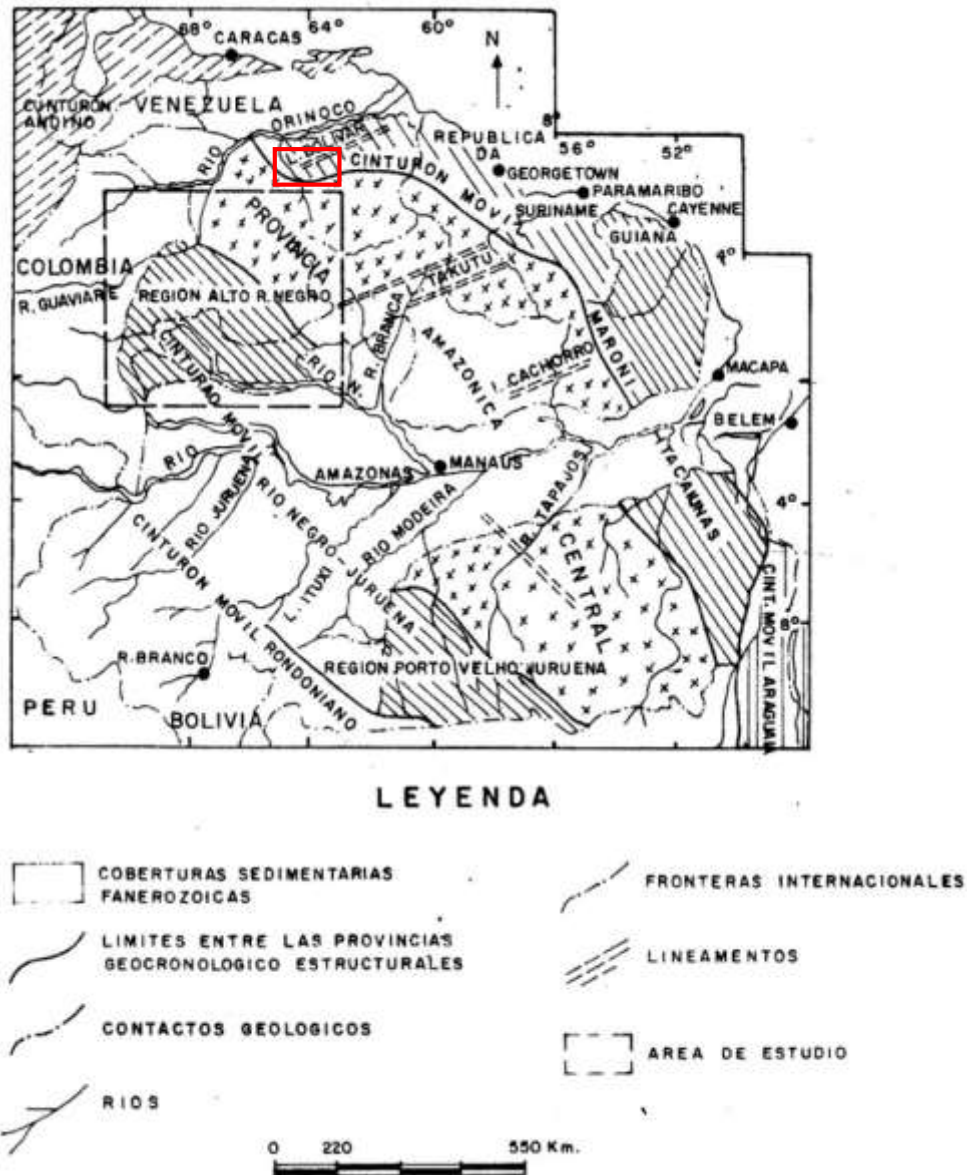


Figura 2. 4Provincias geocronológicas estructurales del Amazonas, Barrios et al., (1985). En rojo se encuentra la zona estudiada por el presente trabajo.

La región estudiada, enmarcada en rojo (figura 2.5) se encuentra en el Dominio Ventuari, surcada por múltiples ríos que dan cuenta de diversos procesos que tuvieron incidencia en su formación. En la misma se observa un relieve accidentado con elevaciones súbitas de la topografía, donde los granitoides de gran extensión son comunes así como los plutones y coberturas sedimentarias tabulares (Barrios, 1985).

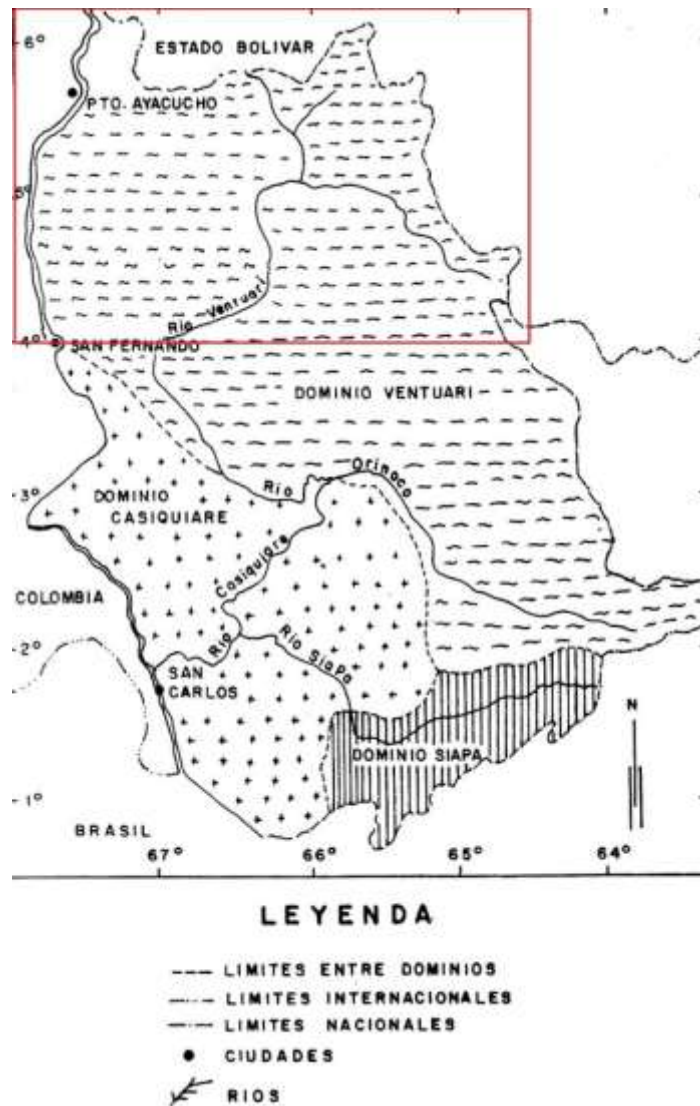


Figura 2. 5 Diferentes dominios presentes en el estado Amazonas. Modificado de Barrios et al. (1985).

La región en estudio está delimitada por el rectángulo rojo.

Por otra parte el dominio Casiquiare que puede observarse de forma escasa al sur, se compone de afloramientos de granitoides regionales con migmatización y sin plutones ni coberturas sedimentarias. El estado Amazonas exhibe la presencia de múltiples fracturas geológicas (figura 2.6) de edades anteriores. Las principales estimadas en 1300 Ma, entre ellos tenemos a la derecha, cercano al estado Bolívar el Rift Ventuari – Labarejuri; al centro el Valle rift de Suapure – Mavaca, éste atraviesa el estado desde la serranía la Neblina hasta el río Orinoco al norte; por último el Rift de Casiquiare de menor extensión en comparación al anterior se encuentra al oeste. Cabe acotar el cambio en la dirección predominante de los diferentes rift, el cual tiene lugar aproximadamente a nivel de río Atabapo. Los mismos se relacionan con el evento tectotermal Orinoquense y la distensión del valle de Rift de Suapure –Mavaca; resalta la presencia de sienitas y granitos alcalinos asociados a un evento tectónico extensional, Según Soares (1985).

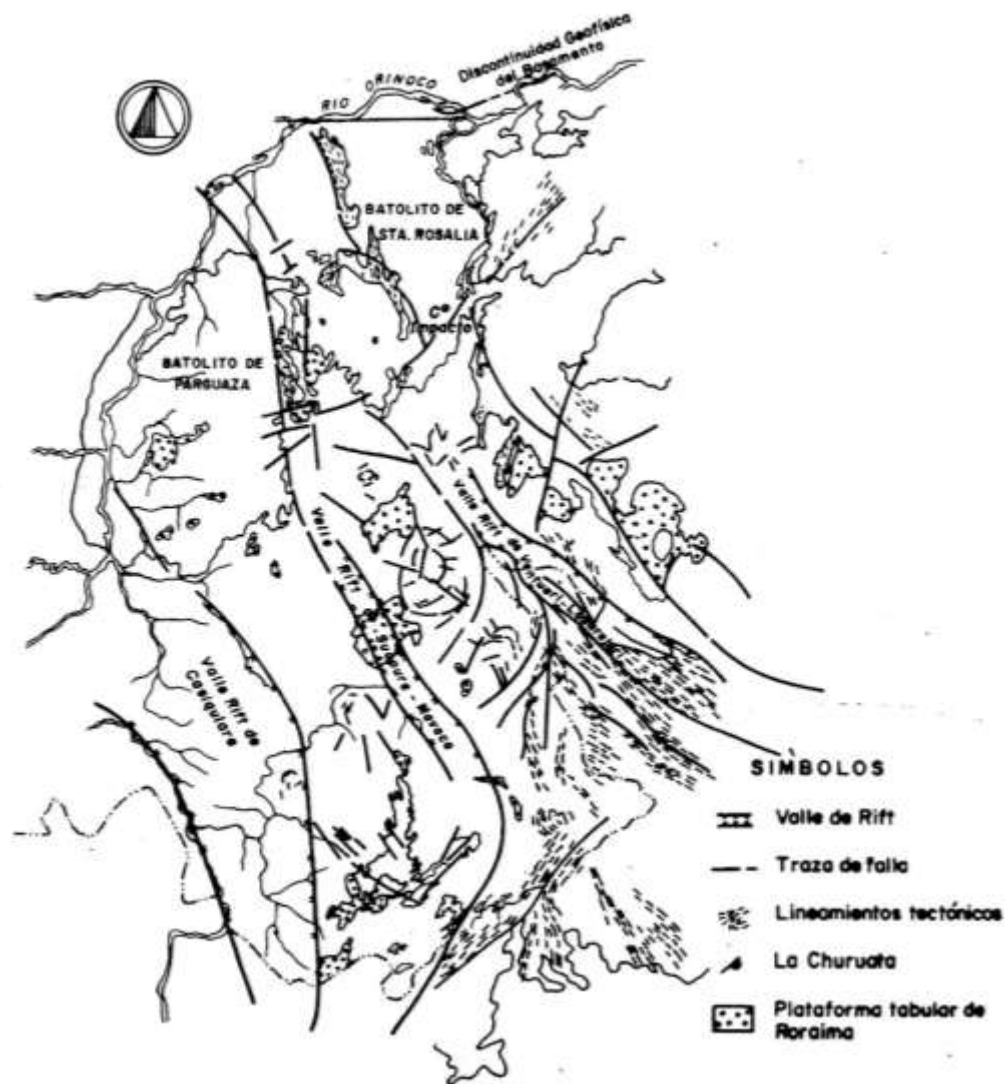


Figura 2. 6 Valles de Rift del estado Amazonas. Modificado de Soares (1985).

2.6 Intrusiones en el escudo de Guayana

La intrusión de diques y mantos de diabasa en corteza continental indica procesos de expansión cortical y litosférica, que en ocasiones puede llegar al rifting y a la separación continental. En el mapa siguiente (figura 2.7), se observan en rojo cuerpos máficos (diques en forma alargada y sills de forma esparcida). Se diferencian ya que los diques son subverticales a verticales e intrusionan discordantemente al basamento ígneo-metamórfico, mientras que los mantos son subhorizontales y

generalmente intrusionan a rocas del Grupo Roraima o afines, que están típicamente estratificadas, con buzamientos subhorizontales.

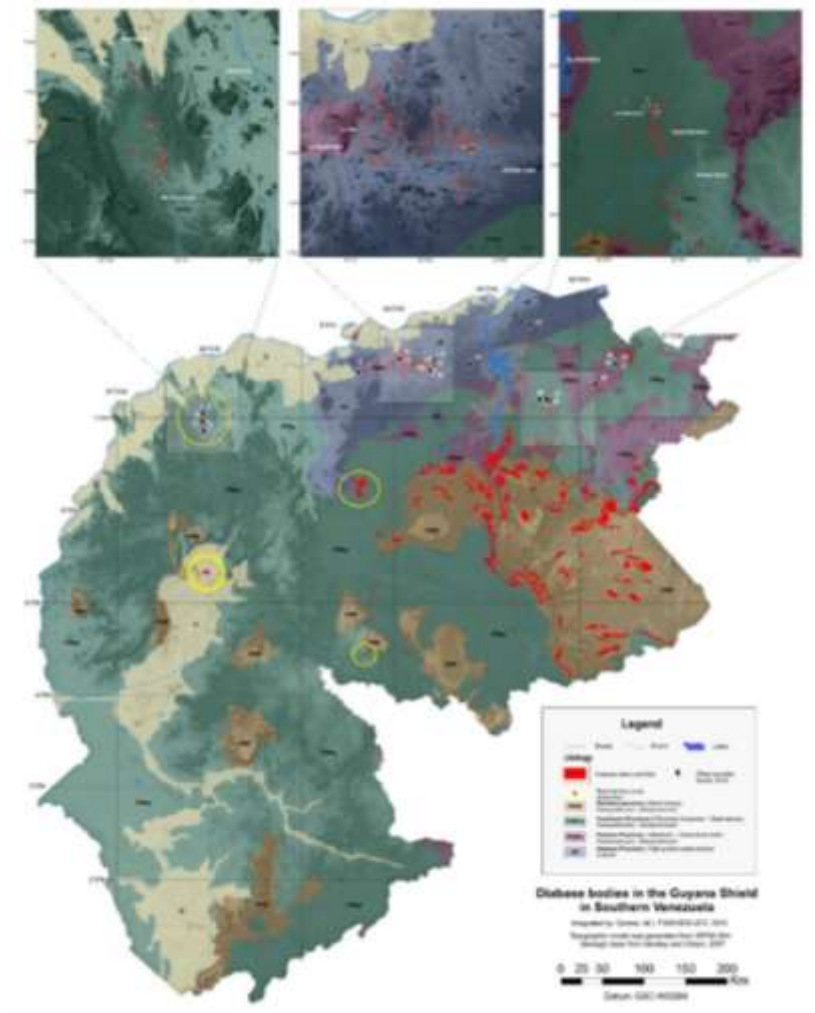


Figura 2. 7 Diques de Diabasa en el escudo de Guayana. Modificado de Gomez, (2015).

Existen dos enjambres de diques de diabasa, de diferentes edades, que están en la zona del río Guaniamo y otros en el río Aro (ambos al norte), los cuales podrían estar relacionados al patrón estructural de la zona. De igual forma, cercano a San Juan de Manapiare se encuentra un manto subhorizontal de extensión considerable que podría incidir en la geometría de los estratos en profundidad, además de otro enjambre de diques de diabasa.

2.7 Mapa geológico de la zona

La región estudiada, en la parte norte del estado Amazonas, tiene una extensión aproximada de 3 grados (°) de longitud y 2 grados (°) de latitud, que con un añadido de 15 minutos (") en cada dirección para tener una mejor cobertura, tiene un área de aproximadamente 100.000 km cuadrados. Abarcando al oeste una parte del territorio Colombiano y al este un trozo de Brasil.

El mapa detallado de la zona (figura 2.7) fue elaborado con mapas geológicos de cada país y posteriormente integrado en uno solo. Los autores fueron los siguientes; Hackley, Urbani, Karlsen y Garrity, 2006 para Venezuela, Tapias *et al.*, 2007 para Colombia y Alves *et al.*, 2015 para Brasil.

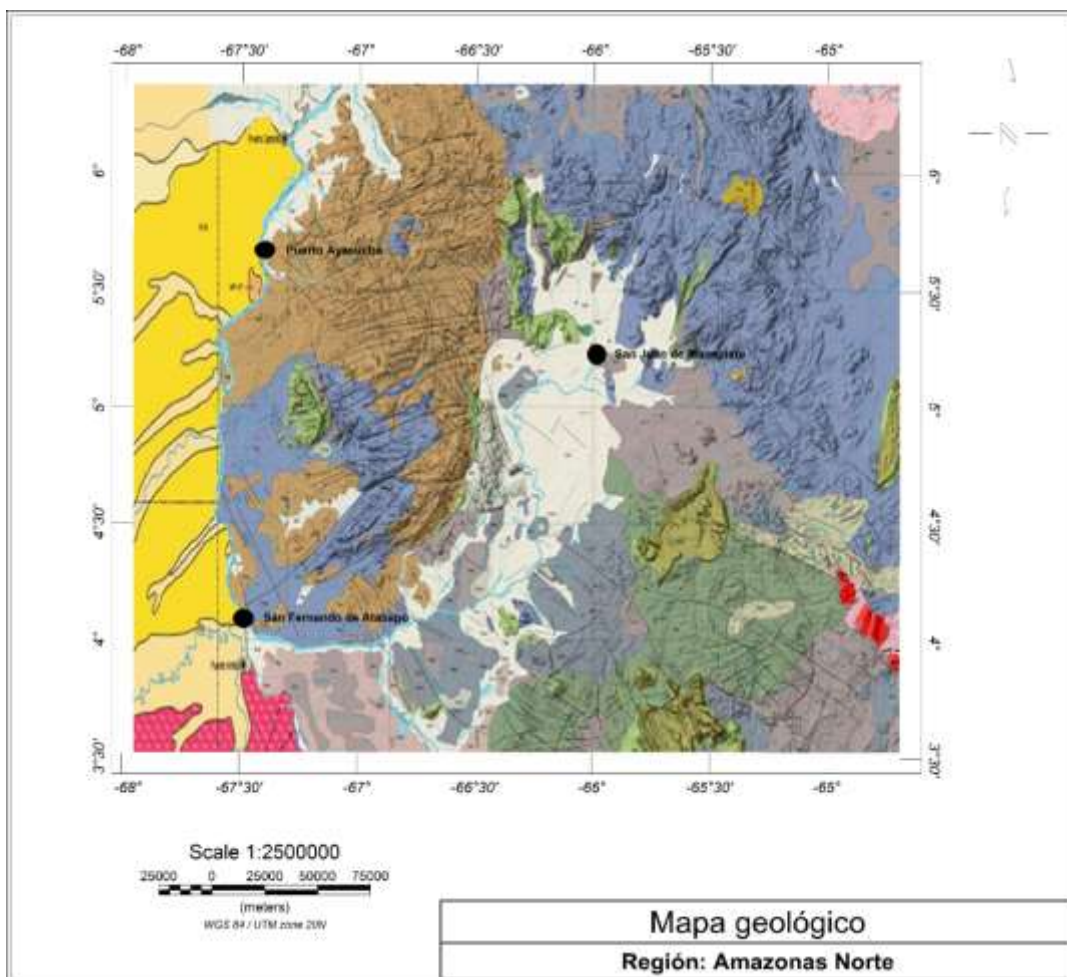


Figura 2. 8 Mapa geológico detallado de la zona de estudio.

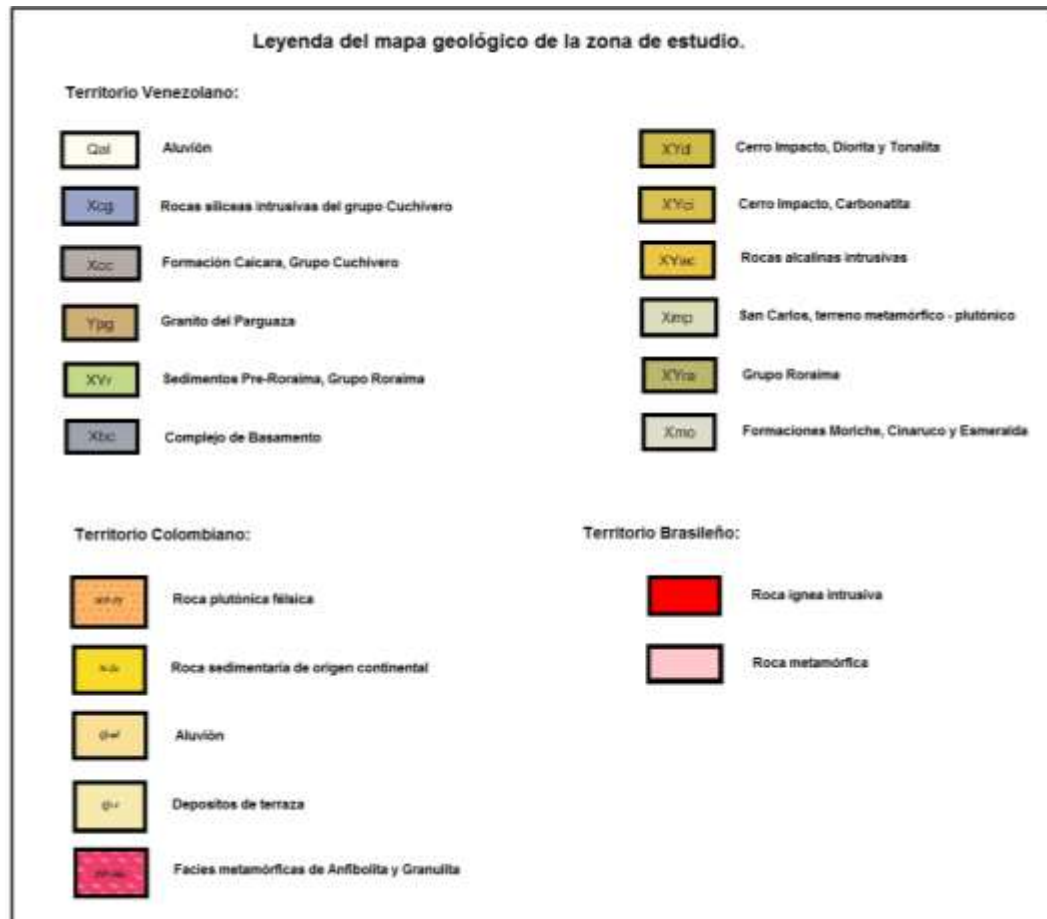


Figura 2. 9 Leyenda del mapa geológico.

De forma detallada (figuras 2.8 y 2.9) la zona está dominada por material ígneo con presencia considerable de cobertura sedimentaria (Roraima) y afloramientos de material metamórfico para el área venezolana; anfibolitas y granulitas al sur y sedimentos al NO en la zona colombiana, así como alternancia de granitos y rocas metamórficas al este, en territorio brasileño.

2.7 Depósitos minerales en la región

El territorio venezolano posee diversos tipos de recursos minerales esparcidos en múltiples zonas del país, de los cuales gran parte se encuentran en el escudo de Guayana. Según el mapa de Bellizzia (1980) mostrado en la figura 2.10, al norte del estado Amazonas hay evidencias de pequeñas mineralizaciones de niobio y terbio de edad precámbrica (1900 a 1500 Ma) en rocas ígneas concordantes, así como grandes depósitos de placeres de estaño del terciario y cuaternario. Por otra parte en el borde sureste de la región hay evaporitas de entre 1500 y 600 Ma con presencia de Uranio.

Cabe destacar la posible presencia de remanentes de aluminio en sedimentos y granitos de los Pijiguaos; y elementos pesados como hierro y plomo en la franja que colinda con el estado Bolívar al este.

Todo ello es indicativo de la importancia en términos de explotación de minerales que posee la región.

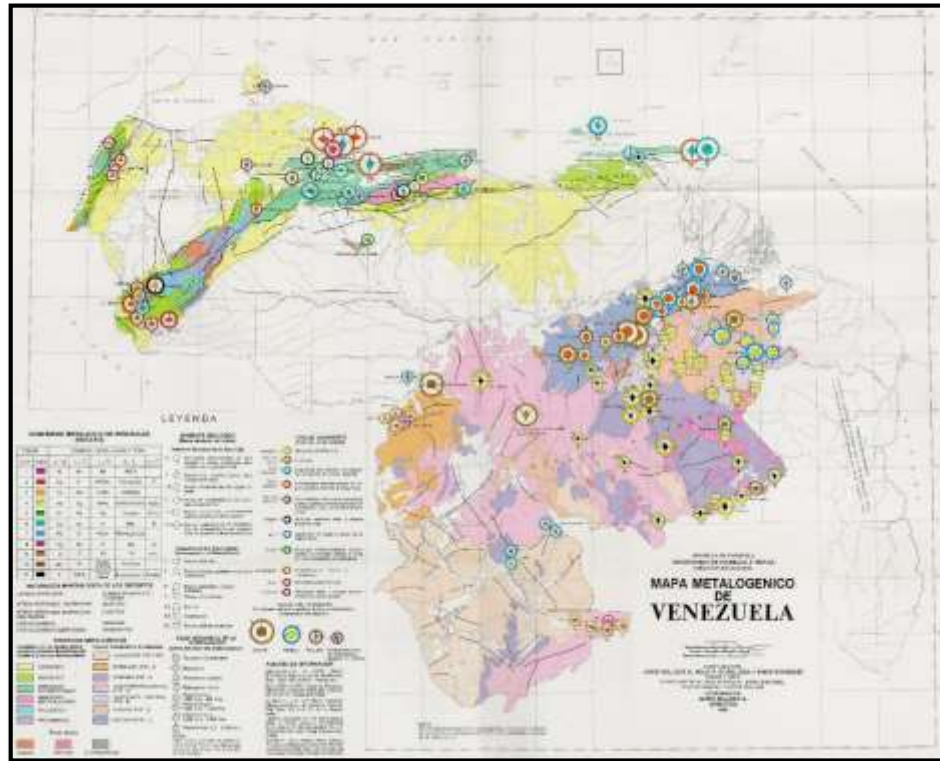


Figura 2. 10 Mapa metalogénico de Venezuela, Bellizzia et al., (1980).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Gravedad

Establecida como una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza y definida como la atracción entre dos cuerpos que poseen masa y están separados una cierta distancia, la gravedad es la base de todos los estudios de gravimetría y su punto de partida se originó con la Ley de Gravitación Universal establecida por Newton en su “*Philosophiæ naturalis principia mathematica*” o Principios matemáticos de la filosofía natural.

Para entender de mejor manera estos conceptos debemos estudiar los postulados de Newton o sus leyes de la mecánica, principios a partir de los cuales se explican gran parte de problemas de la física moderna.

3.1.1 Leyes de Newton:

- Primera ley o Ley de la Inercia: todo cuerpo sobre el cual no incidan fuerzas externas se mantendrá en reposo o movimiento constante. Entendiendo por inercia el nivel de resistencia que experimenta un cuerpo dado un cambio en su movimiento.
- Segunda ley o Ley de la Fuerza: determina que si se aplica una fuerza a un cuerpo, éste experimentará aceleración, lo que es igual a un cambio de la velocidad del cuerpo con respecto al tiempo. De forma matemática esto equivale a: $F = m * a$
- Tercera ley o Ley de Acción y Reacción: Cuando una fuerza determinada actúa sobre un cuerpo, éste reacciona con una fuerza de igual magnitud, pero en sentido inverso. Escrito de en lenguaje matemático representa lo siguiente: $F_{12} = - F_{21}$.

- Dicho esto la Ley de Gravitación surge de la modificación de las tres leyes anteriores aplicadas al caso de un planeta y su sol o en general a dos cuerpos esféricos, con lo cual luego de procedimientos matemáticos se llega a la siguiente ecuación:

$$F = G * \frac{m1*m2}{r^2} \quad \text{Ec. 2.1}$$

3.2 Estructura de la Tierra y principales discontinuidades

La Tierra es el tercer planeta del sistema solar ubicado a 150 millones de km de su estrella, con forma esférica y un radio cercano a los 6360 km. Dividida en una parte externa (atmosfera e hidrosfera) e interna, la cual está conformada por diversas capas; incluye un núcleo compuesto de dos partes, una interna sólida y una capa externa semisólida, principalmente (hierro y níquel) y con una densidad muy alta del orden de 10 a 13 g/cm³, seguida de un nivel medio viscoso denominado manto compuesto de hierro y silicatos de magnesio como el olivino además de una mezcla de óxidos de magnesio, hierro y silicio donde la densidad varía entre 3.4 y 5.6 g/cm³ y tienen lugar diversos procesos como la convección o corrientes de material en estado fluido debido a las altas temperaturas y presiones. Por último, la corteza terrestre o capa más fina con un espesor que varía entre 11 km para las zonas de dorsales oceánicas hasta los 70 km en cadenas montañosas como Los Andes.

A su vez la Tierra posee zonas donde sus propiedades físicas varían súbitamente, estas son conocidas como discontinuidades y se describen a continuación:

3.2.1 Mohorovicic: es la región de transición entre la corteza y el manto, su profundidad varía entre los 10 km donde la corteza es más delgada (dorsales) hasta los 70 km bajo los continentes, encontrándose por lo general entre los 35 – 45 km.

3.2.2 Repetti: ubicada en promedio a los 900 km de profundidad separa el manto superior del inferior.

3.2.3 Gutenberg: la delimita un cambio en la composición del medio en donde las ondas sísmicas (principales herramientas para caracterizar la composición de la Tierra), siendo la zona en donde se separa el manto inferior del núcleo externo ubicada a unos 2900 km.

3.2.4 Wiechert-Lehmann: se encuentra a 5100 km de profundidad y separa el núcleo externo del interno, siendo un indicador de una variación en la densidad del medio.

3.2.5 Conrad: es una zona de transición ubicada dentro de la corteza terrestre y sirve para diferenciar zonas basálticas y graníticas, no es detectable a lo largo de toda la corteza, su profundidad media se estima a los 20 km.

3.3 Gravimetría

Esta ciencia es una de las ramas principales de la Geofísica y consiste en el estudio y medición del campo de gravedad terrestre. Dicho valor de aceleración es medido con un gravímetro, el cual es un instrumento capaz de cuantificar el peso de un cuerpo por medio de la fuerza que actúa sobre una masa.

Existen dos clases:

- Absolutos: los cuales trabajan midiendo directamente la aceleración de una masa durante la caída libre en el vacío, cuando el acelerómetro está unido rígidamente al suelo. Son altamente precisos aunque su costo es muy elevado.

- Relativos: son básicamente una masa atada a un resorte y dependiendo de cuanto se estire se puede cuantificar el valor de gravedad. Se usa como nivel de referencia el geoide o nivel promedio del mar. Se emplean más en campo debido a la portabilidad, costo y disponibilidad de las instituciones encargadas del estudio a realizar.

3.4 Anomalía de Bouguer

Herramienta fundamental en la caracterización geológico – estructural de una región sobre la superficie terrestre, mide el valor de la gravedad en puntos diferentes haciendo uso de diversas correcciones que eliminan múltiples efectos asociados al medio. La unidad formal de medida es el mGal, donde $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$; esto debido a que las magnitudes estudiadas son sumamente pequeñas. El valor de la gravedad en la corteza terrestre es aproximadamente 980,000 mGal. Si la Tierra fuese homogénea y uniforme el valor de la gravedad variaría conforme a la latitud. Por otra parte, como nivel de referencia internacional para el cálculo de la anomalía, existe el denominado geoide o nivel medio del mar que permite estandarizar todas las mediciones realizadas.

Tomando las fórmulas matemáticas simplificadas, los parámetros a tomar en cuenta para el cálculo de la anomalía de Bouguer son:

3.4.1 Corrección de aire libre: elimina el efecto de la elevación de la estación donde se realice la medición. La corrección al aire libre no presta atención a la densidad del material entre la estación de medición y el elipsoide (Lowrie, 2007). De forma matemática equivale a la siguiente cantidad:

$$Cal = 0.3086 * h \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde h : altura de la estación.

3.4.2 Corrección de Bouguer: compensa el efecto de una capa de roca, cuyo espesor corresponde a la diferencia de elevación entre la estación de medición y el nivel de referencia (datum). Modelado mediante un disco sólido de densidad ρ y radio infinito centrado en la estación (Lowrie, 2007).

$$CBg = 0.04191 * h * \rho \quad \text{Ec. 2.3}$$

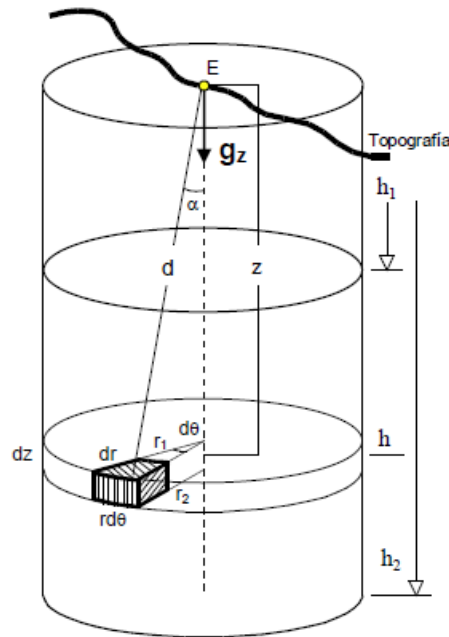


Figura 3. 1 Esquemmatización de la placa de Bouguer para un volumen cilíndrico. Geosoft (2007).

3.4.3 Corrección topográfica: conocida como una de las correcciones más complicadas de calcular debido al volumen de cálculos a realizar; existe como una forma de eliminar el efecto de depresiones y elevaciones en el terreno (valles y montañas) no tomados en cuenta por la corrección de Bouguer. Debido a que se midió sin material en dentro de estos, se debe calcular la atracción de esa masa y

sumarla para anularla. De igual forma las montañas no fueron consideradas para la laja de Bouguer, ya que éstas disminuyen el valor de la gravedad, se debe sumar su efecto. Por lo cual para montañas o valles, esta corrección será siempre positiva.

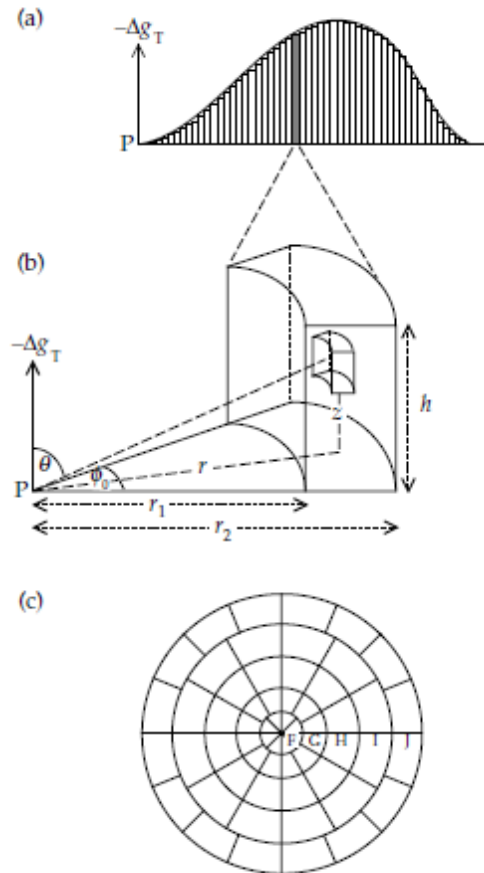


Figura 3. 2 Formas de calcular la corrección topográfica. Modificado de Lowrie (2007).

Se realiza de las siguientes formas:

- Dividiendo la topografía en elementos verticales.
- Calculando cada elemento cilíndrico de acuerdo con su altura por encima o por debajo de la estación de medición.
- La suma de las contribuciones para todos elementos alrededor de la estación con la ayuda de un grilla circular sobre un mapa topográfico.

3.4.4 Corrección por latitud: ya que la Tierra no es una esfera perfecta, siendo los polos achatados, el valor de la gravedad teórica variará con el lugar donde se encuentre la estación de medición. La fórmula empleada en este trabajo es la de Moritz (1980), conocida como GRS80.

$$G_{teo} = k * \frac{g_{obs} * (1 + (k * \sin^2(\varphi))}{(1 - e^2 * \sin^2(\varphi))^{1/2}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Dónde:

- La gravedad normal en el ecuador es: $g_e = 978032.67715 \text{ mGal}$
- K es una constante: $K = 0.001931851353$
- La primera excentricidad numérica: $e^2 = 0.0066943800229$

*Valores tomados de Hinze *et al.*, (2007).

De forma que una vez realizadas todas las correcciones, el cálculo de la anomalía de Bouguer total consiste en la suma de cada una, mediante la siguiente ecuación:

$$ABg = G_{obs} \pm C_{al} \mp C_{Bg} + C_{Topo} - G_{teo} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Otra forma de anomalía de gravedad es la anomalía de aire libre la cual no toma en cuenta la corrección de Bouguer ni el efecto de la topografía. Siendo su fórmula la siguiente:

$$Aal = G_{obs} \pm C_{al} - G_{teo} \quad \text{Ec. 2.6}$$

3.5 Magnetismo

El campo geomagnético es relevante en estudios de Geofísica dado que genera una respuesta sobre los materiales que se encuentran dentro de la Tierra. Dicho campo fue descubierto y estudiado por el científico Carl Gauss en 1838. Esta perturbación es mayormente dipolar (norte y sur magnético), la misma parte de diversos procesos como el efecto dínamo generado por la convección de los materiales del núcleo interno y externo (hierro y níquel) lo cual genera un magnetismo permanente; además del efecto de Coriolis o aceleración relativa asociado a la rotación del planeta, así como los cinturones de Van Allen donde existe una mayor concentración de partículas cargadas las cuales inciden en menor manera sobre la dirección e intensidad del campo.

La medición del campo magnético se realiza mediante un magnetómetro, instrumento que puede ser de dos tipos; escalares (los cuales miden la fuerza total del campo magnético al que están sometidos) y vectoriales (capaces de medir la componente del campo magnético en una dirección preferencial).

- Algunos parámetros importantes asociados al magnetismo son:

3.5.1 Inclinación: suponiendo la presencia de un plano horizontal, la inclinación magnética será el ángulo vertical entre un vector de posición o meridiano magnético y dicho plano. Ésta es positiva para ángulos por encima de la superficie plana y negativa cuando es de forma opuesta. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I = \arctan \frac{B_z}{\sqrt{(B_{0x}^2 + B_{0y}^2)}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

3.5.2 Declinación: ya que el norte geográfico y el norte magnético no se encuentran exactamente alineados, se calcula el ángulo o azimut entre el norte geográfico y el eje magnético de la Tierra, el cual varía lentamente en el tiempo, éste es positivo al este y negativo al oeste. Su ecuación es la siguiente:

$$D = \arcsen \frac{B_y}{\sqrt{(B_{0x}^2 + B_y^2)}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

3.5.3 Campo total: el campo magnético terrestre varía lenta y progresivamente en el tiempo tanto en intensidad como en dirección; también es afectado por la radiación solar, la cual altera la ionosfera creándose corrientes eléctricas, las mismas crean campos magnéticos que interaccionan con el campo geomagnético. Por ello es necesario corregir el valor final del campo para eliminar la presencia de dichos efectos, obteniendo así un valor final denominado campo total.

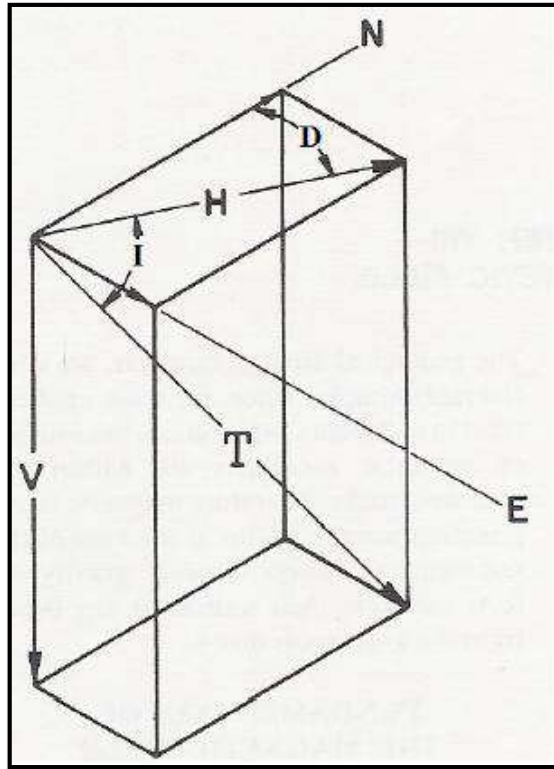


Figura 3. 3 Elementos del campo magnético. Nettleton (1971).

Dónde los parámetros corresponden a:

- T = Intensidad Magnética Total del Campo
- H = Intensidad Magnética horizontal
- V = Intensidad Magnética vertical
- N = Norte geográfico
- E = Este geográfico
- I = Inclinación
- D = Declinación

3.6 Anomalía magnética

Debido a las múltiples variaciones que existen dentro del campo magnético terrestre, es posible comparar los valores magnéticos de las rocas subyacentes asociados a la susceptibilidad del material, con las cantidades magnéticas calculadas de forma teórica. Estas anomalías dependen de factores como la geometría y la localización de las masas de roca y su orientación con respecto al campo terrestre (Dobrin y Savit 1988). Al generar mapas de dichos parámetros se puede interpretar la estructura y composición de la región estudiada, su aplicación principal es la búsqueda de recursos minerales.

3.6.1 Susceptibilidad magnética: se entiende como la capacidad que poseen los materiales a magnetizarse debido a la presencia de un campo magnético. Varía dependiendo del tipo de material, sea estos:

- Diamagnéticos: caracterizados por susceptibilidades magnéticas negativas, lo que significa, que la imantación inducida en ellos está orientada en sentido opuesta con respecto al campo externo aplicado.
- Paramagnéticos: ligeramente magnéticos, caracterizados por susceptibilidades magnéticas positivas pequeñas.
- Ferromagnéticos tienen susceptibilidades positivas y relativamente altas. Están asociados a elementos metálicos como hierro, níquel, entre otros.

La ecuación de la anomalía magnética es la siguiente:

$$AM = IMT - IGRF \quad \text{Ec. 2.9}$$

Dónde:

- AM = Anomalía magnética
- IMT = Intensidad magnética total
- $IGRF$ = Campo geomagnético de referencia internacional

3.7 I.G.R.F

El International Geomagnetic Reference Field o Campo geomagnético de referencia internacional es un modelo teórico (con base en armónicos) el cual muestra las variaciones en intensidad a lo largo de toda la superficie del planeta. Tiene un rango que varía entre los 25000 y 65000 nanoteslas (nT). NOAA (2014).

3.8 Filtrado de datos

Los resultados producto del cálculo de las anomalías tanto gravitatoria como magnética dan una respuesta total del contenido de frecuencia de la región estudiada, sin diferenciar profundidad, geometría o dirección de estratos dentro del medio, es por ello que para poder establecer el tipo de estructura presente, se utilizan diferentes herramientas matemáticas que resaltan ciertas características del material.

3.8.1 Separación Regional – Residual:

Las grandes estructuras producen anomalías de Bouguer que se caracterizan por ser ondas amplias y suaves, llamadas de tendencia regional por su efecto o simplemente anomalía regional. Sobre ésta puede estar superpuesta una anomalía local, de extensión limitada y menor longitud de onda llamada anomalía residual o local (Zeng, 2010).

Partiendo del mapa de anomalía total se aplican diferentes filtros sobre los datos, los más usados suelen ser:

Mínimos cuadrados: se aplica una función que modele la tendencia regional o forma de la anomalía; modificando esta mediante el grado del polinomio, donde grado 1 representa un plano, grados dos una parábola y grado 3 una curva con un punto de inflexión. Cabe acotar que tiene un elevado error asociado ya que no toma en cuenta la geología de la zona.

Continuación analítica de campo: un campo continuo como es el caso de la gravedad puede ser estimado a diferentes alturas, eliminando el efecto de las masas que inciden en él. Esta puede realizarse en dos direcciones, hacia arriba para eliminar el efecto de pequeños volúmenes de material favoreciendo el análisis regional, o hacia abajo ejerciendo el efecto contrario ayudando a calcular la componente residual.

Pasa banda: permite delimitar el contenido de frecuencia que ejerce influencia sobre la anomalía, donde las bajas frecuencias se usan para delimitar objetos a gran profundidad y las altas frecuencias permiten observar cuerpos someros. También ayuda en la eliminación de ruido (mayormente de alta frecuencia) producto de la adquisición. Los valores límites para su aplicación suelen ser complejos de estimar, una de las formas para hacerlo es mediante un espectro de frecuencia que permita visualizar la fuente de la anomalía.

3.8.2 Derivadas direccionales:

En ocasiones el filtrado regional – residual no permite observar todas las características que posee un conjunto de datos, interfiriendo con la interpretación estructural de la zona, para ello se utilizan las derivadas direccionales (los tres ejes coordenados) las cuales se ocupan mediante la aplicación de series de Taylor o polinomios de Laplace, de resaltar la anomalía en dichas direcciones.

3.8.3 Cosenos direccionales:

La aplicación de la derivadas direccionales no siempre representa la mejor opción de filtrado para resaltar comportamientos importantes de la anomalía, es por ello que los cosenos direccionales permiten realizar la misma operación variando de forma controlada por el intérprete, el ángulo en el cual se modifica la contribución de las fuentes.

3.8.4 Reducción al Polo y al Ecuador:

Para el caso de los datos magnéticos, suele ser útil la reducción al polo magnético, esta permite dirigir la forma de la anomalía en dirección a los polos del planeta, alineándose con el meridiano magnético y exhibiendo de forma más clara la dirección

en la que apunta la magnetización remanente de los materiales. Por otra parte cuando se está en regiones cercanas a la línea media de la Tierra, es recomendable la reducción al Ecuador la cual tiene un efecto opuesto a la reducción al polo.

3.9 Espectro de potencia

Una de las principales interrogantes en el estudio de campos potenciales, es la profundidad a la que se encuentran las fuentes anómalas, una forma de estimar dicho parámetro es mediante el cálculo de su espectro de potencia. Esto se hace a través de la transformada de Fourier en dos dimensiones (x, y); la gráfica del logaritmo contra el numero de onda y la pendiente de la curva asociada dividida entre 4π da un estimado fiable de la profundidad.

3.10 Deconvolución

3.10.1 Deconvolución de Euler:

Otra forma de estimar la profundidad es mediante la deconvolución de Euler, esta herramienta matemática relaciona un campo y su gradiente (direccional) con la localización de la fuente, donde el grado de homogeneidad es expresado directamente por el índice estructural o valor proporcional de cambio con la distancia al campo potencial (Thompson, 1982). Por medio del método de mínimos cuadrados se buscan todas las incógnitas de la ecuación para resolverla, cambiando constantemente la posición de la ventana. En donde la mejor solución es aquella en la cual las incógnitas calculadas estén menos dispersas (menor desviación estándar).

La fórmula es la siguiente:

$$(x - x_0) * \frac{df}{dx} + (y - y_0) * \frac{df}{dy} + (z - z_0) * \frac{df}{dz} = -N * (f - B) \quad \text{Ec. 2.10}$$

Dónde:

X, Y y Z: coordenadas de ubicación de la fuente.

Xo, Yo y Zo: posición del cuerpo estudiado.

F: campo potencial

N: índice estructural

B: valor regional del campo total

Tabla 3. 1 Elementos del campo magnético.

Tipo de Fuente	Índice estructural	
	Gravimetría	Magnéticos
Contactos o fallas	0 a 1	1 a 2
Sill y diques	1 a 2	2 a 3
Esferas	2 a 3	3 a 4

3.10.2 Deconvolución de Werner:

Utilizada en el análisis de datos magnéticos a lo largo de perfiles, permite estimar la profundidad del basamento suponiendo que los cuerpos son láminas bidimensionales, donde las anomalías y las distancias de los puntos de observación forman una ecuación lineal, con sus coeficientes relacionados con los parámetros de la lámina. Esta anomalía es igual al gradiente horizontal de la anomalía del campo total sobre un espacio semi-infinito (Ramírez, 2014). Suele ser útil ya que las soluciones arrojadas resaltan los máximos contrastes laterales, como contactos o fallas. Cuando la ventana es excesivamente grande el algoritmo tiende a generar valores errados por lo cual

debe usarse tomando en cuenta las características geológico - estructurales de la zona. La ecuación empleada originalmente por Werner (1953) es la siguiente:

$$\Delta T(x) = \frac{A(x-x_0)+B*d}{(x-x_0)^2+d^2} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Dónde: x_0 = ubicación de la fuente

d = profundidad de la fuente

A y B = constantes de magnetización.

3.11 Modelos de datos satelitales

Las mediciones tomadas por un satélite artificial en órbita, permiten una rápida interpretación visual, debido a la amplia escala de territorio que es percibida por el sensor asociado. Existen diferentes espectros que tienen la capacidad de captar la superficie terrestre en múltiples frecuencias o longitudes de onda (bandas) del espectro electromagnético. De forma que este tipo de datos es especialmente usado en la Geofísica para realizar adquisiciones de las diferentes propiedades de las rocas en el planeta dadas las ventajas asociadas como rápida y segura adquisición, elevado nivel de detalle, entre otros.

Los modelos de geopotencial representan el potencial gravitacional expandido en armónicos esféricos (García, 2009). Estos surgen en los años 30 del siglo pasado, momento en el cual la tecnología hacía difícil su cálculo matemático asociado; a partir de la década de los 60 importantes agencias aeroespaciales empezaron a utilizarlos combinando adquisiciones terrestres y satélites. En los años siguientes los modelos satelitales cobraron mayor importancia, siendo utilizados por universidades y diferentes centros de investigación.

La ecuación de armónicos esféricos es la siguiente:

$$V = \frac{GM}{r} * (1 - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^2 \left(\frac{a}{r}\right)^n * (C_{nm} * \cos(m\lambda) + S_{nm} * \text{sen}(m\lambda)) * P_{nm} * \cos(\theta))$$

Ec. 2.12

Para la investigación presente se usaron los siguientes modelos de datos satelitales:

3.11.1 EGM2008

Publicado en el año 2008, por la National Geospatial Intelligence Agency (NGA) EGM Development Team, tiene una resolución de 5 minutos por 5 minutos. Es un modelo combinado del campo terrestre, e incluye información proveniente de fuentes satelitales (GRACE), altimétricas y terrestres (García, 2009). Los datos satelitales usados para este modelo fueron colectados por los satélites de la misión espacial GRACE, los cuales, equipados con acelerómetros y cámaras estelares, se encontraban a una órbita de 500 km sobre la Tierra; éstos miden la variación de la distancia entre ellos mediante laser y rastreo por GPS. El datum base fue el WGS84. Representó una adquisición gravimétrica global y con buen detalle, útil para el estudio de fenómenos regionales.

3.11.2 WGM2012

Conocido como World Gravity Model y generado en el año 2012, representó un esfuerzo conjunto de múltiples agencias de investigación geodésica y geofísica para obtener un modelo de alta resolución del campo de gravedad terrestre. Fue creado con base en la adquisición en el modelo EGM2008 y el DTU10 (modelo con datos de gravedad en zonas marinas). Posee una mayor resolución que el anterior, la cual es de 1 minuto por 1 minuto, cuya topografía asociada viene del modelo ETOPO1. La base de datos completa de este modelo se encuentra publicada en el portal de la Universidad de California en San Diego (UCSD).

3.11.3 GGMplus

Generado como un proyecto de la Universidad de Curtin (Perth, Australia) y la Universidad Técnica de Munich (Munich, Alemania), el GGMplus (Global Gravity Model plus, por sus siglas en inglés) suministra información de gravedad de la Tierra con una resolución de 220 m en los ejes x e y , siendo así el modelo de datos de gravedad con mayor detalle a la fecha actual. El mismo no es del todo global ya que solo posee datos para zonas continentales; los océanos y lagos de gran magnitud representan vacíos de información dentro de las ventanas de datos, distribuidas en intervalos de 5 grados por cinco grados.

Contiene datos de aceleración de gravedad, perturbaciones gravitatorias, deflexiones de la vertical norte-sur y este-oeste, y alturas del cuasigeoide (Kusnir, 2015).

Este fue creado a partir de los datos suministrados por las misiones GRACE y GOCE así como los modelos derivados de estas. Los datos se encuentran disponibles en la librería en línea de la Universidad de Curtin.

Para esta investigación se combinaron los datos de este modelo con información topográfica de la SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) calculados a 30 segundos de arco (alrededor de 90 m).

3.11.4 EMAG2

El Earth Magnetic Anomaly Grid (EMAG2) es un modelo de anomalía gravimétrica y magnética, generado a partir de datos satelitales (misión espacial CHAMP) y adquisiciones aéreas y marinas con una resolución de 2 minutos arco, donde los datos están referenciados a 4 km por encima del geoide (Maus, 2009). Su principal función era la de obtener mejores fuentes de información acerca de la composición de la Tierra y la dinámica de los procesos que tienen lugar en el espacio cercano a la atmosfera terrestre (García, 2009).

Los datos satelitales fueron tomados en una órbita de baja altura de aproximadamente 400 km, permitiendo una cobertura completa del planeta, útil en el cálculo de las anomalías y sus variaciones en el dominio del tiempo.

El satélite Challenging Minisatellite Payload (CHAMP), controlado por el centro alemán de investigaciones geocientíficas, estaba equipado de un magnetómetro tipo Fluxgate, un acelerómetro, un sensor de estrellas, un receptor GPS, un retro-reflector láser y un medidor de deriva de iones (Kusnir, 2015).

3.12 Modelos o perfiles del subsuelo

Mediante el uso de las anomalías de Bouguer y magnética, y teniendo como base la geología de una región, es posible delimitar un perfil que atraviese la zona en una dirección preferencial y así establecer un corte transversal en profundidad, en el cual se observen parámetros estructurales como la geometría, espesor y presencia de fallas e intrusiones que afectan la corteza terrestre generando así un modelo geológico – estructural, útil para diversas aplicaciones como tectónica o prospección de yacimientos (de minerales o hidrocarburos).

La precisión de cada modelo dependerá en mayor medida de la resolución de los datos utilizados en el cálculo de las anomalías; sin embargo, siempre habrá un error asociado a la discrepancia entre el enfoque matemático y el geológico.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1 Esquema general de trabajo

La investigación fue llevada a cabo mediante diferentes etapas, las cuales están descritas mediante el siguiente diagrama:

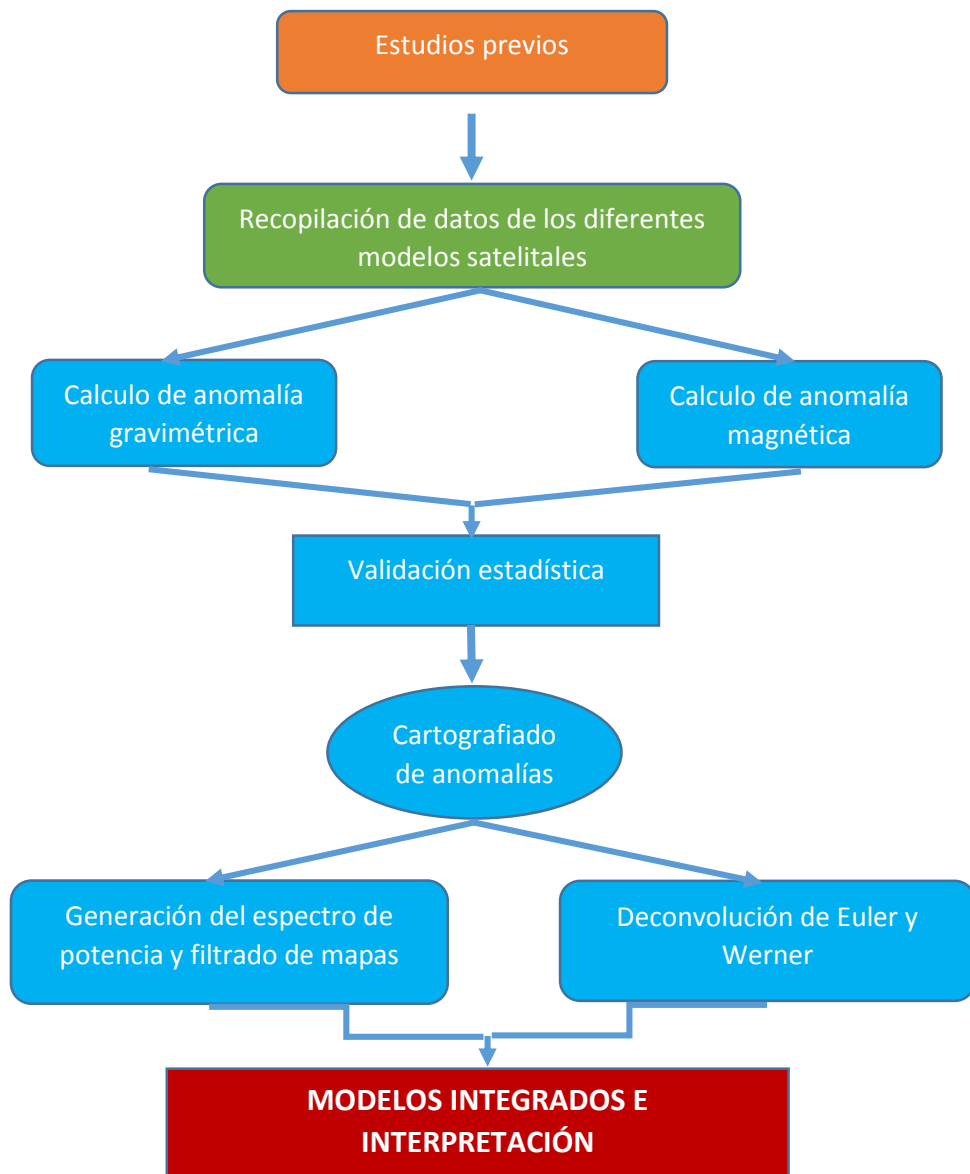


Figura 4. 1 Etapas de la investigación.

4.2 Investigación bibliográfica

Como etapa inicial se recopiló información acerca de investigaciones en el estado Amazonas para tener un mejor entendimiento acerca de los procesos geológicos y aspectos estructurales que rigen la región, dentro de los trabajos citados se encuentran; Sierra (2002) al sur de Puerto Ayacucho con información de datos aeromagnéticos y varios modelos donde se observan las principales provincias del escudo de guayanés, resaltando el granito del Parguaza y la profundidad del manto cercana a los 40 km. Por otra parte Erasmo (2002) estudio el sur de San Fernando de Atabapo, con resultados similares en relación a profundidades corticales. De igual forma existen otros trabajos útiles como Bellizzia (1980), Barrios (1985), entre otros. Además se realizó una búsqueda detallada de la geología de la región para entender la evolución petrotectónica de esta y su correlación con las diferentes propiedades geofísicas a estudiar.

4.2 Creación de la base de datos

Para este trabajo se tomaron 4 bases de datos, 3 gravimétricas y 1 magnética, las mismas se generaron a partir de modelos de armónicos esféricos obtenidos mediante modelos satelitales (misiones GOCE, GRACE, CHAMP). Con diferentes resoluciones para una mejor visualización de las propiedades. El cálculo de las diferentes anomalías se hizo mediante las formulas del capítulo III, obteniendo así la anomalía de Bouguer, la anomalía de aire libre y la anomalía magnética de la zona, así como su topografía asociada.

4.3 Análisis estadístico

Con el fin de validar las bases de datos generadas, se realizó el correspondiente análisis de los parámetros estadísticos más representativos como varianza, mediana, desviación estándar, entre otros; así como su histograma, la prueba de normalidad y el diagrama de caja y bigotes de cada conjunto. Esto se realizó mediante el uso del

programa SPSS Statistics de IBM, el cual representa una herramienta de uso sencillo mediante la cual se generan los análisis necesarios.

4.4 Cartografiado de anomalías

Mediante el programa Oasis Montaj (Geosoft, 2007) es posible generar mapas de anomalías, aplicar filtros a los datos, generar modelos por medio de perfiles y un compendio de herramientas matemáticas que permiten un análisis más profundo de la información procedente de los datos de anomalías.

A continuación se explica un poco acerca del procedimiento:

4.4.1 Importar datos:

Como punto inicial, se toman las bases de datos a utilizar y se importan al programa, esto con la finalidad de manejar la información directamente y que pueda ser interpretada por el programa. Esto se hace de la siguiente forma: sobre la barra central de menús del programa se encuentra la pestaña data, en la sección “Import” se abre un submenú con múltiples opciones para importar datos en diferentes formatos de origen, bien sea desde un archivo texto, resultados exportados de otros programas o bases de datos en general.

4.4.2 Crear mapas:

Para observar de manera gráfica una propiedad estudiada se procede a la realización de diferentes mapas, tanto de topografía de la zona, como de anomalías de gravedad o magnetica. Mediante el menú “Grid” del programa Oasis se muestran diferentes opciones de cartografiado, variando estas por el método de interpolación usado; el programa permite usar los algoritmos de mínima curvatura, interpolación a través de líneas paralelas, kriging, tinning, entre otros.

4.4.3 Espectro de potencia

Como herramienta útil para establecer la contribución de las diferentes fuentes anómalas y sus respectivas profundidades asociadas se calcula el espectro de frecuencia utilizando el módulo MAGMAP. A su vez necesario para el filtrado de los diferentes mapas.

4.4.4 Filtrado

Con el fin de desenmascarar información oculta dentro de los diferentes mapas de anomalía, se aplican múltiples filtros a los datos, como por ejemplo separación regional – residual, derivadas direccionales, entre otros. Dentro del menú MAGMAP se encuentra una pestaña para la aplicación de filtros o resaltadores a los diferentes grids. Algunas de las pestañas más representativas son: “SetConFile”, permite elegir el filtro a aplicar (continuación analítica de campo, cosenos direccionales, entre otros), “SetTrend” es usado para delimitar las tendencias a eliminar, “SetExpand” permite elegir entre ventanas cuadradas o rectangulares y SetFill establece como se llena la ventana (máxima entropía o inverso de la distancia).

4.4.5 Deconvolución de Euler

De igual forma que se aplican filtros a los mapas, es posible el empleo de múltiples herramientas matemáticas a las anomalías estudiadas, las cuales permiten obtener información adicional del comportamiento de las propiedades del medio de estudio. Mediante el menú “Euler” se puede calcular su deconvolución, como dicta la imagen a continuación mostrada los diferentes campos son usados para escoger el grid a deconvolucionar, las derivadas direccionales del correspondiente grid, el nombre de la base de datos resultante, el índice estructural (dependiendo de las estructuras buscadas), el error asociado, el tamaño de ventana, entre otros.

4.4.6 Deconvolución de Werner

Esta herramienta es útil en el análisis de perfiles de anomalía magnética para poder estimar profundidades de contactos. El módulo “Pdepth”, subpestaña Werner solutions del Oasis Montak (Geosoft 2007) permite calcularla. Los parámetros son la profundidad mínima y máxima a observar, los tamaños de ventana y el crecimiento de esta, el índice estructural, rumbo y componentes del campo magnético a lo largo del perfil trazado (declinación, inclinación, intensidad).

4.4.7 Perfil de subsuelo

El último paso en la caracterización de la zona consiste en tomar perfiles de las anomalías de la ventana estudiada y generar el modelo final del subsuelo de la región. La herramienta GM-SYS permite realizar esta operación para los diferentes grids o mapas de anomalías. Estos son luego integrados en un módulo interactivo en donde se moldean parámetros como la profundidad y número de estratos, geometría, densidad y susceptibilidad del material.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

5.1 Estudio de parámetros estadísticos

El aplicar un control estadístico a los datos de trabajo permite conocer características del comportamiento de las bases de datos empleadas, de forma que pueda observarse qué tipo de distribución sigue, la población asociada así como los diferentes parámetros y valores atípicos (si es que existen) con los cuales se escoge el método más eficiente de interpolación para la creación de mapas y posteriores resultados; de forma que pueda identificarse cualquier problema matemático que afecte la calidad de los datos o el comportamiento general de la muestra. A continuación se presentan el análisis estadístico asociado a las bases de datos gravimétrica y magnética usadas en esta investigación.

5.2 Análisis estadístico GGMplus

Correspondiente a la base de datos gravimétrica del modelo GGMplus el número de datos analizados para la ventana estudiada fue de un poco más de trescientos cincuenta y tres mil (tabla 5.1) de los cuales se tiene un rango de valores que va desde -152,89 hasta 44,58 mGal y una desviación estándar de 21,60. La prueba de normalidad arrojó un valor de significancia menor a 0,005 por lo cual se considera un comportamiento normal gaussiano.

El histograma mostrado en la figura 5.1 denota una distribución normal bimodal en donde los valores de clase acotados entre el mínimo y máximo antes mencionados adquieren un mayor peso en la parte central del rango asociado el cual es de 197,47 mGal. Además el diagrama de caja de la figura 5.2 se encuentra centrado cercano a

los -50 mGal con algunos valores anómalos hacia los extremos de la población estudiada (tanto negativos como positivos).

De forma que el contenido total de valores permite usar una futura interpolación por el método de Kriging, sin embargo por la cantidad de datos un algoritmo más eficiente es el de mínima curvatura el cual minimiza el tiempo de cómputo y da resultados prácticamente iguales aunque con un nivel de error ligeramente mayor.

Tabla 5. 1 Población estudiada, base de datos GGMplus.

Resumen de procesamiento de casos							
	Z	Casos					
		Válido		Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
AB	G	353379	100,0%	0	0,0%	353379	100,0%

Tabla 5. 2 Estadísticos descriptivos base de datos GGMplus.

Descriptivos				
	Z		Estadístico	Error estándar
AB	G	Media	-41,932336	0,0363505
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-42,003582
			Límite superior	-41,861090
		Media recortada al 5%	-41,558626	
		Mediana	-41,128013	
		Varianza	466,941	
		Desviación estándar	21,6088077	
		Mínimo	-152,8906	
		Máximo	44,5884	
		Rango	197,4790	
		Rango intercuartil	32,9353	
		Asimetría	-0,214	0,004
		Curtosis	-0,373	0,008

Tabla 5. 3 Prueba de Kolmogorov, base de datos GGMplus.

Pruebas de normalidad				
	Z	Kolmogorov-Smirnov		
		Estadístico	Número de datos	Significancia
AB	G	0,076	353379	0,000

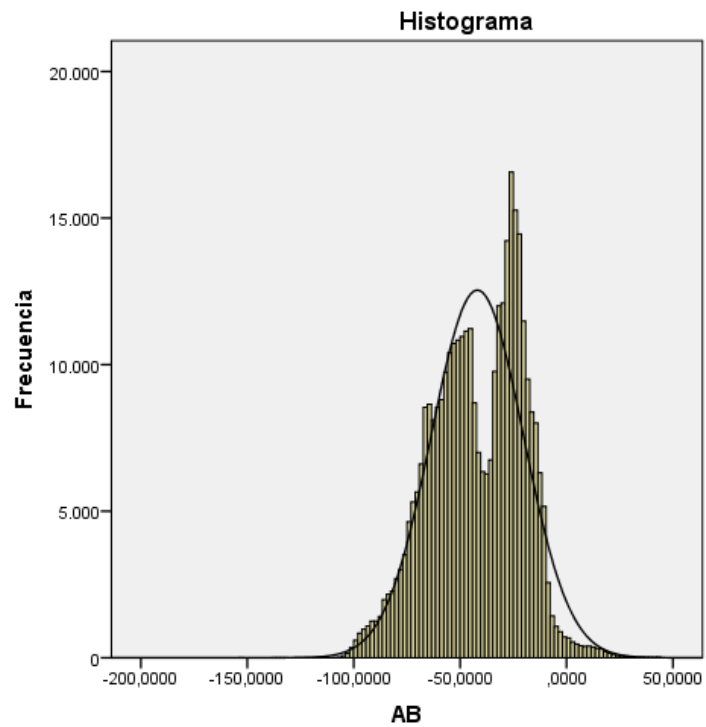


Figura 5. 1 Histograma de frecuencia, base de datos GGMplus.

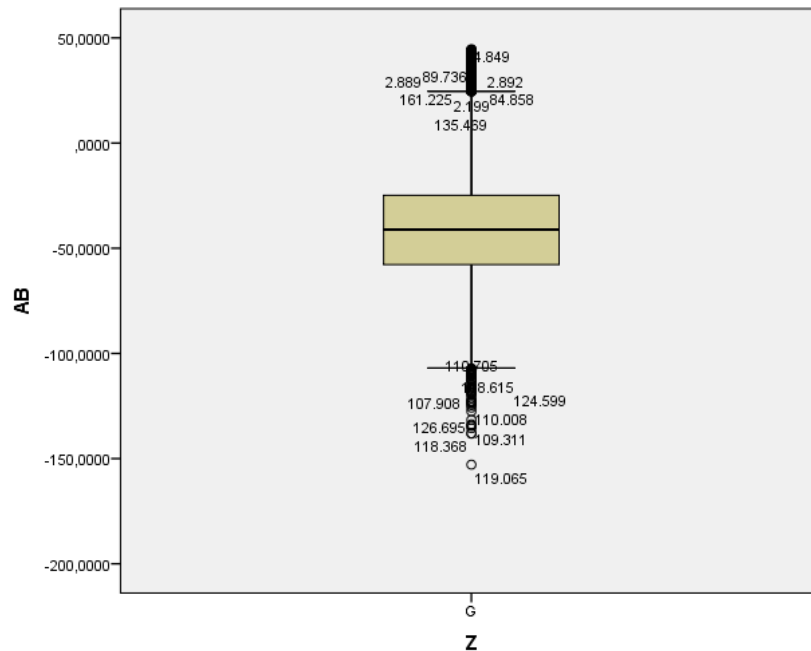


Figura 5. 2 Diagrama de caja y bigote, base de datos GGMplus.

5.3 Análisis estadístico Emag2

Con relación a la base de datos magnética del modelo Emag2 el conjunto de valores analizados para la ventana estudiada fue de casi ocho mil (tabla 5.2) en donde el rango de valores oscila entre -189,29 y 154.4576 nT; con una desviación estándar de 59,58. De igual forma la prueba de normalidad arrojó un valor de significancia menor a 0,005 por lo cual se considera un comportamiento normal gaussiano.

El histograma mostrado en la figura 5.3 exhibe una distribución normal unimodal con centro cercano al origen (cero) y con valores de clase acotados entre el mínimo y máximo mencionados arriba, los mismos poseen mayor peso en la parte central del rango asociado el cual es de 343,74 nT. Al mismo tiempo el diagrama de caja de la figura 5.4 se encuentra centrado en -9,27 con algunos valores anómalos hacia los extremos de la población estudiada (en mayor cantidad negativos).

De igual forma que el análisis de la base de datos gravimétrica el contenido total de valores permite usar una futura interpolación por el método de Kriging, pero para mantener un estándar en el procesamiento se escogió el algoritmo de mínima curvatura.

Tabla 5. 4 Población estudiada, base de datos Emag2.

Resumen de procesamiento de casos							
	Z	Casos					
		Válido		Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
AM	M	7970	100,0%	0	0,0%	7970	100,0%

Tabla 5. 5 Estadísticos descriptivos base de datos Emag2

Descriptivos				
	Z		Estadístico	Error estándar
AM	M	Media	-9,356829	0,6673922
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-10,665092
			Límite superior	-8,048566
		Media recortada al 5%	-8,295482	
		Mediana	-9,272212	
		Varianza	3549,936	
		Desviación estándar	59,5813422	
		Mínimo	-189,2903	
		Máximo	154,4576	
		Rango	343,7479	
		Rango intercuartil	73,3271	
		Asimetría	-0,215	0,027
		Curtosis	0,078	0,055

Tabla 5. 6 Prueba de Kolmogorov, base de datos Emag2.

Pruebas de normalidad				
	Z	Kolmogorov-Smirnov		
		Estadístico	Número de datos	Significancia
AM	M	0,030	7970	0,000

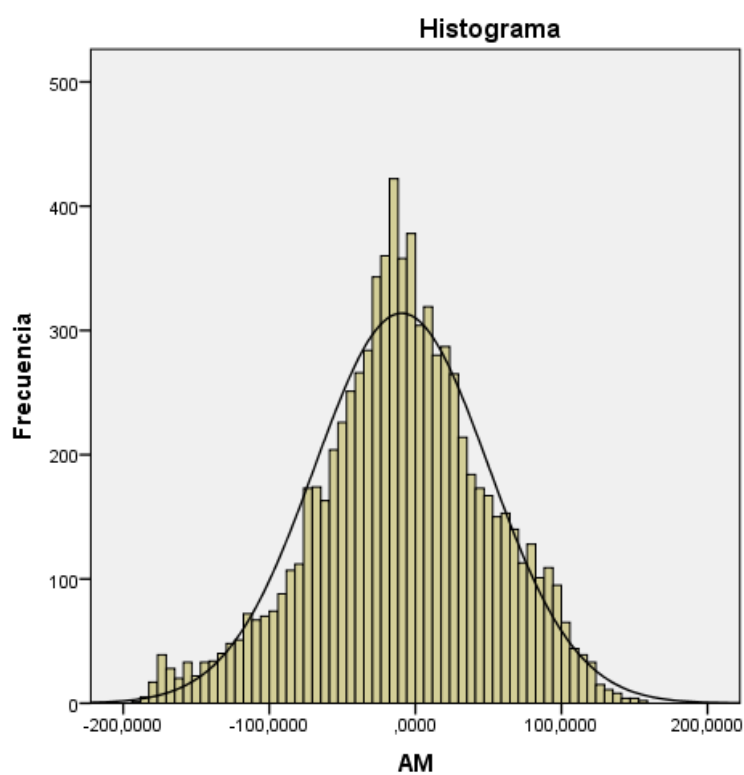


Figura 5. 3 Histograma de frecuencia, base de datos Emag2.

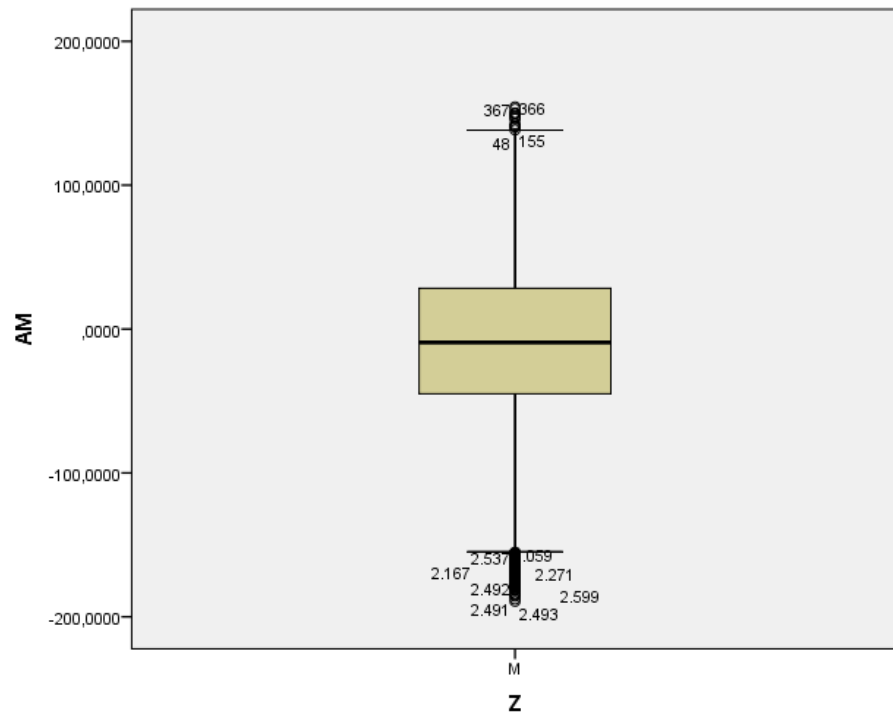


Figura 5. 4 Diagrama de caja y bigote, base de datos Emag2.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Espectros de potencia

La estimación de profundidades tiene un papel fundamental en el análisis de las anomalías y la posterior caracterización del subsuelo, dicho esto se muestran a continuación los espectros de frecuencia de las diferentes bases de datos empleadas en el presente estudio.

6.1.1 Espectro de potencia ABAE.

El grafico mostrado en la figura 6.1 presenta cuatro tramos con diferentes pendientes, donde cada una de ellas permite estimar la profundidad de las fuentes de anomalía presentes en la zona. La primera se encuentra a 38.9 km de profundidad y se relaciona con la discontinuidad de Mohorovicic, seguidamente a 12,76 km se encuentra una segunda fuente que podría asociarse al basamento de la región, a continuación a 5.05 km está presente una tercera fuente asociada a las provincias litológicas de la zona, por ultimo una cuarta fuente no relevante asociada a ruido de alta frecuencia.

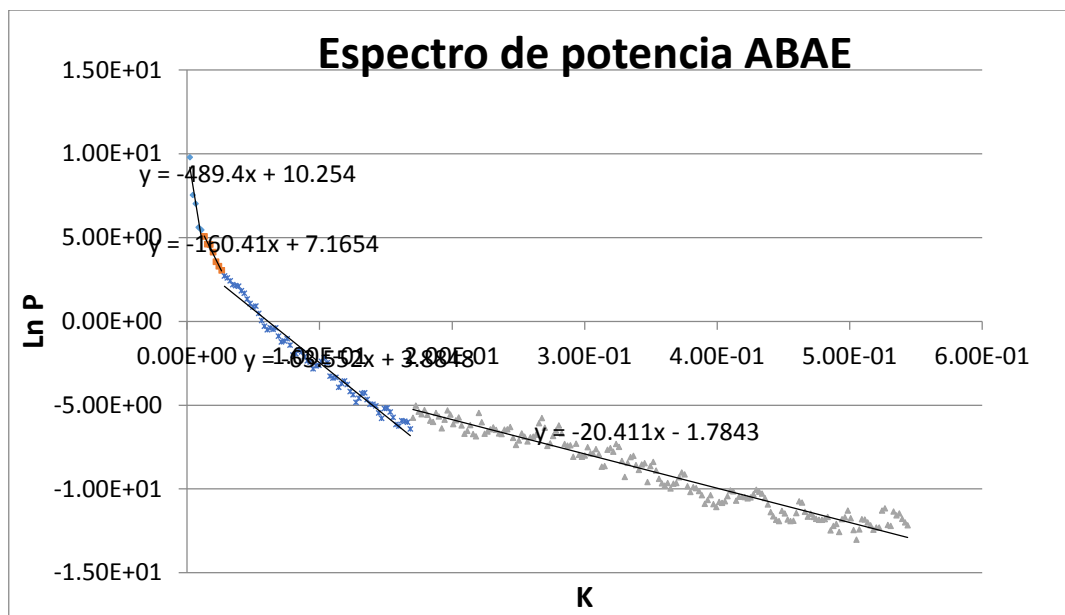


Figura 6. 1 Espectro de potencia, base de datos ABAE.

Tabla 6. 1 Estimación de profundidades, base de datos ABAE.

Profundidad	Km
Pendiente 1	38.945215
Pendiente 2	12.765022
Pendiente 3	5.0573075
Pendiente 4	Ruido

6.1.2 Espectro de potencia UCSD.

Con relación a la figura 6.2 se observan de igual forma cuatro fuentes, la primera a 38,50 km relacionada a la interfaz corteza – manto, la segunda a 13,24 km sirve como un estimador de la profundidad promedio de las estructuras en la corteza superior, una tercera fuente de tendencia ruidosa a 2.23 relacionada a la profundidad de la provincia de Roraima y por ultimo ruido aleatorio.

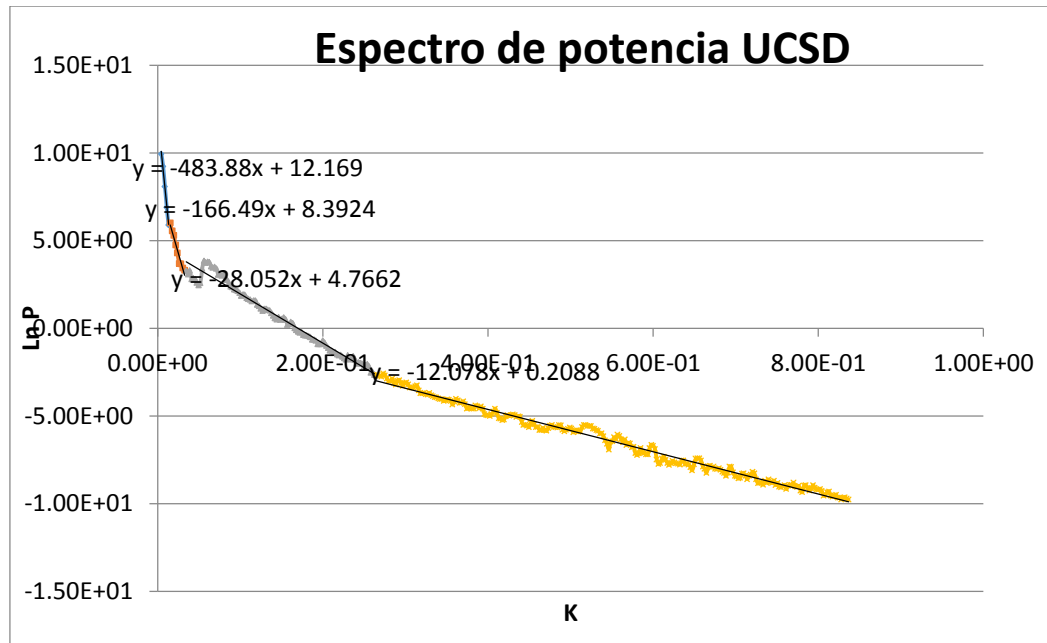


Figura 6. 2Espectro de potencia, base de datos UCSD.

Tabla 6. 2 Estimación de profundidades, base de datos UCSD.

Profundidad	km
Pendiente 1	38.5059469
Pendiente 2	13.2488532
Pendiente 3	2.23230723
Pendiente 4	Ruido

6.1.3 Espectro de potencia GGMplus.

La gráfica correspondiente al espectro de potencia del modelo GGMplus (figura 5.6) se obtuvo mediante la anomalía regional de Bouguer debido a que la elevada resolución espacial de este modelo tiene asociado ruido de alta frecuencia que impide el cálculo de las diferentes fuentes de anomalía y su correspondiente profundidad, por lo que fue necesario eliminar la componente residual de los datos.

De forma que el espectro resultante presenta al igual que las bases de datos anteriores cuatro pendientes diferentes, donde la primera tiene una profundidad estimada de 38,79 km asociada a Mohorovicic, la segunda de 13,75 km es un estimador de la profundidad de las interfaz corteza superior – corteza inferior, una tercera pendiente de 1,25 se relaciona con los rasgos estructurales más someros. Por ultimo una cuarta fuente asociada a ruido. De manera que las tres bases de datos gravimétricas empleadas mantienen un rango de profundidades similar, asociado a los grandes rasgos estructurales, el primero para la discontinuidad base de la corteza, el segundo para la profundidad máxima de estructuras de las diferentes provincias geológicas encontradas en la región (Parguaza, Cuchivero, entre otros) y por último los rasgos más someros ligados a Roraima, aluviones y eventos geológicos recientes.

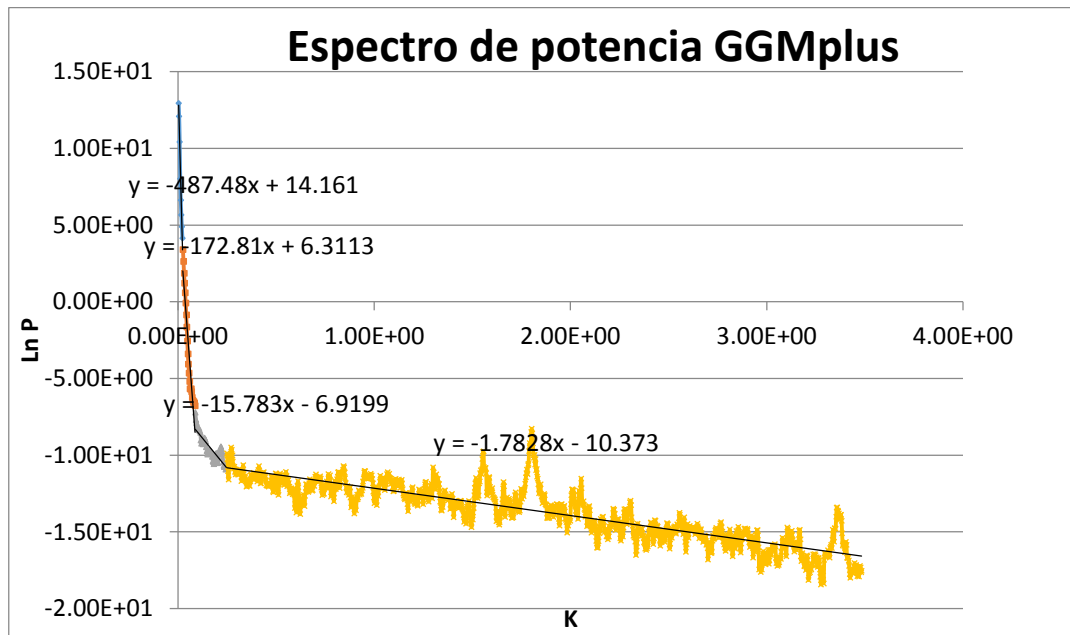


Figura 6. 3 Espectro de potencia, base de datos GGMplus.

Tabla 6. 3 Estimación de profundidades, base de datos GGMplus.

Profundidad	Km
Pendiente 1	38.7924258
Pendiente 2	13.7517829
Pendiente 3	1.25597123
Pendiente 4	Ruido

6.1.4 Espectro de potencia Emag2.

Con relación al espectro de datos magnéticos (figura 6.4) destacan una primera fuente a 30,58 km asociada posiblemente a la profundidad máxima de magnetización de los materiales, en segundo lugar se observa otra fuente a 12,66 km relacionada a material basáltico, luego a 2,28 km están las unidades magnéticas más someras, posiblemente material sedimentario, por ultimo aparece un sector con ruido de alta frecuencia.

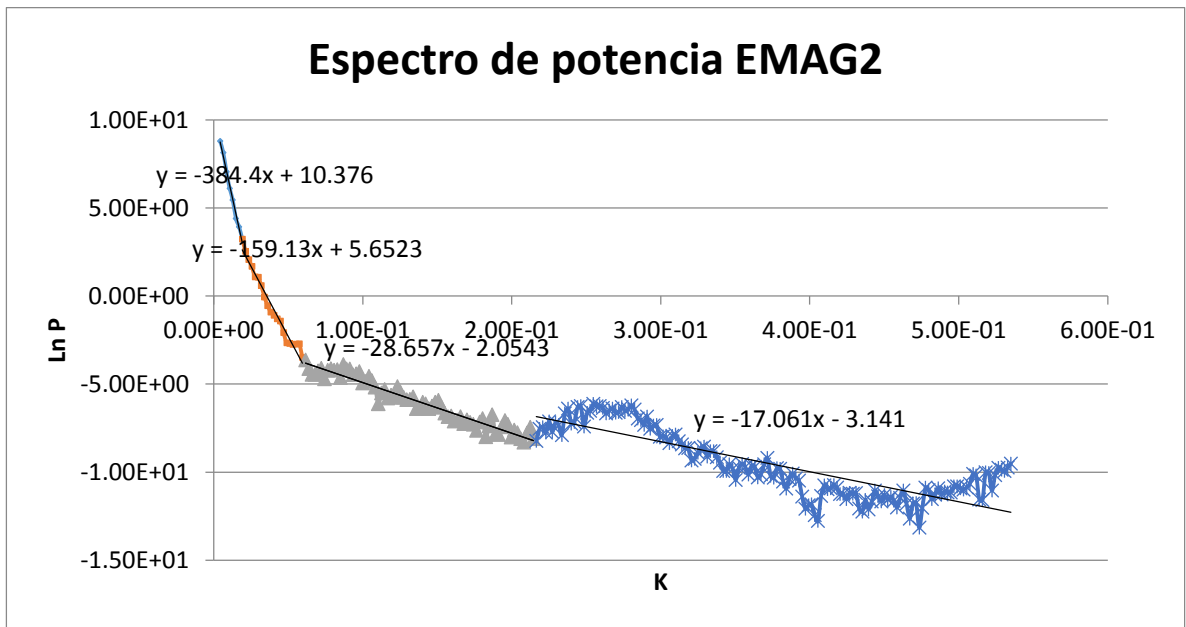


Figura 6. 4 Espectro de potencia, base de datos Emag2.

Tabla 6. 4 Estimación de profundidades, base de datos Emag2.

Profundidad	Km
Pendiente 1	30.5895801
Pendiente 2	12.663163
Pendiente 3	2.2804516
Pendiente 4	Ruido

6.2 Topografía

A continuación se muestran los diferentes mapas de topografía usados para las diferentes bases de datos, cada uno con resoluciones diferentes.

Los datos de topografía para la base de datos de ABAE (figura 6.5) presentan bajo detalle de la región debido a que el espaciamiento aproximado entre estaciones es de 10 km, sin embargo muestran los rasgos generales más importantes como el rango de alturas el cual va desde los 50 m en la parte Oeste de la región hasta 2.3 km de altura en la zonas con cerros o tepuyes.

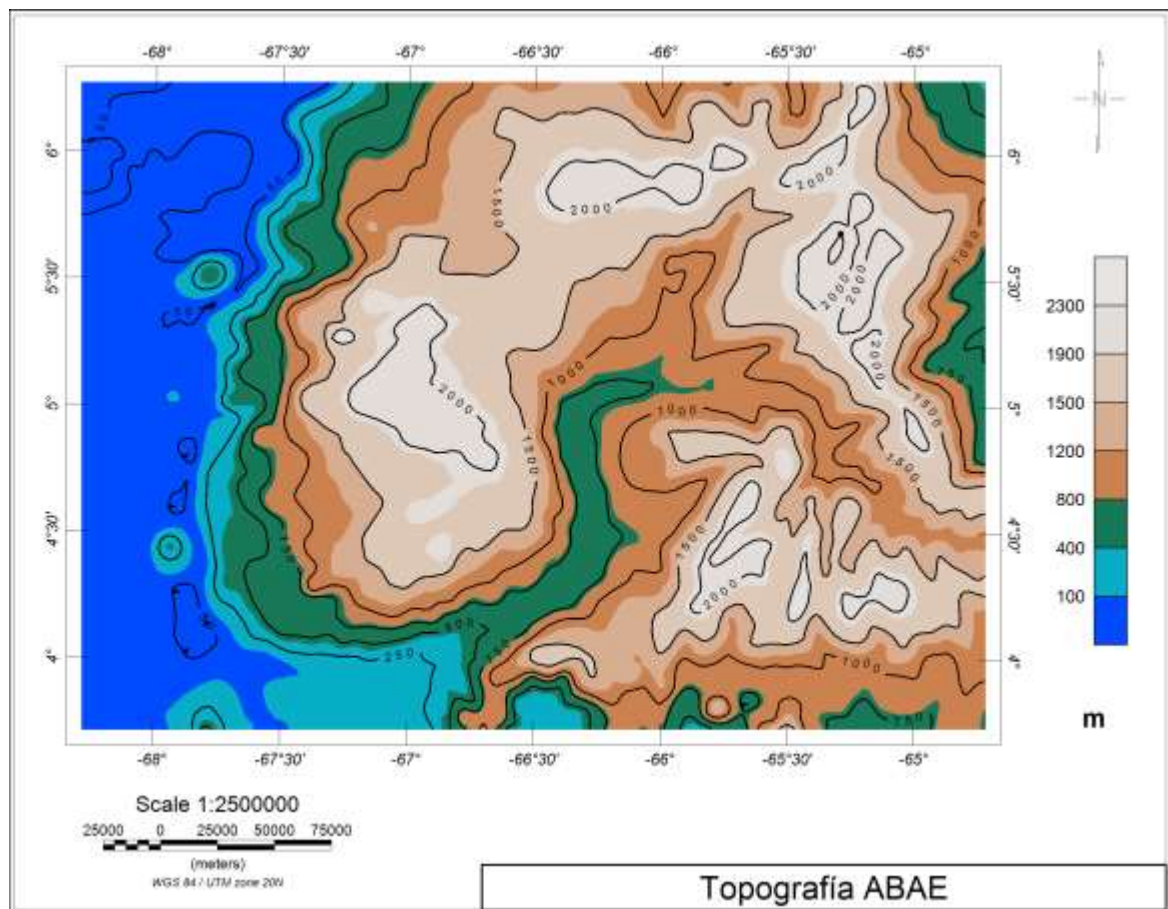


Figura 6. 5 Topografía, base de datos ABAE.

En relación a la altimetría de los datos de la UCSD con una separación de 1.8 km entre estaciones (figura 6.6) se observa un mayor detalle de los contornos de las estructuras y un rango de alturas igual al de la figura 6.5, donde las estructuras más altas están concentradas al Este de la zona estudiada.

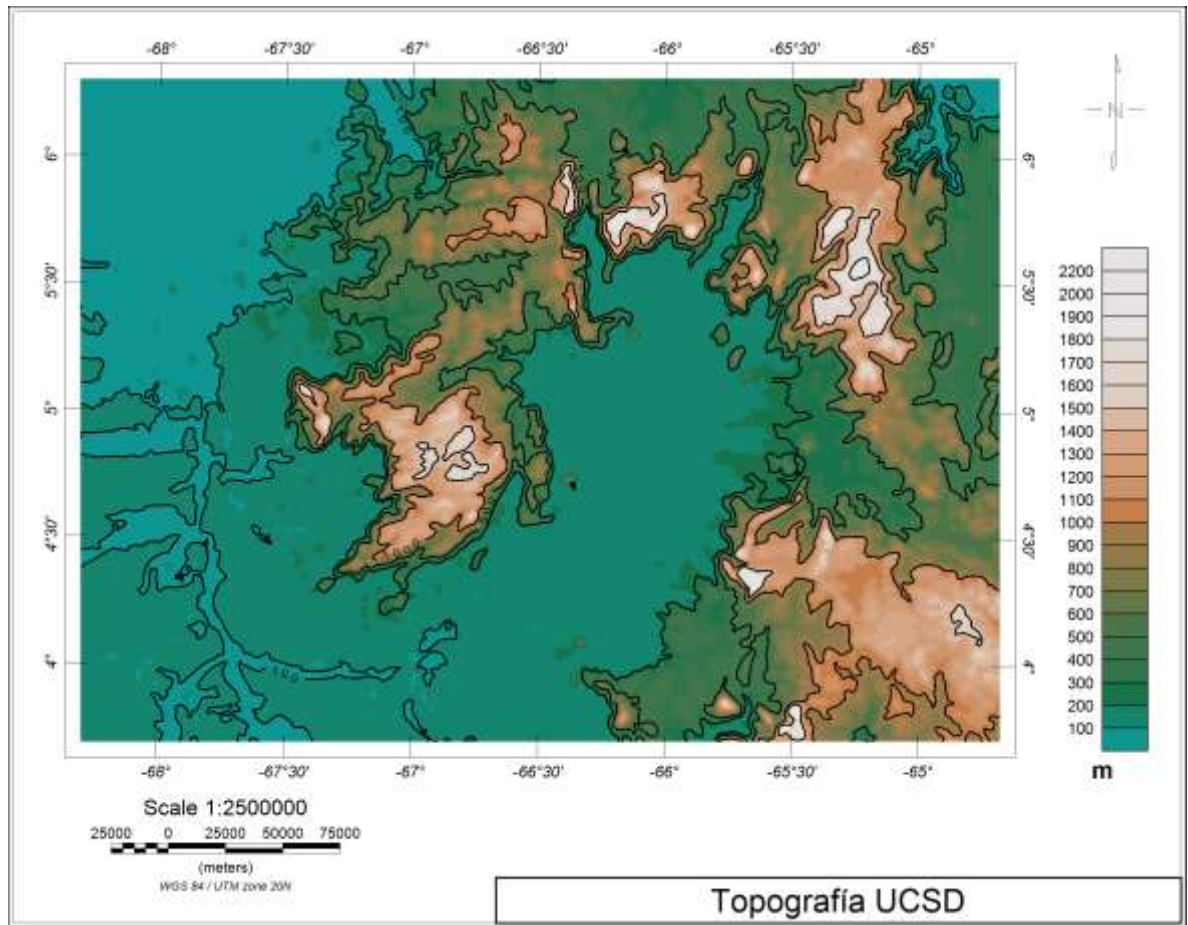


Figura 6. 6 Topografía, base de datos UCSD.

Para el modelo GGMplus (figura 6.7) muestreado a 18 segundos de arco (aproximadamente 200 metros entre estaciones) se observa una topografía de la región con un elevado detalle, viendo incluso en algunos tramos la forma del cauce del río Orinoco (parte suroeste del gráfico).

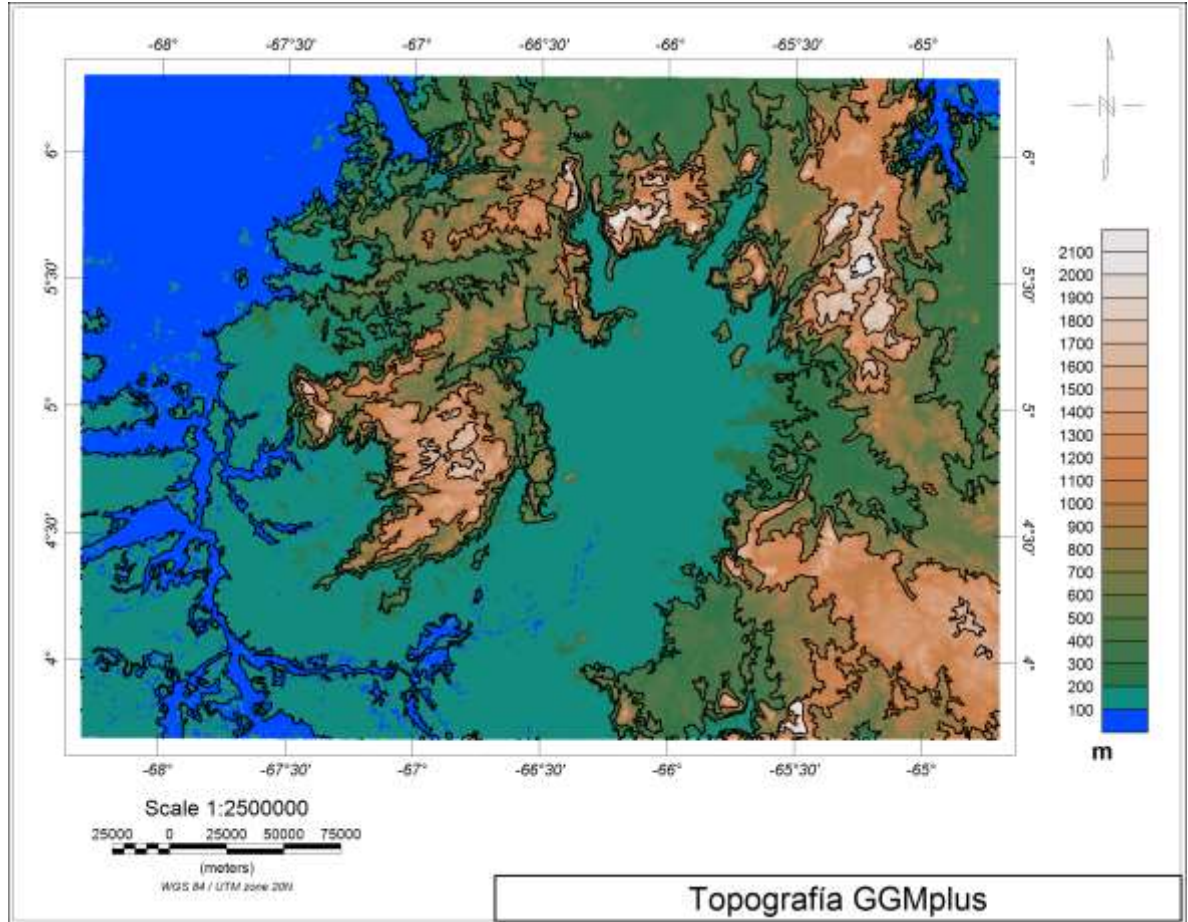


Figura 6. 7 Topografía, datos tomados del modelo SRTM.

6.3 Anomalía de aire libre

Los mapas de las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 corresponden a la anomalía de aire libre calculada para la región. Para las bases de datos de ABAE y la UCSD los contornos de las estructuras son básicamente idénticos, con pequeñas variaciones en zonas con valores máximos donde los contornos cierran de formas diferentes. Esto es contrario a lo esperado debido a que se utilizaron modelos topográficos con diferente resolución para ambas bases de datos.

Por otra parte para la base de datos GGMplus el nivel de detalle de los contornos es significativamente mayor, la diferencia principal se observa al norte de San Juan de Manapiare y al extremo Noreste de la región en donde los valores son mínimos, opuesto a las otras bases de datos. Cabe resaltar que el rango de la anomalía difiere en gran medida para cada gráfico, siendo de -47 a 129 mGal para ABAE, -80 a 226 mGal para UCSD y -76 a 203 mGal para GGMplus.

De forma general se corrobora que la anomalía de aire libre tiene una dependencia directa con la topografía de la región, ejemplo el máximo presente en la zona del macizo Sipapo el cual se observa en los tres mapas, el mínimo correspondiente a la región plana donde se encuentra situado San Juan de Manapiare o incluso el máximo local asociado al cerro Duida – Marahuaca al sur del territorio.

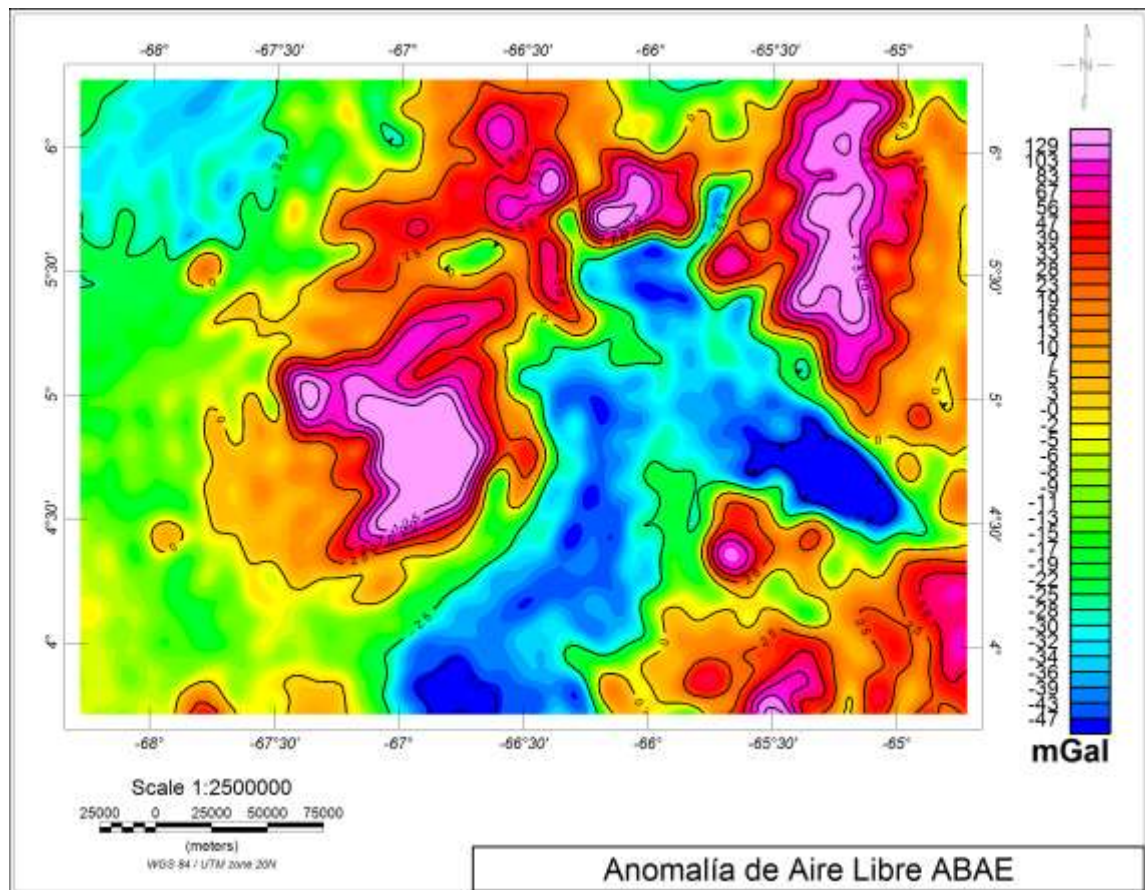


Figura 6. 8 Anomalía de aire libre, base de datos ABAE.

Detallando el comportamiento general de la anomalía se observa una orientación aproximada de los contornos de N25°E para valores máximos correspondiente a los diferentes cerros presentes de topografía elevada y N15°E para los mínimos en la zona central de la ventana escogida, esto es válido para las longitudes 67°30' a 65°, sin embargo para el extremo Oeste de la región los valores son intermedios con algunos máximos y mínimos asociados a una topografía baja.

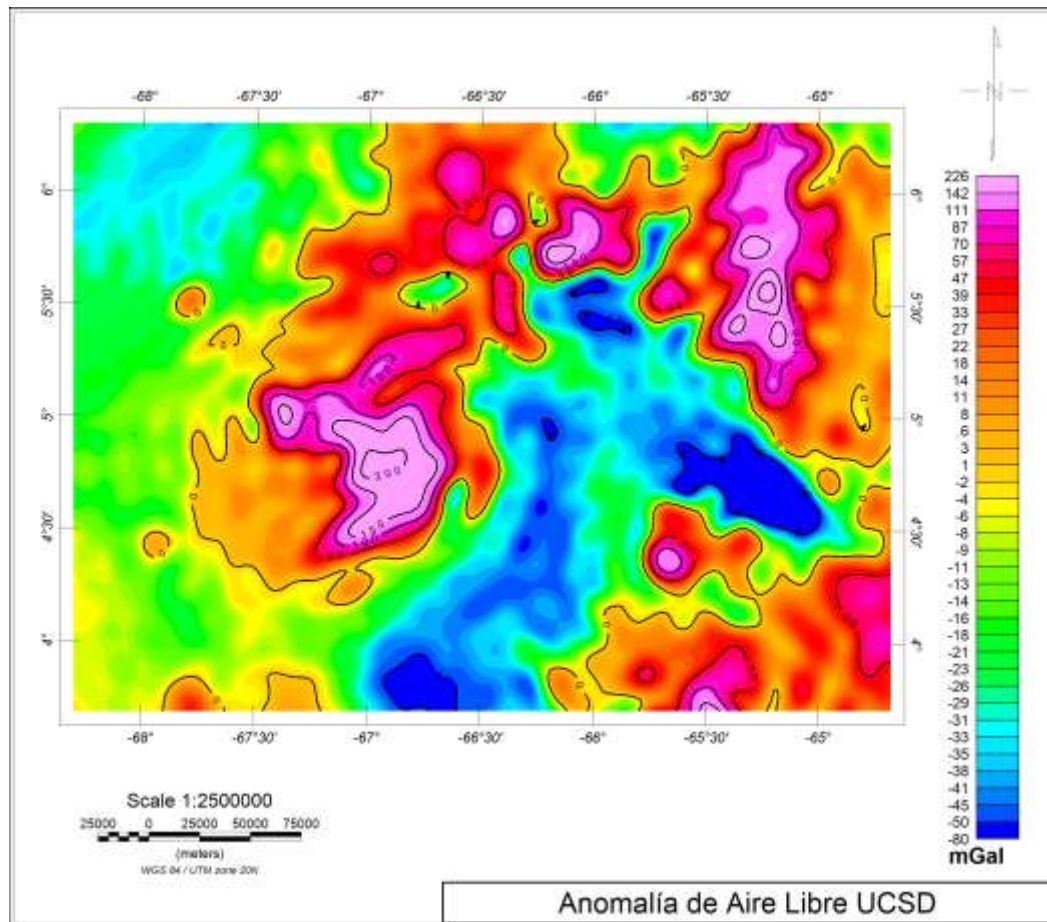


Figura 6. 9 Anomalía de aire libre, base de datos UCSD.

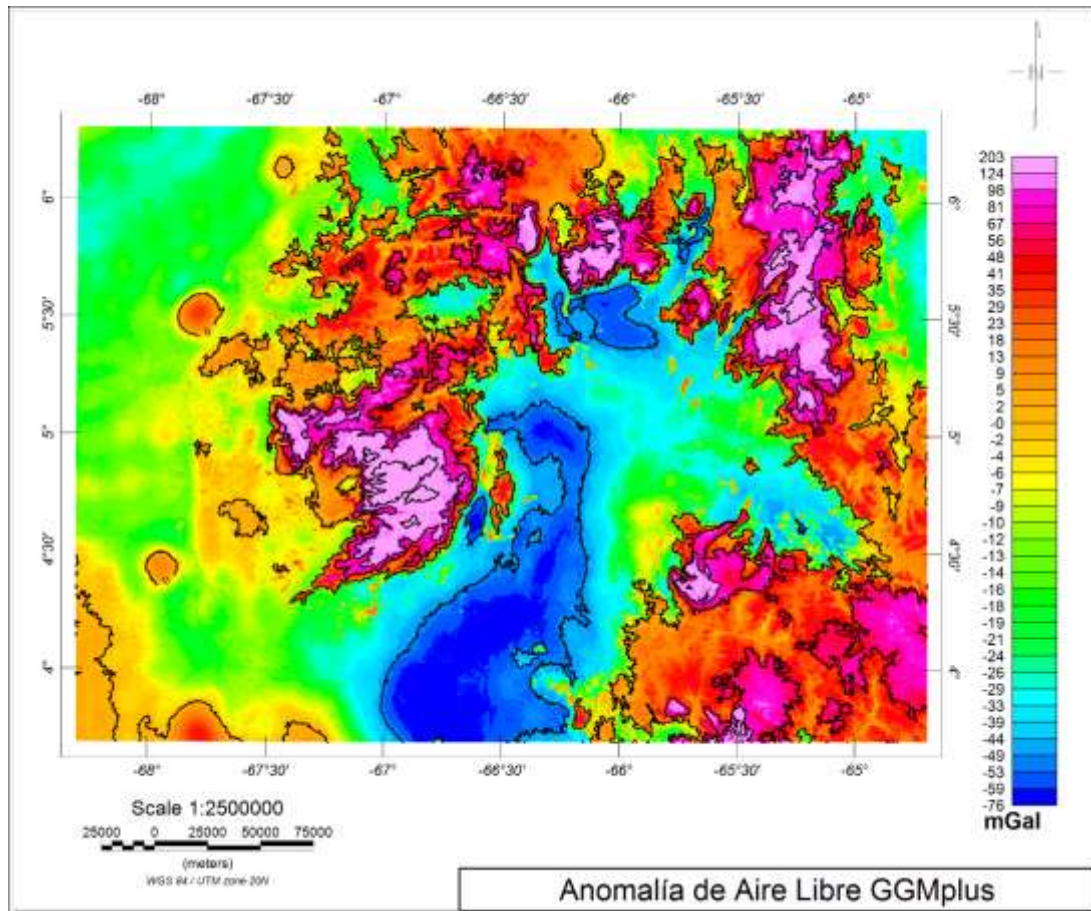


Figura 6. 10 Anomalía de aire libre, base de datos GGMplus.

6.4 Anomalía de Bouguer

Las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 corresponden a los mapas de anomalía de Bouguer de la zona. Para los datos de ABAE la anomalía va de -15 a -214 mGal en donde la orientación general de las estructuras posee una forma curvada cercana a la longitud 67°30' W correspondiente a valores máximos, el gradiente asociado es muy elevado, aproximadamente de 1,22 mGal/km. Mientras que en la parte central y al este de la región los valores son mínimos y la geometría asociada es alargada en su mayoría, con un gradiente de 2,08 mGal/km. En la latitud más baja y cercano a los 65°30' W de longitud se encuentra un máximo local relacionado al flanco norte del tepuy Duida – Marahuaca. Según reportes de la ABAE esta base de datos (publicada en 2008)

presenta un nivel de error considerable para zonas al sur del cauce del río Orinoco, por lo cual no es la mejor opción al momento de tomar una referencia para los valores de gravedad.

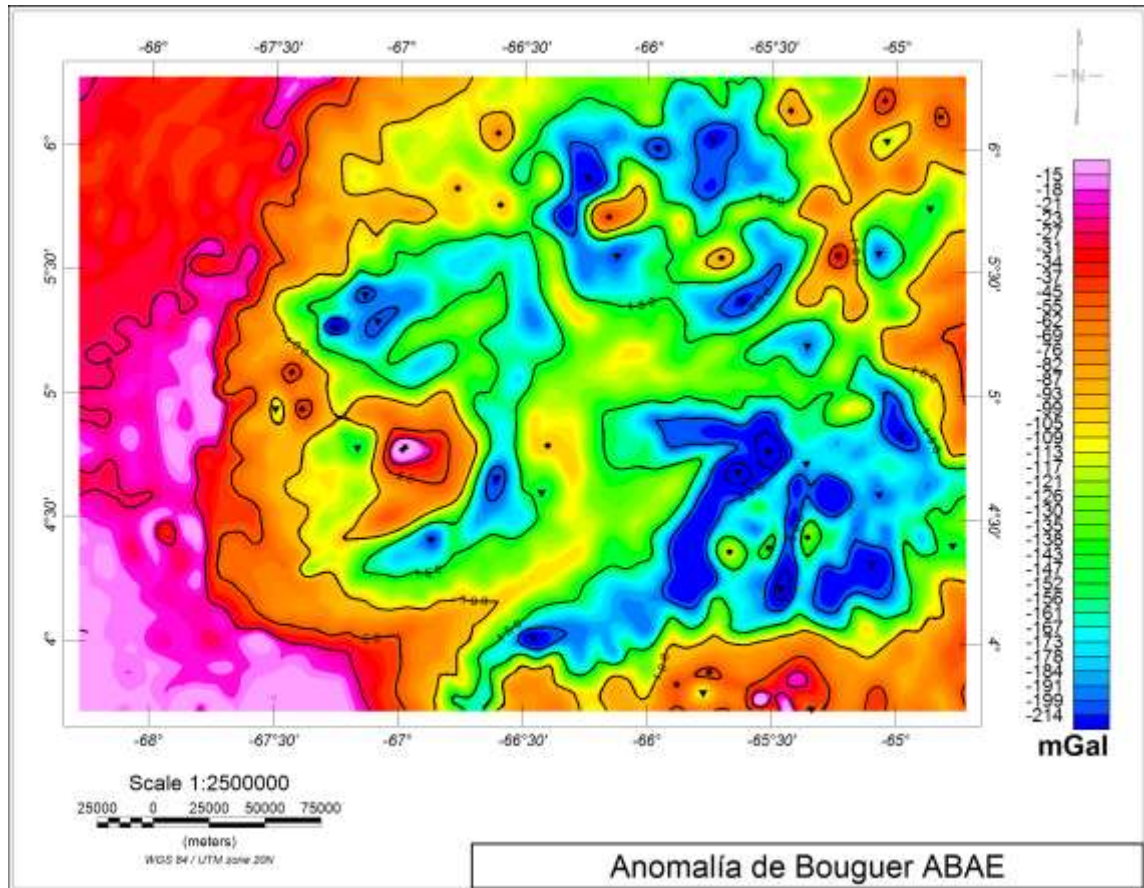


Figura 6. 11 Anomalía de Bouguer, base de datos ABAE.

Para el mapa de Bouguer con base en datos de la Universidad de California (UCSD) se observan tres zonas principales, la primera en el extremo Oeste de la ventana con valores máximos (86 mGal) y contornos circulares en partes concéntricas, una segunda región de valores intermedios (-30 a -50 mGal) y orientación aproximada N15°E, por último una zona con mínimos (-186 mGal) al sureste y geometría circular. En el extremo Noreste y al igual que en el mapa de la figura 6.11 se encuentra un máximo correspondiente a un contacto en profundidad con la provincia

de Cuchivero. Los gradientes para este mapa son mucho más suaves con valores promedio de 0.38 mGal/km.

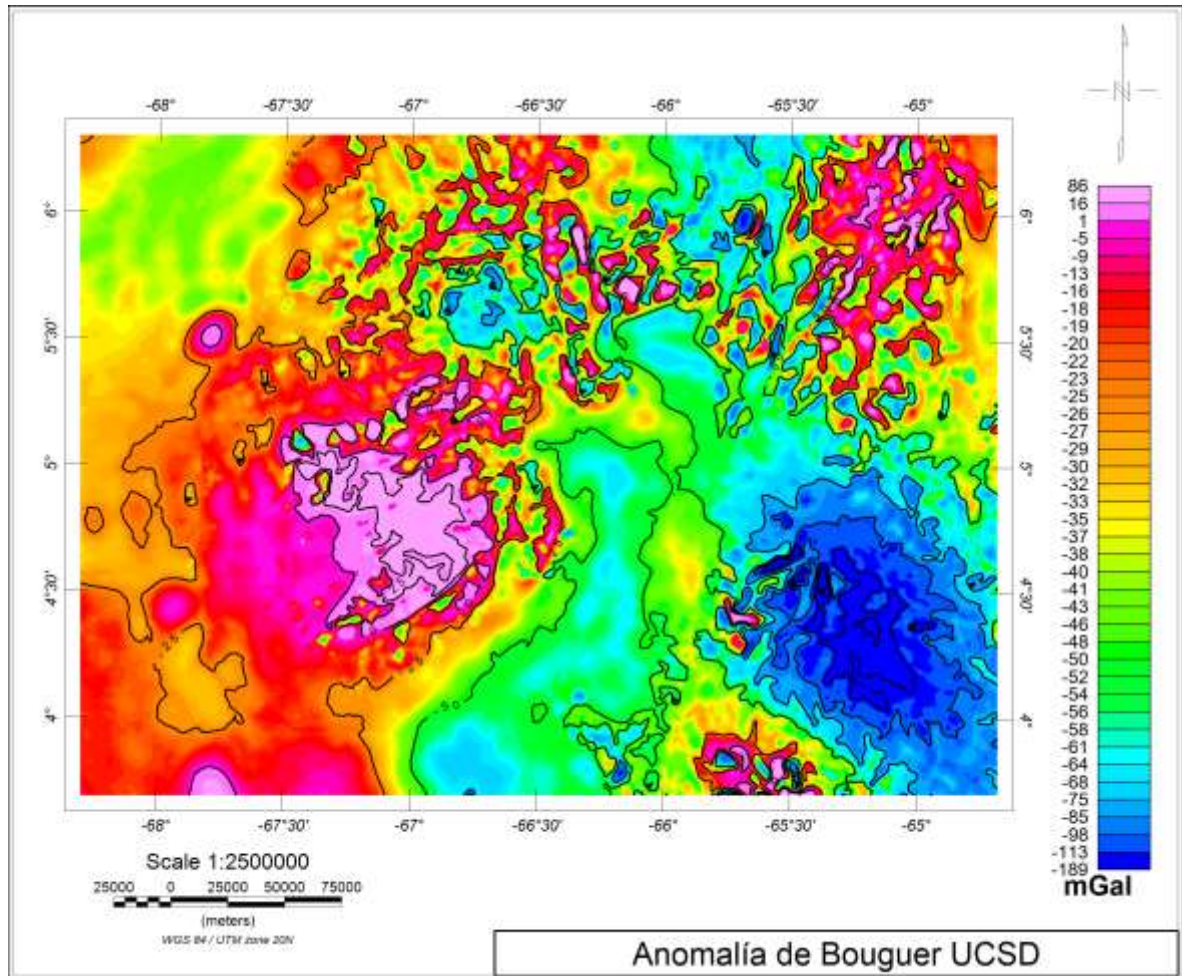


Figura 6. 12 Anomalía de Bouguer, base de datos UCSD.

En relación al mapa del modelo GGMplus se presenta un rango de anomalía de 45 a -150 mGal; existen zonas bien definidas, en el extremo oeste (territorio colombiano) valores intermedios asociados a sedimentos del Cuaternario (Tapias, 2006), en la longitud 67°30' W un máximo asociado al granito del Parguaza, seguido de un mínimo que posiblemente tenga relación con un graben descrito por Barrios (1985), esta zona tiene un gradiente elevado del orden de 1,76 mGal/km. Continuando en dirección este se encuentra un máximo relacionado con fuente en el cerro Duida – Marahuaca y el cerro Cacurí (en dirección norte) y por último un máximo absoluto (-

150 mGal) que citando a Barrios (1985) corresponde a un segundo graben denominado valle de Ventuari- Labarejuri. Este último tramo posee el mayor gradiente de aproximadamente 2,6 mGal/km, en donde puede observarse la transición entre los mínimos y máximos absolutos de la región. La geometría de las diferentes zonas resaltantes del mapa es mayormente alargada (ancha en el caso de Parguaza por su amplia extensión) y sigue un rumbo de N20°E similar al de la figura 6.12; en términos generales el comportamiento de la región tiene una fuerte componente regional asociada. Una vez analizado el comportamiento de los tres mapas de anomalía de Bouguer y debido a que el modelo GGMplus tiene la mayor resolución, el procesamiento posterior se hará tomando como base estos datos.

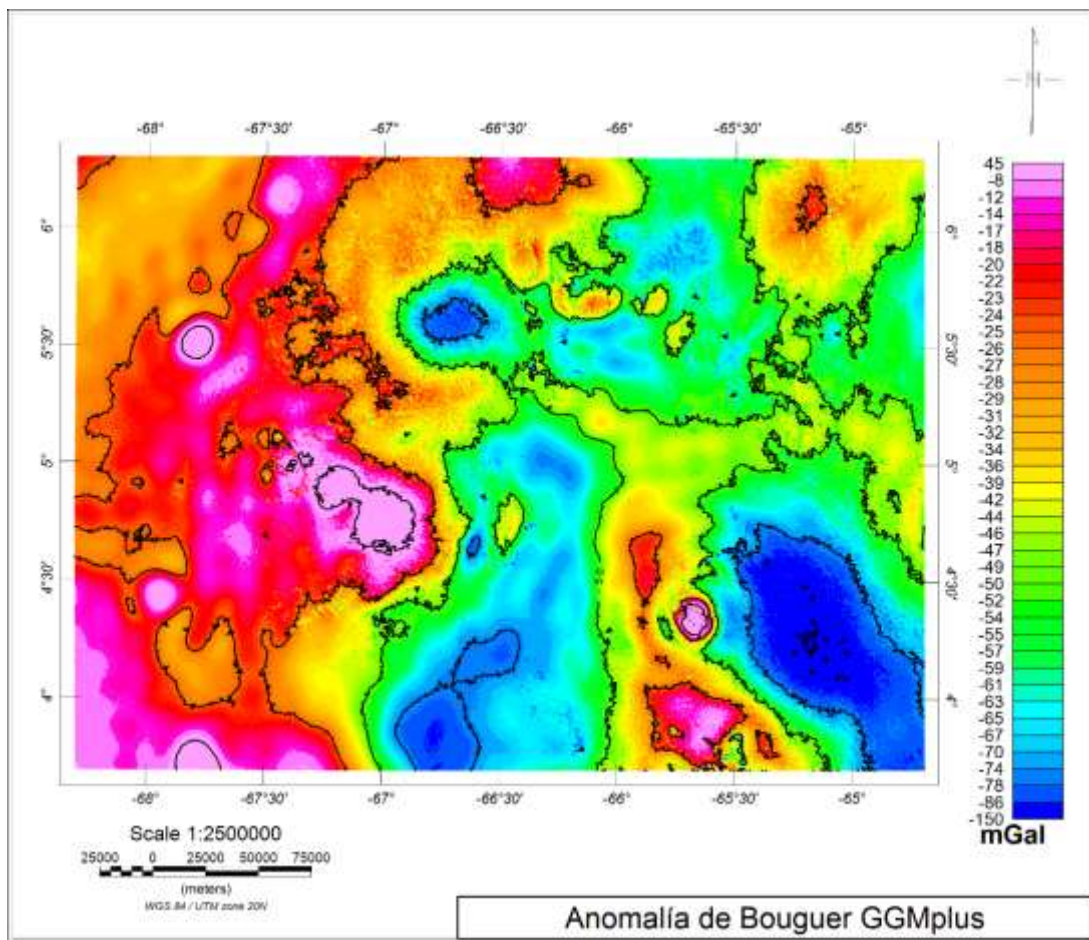


Figura 6. 13 Anomalía de Bouguer, base de datos GGMplus.

6.5 Anomalía regional de Bouguer

Para el cálculo de la anomalía regional se empleó la continuación analítica hacia arriba la cual posee la ventaja de incluir consideraciones geológicas regionales, la figura 6.14 muestra dicho procedimiento referido a una altura de 70 km, este representó el mejor ajuste luego de realizar pruebas a diferentes alturas, basado en el procedimiento empleado por Zeng (2010), empezando desde los 5 km hasta los 100 km, a partir de 70 km el ajuste se mantuvo sin variación aparente. Se observa una geometría lineal en la dirección de los contornos la cual posee un rumbo de N15°E, el cual empieza a cambiar su dirección hacia la parte este de la región estudiada. El rango de valores va de -32 mGal para los máximos hasta -51 mGal para los mínimos. El gradiente promedio del mapa es de 0,1 mGal/km.

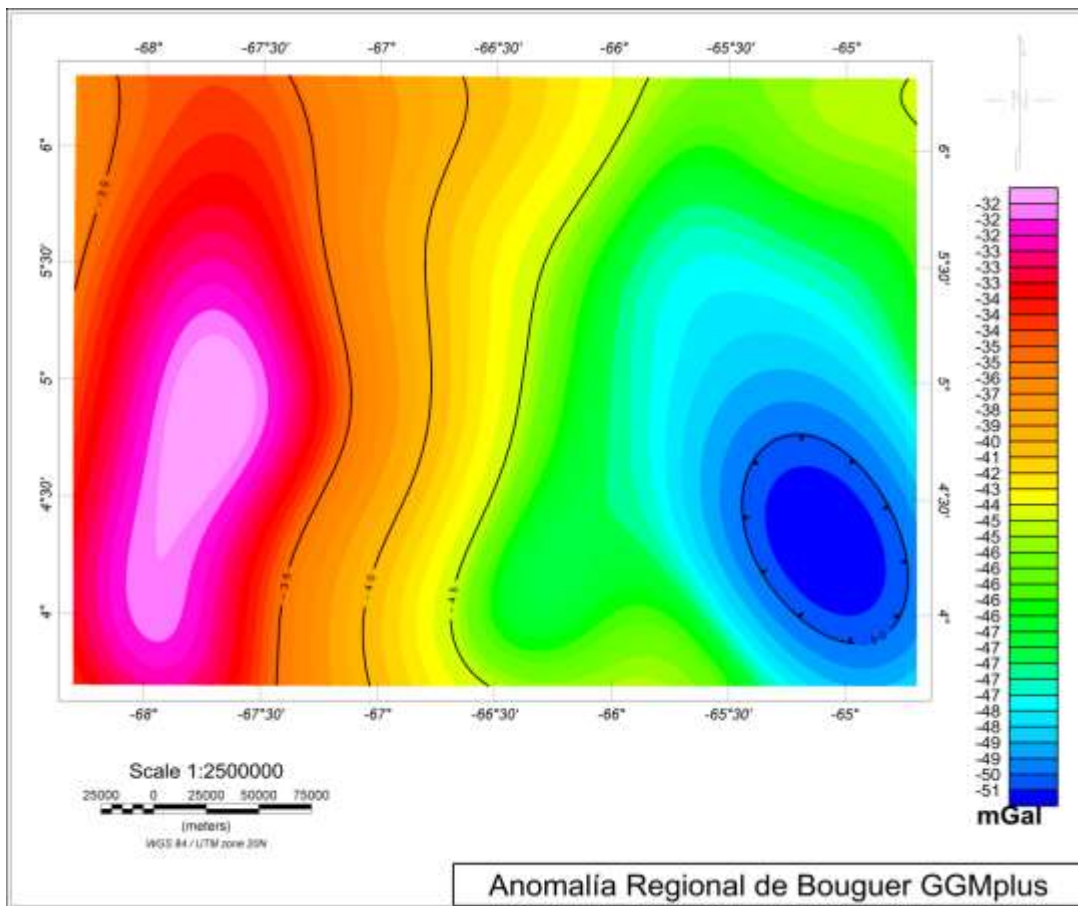


Figura 6. 14 Anomalía Regional de Bouguer, base de datos GGMplus. Por continuación analítica hacia arriba a 70 km.

6.6 Anomalía residual de Bouguer

Luego del cálculo de la anomalía regional mediante la continuación analítica hacia arriba, se obtuvo la anomalía residual sustrayendo la tendencia regional al mapa total de Bouguer, el resultado de dicho procedimiento se encuentra en la figura 6.15. El rango de dicha anomalía va de 93 a -100 mGal, con estructuras locales, muy similares a la tendencia del mapa total de Bouguer, las cuales abundan en el mapa. Donde los valores máximos están asociados a las unidades más someras como Roraima y sedimentos en general y los valores mínimos representan estructuras como diques o sills. La orientación de los contornos varía en gran medida aunque se observa una orientación N30°W en la región central y N20°E en el extremo oeste. Por otra parte la geometría es mayormente alargada aun cuando presenta cierres circulares asociados a máximos y mínimos locales. El gradiente general es elevado debido al cambio rápido en las propiedades del subsuelo.

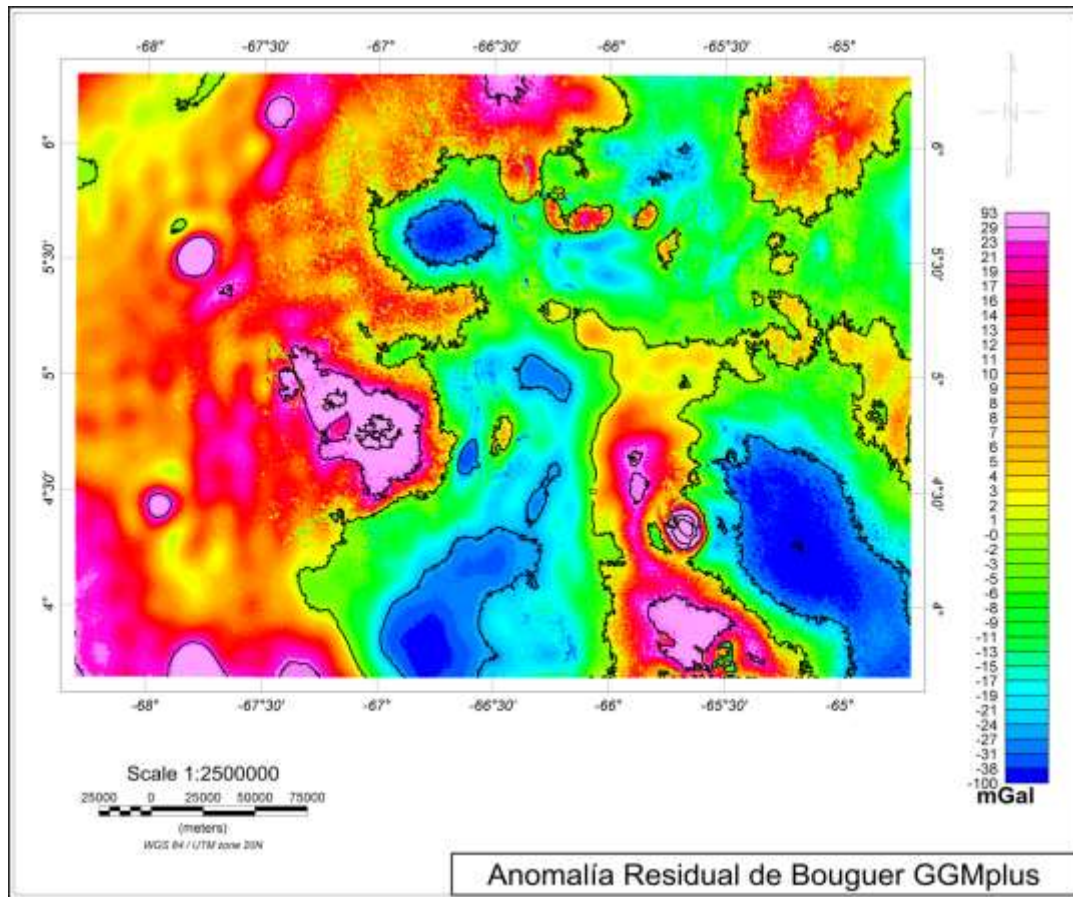


Figura 6. 15 Anomalía Residual de Bouguer, base de datos GGMplus. Para regional por continuación analítica hacia arriba a 70 km.

6.7 Derivada direccional de la anomalía de Bouguer

Con el fin de resaltar la anomalía en una dirección específica para observar alineamientos con las estructuras presentes se calcularon derivadas direccionales con orientaciones específicas. Para el caso de la figura 6.16 se realizó este procedimiento con una dirección N30°W, en el mismo se ve el alineamiento de dos posibles mínimos asociados a los dos grabens propuestos por Barrios (1985); por otra parte un máximo entre ellos que refleja la contribución de los cerros Duida- Marahuaca y Cacuri a la anomalía de la zona. En la sección Oeste del mapa está presente una zona de altos valores correspondientes al granito del Parguaza y a la provincia de Cuchivero, ambas estructuras a poca profundidad; así como un máximo absoluto

asociado a Roraima. La anomalía total posee un rango más cerrado que la anomalía de Bouguer, encontrándose valores de -81 a 50 mGal.

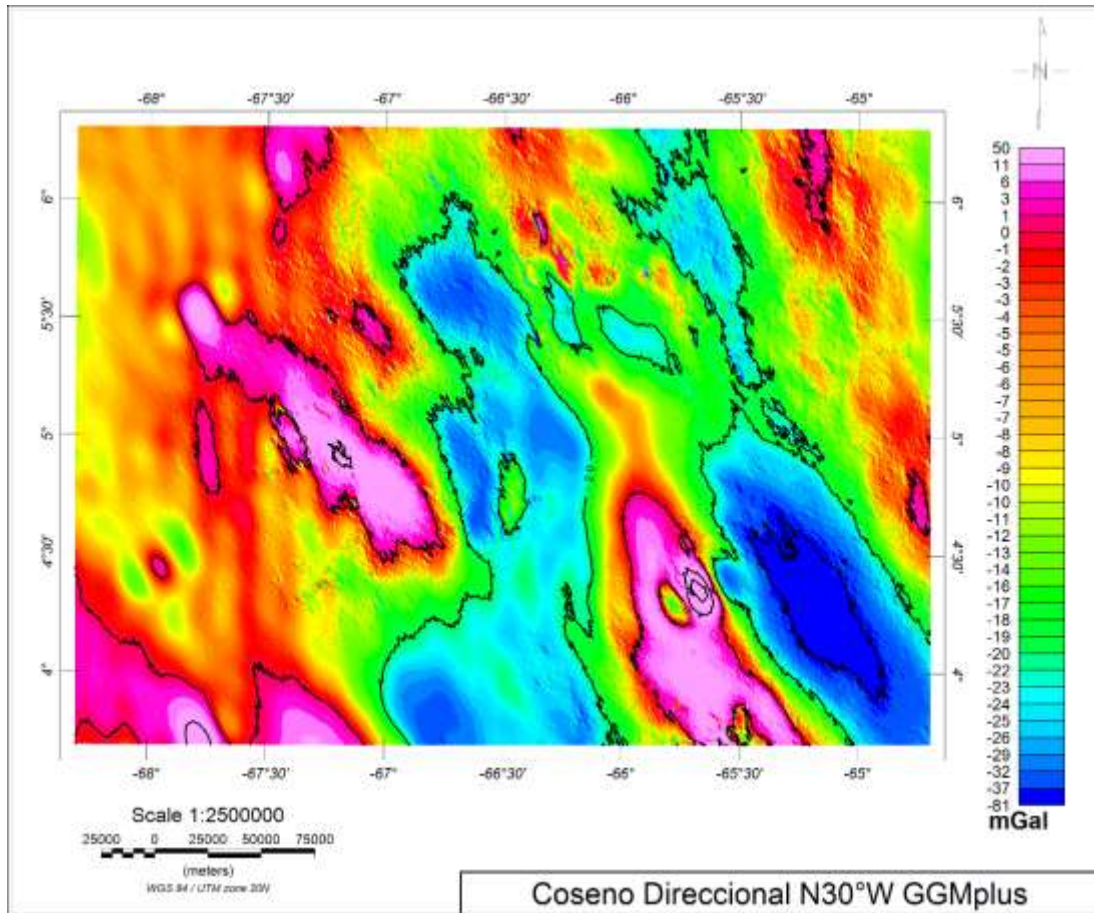


Figura 6. 16 Derivada direccional, base de datos GGMplus.

6.8 Anomalía magnética, base de datos ABAE, modelo Emag2

El mapa de anomalía magnética (figura 6.17) presenta un rango de valores que varía entre -139 y 102 nT, posee tres zonas con valores máximos, la primera en el extremo noroeste asociada a estructuras con alta magnetización remanente y poca profundidad, un segundo máximo en el centro del mapa con forma curva posiblemente continuación de la primera; luego al sur expresiones relacionadas a los

cerros Yapacana y Duida – Marahuaca. Por otra parte los mínimos presentes se relacionan con el cerro Autana y el macizo Sipapo (al oeste) y al cerro Cacuri al este, ambas secciones con contornos alargados circulares en donde el gradiente es cercano a 1,56 nT/km, lo cual implica zonas con baja magnetización remanente posiblemente asociados al grupo Roraima.

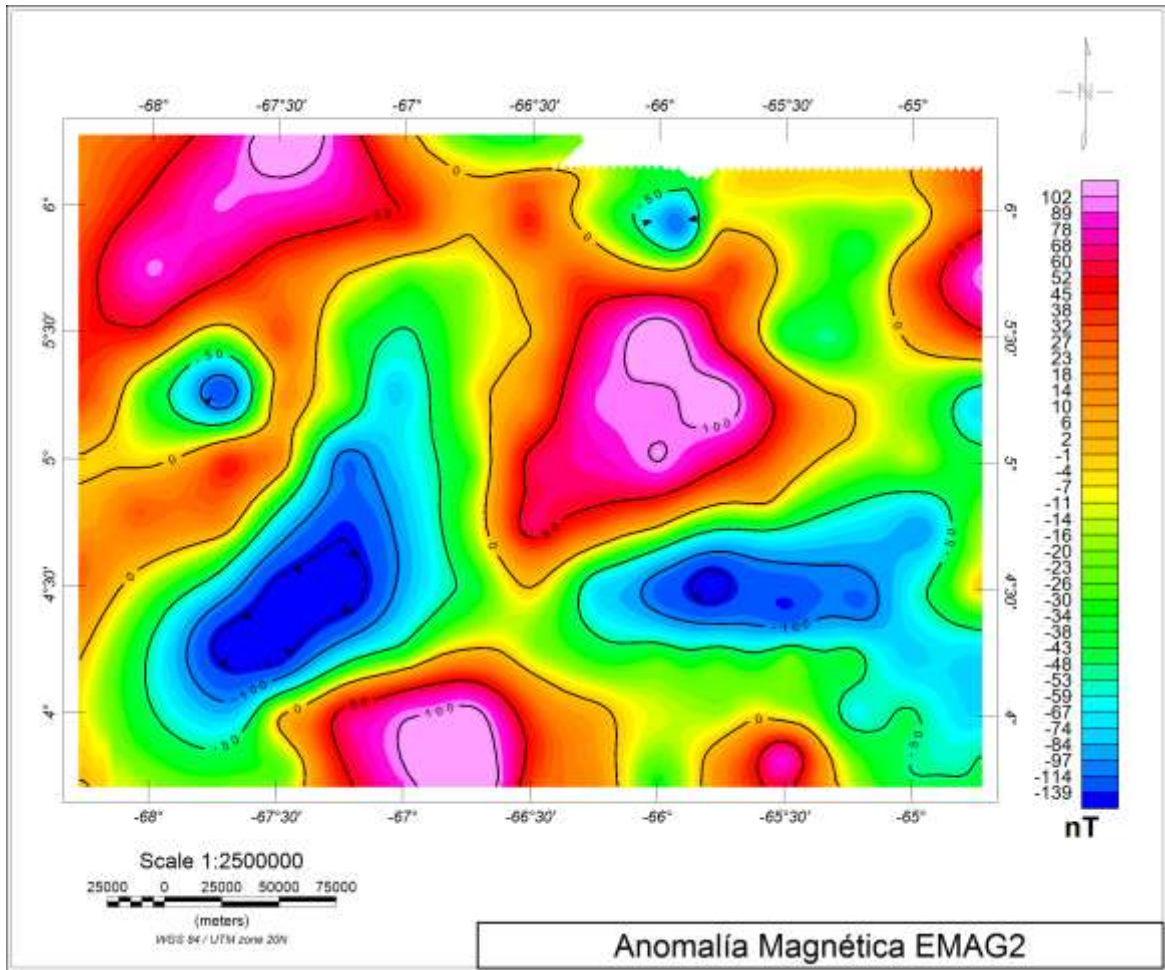


Figura 6. 17 Anomalía Magnética, base de datos Emag2.

6.9 Campo geomagnético de referencia internacional o IGRF

El IGRF calculado representa un nivel calculado a partir de coeficientes de Gauss, comprende el campo magnético teórico de la Tierra, calculado para la región (figura 6.18); posee una orientación aproximada de contornos N70°E, con valores que van de 30544 nT para el mínimo absoluto observado en el sureste de la región hasta 31859 nT al noroeste. Este representa una aproximación mayormente regional de lo esperado para la zona. Debido a que es un modelo teórico en donde la magnitud de los contornos varía lenta y progresivamente el gradiente asociado es muy bajo.

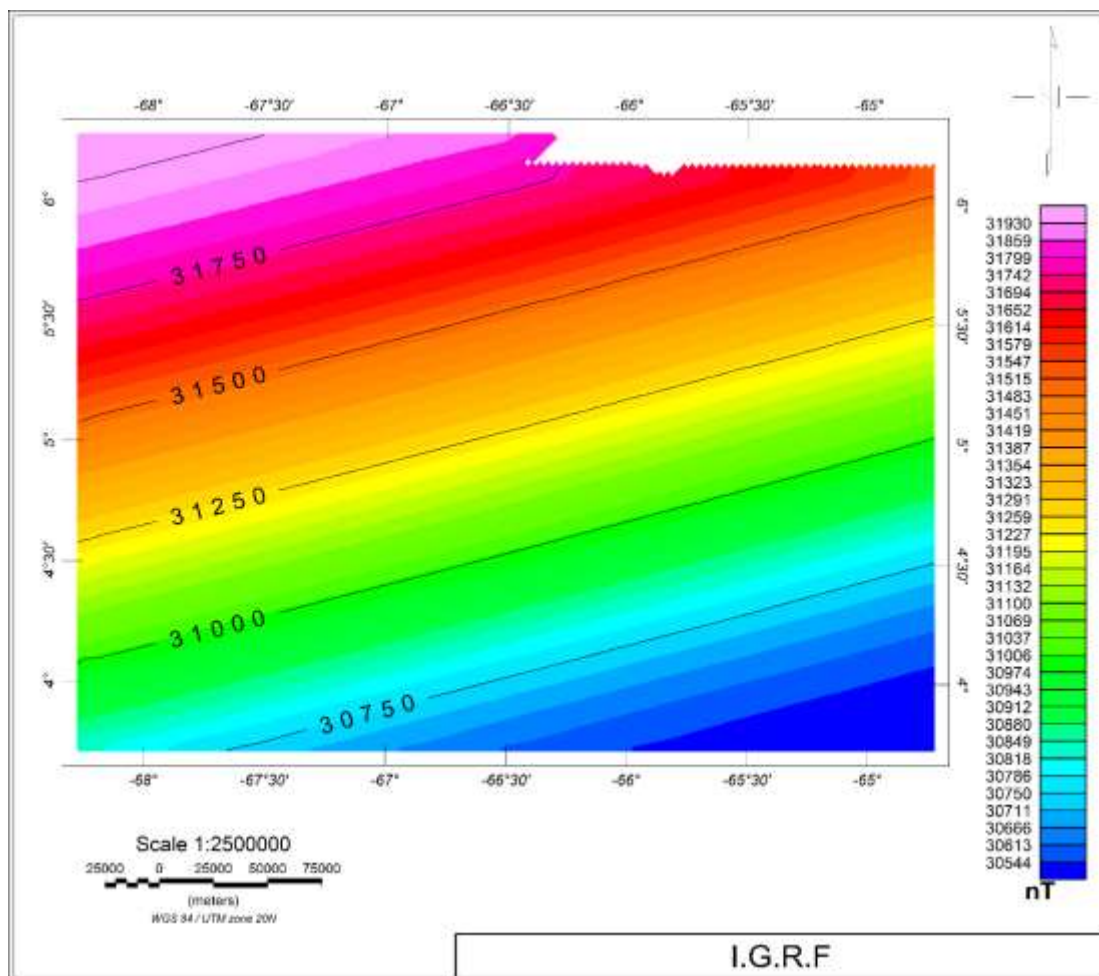


Figura 6. 18 Campo geomagnético de referencia internacional.

6.10 Anomalía regional magnética, base de datos ABAE, modelo Emag2

Mediante una continuación analítica calculada a 100 km hacia arriba, debido a que representó el mejor ajuste dado que por encima de este valor el comportamiento regional se mantuvo sin variación, la separación regional magnética exhibe el siguiente comportamiento; máximos y mínimos concordantes con el IGRF aunque con menor horizontalidad de los contornos debido a que la región estudiada se encuentra sobre el dominio Ventuari (topografía accidentada y presencia de plutones), lo cual es consistente con lo observado en el grafico como una inflexión magnética en la región centro-oeste del mapa. El rango de esta anomalía varía entre -30 y 22 nT con una orientación general de N45°E para los contornos.

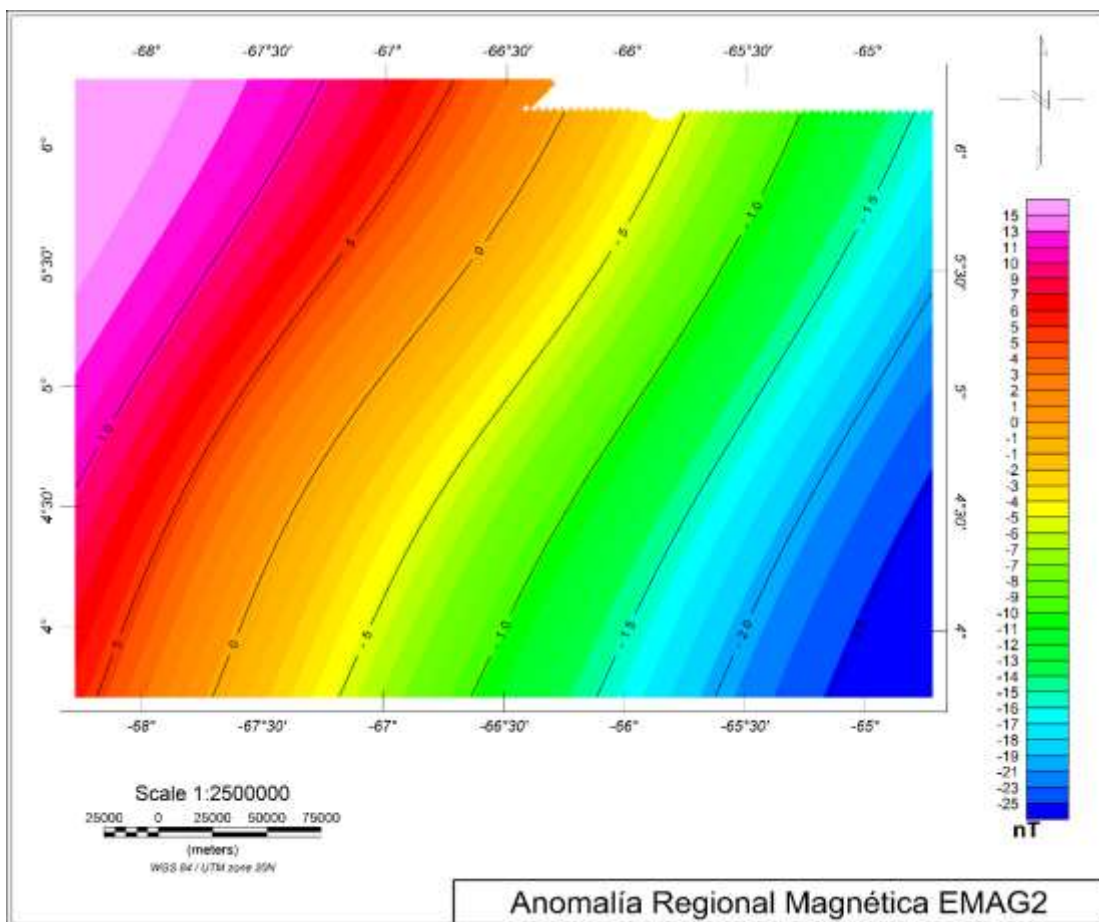


Figura 6. 19 Anomalía Regional Magnética, base de datos Emag2. Por continuación analítica hacia arriba a 100 km.

6.11 Anomalía residual magnética, base de datos ABAE, modelo Emag2

La anomalía residual (figura 6.20) con un rango de valores de -38 a 39 nT, exhibe múltiples estructuras alargadas asociadas a máximos, intercaladas con elipses de magnitud negativa; esto se relaciona con heterogeneidades, abundantes en la región, debido a esto el gradiente general de la zona cambia rápidamente. Para la longitud 68° W y latitud cercana a $5^{\circ}30'$ N se encuentra un mínimo relacionado al cerro Autana; por otra parte en el extremo sur del mapa existen dos máximos locales asociados a los cerros Duida y Yapacana lo que indica presencia de minerales pesados en la cercanía. En general el grafico se encuentra relacionado a las capas más someras presentes en la región, por ejemplo Roraima así como algunos diques locales.

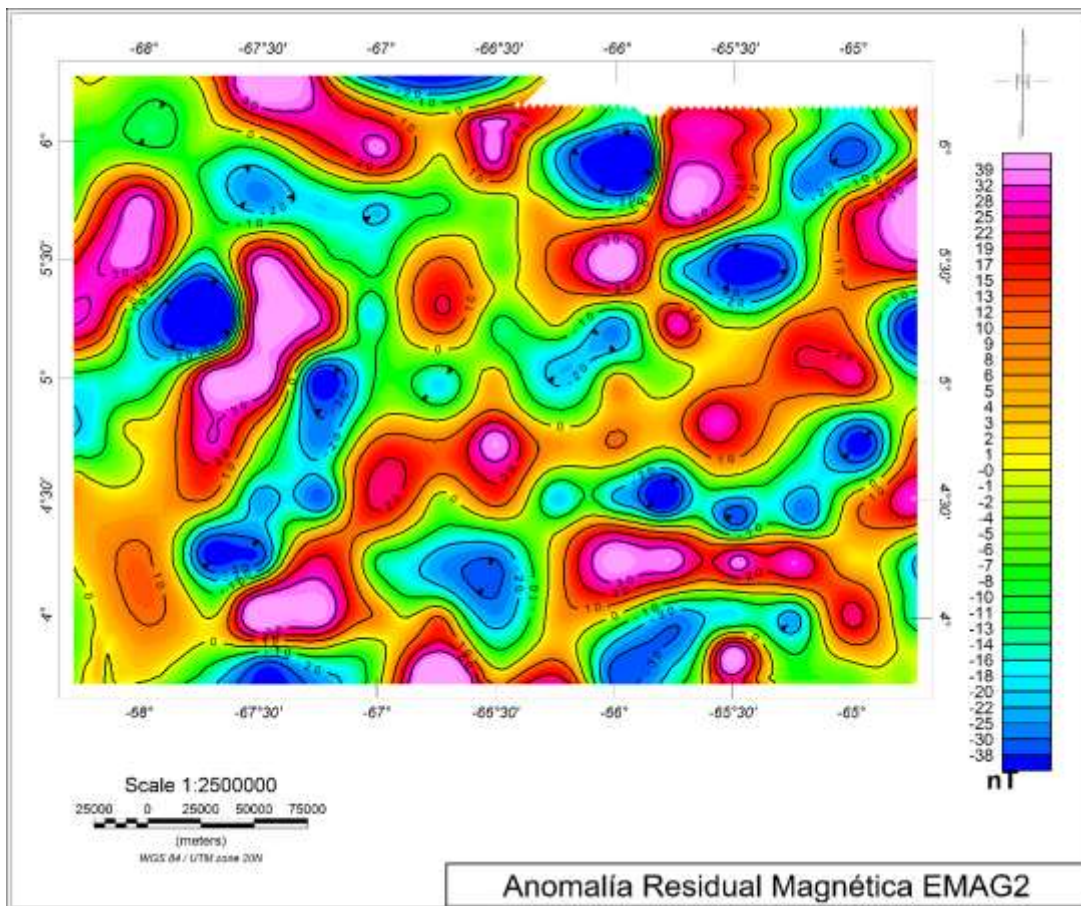


Figura 6. 20 Anomalía Residual Magnética, base de datos Emag2. Para regional por continuación analítica hacia arriba a 100 km.

6.11 Derivada direccional, base de datos ABAE, modelo Emag2

El coseno direccional de orientación N30°W mostrado en la figura 6.21, permite resaltar tres rasgos principales de la región, en el medio un máximo de carácter regional ligado a la presencia de valles de rift en la zona, por otra parte los dos mínimos de orientaciones variables representan los contactos con estructuras no magnéticas, con Cuchivero al Oeste y el terreno metamórfico de San Carlos al Este. El rango de valores es de -45 a 49 nT. De forma local en las coordenadas 67°30' W de longitud y 5°30' N de latitud se encuentra una cupla magnética local asociada al cambio brusco de litología entre el granito del Parguaza y sedimentos del Cuaternario (territorio colombiano) en donde incide directamente el volumen de las estructuras, teniendo mayor contribución la masa de roca ígnea.

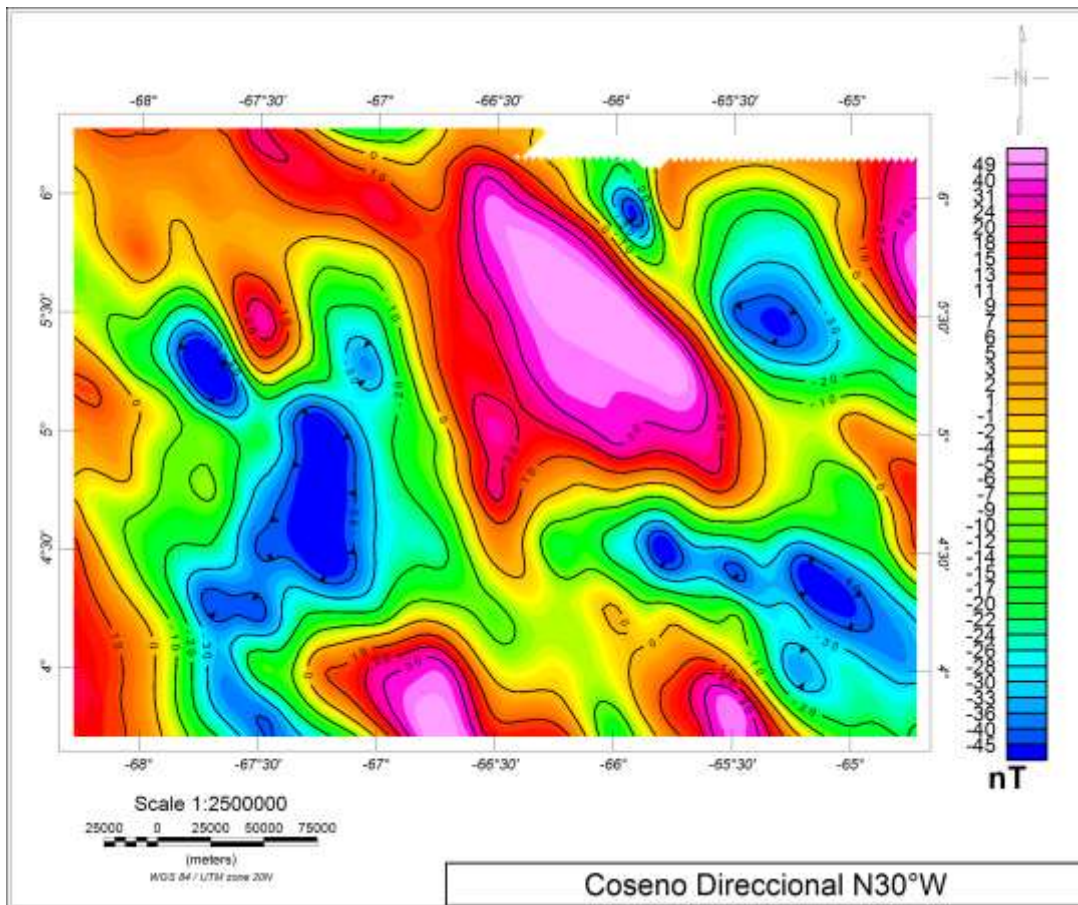


Figura 6. 21 Derivada direccional magnética, base de datos Emag2.

6.12 Reducción al Ecuador y al Polo magnético

A manera de resaltar la anomalía magnética pueden aplicarse filtros que centran o mueven los contornos presentes en una dirección predeterminada, para el caso de la reducción al Ecuador la cual es la mejor opción para latitudes cercanas a cero grados (0°) la geometría tiende a achataarse, caso contrario a la reducción al polo en donde los contornos se alargan. Los mapas de las figuras 6.22 y 6.23 representan los procedimientos descritos anteriormente. Para ambos casos los sectores de contornos más amplios representan una forma aproximada de los macizos, tepuyes o cerros en la zona sin importar si están asociados a máximos o mínimos. En cuanto a la reducción al polo es clara una gran estructura alargada posiblemente ubicada a gran profundidad.

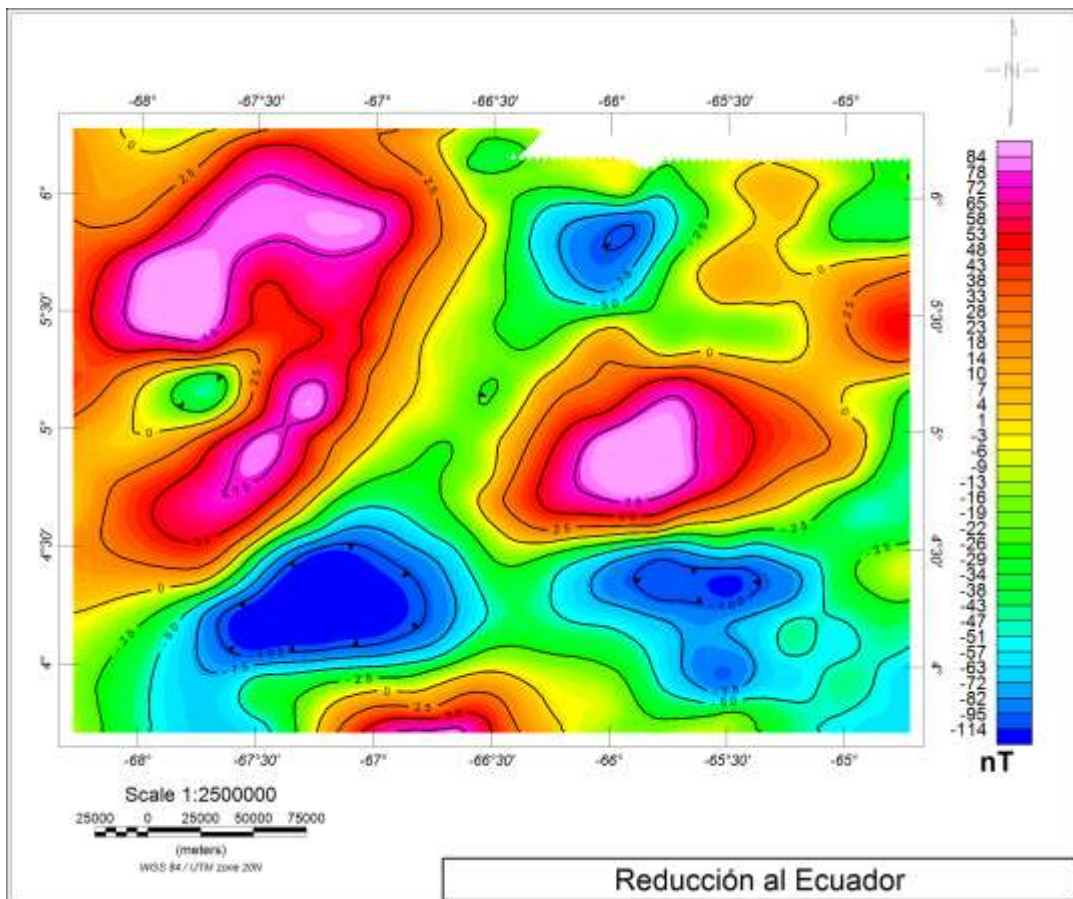


Figura 6. 22 Filtro de reducción al Ecuador, base de datos Emag2.

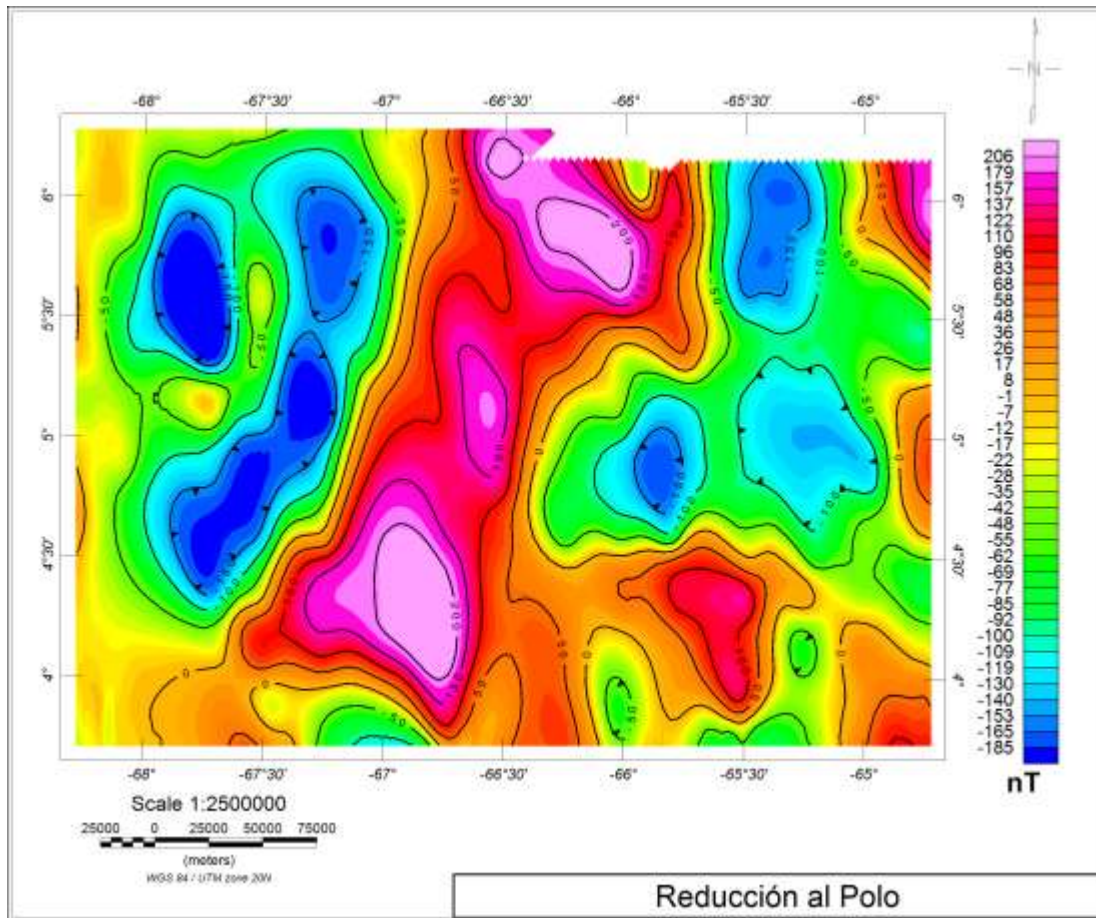


Figura 6. 23 Filtro de reducción al Polo, base de datos Emag2.

Cada uno permite identificar estructuras importantes de la zona estudiada mediante su comportamiento magnético; sin embargo, en este caso la reducción al Ecuador es la mejor opción debido a la posición de la región cercana al Ecuador terrestre.

6.13 Deconvolución de Euler

Las figuras 6.24, 6.25 y 6.26 corresponden a las diferentes deconvoluciones de Euler realizadas a los datos gravimétricos y magnéticos. Los parámetros importantes a tomar en cuenta son la profundidad de las estructuras así como la geometría y volumen que siguen los diferentes conjuntos de puntos. Con relación a la deconvolución 2D de datos de gravedad se tiene un rango de profundidades estudiadas de 1 a 20 km. Para la menor profundidad se observa una baja cantidad de puntos dispersos alrededor del mapa asociados a fallas. Entre 5 y 15 km hay una gran cantidad de soluciones (respuesta del cálculo matemático) directamente relacionado en la parte occidental del mapa las provincias de Cuchivero, granitos del Parguaza y granito de Atabapo (suroeste); de igual forma con longitud $-66^{\circ}30'$ y latitud $5^{\circ}30'$ se encuentra localizado el batolito de Santa Rosalía. En relación al rango por encima de la mayor profundidad (20 km) está delimitada la geometría general de dos graben propuestos por Barrios (1985), uno central denominado valle de rift de Suapure – Mavaca y otro al este de menor volumen y extensión llamado valle de rift de Ventuari – Labarejuri.

Para el caso de la deconvolución magnética las profundidades se encuentran entre 1 y 15 km, este mapa posee una orientación más marcada de las estructuras, donde existen dos tendencias en relación al rumbo, la primera con un aproximado de $N30^{\circ}E$ y la segunda casi Norte – Sur. Los puntos menos profundos (de 1 a 2.5 km) están asociados a estructuras del grupo Roraima, por otra parte entre 2.5 y menos de 15 km es factible encontrar estructuras ígneas como Cuchivero y Parguaza así como material metamórfico (terreno de San Carlos). Por ultimo para profundidades mayores a 15 km se observan 3 estructuras alargadas, una en el centro y la otra al este referidas a los dos rifts nombrados anteriormente y una tercera de mayor volumen en el extremo suroeste de la región coherente con el rift de Casiquiare, punto en donde los dominios geológicos cambian.

Por ultimo para la deconvolución 3D de datos de gravedad se aumentó el rango de profundidades y se redujo el valor de tolerancia a un 5% para tener un modelo más confiable y menos redundante de los elementos presentes. En el grafico se observan estructuras someras y profundas, donde a medida que aumenta la profundidad las soluciones son más difusas, lo que quiere decir que el error aumenta y es difícil delimitar una geometría exacta de las estructuras. En términos geológicos las estructuras someras se asocian una vez más con el grupo Roraima así como sedimentos Pre-Roraima, para profundidades intermedias hay un paquete sin dividir correspondiente a las diferentes estructuras del basamento, por ultimo a mayor profundidad se observan una vez más los grabens de la zona, los cuales aumentan su extensión en latitudes más bajas, donde manifiesta la geometría divergente asociada al adelgazamiento cortical.

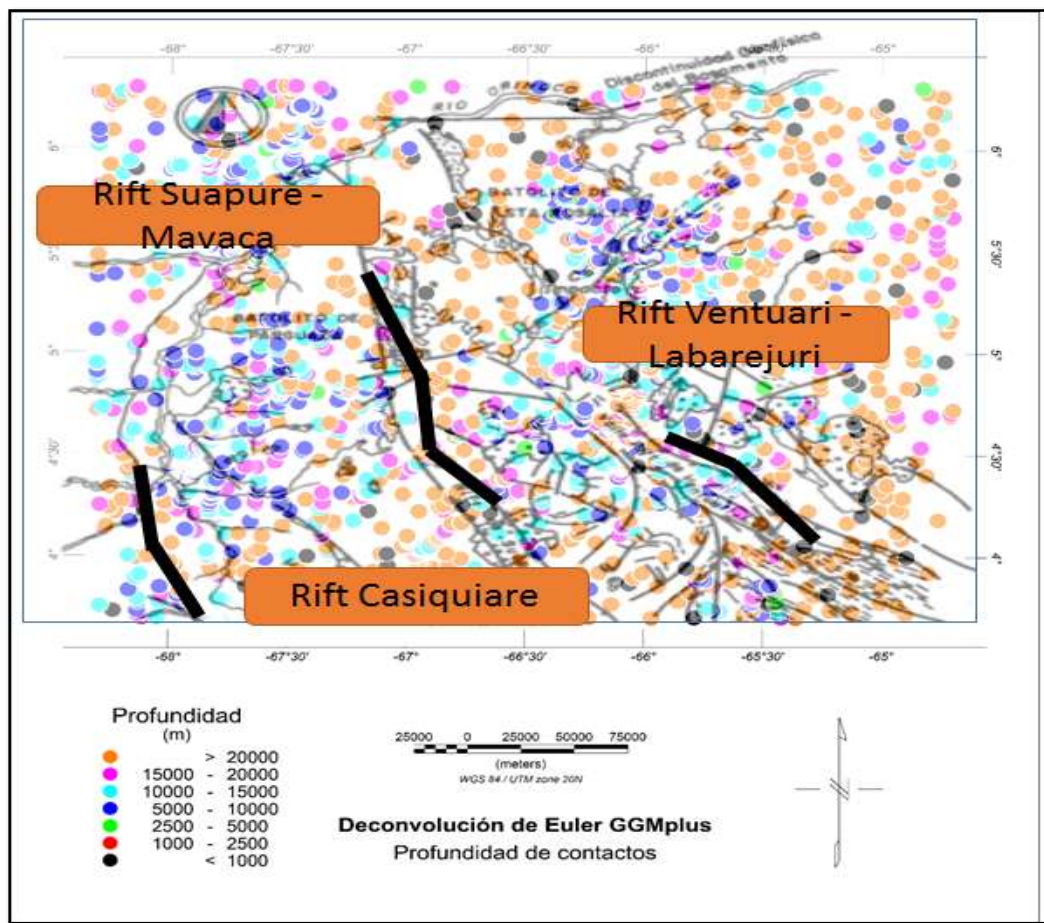


Figura 6. 24 Deconvolución de Euler aplicada a datos gravimétricos.

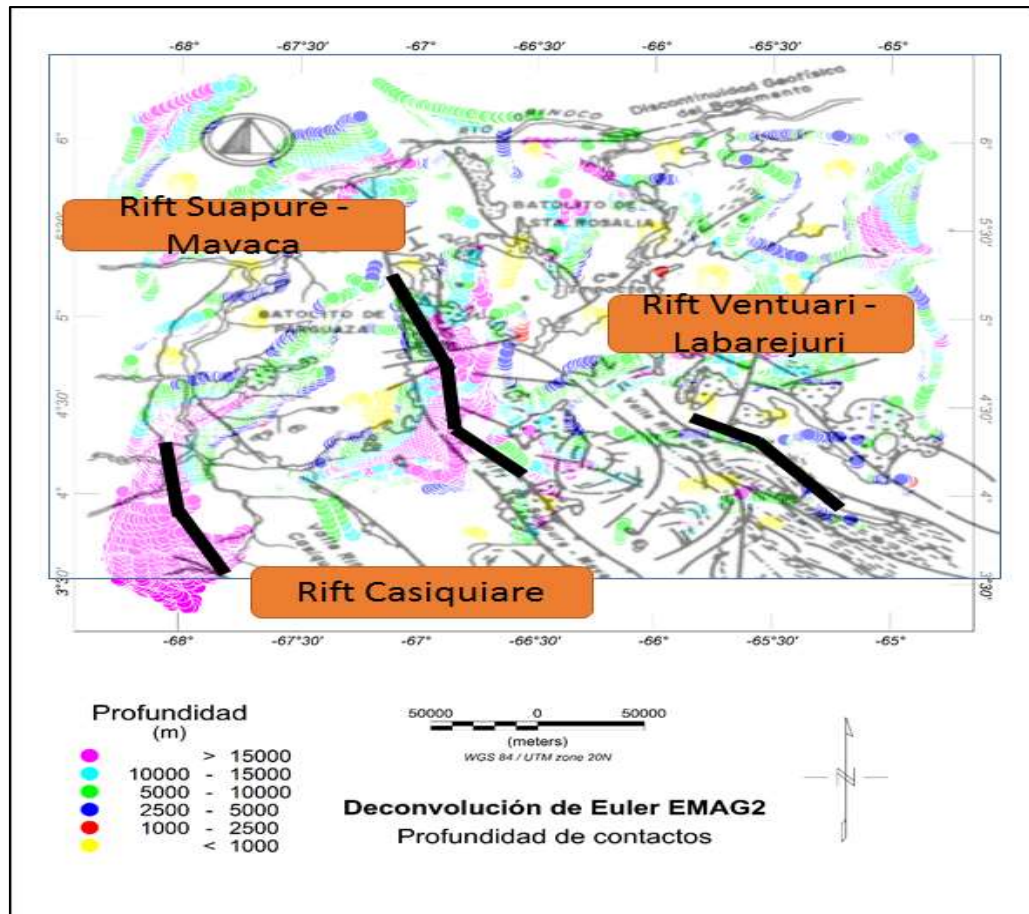


Figura 6. 25 Deconvolución de Euler aplicada a datos magnéticos.

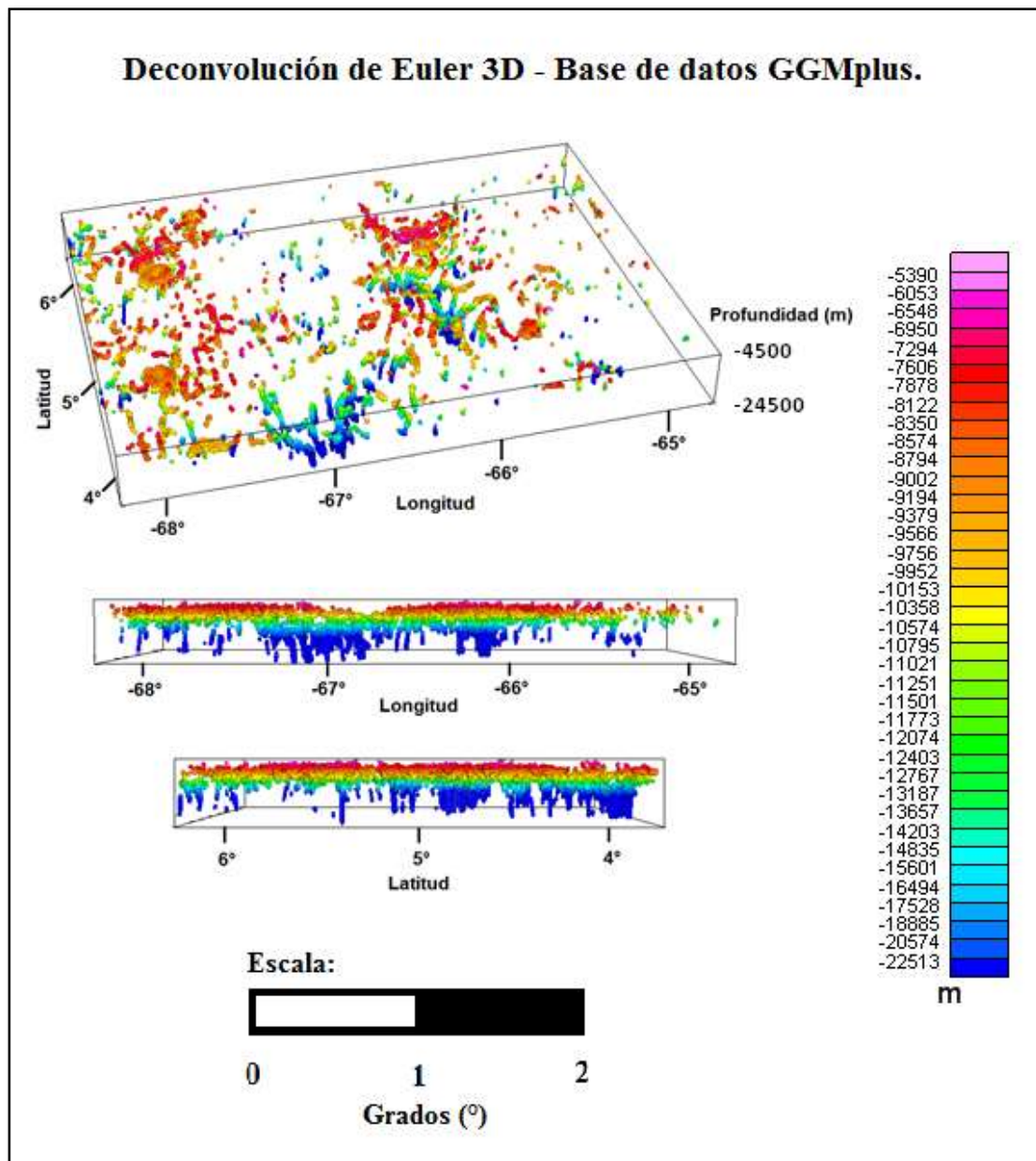


Figura 6. 26 Deconvolución de Euler 3D aplicada a datos de anomalía de Bouguer.

6.14 Deconvolución de Werner

A los datos magnéticos se les aplicó este procedimiento matemático para delimitar contrastes entre estructuras, esto se hizo sobre dos perfiles para interpretación de la zona que posteriormente se usaron para el modelado geológico – estructural de la región estudiada.

Para el primer perfil con dirección Este – Oeste (figura 6.27) resaltan 4 zonas; en el extremo oeste se observa el punto de transición entre el granito del Parguaza y Cuchivero. En la sección central se encuentran soluciones dispersas correspondientes al rift de Suapure - Mavaca. La estructura vertical se relaciona con rastros de un dique de gran extensión, con su parte terminal ubicada en las inmediaciones del cerro Cacurí. Por ultimo al este del perfil aparecen una vez más puntos dispersos posiblemente asociados al margen del rift Ventuari - Labarejuri.

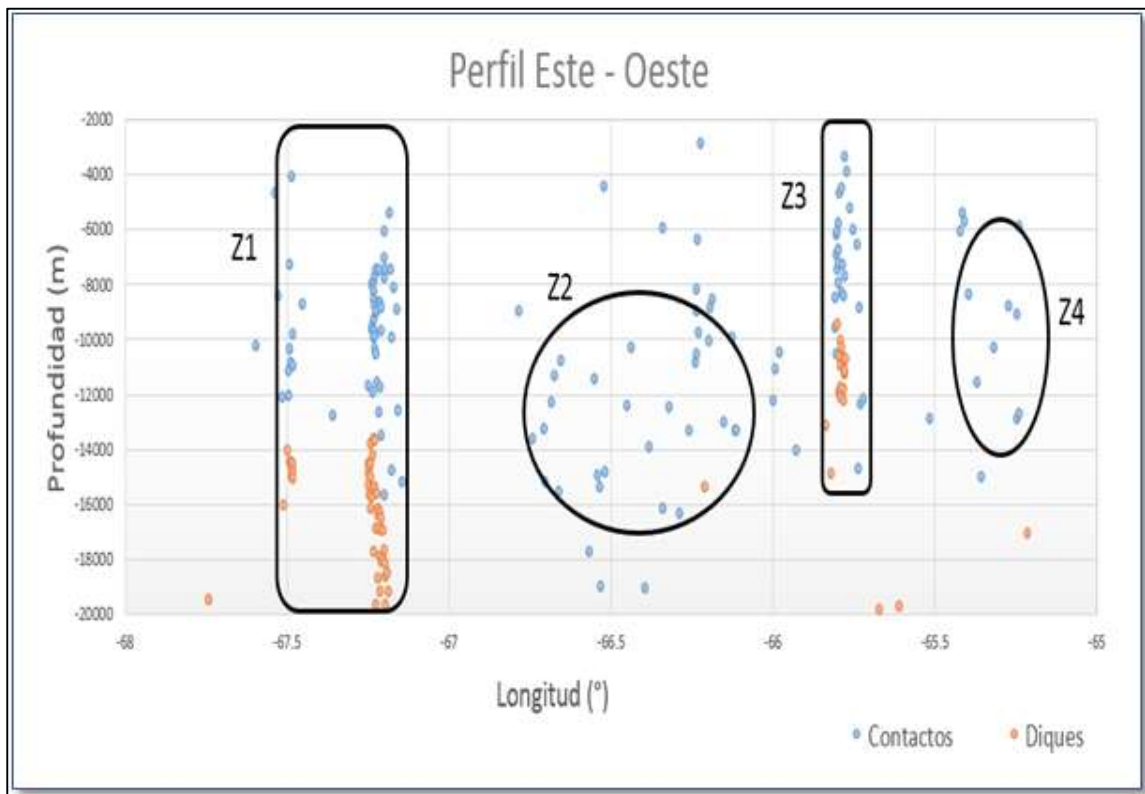


Figura 6. 27 Deconvolución de Werner, perfil Este – Oeste.

En relación al segundo perfil con dirección N45°E (figura 6.28) pueden observarse 5 zonas; en el extremo oeste soluciones dispersas localizadas a gran profundidad, posiblemente asociadas al extremo final del valle de rift de Casiquiare. Seguidamente la franja vertical del perfil se asocia al cambio del granito del Parguaza y Cuchivero. En el centro del gráfico los puntos reflejan la sección final del rift Suapure - Mavaca. La siguiente estructura vertical se asocia a un dique de diabasa con de aproximadamente 50 km de extensión, paralelo y al este de la población de San Juan de Manapiare. El extremo este con puntos dispersos se relaciona con el batolito de Santa Rosalía y el cerro Impacto.

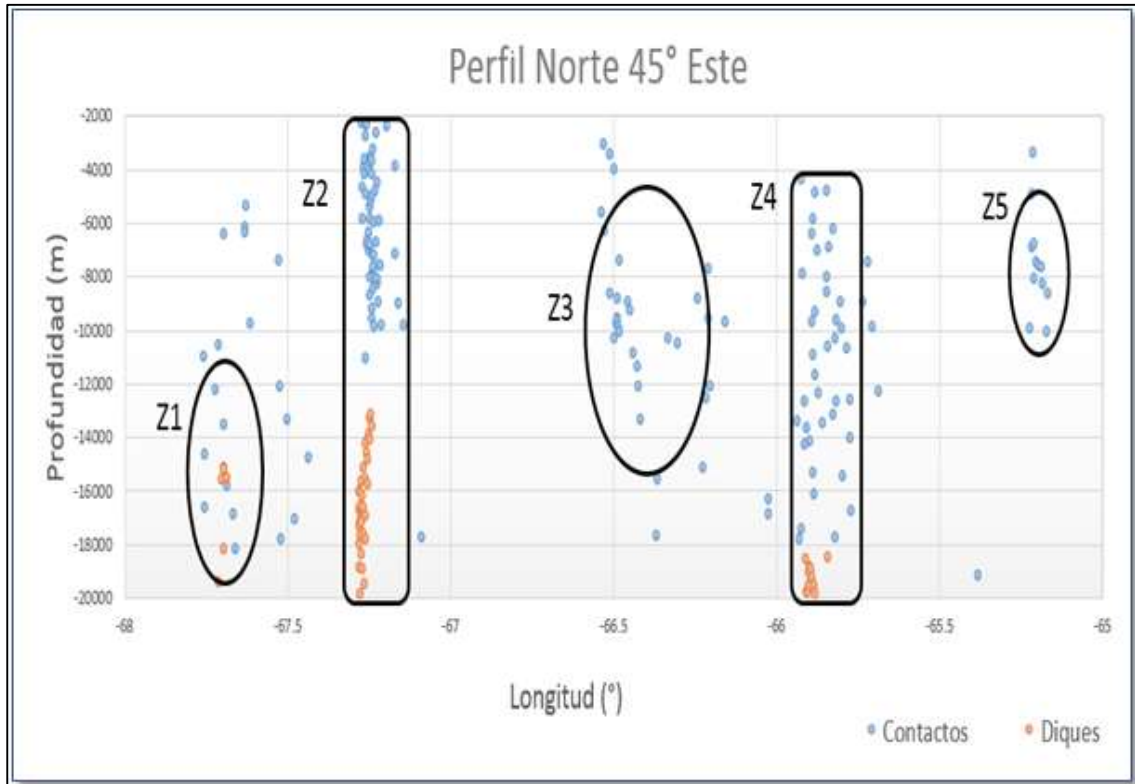


Figura 6. 28 Deconvolución de Werner, perfil N45°E.

6.15 Modelado estructural en base a perfiles de la zona

Como se mencionó en el apartado anterior se escogieron dos perfiles para el modelado geológico – estructural de la zona, el primero ubicado sobre la latitud $4^{\circ}30'$ N y con dirección este – oeste, con una extensión aproximada de 330 km de largo. El segundo perfil se ubicó con orientación N-E desde el punto -68° de longitud y 4° de latitud hasta -65° de longitud y 6° de latitud con un rumbo aproximado de $N45^{\circ}E$ y una distancia total de 400 km de largo. La selección se realizó para datos de anomalía de Bouguer y anomalía magnética como se muestra en las figuras 6.29 y 6.30.

Debido a la falta de un control de profundidad y teniendo como base las información de los espectros de potencia, se modeló primero sobre las anomalías regionales para establecer la profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic así como su geometría. Luego se procedió a modelar sobre los mapas de anomalía total para poder incluir el efecto de las diferentes estructuras presentes en la región. La figura 6.31 permite observar la relación entre las estructuras profundas descritas por Soares (1985) y la anomalía de Bouguer calculada.

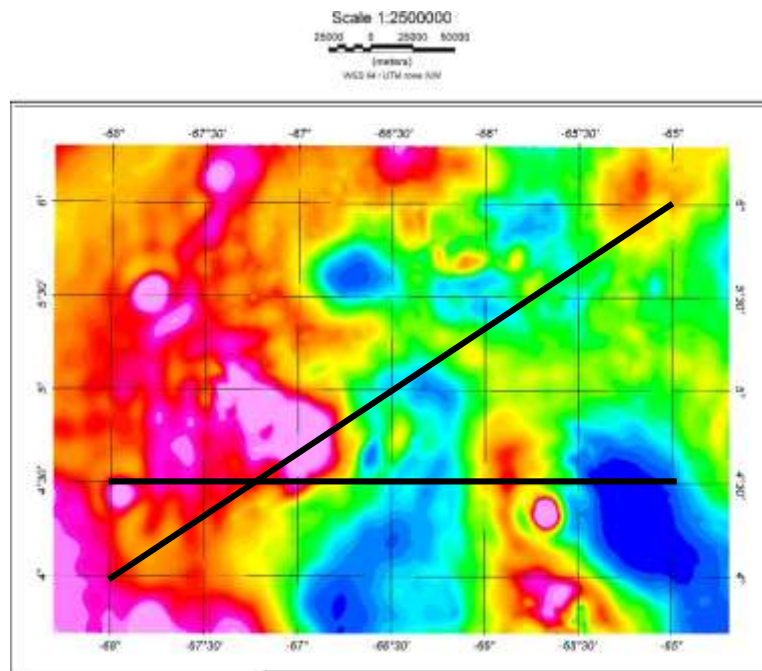


Figura 6. 29 Ubicación de perfiles sobre anomalía de Bouguer.

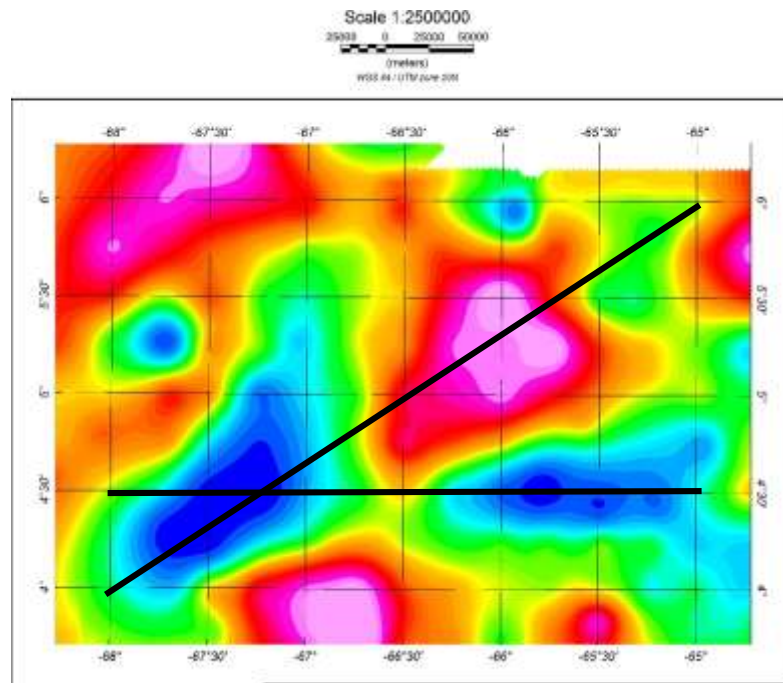


Figura 6. 30 Ubicación de perfiles sobre anomalía magnética.

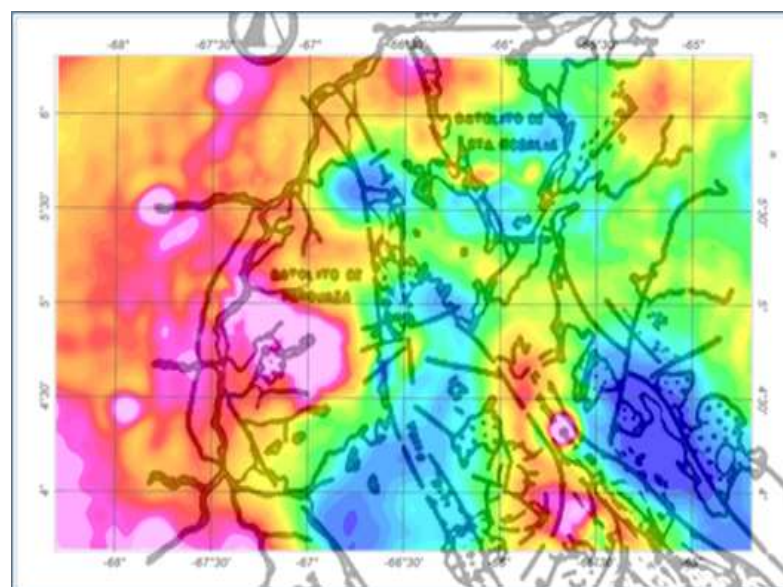


Figura 6. 31 Anomalía gravimétrica y rasgos estructurales de la región estudiada.

6.15.1 Modelos regionales de la zona.

En relación a los modelos de tendencia regional de la región se obtuvo que la anomalía gravimétrica varía entre -20 y -60 mGal, donde existen valores máximos al oeste de los perfiles y mínimos al este con pequeñas inflexiones presentes a lo largo del perfil. Esto quiere decir que el basamento debería de encontrarse a mayor profundidad conforme se disminuye la distancia al estado Bolívar. El rango de profundidad va desde los 36.5 hasta los 40 km, siendo una medida promedio 38,5 km. Dichas variaciones del orden de los 2 km se asocian a procesos de rifting o adelgazamiento cortical. Por otra parte la anomalía magnética tiene un comportamiento suave donde en el extremo oeste los valores son negativos. Luego de los 100 km del perfil se tiene un punto de inflexión donde se vuelve muy positiva. Por último el rango de la anomalía va de 7 a 21 nT, valore asociados a estructuras magnéticas en la vecindad. Con el fin de disminuir el error asociado se dio forma a los bloques para gravedad y se variaron parámetros como densidad, la inclinación y declinación que ayudan que dieran sentido al modelo.

Tabla 6. 5 Parámetros de los modelos.

Estructura	Densidad (g/cc)	Susceptibilidad (emu)	Leyenda
Manto	3.2	0.013	
Corteza Inferior	2.85	0.011	
Corteza Superior	2.75	0.009	
Cuchivero	2.64	0.008	
Gr. Del Parguaza	2.66	0.005	
Roraima	2.53	0.003	
Sed Pre-Roraima	2.54	0.003	
Graben (Basalto)	2.8	0.011	
Graben (cubierta sin dividir)	2.6	0.009	
Terr. Metamórfico de San Carlos	2.72	0.005	
Formación Caicara	2.62	0.0001	
Aluvión	2	0.00001	
Diques	2.8	0.006	

6.15.2 Modelos totales de la zona.

Una vez modelado la anomalía regional y establecida la forma de la interfaz corteza – manto se procede a modelar la anomalía total (gravimétrica y magnética) y así establecer las diferentes estructuras presentes a lo largo del perfil escogido.

Para ambos perfiles se tienen 3 capas sin dividir correspondientes al manto (mayor profundidad), seguido de la corteza inferior y superior respectivamente, para terminar con el rango de profundidad correspondiente al basamento y estructuras someras.

Con respecto al perfil Este – Oeste (figura 6.32) las anomalías mantienen un comportamiento mayormente regional aun cuando existen variaciones o picos pronunciados en zonas puntuales, estos representan el punto de cambio de estructuras pequeñas a regionales. Las anomalías van de -20 a -90 mGal y de 0 a -177 nT.

Las capas observadas de izquierda a derecha son; Cuchivero, Parguaza, Cuchivero con profundidades que rondan los 10 km, con rastros de Roraima de poco espesor (1 a 2 km). Luego se encuentran el punto de inicio de una estructura de grandes dimensiones que a través de comparación geológica, estructural y composicional se determinó que trata del graben de Suapure Mavaca, con material dividido en tres zonas diferentes, la más profunda correspondiente a una capa de basaltos (hasta un máximo de 15 a 16 km), sobre esta un relleno de roca sin dividir de densidad media – alta (2.6 g/cc) y superficialmente rastros de Roraima y aluvión del cuaternario. Posterior a esta gran estructura se encuentra a unos 8 km una sección del terreno metamórfico de San Carlos y por encima de este Roraima, sedimentos pre-Roraima y un dique de diabasas. En la sección final se aprecia otra estructura regional correspondiente al graben Ventuari – Labarejuri.

En relación al perfil N45°E (figura 6.33) la anomalía mantienen un comportamiento principalmente regional dada la forma de las curvas, aun cuando existe una componente residual ligada a variaciones o picos acentuados en zonas puntuales, los cuales representan el punto de cambio de estructuras pequeñas a regionales. Las anomalías van de 15 a -66 mGal y de 93 a -185 nT.

De izquierda a derecha el material observado es; Cuchivero y Parguaza con profundidades que rondan los 10 km, con vestigios de Roraima de poco espesor (500 m). Luego una alteración en la corteza superior donde el espesor es menor. A continuación se encuentra el punto del graben de Suapure - Mavaca, con material dividido en tres zonas diferentes, donde la mayor profundidad corresponde a una capa de basaltos (hasta un máximo de 14 a 15 km), sobre esta un relleno de roca sin dividir de densidad media – alta (2.6 g/cc) y superficialmente rastros de Roraima y un dique de diabasa. Luego aparece nuevamente la provincia de Cuchivero y por encima capas de poco espesor de material correspondiente a Roraima, se repite la secuencia ahora para el rift Ventuari – Labarejuri, Cuchivero tiene la presencia de la formación Caicara a una profundidad aproximada de 4 km.

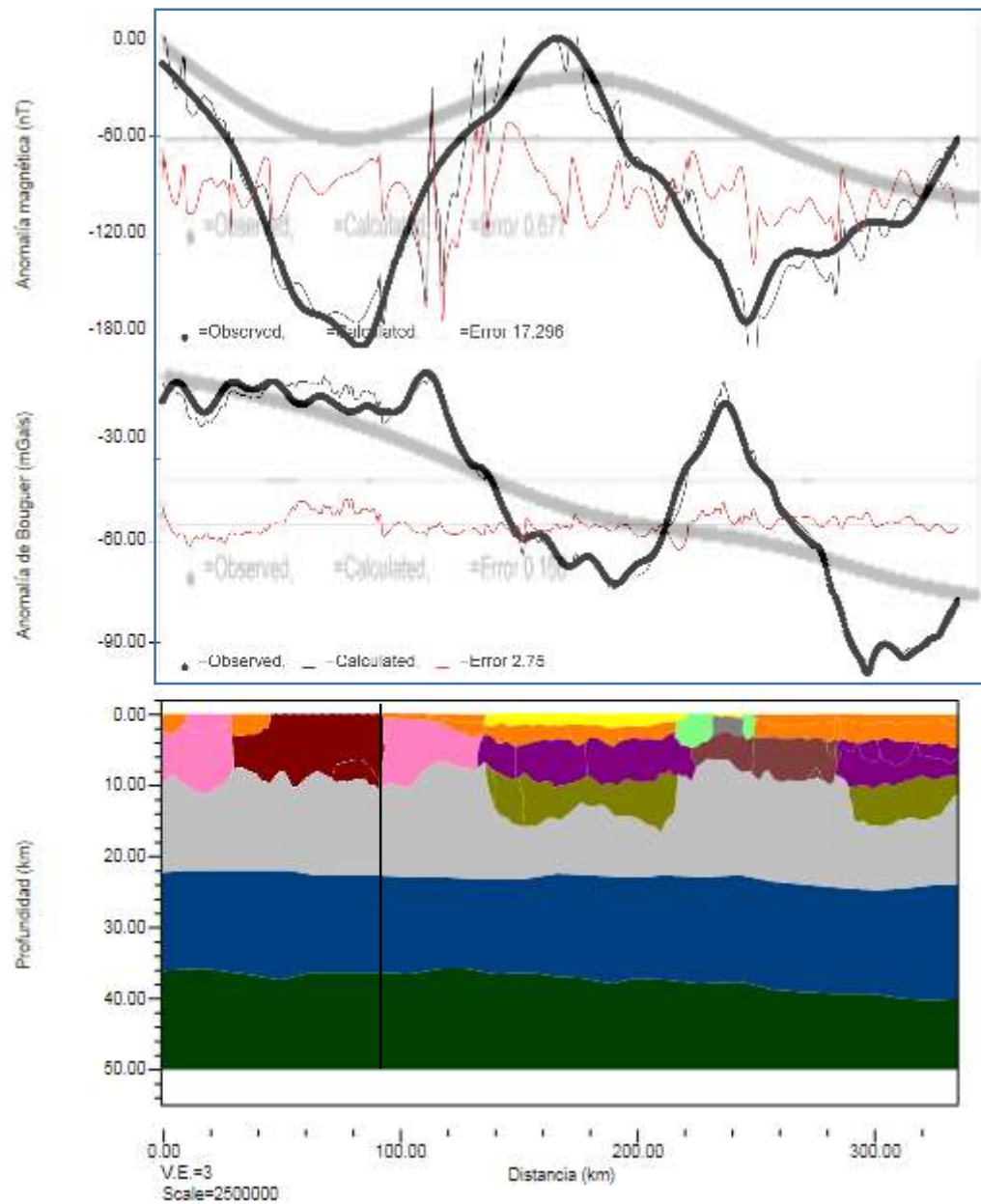


Figura 6. 32 Modelo geológico – estructural, perfil Este Oeste. La línea negra vertical representa el punto de intersección entre los perfiles.

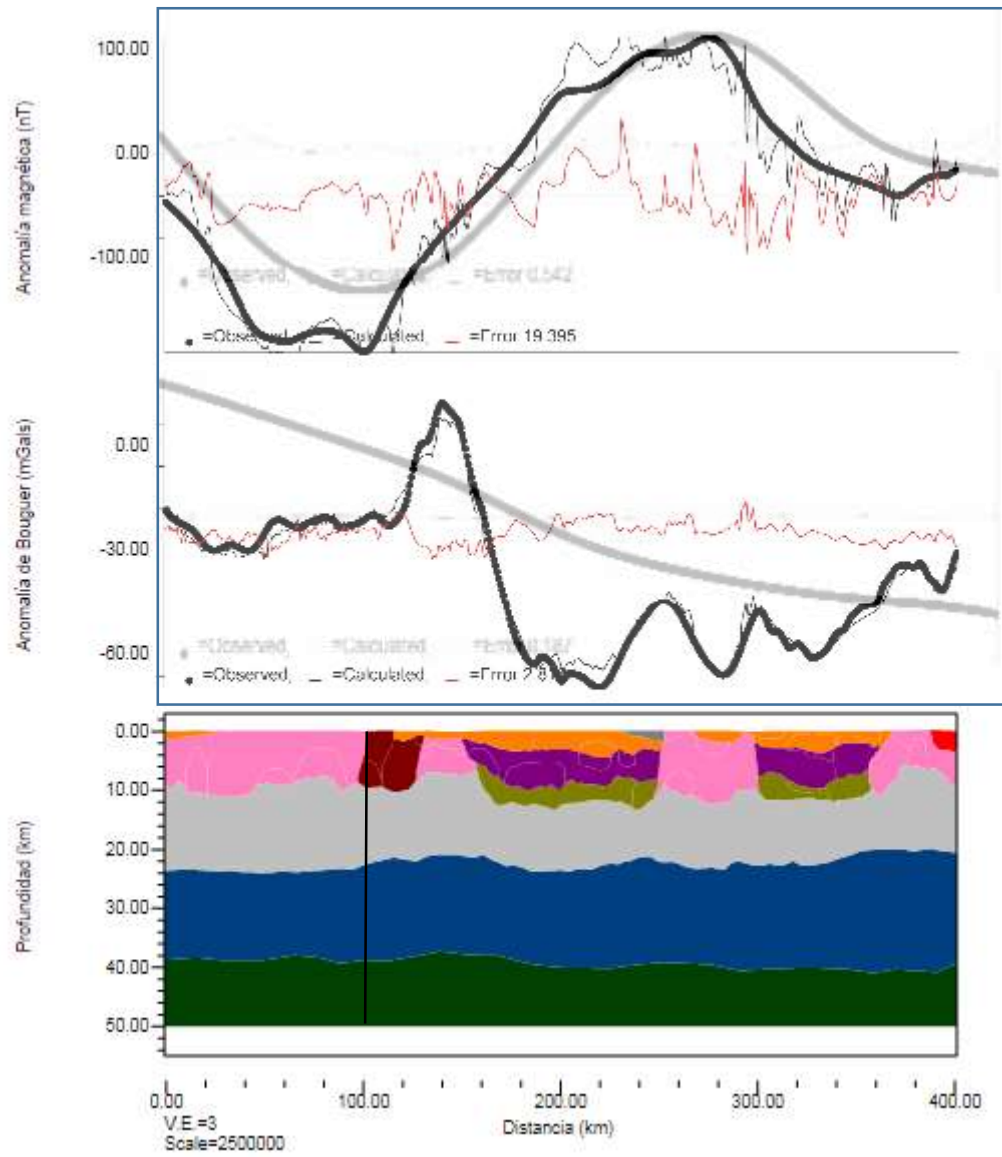


Figura 6. 33 Modelo geológico – estructural, perfil Norte 45° Este. La línea negra vertical representa el punto de intersección entre los perfiles.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Por medio del análisis espectral se encontró que el espesor de la corteza en la zona es en promedio de 38,5 km con múltiples incrementos y decrementos de menor magnitud (de 1 a 2 km). Estas profundidades arrojaron un valor casi idéntico para las diferentes bases de datos empleadas. De forma que se verifica lo dicho por Wendel (2013), Rangel (2014) y Kusnir (2015) en cuando al rango de profundidad asociado para el resto del estado Amazonas. De igual forma se observó la profundidad asociada a las estructuras del basamento, entre los 10 y 12 km.

La anomalía de Bouguer con un rango de valores de 45 a -150 mGal da cuenta de cómo los diferentes contornos se asocian a las estructuras geológicas presentes como lo son un tramo aluvional al noroeste, una zona de plutones y rocas extrusivas al suroeste, la sección central correspondiente a estructuras densas y profundas así como a la respuesta que dan estructuras someras como los tepuyes. Un punto importante es el cambio rápido en los gradientes de la zona por causa del cambio entre unidades. Por otra parte es interesante mencionar como las derivadas direccionales delimitan claramente los grabens asociados a la zona.

A su vez la anomalía magnética cuyo rango se encuentra entre -139 y 102 nT exhibe zonas con alto contenido magnético hacia el norte, contrario a lo observado en la sección sur donde los cerros del grupo Roraima tienen un contenido muy bajo de magnetización remanente.

Con respecto a la deconvolución de Euler el rango de profundidad de estructuras va de 1 a 20 km, con estructuras someras relacionadas al grupo Roraima y diques de diabasa; plutones y granitos entre 5 y 10 km así como los tres grabens característicos de la región cercanos a 15 km.

De la deconvolución de Werner sobre los perfiles se observa el contraste entre Cuchivero y Parguaza a las profundidades estimadas por Euler, de igual forma pasa con los grabens los cuales se ven como puntos dispersos en el centro y este de los perfiles.

En relación a los modelos geológicos – estructurales se obtuvo para el regional una profundidad mínima de 36 km hacia el extremo occidental de la zona de estudio la cual disminuye progresivamente hasta unos 40 km en el extremo oriental. Los modelos totales concuerdan en gran medida con el mapa geológico de la zona lo que establece una relación directa entre el material en superficie y las estructuras en profundidad.

7.2 Consideraciones generales

Posterior al análisis e interpretación de las diferentes anomalías así como el empleo de diferentes procedimientos matemáticos incorporados y el subsiguiente modelo de la región, se puede establecer lo siguiente:

- De las tres bases de datos de gravedad la mejor opción está representada por el modelo GGMplus, no solo por su elevada resolución espacial sino además por la validación asociada a los datos. Aun cuando posee altas frecuencias que en ocasiones dificultan el cálculo de profundidades, esto puede solucionarse mediante un filtrado simple.
- El análisis estadístico permitió conocer la calidad de los datos, que distribución siguen y cuál es la mejor opción al momento de usarlos para el empleo de un estudio geofísico.
- Los espectros de frecuencias constituyen una buena herramienta para el cálculo de profundidades cuando no se tiene información adicional acerca de las estructuras presentes.

- Se observó el peso que tiene sobre la anomalía de aire libre la topografía de una zona y por qué debe realizarse una corrección topografía óptima a fin de eliminar el efecto que esta produce sobre los datos.
- Las anomalías de Bouguer y magnética permitieron observar las principales estructuras presentes en la región y como la densidad, profundidad y magnetismo asociado del material permiten delimitar las características de la región.
- La deconvolución de Euler es una herramienta sumamente útil que por medio del cálculo de los gradientes de anomalías permite desenmascarar información asociada a la profundidad y contactos de las estructuras.
- La deconvolución de Werner constituye un buen delimitador del cambio en profundidad de la cantidad de magnetización asociada un medio rocoso e incluso en la diferenciación de estructuras.
- Los modelos geológicos – estructurales con base en datos satelitales de anomalía permiten realizar una caracterización verosímil con un alto nivel de detalle, basado en la geología del medio.

7.3 Recomendaciones

- Aun cuando los modelos satelitales permiten caracterizar la zona, si se requiere un mayor detalle se recomienda realizar una adquisición local de gravimetría así como la toma de muestras en afloramientos para mejorar el rango de densidades usado para cada grupo observado.
- Como un correcto estimador de la profundidad de Mohorovicic se invita a practicar un estudio integrado de métodos potenciales con sísmica de gran ángulo que permita establecer marcadores en la región.
- Con el fin de usar de forma habitual los modelos de datos satelitales se propone realizar investigaciones en diferentes zonas del país como los andes venezolanos, las principales cuencas petrolíferas y el resto del cratón de Guayana para conocer la respuesta arrojada por los diferentes modelos y compararlo con gravimetría in situ.
- Se sugiere realizar una integración futura de los resultados producto de cada uno de los estudios en el estado Amazonas, a fin de obtener una caracterización completa y sin sectorizar de toda la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrios, F., U. Cordani y K. Kawashita (1985) Caracterización geocronológica del Territorio Federal Amazonas, Venezuela. Memorias del VI Congreso Geológico de Venezuela. Tomo III. P-1435.
- Bellizzia. A, N. Bellizzia y S. Rodríguez (1980). Mapa metalogénico de Venezuela.
- Gamero, A. *et al.* (2014). Caracterización geoquímica de minerales pesados recolectados en la zona nor-occidental del estado bolívar. Instituto Nacional de Geología y Minería. Caracas, Venezuela. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 29.
- Chalbaud, D. (2000). Determinación del espesor cortical del Escudo de Guayana a partir de análisis de información de sísmica de refracción. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar. Departamento de Geofísica. 117 P.
- Dobrin, M.B., and C.H. Savit (1988). Introduction to Geophysical Prospecting (4th ed.), New York, McGraw-Hill, 867 P.
- Erasmo, A. (2002). Análisis geoestadístico y espectral de datos aeromagnéticos de la zona centro-occidental del estado Amazonas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 89 P.
- García, A. (2009). Mapas de anomalías de gravedad y magnetismo de Venezuela generados a partir de datos satelitales. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 199 P.
- González de Juana, C., J.M. Iturralde de Arozena y X. Picard Cadillat (1980). Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas. Tomo I. Caracas. Departamento de Geofísica. 1031 P.
- Hackley, P.C., F. Urbani, A.W. Karlsen y C. P. Garrity (2006) Mapa Geológico de Venezuela. Escala 1:750.000. U.S. Geological Survey.

- Kusnir, E. (2015). Integración gravimétrica y magnética a partir de datos satelitales en la zona central del estado Amazonas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 176 P.
- Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics, 2nd ed. 381 P. Cambridge, New York, Melbourne.
- Lozano, L. (2004). Interpretación de datos aeromagnéticos con fines de prospección minera en la zona circundante al río Antabare, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 116p.
- Maus, S., *et al.* (2009) EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. En: Geochem. Geophys. Geosyst, Vol.10.
- Mendoza, V.S. (2012). Geología de Venezuela. Evolución geológica, recursos minerales el Escudo de Guayana y revisión del precámbrico mundial. Tomo I. Bogotá. 364 P.
- Morgado, L. (2004). Análisis geofísico en la región de Gurí al nordeste del estado Bolívar, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 181 P.
- Nettleton, L. (1971). Elementary Gravity and Magnetism for Geologists and Seismologists, SEG Mono., No. 1, 121 p. (G&M)
- Pérez, M. (2004). Análisis geofísico integrado en la región de Guareto al noreste del estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 126 P.
- Pavlis, N. *et al.* (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), Journal of Geophysical Research, Vol. 117.
- Ramírez, E. (2014). Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos y magnéticos en el perfil Calabozo – Dabajuro. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 109 P.

- Rangel, L. (2014). Integración gravimétrico-magnética, a partir de datos satelitales, en el área de San Carlos de Río Negro – Estado Amazonas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 103 P.
- Alves, R., R. Leão, E. B. Da Silva, L. F. Rezzano. (2015). Mapa geológico simplificado do Brasil. Escala 1:6.000.000. Serviço Geológico do Brasil.
- Sierra, R. (2002). Reprocesamiento y reinterpretación de datos aeromagnéticos del sur de Puerto Ayacucho, estado Amazonas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 122 P.
- Soares, M. (1985). Estudio petrográfico de la estructura alcalina La Churuata, Territorio Federal Amazonas. Memorias del VI Congreso Geológico de Venezuela.
- Tapias, J.G., A. N. Guevara, N.E. Ramírez, M. D. Mejía, M.L. Tejada, J. Sepúlveda, J.A. Osorio, T. Gaona, H. Diederix, H. Uribe y M. Mora. (2007). Mapa Geológico de Colombia.
- Telford, W.M., L.M., Geldart, R.P. y Sheriff (1990). Applied Geophysics. Cambridge University Press. 2nd Ed. 760 P.
- Wendel, J. (2013). Interpretación geológico-geofísica mediante datos gravimétricos y magnéticos satelitales en la zona sur-sureste del estado Amazonas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. 67 P.
- Werner, S. (1953). Interpretation of magnetic anomalies of sheet like bodies. Sveriges Geologist under Ser. C.C, Arabok, 43(6).
- Yanez, P. (1984). Geología y geomorfología del Grupo Roraima en el sureste de Venezuela.
- Zeng, H., *et. al.* (2010). A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China.
- Zohdy, A. *et.al.* (1974). Application of surface geophysics to ground-water investigations. U.S. Geological Survey.

Páginas web consultadas:

<http://www.pdv.com/lexico/p191w.htm>

<http://www.pdvsa.com/lexico/r45w.htm>

<http://www.pdv.com/lexico/i3w.htm>

<http://www.pdv.com/lexico/c1510w.htm>

<http://www.pdvsa.com/lexico/2edic/p27e.htm>

<http://www.pdv.com/lexico/c602w.htm>

<http://www.pdv.com/lexico/s470w.htm>

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/magfield.shtml>

<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>

<http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/GGMplus2013-gravity-model>

<http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>

<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE/>

http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi

APENDICE

A.1 Demostración de la Ley de Gravitación Universal:

$$\text{Si: } a = \frac{v^2}{r} \quad \text{Ec. A.1} \quad ; \quad F = m * a \quad \text{Ec. A.2}$$

$$\text{Entonces: } F = m * \frac{v^2}{r} \quad \text{Ec. A.3}$$

$$\text{A su vez: } v = \frac{2\pi r}{T} \quad \text{Ec. A.4}$$

- Sustituyendo (4) en (3), se tiene:

$$F = m * \frac{4 * \pi^2 * r^2}{r * T^2} = 4 * \pi^2 * m * \frac{r}{T^2} \quad \text{Ec. A.5}$$

- Tomando en cuenta la tercera Ley de Kepler que dice que para cualquier planeta, el cuadrado de su período de órbita es directamente proporcional al cubo de su distancia promedio al Sol.

$$T^2 = C * r^3 \quad \text{Ec. A.6}$$

$$F = 4 * \pi^2 * m * \frac{r}{C * r^3} = \frac{4 * \pi^2}{C} * m * \frac{1}{r^2} = K * \frac{m}{r^2} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$\text{Donde: } K = \frac{4 * \pi^2}{C} \quad \text{Ec. A.8}$$

- La fuerza con la que un cuerpo se mantiene ligado a otro será:

$$F = K * \frac{m}{r^2} \quad \text{Ec. A.9}$$

- Usando la tercera ley de newton o ley de acción y reacción:

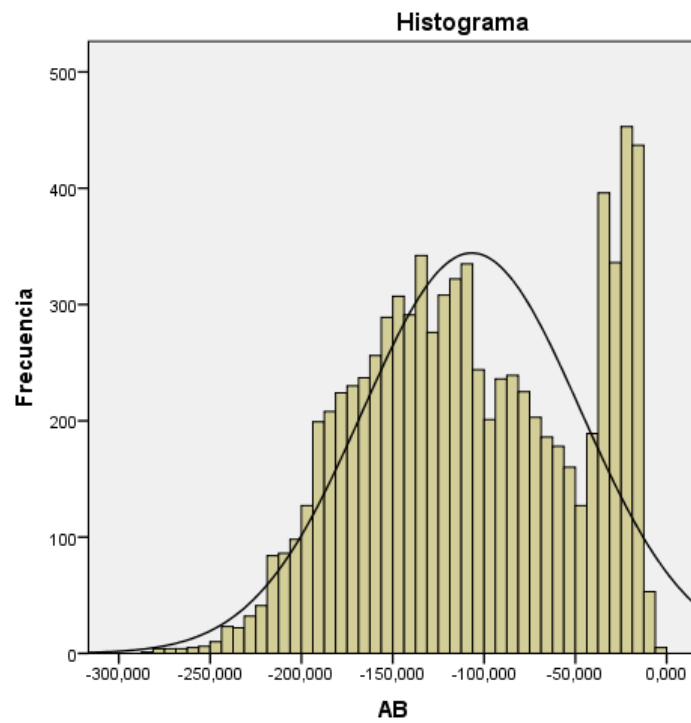
$$k1 * \frac{m1}{r^2} = k2 * \frac{m2}{r^2} \quad \text{Ec. A.10}$$

$$\frac{k1}{m2} = \frac{k2}{m1} = G \quad \text{Ec. A.11}$$

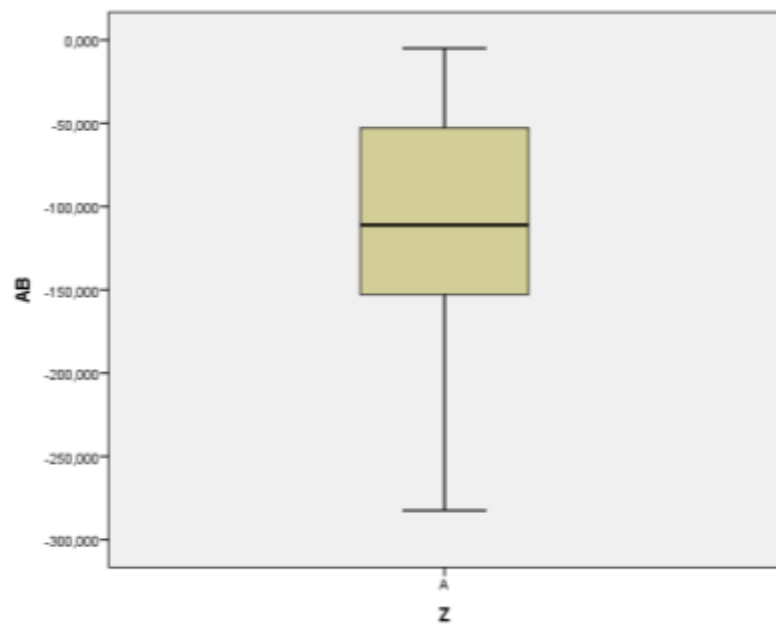
- Definiendo a través de múltiples ensayos usando cuerpos de diferente masa una constante G o constante de gravitación universal, equivalente a: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- Por lo cual se llega a la última ecuación o formula de gravitación universal:

$$F = G * \frac{m1 * m2}{r^2} \quad \text{Ec. A.12}$$

B.1 Estadísticos ABAE

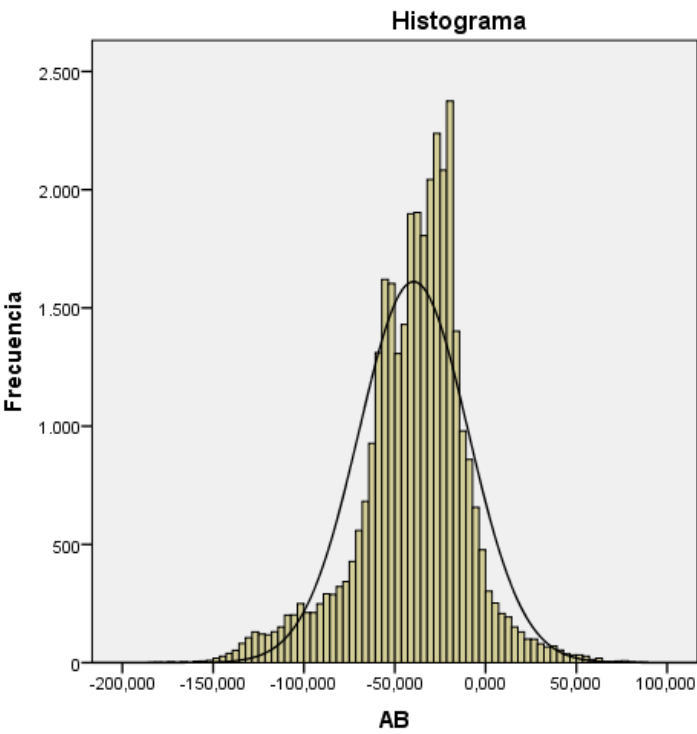


B. 1 Histograma de frecuencias - Base de datos ABAE.

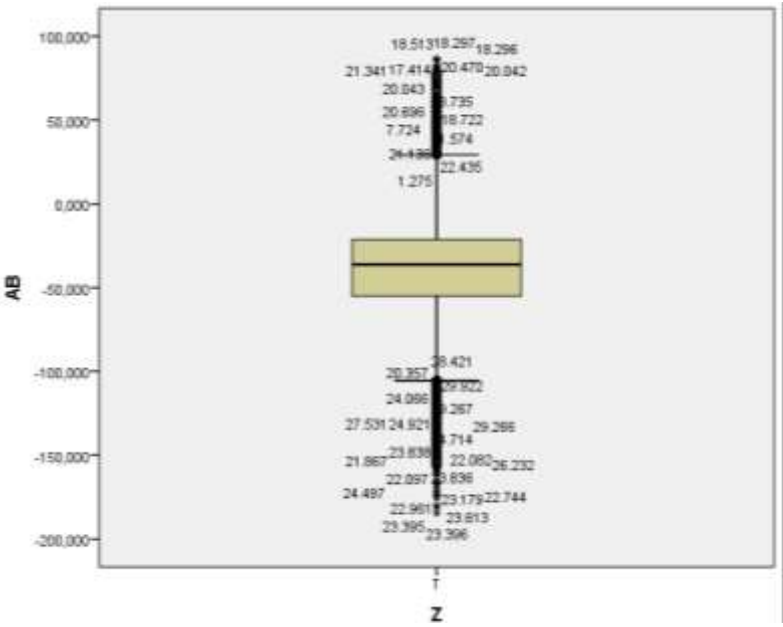


B. 2 Diagrama de caja y bigotes - Base de datos ABAE.

B.2 Estadísticos UCSD

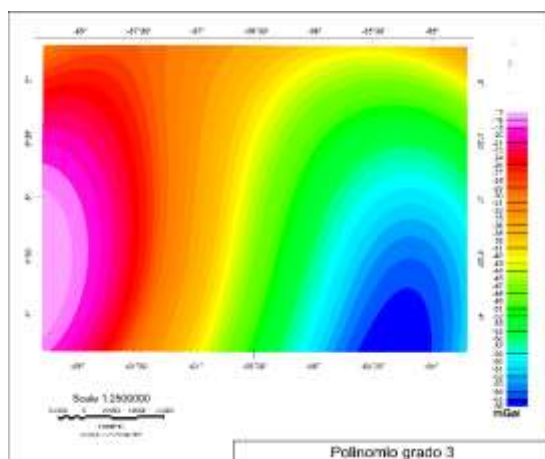
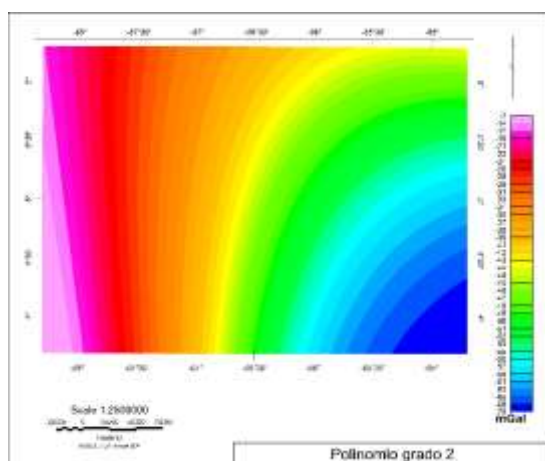
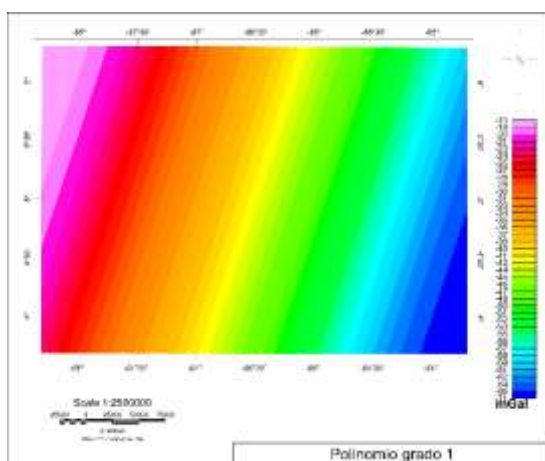


B. 3 Histograma de frecuencias - Base de datos UCSD.



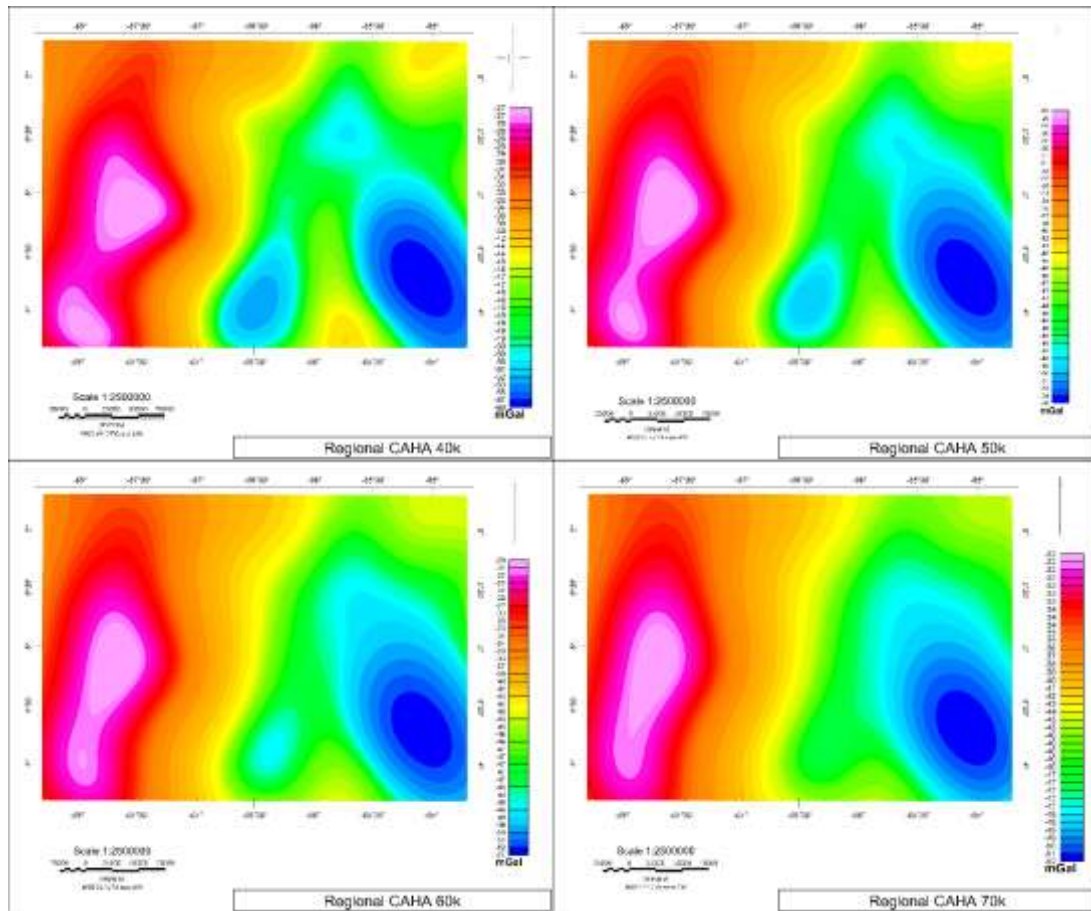
B. 4 Diagrama de caja y bigotes - Base de datos UCSD.

C.1 Mapas de anomalía regional de Bouguer por superficies polinómicas



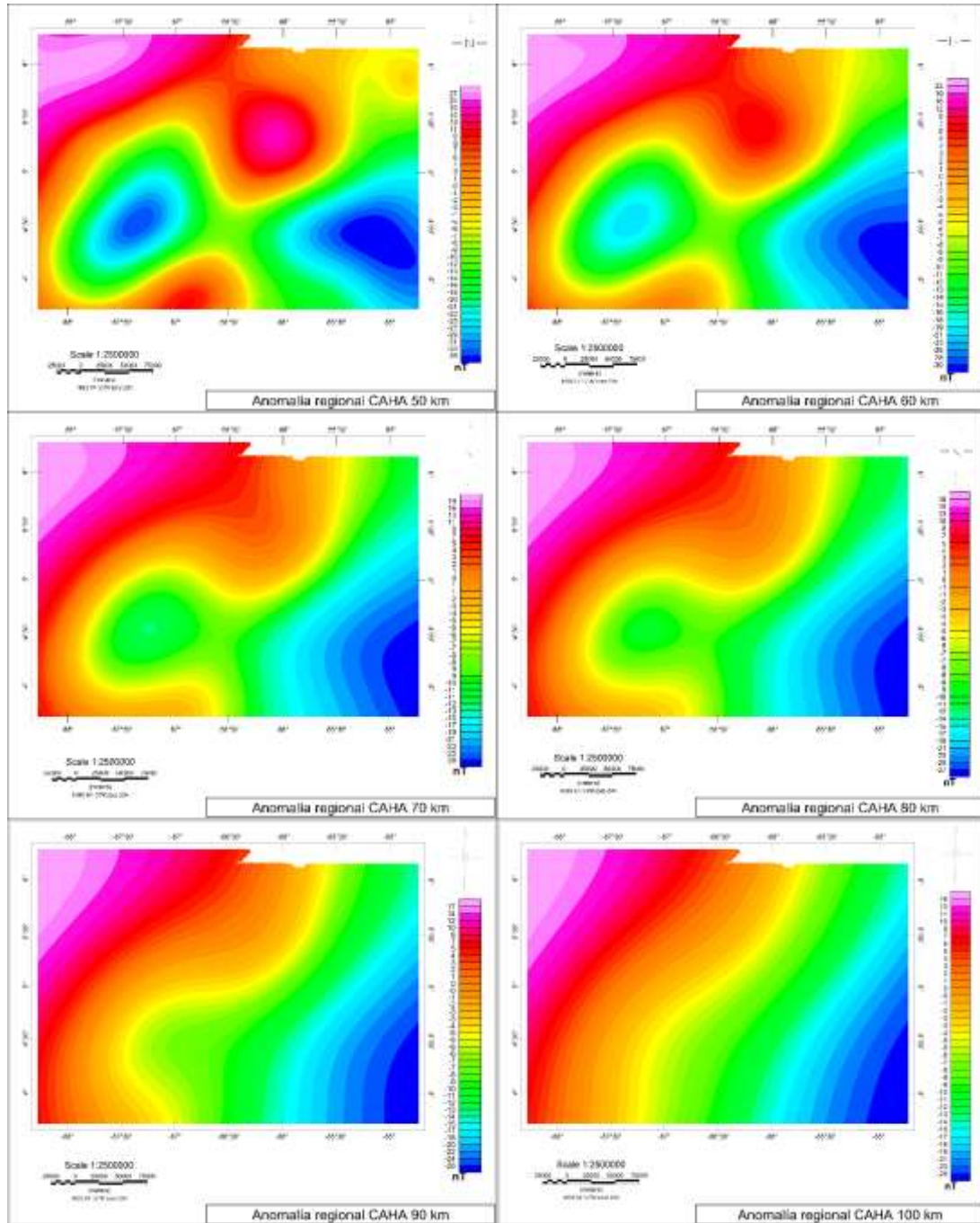
C. 1 Mapas de anomalía regional de Bouguer por superficies polinómicas.

C.2 Mapas de anomalía regional de Bouguer por continuación analítica hacia arriba.



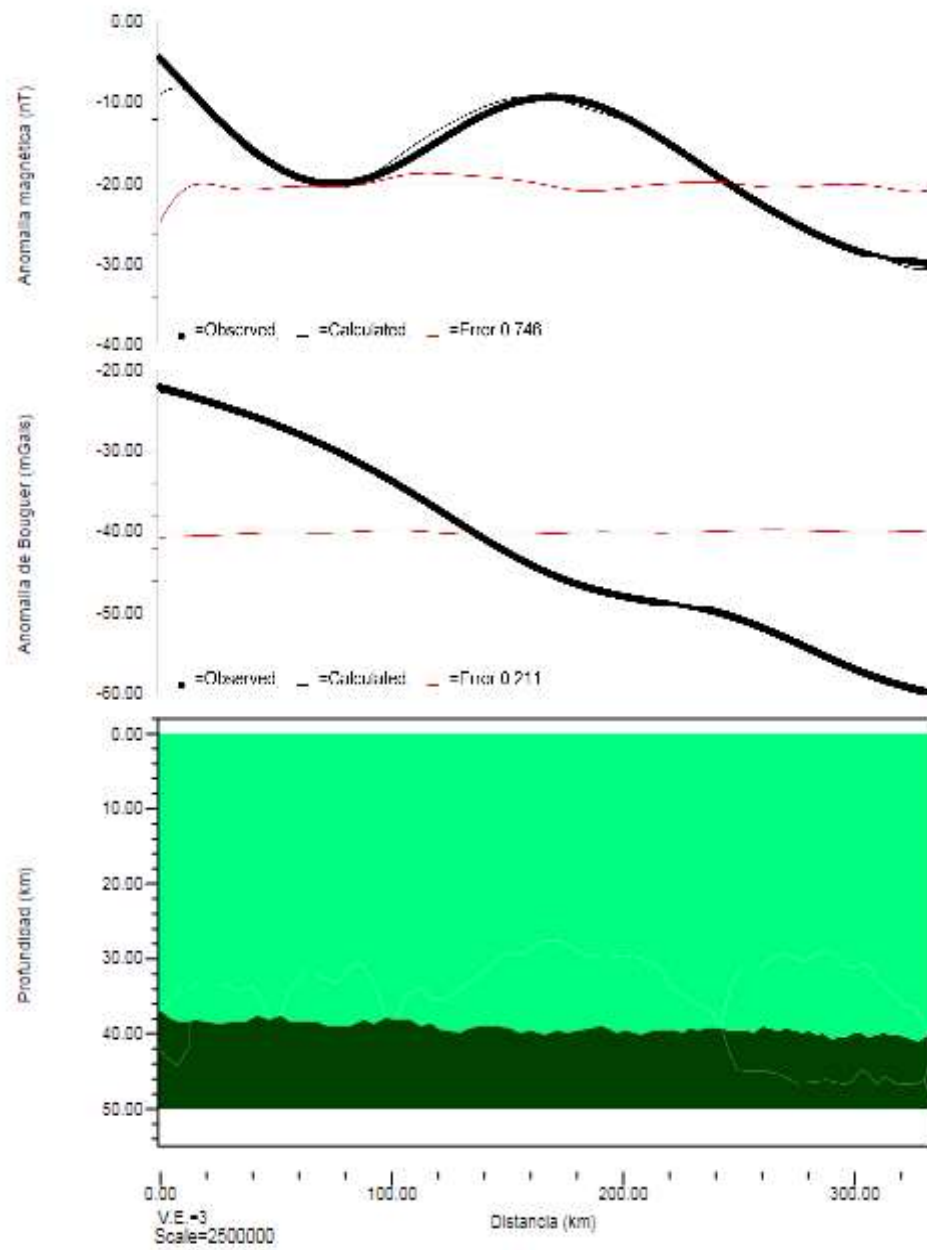
C. 2 Mapas de anomalía regional de Bouguer por continuación analítica hacia arriba. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: regionales a 40, 50, 60 y 70 km.

C.3 Mapas de anomalía regional magnética por continuación analítica hacia arriba.

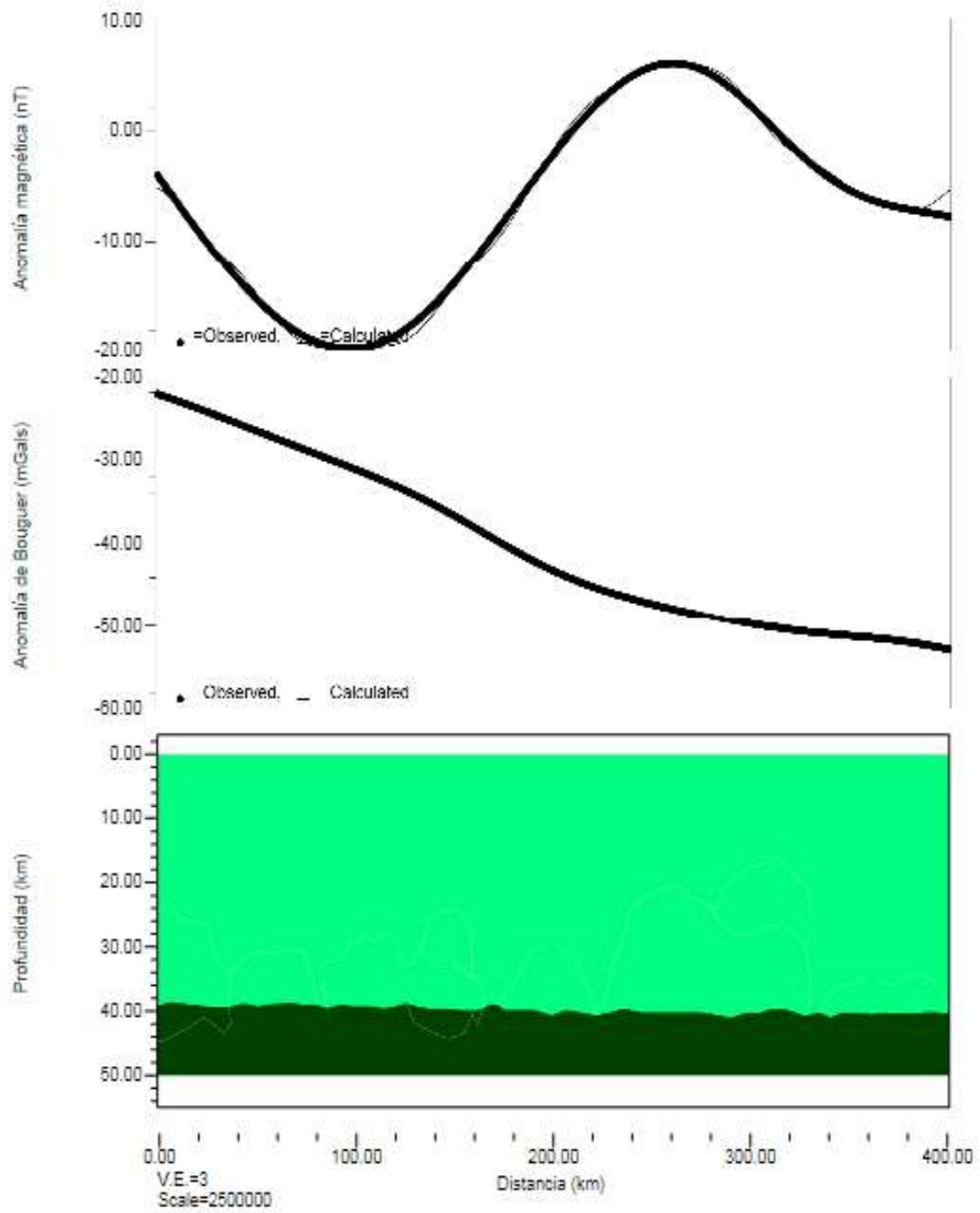


C. 3 Mapas de anomalía regional magnética por continuación analítica hacia arriba. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: regionales a 50, 60, 70, 80, 90 y 100 km.

D.1 Modelos Regionales:



D. 1 Modelo regional, perfil Este Oeste.



D. 2 Modelo regional, perfil Norte 45° Este.