

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN EL ESTADO AMAZONAS.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Manuel V, Pérez V

Para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN EL ESTADO AMAZONAS.

TUTOR ACADÉMICO: Dra. Nuris Orihuela.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Manuel V, Pérez V
Para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

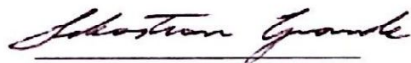
Caracas, 2017

Caracas, junio de 2017

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Manuel Vicente Pérez Vargas, titulado:

**PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS
GRAVIMÉTRICOS EN EL ESTADO AMAZONAS.**

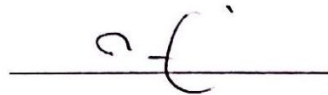
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico y sin que ello signifique se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Sebastián Grande
Jurado



Prof. Mariano Arnaiz
Jurado



Prof. Nuris Orihuela
Tutor académico

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela por facilitar los recursos para formarme académicamente y orgulloso de formar parte de la casa que vence la sombra.

A mi tutora, Nuris Orihuela, por ayudarme y permitirme aprender de ella al realizar este trabajo.

A mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi princesa, por ser parte muy importante de mi vida, por haberme apoyado en las buenas y en las malas, y sobre todo su paciencia y apoyo incondicional.

A mis compañeras, María y Alejandra quienes siempre estuvieron presentes y mil gracias por todos los momentos que hemos pasado juntos.

Pérez V., Manuel V.

PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN EL ESTADO AMAZONAS

Tutor académico: Dra. Nuris Orihuela

UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2017

Palabras claves: *Anomalía de Bouguer, análisis espectral, estado Amazonas, granitos tipo rapakivi.*

RESUMEN

En el presente Trabajo Especial de Grado se realizó un estudio gravimétrico basado en el procesamiento e interpretación de datos adquiridos en el estado Amazonas, como parte de la campaña entre en IGVS (Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar) y la UCV (Universidad Central de Venezuela) para crear una red de estaciones de referencia con una distribución espacialmente homogénea y homologada internacionalmente a lo largo del territorio nacional. Dentro de Venezuela el estado con menor cobertura de estaciones gravimétricas es Amazonas, por lo que en este trabajo se procesaron 231 estaciones gravimétricas divididas en 215 estaciones de ordinarias y 16 estaciones bases levantadas en los cauces de los ríos Orinoco y Ventuari; así mismo en la zona sur se recuperaron estaciones de campañas de medición del año 1991, todas referidas a la gravedad absoluta de la estación Puerto Ayacucho (medida en el 2016). Con la integración de estos datos se realizaron mapas de anomalía de Bouguer (AB), gravedad observada y componentes residual y regional de la AB, que permitieron correlacionar el dato geofísico con la geología de la zona de estudio. Los resultados obtenidos muestran un rango de valores para el mapa de anomalía de Bouguer, entre 129.24 mGal a -63.1 mGal asociado a rasgos geológicos como contactos entre unidades y adelgazamiento cortical típica de las zonas donde se encuentran los granitos tipo rapakivi. Por su parte el análisis espectral, permitió estimar la profundidad de Moho a 41.85 km y dos interfases intracortical a 31.39 km y 16.24 km.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
CAPÍTULO I.....	8
INTRODUCCIÓN	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo general	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 Justificación	10
1.4 Ubicación de la zona de estudio	10
CAPÍTULO II	12
MARCO GEOLÓGICO	12
Provincia Pastora	12
Provincia Cuchivero	13
Provincia Roraima	16
Dominio del estado Amazonas	16
Subprovincia petrotectónica de Ayacucho.....	18
Subprovincia petrotectónica de Manapiare.....	19
Subprovincia petrotectónica de Alto Orinoco	20
Subprovincia petrotectónica de Siapa	20
Subprovincia petrotectónica de Casiquiare Norte y Sur	21
CAPÍTULO III.....	22
MARCO TEÓRICO	22
3.1 Teoría Básica	22
3.2 Correcciones gravimétricas.....	24
3.2.1 Corrección por deriva instrumental	24
3.2.2 Corrección por marea.....	25
3.2.3 Corrección Atmosférica	25
3.2.4 Corrección de aire libre	25

3.2.5 Corrección de Bouguer	26
3.2.6 Corrección topográfica	26
3.3 Anomalías de Bouguer.....	26
3.4 Separación Regional-Residual.....	27
3.5 Análisis Espectral	27
CAPÍTULO IV.....	29
MARCO METODOLÓGICO	29
4.1 Recopilar información de estaciones levantadas en el estado Amazonas.....	30
4.2 Depurar e integración de los datos	30
4.3 Calculo de gravedad observada	30
4.4 Calculo de anomalía de Bouguer.....	31
4.5 Validación estadística de los datos	33
4.5 Elaborar mapas	33
CAPÍTULO V	35
RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
5.1 Estadística descriptiva.....	35
5.1.1 Gravedad observada.....	35
5.1.2 Anomalía de Bouguer	37
5.2 Análisis de mapas	40
5.2.1 Gravedad observada.....	40
5.2.2 Anomalía de Bouguer	43
5.2.3 Componente regional del mapa de anomalía de Bouguer	48
5.2.4 Componente residual del mapa de anomalía de Bouguer.....	49
5.2 Análisis espectral	52
CAPÍTULO VI.....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÉNDICE A: Base de datos de estaciones en el estado Amazonas	59
APÉNDICE B: Mapa geológico-estructural con respuesta de la AB.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
FIGURA 2. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO. (MODIFICADO DE HACKLEY <i>ET AL</i> , 2006).....	15
FIGURA 3. MAPA GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO DEL ESTADO AMAZONAS, DIVIDIDOS EN SUBPROVINCIAS (TOMADO DE MENDOZA, 2012)	19
FIGURA 4. RELACIÓN ENTRE EL GEOIDE, ELIPSOIDE Y TOPOGRAFÍA. (OLAYA, 2014)....	23
FIGURA 5. FUENTES DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA. (MODIFICADO DE SPECTOR Y GRANT, 1970).....	28
FIGURA 6. FLUJO DE TRABAJO.....	29
FIGURA 7. CURVAS DE MAREA TERRESTRE, GENERADAS POR EL PROGRAMA MT80TW; ROJO: MAREA CALCULADA, AZUL: MAREA REPORTADA POR EL GRAVÍMETRO SCINTREX CG-5. (TOMADO DE AROCHA, 2016)	31
FIGURA 8. VENTANA EXTRAÍDA DE N.O.A.A.	32
FIGURA 9. APLICACIÓN DEL FILTRO GAUSIANO CON LONGITUD DE ONDA 0,0101506, VALOR OBTENIDO DEL PROCESAMIENTO DEL AVERAGE SPECTRUM.	34
FIGURA 10. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE LA GRAVEDAD OBSERVADA.....	36
FIGURA 11. DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES DE LA GRAVEDAD OBSERVADA.	37
FIGURA 12. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER.	39
FIGURA 13. DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER.....	39
FIGURA 14. MAPA TOPOGRÁFICO. ETOPO 1 (NOAA).....	40
FIGURA 15. MAPA GEOLÓGICO CON ESTACIONES. (MODIFICADO DE HACKLEY <i>ET AL</i> , 2006).....	41
FIGURA 16. MAPA DE GRAVEDAD OBSERVADA.....	42
FIGURA 17. MAPA DE ANOMALÍA DE BOUGUER.....	44
FIGURA 18. MAPA DE ANOMALÍA DE BOUGUER VENEZUELA CALCULADO A PARTIR DEL EGM2008 LINARES <i>ET AL</i> (2015)	47
FIGURA 19. MAPA DE ANOMALÍA DE BOUGUER REGIONAL	49
FIGURA 20. MAPA DE ANOMALÍA DE BOUGUER RESIDUAL.....	51
FIGURA 21. ESPECTRO DE POTENCIA DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER	53
FIGURA 22. MAPA GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL CON RESPUESTA GRAVIMETRICA	68

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA GRAVEDAD OBSERVADA	36
TABLA 2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER	38
TABLA 3. PROFUNDIDAD DE LOS EVENTOS DE ACUERDO AL ESPECTRO DE POTENCIA DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER.....	53

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El método gravimétrico es una técnica que permite observar las anomalías en la Tierra, en este caso la anomalía de Bouguer, la cual se produce por cambios de densidad entre diferentes materiales proporcionando información sobre el subsuelo, como por ejemplo la distribución de las estructuras geológicas; lo que permite una caracterización geológico-estructural de una región (Mariita, 2007). La gravimetría en Venezuela inicia en el año 1925, promovida por la industria petrolera trasnacional con estudios prospectivos para la detección de yacimientos de hidrocarburos (Orihuela, 2014). Por esta razón, las mediciones de gravedad originalmente solo se limitaron a estudiar las principales zonas que pudiesen tener hidrocarburos, en este caso las cuencas sedimentarias, quedando excluido de este tipo de estudios los estados localizados al sur de Venezuela, entre ellos el estado Amazonas.

El estado Amazonas cuenta con una extensión de 183.500 km² representando un 19,38% del territorio nacional (INE, s/f), sus zonas selváticas y boscosas hacen que el acceso sea difícil y, junto con su gran extensión territorial son factores que limitan la construcción de una red gravimétrica espacialmente distribuida a través del mismo. Esto se considera una desventaja para el país y una limitación para las demás áreas que estudia la gravimetría (prospección minera, investigaciones geológicas o para definir modelos geoidales), ya que esta región está considerado por tener grandes reservas minerales, siendo económicamente estratégico para el país y atractivo para la industria.

Por esta razón, la investigación de este Trabajo Especial de Grado realizada en alianza con el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) y la

Universidad Central de Venezuela (UCV), para la adquisición y recuperación de datos gravimétricos en el estado Amazonas, específicamente en los cauces de los ríos Orinoco y Ventuari; tiene como la finalidad crear una red de datos normalizados y homologados de alcance nacional que permita aportar elementos para el análisis sobre el origen y evolución geológica en este estado, a través del procesamiento e interpretación de datos obtenidos en estos ríos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Interpretar los datos gravimétricos del estado Amazonas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las gravedades observadas y los amarres correspondientes.
- Caracterizar estadísticamente el dato gravimétrico.
- Construir una red de datos gravimétricos del estado Amazonas.
- Calcular la Anomalía de Bouguer
- Elaborar los mapas de anomalía de Bouguer, residual y regional de la zona de estudio.
- Estimar profundidades de las principales estructuras geológicas mediante el análisis espectral.
- Correlacionar mapas de anomalía de Bouguer con la geología de la zona de estudio.

1.3 Justificación

Este trabajo de investigación es un aporte a la gravimetría, ya que permite establecer las referencias gravimétricas para nuevos proyectos relacionados con la búsqueda de yacimientos mineros y aporta elementos para el análisis de la geología del Escudo de Guayana. El fortalecimiento de la industria minera en Amazonas puede incidir en la mejora de la calidad de vida de sus habitantes y en la economía a nivel nacional. Adicionalmente, estas estaciones gravimétricas permiten mejorar las condiciones para la generación de modelos geoidales.

1.4 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se muestra en la figura 1, la cual comprende específicamente los cauces de los ríos Orinoco y Ventuari, además de estaciones recuperadas de campañas anteriores ubicadas al sur del estado. Por lo cual se propone integrar 16 estaciones bases y 215 estaciones ordinarias (ver en Apéndice A) que permitan crear una red gravimétrica normalizada.

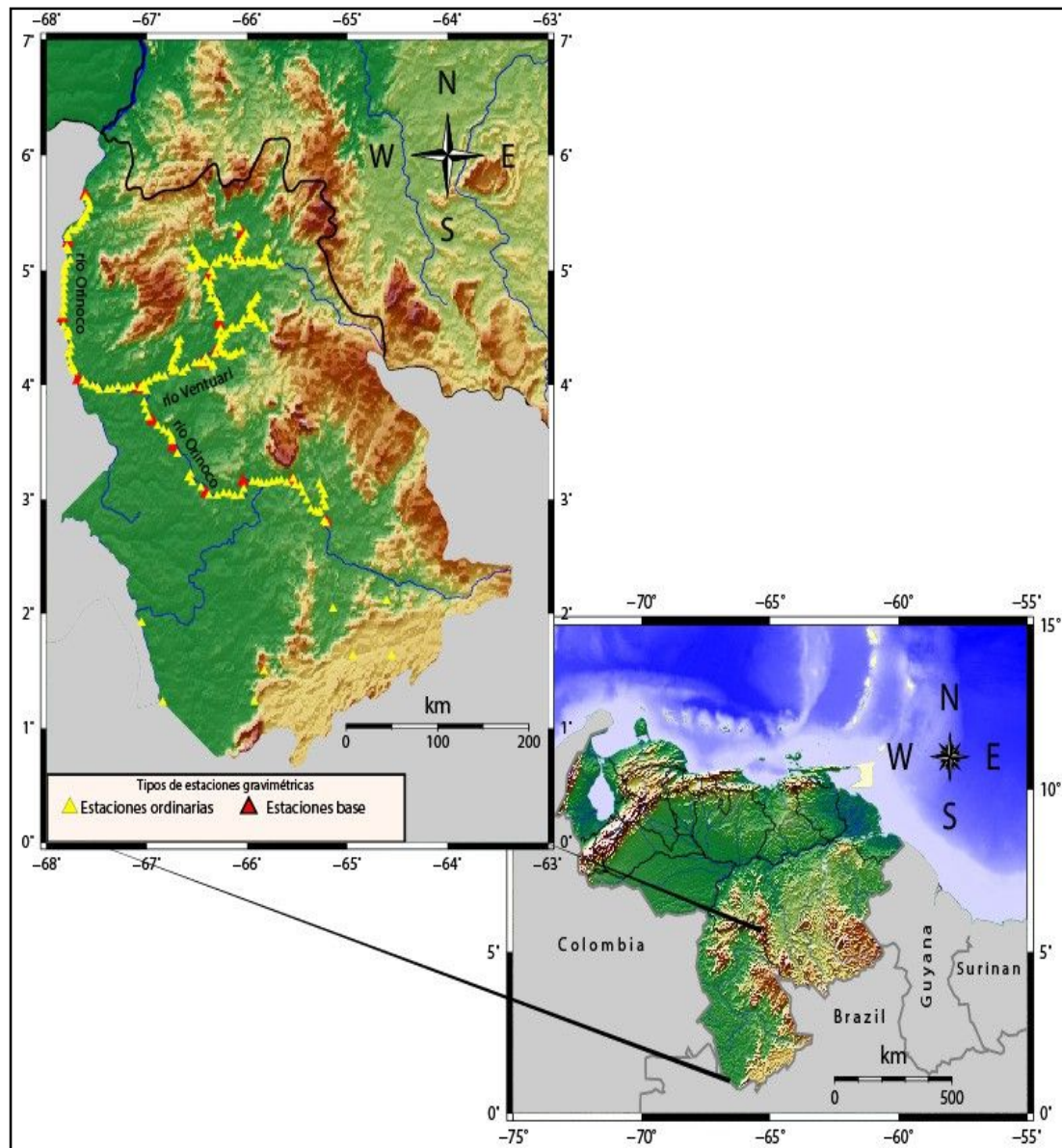


Figura 1. Ubicación del área de estudio

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

Geológicamente, el estado Amazonas forma parte del Escudo de Guayana, su región septentrional se encuentra al sur del río Orinoco en Venezuela, mientras que la región meridional se adentra en Colombia y Brasil (Martínez y Belisario, 2009). De acuerdo a González de Juana *et al.*, (1980), con base a las propiedades petrológicas y tectónicas dividió el Escudo de Guayana en cuatro provincias, conocidas como: Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima. De estas provincias en el estado Amazonas se pueden encontrar aflorando: Pastora, Cuchivero y Roraima. En la figura 2, se observa el mapa geológico de la zona de estudio.

Provincia Pastora

De acuerdo con Mendoza (2012) esta provincia se extiende desde la falla Gurí, al norte, hasta las proximidades del parque nacional Canaima, al sur. Al este por los límites con el Esequibo y al oeste por el río Caura. De edad Proterozoico, litológicamente formada por rocas volcánicas félsicas y máficas además de rocas metasedimentarias de bajo grado (fácies de anfíbolita) de acuerdo con Barrios *et al.*, (1985). Mientras que Mendoza (2012) establece que se encuentra constituida por esquistos verdes y Cinturones de Rocas Verdes. Esta provincia está integrada por las formaciones: El Callao, Cicapra y Yuruarí. Según indica Barrios *et al.*, (1985), las formaciones El Callao y Cicapra está formada por anfíbolitas con esporádicas rocas graníticas, mientras que la formación Yuruarí, está integrada por rocas metasedimentaria de grano grueso. A pesar que esta provincia se encuentra principalmente en el estado Bolívar, se han observados Cinturones de Rocas Verdes dispersos dentro del estado Amazonas.

Provincia Cuchivero

Establece Mendoza (2012) que durante el Paleoproterozoico Tardío a Mesoproterozoico rocas intrusivas volcánicas félsicas calcoalcalinas, pertenecientes a un arco magmático, y rocas sedimentarias, intrusionaron y se depositaron respectivamente sobre un basamento de Cinturón de Rocas Verdes-granitos sódicos asociados, en las partes sur, centro y occidente del Escudo. Esta provincia abarca la región centro norte, litológicamente formada por grandes extensiones de roca plútonica, roca metasedimentaria y metavolcánica, así como intrusiones plutónicas diques de aplita y vetas de pegmatitas. El denominado Complejo Cuchivero está formado por los granitos de Guaniamito, Santa Rosalía y las Volcanicas de Caicara (Mendoza, 2012; Barrios *et al*, 2014). A continuación, se presentan las principales características de las formaciones que componen a esta provincia de acuerdo con Mendoza (2012):

- **Volcanicas de Caicara:** está constituida por roca metavolcánica, predominando las ácidas, como por ejemplo las rocas riolitas. En Amazonas, en la zona inferior de la cuenca Ventuari aflora partes de las volcánicas de Caicara en el Miembro Carúm. Las rocas volcánicas de Caicara están en contacto de falla e intrusivo en rocas comagmáticas de los granitos de San Pedro y Santa Rosalía en la zona del río Suapure y con el Granito de Guaniamito en el Caño de Guaniamito
- **Granitos de Guaniamito:** aflora al oeste del río Cuchivero, formada por rocas ácidas intrusivas de composición granítica y ricas en componentes félsicos.
- **Granito de Santa Rosalía:** roca granítica expuesta al este y oeste del río Cuchivero, así como en áreas cercanas a San Fernando de Atabapo, presenta contacto intrusivo o de falla con las rocas volcánicas de la formación Caicara.

- **Granito de San Pedro:** representa una facies transicional de grano fino del Granito de Santa Rosalía y rocas volcánicas. Aflora cerca del paso San Pedro del río Suapure.
- **Matabasita:** roca metamórfica de carácter máfico que afloran en la región del alto Suapure.
- **Grupo Suapure:** rocas ígneas ácidas que afloran desde Los Pijiguaos hasta el río Ventuari. Incluye dos tipos de granitos conocidos como Granito de Pijiguaos y Granito rapakivi de Parguaza. Se pueden encontrar desde Los Pijiguaos hasta Puerto Páez, sentido este-oeste, y desde Los Pijiguaos hasta el río Ventuari en sentido norte sur.

La Provincia Cuchivero parece extenderse hacia el SE desde los Ríos Cuchivero-Ventuari hacia el Río Tapajós, en Brasil. Formado parte de las rocas del Proterozoico sin diferenciar, (Sidder y Mendoza, 1995, en Mendoza, 2012).

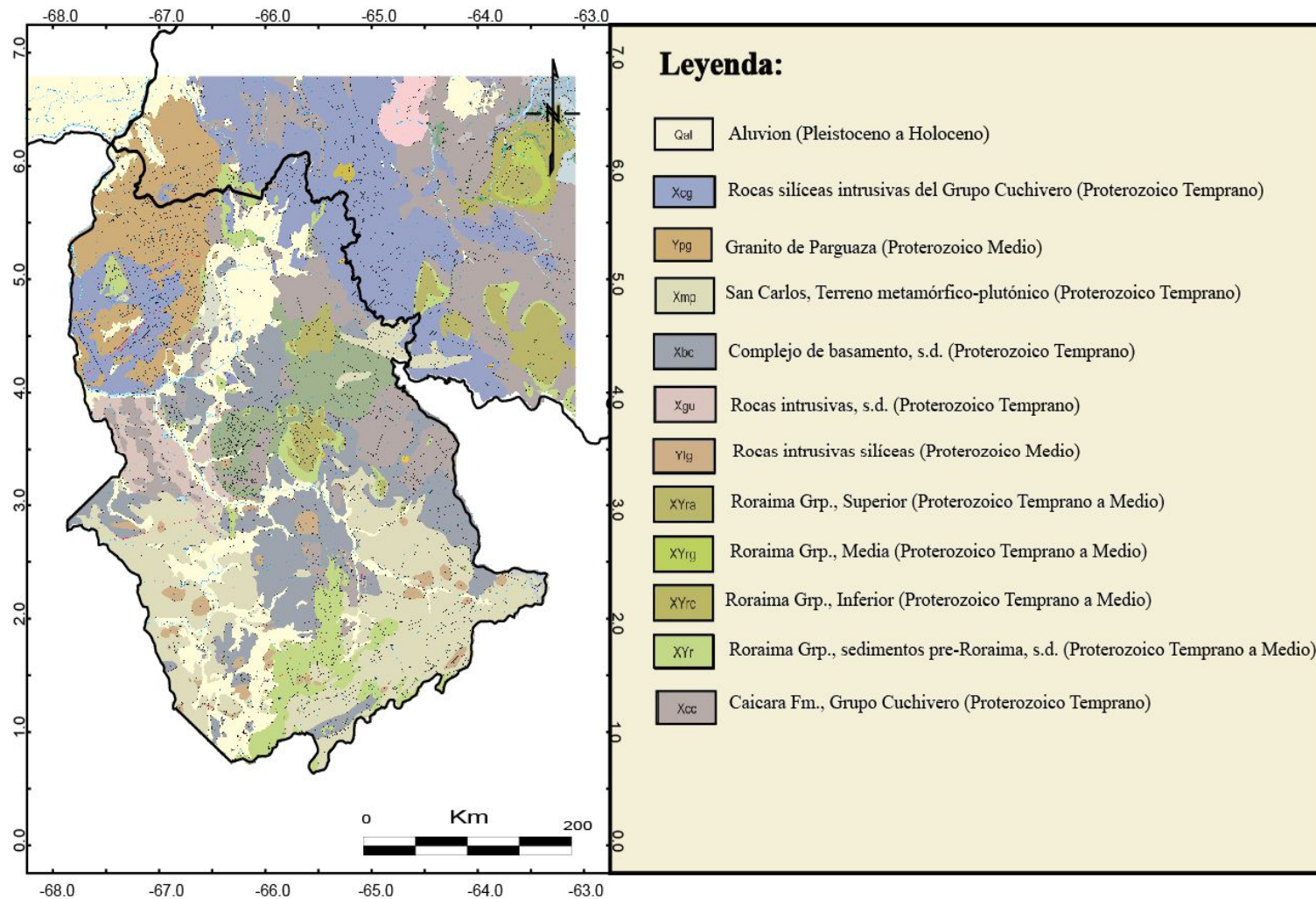


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio. (Modificado de Hackley *et al*, 2006)

Provincia Roraima

Abarca la parte central del estado Bolívar hasta Santa Elena de Uairén en dirección norte-sur y desde el río Venamo hasta las proximidades del río Paragua en dirección este-oeste. También se puede encontrar con remanentes en diversas zonas del Estado Amazonas. De acuerdo con Mendoza (2012), las rocas que dieron origen a esta provincia fueron depositadas en ambientes mayormente fluviales, deltaicos, a localmente marinos costeros, lacustrinos, en canales de ríos de baja sinuosidad y llanuras aluviales, distributarios deltaicos encima de largos interdelticos, lagunares costaneros a bahías interdelticos, playas sin barras y llanuras intramareas. Además, establece que, esta provincia carece tectonismo marcado, con alguna falla de arrastre o fallamiento como en el tepuy de Parú en el estado Amazonas.

Esta provincia se encuentra representada básicamente por areniscas, cuarcitas, roca arcillosa y conglomerática, aunque se han encontrado evidencias mineralógicas y texturales de efectos metamórficos. Los efectos metamórficos no son regionales y solo muestra metamorfismo de contacto en contacto con granitos intrusivos. Dentro de esta provincia se encuentran también diabasas intrusivas e interestratificaciones de tobas riolíticas silicificadas (pseudojaspes), (Mendoza, 2012; Soares, 1985).

Dentro de esta provincia se encuentra el Grupo Roraima y el Grupo pre-Roraima, el cual fue dividido en dos de acuerdo a Mendoza (2012), el primero oxidante y el segundo más reductor. En estos grupos se encuentran las Formaciones Moriche (rica en conglomerados), Cinaruco y Esperalda (compuesta por cuarzo-clorítico con epidoto semejante a la Formación Cinaruco)

Dominio del estado Amazonas

De acuerdo con Mendoza (2012) en el estado Amazonas afloran en orden de mayor a menor tectonodeformación y metamorfismo, los siguientes conjuntos de rocas:

1. Gneises y Migmatitas tipo Minicia, Macabana y Maroa
2. Metasedimentos de medio grado metamórfico del Siapa

3. Roca granítica
4. Metasedimentos pre-Roraima tipo formaciones Unturán, La Esmeralda
5. Granitos anorogénicos, postectónicos tipo Atabapo, Inirida, San Carlos, Cucuy, Parima
6. Complejos alcalinos y relacionados tales como La Churuata
7. Sedimentos grupo pre-Roraima y Roraima

Asimismo, establece que las edades en general de las rocas que afloran a través del estado Amazonas disminuyen de edades en dirección NE hacia el SSO y, por el contrario, el metamorfismo aumenta en esa dirección. Además, todas estas rocas son agrupadas como Rocas Proterozoicas sin dividir o diferenciar por CVG Tecmin CA-USGS de acuerdo con Mendoza, 2012; pero Barrios *et al* (1985) las separa en dos dominios: el Dominio Ventuari que se extiende por la cuenca del río Ventuari, al norte y al este del río Orinoco en el estado Amazonas y comprende roca volcánica y plutónica similares a la Asociación Cuchivero, Granito Rapakivi de Parguaza, roca sedimentarias del Grupo Roraima. Y el Dominio Casiquiare, que se localiza al sur del río Orinoco entre San Fernando de Atabapo y Santa Bárbara y está formado por gneis graníticos, migmatitas y escasos afloramientos de sedimentos pre-Roraima.

La zona donde el río Orinoco cambia de curso NW (Santa Bárbara-Alto Orinoco) a NS (San Fernando de Atabapo- Puerto Ayacucho) pasando por la dirección EW (entre San Fernando de Atabapo y Santa Bárbara) representa un frente tectónico o zona de sutura donde se enfrentan rocas anorogénicas del Granito de Parguaza, al norte de Atabapo con migmatitas granítico-tonalíticas tipo Complejo de Supamo (Mendoza, 2012). De acuerdo con Mendoza (1977), nombra que en esta zona como Frente Tectónico o Sutura Atabapo, que podría representar una triple surtura entre Ventuari-Tapajos, al NE, Maroni-Itacaiunas, al SE y Río Negro-Jureana al SO, donde un *hot spot* motorizó un rift continental y emplazando magmas basálticos que se mezclaron con material costral para producir los granitos anarogénicos de Parguaza.

La evolución de una zona de subducción de dirección NE 1.9 Ga a 1.45 Ga y el cambio de un régimen tectónico de compresión horizontal a un régimen tectónico de tensión vertical al final de los eventos de subducción (en la Orogénesis Nickeriana) puede explicar la complejidad geológica de la zona y la razón por la cual aun no se hayan diferenciado mas apropiadamente, además de la carencia de estudios de detalle en campo, de geoquímica y geocronología (Mendoza 2012).

Debido a la complejidad anteriormente mencionada, es conveniente reagrupar las rocas aflorantes en el estado Amazonas, por ello, Mendoza (2012) establece cinco subprovincias o dominios petrotectónicos, que se denominaron de la siguiente manera: Ayacucho, Manapiare, Alto Orinoco, Siapa y Casiquiare (figura 3), describiéndolos de la siguiente forma:

Subprovincia petrotectónica de Ayacucho: la cual incluye granitos anorogénicos tipo Granito rapakivi de Parguaza “intrusivos en un basamento formado por rocas volcánicas tipo Volcánicas de Caicara y granitos biotíticos tipo Santa Rosalía” Mendoza (2012). Del mismo modo de acuerdo con Mendoza (2012), esta provincia sufrió reactivaciones tectono-termales durante la Orogénesis Nickeriana, con milonitización y reajustes de fallas y cruces de fallas, emplazamientos de pegmatitas heterogéneas mineralizadas con estaño, columbita-tantalita y otros recursos minerales, de complejos alcalinos, aplitas y granitos especializados ricos en estaño. Los granitos intrusivos son epizonales, mientras que los de Cuchivero son mesozonales y las volcánicas son explosivas riolíticas. Geomorfológicamente, presenta planaltos, que por lixiviación tropical lluviosa dieron origen a gigantescos depósitos de lateritas alumínicas o lateritas bauxíticas.

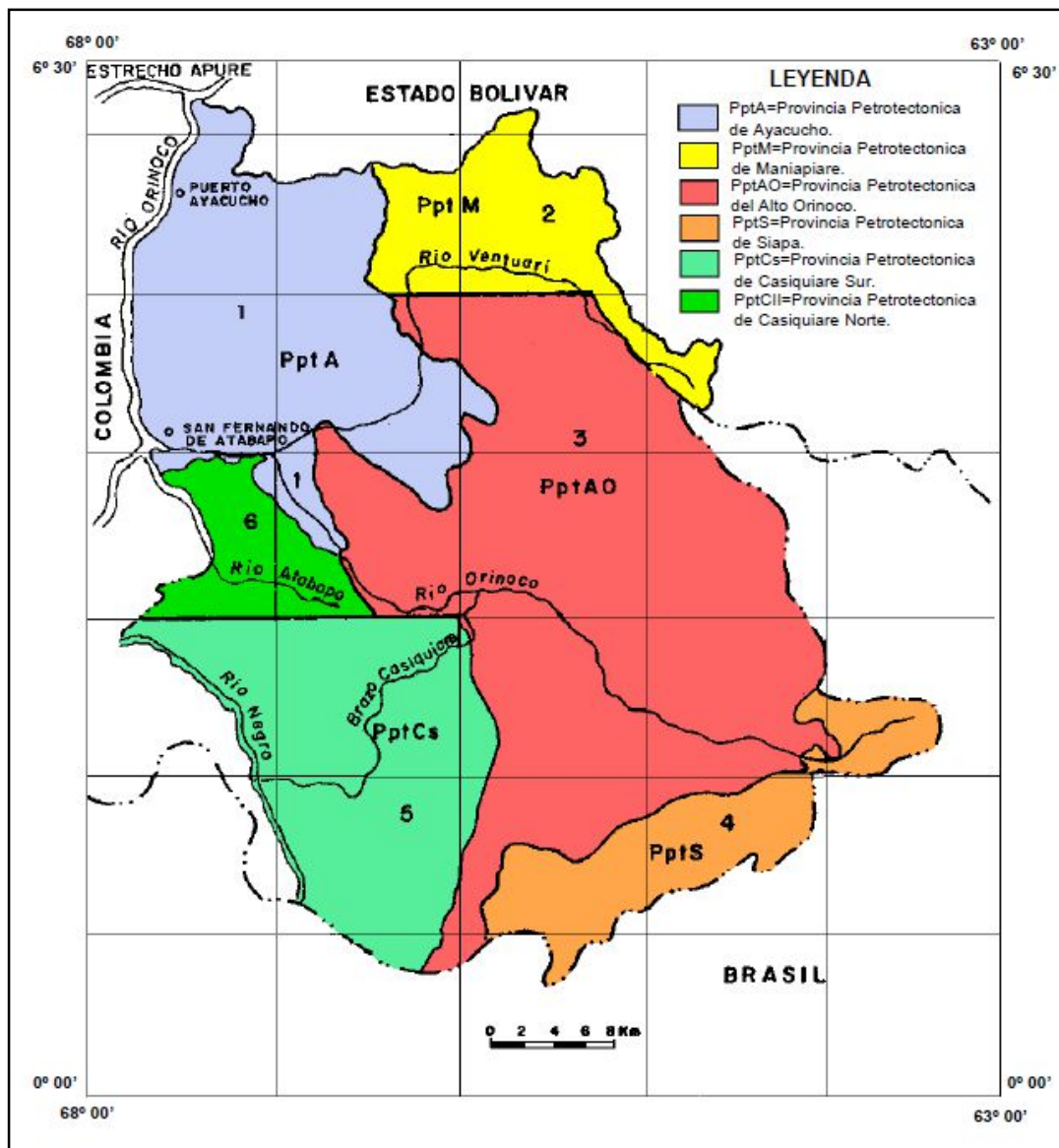


Figura 3. Mapa geológico esquemático del estado Amazonas, divididos en subprovincias (Tomado de Mendoza, 2012)

Subprovincia petrotectónica de Manapiare: la cual está compuesta por intrusiones de rocas volcánicas de los ríos Asita y Parucito tipo Volcánicas de Caicara y de granitos biotíticos, tipo Granito de Santa Rosalía, en un basamento expuesto en el Alto Ventuari. “Algunas rocas metasedimentarias pre-Roraima se observan en

contacto o interestratificadas con las rocas volcánicas riolíticas de Caicara” Mendoza (2012). Las fracturas más antiguas en la zona son de tendencias NE y NW.

Subprovincia petrotectónica de Alto Orinoco: se extiende desde la confluencia del río Orinoco hasta las nacientes del gran río y se continúa por Parima y Surucucú en Brasil. Litológicamente está formada por cuarzo-monzonitas semimasivas o atectónicas como las de los ríos Parú, Yureba y Marieta, intrusivas en gneises tonalíticos y augengneises, gneises cuarzo-plagioclásicos-epidótico-biotíticos, granitos trondiemíticos, tonalitas y rocas gabroides. Rocas volcánicas riolíticas tipo Volcánicas de Caicara y granitos tipo Santa Rosalía. Los granitos rapakivis tipo Parguaza abundan hacia el extremo S-SE de esta provincia y se conocen como Granito de Parima y Granito de Surucucú.

En el área del Río Cunucunuma-Tepuyes Duida-Marahueta se identifican granitos tectonizados en el Alto del río Cunucunuma y Granitos rapakivis tipo Parguaza. Además esta zona está cruzada por una gran falla regional de rumbo NW-SE, asociada a la cual los granitos han sufrido cizallamiento y cataclasis. A 7 km aguas arriba de la desembocadura del río Cunucunuma en el Orinoco pasa el contacto entre las subprovincias Alto Orinoco al NNE y Casiquiare SSO. En general esta provincia registra un marcado tectonismo de dirección NE, con fuerte cizallamiento y pero las tendencias estructurales muy variadas y complejas, aunque predominan las N30°-50° O y N50°-70°E.

Subprovincia petrotectónica de Siapa: la subprovincia petrotectónica del Siapa se extiende desde la divisoria de aguas del Alto Orinoco y la de su afluente Mavaca con la del río Siapa. Litológicamente se compone de metasedimentos tectonizados, cizallados de esquistos cuarzo-micáceos-estaurolíticos-granatíferos y gneises cuarzo-feldespáticos-epidótico-anfibolíticos y anfibolitas o remanentes de Cinturones de Rocas Verdes. Tiene las mismas tendencias estructurales que las provincias Imataca y Kanukú de N60-70°E.

Subprovincia petrotectónica de Casiquiare Norte y Sur: se caracteriza por su plano y bajo relieve conocida como “Penillanura del Casiquiare” y por su complejidad lito-tectono-metamórfica. Las rocas que afloran entre Atabapo y Santa Cruz cerca de Maroa (Asociación Atabapo-Maroa) se caracterizan por ser gneis y migmatitas tonalíticos con intrusiones de cuarzo-gabroide a tonalíticas, tipo Complejo Supamo. La asociación Caño Casiquiare está compuesta por complejos grabroides intrusivos en roca granítica gnéisicas tonalíticas. Mientras que la Asociación San Carlos – Cucuy, comprende genises, augeneises cuarzo feldespático anfibólito con migmatitas. En general, se caracteriza por la ausencia total de rocas volcánicas y plutónicas tipo Grupo Cuchivero, por la escasez de metasedimentos y de sedimentos tipo Roraima y al norte del caño San Miguel (al norte de San Carlos de Río Negro y al este de Puerto Colombia), se sigue una gran falla o zona de cizalla de rumbo cercano a EW, las tendencias estructurales en rocas con mayor deformación y metamorfismo con N50°-60°W y N10°-30°E.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

El método gravimétrico implica el uso de un campo potencial de la Tierra, en este caso la gravedad; este campo natural observado se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas, de manera que nos permite estudiar las variaciones laterales de las estructuras que componen el subsuelo. En este capítulo se exponen los principios teóricos fundamentales de este método.

3.1 Teoría Básica

Los estudios gravimétricos, tanto a gran escala como a pequeña escala, se rigen por la ecuación fundamental de la Ley de Gravitación de Newton (ecuación 1), de acuerdo a Telford *et al* (1990):

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

Donde F es la magnitud de la fuerza de atracción, m_1 y m_2 son masas de los cuerpos, r es la distancia que las separa y G la constante de gravitación universal $\left(6,674 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}\right)$.

Si la Tierra fuera perfectamente esférica sin heterogeneidades laterales y sin rotación, la aceleración de gravedad sería la misma en toda la Tierra y obedecería a la siguiente fórmula:

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Pero este no es el caso, la Tierra no es homogénea y rota sobre su propio eje. La rotación causa deformidades sobre la superficie terrestre, por lo que en los polos el radio de la tierra es diferente al del ecuador, causando que la gravedad también sea distinta.

El geoide representa la forma real de la superficie terrestre, de acuerdo con Pratt (2004), definida como una superficie equipotencial que corresponde al nivel medio del mar. Además, indica, que el geoide es una superficie conceptual, que se deforma por la ausencia o presencia de material atrayente. Debido a la complejidad de la forma geoidal de la Tierra se ha buscado un modelo matemático que se ajuste de mejor manera la superficie de la misma, definiendo el elipsoide (en la figura 4, se observa la relación entre el geoide, elipsoide y la topografía). De acuerdo con Hinze *et al.*, (2005) la ecuación recomendada para calcular la gravedad del elipsoide teórico está dada por:

$$g_T = \frac{g_e(1+k\sin^2 \varphi)}{(1-e^2\sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad [\text{mGal}] \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde g_e es el valor 978032,67715 mGal, representa la gravedad en el ecuador. La constante k viene dada por 0,001931851353; y la excentricidad está dada por e^2 con valor de 0,0066943800229. Por último, φ es la latitud. Esta ecuación se conoce como gravedad teórica (g_T).

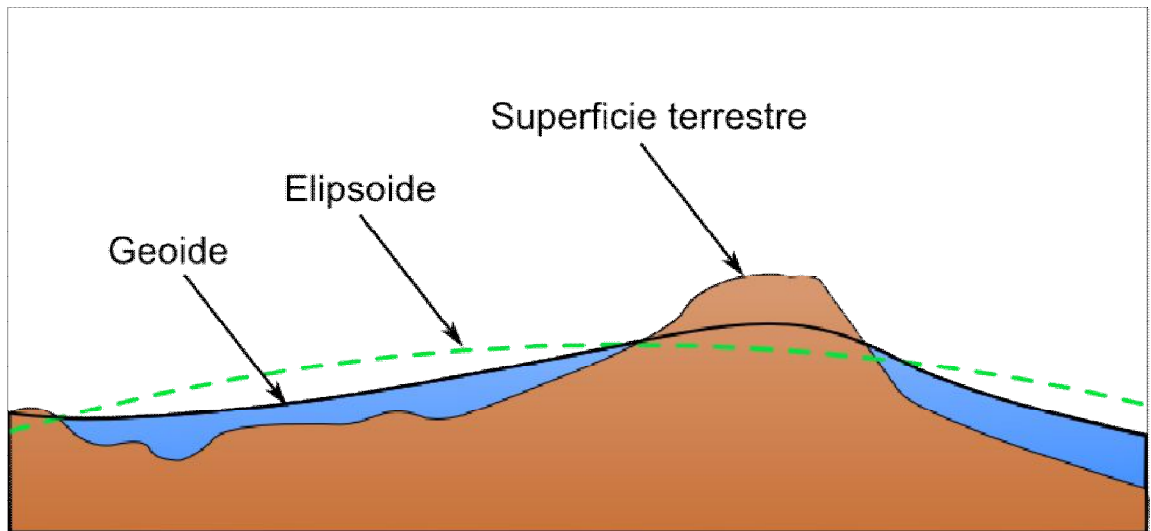


Figura 4. Relación entre el geoide, elipsoide y topografía. (Olaya, 2014)

3.2 Correcciones gravimétricas

Los datos gravimétricos están influenciados por efectos naturales terrestres, los cuales representan una distorsión o ruido que no son de interés, por lo tanto, es necesario eliminar estos efectos a través de las siguientes correcciones:

3.2.1 Corrección por deriva instrumental

Se realiza para corregir variaciones de gravedad en función del tiempo, producto de cambios inducidos térmicamente en las propiedades elásticas del muelle del gravímetro, puesto que las propiedades elásticas del resorte no son perfectas. El efecto es pequeño en gravímetros modernos (Lowrie, 2007) y puede ser compensado aplicando la siguiente ecuación:

$$D_I = \frac{(L_f - L_i)}{(t_f - t_i)} t_{\Delta} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde, $L_f - L_i$ es la variación de lecturas entre la apertura y cierre de la estación base, $t_f - t_i$ es la diferencia en tiempo entre apertura y cierre de la estación base y t_{Δ} representa el tiempo referido a la apertura del circuito. Cuando la apertura y cierre del circuito se hace en diferentes bases, se sigue la siguiente ecuación:

$$D_I = \frac{(G_{\Delta} - L_{\Delta})}{(t_i - t_f)} t_{\Delta} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde G_{Δ} representa la diferencia entre de gravedad absoluta las estaciones bases, L_{Δ} la diferencia de lectura del gravímetro entre las estaciones bases, $t_f - t_i$ es la diferencia en tiempo entre apertura y cierre de las estaciones bases y t_{Δ} representa el tiempo referido a la apertura del circuito.

3.2.2 Corrección por marea

Es debido a cambios de gravedad por el movimiento relativo del Sol y la Luna. Estos provocan cambios en el orden de $\pm 0,3$ mGal durante un periodo de 24 horas, es decir, hasta 0,05 mGal por hora (Pratt, 2004). Esta corrección se determina mediante el uso de algoritmos que extraen parámetros de marea para estaciones individuales a partir de valores sintéticos de los mares que calcula de acuerdo a la longitud, latitud, fecha, hora de medición de la estación.

3.2.3 Corrección Atmosférica

Se realiza para corregir efectos de la masa atmosférica, donde se incluye a la masa terrestre para calcular la gravedad teórica elipsoidal. La masa sobre la estación no afecta la medida de la estación. Suponiendo que la atmosfera consiste en una capa homogénea y esférica (Hinze *et al.*, 2005), se utiliza la siguiente ecuación:

$$\delta g_{atm} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2 \quad [\text{mGal}] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde h es la altura de la estación. Esta corrección se necesita en zonas que cubren amplia gama de alturas, la misma se puede restar a la gravedad teórica o sumar a la gravedad observada.

3.2.4 Corrección de aire libre

Consiste en eliminar efectos de cambios de elevación respecto al nivel de referencia durante el levantamiento (Pratt, 2004). La ley de gravitación universal de Newton (ecuación 1), establece que mientras más crece la distancia que separa los cuerpos, menor es la atracción gravitacional. Por lo tanto, de acuerdo con Hinze *et al.*, (2005) la ecuación 7 corrige estos efectos:

$$\delta g_h = -(0,3087691 - 0,0004398 \sin^2 \varphi) + 7,2125 \times 10^{-8} h^2 \quad [\text{mGal}]$$

(Ecuación 7)

3.2.5 Corrección de Bouguer

La corrección anterior no toma en cuenta el exceso de masa en montañas, ni el déficit de masa en los valles, por ello, esta corrección consiste en eliminar el efecto de la gravedad de la masa entre el nivel de referencia y el sitio de medición, (Hinze *et al.*, 2005). Para corregir estos efectos se sigue la ecuación 8:

$$\delta g_{bc} = 2\pi G\rho (1 + \mu)h - \lambda R \quad [\text{mGal}] \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde μ y λ son coeficientes adimensionales definidos por (LaFehr., 1991), G es la constante gravitacional, ρ es la densidad del material, h es la altura elipsoidal y R es el radio de la tierra ($R_0 + h$).

3.2.6 Corrección topográfica

Se realiza para corregir pequeños errores producidos por efectos del terreno, ya sea producto de valles o montañas. Se realiza calculando las diferencias de alturas entre el terreno y la estación de medición, se puede realizar manualmente a través de un método ideado por Hammer, llamado graticula de Hammer, o a través de algoritmos computacionales definidos por Nagy en 1966 y Kane en 1962.

3.3 Anomalías de Bouguer

Se define por las correcciones gravimétricas explicadas anteriormente, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$AB = G_{obs} - \delta g_{atm} + \delta g_h - \delta g_{bc} + Ct - Gt \quad [\text{mGal}] \quad (\text{Ecuación 9})$$

3.4 Separación Regional-Residual

Las anomalías de gravedad pueden estar afectadas por efectos regionales o residuales. Los regionales pueden estar representados por la corteza terrestre y zonas superiores del manto, las cuales se caracterizan por ser de alta amplitud y baja frecuencia, es decir, permite estudiar características geológicas a un nivel de las placas tectónicas. Los efectos residuales son producidos por contraste de densidad de regiones más someras y son de baja amplitud y alta frecuencia, por ejemplo, permite estudiar o identificar fallas y cuencas sedimentarias.

3.5 Análisis Espectral

El análisis espectral es una técnica que permite eliminar componentes de longitud de onda del campo de gravedad, se basa en el estudio del espectro de potencia del campo en función a la dirección en que se mida para un diferente número de ondas en cada caso. Spector y Grant (1970), desarrollaron este método basado en el estudio del espectro de energía promediado radialmente, seleccionando la banda de frecuencia (número de ondas) la cual tiene una relación es lineal. En estas bandas de frecuencia la pendiente de esta relación, es proporcional a la profundidad del tope de la fuente que produce la anomalía. La profundidad de la fuente se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$Z = -\frac{m}{4\pi} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde m es la pendiente que mejor se ajusta a la fuente. En la figura 5 se observa los tipos de fuentes.

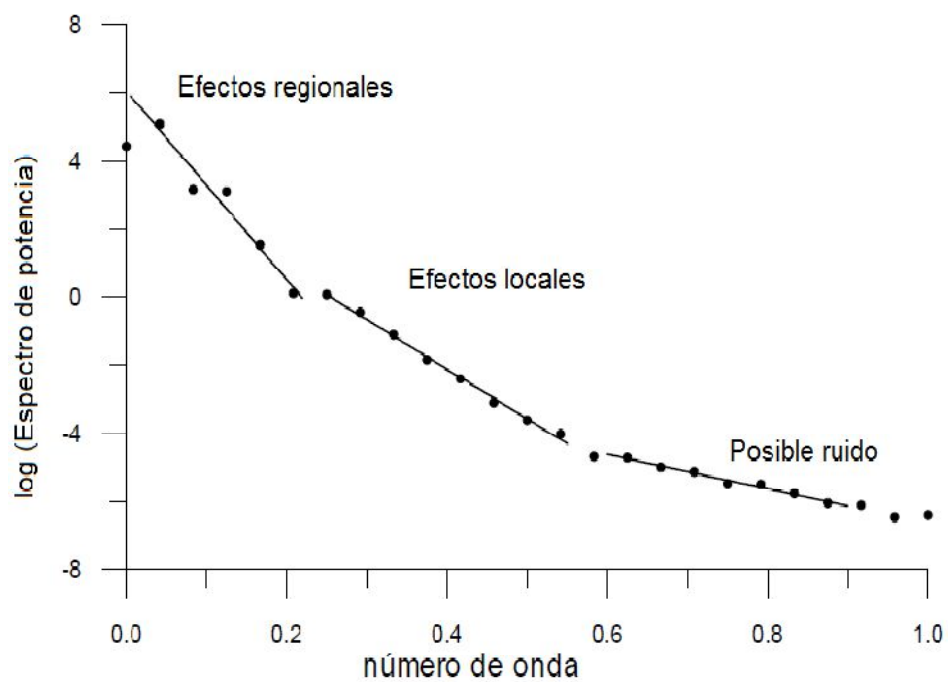


Figura 5. Fuentes del espectro de frecuencia. (Narvaéz, 2012)

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

La metodología utilizada para lograr los objetivos planteados en esta investigación, se muestra en la figura 6:

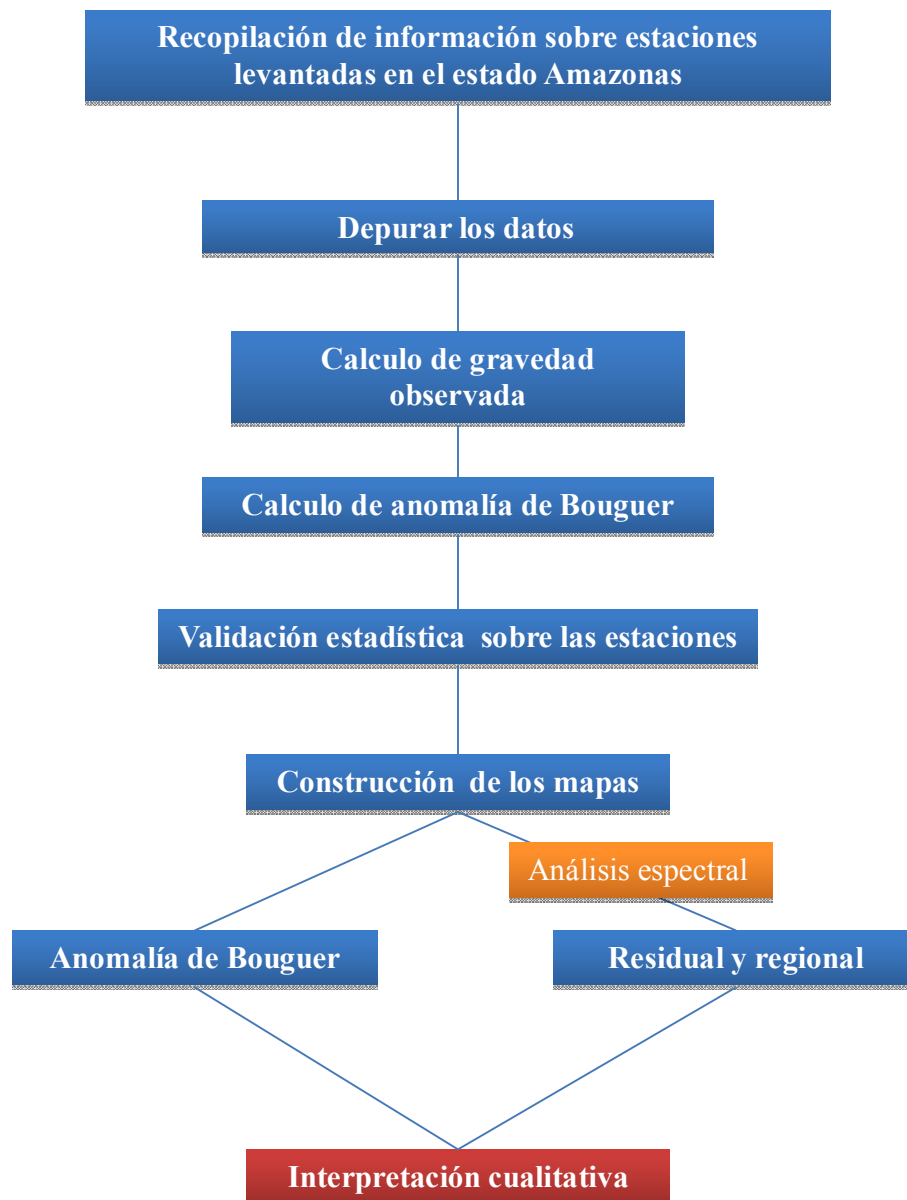


Figura 6. Flujo de trabajo

El gravímetro utilizado en los levantamientos es un *AUTOGRAV Scientrex CG-5*, tiene una resolución de 0,001 mGal, registro digital, múltiples filtros para minimizar el ruido ambiental, entre otras características. El equipo permite realizar correcciones de marea, para ello solo se necesita definir en el equipo la latitud, la longitud, la altura de la estación, la hora y la fecha de medición, o en su defecto, conectar a un GPS de entrada compatible con la consola de medición. (SCIENTREX, Limited, 2012)

4.1 Recopilar información de estaciones levantadas en el estado

Amazonas

En la etapa inicial se recopiló la información suministrada por el IGVSB. A través de un inventario se conoció que se disponían de 10 estaciones bases para el levantamiento sobre el cauce del río Orinoco y 98 estaciones ordinarias (levantadas en mayo del año 2015). Y para el levantamiento sobre el cauce del río Ventuari, 6 estaciones bases y 104 estaciones ordinarias (levantadas entre septiembre y octubre del año 2015). También en este proceso de reunir información, se logró recuperar 33 estaciones de una campaña de adquisición en el año 1991.

4.2 Depurar e integración de los datos

Esta etapa del procesamiento se realizó con la ayuda de varios programas, primero para los datos levantados sobre el río Orinoco se utilizó el paquete computacional Mt80tw para realizar la compensación por marea, debido a errores al definir los parámetros en el equipo de medición. El funcionamiento de este programa fue verificado por Arocha (2016), quien verificó a través de una comparación entre la gravedad corregida por el programa Mt80tw y el gravímetro *Scientrex CG-5* (figura 7). Para la corrección de deriva instrumental de todos los levantamientos, se efectuaron con el paquete computacional, Microsoft Office Excel 2013.

4.3 Cálculo de gravedad observada

Una vez corregidos los datos por deriva instrumental, para calcular la gravedad observada se usó el programa *Microsoft Office Excel 2013*. Para cumplir con los

estándares internacionales se homologaron todas las estaciones a la campaña de medición de gravedad absoluta del año 2016, promovida por el IGVSB, tomando como referencia la estación Puerto Ayacucho de $978043,821 \pm 11 \mu\text{Gal}$

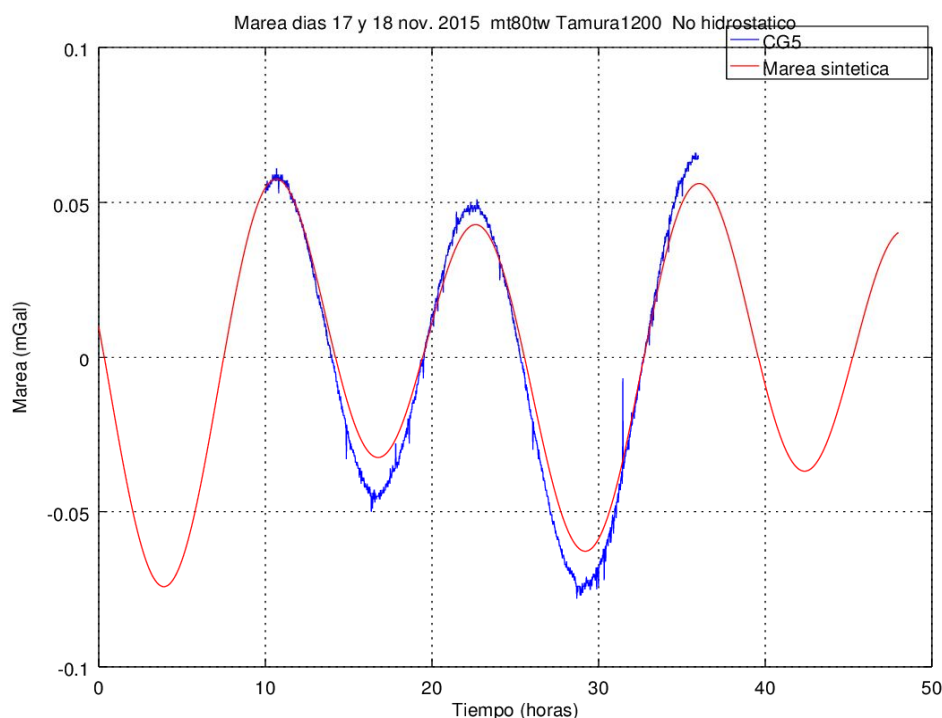


Figura 7. Curvas de marea terrestre, generadas por el programa Mt80tw; rojo: marea calculada, azul: Marea reportada por el gravímetro Scintrex CG-5. (Tomado de Cavada, 2015)

4.4 Calculo de anomalía de Bouguer

Los cálculos de anomalía de Bouguer se realizaron mediante las ecuaciones definidas en el capítulo anterior, con la ayuda del programa *Matlab* se programó un código que permitió usar las ecuaciones descritas. En particular para la corrección topográfica se apoyó en el programa Oasis Montanj versión 7.0.1, específicamente el módulo *Gravity -> Terrain Correction -> Create Regional Correction Grip -> Terrain*

Correction. Los parámetros utilizados en “*Create Regional Correction Grip*” y “*Terrain Correction*” se muestran a continuación:

Terrain Density: 2,67 g/cm³

Outer (regional) correction distance: 170 km

Inner (local) correction distance: 20km

Optimization: faster

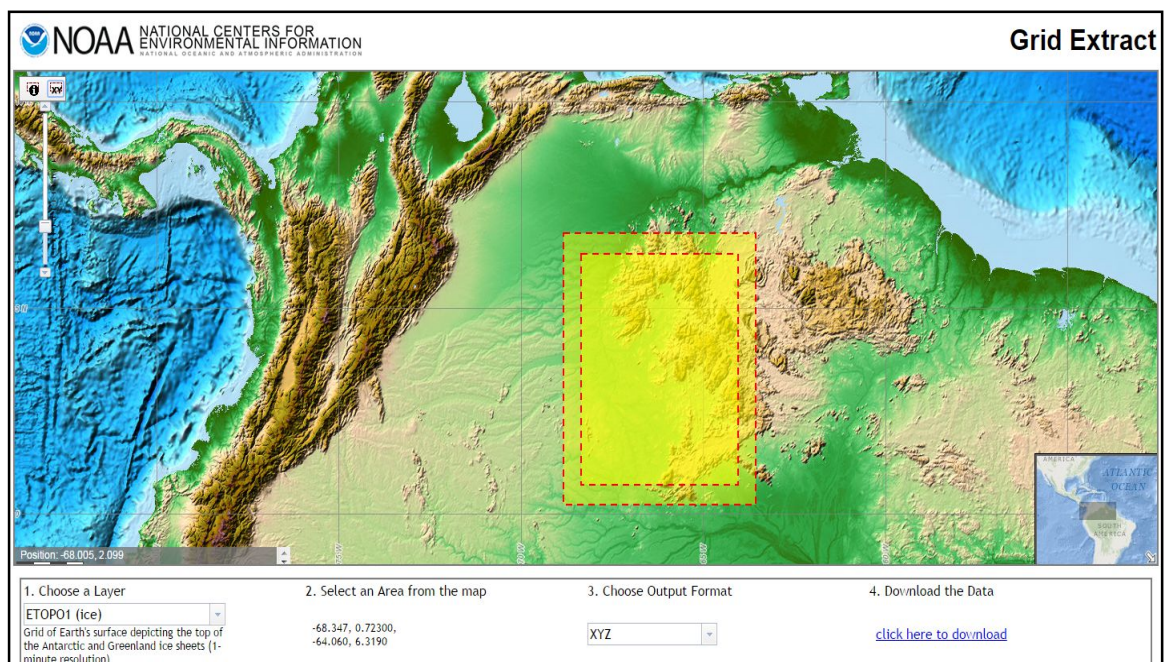


Figura 8. Ventana extraída de N.O.A.A.

El modelo de elevación digital empleado fue extraído del portal web de la *Nacional Centers for Environmental Information* (N.O.A.A.) con dos versiones necesarias para usar el módulo descrito anteriormente. El primero 1° más extenso de la zona de estudio y el segundo 0.5° más amplio de la zona de estudio. En la figura 8 se muestra la ventana de estudio y la base de datos, ETOPO1.

4.5 Validación estadística de los datos

El análisis estadístico se realizó con el programa *R Project*, versión *Ri386 3.3.2*, con el que se obtuvo la estadística descriptiva, los histogramas y el diagrama de caja y bigotes para el dato gravimétrico.

4.5 Elaborar mapas

Se realizó mediante el programa *Oasis Montaj*, siguiendo secuencia se obtuvo el mapa de anomalía de Bouguer a través del módulo *Grid and Image*. Para elaborar el mapa de residual y regional por análisis espectral, se activó el módulo *MAGMAP* en la opción *GX -> Load Menu*. Con el módulo *MAGMAP* se aplicó todas las de opciones de *Interactive Filtering*. Al aplicar la opción *Radial Average Spectrum* genera un archivo .txt el cual se exportó a Microsoft Excel 2013 para identificar las fuentes profunda e intermedia tal como indica la figura 5 del capítulo anterior. Para construir el mapa de residual y regional se identificó el límite entre la fuente profunda e intermedia, se tomó la longitud de onda de este límite y se aplicó la siguiente opción de *Interactive Filtering*, llamada *Interactive Spectrum Filters*, tal como indica la figura 9.

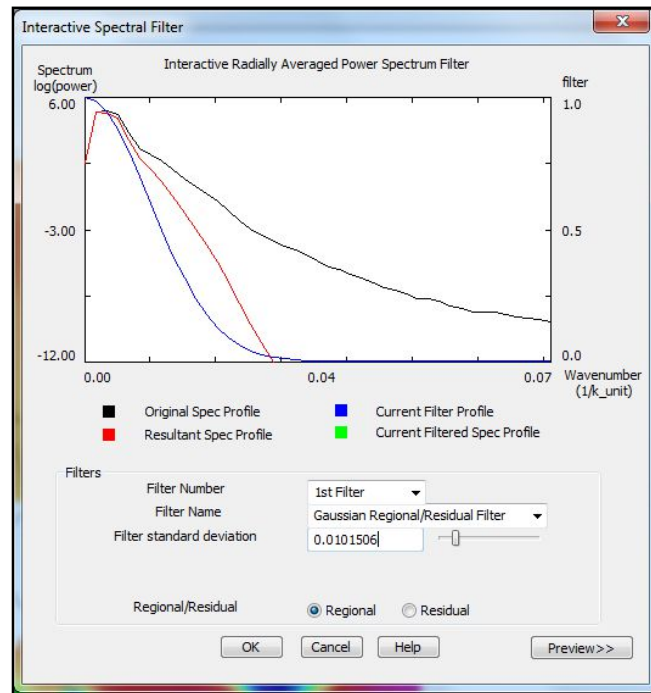


Figura 9. Aplicación del filtro gaussiano con numero de onda 0.0101506, valor obtenido del procesamiento del espectro de potencia.

El filtro utilizado fue el gaussiano regional/residual, el cual permite modelar el ruido. Por último, se aplicó el siguiente paso del *Interactive Filtering, Apply Filters* para generar los mapas.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Estadística descriptiva

5.1.1 Gravedad observada

Con la finalidad de hacer un control de calidad y de estudiar el comportamiento de las mediciones adquiridas, en la tabla 1 se observa la estadística descriptiva aplicada a 231 datos (12 estaciones recuperadas, 16 estaciones bases y 203 estaciones ordinarias, ver en Apéndice A). Los resultados muestran un valor máximo de 978061.612 mGal y un valor mínimo de 977968.551 mGal, el primero corresponde a la estación 0048 recuperada de la campaña de medición en el año 1991 y el segundo pertenece a la estación 7082 de la campaña de medición sobre el río Orinoco. El valor de la media (Me), mediana (X) y moda (Mo): 977999.767, 977995.825 y 977979.350 mGal, respetivamente, indican que la distribución es sesgada a la derecha al cumplirse la relación $Mo < X < Me$. Por su parte la Curtosis, de valor -0.542; indica que ligeramente hay menor concentración de los datos en torno a la media.

En la figura 10 se confirma lo descrito por la estadística descriptiva, corroborando un comportamiento unimodal sesgado a la derecha. Los valores más altos de gravedad corresponden a la región SE de la zona de estudio, donde se observan las estaciones de mayor altura; lo que indica que la respuesta es producto de rasgos geológicos. Por su parte, el diagrama de caja y bigotes (figura 11) indica que no se encuentran valores atípicos dentro de la muestra validando los datos adquiridos e integrados.

Tabla 1. Estadística descriptiva de la Gravedad observada

Gravedad Observada	
Media	977999.767
Error típico	1.529
Mediana	977995.825
Moda	977979.350
Desviación estándar	23.235
Varianza de la muestra	539.856
Curtosis	-0.542
Coefficiente de asimetría	0.723
Rango	93.061
Mínimo	977968.552
Máximo	978061.612
Suma	225917946.155
Cuenta	231

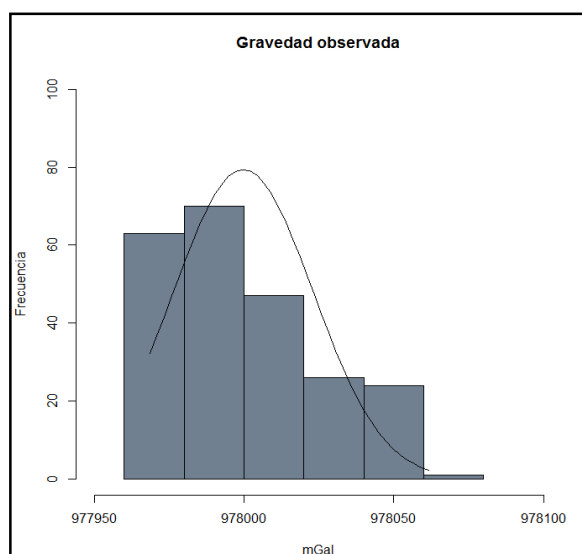


Figura 10. Histograma de frecuencia de la Gravedad observada.

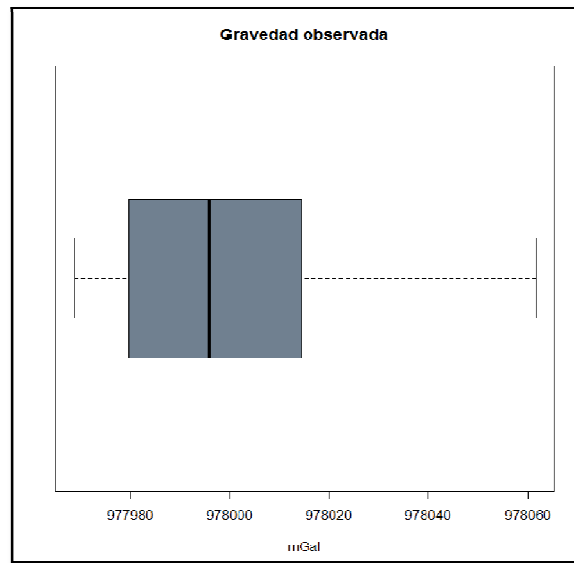


Figura 11. Diagrama de caja y bigotes de la Gravedad observada.

5.1.2 Anomalía de Bouguer

La estadística descriptiva de la anomalía de Bouguer se muestra en la tabla 2, donde se observan valores máximos y mínimos de 129.24 mGal y -67.90 mGal respectivamente. El primero asociado a la estación 0048, mientras que el valor mínimo pertenece a la estación 7273 de la campaña de medición sobre el río Ventuari ubicada en la región NE del área de estudio. El valor de la media y la moda coinciden en -40.62 mGal mientras que la mediana tiene un valor de -48.17 mGal. En la figura 12 se observa un comportamiento unimodal con un sesgo hacia la derecha, debido a los valores positivos en la anomalía de Bouguer que corresponden a las estaciones ubicadas al sur de la zona de estudio; posiblemente causado por desequilibrios de contrastes de densidades o a la poca calidad del dato recuperado.

Tabla 2. Estadística descriptiva de la anomalía de Bouguer

<i>Anomalía de Bouguer</i>	
Media	-40.62
Error típico	1.66
Mediana	-48.17
Moda	-40.62
Desviación estándar	25.31
Varianza de la muestra	640.36
Curtosis	21.08
Coefficiente de asimetría	3.73
Rango	197.14
Mínimo	-67.90
Máximo	129.24
Suma	-9382.30
Cuenta	231

En el diagrama de caja y bigotes mostrado en la figura 13, el cuartil 25% se ubica en -54.43 mGal mientras que el cuartil 75% es de -28.00 mGal. Además muestra cuatro (4) valores atípicos a la derecha del rango intercuartilico superior, los cuales pertenecen a las estaciones: Río Negro, Aux 1, 0039 y 0048; todas ubicadas al sur y pertenecientes a las estaciones recuperadas de la campaña de adquisición de 1991. No fueron descartadas del procesamiento debido a que este grupo de estaciones son las que caracterizan la zona sur del estado Amazonas y son estaciones que sostienen un alto contraste de densidad posiblemente debido a rasgos geológicos de la zona; sin embargo, la estadística mostrada revela posibles limitaciones por lo que se aconseja nuevos levantamientos en esa región.

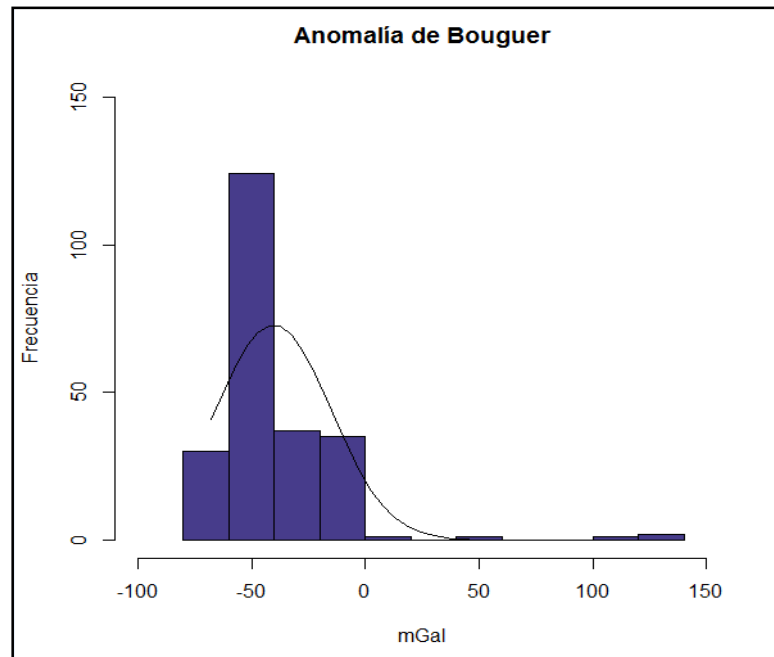


Figura 12. Histograma de frecuencia de la anomalía de Bouguer.

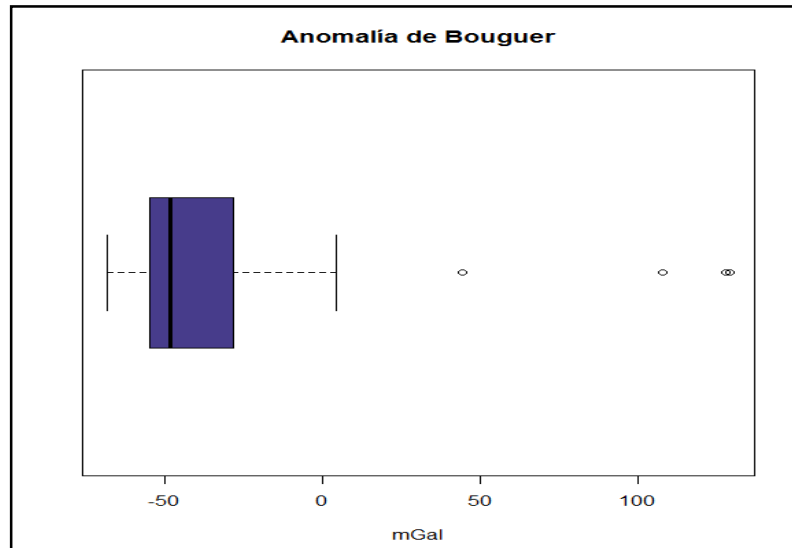


Figura 13. Diagrama de caja y bigotes de la anomalía de Bouguer.

5.2 Análisis de mapas

5.2.1 Gravedad observada

Las variaciones de la gravedad observada están íntimamente relacionadas con la topografía (figura 14), por lo que se debe tomar en consideración. Así mismo, se debe considerar la geología de superficie (figura 15).

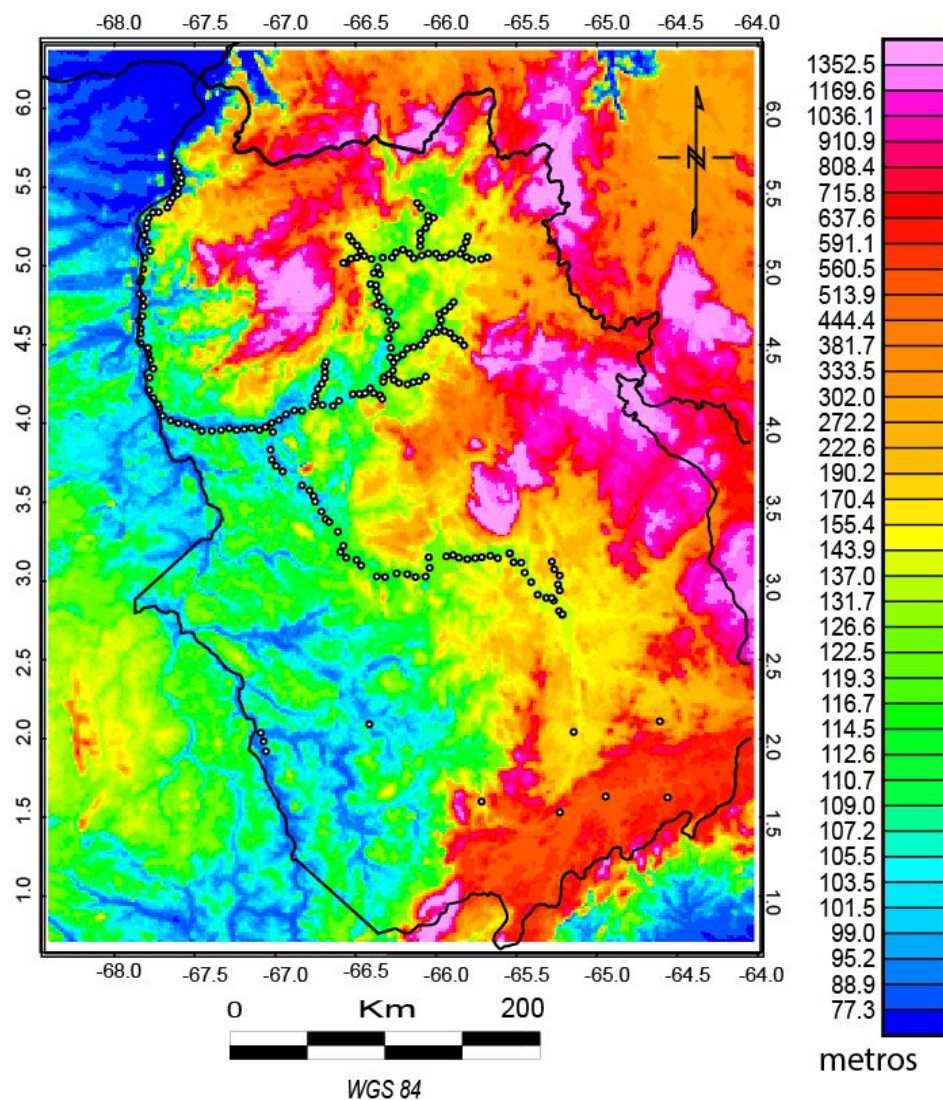


Figura 14. Mapa topográfico. Etopo 1 (NOAA)

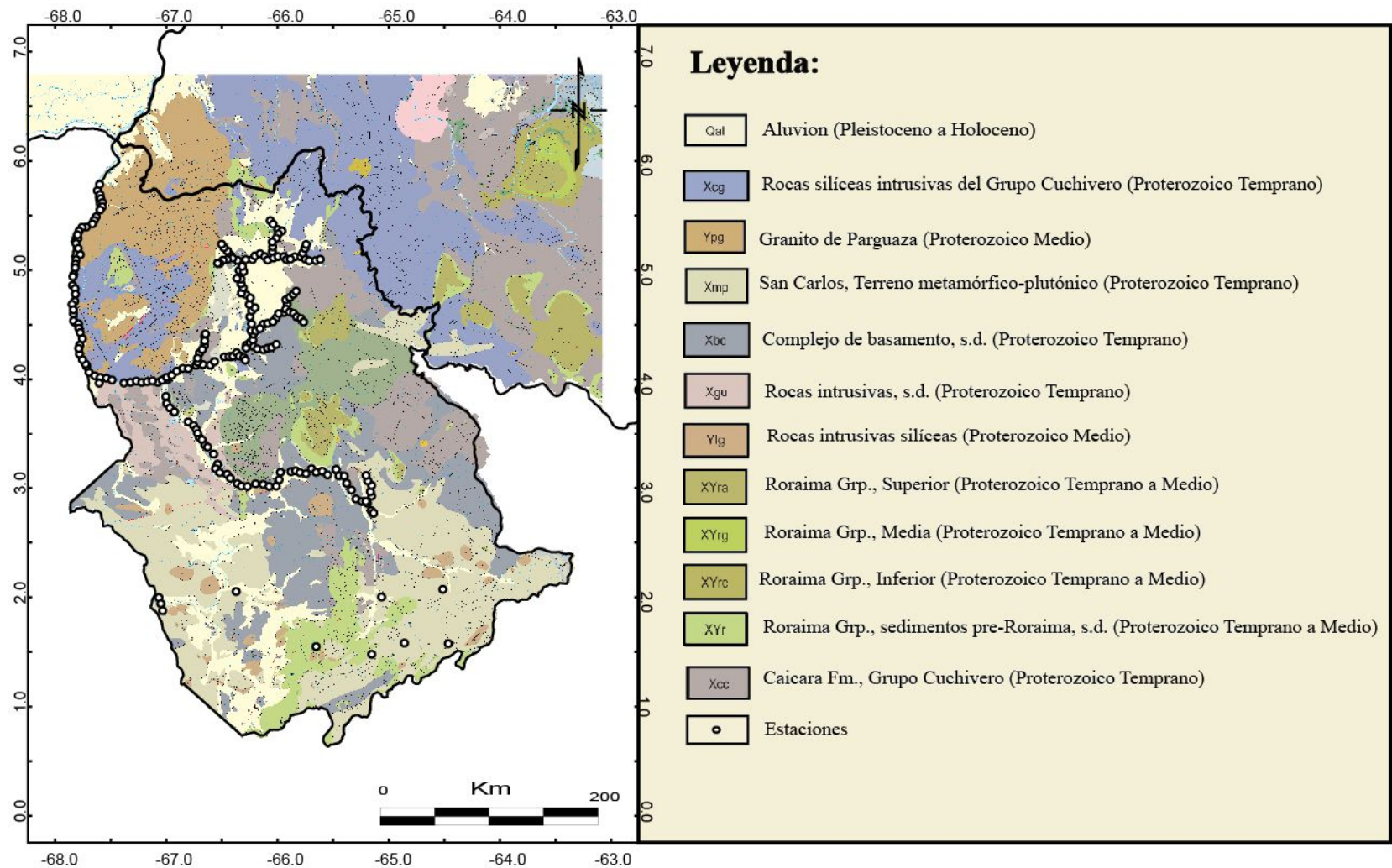


Figura 15. Mapa geológico con estaciones. (Modificado de Hackley *et al*, 2006)

En la figura 16 se muestra el mapa de la gravedad observada, al NO se encuentra el Grupo Suapure específicamente el Granito Rapakivi de Parguaza; rocas intrusivas del Proterozoico Medio, donde se observan contornos orientados SO-NE con un rango de gravedad que se mantienen entre 978077.438 mGal y 977989.229 mGal, representando un gradiente de 0.518 mGal/km.

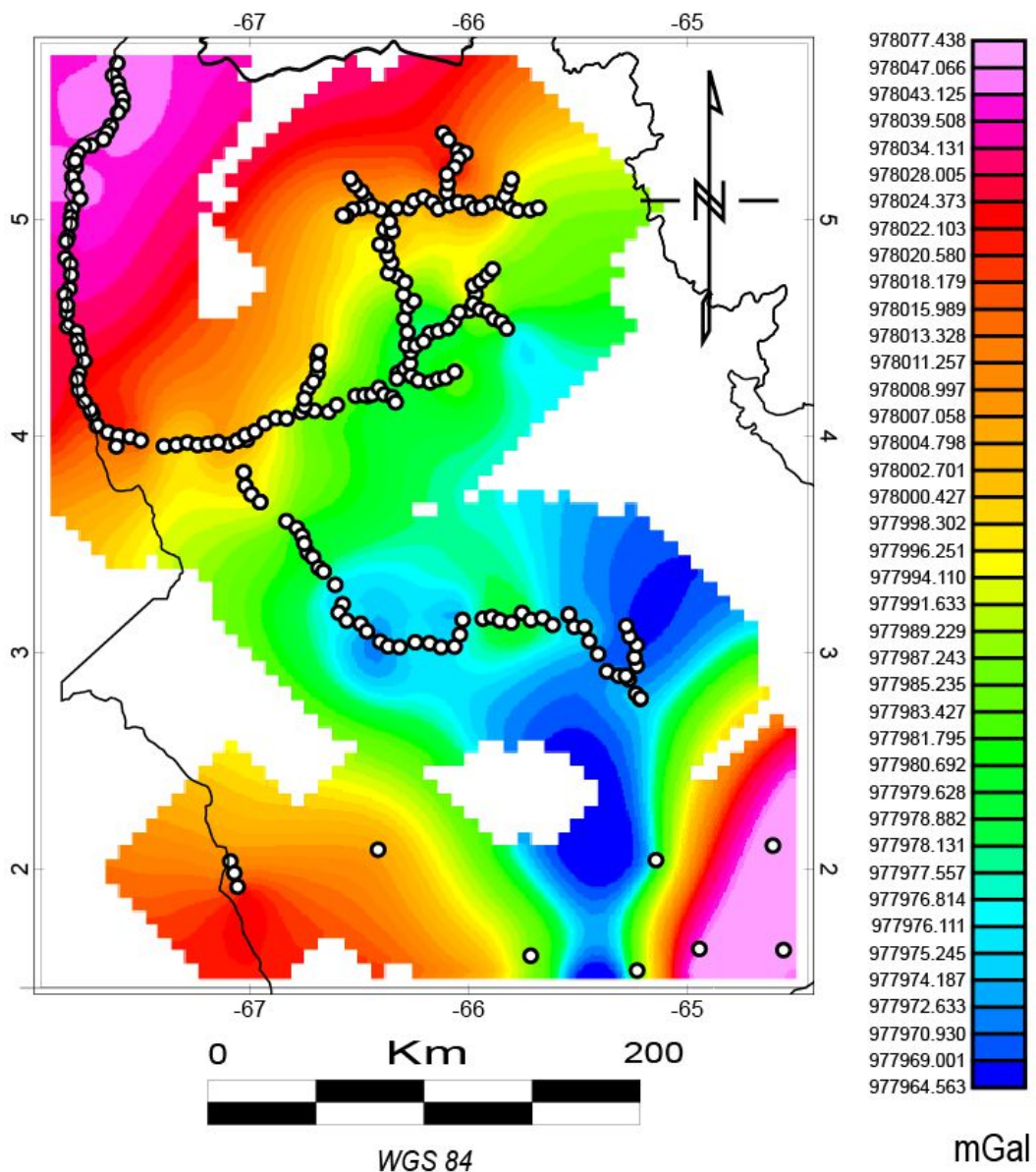


Figura 16. Mapa de gravedad observada.

En la región central y la zona SE del mapa, caracterizada por ser el área de menor altura, se puede notar que los contornos cambian de tendencia a dirección NO-SE con un rango de gravedad que varían entre 978020.580mGal y 977972.633 mGal; cuyo gradiente es de 0.319mGal/km. En la región SE (entre las longitudes: -66; -64.5 y las latitudes: 3.5; 1.5) se observa que las orientaciones de los contornos mantienen una dirección aproximada de N75°E, con un rango de gravedad entre 978077.438 mGal y 977964.563 mGal, representando un gradiente de 0.7525 mGal/km; siendo la zona con el gradiente más fuerte del mapa.

5.2.2 Anomalía de Bouguer

En la figura 17 se muestra el mapa de anomalía de Bouguer total de la región de estudio, en él se puede observar un rango de anomalía de 129.24 mGal al sur hasta -63.1 mGal al NE; al hacer una comparación con la figura 15, se puede notar que la mayor influencia de las magnitudes negativas la ejerce el Grupo Cuchivero y el Granito del Parguaza. Se destaca que el mapa presentado se ajusta con lo expuesto por Linares *et al.*, (2015), el cual, presentó resultados de la anomalía de Bouguer en bases a datos satelitales, tal y como se muestra en la figura 18; resaltando que la zona de estudio en esta investigación se encuentra entre 150 mGal a -86 mGal aproximadamente. Debido a la respuesta de la anomalía (figura 17) se pueden discriminar 4 zonas principales: la región NO, la región NE, la región central y la región sur.

Comenzando la descripción de la figura por la zona norte occidental, que está representada por un rango de anomalía entre -3.6 mGal a -40.6 con una tendencia de los contornos N70°E; posiblemente influenciado por la disposición del Granito del Parguaza. Entre el dominio Ventuari que se extiende desde la cuenca del mismo río, al norte y al este del río Orinoco, y el dominio Casiquiare que se localiza al sur del río Orinoco entre San Fernando de Atabapo y Santa Bárbara, se observa un cambio de magnitud de la anomalía; específicamente en la zona donde el río Orinoco cambia

su curso de NO a este-oeste, la cual, puede estar representado por un frente tectónico o zona de sutura donde se enfrentan rocas anorogénicas del Granito del Parguaza con rocas tipo Complejo Supamo y se extiende en dirección norte-sur por el cauce del río Orinoco (Mendoza, 2012).

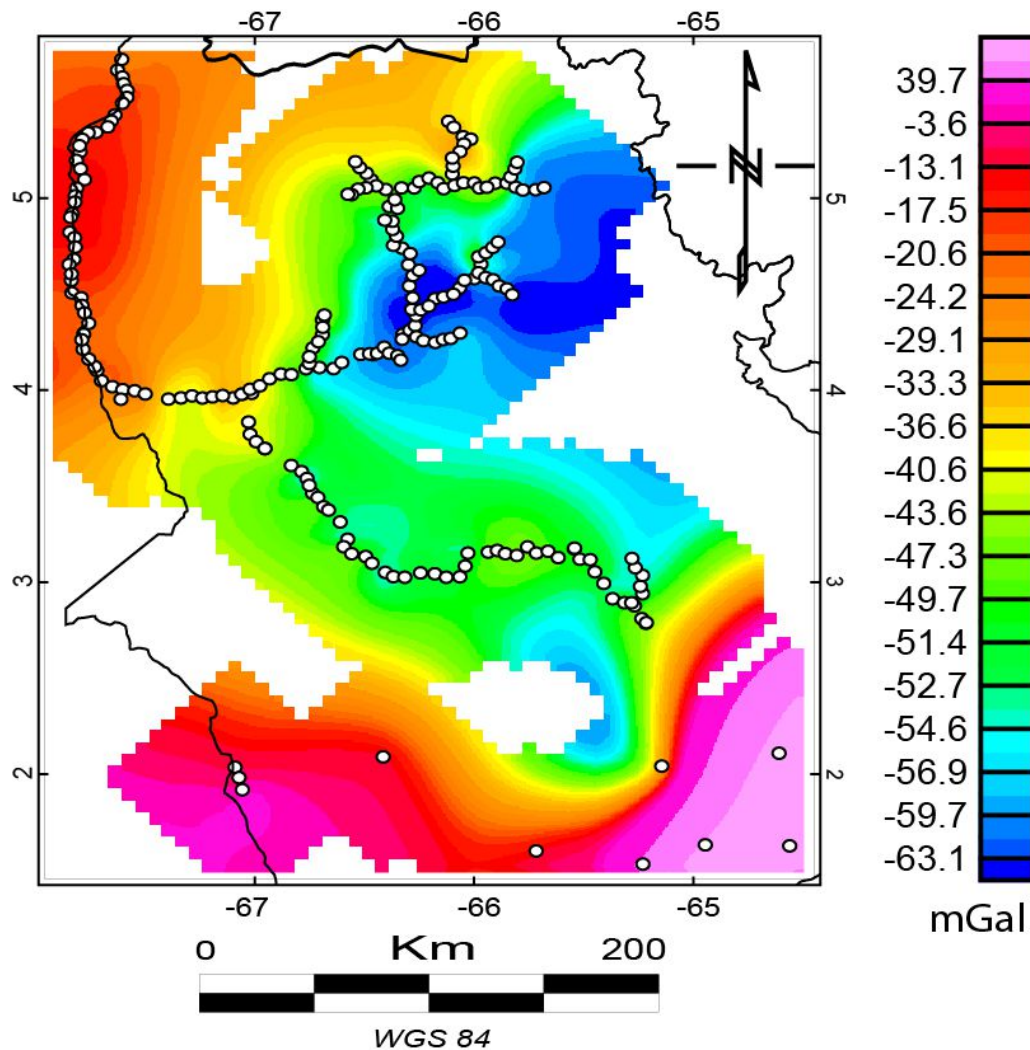


Figura 17. Mapa de anomalía de Bouguer.

Posiblemente producto de esta interacción se puede identificar un gradiente de 0.310 mGal/km. Esta zona, además de marcar el contacto entre los dominios Ventuari y Casiquiare con las provincias Maroni-Itacaiucas y Río Negro-Juruena representando

una triple sutura conocida como Frente Tectónico o Sutura Atabapo (Gaudette y Olszewski, 1985; Mendoza, 1977).

En la región norte oriental entre latitud 4°; 6° y longitud -67°; -66.5°, se observan tendencias en dirección NE-SO que se alinean con los aluviones de edad Pleistoceno a Holoceno que se encuentran en la cuenca del río Ventuari, caracterizadas por un rango de la anomalía entre -48.9 mGal a -63.1 mGal; así mismo, esta zona presenta fracturas con tendencia NE y NO. El gradiente observado de 0.298 mGal/km, delimita el contacto entre la subprovincia Manapiare y la subprovincia del Alto Orinoco.

En la parte central (acotada por: longitud -67.5; -66.5 y latitud 4; 2.5) se observa una dirección de los contornos NO-SE, que podría estar influenciada por una gran falla regional de rumbo en esta dirección que atraviesa los tepuyes Duida y Marahuaca, posiblemente reactivada después del Nickeriano (ver Apéndice B); debido a este tectónismo los granitos de la zona han sufrido fuerte cataclasis y cizallamiento, (Mendoza, 2012). Del mismo modo, en esta dirección se puede identificar un contacto entre las provincias Casiquiare y Alto Orinoco; cuya interacción al SO muestra un gradiente de 0.54 mGal/km. Así mismo, al NE se observa otro gradiente de 0.27 mGal/km posiblemente debido al contacto entre las rocas del Grupo Cuchivero y un granito calco-alcalino del Proterozoico Temprano (figura 15) que se observan a lo largo del río Parú. Por su parte, el rango de anomalía se encuentra entre -40.6 mGal y 54.6 mGal, asociada al Complejo de Basamento, sedimentos pre-Roraima y rocas del Grupo Cuchivero que se encuentran en esta región.

La zona sur occidental (acotada por: longitud -68; -66° y latitud 2.5; 1.5°) muestra contornos en dirección cercana a este-oeste, el cual se alinea con las tendencias estructurales de fallas de rumbo que se observan al sur del caño San Miguel, como respuesta regional, ya que también hay tendencias estructurales en dirección norte-sur y N20°-30°E. Los rangos de anomalía entre -17.5 mGal a 39.7 mGal corresponden a la respuesta de la Asociación San Carlos-Cucuy (Mendoza, 2012).

Por último, en la región SE (subprovincia del Siapa) las tendencias de los contornos tienen la misma alineación estructural de las provincias Imataca y Kanukú de N60°-70°E. Los rangos de 129.24 mGal a -36.6 mGal pudiese estar asociado a los sedimentos pre-Roraima y roca plutónica (San Carlos) cuya secuencia infra y supracortical ha sido intrusionada por granitos y granodioritas anorogénicas o postectónicas. El fuerte gradiente de 0.911 mGal/km podría ser causado por un contacto geológico entre las subprovincia Siapa y Alto Orinoco.

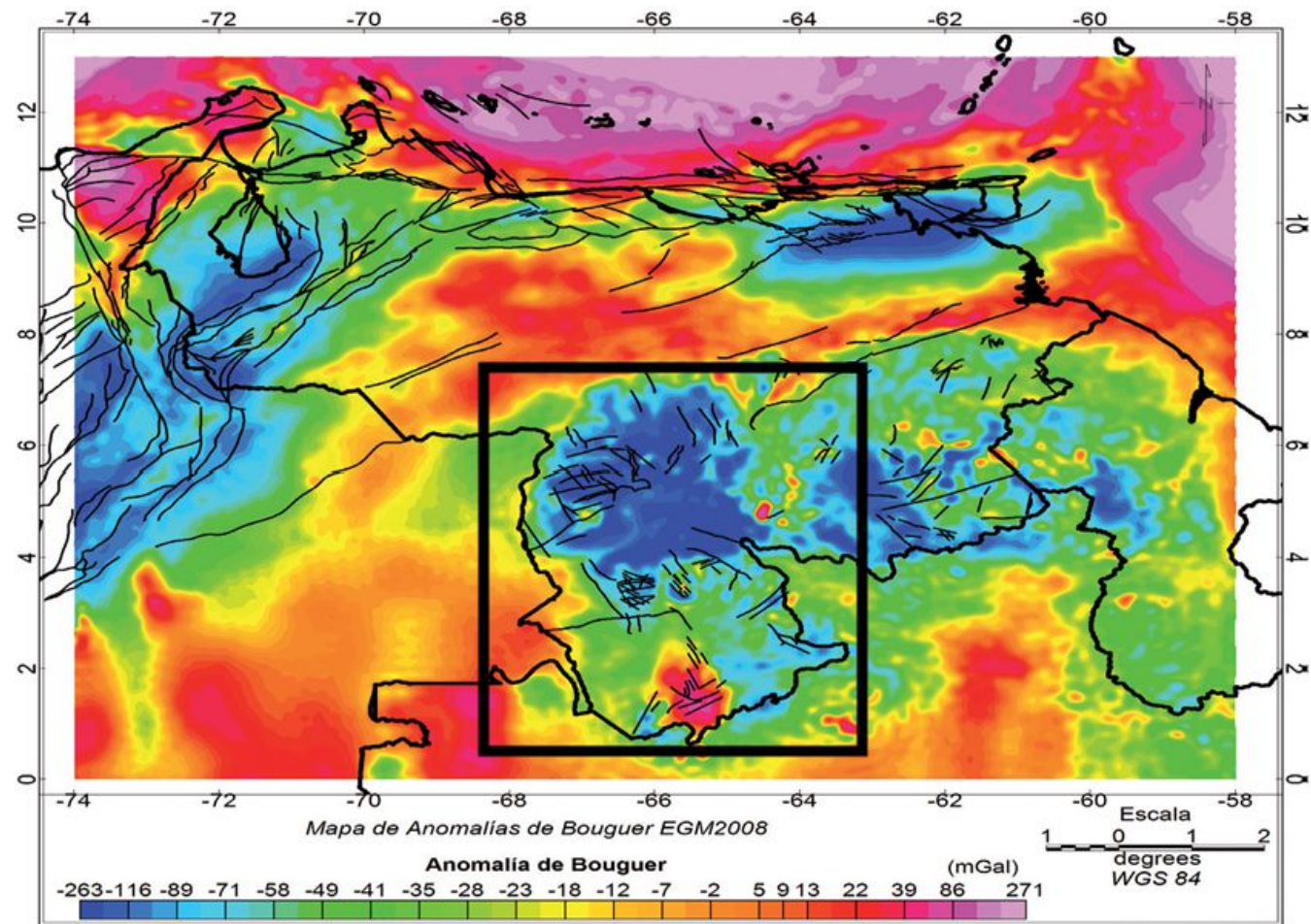


Figura 18. Mapa de anomalía de Bouguer Venezuela calculado a partir del EGM2008 Linares *et al* (2015)

5.2.3 Componente regional del mapa de anomalía de Bouguer

El mapa de anomalía regional (figura 19) concuerda de manera general al mapa de anomalía de Bouguer, conservando las mismas tendencias descritas en este, con lo cual se podría inferir que la señal gravimétrica está dominada por longitudes de onda de carácter regional. De igual forma al mapa anterior, se identifican cuatro zonas principales de acuerdo a la tendencia de sus contornos: la región NO, la región NE, la región central y la región sur.

En la zona NO se observan contornos que se alinean en dirección N80°E con valores de anomalía que se encuentran entre -12.4 mGal a -39.1 mGal, del mismo modo, se puede apreciar un gradiente de 0.262 mGal/km. Continuando en la zona norte oriental, se puede notar una dirección preferencia de la tendencia NE-SO, con un rango de anomalías de -61.4 mGal a -49.9 mGal; el gradiente en esta zona es de 0.375 mGal/km.

En la región central, se observan tendencias en dirección NO-SE con un rango de anomalía entre -40.6 mGal a -52.0 mGal con un gradiente en dirección NE de 0.208 mGal/km. Por su parte, la región sur se caracteriza por contornos alineados casi este-oeste, entre un orden de 94.3 mGal a -39.1 mGal y un gradiente de 1.667 mGal/km.

Se podría inferir que la respuesta descrita anteriormente puede estar asociada a la disminución de edades de la geología desde NE hacia el SSO, siendo la zona central perteneciente al dominio Ventuari la región de mayor edad; por el contrario, en la dirección descrita anteriormente aumenta el metamorfismo (Mendoza, 2012). Las anomalías de mayor magnitud localizadas en la zona NE y SE se pueden deber a un adelgazamiento cortical característico de zonas donde se encuentran los granitos tipo rapakivi (Bonilla *et al*, 2016).

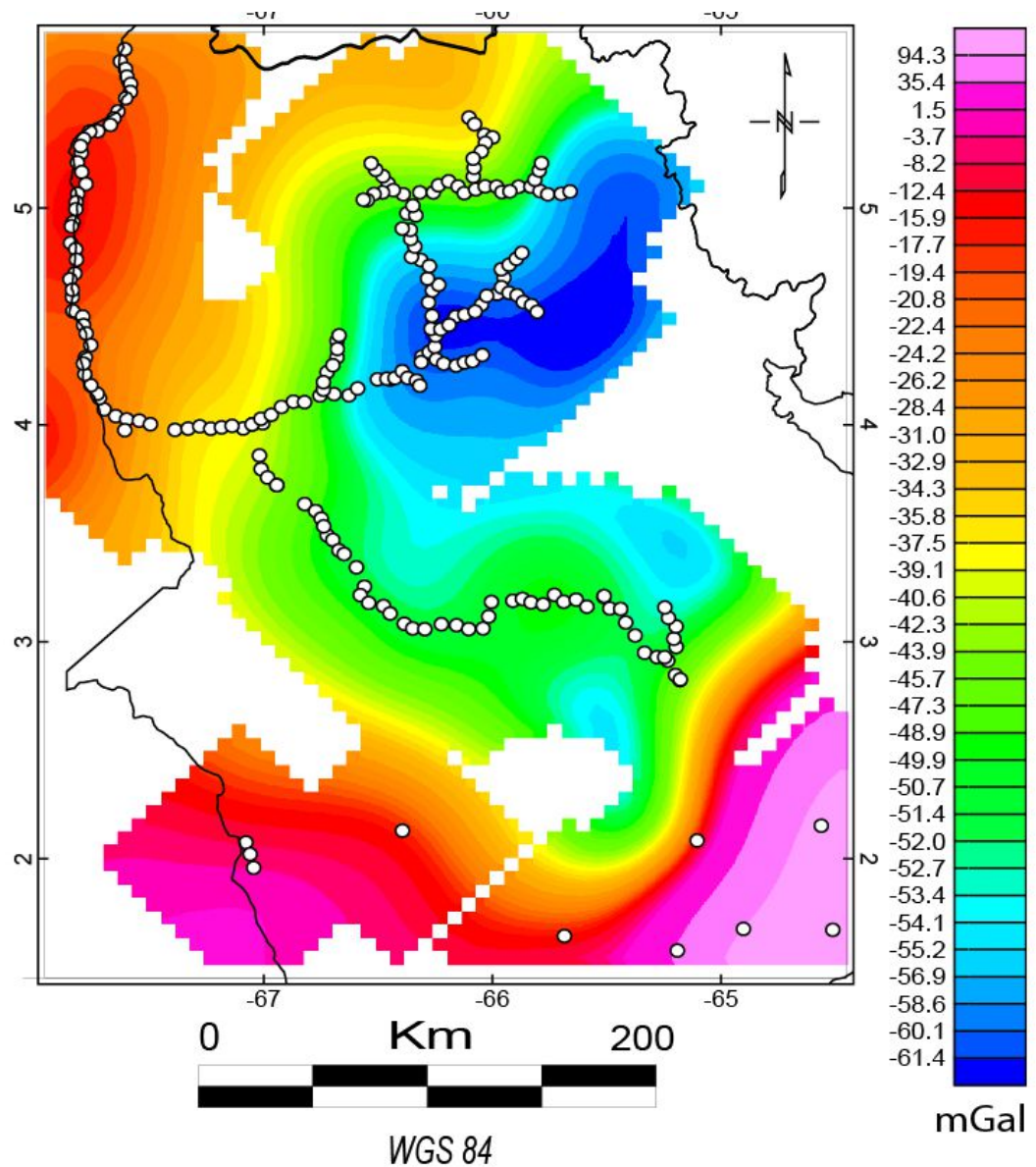


Figura 19. Mapa de anomalía de Bouguer regional

5.2.4 Componente residual del mapa de anomalía de Bouguer

La respuesta gravimétrica del mapa de la anomalía residual se muestra en la figura 20, donde comenzando por la zona NO del mapa (acotada por longitud -68° ; -67° y longitud 4° ; 5.5°) se puede observar que los contornos en esta zona son aproximadamente norte-sur, con un rango de anomalía de 15.3 mGal a 2.3 mGal;

posiblemente influenciados por el frente tectónico o zona de sutura mencionado anteriormente, pero ahora claramente diferenciado desde San Fernando de Atabapo hasta Puerto Ayacucho, resaltando un gradiente de 0.316 mGal/km.

La región que se encuentra entre la longitud -67° y las latitudes 4° ; 5° se observa un máximo local, el rango de valores en esta zona se encuentra entre 1.3 mGal a -0.2 mGal. Los contornos se alinean en dirección $N45^{\circ}E$, que de acuerdo con la geología, es la influencia del Granito del Parguaza que se extiende de manera irregular desde el norte del estado Amazonas en contraste con las rocas silíceas intrusivas del Grupo Cuchivero o con rocas del Grupo Roraima.

Entre las longitudes -67° ; -66° y las latitudes 4° ; 5° se puede observar un mínimo local, con valores entre -1.2 mGal a -2.1 mGal que se alinea con una tendencia casi norte-sur; el cual podría ser por la presencia las Formaciones Moriche, Cinaruco y Esmeralda. El gradiente en esta zona hacia el cauce del río Ventuari es de 0.086 mGal/km y hacia el este con el Granito del Parguaza es de 0.15 mGal/km.

En la zona central, en dirección oeste-este sobre en la latitud 3° se resaltan tres eventos: el primero un mínimo local, con un rango de valores entre -0.8 a -1.7 mGal que podría ser por el contraste entre los aluviones de la cuenca del río Orinoco con las rocas intrusivas de edad Proterozoico. El segundo un máximo local, entre 1.3 mGal a -0.2 mGal, localizado al sur del cerro Duida y al norte el pueblo de La Esmeralda; que podría estar asociado al Grupo Roraima en contraste con roca silícea intrusiva del Grupo Cuchivero. El tercer evento que se observa en esta dirección está asociado con el contraste entre, el terreno metamórfico-plutónico de San Carlos y la Asociación Cuchivero que se observa en afloramientos dispersos a través del estado Amazonas. Los contornos en esta zona se alinean en dirección NO-SE.

Por último, en la zona sur, partiendo desde el oeste se observan las estaciones en las adyacencias del pueblo San Carlos de Río Negro, donde a pesar de la poca cantidad de estaciones en la zona se marca un ligero contraste; mostrando anomalías entre un rango de 0.4 mGal a 1.5 mGal con contornos alineados en este-oeste siguiendo la

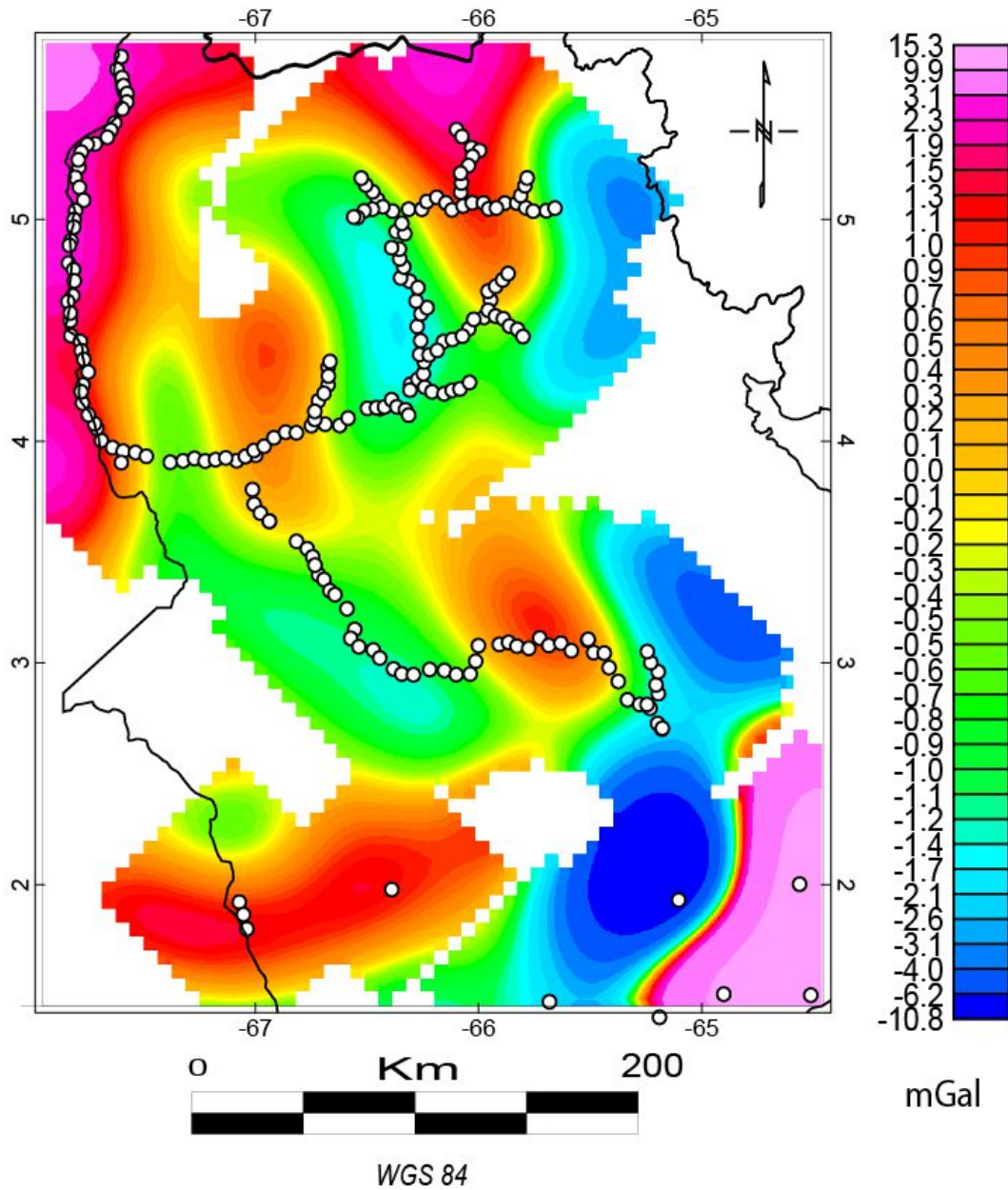


Figura 20. Mapa de anomalía de Bouguer residual

dirección de la falla de rumbo en la zona. En la región SE, se observa un fuerte contraste, que varía entre 15.3 mGal a -10.8 mGal con contornos alineados en dirección NE-SO que concuerda con la tendencia estructural de la zona. La relación entre el mínimo, de rango -10.8 mGal a -2.1 mGal (acotada por longitud -66°; -65° y

latitud 1.5°; 2°) y máximo de 1 mGal a 15.3 mGal (acotada por longitud -65°; -64.5° y latitud 1.5°; 2°) sea posiblemente debido a la presencia de sedimentos pre-Roraima dentro del Grupo Cuchivero.

5.2 Análisis espectral

En el espectro (figura 21), se observa que las longitudes de onda larga van desde 0.0018 rad/km a 0.0092 rad/km, la cual son generadas por fuentes profundas que de acuerdo con la tabla 3 se le asocia una profundidad de 41.85 km, correspondiente a una medida promedio de Moho para la región de estudio; entrando en el rango de profundidades (entre 36 km a 42 km) mostradas por Niu *et al* (2007) de acuerdo a su estudio con funciones receptoras. Asimismo, la segunda y tercera interfaces se encuentran comprendidas entre 0.011 rad/km a 0.023 rad/km y 0.025 rad/km a 0.042 rad/km, respectivamente; asociadas a una profundidad de 31.39 km para la intermedia y 16.24 km para la somera, tal y como lo expresa la tabla 3.

La profundidad intermedia descrita en el párrafo anterior, se podrían a asociar de acuerdo a lo estudiado por Schmitz *et al* (2002), a una zona de baja velocidad que se localiza entre un rango de profundidad de 25 a 35 km, explicada por un proceso de diferenciación en la corteza durante los ciclos magnéticos en el Arqueano y Proterozoico. Por su parte, la profundidad somera puede relacionar con la discontinuidad de Conrad, la cual de acuerdo con Schmitz *et al* (2002) puede llegar hasta unos 20 km de profundidad.

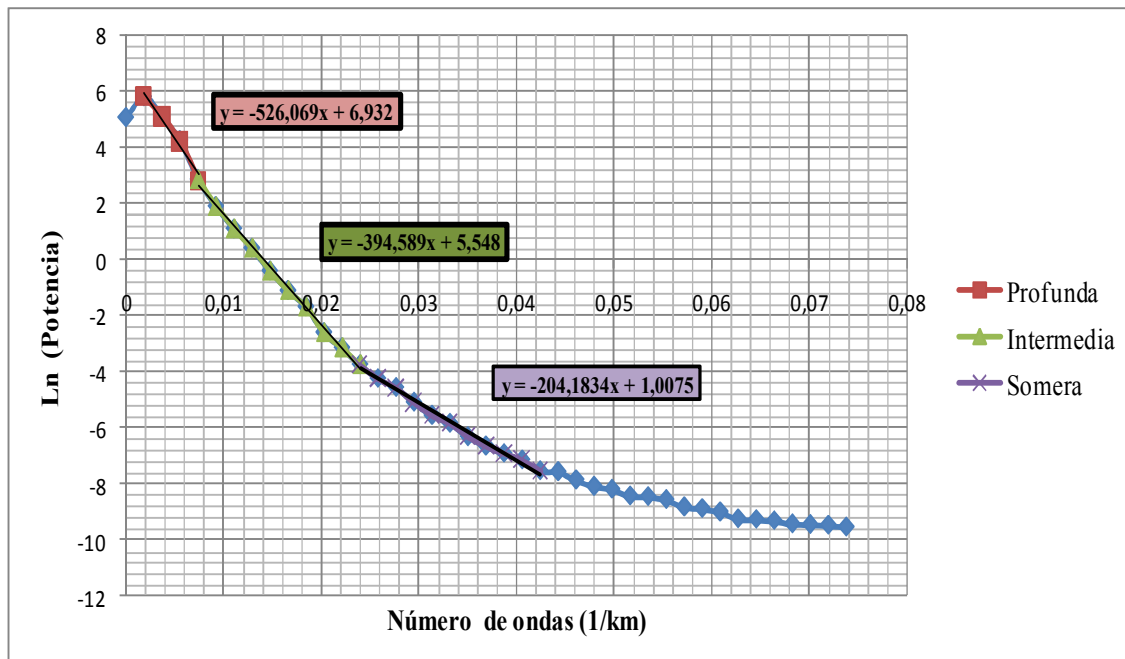


Figura 21. Espectro de potencia de la anomalía de Bouguer

Tabla 3. Profundidad de los eventos de acuerdo al espectro de potencia de la anomalía de Bouguer

Evento	Pendiente	Profundidad (Km)
Profundo	-526.06	41.86
Intermedio	-394.50	31.39
Somero	-204.18	16.25

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis estadístico permitió obtener el control de calidad de las 231 estaciones (ver en Apéndice A), tanto las que se adquirió en las campañas del 2015 sobre los ríos: Orinoco y Ventuari; como las recuperadas de la campaña del año 1991. Cabe destacar que en el diagrama de caja y bigotes de la anomalía de Bouguer se notaron cuatro valores atípicos, los cuales se asociaron con rasgos geológicos como el contacto en la zona sur del estado Amazonas.
- En el mapa de anomalía de Bouguer se observan los altos valores de anomalía al NO y al SE de, -13.1 mGal y 129.24 mGal, respectivamente. El primero asociado al Granito Rapakivi del Parguaza y el segundo al contacto entre unidades geológicas y un posible adelgazamiento cortical. En la zona central del mapa, se observan los valores mínimos los cuales se pueden asociar a la cuenca del río Parú donde se observan rocas del Grupo Cuchivero en contacto con un granito calco-alcálico de edad Proterozoico Temprano.
- Las principales estructuras geológicas que producen las anomalías en los mapas se identificaron como: el Granito Rapakivi del Parguaza, los sedimentos pre-Roraima y así como las rocas intrusivas del Grupo Cuchivero.
- Del análisis espectral se pueden identificar tres cortes, los cuales se asocian a 41.86 km a Moho, 31.39 km a una zona de baja velocidad identificada por sísmica de refracción de alto ángulo según estudios de Schmitz *et al* (2002) y la discontinuidad de Conrad a 16.24 km.

- La distribución espacial de las estaciones bases sobre el área de estudio, aporta un beneficio logístico y referencial para futuras campañas de levantamientos gravimétricos o geodésicos que permitan estudiar el estado Amazonas con mayor profundidad.
- Se recomienda integrar los datos con un levantamiento magnético de detalle sobre todo con fines mineros para identificar los recursos naturales de nuestro país y aportar información geológica sobre el estado Amazonas.
- Se recomienda extender al sur del estado Amazonas, los levantamientos gravimétricos utilizando gravímetros digitales y amarre a la estación de gravedad absoluta de Puerto Ayacucho

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arocha, F. (2016). *Diseño y adquisición de una red de referencia gravimétrica nacional en el centro-oriente venezolano*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica.
- Barrios, F., Cordaniy K. Kawashita (1985). *Caracterización geocronológica del Territorio Federal Amazonas, Venezuela*. Memorias del VI Congreso Geológico de Venezuela. Tomo III.
- Bonilla, A., Frantz, J.C., Charao-Marques, J., Cramer, T., Franco, J.A., Amaya, *Magnetismo Rapakivi en la cuenca media del río Inírida, Departamento de Guainía, Colombia*. Boletín de Geología. Vol. 38, N°1, enero-abril 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016001>
- Cavada, J. (2015). *Ejemplo de uso del programa MT80TW para cálculos de mareas terrestres*. Version 3.
- Gaudette, H., Olszewski, W., (1985). *Geochronology of the Basement Rock Amazon Territory, Venezuela and Tectonic Evolution of the Western Guiana Shield*. Geol in Mijnbouw, V 64, p. 131-143.
- GEOSOFT INC., (2013). Geosoft Oasis montaj: Software de Mapeo y Procesamiento de Datos de las Ciencias de la Tierra. En GEOSOFT. Toronto. 153 (2007). *Montaj MAGMAP Filtering: 2D frequency domain processing of potential field data extension for Oasis montaj v.4*. Tutorial. Canada: 82 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.
- Hackley, P.C., F. Urbani, A.W. Karlsen y C. P. Garrity (2006) Mapa Geológico de Venezuela. Escala 1:750.000. US. Geological Survey, file report 2006-1109. [<http://pubs.usgs.gov/of/2006/1109/>]
- Hinze, W. J., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G., Winéster, D. (2005). *New standards for reducing gravity data: The North American gravity database*. *Geophysics*, 70(4), J25-J32

- Instituto Nacional de Estadística (INE).
<http://www.ine.gov.ve/documentos/see/sintesisestadistica2013/estados/Amazonas/documentos/SituacionFisica.htm>. Consultado: Julio 2016.
- Kane, M.F., (1962). *A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer*. Geophysics. V 27, No 4, pp. 455–462.
- La Fehr, T. R., (1991). Standardization in gravity reduction. Geophysics, 56(8), 1170-1178.
- Linares, F., Arráiz, D., Orhiehuela, N. (2015). *Mapa de anomalías de Bouguer de Venezuela derivado del modelo combinado EIGEN-6C4*. Ciencias Aplicadas Latinoamérica. 2015,2. Doi: 10.3997 / 2352 - 8281.20150006
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. 2nded .381 P. Cambridge, New York, Melbourne.
- Mariita, N.O. (2007). The gravity method. Presentado en el curso de Surface Exploration for Geothermal Resources, Lake Naivasha Kenya.
- Martínez, L., Belisario, V (2009). *Interpretación geológica de superficie mediante el uso de sensores remotos y su aplicación en la detección de posibles anomalías de uranio en la zona NO del estado Amazonas*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geología.
- Mendoza, S. V., (1977). *Evolución Tectónica del Escudo de Guayana*. II Cong. Latinoamericano Geol. Caracas, 1973. MEM Pub. Esp. N 7, V3, p2237-2270.
- Mendoza, S. V., (1977). *Petrogénesis de rocas volcánicas (piroclásticas) precámbricas del noroeste del Escudo de Guayana*. V Cong. Geol. Venezolano. T 2, p. 555-589
- Mendoza, V. S. (2012). *Geología de Venezuela. Evolución geológica, recursos minerales el Escudo de Guayana y revisión del precámbrico mundial*. Tomo I. Bogotá.
- Nagy D., (1966). *The Prism Method for Terrain Corrections Using Digital Computers*. Pure Appl. Geophys. 63, 31–39. pag 10.
- Narváez, L. (2012). *Modelo de fuentes de anomalías Geomagnéticas de Campo Total asociadas al estado de la cámara magmática del volcán Galeras*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Bogotá, Colombia.

- Niu, F., T. Bravo, G. Pavlis, F. Vernon, H. Rendon, M. Bezada, A. Levander (2007). *Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela*. Journal of Geophysical Research (JGR), 112, B11308, doi:10.1029/2006JB004802.
- Olaya, V (2014). *Sistema de información geográfica*. <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html>. Consultado: Abril 2016.
- Orihuela, N. (2014). *Historia de la gravimetría en Venezuela*. Revista venezolana de Ciencias de la Tierra. 46 (1) :44-57.
- Pratt, G. (2004). *Applied Geophysics (Geology319/829)*. Departament of Geological Sciences and Geological Engineering. Queen`s University.
- Schmitz, M., Chalbaud, D., Castillo, J., Izarra, C. (2002). *The crustal structure of the Guayana Shield, Venezuela, from seismic refraction and gravity data*. Tectonophysics. 345 (2002) 103-118.
- SCINTREX Limited., (2012). *CG-5 Scintrex AutogravTM System Operation Manual*. Canada: SCINTREX Limited.
- Sidder, G. B. y S. V. Mendoza. (1995). *Geology of the Venezuelan Guyana Shield and its relation to the geology of the entire Guyana Shield*. U.S. Geological Survey Bulletin 2124:B1-B41.
- Soares,M.(1985).*Estudio petrográfico de la estructura alcalina La Churuata, Territorio Federal Amazonas*. Memorias del VI Congreso Geológico de Venezuela.
- Spector A., Grant F.S (1970) *Statistical models for interpreting Aeromagnetic data*. Geophysics. 35(2), 293-302.
- Telford, W. M., L. M., Geldart, R. P. y Sheriff (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 2nd Ed. 760P.

APÉNDICE A: Base de datos de estaciones en el estado Amazonas

Leyenda:

	Estaciones bases		Estaciones recuperadas
--	------------------	--	------------------------

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
5000 (Ayacucho)	-67.6263890	5.6661110	86.00	978043.821	-20.951
5001 (Samariapo)	-67.7969437	5.2408333	79.80	978043.807	-14.905
5002 (San Pedro)	-67.8366699	4.5711112	85.93	978029.210	-18.012
5003 (Atabapo)	-67.6994476	4.0486112	85.81	978017.877	-22.334
5004 (Santa Barbara)	-67.0984726	3.9592223	85.26	978002.720	-36.425
5005 (Carida)	-66.9539872	3.6955547	85.54	977992.754	-43.168
5006 (San Antonio)	-66.7366353	3.4621881	92.10	977982.858	-49.172
5007 Cariche	-66.4045897	3.0505283	103.70	977970.361	-55.255
5008 (Laulau)	-66.0280500	3.1511111	103.32	977973.111	-53.557
5009 (La Esmeralda)	-65.5430527	3.1730556	107.83	977974.736	-51.321
5010 (Ocamo)	-65.2161102	2.7858334	118.43	977972.140	-48.167
5011 Macabana (Porvenir)	-66.4622192	4.1849999	108.00	977979.429	-58.228
5012	-66.3249969	4.2908335	100.00	977978.694	-61.899
5013 Puerto Limón	-66.2949982	4.5419445	118.00	977980.238	-60.337
5014 Maco	-66.3872223	4.9558334	124.00	977997.435	-48.109
5015 San Antonio de Manapiare (Laja)	-66.0993042	5.1253610	127.00	978006.664	-40.976
5016 Manapiare	-66.0500259	5.3191390	141.00	978019.842	-28.178

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7001	-67.8133316	5.1962500	75.31	978044.716	-14.146
7002	-67.7947235	5.1520834	73.09	978044.480	-14.102
7003	-67.7763901	5.0961390	74.51	978043.898	-13.509
7004	-67.8123322	5.0514400	73.98	978041.949	-14.851
7005	-67.8189700	5.0119222	74.48	978041.931	-14.147
7006	-67.8205032	4.9791112	70.82	978042.364	-13.916
7007	-67.8330002	4.9194169	71.10	978040.320	-14.979
7008	-67.8438873	4.8222222	77.37	978039.332	-13.258
7009	-67.8402786	4.9000001	76.52	978039.169	-14.772
7010	-67.8216629	4.7936110	73.22	978038.607	-14.365
7011	-67.8183365	4.7447224	74.72	978037.724	-14.224
7012	-67.8252792	4.6808333	77.42	978033.614	-16.860
7013	-67.8472214	4.6538887	73.08	978035.256	-15.675
7014	-67.8363876	4.6050000	73.74	978033.505	-16.589
7016	-67.8344421	4.5063887	79.30	978028.825	-18.772
7017	-67.7916641	4.4805555	79.63	978026.780	-20.389
7018	-67.7880554	4.4405556	75.83	978027.473	-19.880
7019	-67.7766647	4.4019446	79.53	978027.270	-18.826
7020	-67.7572250	4.3477778	80.44	978023.878	-21.300
7021	-67.7805557	4.2908335	77.01	978025.079	-19.996
7026	-67.7200012	4.1016665	79.16	978021.688	-20.502
7025	-67.7294464	4.1216664	79.78	978022.374	-19.952
7024	-67.7569427	4.1608334	79.58	978021.991	-20.858
7023	-67.7830582	4.2125001	79.86	978022.254	-21.217
7022	-67.7890881	4.2617347	80.86	978022.360	-21.571
7027	-67.6497192	4.0177779	78.77	978021.104	-20.094
7028	-67.6025009	4.0022221	76.63	978020.102	-21.322

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7029	-67.5477753	3.9963889	76.96	978017.145	-24.141
7030	-67.4997253	3.9797223	77.25	978017.038	-23.983
7031	-67.6108100	3.9525001	81.19	978012.384	-27.525
7032	-67.3936081	3.9533334	80.64	977999.595	-40.434
7033	-67.3366699	3.9591668	78.36	978000.308	-40.151
7034	-67.2861099	3.9697223	78.21	977997.311	-43.309
7035	-67.2388916	3.9586110	79.53	977989.837	-50.385
7036	-67.1924973	3.9644444	79.63	978013.706	-26.604
7037	-67.1466675	3.9716666	81.04	978008.876	-31.248
7038	-67.0563889	3.9794400	82.58	978004.894	-35.026
7039	-67.0138855	3.9833400	84.52	978002.689	-36.899
7040	-67.0286102	3.8336110	84.44	977997.145	-40.622
7041	-67.0213852	3.7702777	84.74	977997.409	-39.543
7042	-66.9938889	3.7311110	85.29	977996.490	-39.894
7043	-66.9538879	3.6955554	90.06	977996.673	-38.366
7044	-66.8336105	3.6075001	86.69	977986.967	-47.722
7045	-66.7863922	3.5752778	87.72	977980.687	-53.442
7046	-66.7622223	3.5397222	87.58	977977.876	-55.885
7047	-66.7516632	3.5038888	88.14	977979.547	-53.710
7048	-66.7122192	3.4408333	105.38	977981.387	-47.873
7049	-66.6861115	3.3922222	89.33	977978.557	-53.260
7050	-66.6636124	3.3750000	103.00	977978.332	-50.697
7051	-66.6105576	3.3133333	103.00	977975.940	-52.443
7052	-66.5763855	3.2233334	91.30	977974.392	-55.310
7053	-66.5944443	3.1841667	117.19	977976.058	-48.227
7054	-66.5580521	3.1477778	111.57	977977.372	-47.664
7055	-66.4941635	3.1333334	113.20	977974.199	-50.371

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7056	-66.4655533	3.0983334	113.65	977974.851	-49.289
7057	-66.3680573	3.0286112	94.47	977974.201	-52.974
7058	-66.3161087	3.0252779	95.47	977974.589	-52.359
7059	-66.2444800	3.0480556	95.58	977976.520	-50.624
7060	-66.1788864	3.0433333	95.82	977975.719	-51.334
7061	-66.1266632	3.0252779	95.95	977974.592	-52.264
7062	-66.0647202	3.0277777	96.35	977976.355	-50.446
7063	-66.0402756	3.0836110	98.75	977975.863	-51.013
7064	-65.9355500	3.1563890	99.43	977978.948	-48.514
7065	-65.8941650	3.1647222	101.01	977978.470	-48.775
7066	-65.8574982	3.1483333	105.12	977977.296	-49.005
7067	-65.8047256	3.1388888	101.13	977980.403	-46.569
7068	-65.7561111	3.1833300	102.06	977980.110	-47.131
7069	-65.7158356	3.1511111	102.59	977978.822	-48.004
7070	-65.6622238	3.1605556	103.96	977976.519	-50.142
7071	-65.6161118	3.1277700	103.68	977977.545	-48.869
7072	-65.5172195	3.1191666	104.84	977975.382	-50.724
7073	-65.4702759	3.1166666	105.53	977975.797	-50.150
7074	-65.4488907	3.0536110	105.76	977975.694	-49.596
7075	-65.4086075	2.9933333	107.62	977970.643	-53.715
7076	-65.3680573	2.9133334	108.60	977971.333	-52.094
7077	-65.3144500	2.8930554	109.77	977973.123	-49.891
7078	-65.2680588	2.8763888	114.57	977970.063	-51.863
7079	-65.2350006	2.8097222	112.20	977974.885	-46.846
7080	-65.2813873	2.8924999	110.21	977971.434	-51.489
7081	-65.2313919	2.9397223	111.86	977971.210	-51.758
7082	-65.2413864	2.9780555	113.14	977968.575	-54.563

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7083	-65.2313919	3.0347223	115.19	977969.431	-53.781
7084	-65.2644424	3.0747223	115.68	977968.552	-55.009
7085	-65.2797241	3.1230555	117.60	977968.561	-55.092
7086	-67.6041641	5.6302776	65.83	978044.829	-23.258
7087	-67.5980530	5.5952778	64.38	978047.299	-20.459
7088	-67.5822220	5.5605555	72.71	978047.881	-17.642
7089	-67.5833359	5.5238891	73.18	978046.169	-18.627
7090	-67.6036148	5.4941669	73.63	978044.519	-19.677
7091	-67.6069412	5.7222000	69.55	978045.193	-23.798
7092	-67.6374969	5.4330554	62.83	978047.443	-17.825
7093	-67.6547241	5.4011111	77.56	978045.044	-16.799
7094	-67.6702805	5.3705554	78.92	978043.153	-17.910
7095	-67.7244415	5.3419442	83.95	978042.395	-17.204
7096	-67.7600021	5.3394446	77.31	978042.575	-18.258
7097	-67.7863922	5.3058333	82.54	978041.960	-17.288
7098	-67.7997208	5.2725000	73.99	978044.139	-16.232
7200	-67.0600943	3.9779759	83.89	978005.030	-34.615
7201	-67.0216742	4.0039186	85.53	978003.843	-35.805
7202	-66.9767216	4.0222002	84.86	978001.290	-38.719
7203	-66.9326523	4.0589395	85.15	978000.805	-39.615
7204	-66.8807839	4.0832306	85.36	977995.355	-45.332
7205	-66.8329453	4.0807213	85.96	977989.704	-50.834
7206	-66.7661812	4.1113362	88.36	977990.729	-49.738
7207	-66.7052437	4.1175139	87.10	977982.514	-58.280
7208	-66.6406770	4.1119096	90.94	977984.875	-55.121
7209	-66.6032135	4.1437092	89.23	977983.905	-56.836
7210	-66.5172514	4.1860689	88.62	977983.218	-58.193

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7211	-66.4766753	4.1888778	87.57	977982.402	-59.251
7212	-66.4415202	4.1918501	89.10	977979.640	-61.753
7213	-66.4099078	4.2231655	90.32	977982.346	-59.221
7214	-66.3278504	4.2648142	89.73	977980.623	-61.612
7215	-66.2930952	4.3121568	91.33	977979.081	-63.478
7216	-66.2682773	4.3357852	88.81	977978.595	-64.776
7217	-66.2644174	4.3877719	90.34	977979.618	-64.164
7218	-66.2846864	4.4200366	89.64	977977.552	-66.813
7219	-66.2799489	4.4800370	90.66	977978.338	-66.664
7220	-66.2783953	4.5968304	93.37	977980.007	-66.133
7221	-66.2506518	4.6237044	94.17	977982.298	-64.074
7222	-66.2993513	4.6527301	95.33	977987.326	-59.243
7224	-66.3281218	4.7390688	95.99	977994.160	-53.553
7223	-66.2911277	4.7109001	94.95	977988.961	-58.537
7225	-66.3680070	4.7537361	96.89	977992.160	-55.596
7226	-66.3536273	4.8015800	97.35	977995.301	-53.082
7227	-66.3714490	4.8368329	98.26	977998.840	-49.901
7228	-66.3727844	4.8793572	98.46	978000.296	-49.053
7229	-66.3486515	4.9465670	95.15	977999.107	-51.917
7230	-66.3614778	4.9913329	99.73	978002.612	-48.224
7231	-66.3311328	5.0527792	101.11	978003.809	-47.729
7232	-66.2727234	5.0527051	85.96	978000.871	-53.608
7233	-66.2501115	5.0855748	98.89	977999.518	-52.965
7234	-66.2058595	5.1039397	97.77	978003.309	-49.684
7235	-66.1652534	5.0796364	98.99	978006.667	-45.705
7236	-66.1387917	5.0487039	100.98	978000.745	-50.755
7237	-66.0889870	5.0658613	100.51	978003.518	-48.345

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7238	-66.0955955	5.1662942	102.58	978018.869	-34.202
7243	-66.1166664	5.3991077	105.58	978021.321	-35.022
7244	-66.0926272	5.3683914	103.87	978016.968	-39.188
7242	-66.0147336	5.3067447	104.51	978014.942	-40.061
7241	-66.0461464	5.2816696	104.17	978021.734	-32.918
7240	-66.0640593	5.2417223	103.90	978026.217	-27.830
7239	-66.0993411	5.2085871	102.42	978020.167	-33.621
7245	-66.0481327	5.0795226	101.52	978007.739	-44.146
7246	-65.9986538	5.0785565	101.06	978009.397	-42.562
7249	-65.9035730	5.0773138	105.90	978007.514	-43.499
7250	-65.8505056	5.0775597	110.47	978003.234	-46.903
7251	-65.8105439	5.0567953	105.21	977995.699	-55.127
7252	-65.7775497	5.0416706	102.98	977989.087	-61.930
7253	-65.7191749	5.0435255	104.62	977990.639	-60.102
7254	-65.6806625	5.0544809	107.32	977989.677	-60.726
7247	-65.9758573	5.0527910	103.70	978006.656	-44.390
7248	-65.9410950	5.0562048	104.44	978006.929	-44.029
7255	-65.8330151	5.1096494	107.89	978000.287	-50.864
7256	-65.8136691	5.1524361	104.27	977995.825	-56.710
7257	-65.8038005	5.1864669	106.62	977996.699	-55.939
7258	-66.4024813	5.0444926	97.08	978005.468	-46.716
7260	-66.4682398	5.0944774	98.58	978009.830	-42.857
7261	-66.4906365	5.1291470	102.63	978009.961	-42.504
7262	-66.5216329	5.1588498	110.52	978012.684	-38.738
7263	-66.5412863	5.1889223	102.81	978011.750	-41.645
7268	-66.4074554	4.8852583	95.49	977994.452	-55.562
7259	-66.4458730	5.0638172	97.08	978006.799	-45.690

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7264	-66.4921917	5.0536199	102.78	978005.322	-45.914
7265	-66.5293781	5.0460801	105.53	978001.696	-48.893
7266	-66.5587575	5.0177436	104.33	978000.844	-49.531
7267	-66.5754806	5.0198977	102.49	978001.393	-49.370
7269	-66.2424973	4.4176303	91.83	977978.970	-64.933
7271	-66.1788634	4.4757608	93.28	977979.350	-65.082
7272	-66.1389452	4.4848051	90.20	977979.350	-65.816
7274	-66.0661962	4.5308052	91.71	977980.132	-65.390
7276	-65.9981873	4.5802620	93.45	977988.280	-57.611
7278	-65.9685659	4.6554981	95.37	977994.860	-51.746
7279	-65.9799932	4.6944255	96.25	977999.327	-47.679
7280	-65.9460020	4.7151924	97.83	977992.711	-54.297
7281	-65.9147083	4.7428528	98.14	977990.599	-56.758
7282	-65.8905716	4.7706129	98.88	977986.993	-60.636
7270	-66.2064870	4.4372916	90.15	977977.930	-66.574
7273	-66.0942266	4.4989697	92.07	977977.103	-67.898
7275	-66.0435265	4.5718503	92.54	977983.786	-62.161
7277	-65.9794537	4.6112432	96.74	977996.659	-49.040
7283	-65.9472176	4.5857675	95.18	977990.884	-54.751
7284	-65.9123998	4.5740924	96.72	977982.408	-62.761
7285	-65.8853416	4.5421667	97.17	977986.652	-57.975
7286	-65.8497414	4.5271939	99.33	977982.464	-61.535
7287	-65.8256322	4.4963081	102.92	977975.450	-67.426
7288	-66.2625649	4.2772143	88.41	977979.548	-63.110
7289	-66.2305778	4.2573788	89.35	977982.450	-59.759
7290	-66.1768051	4.2484291	100.94	977980.593	-59.252
7291	-66.1406229	4.2632043	96.93	977980.636	-60.179

Estación	Longitud	Latitud	cota (m)	Gravedad Observada (mGal)	Anomalía de Bouguer (mGal)
7292	-66.1059826	4.2693799	96.01	977983.146	-57.929
7293	-66.0635438	4.2971592	97.94	977984.263	-56.811
7294	-66.3868254	4.1921631	89.79	977979.121	-62.141
7295	-66.3483975	4.1794340	88.89	977979.616	-61.653
7296	-66.3343338	4.1559578	91.54	977979.056	-61.390
7297	-66.7513738	4.1385391	84.60	977992.318	-49.233
7299	-66.7351017	4.2196133	85.65	977995.672	-46.736
7301	-66.6918139	4.2886747	87.97	977991.560	-51.318
7303	-66.6916306	4.3655538	89.16	977999.406	-44.283
7298	-66.7510793	4.1735670	85.17	977997.345	-44.551
7300	-66.7099247	4.2518269	90.35	977995.027	-46.895
7302	-66.6900429	4.3273816	89.24	977996.487	-46.666
7304	-66.6827691	4.3906073	90.31	977999.208	-44.625
Ocamo	-65.2142306	2.7891056	139.26	977975.084	-41.138
Esmeralda	-65.5415167	3.1768750	129.19	977971.492	-50.388
Río Negro	-67.0568861	1.9189056	98.03	978022.522	4.635
Aux 1	-64.9452750	1.6317778	496.10	978045.970	108.091
0039	-64.5604361	1.6265361	540.04	978057.309	128.120
0048	-64.6088556	2.1090389	538.26	978061.612	129.239
174-1	-65.1437889	2.0417194	147.65	977976.242	-32.637
Chapazon	-67.0900000	2.0361111	96.95	978009.749	-9.022
Zolano	-67.0719444	1.9819444	97.86	978009.105	-9.151
Boca Siapa	-66.4144444	2.0900000	97.22	978006.356	-12.738
Siapa A	-65.7166667	1.6000000	166.70	977988.223	-14.386
Siapa B	-65.2300000	1.5316667	506.49	977979.721	44.444

APÉNDICE B: Mapa geológico-estructural con respuesta de la AB

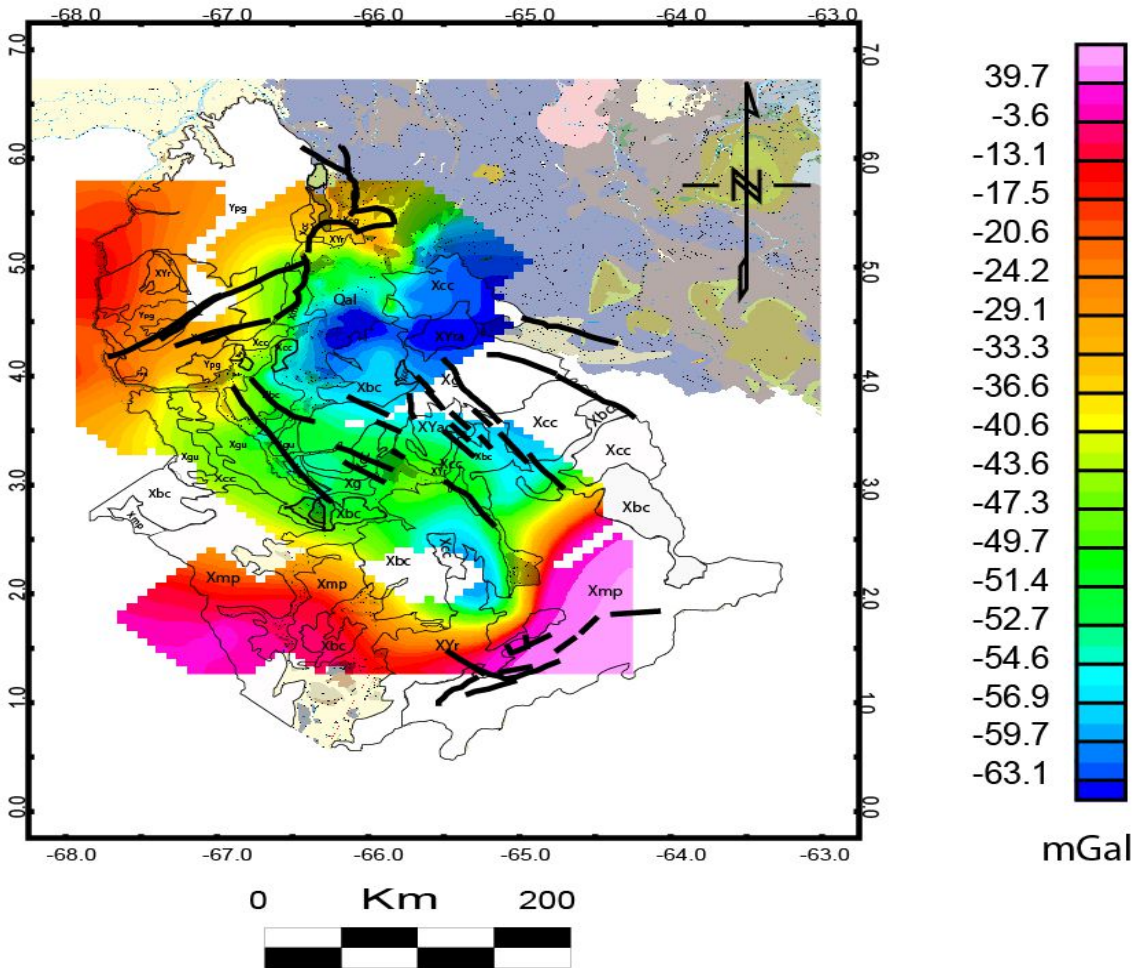


Figura 22. Mapa geológico-estructural con respuesta gravimétrica

Qal	Aluvión (Pleistoceno a Holoceno)	Xcg	Rocas silíceas intrusivas del Grupo Cuchivero (Proterozoico Temprano)
Ypg	Parguaza Granito (Proterozoico Medio)	Xmp	San Carlos, Terreno metamórfico-plutónico (Proterozoico Temprano)
Xbc	Complejo de basamento, s.d. (Proterozoico Temprano)	Ypg	Parguaza Granito (Proterozoico Medio)
Xmp	San Carlos, Terreno metamórfico-plutónico (Proterozoico Temprano)	Xbc	Complejo de basamento, s.d. (Proterozoico Temprano)
Xgu	Rocas intrusivas, s.d. (Proterozoico Temprano)	Ylg	Rocas intrusivas silíceas (Proterozoico Medio)
Xcc	Caicara Fm., Cuchivero Grp. (Proterozoico Temprano)		
XYra	Roraima Grp., Superior (Proterozoico temprano a medio)		
XYrg	Roraima Grp., Medio (Proterozoico temprano a medio)		
XYrc	Roraima Grp., Inferior (Proterozoico temprano a medio)		
XYr	Roraima Grp., sedimentos pre-Roraima, s.d. (Proterozoico temprano a medio)		