

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **MODELADO GEOFÍSICO INTEGRADO DE LA CUENCA BARINAS-APURE**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela por el  
Br. Cárdenas Castilla, Henry Miguel.  
Para optar por el título de Ingeniero Geofísico.

Caracas; febrero de 2015

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **MODELADO GEOFISICO INTEGRADO DE LA CUENCA BARINAS-APURE**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Antonio Ughi

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela por el  
Br. Cárdenas Castilla, Henry Miguel.  
Para optar por el título de Ingeniero Geofísico.

Caracas; febrero de 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 Bachiller Henry M. Cárdenas C., titulado:

**“MODELADO GEOFISICO INTEGRADO DE LA CUENCA  
BARINAS-APURE.”**

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



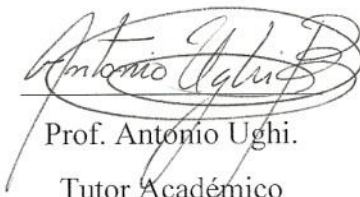
Prof. Ignacio Mederos

Jurado



Prof. JancKarlos Reyes

Jurado



Prof. Antonio Ughi.  
Tutor Académico

## DEDICATORIA

*El presente trabajo está dedicado en primer lugar a Dios, a mis hermanas, a mi abuelo y en especial a mi madre, por ser las principales personas que me han apoyado en mis sueños y me animan a seguir intentándolo día a día y conquistar mis sueños.*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por estar siempre presente, poner en mi camino todas esas pruebas necesarias para que hoy por hoy esté donde estoy y por llevarme por el camino que debo recorrer agarrado de su mano.

A mi mamá, por ser madre y padre a la vez, por estar siempre presente, por sacrificar tanto por nosotros; quien me ha dado los mejores consejos, incluso sin yo pedirselos, la que me ha mostrado el camino para ser una mejor persona, y sobre todo, por ser mi ejemplo a seguir en cuanto a superación de vida, a ti madre por ser la mujer que no le importó desvelarse cuando estuve enfermo y la que no se deja de preocupar por mí, este trabajo y lo que simboliza es una manera de retribuirte todo lo que has hecho por mí, darte gracias no basta, y cada vez que alcance un triunfo la primera persona a quien se lo voy a deber es a ti.

A mi casa de estudios, y mi segundo hogar, la Universidad Central de Venezuela, un honor poder decir que me formé en “la casa que vence las sombras”, porque en ella he vivido los mejores años de mi vida.

A mis hermanas Susana y Sheila que no dejo de admirar, a Susana por la disciplina con la que realiza cada actividad y con la que rige casi todos los aspectos de su vida, la que me repite casi a diario “con constancia disciplina y dedicación vas a alcanzar todos tus sueños” y a Sheila por ser una persona que siempre ha ido tras sus sueños, y quien me ha dado consejos de vida muy útiles los cuales aplico casi a diario.

Al profesor Antonio Ughi, por creer en mí, y a quien le debo no sólo este trabajo, con él fue con quien vi la primera materia de la especialización y con su manera de dictar las clases hizo que yo reafirmara mi decisión de que estaba en el camino correcto.

A Alberto Rizzitelli, Daisy Giménez y Matías Rizzitelli, por permitirme entrar en su familia y ser personas a quienes les tengo un gran aprecio, por ayudarme tanto, sin siquiera ellos saberlo, a Alberto por ser alguien a quien considero un padre, quien me apoya en mis estudios y vela por mi futuro, al igual que mi comadre Daisy, y a Matías, por más que mi ahijado lo considero mi hermanito, menor.

A la empresa Amundaray Instrumentos Geotécnicos C.A. y al gerente general José Luis Oliver por darme la oportunidad de aplicar todos los conocimientos aprendidos en mi casa de estudios, y a todo el personal que compone la empresa, en especial a Peggy Zerpa quien considero como una hermana y Moisés Araque por ser una persona que te ayuda cuando lo necesitas, y a Jennifer Bellardi por ser alguien que ha sabido motivarme cuando lo necesité.

A mis compañeros de la universidad, Ricardo Macero y Carlos Fuenmayor, y en especial a Dionisio González, a quien considero un hermano y por estar siempre en el momento indicado y compartir conmigo en las buenas y no tan buenas.

A los profesores Jesús González, José Cavada, Vincenzo de Lisa, Andrés Espeso, quienes más allá de ser profesores, se preocupan por sus estudiantes en la carrera, y velan porque seamos unos profesionales que destaquemos, en especial a Mariano Arnaiz, quien me ha ayudado con la elaboración de este trabajo, a quien no le preocupa sacar tiempo y explicarme o ayudarme cuando lo necesité y a los demás profesores del departamento, de quien he aprendido algo distinto a lo largo de mi carrera.

Gracias a mi padre que aunque ha sido una persona intermitente en mi vida te agradezco por todo lo que has hecho en mi vida, incluyendo lo bueno y lo malo. Ya que gracias a todo eso has hecho de mi hoy día una mejor persona.

Y por último a todas aquellas personas que siempre creyeron en que podría cumplir mis metas.

Por último y no menos importante, gracias a Andrea Zerpa quien siempre buscó la manera de apoyarme, darme ánimos y ayudarme durante la elaboración de este trabajo especial de grado. ¡Te Amo!

**Henry Miguel Cárdenas Castilla**  
**MODELADO GEOFISICO INTEGRADO DE LA CUENCA BARINAS-  
APURE.**

Tutor académico: Prof. Antonio Ughi. Trabajo Especial de Grado. U.C.V. Facultad de  
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Caracas  
Palabras Clave: Gravimetría, Cuenca Barinas Apure, satélite, modelado

**Resumen:** La cuenca Barinas-Apure se ubica en el noroccidente de Venezuela, en los estados homónimos, esta es una zona que posee una estructuración compleja debido a los eventos tectónicos que han ocurrido. El estudio de esta cuenca es de gran interés en cuanto a su explotación económica pues, en ella existen los principales yacimientos de hidrocarburos del país, siendo de significativa atracción para el estudio y comprensión de sus características.

A través de un modelado geofísico integrado de la cuenca, que abarca un área comprendida entre las longitudes 72°W y 66°W y las latitudes 6°N y 9°N, se utilizaron datos de gravimetría, líneas sísmicas previamente interpretadas, datos de magnetismo y perforaciones de pozo. A los datos gravimétricos se les realizó una separación regional residual, análisis espectral y Deconvolución de Euler, lo cual permitió estimar el espesor sedimentario.

Este modelo permitió identificar deformaciones generadas por la colisión entre el Bloque de Maracaibo y la Placa Suramericana; estas deformaciones se encuentran desde la discontinuidad de Moho hasta la cuenca sedimentaria, determinándose que el posible punto de flexión de la Placa Suramericana se ubica en el estado Apure.

Este Trabajo Especial de Grado toma en cuenta la importancia de integrar la información del área de estudio al realizar modelados geofísicos, y de esta manera contribuir a nutrir los modelos con resultados de mayor calidad.

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                                                      | <b>Pág.</b> |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|
| DEDICATORIA                                                          | iv          |
| AGRADECIMIENTOS                                                      | v           |
| RESUMEN                                                              | vii         |
| ÍNDICE DE FIGURAS                                                    | x           |
| ÍNDICES DE TABLAS                                                    | xii         |
| CAPÍTULO I                                                           |             |
| INTRODUCCIÓN                                                         | 1           |
| 1.1 Planteamiento del problema                                       | 1           |
| 1.2 Objetivos                                                        | 3           |
| 1.2.1 Objetivo general                                               | 3           |
| 1.2.2 Objetivos específicos                                          | 3           |
| 1.3 Justificación                                                    | 3           |
| 1.4 Ubicación del área de estudio                                    | 4           |
| CAPÍTULO II                                                          |             |
| MARCO GEOLÓGICO                                                      | 5           |
| 2.1 Los Andes de Mérida                                              | 5           |
| 2.2 La cuenca Barinas-Apure                                          | 6           |
| 2.2.1 Estratigrafía de la cuenca Barinas-Apure                       | 7           |
| 2.3 Arco de El Baúl                                                  | 13          |
| 2.4 Basamento Cristalino                                             | 14          |
| 2.5 Evolución geodinámica de la cuenca Barinas-Apure                 | 17          |
| CAPÍTULO III                                                         |             |
| MÉTODO                                                               | 19          |
| 3.1 Primera etapa: Recopilación de la información                    | 19          |
| 3.2 Segunda etapa: Procesamiento de datos gravimétricos              | 24          |
| 3.3 Tercera etapa: Interpretación de la información                  | 27          |
| 3.3.1 Mapas a generar como herramientas para la interpretación       | 27          |
| 3.3.1.1 Separación de anomalías Regionales y Residuales              | 28          |
| 3.3.1.2 Análisis del espectro de potencia de los datos gravimétricos | 33          |
| 3.3.2 Deconvolución de Euler                                         | 35          |
| 3.4 Cuarta etapa: Perfil 2D en el área de estudio                    | 37          |
| CAPÍTULO IV                                                          |             |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS                                                | 39          |
| 4.1 Mapa de Anomalía de Bouguer                                      | 41          |
| 4.2 Análisis estadístico de los datos                                | 42          |
| 4.3 Espectro de potencia de los datos gravimétricos                  | 44          |
| 4.4 Separación Regional Residual                                     | 51          |
| 4.5 Derivadas en el eje Z                                            | 53          |
| 4.6 Coseno direccional                                               | 55          |
| 4.7 Deconvolución de Euler                                           | 57          |
| 4.8 Anomalía magnética                                               | 60          |



|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4.9 Modelo gravimétrico        | 60 |
| CAPITULO V                     |    |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 63 |
| 5.1 Conclusiones               | 63 |
| 5.2 Recomendaciones            | 64 |
| BIBLIOGRAFÍA                   | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b>                                                                                                                                                          | <b>Pág.</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.1. Ubicación de los campos petroleros en los estados Barinas y Apure, tomado de Martínez (2012)                                                                      | 1           |
| 1.2. Ubicación de la zona en estudio                                                                                                                                   | 4           |
| 2.1. Mapa estructural simplificado de los Andes Venezolanos mostrando las fallas rumbo deslizantes                                                                     | 5           |
| 2.2. Localización de los grábenes en Venezuela                                                                                                                         | 7           |
| 2.3. Orientación del Arco de El Baúl (tomado de Kiser y Bass, 1985)                                                                                                    | 14          |
| 2.4. Distribución de los terrenos autóctonos del basamento pre-cretácico. Tomado de Yoris y Ostos (1997)                                                               | 15          |
| 2.5. Mapa del basamento (tomado de Foster 1980)                                                                                                                        | 16          |
| 2.6. Dominio del basamento (tomado de Gou, 2009)                                                                                                                       | 16          |
| 3.1. Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para la recopilación de información                                                                               | 19          |
| 3.2. Transecto sísmico del estado Barinas (línea azul). Tomado de Henriques (2004).                                                                                    | 19          |
| 3.3. Interpretación estructural Basamento pre-K. Tomado y modificado de González (2009)                                                                                | 20          |
| 3.4. Modelos gravimétricos estructurales de la zona noroccidental de Venezuela a) Perfil A-A', b) Perfil B-B'. Tomado y modificado de Arnaiz (2011)                    | 22          |
| 3.5 Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para el procesamiento de datos gravimétricos                                                                       | 24          |
| 3.6. Mapa de factor T del área de estudio                                                                                                                              | 26          |
| 3.7. Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para la interpretación de la información                                                                          | 27          |
| 3.8. Mapa de Anomalía de Bouguer para una densidad de 2.67 g/ml                                                                                                        | 28          |
| 3.9. Mapas de separación Regional-Residual por continuación analítica del campo de la Anomalía de Bouguer a una altura de 9000 m. (a) mapa regional, (b) mapa residual | 29          |
| 3.10. Mapas de separación Regional-Residual por filtro pasa banda de la Anomalía de Bouguer a una frecuencia de corte de 0.026. (a) mapa regional, (b) mapa residual   | 30          |
| 3.11. Mapas de separación Regional-Residual por filtro gaussiano de la Anomalía de Bouguer a una frecuencia de corte de 0.026. (a) mapa regional, (b) mapa residual    | 30          |
| 3.12. Mapas de derivadas direccionales de la Anomalía de Bouguer. (a) derivada en X, (b) derivada en Y, (c) derivada en Z                                              | 31          |
| 3.13. Mapa de coseno direccional a un Angulo de 45° de la Anomalía de Bouguer                                                                                          | 32          |
| 3.14. Mapa de Anomalía Magnética.                                                                                                                                      | 32          |
| 3.15. Análisis espectral de la AB para toda la ventana de datos                                                                                                        | 33          |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.15. Desplazamiento de las ventanas utilizadas y ubicación del punto central de cada ventana realizada                                                                                                                                                   | 34 |
| 3.16. a) Representación gráfica del logaritmo neperiano del espectro de potencia respecto a la frecuencia. b) Representación ideal del espectro de potencia frente a la frecuencia. Tomado de González (2014).                                            | 35 |
| 3.17. Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para generar el perfil 2D en el área de estudio.                                                                                                                                                    | 37 |
| 3.18. Ubicación del perfil gravimétrico                                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| 3.19. Perfil gravimétrico a modelar                                                                                                                                                                                                                       | 38 |
| 4.1. Mapa de topografía del área de estudio                                                                                                                                                                                                               | 39 |
| 4.2. Mapa de Anomalía de Aire Libre                                                                                                                                                                                                                       | 40 |
| 4.3. Mapa de Anomalía de Bouguer, para una densidad de 2.67 g/ml                                                                                                                                                                                          | 42 |
| 4.4. Histograma de frecuencia de los datos de AB                                                                                                                                                                                                          | 44 |
| 4.5. Espectro de potencia de los datos de AB                                                                                                                                                                                                              | 44 |
| 4.6. Análisis del espectro de potencia                                                                                                                                                                                                                    | 45 |
| 4.7. Ubicación del punto medio de cada ventana de datos realizada                                                                                                                                                                                         | 46 |
| 4.8. Ejemplos del espectro de potencia realizado para cada ventana                                                                                                                                                                                        | 47 |
| 4.9. Mapa generado a partir de las profundidades someras obtenidas en el análisis espectral                                                                                                                                                               | 49 |
| 4.10. Mapa generado a partir de las profundidades intermedia 1 obtenidas en el análisis espectral                                                                                                                                                         | 50 |
| 4.11. Mapa generado a partir de las profundidades intermedia 2 obtenidas en el análisis espectral                                                                                                                                                         | 51 |
| 4.12. Mapa de Anomalía de Bouguer regional con filtro gaussiano de 0.026                                                                                                                                                                                  | 52 |
| 4.13. Mapa de Anomalía de Bouguer residual                                                                                                                                                                                                                | 53 |
| 4.14. Primera derivada en el eje Z de la Anomalía de Bouguer                                                                                                                                                                                              | 54 |
| 4.15. Segunda derivada en el eje Z de la Anomalía de Bouguer                                                                                                                                                                                              | 55 |
| 4.16. Mapa de coseno direccional de 45° de la Anomalía de Bouguer                                                                                                                                                                                         | 56 |
| 4.17. Mapa de coseno <sup>2</sup> direccional de 45° de la Anomalía de Bouguer                                                                                                                                                                            | 57 |
| 4.18. Deconvolución de Euler con índice estructural de 3 sobre el mapa de segunda derivada de Anomalía de Bouguer. (a) Soluciones de 0 a 12 km, (b) soluciones de 12 y 15 km, (c) soluciones de 15 a 18 km y (d) soluciones de 18 a 20 km de profundidad. | 58 |
| 4.19. Deconvolución de Euler con un índice estructural 3 sobre el mapa de segunda derivada de Anomalía de Bouguer. (a) Soluciones de 20 a 25 km, (b) soluciones de 25 y 30 km, (c) soluciones de 30 a 35 km y (d) soluciones de 35 a 40 km de profundidad | 59 |
| 4.20. Mapa de Anomalía Magnética con reducción al Ecuador                                                                                                                                                                                                 | 60 |
| 4.21. Modelado gravimétrico del perfil A-A'.                                                                                                                                                                                                              | 62 |

## ÍNDICE DE TABLAS

| <b>Tabla</b>                                                                                          | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 3.1. Perforaciones de pozo con profundidad de basamento pre-K. Tomado y modificado de González (2009) | 20          |
| 3.2. Profundidades promedios de 4 fuentes gravimétricas estimadas por el análisis espectral           | 34          |
| 3.3. Índice estructural asociado a las estructuras geológicas (tomado y modificado de Alberti 2012)   | 36          |
| 4.1. Estadísticos descriptivos de los datos de AB                                                     | 42          |
| 4.2. División de clases del histograma de frecuencias de los datos de AB                              | 43          |
| 4.3. Profundidad de fuentes gravimétricas a partir del análisis espectral                             | 45          |
| 4.4. Análisis espectral a las 91 ventanas generadas del área de estudio                               | 47          |
| 4.5. Capas y densidades utilizadas en el perfil A-A'                                                  | 61          |

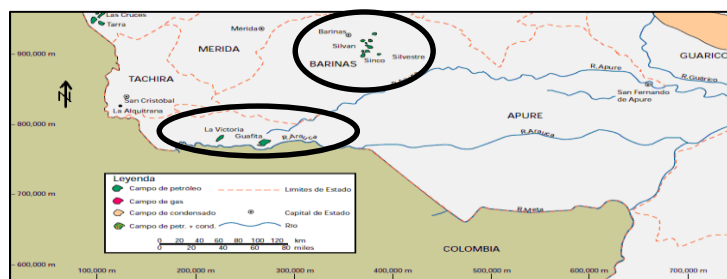
# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

La cuenca de Barinas-Apure abarca los estados homónimos. A través de este estudio geofísico integrado, se pretende aportar nueva información sobre la geometría de la cuenca mediante el uso de datos de gravimetría, magnetometría, perforaciones de pozo e información sísmica de la zona. Dichos estudios provenientes de diferentes métodos se complementan debido a que por ejemplo en donde la sísmica pierde efectividad, la gravimetría hace mayor énfasis. Esto permite generar modelos con una mayor precisión, los cuales son de vital importancia ya que esto nos permite entender la evolución de la cuenca en estudio.

Por ser parte primordial de las cuencas petrolíferas que posee Venezuela, la cuenca Barinas-Apure ha sido estudiada en vista de que en la subcuenca de Barinas se encuentran en producción los campos de San Silvestre y Sinco, destacados entre los más importantes del estado Barinas. De éstos se extraen crudos pesados y medianos provenientes de la Formación Gobernador del Eoceno, y de la Formación Escandalosa del Cretácico medio. Además en la subcuenca de Apure, al oeste del estado, se encuentran los campos Guafita y La Victoria, productores de crudo liviano. La ubicación de estos campos se puede apreciar en la figura 1.1.



**Figura 1.1.** Ubicación de los campos petroleros en los estados Barinas y Apure, tomado de Martínez (2012).

En consecuencia, esta cuenca ha sido ampliamente estudiada para entender la evolución geodinámica y, la posible existencia de sistemas petroleros relacionados a *rifts* de edad Jurásica en la cuenca de Barinas-Apure, y en los Andes Venezolanos (Arminio, Audemard y Serrano, 2001; y Arminio, *et al.*, 2004). El principal objetivo de estos estudios ha sido el del basamento a través de inversiones gravimétricas y magnéticas. De los estudios realizados en dicha cuenca y áreas circundantes se destacan los de De Cizancourt (1933), Bucher (1952), González de Juana (1952,1980), MENEVEN (1983), Feo-Codecido et al. (1984), Mapas de Anomalías Magnéticas de Venezuela (1989), De Toni y Kellogg (1993), Audemard (1991), Lugo y Mann (1995), Parnaud et al. (1995), Colleta et al. (1997), Yoris y Ostos (1997), Audemard y Audemard (2002), Henriques (2004), Chacín et al (2005) y González (2009).

No obstante, Andrade (2001) comenta que no se pueden discriminar provincias geológicas como se ha hecho en Guayana, dado que muy pocos taladros han logrado alcanzar el basamento precámbrico y las descripciones son muy pobres.

Todo lo anterior expuesto hace que el estudio de la cuenca sea de gran importancia, ya que permite consolidar la información existente, así como generar nueva información que pueda ofrecer un aporte al entendimiento de la evolución tectónica, no solo de la cuenca, sino también de la parte noroccidental de Venezuela.

A través de la interpretación de los datos gravimétricos podemos estimar la morfología y profundidad de la fuente que produce las anomalías gravimétricas. Con la información proveniente de las líneas sísmicas interpretadas, las cuales definen la geometría de las estructuras y el espesor sedimentario, junto con los datos de pozo - que permiten observar con una mayor precisión el tope y base de las formaciones- así como con la densidad de cada formación; se pueden definir los siguientes objetivos para generar como resultado final un perfil 2D de la cuenca de Barinas-Apure.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general:**

Realizar un modelado estructural integrado utilizando gravimetría y líneas sísmicas interpretadas de la cuenca Barinas-Apure.

### **1.2.2 Objetivos específicos:**

1. Separar fuentes gravimétricas regionales y locales.
2. Analizar el espectro de potencia de la ventana de datos.
3. Determinar la profundidad de las distintas fuentes gravimétricas.
4. Estimar el espesor sedimentario.
5. Generar la Deconvolución de Euler del área de estudio.
6. Modelar el basamento de la cuenca sedimentaria.

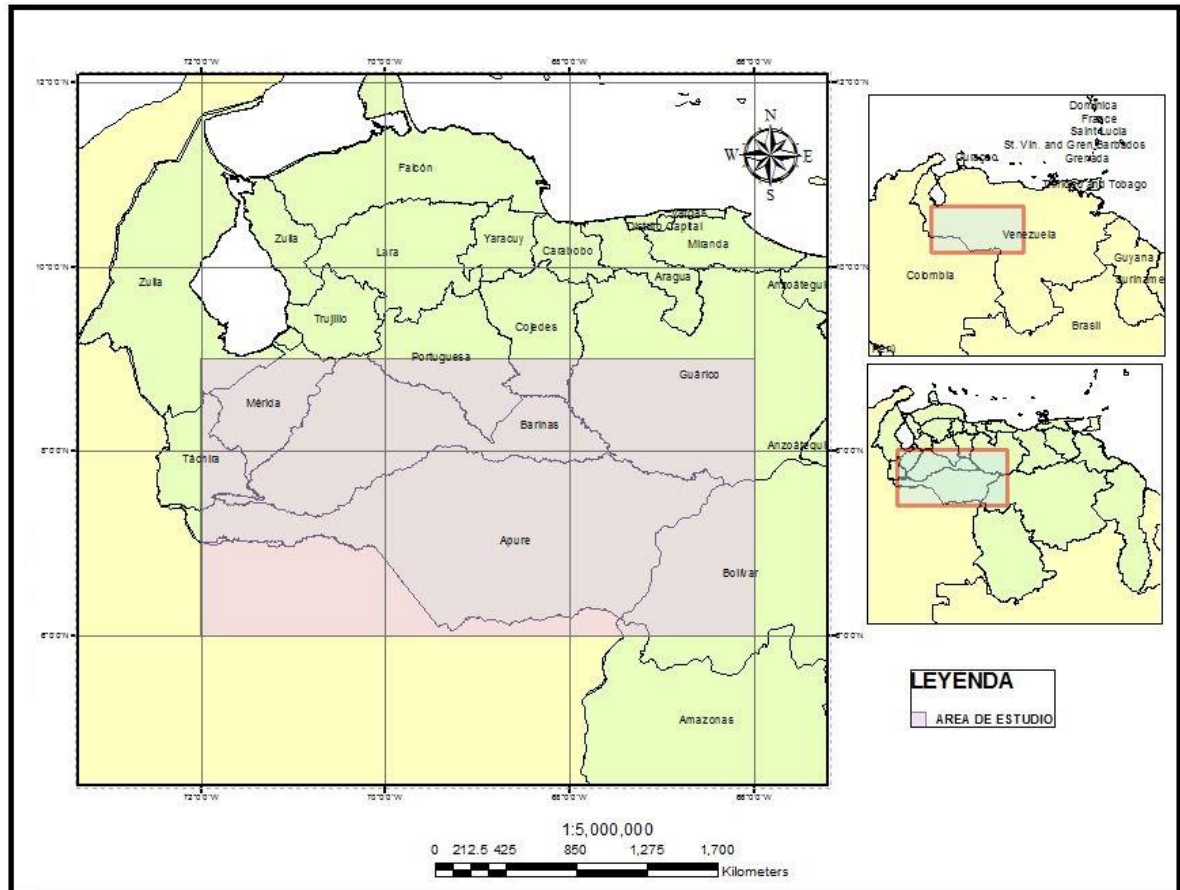
## **1.3 Justificación**

Al integrar la información proveniente de líneas sísmicas interpretadas, registros de pozos y magnetometría, junto con la configuración geológica del área de estudio y mediante el análisis y modelado de un perfil gravimétrico, se podrá realizar un modelo estructural acorde a los modelos geológicos existentes y, adicionalmente, ayudará a dar una mejor comprensión de las estructuras existentes en el área, así como también la evolución de la misma. Esto es de especial importancia para el occidente del país ya que su evolución geológica es significativamente más compleja que la zona oriental.

Este proyecto de investigación tiene como propósito integrar la información geofísica proveniente de gravimetría y sísmica para determinar la forma de la cuenca. Con la información proveniente de la gravimetría, se buscará la geometría de la cuenca, así como los cambios estructurales. De la información de los pozos se obtendrá la profundidad del basamento pre-cretácico en diversas zonas de la cuenca, y de la línea sísmica la estratigrafía y profundidad de la cuenca y, por último, con la magnetometría, se podrán diferenciar estructuras debido a que cada una tiene un comportamiento magnético diferente.

El modelo geofísico integrado que se obtendrá puede resultar de relevancia en el campo de las Ciencias de la Tierra, para ampliar y consolidar la información existente en la cuenca.

#### 1.4 Ubicación del área de estudio



**Figura 1.2.** Ubicación de la zona en estudio.

La cuenca abarca principalmente los estados de Barinas y Apure (Figura 1.2), y se encuentra comprendida entre los 6° y 9° de latitud y los 72°W y 66°W en longitud. Es en esta área donde se utilizaron datos gravimétricos satelitales de la zona, las perforaciones de pozo presentes en la misma y las líneas sísmicas ya interpretadas.

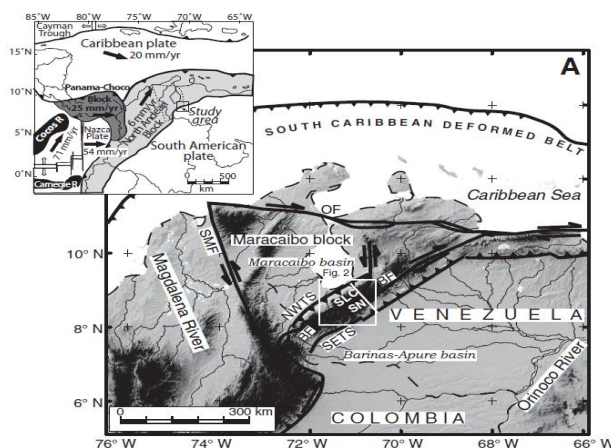


## CAPÍTULO II

### MARCO GELÓGICO

#### 2.1 Los Andes de Mérida

Esta cadena montañosa posee una orientación aproximada N45E; se extiende 350 km desde la frontera colombo-venezolana hasta la ciudad de Barquisimeto, y posee una altura en su punto más elevado de 5000 msnm; a primera vista, esta cordillera puede ser confundida con una prolongación de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos (Audemard, 2003), quien comenta además que no existe relación genética directa entre ambas. Mencionan Audemard y Audemard (2002) que la ausencia de esta relación genética se debe a que el levantamiento de Los Andes de Mérida no está relacionado directamente a la interacción del cratón suramericano u otro arco o dominios oceánicos, y que ambas cadenas se encuentran separadas por la terminación sur de la falla de Santa Marta-Bucaramanga y por el Macizo de Santander. Esto quiere decir que la mayoría de los Andes suramericanos y los de Mérida no son producto del mismo evento formacional, estos últimos se elevan durante el Mioceno Medio, como consecuencia directa de la interacción entre la Placa Caribe y la Suramericana (Schlumberger Oilfield Services, 1997).



**Figura 2.1.** Mapa estructural simplificado de los Andes Venezolanos mostrando las fallas rumbo deslizantes más importantes. Modificado de Bermúdez (2011).

Audemard y Audemard (2002) consideran que la interacción con la Placa de Nazca y la Placa Caribe también contribuyen a la orogénesis de los Andes de Mérida (Figura 2.1).

En el Mioceno se levantan unos Andes menos prominentes que los actuales, lo que probablemente se relaciona con los primeros estadios de la colisión del Arco de Panamá contra el noroccidente del continente suramericano (Arnaiz, 2011). Este levantamiento inicia la depositación de material molásico a lo largo de ambos flancos de la cadena (formaciones Parángula e Isnotú) (Audemard 1993; Colletta *et al.*, 1997); en el Mioceno superior se produce la generación de la cuenca antepaís Barinas-Apure y la separación de ésta de la cuenca de Maracaibo (Audemard y Audemard, 2002).

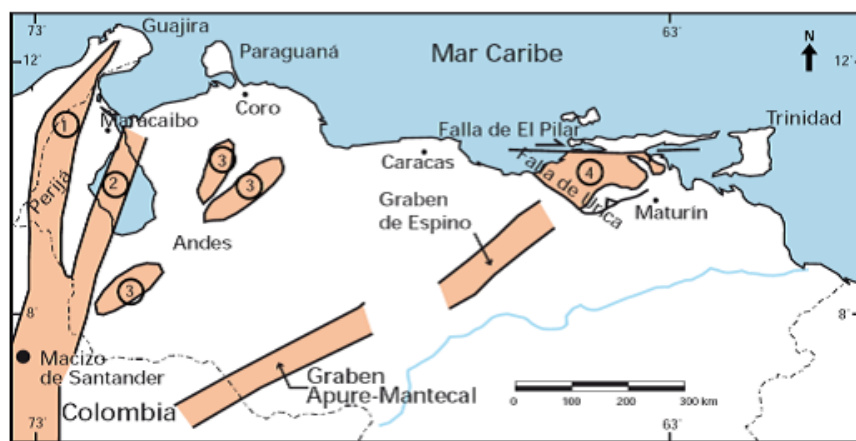
## **2.2 La cuenca Barinas-Apure.**

Esta cuenca, como comenta Chacín *et al.*, (2005) posee un área aproximada de 92000 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima estimada de 5000 m y se encuentra ubicada al suroeste del territorio venezolano; esta depresión se extiende geográficamente desde la antifosa andina al noroestes, hasta las planicies situadas entre los ríos Apure y Arauca. Esta cuenca se encuentra limitada al noroeste por los Andes de Mérida; al norte por la prolongación occidental de la Serranía del Interior Central; al este y al noreste por el levantamiento de El Baúl, este último sirve de límite entre la cuenca Oriental de Venezuela y la cuenca Barinas-Apure (Arnaiz, 2011), y hacia el sur se separa de la cuenca de los llanos colombianos por un alto gravimétrico reportado por Hosper y Van Wijen en 1959 (citados por González de Juana *et al.*, 1980).

De manera general se describe esta cuenca como asimétrica con su flanco meridional suavemente inclinado, siguiendo la pendiente del escudo de Guayana, y un flanco septentrional abrupto, marcado por las rocas del flanco sureste de los Andes venezolanos. La cuenca Barinas-Apure se origina a raíz del levantamiento de los Andes de Mérida durante el Mioceno Superior y es considerada como una cuenca de tipo antepaís, su basamento se considera de edad paleozoica y autóctono, conformado

por las rocas conocidas como “Capas Rojas”, que marcan la apertura de Gondwana y Laurentia (Schlumberger Oilfield Services, 1997).

Dentro de la cuenca Barinas-Apure debido a una rotura o *rifting* de Pangea se produjeron varias estructuras entre el Triásico-Jurásico que posteriormente influyeron en la evolución de esta cuenca sedimentaria. Este evento denominado como la apertura del Proto-Caribe indujo el desarrollo de valles de extensión o grábenes (Apure-Mantecal) (Schlumberger Oil Services, 1997), como se puede observar en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Localización de los grábenes en Venezuela. Tomado de (Schlumberger Oil Services 1997).

### **2.2.1 Estratigrafía de la cuenca Barinas-Apure:**

El motivo por el cual esta cuenca es de gran importancia económica en sus estratos sedimentarios es debido a que en ella se encuentra la roca madre por excelencia que es la Formación Navay, de edad Cretácico Tardío, la misma posee facies laterales que son equivalentes a la de la Formación La Luna. En esta cuenca además se han encontrado rocas madre de importancia secundaria en el Grupo Orocué (Formación Los Cuervos), pero ésta sólo se habría generado en los depocentros más profundos, asociados con la acumulación de grandes espesores de molasa por el levantamiento andino (Schlumberger Oil Services, 1997).

El autor mencionado anteriormente define que las principales rocas yacimientos clásticas son las Formaciones Escandalosa (Cretácico), Burgüita (Cretácico), (Grupo) Orocué (Paleoceno), Mirador-Guafita (Miembro Arauca)

(Eoceno-Oligoceno). El yacimiento Carbonático más relevante lo constituyen las calizas con porosidad secundaria del miembro Guayacán (Caliza “O”) de la Formación Escandalosa. Los sellos regionales más importantes son los intervalos lutíticos de las Formaciones Burgüita (Cretácico Tardío), Paguey (Eoceno) y Guafita (Miembro Guardulio).

### **Formación Rio Yuca:**

Según Martínez (2012), esta formación es de edad Terciario (Mioceno Tardío-Plioceno), se deposita en un ambiente continental, donde solo se conocen restos de materia orgánica. En su parte inferior, se deposita bajo un ambiente de marismas o lagunas costeras; el resto de la formación se caracteriza por un ambiente continental de ríos meandreados y entrelazados de baja velocidad.

### **Formación Parángula:**

De edad Terciario (Mioceno Temprano-Medio) refleja la rápida acumulación de los detritos erosionados del levantamiento de los Andes de Mérida, y depositados en la antefosa adyacente (Martínez, 2012). Representa un ciclo sedimentario transgresivo-regresivo sobre las formaciones erosionadas del Eoceno Medio-Tardío y Oligoceno, que se inicia con un clástico basal y continua en su parte inferior con sedimentación de ambiente marino somero-salobre-continental, y en su parte superior con sedimentos de ambiente netamente continental de corrientes fluviales entrelazadas y lacustre. Pudo existir ambientes locales de pantano-manglar durante el periodo de transición al ambiente continental (Campos, 1977).

En la superficie aparecen conglomerados lenticulares de grano grueso, de color gris a verdoso y pardo claro a blanco; areniscas de grano fino en capas masivas con estratificación cruzada, localmente glauconíticas; limonitas abigarradas a tonos rojos, morados, pardo rojizo y pardo claro. En el subsuelo, la litología es similar, pero con la ausencia de los conglomerados. Aquí es notable el carácter regresivo (engrosamiento hacia arriba) de la formación, que se inicia con una gruesa arenisca basal, gradando hacia arriba a arcillas y limolitas varicoloreadas y no-calcáreas,

alternando con areniscas arcillosas de grano fino, micáceas y lenticulares (Campos, 1977).

Esta formación es discordante en el tope y la base, con angularidad en la mayoría de los afloramientos, sobre Pagüey, en las partes central y noreste de la cuenca, y sobre el Miembro Arauca en las partes sureste y suroeste de la cuenca. En Apure, la parte inferior de Parángula (Miembro Guardulio) descansa en discordancia paralela sobre el Miembro Arauca (Campos 1977).

### **Formación Guafita:**

De edad Oligoceno-Mioceno Temprano, se origina en ambientes de complejos canales distributarios activos y abandonados, muy tipo sistema deltaico constructivo de llanura baja o progradante. Generalmente se conforma por una alternancia de arenas y lutitas con algunas capas delgadas de Lignito. Se divide en dos miembros, Arauca y Guardulio (Martínez 2012).

El Miembro Arauca está formado principalmente por areniscas de matriz arcillosa-caolinítica con restos de plantas. Cuenta con la presencia de un 20% de limolitas también con presencia de restos de plantas, de color gris claro a gris oscuro; este miembro se encuentra ubicado en la parte inferior de la formación. El miembro superior de la formación es Guardulio, está conformado por lutitas generalmente gradadas a carbonosas y lignitos, de color gris oscuro a verdoso, con abundantes restos de plantas. En porción similar se encuentran arcillitas abigarradas y manchadas de óxido de hierro. Un 20% del miembro lo constituyen caolinitas de color gris claro mal compactadas (Kiser, 1989).

### **Formación Escandalosa:**

Ésta formación es del Cretácico (Cenomaniense-Turonense), se forma bajo ambientes neríticos de plataforma, bajo un proceso de regresión a un intervalo de máxima inundación, hasta una transgresión (Martínez (2012). Se encuentra concordante bien definido en su contacto inferior con la Formación Aguardiente, igualmente en su contacto superior con la Formación Navay. Está formación la

componen areniscas macizas cuarzosas, muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas. Las areniscas son de color gris, gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas, micáceas y carbonaceas. Se presentan en capas delgadas a masivas, con estratificación cruzada en las capas más gruesas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonaceas. En el tope de la sección se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, aura, cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina; se ha relacionado con la Caliza Guayacán del piedemonte andino (Kiser, 1989).

### **Formación Aguardiente:**

Del Cretácico (Albiense), encuentra su contacto superior concordante y transicional con la Formación Maraca mientras su contacto inferior es con la Formación Apón de forma concordante y diacrónica (Martínez 2012). Está conformada por areniscas calcáreas duras, de color gris a verde claro, localmente glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior Notestein *et al.* (1944); localmente las areniscas son tan calcáreas que se aproximan a calizas arenosas. Según Salvador (1061-b), esta formación presenta una litología muy uniforme, compuesta predominantemente por areniscas cuarzosas, a veces glauconíticas, con capas de caliza distribuidas en varios niveles. Renz (1959) insistió sobre el carácter cuarzoso y los colores claros de meteorización de las areniscas, las intercalaciones de lutitas oscuras y la presencia fosilífera de varios tipos.

### **Formación Navay:**

De edad Cretácico (Coniaciense-Maastrichtiense), Pierce (1960) describe esta formación y comenta que se encuentra compuesta de lutitas silíceas, friables a no friables, blanda, duras, quebradizas, amarillo claro a cremo y a blanco; lutitas tripolíticas muy porosas, pardo claro a gris claro, y alguna ftanitas no porosas, lenticulares, pardo claro, y lutitas calcáreas, carbonaticos, gris a gris oscuro. Como constituyentes menores de la formación, se presentan areniscas lenticulares de grano

angular, calcáreas a silíceas, pardo claro a gris claro. Estas areniscas, muy calcáreas a veces, se han definido como calizas clásticas, probablemente por su contenido fosilífero. En afloramientos, las lutitas carbonáceas se meteorizan y lixivian a lutitas gris a pardo. Signos característicos con su fina laminación, restos fosfatizados de peces (vertebras, escamas y espinas), común glauconita, las ftanitas y una relativamente fácil correlación de electrofacies a través de la cuenca. Ha sido repartida, en orden ascendente, en la lutita “N” (Miembro La Morita) y “M” al “I” (Miembro Quevedo). Tiende a ser más arenosa hacia arriba; se vuelve muy arenosa hacia el escudo de Guayana y hacia Apure y la cuenca de Los Llanos. En el afloramiento, la formación se meteoriza comúnmente a colores claros: gris claro, blancuzco, beige, marrón clara y con una textura silícea porosa.

El Miembro La Morita que se encuentra en la parte inferior es descrito por Kiser (1961) como compuesta de lutitas arcillosas suaves, gris claro a oscuro, con abundancia local de restos de peces. El límite superior estaría en la base de la lutita, limolita o caliza silícea, dura y quebradiza más inferior de la sección suprayacente; este miembro consiste en una sección esencialmente lutítica, en la sección tipo en la quebrada Agua Fría, donde consiste casi exclusivamente en una lutita gris oscura, calcárea a parcialmente limolítica, con intercalaciones de horizontes fosfáticos, hacia el flanco suroccidental de la cuenca de Barinas, cambia gradualmente a una facies compuesta casi totalmente de areniscas, con intercalaciones menores de lutitas y ocasionalmente calizas Renz (1959).

El Miembro Quevedo fue introducido por Renz (1959), para designar una secuencia de rocas silíceas duras, quebradizas, de fractura concoidea, predominantemente lutíticas, de color gris claro que meteorizan a blanco, que incluye además intercalaciones de areniscas gruesamente estratificadas, lutitas negras, calizas fosfáticas y capas de ftanita que constituyen hasta un 40% de la sección. Los restos de peces forman más del 50% de las capas de areniscas, y aunque la formación es en general muy fosilífera, las faunas están muy mal preservadas y por consiguiente son de difícil identificación.

**Formación Pagúey:**

Del Terciario (Eoceno Medio), esta formación se distingue tanto en el subsuelo como en la superficie por la característica predominancia de lutitas marinas grises a negras, duras, astillosas, bien laminadas, muy foraminíferas y con niveles comunes de nódulos sideríticos e incluso ftaníticas. En el subsuelo (Von Der Osten, 1966), la parte inferior, de unos 130 m, consiste en una secuencia cíclica de lutitas que gradan hacia arriba a limolitas y areniscas de grano fino. Estos ciclos arenosos se trazan lateralmente hacia el suroeste a lentes de la formación Cobre en la zona de interdigitación de las dos litofacies.

Los 250 m superiores del Campo Sinco son casi totalmente lutitas. En la superficie, Pierce (1960) observa areniscas grises claras a grises azuladas, ocasionalmente petrolíferas, en capas delgadas a medianas, de grano fino a medio, lutolíticas macizas, limolitas y lutitas en estratos irregulares constituyen una gran parte de la formación. En la parte superior, las areniscas son ferruginosas, carbonáceas, ocasionalmente calcáreas, grises a grises oscuras, frecuentemente meteorizadas a pardo, de grano fino a medio, lajosas y con rizaduras; estas alternan con lutitas y limolitas fosilíferas, en estratos irregulares, grises oscuras a negras.

**Formación Burguita:**

De edad Cretácico (Santonense-Maastrichtense), Renz (1959) describe areniscas micáceas, limolíticas, parcialmente glauconíticas y frecuentemente calcáreas, friables, de grano fino y color gris claro, con fragmentos ftaníticos e interlaminaciones de lutitas gris oscuro y arcilla de color gris claro. Incluye la presencia de una caliza conchífera en la base, en la quebrada Buenaña y tributarios del río Burgua. Las areniscas son masivas, muy lenticulares y erráticas en su desarrollo, además, se hacen más delgadas y presentan lutitas interestratificadas de mayor espesor hacia el tope, son de color gris o marrón, plásticas o duras, carbonáticas, piríticas y no calcáreas. Van Andel (1958) realizó un estudio petrográfico de algunas areniscas de esta unidad que se clasifican como grauvacas y subgrauvacas.



En el área de Burgua, Kiser (1989) indica que la formación se inicia con un paquete de areniscas, calizas y lutitas cuyo tope conforma un buen reflector sísmico en esa área. Las areniscas presentan similar descripción y las calizas son de color crema, gris y marrón claro, duras, microcristalinas, glauconíticas, carbonáticas y piríticas.

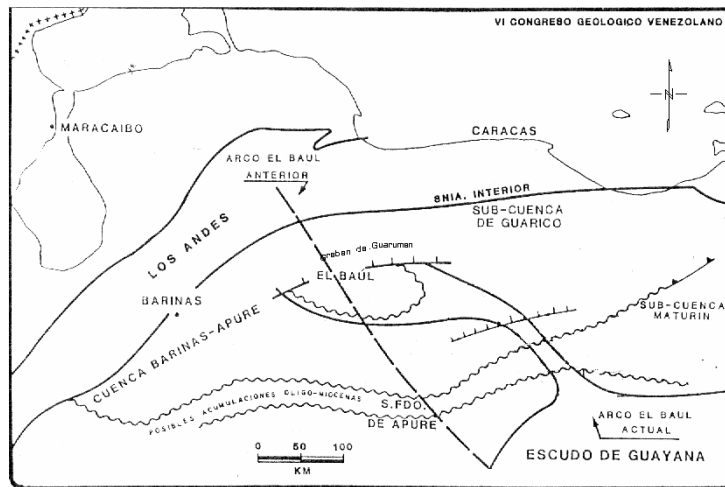
El autor mencionado anteriormente también describe que suprayacente a este paquete, predominan las lutitas que gradan a limolitas y arcilla, con intercalaciones de calizas glauconíticas y areniscas similares a las basales; la parte superior se compone de areniscas calcares, lutitas con concreciones y nódulos de arcillita siderítica, y calizas arenosas.

### **2.3 Arco de El Baúl**

El Arco del El Baúl tiene su expresión geológica más estudiada en medio de los llanos venezolanos, 240 km al noreste del río Orinoco, y a unos 80 km al sureste de San Carlos, en el estado Cojedes, donde se levantan cerros con elevaciones de hasta 512 m de elevación, donde afloran rocas ígneo metamórficas estudiadas por geólogos por más de 20 años (Kiser y Bass, 1985).

El Arco de El Baúl ha sido relacionado genéticamente con el saliente del Escudo Guayanés hacia el noreste, modelado por el curso del Orinoco, entre las desembocaduras de los ríos Apure y Capanaparo; con el bisagre entre los Andes y las Serranías del Interior, en el área de Acarigua y Barquisimeto; y con el Alto de Coro que separa estructuralmente la Cuenca de Falcón en dos partes (Figura 2.3) (Kiser y Bass, 1985).

Kiser y Bass (1985) realizaron un trabajo de interpretación de datos aeromagnéticos tomados entre 1981 y 1982, donde se indica la orientación S 85° E del basamento magnético del Arco de El Baúl; hasta los 2000 pies de profundidad del basamento, cubriendo un área de 23000 km<sup>2</sup> en una ventana de (100x230 km) y está limitado hacia el norte por la fosa tectónica de Guarumen la cual es de edad Cenozoica (Plioceno-Pleistoceno) y hacia el sur por la fosa tectónica de Espino-San Fernando de edad post Paleozoico – pre Cretáceo.



**Figura 2.3.** Orientación del Arco de El Baúl (tomado de Kiser y Bass, 1985).

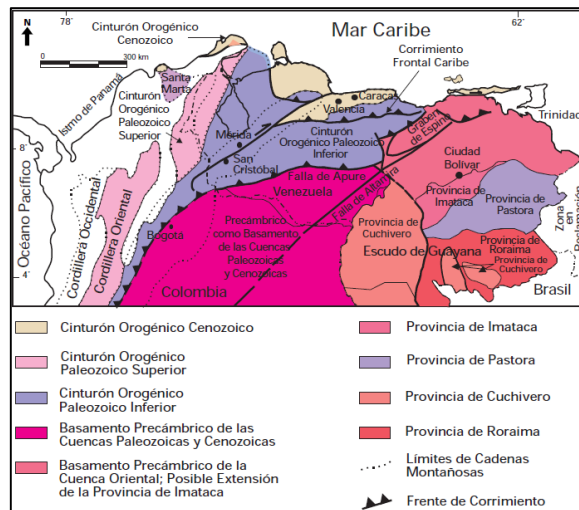
El Arco de El Baúl, con sus componentes el Arco de Machete y El Arco del Monasterio, separan la sub cuenca de Guárico de la Cuenca Barinas-Apure, y la litología terciaria de los pozos al sureste del arco muestran cambios significativos en la secuencia terciaria, comparados con la litología de los pozos al noreste del eje. La influencia marina (glauconita) es más obvia en el Terciario de los pozos de la Cuenca Barinas-Apure que en los pozos al Noreste de El Baúl (Kiser y Bass, 1985).

## 2.4 Basamento cristalino

Este basamento que pudiera tener presencia en la zona muy probablemente puede tener influencia de tres unidades geográficas: Cratón precámbrico al sur (3600-1000 m.a.), un cinturón intermedio de edad Paleozoico (500-175 m.a.) y un borde norte de rocas alóctonas de edad Mesozoico a Terciario, relacionado con el emplazamiento de la Placa del Caribe. (128-66 m.a.) (Foster 1980 y González 2009).

La zona del Precámbrico puede extenderse hacia el norte en el subsuelo hasta el sur de un lindero descrito por el río Apure, pasando en dirección este al sur de las Mercedes, estado Guárico y de allí hasta la Cordillera de la Costa en los estados Anzoátegui y Monagas (Martínez 2012). Los cuerpos existentes en esta zona se pueden clasificar en dos clases: alóctonos y autóctonos. Los terrenos autóctonos se localizan en el Escudo de Guayana y como basamento de las cuencas Paleozoicas y Cenozoicas al sur de la Falla de Apure. En el Escudo de Guayana dichos terrenos se

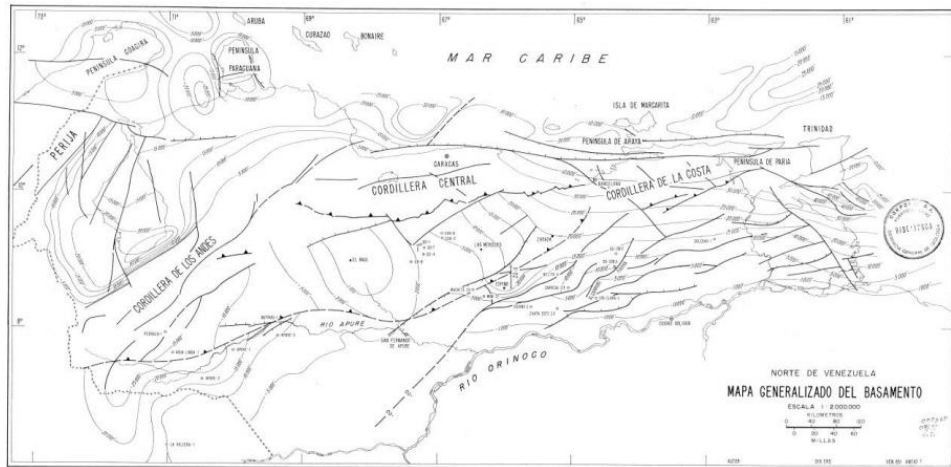
clasifican en cuatro provincias que son: Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima como se puede observar en la figura 2.4 (González, 2009).



**Figura 2.4.** Distribución de los terrenos autóctonos del basamento pre-Cretácico. Tomado de Yoris y Ostos (1997).

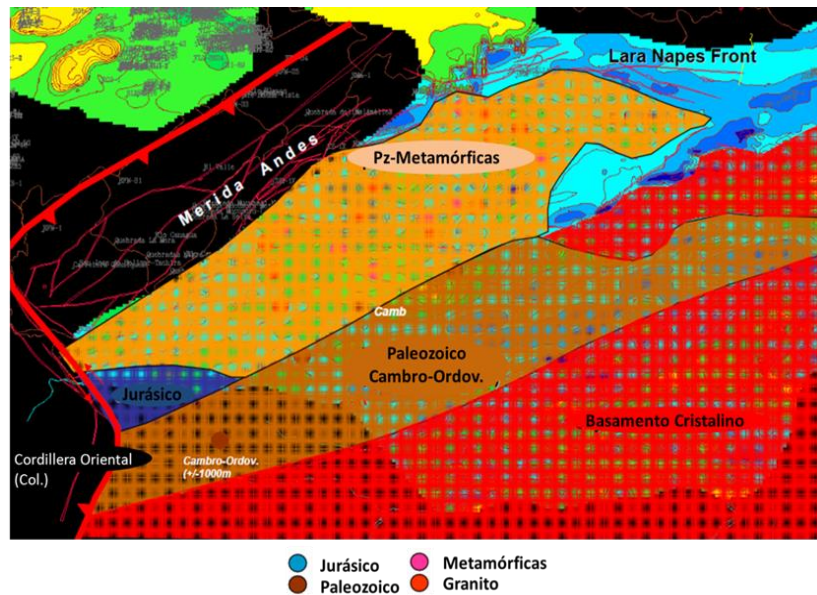
Los terrenos alóctonos iniciaron su adosamiento a Suramérica durante el Paleozoico Temprano (Orogénesis Caledoniana 570-385 m.a), de esto afloran rocas en los alrededores de Mérida y San Cristóbal. Después ocurrió la sutura durante la Orogénesis Herciniana (385-245 m.a.) en el Paleozoico Superior y la última colisión tuvo su inicio a finales del Mesozoico (Cretácico) (Yoris y Ostos, 1997 y González, 2009).

El cinturón intermedio del paleozoico se encuentra en diversas regiones de Venezuela (Ostos, et al. 2005) desde el lindero descrito por el río Apure-Las Mercedes hasta el basamento Mesozoico. Se verifica su presencia en Perijá hasta Barinas Occidental y hacia el Oriente en El Baúl y a unos 50 km al oeste de Las Mercedes, estado Guárico. La existencia de Basamento Paleozoico y Precámbrico en los Andes y Perijá indica que el Cratón Precámbrico pudo tener una extensión anterior que fue afectada luego por eventos tectónicos y termales. El basamento Mesozoico se extiende a lo largo de la Península Goajira, a través de la cuenca de Falcón y la Cordillera de la Costa hasta la faja metamórfica de Araya-Paria. Hacia el sur, sus límites están generalmente formados por fallas de corrimiento (Foster, 1980) (Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Mapa del Basamento (tomado de Foster 1980).

Según Gou (2009), para solucionar la ubicación de los límites de Basamento, diversos autores han propuesto soluciones basadas en informaciones geológicas y extrapolación de la información interpretada en diversos estudios. En estos trabajos se plantea la extensión del dominio del basamento Precámbrico en la Cuenca Barinas-Apure a un límite ubicado más al oeste de lo planteado por estudios de Apure, ubicándolo cercano al sector Mantecal-La Estacada, manteniendo la misma orientación y ubicando al noroeste el rio Apure el límite que diferencia un basamento Paleozoico temprano (Cámbrico-Ordovícico) del Paleozoico tardío



**Figura 2.6.** Dominio del basamento (tomado de Gou, 2009).

## 2.5 Evolución geodinámica de la cuenca barinas-apure.

La interacción de las placas litosféricas oceánicas del Caribe y Pacífico, entre las placas continentales de Norteamericana y Suramericana, y el bloque de Maracaibo al noreste de Boconó rigieron la evolución geodinámica de la cuenca Barinas-Apure.

Sobre la base del estudio integrado de cuencas realizado por PDVSA/EFAI (2006), este proceso evolutivo se puede dividir en 7 fases, marcadas por discordancias regionales. Cada una se define como un ciclo tectónico mayor que representa una fase de la historia de la cuenca:

1. Fase Uno: En el Paleozoico, se conforma por eventos asociados a la orogénesis del Precámbrico Tardío-Paleozoico Temprano como a Paleozoico Tardío. Se evidencia dentro de la cuenca Barinas-Apure por corrimientos y pliegues transportados sur-sureste, típicos de deformación de orógenos, erosionados y sellados por debajo del Cretácico.
2. Fase Dos: En el Jurásico, la formación de un *rift* producto de la ruptura de Pangea con estructuras en dirección noroeste-sureste. La Formación La Quinta representa los depósitos sintectónicos asociados a la apertura del margen occidental de la apertura Jurásica de Tethys. Se asocian importantes niveles marinos evaporíticos con un fuerte potencial petrolífero en Colombia y México aún no reconocidos en Venezuela.
3. Fase Tres: Hacia el Cretácico, debido a la subsidencia y la relajación termal marcada por la transgresión marina (*Bark Arc* Pasivo) y se depositan sedimentos ricos en material orgánico. Este margen se activa con el inicio de la tectónica del Caribe.
4. Fase Cuatro: En el Cretácico Tardío-Paleoceno, se evidencia en Colombia por la colisión del arco insular (representado por la cordillera occidental y su cuenca antepaís asociada). En Venezuela se evidencian los primeros efectos de una deformación compresiva en la Sierra de Perijá, y se inicia el levantamiento del arco de Mérida, que va a permanecer como zona positiva hasta el Eoceno Medio en Barinas Apure.

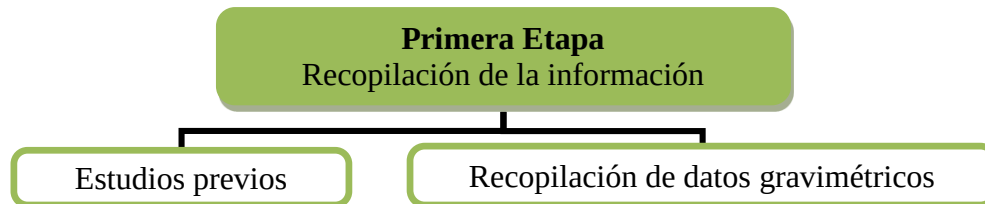
5. Fase Cinco: En el Paleoceno Tardío-Eoceno Medio. Durante este periodo continua la colisión en el occidente de Colombia (Paleoceno Medio-Tardío), pasando por el norte de la zona de Maracaibo-Santa Marta, que produce una acreción progresiva más el emplazamiento de las napas de Lara.
6. Fase Seis: En el Eoceno Tardío-Oligoceno, ocurre el levantamiento del proto-Perijá y ocurre simultáneamente la redistribución de los depocentros de la cuenca de Maracaibo, además de una erosión importante en la cuenca Barinas-Apure y el oriente de Maracaibo.
7. Fase Siete: En el Mioceno-Plioceno, marcada por la colisión del terreno Panamá-Baudó contra la esquina noroccidental de Venezuela en el Mioceno Tardío-Holoceno que genera los Andes de Mérida y las cuencas asociadas en Maracaibo y Barinas Apure. Se define finalmente Perijá y ocurre la inversión de las cuencas de Maracaibo y Falcón. En Colombia afecta el macizo de Santa Marta, macizo de Santander y la Cordillera Oriental de Colombia. La deformación de la cuenca de los Andes de Mérida y Perijá es controlada por tectónica de basamento y se localizan indicios a lo largo de alineamientos estructurales Paleozoicos y Jurásicos preexistentes.

Es importante tomar en cuenta que en el frente suroriental Andino y en la Cuenca de Barinas se reactivan pasivamente estructuras asociadas a Caribe, y en los Andes de Mérida ocurre la transcurrencia a lo largo de Boconó, originada simultáneamente en el bloque de Maracaibo (PDVSA/EFAI, 2006).

## CAPÍTULO III

### MÉTODO

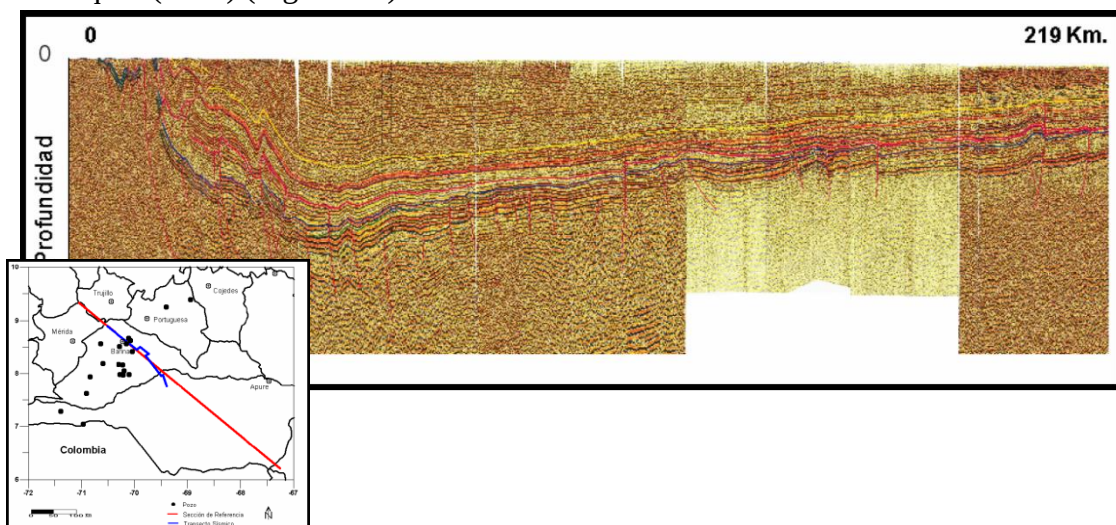
#### 3.1 Primera etapa: Recopilación de la información



**Figura 3.1.** Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para la recopilación de información.

En esta etapa inicial se recopiló la información bibliográfica de los diferentes estudios que se han realizado en la cuenca Barinas-Apure. De distintos autores se reunió la información referente a la geología regional y estratigrafía de la zona, así como la evolución tectónica de la misma. Además se recopiló información sobre interpretaciones geofísicas proveniente de trabajos especiales de grado, artículos de investigación, y eventos que tienen un enfoque geocientífico.

Entre los estudios previos destaca una línea sísmica interpretada, tomada de Henriques (2004) (Figura 3.2).

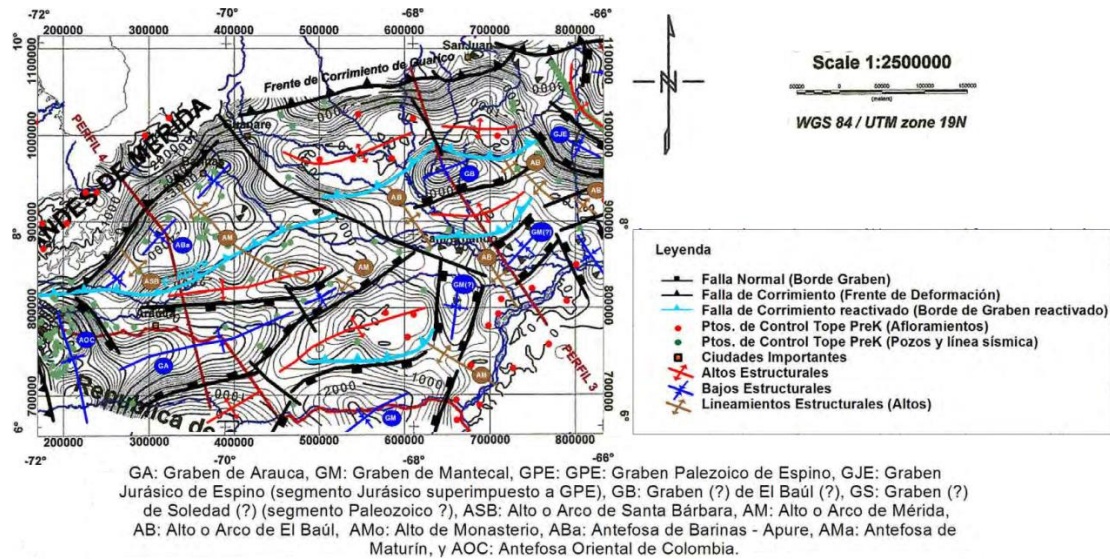


**Figura 3.2.** Transecto sísmico del estado Barinas (línea azul). Tomado de Henriques (2004).



De la figura anterior se puede observar fallas presentes hacia la Cordillera de los Andes, además se observa como la cuenca Barinas-Apure disminuye su profundidad a medida que nos desplazamos hacia el sureste, así como la estratigrafía de la cuenca.

Del trabajo de investigación de González (2009) destaca la interpretación estructural del tope del basamento pre-cretácico (Figura 3.3) así como una tabla con perforaciones que alcanzaron el basamento pre-cretácico (tabla 3.1).



**Figura 3.3.** Interpretación estructural Basamento pre-K. Tomado y modificado de González (2009).

En la figura 3.3 se observa el complejo sistema de fallas presentes en la cuenca Barinas-Apure donde la mayoría se encuentra asociadas al borde de los grábenes, donde destaca el de Apure, Arauca y de Mantecal así como los diferentes elementos estructurales como el Arco del Baúl y de Mérida.

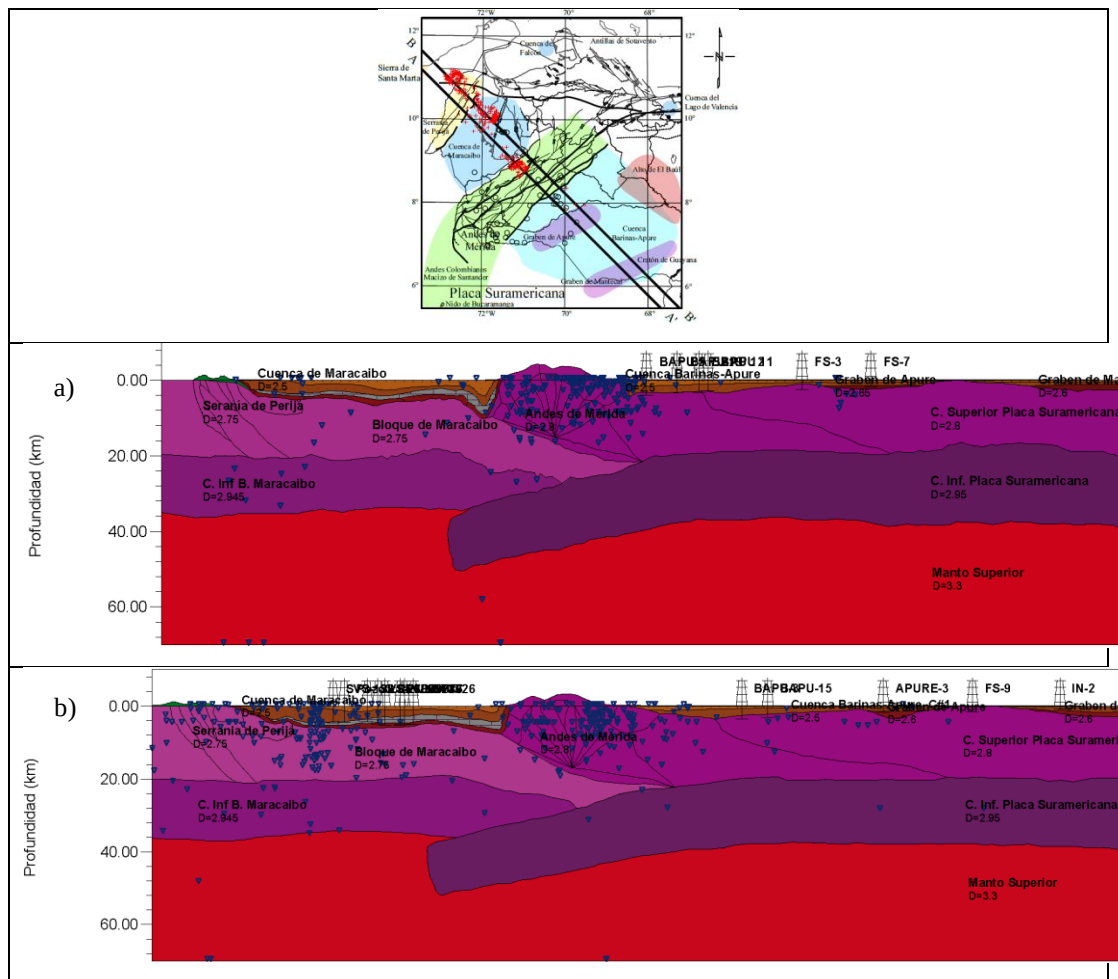
**Tabla 3.1.** Perforaciones de pozo con profundidad de basamento pre-K. Tomado y modificado de González (2009)

| Nombre | Longitud | Latitud | Tope Pre-K<br>(m.s.n.m.) | Nombre | Longitud | Latitud | Tope Pre-K<br>(m.s.n.m.) |
|--------|----------|---------|--------------------------|--------|----------|---------|--------------------------|
| BAPU1  | -68.941  | 9.388   | -3645.64                 | FS-4   | -69.548  | 7.749   | -2512.41                 |
| BAPU2  | -71.386  | 7.283   | -3137.23                 | FS-5   | -69.306  | 7.920   | -1821.32                 |
| BAPU3  | -70.150  | 8.560   | -3666.52                 | FS-6   | -69.311  | 6.843   | -2156.4                  |
| BAPU4  | -70.109  | 8.665   | 3788.24                  | FS-7   | -69.450  | 7.152   | -1862.92                 |
| BAPU5  | -70.597  | 8.185   | -4149.68                 | FS-8   | -69.164  | 7.312   | -1715.75                 |
| BAPU6  | -70.964  | 7.046   | -2792.83                 | FS-9   | -68.884  | 7.486   | -1578.22                 |



|                  |         |       |          |                   |         |       |          |
|------------------|---------|-------|----------|-------------------|---------|-------|----------|
| <b>BAPU7</b>     | -69.403 | 9.251 | -1344.67 | <b>FS-10</b>      | -8.594  | 7.644 | -1429.66 |
| <b>BAPU8</b>     | -70.909 | 7.623 | -3599.62 | <b>FS-11</b>      | -68.413 | 7.924 | -1431.05 |
| <b>BAPU9</b>     | -70.074 | 8.621 | -3671.82 | <b>FS-12</b>      | -68.155 | 7.817 | -1336.7  |
| <b>BAPU10</b>    | -70.194 | 8.049 | -2660.16 | <b>FS-13</b>      | -67.848 | 7.840 | -1243.67 |
| <b>BAPU11</b>    | -70.214 | 7.973 | -2904.99 | <b>FS-14</b>      | -67.623 | 8.048 | -1048.66 |
| <b>BAPU12</b>    | -70.268 | 7.980 | -3281.61 | <b>AND-1</b>      | -71.470 | 8.451 | 1120.32  |
| <b>BAPU13</b>    | -70.099 | 7.982 | -2779.97 | <b>AND-2</b>      | -71.352 | 8.450 | 1795.18  |
| <b>BAPU14</b>    | -70.839 | 7.936 | -1436.67 | <b>AND-3</b>      | -70.838 | 9.042 | 3249.84  |
| <b>BAPU15</b>    | -70.036 | 8.408 | -3207.05 | <b>AND-4</b>      | -70.584 | 9.224 | 1583.96  |
| <b>BAPU16</b>    | -70.641 | 8.560 | -788.39  | <b>IN-1</b>       | -69.280 | 6.233 | -1698.97 |
| <b>BAPU17</b>    | -70.276 | 8.508 | -3566.6  | <b>IN-2</b>       | -68.602 | 6.875 | -824.4   |
| <b>BAPU18</b>    | -70.220 | 8.165 | -2934.16 | <b>IN-3</b>       | -67.894 | 7.417 | -844.89  |
| <b>BAPU19</b>    | -70.296 | 8.171 | -3270.63 | <b>IN-4</b>       | -68.303 | 7.187 | 65.22    |
| <b>NP-1</b>      | -71.628 | 7.510 | -314.86  | <b>IN-5</b>       | -68.004 | 7.164 | 58.8     |
| <b>NP-2</b>      | -71.626 | 7.248 | -6268.21 | <b>IN-6</b>       | -68.068 | 6.923 | 63.09    |
| <b>NP-3</b>      | -71.625 | 7.076 | -5826.97 | <b>IN-7</b>       | -67.107 | 7.170 | 41.07    |
| <b>NP-4</b>      | -71.817 | 7.360 | -2823.24 | <b>IN-8</b>       | -66.383 | 7.302 | 44.66    |
| <b>NP-5</b>      | -71.799 | 7.342 | -4322.7  | <b>IN-9</b>       | -67.310 | 6.222 | 60.85    |
| <b>NP-6</b>      | -71.707 | 7.232 | -7649.1  | <b>IN-10</b>      | -68.991 | 8.784 | 87.73    |
| <b>NP-7</b>      | -71.657 | 7.162 | -6050.35 | <b>IN-11</b>      | -68.636 | 8.784 | 72.96    |
| <b>NP-8</b>      | -71.418 | 7.133 | -3604.31 | <b>IN-12</b>      | -68.227 | 8.793 | 63.95    |
| <b>NP-9</b>      | -71.263 | 7.069 | -3277.49 | <b>IN-13</b>      | -68.581 | 9.254 | 83.51    |
| <b>NP-10</b>     | -71.150 | 7.045 | -3042.82 | <b>PC-1</b>       | -67.551 | 6.065 | 58.9     |
| <b>SZW-3</b>     | -70.160 | 8.147 | -2640.8  | <b>PC-2</b>       | -67.557 | 6.274 | 47.61    |
| <b>ARAUCA-1</b>  | -71.857 | 6.955 | -7076    | <b>PC-3</b>       | -67.398 | 6.635 | 63.65    |
| <b>ARAUCA-4</b>  | -71.836 | 6.982 | -7009.23 | <b>PC-4</b>       | -67.213 | 7.047 | 50.48    |
| <b>15-Gu-501</b> | -69.282 | 9.134 | -921.39  | <b>PC-5</b>       | -67.076 | 7.324 | 39.37    |
| <b>VEN-1</b>     | -71.919 | 7.863 | 2495.89  | <b>PC-6</b>       | -66.750 | 7.434 | 36.74    |
| <b>VEN-2</b>     | -72.056 | 7.919 | 2679.94  | <b>PC-7</b>       | -66.955 | 6.604 | 60.33    |
| <b>VEN-3</b>     | -71.927 | 8.129 | 2921.44  | <b>PC-13</b>      | -66.575 | 6.851 | 69.55    |
| <b>VEN-4</b>     | -72.000 | 8.258 | 1903.97  | <b>PC-14</b>      | -65.895 | 7.109 | 127.95   |
| <b>VEN-5</b>     | -71.669 | 8.129 | 1710.32  | <b>Nutrias-1</b>  | -69.317 | 8.082 | -2007.63 |
| <b>VEN-6</b>     | -72.177 | 7.726 | 1642.91  | <b>Apure-1</b>    | -70.026 | 7.660 | -2582.89 |
| <b>VEN-7</b>     | -72.129 | 7.806 | 1893.1   | <b>Apure-2</b>    | -70.486 | 7.236 | -2171.19 |
| <b>FS-1</b>      | -69.998 | 7.040 | -2944.72 | <b>Apure-3</b>    | -69.371 | 7.896 | -1815.36 |
| <b>FS-2</b>      | -69.855 | 7.269 | -2700.27 | <b>Hamaca-2X</b>  | -69.322 | 8.598 | -1107.44 |
| <b>FS-3</b>      | -69.719 | 7.537 | -2507.03 | <b>Ticoporo-1</b> | -69.968 | 7.888 | -2534.26 |

En el trabajo de Arnaiz (2011) se tienen dos perfiles gravimétrico-estructurales, los cuales atraviesan la cuenca en estudio (Figura 3.4). En estos dos perfiles se realizó el modelado asumiendo la Cordillera Andina como una estructura en flor positiva, además de la subducción generada a partir del choque entre el bloque de Maracaibo y la Placa Suramericana, otro elemento resaltante de este modelado gravimétrico es el graben de Apure y de Mantecal, así como la separación de la corteza superior e inferior marcada por la discontinuidad de Conrad y las densidades promedio utilizadas para cada estrato.



**Figura 3.4.** Modelos gravimétricos estructurales de la zona noroccidental de Venezuela a) Perfil A-A', b) Perfil B-B'. Tomado y modificado de Arnaiz (2011).

Para culminar la primera etapa se procedió a la recopilación de datos. En esta parte se recopiló la información base sobre la cual se obtuvieron los valores de Anomalía de Bouguer (AB). Esta información proviene del Instituto de Oceanografía de La Universidad de California, Estados Unidos, ya que poseen datos satelitales de Anomalía de Aire Libre (AA) y topografía de todo el mundo, disponibles en la misma página web. En dicho portal, se coloca el intervalo de latitud y longitud del cual se tenga interés, y la interfaz de descarga produce como resultado dos archivos de texto donde se encuentra la ubicación de cada medición, variando el primero en que contiene la AA (Figura 4.2) y el segundo la topografía (Figura 4.1).

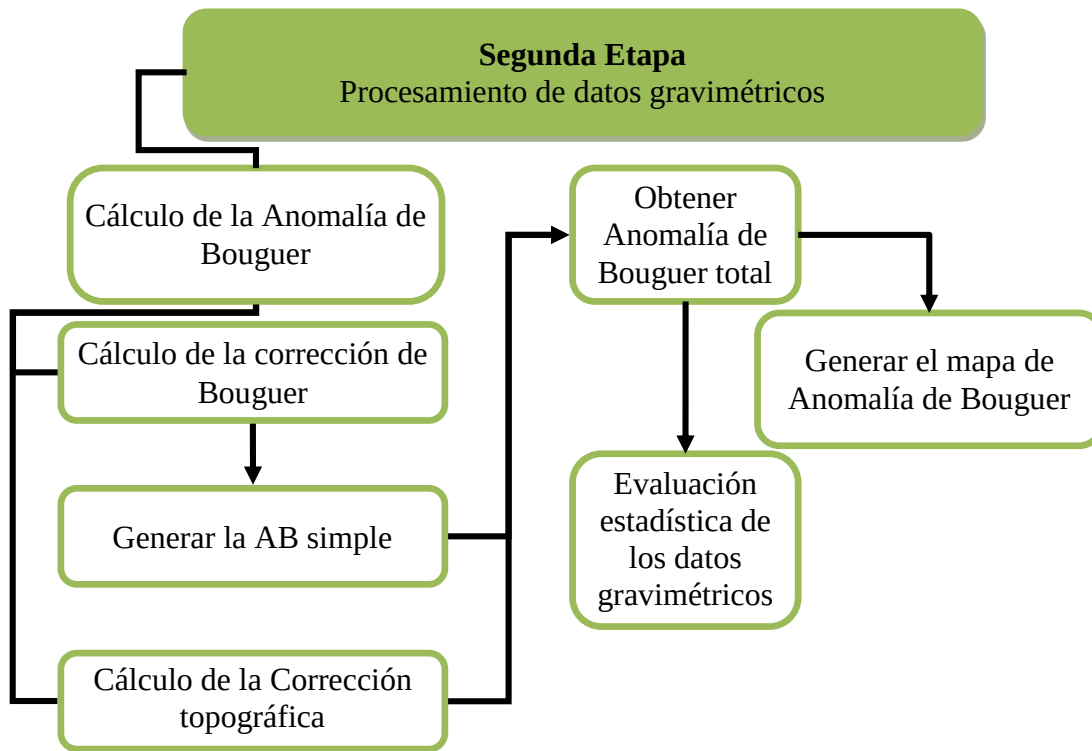
Se obtuvo la anomalía de Aire Libre a partir de datos satelitales generados por el Instituto de Oceanografía de la Universidad de California, Estados Unidos, también disponibles en su página web. En la misma, se seleccionó la ventana de interés, descargándose la información en un archivo de texto que contiene la posición en latitud y longitud y la anomalía de Aire Libre del punto.

Para descargar la topografía se realizó el mismo procedimiento que para la obtención de datos de la anomalía de aire libre.

Los datos magnéticos usados derivan del modelo EMAG2 (*Earth Magnetic Anomaly Grid 2-arc-minute resolution*), el cual integra datos satelitales junto con adquisiciones aéreas y marinas, la resolución de este modelo es de 2 arco minutos y fueron reducidos 4000 m por encima del elipsoide WGS84. Esta base de datos abarca casi toda Venezuela con excepción de una leve franja en los Andes Venezolanos. Estos datos fueron unificados por *Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences* (CIRES).

Cabe destacar que para esta investigación la ventana de datos con la que se trabajó posee medio grado más por cada lado para disminuir los errores por efecto de borde.

### 3.2 Segunda etapa: Procesamiento de datos gravimétricos



**Figura 3.5.** Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para el procesamiento de datos gravimétricos.

El cálculo de la Anomalía de Bouguer (AB) se muestra en la Ecuación 3.1:

$$AB = Gobs \pm Cal \mp Cb + Ctopo - Gteo \quad (Ec\ 3.1)$$

Dónde:

AB= Anomalía de Bouguer.

Gobs= Gravedad observada.

Cal= Corrección de Aire Libre.

Cb= Corrección de Bouguer.

Ctopo= Corrección Topográfica.

Gteo= Gravedad teórica.

Todas las variables mencionadas anteriormente se encuentran expresadas en mGal

Los datos satelitales que se encuentran disponibles en el Instituto de Oceanografía de California son de Anomalía de Aire Libre (AA), esta anomalía en este paso ya posee la corrección de aire libre. Su ecuación se muestra en la Ecuación 3.2:

$$AA = Gobs \pm Cal - Gteo \text{ (Ec 3.2)}$$

De lo anterior, la Anomalía de Bouguer se puede expresar como se muestra en la Ecuación 3.3:

$$AB = AA \mp Cb + Ctopo \text{ (Ec 3.3)}$$

Por lo que para determinar la AB sólo se necesita determinar la Cb y la Ctopo para cada punto.

Para calcular la Cb y Ctopo se utilizan las Ecuaciones 3.4 y 3.5:

$$Cb = 0.04191 * \rho b * h \text{ (Ec 3.4)}$$

$$Ctopo = t * \rho b \text{ (Ec 3.5)}$$

Dónde:

$\rho b$ = Densidad de Bouguer, expresada en g/ml

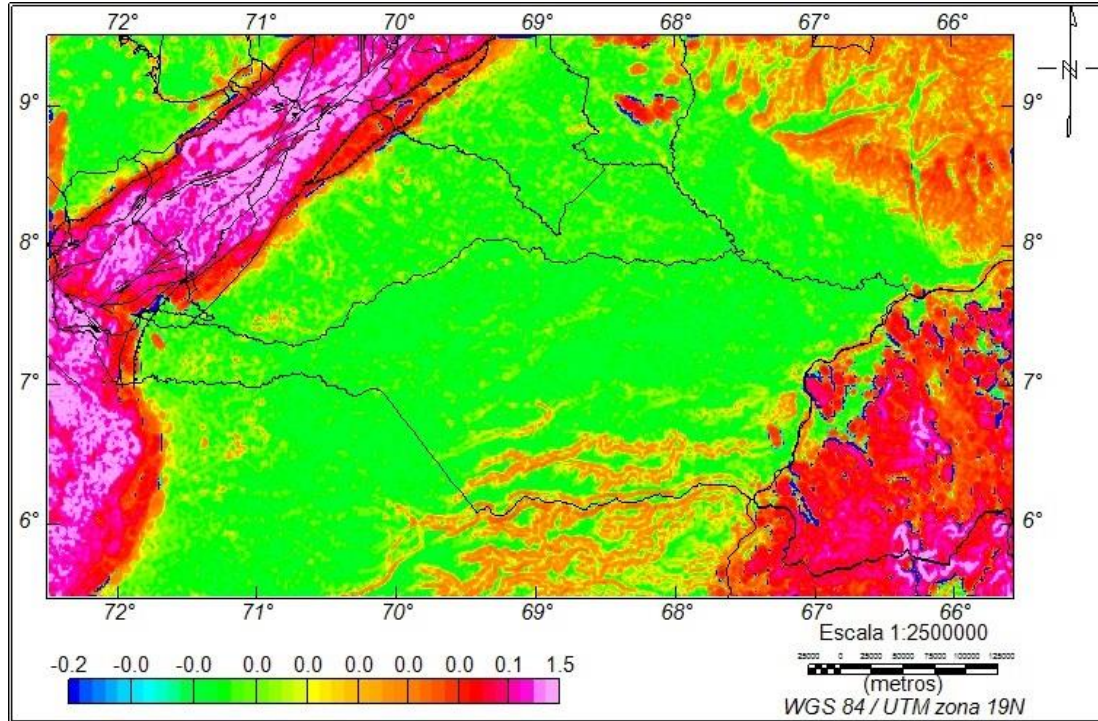
h= Altura del punto con respecto al nivel medio del mar, expresada en m.

t=Factor geométrico que varía dependiendo de los cambios en la topografía que se encuentra alrededor del punto en un radio de 22 km.

En este caso la densidad de Bouguer utilizada fue de una lámina compuesta en donde, para los datos terrestres la densidad utilizada fue de 2.67 g/ml ya que es la densidad de la corteza continental. Para el caso de los datos en el cual la topografía fue negativa (datos de batimetría), utilizó una densidad de 1.03 g/ml.

Para calcular el factor geométrico t se utilizó el software Oasis montaj 6.2.4, para realizar esta corrección el mismo necesita un mapa de topografía local (área de estudio) y un mapa de topografía regional, la característica de este mapa regional es que posee un grado más de información por cada lado. Para el caso de este trabajo se trabajó en una ventana cuya longitud se encuentra en el intervalo de longitud [72.5, 65.5] W, y latitud de [9.5, 5.5], lo que significó que el mapa de anomalía regional que se utilizó fue con un intervalo en longitud de [73.5, 64.5] W y latitud de [10.5, 4.5].

A manera de control de calidad de este dato, se realizó un mapa con el valor del factor en la corrección topográfica (figura 3.6), el cual debe poseer una tendencia similar a la topografía



**Figura 3.6.** Mapa de factor t del área de estudio.

Cálculo de muestra:

Para tener una mejor comprensión del cálculo realizado, se procedió paso a paso de la siguiente manera:

Para el punto:

P1: Lat=-72.49170; Long=9.49790; Topo=29.00000; AA=-66.20000

$$Cb = 0.04191 * 2.67000 * 29.00000 = 3.24510$$

$$C_{topo} = 0.00010 * 2.67000 = 0.00027$$

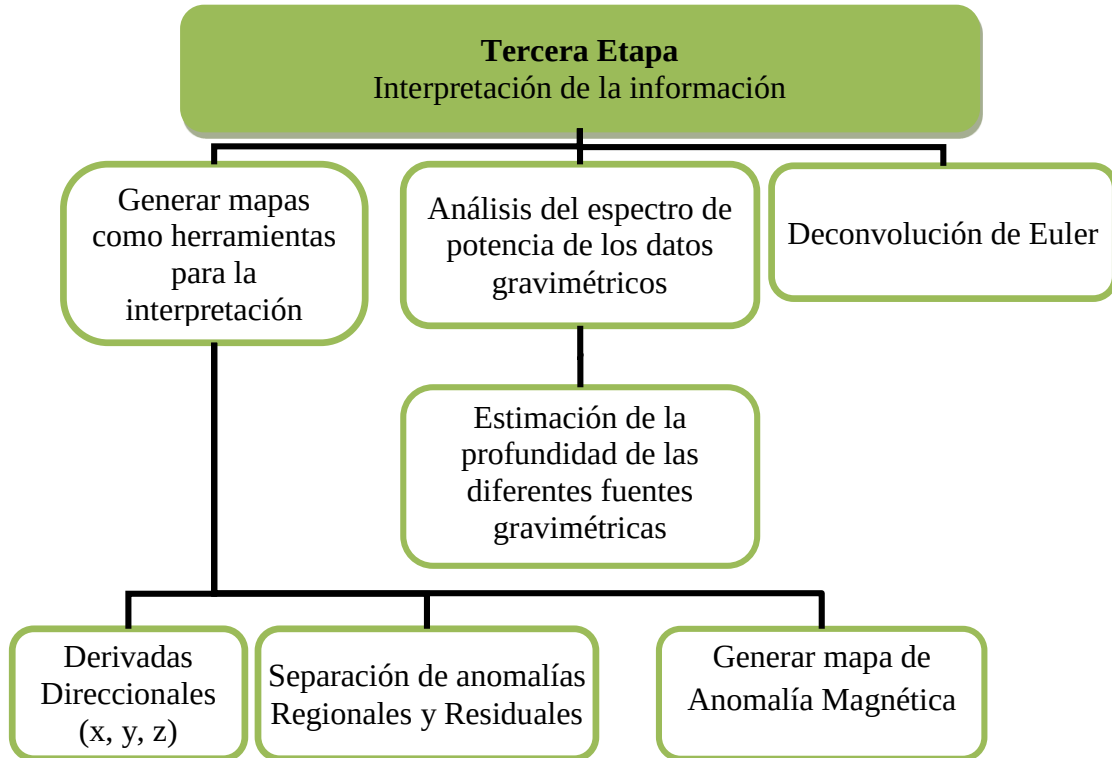
$$AB = -66.20000 - 3.24510 + 0.00027 = -69.44483$$

La AB se encuentra expresada en mGal.

Después de generar la Anomalía de Bouguer a partir de la Anomalía de Aire Libre se procedió a generar el mapa de AB de la zona, al mismo tiempo se realizó el

análisis estadístico de los datos para determinar media, moda, tendencia de los datos, y la existencia de datos anómalos.

### 3.3 Tercera etapa: Interpretación de la información



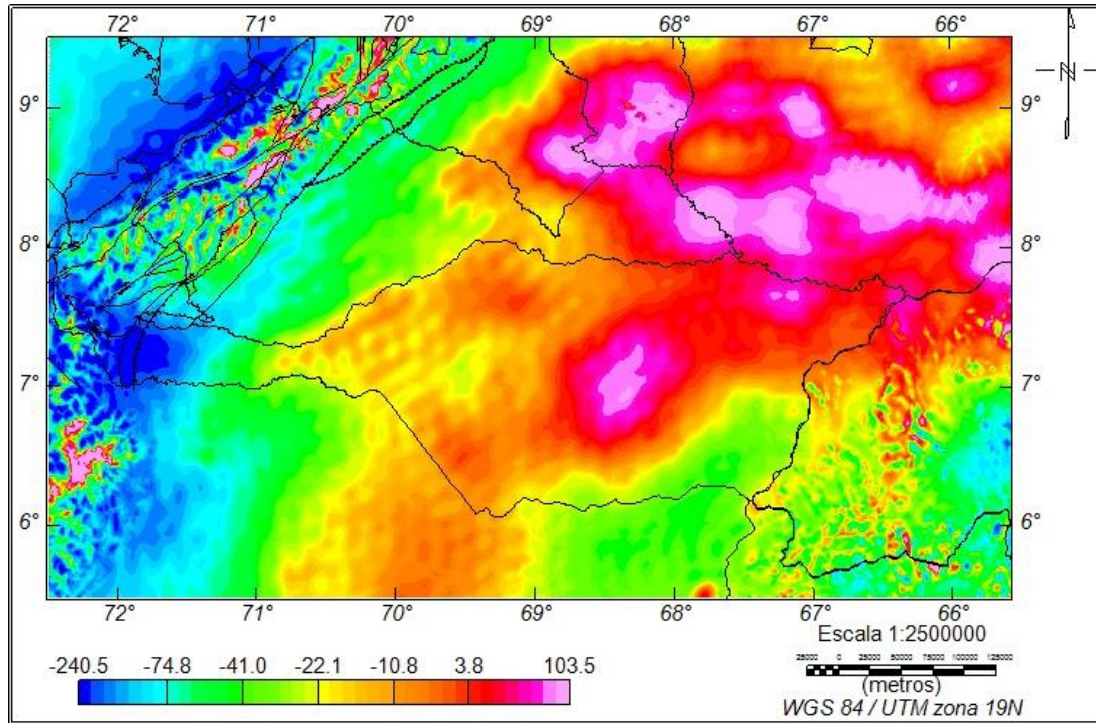
**Figura 3.7.** Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para la interpretación de la información.

#### 3.3.1 Mapas a generar como herramientas para la interpretación:

El mapa de AB que obtenido como resultado después de realizar todas las operaciones en la etapa anterior se muestra en la figura 3.8.

Las distorsiones de textura corrugada que se observan en la figura 3.8 es una consecuencia de realizar interpolaciones en áreas de levantamientos con el mayado regular. Por lo que se le aplica un filtro gaussiano con una frecuencia de corte de 0.0349 de manera que se puede eliminar este efecto sin que se distorsione la información de interés.

Al momento de interpretar la información proveniente del mapa de Anomalía de Bouguer, resulta una herramienta indispensable la de aplicar filtros para resaltar atributos en el mapa que no pueden observarse a simple vista.



**Figura 3.8.** Mapa de Anomalía de Bouguer para una densidad de 2.67 g/ml.

### 3.3.1.1 Separación de anomalías Regionales y Residuales:

En el presente trabajo se utilizó el software Oasis Montaj 6.2.4 tanto para la visualización como para el procesamiento de la información.

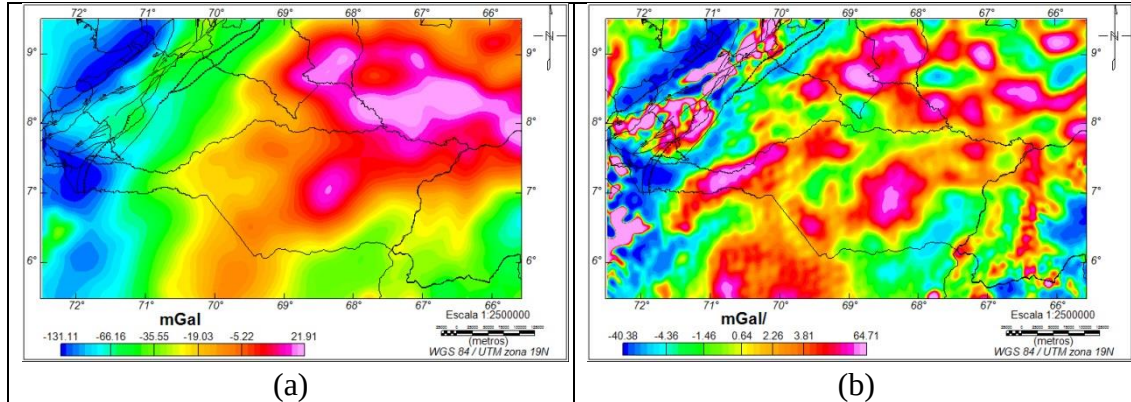
A continuación se nombran los métodos de separación Regional Residual utilizados:

#### 1. Continuación Analítica del Campo.

Se realizó una continuación analítica del campo hacia arriba con el fin de separar las señales generadas por fuentes someras o residuales de las fuentes profundas o regionales. En este método se elimina toda la información proveniente de fuentes gravimétricas someras, exponiendo con un mejor detalle la información que



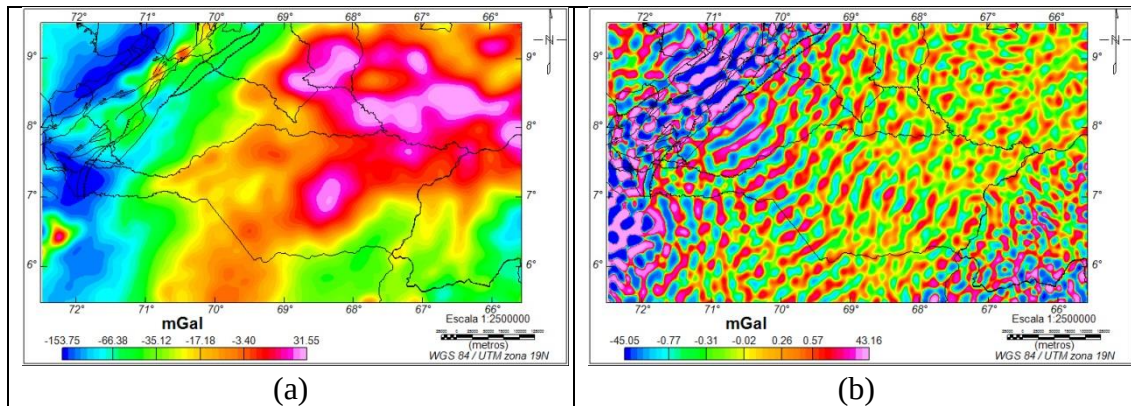
aportan las fuentes profundas. Para determinar el efecto generado por las fuentes someras se realiza una substracción entre el mapa de AB con respecto al mapa Regional de continuación analítica del campo hacia arriba (Figura 3.9).



**Figura 3.9.** Mapas de separación Regional-Residual por continuación analítica del campo de la Anomalía de Bouguer a una altura de 9000 m. (a) mapa regional, (b) mapa residual.

## 2. Filtrado de longitud de ondas por un filtro Pasa Banda.

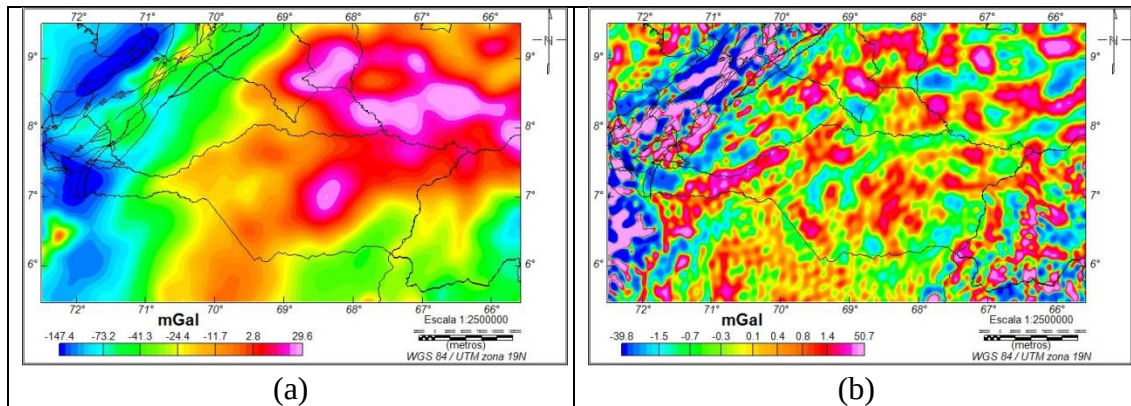
Para este caso la separación Regional residual comienza con el análisis del espectro de potencia de toda la ventana de datos del área de estudio. A partir de este espectro se identifican los tramos correspondientes a la fuente regional, residual y ruido. Estos tramos se encuentran limitados por un rango de número de ondas característico (González, 2014). Una vez que se obtiene la información de longitud de onda del espectro de potencia, se utiliza la misma para que se trunquen los datos teniendo como límite las frecuencias de corte obtenidas. El mapa resultante de este procedimiento es el mapa de Anomalía de Bouguer Regional, ya que los datos que se eliminan provienen de las fuentes gravimétricas someras. Para obtener el mapa de anomalía residual se aplica una sustracción entre el mapa de AB con respecto al mapa de AB regional generado con este método (Figura 3.10).



**Figura 3.10.** Mapas de separación Regional-Residual por filtro pasa banda de la Anomalía de Bouguer a una frecuencia de corte de 0.026. (a) mapa regional, (b) mapa residual.

### 3. Método de separación Regional Residual por un Filtro Gaussiano.

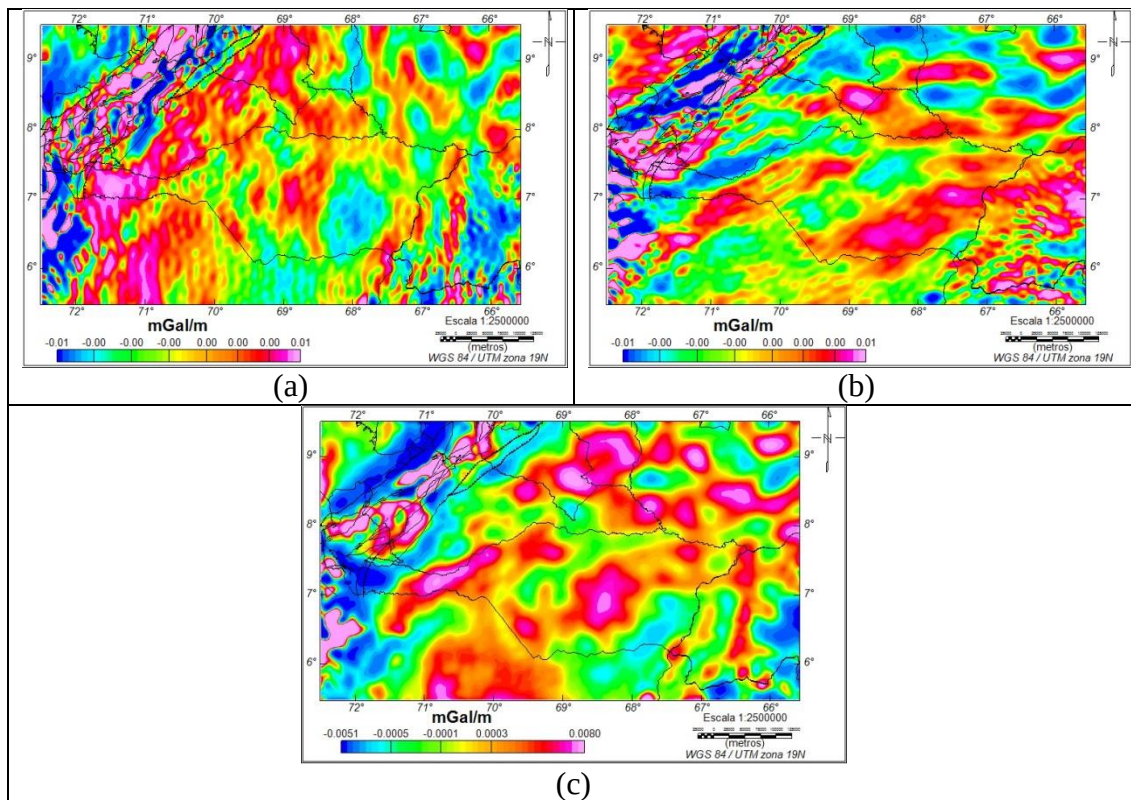
Este método también parte del análisis del espectro de potencia del mapa total de AB para seleccionar los diferentes rangos longitudes de onda que contiene cada fuente gravimétrica. A partir del mismo se utiliza el valor de ondas obtenidos en los límites de los distintos rangos. Estos datos obtenidos en el análisis espectral los utiliza el software de procesamiento antes mencionado para estimar la desviación estándar de la curva gaussiana que trunca los datos de AB. El mapa resultante de este paso es el mapa de Anomalía de Bouguer Regional en la zona. Para estimar la AB Residual se realizó el mismo procedimiento que en el paso anterior (Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Mapas de separación Regional-Residual por filtro gaussiano de la Anomalía de Bouguer a una frecuencia de corte de 0.026. (a) mapa regional, (b) mapa residual.

Derivadas direccionales:

Este método se realizó con la finalidad de observar el gradiente de la anomalía gravimétrica por cada punto de medición. Posteriormente esta información se muestra visualmente lo que permite resaltar los gradientes que se producen por los contrastes de densidades cuyas orientaciones se alinean con la dirección de la derivada, y de esta manera darle un contexto geológico o tectónico a la anomalía observada. Para este trabajo se realizó el método de derivada direccional para los tres ejes preferenciales X, Y, Z (Figura 3.12).

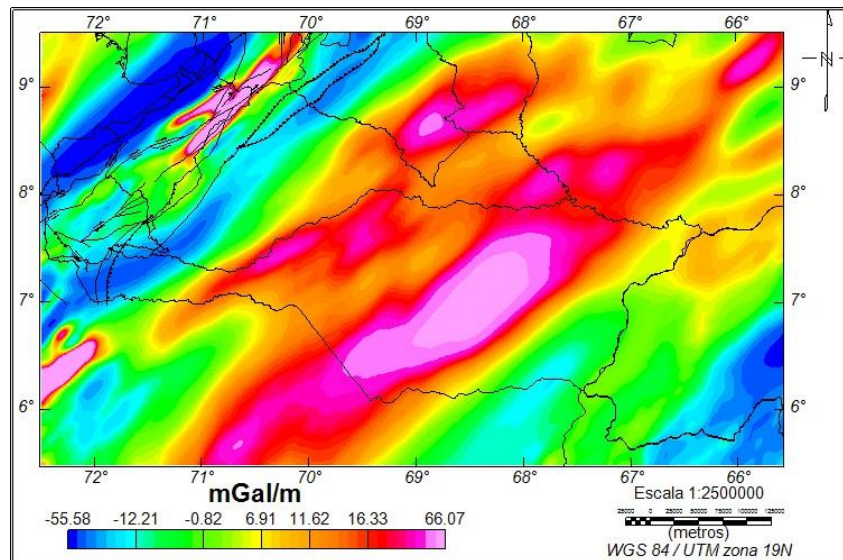


**Figura 3.12.** Mapas de derivadas direccionales de la Anomalía de Bouguer. (a) derivada en X, (b) derivada en Y, (c) derivada en Z.

Coseno Direccional:

Realizado con la finalidad de observar anomalías gravimétricas en ciertas direcciones diferentes a las del eje X – Y, también con la finalidad de resaltar gradientes producidos en esta dirección en particular (Figura 3.13).

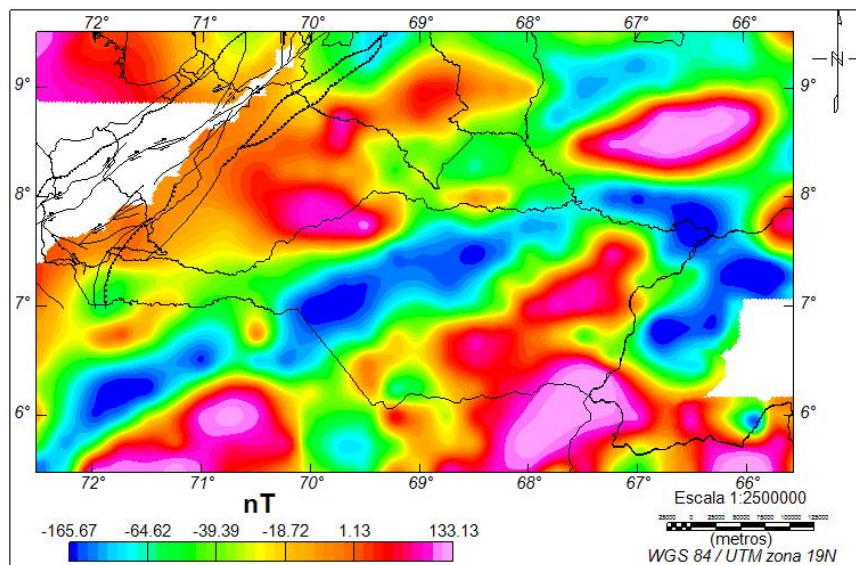




**Figura 3.13.** Mapa de coseno direccional a un Angulo de 45° de la Anomalía de Bouguer.

#### Mapa de Anomalía Magnética:

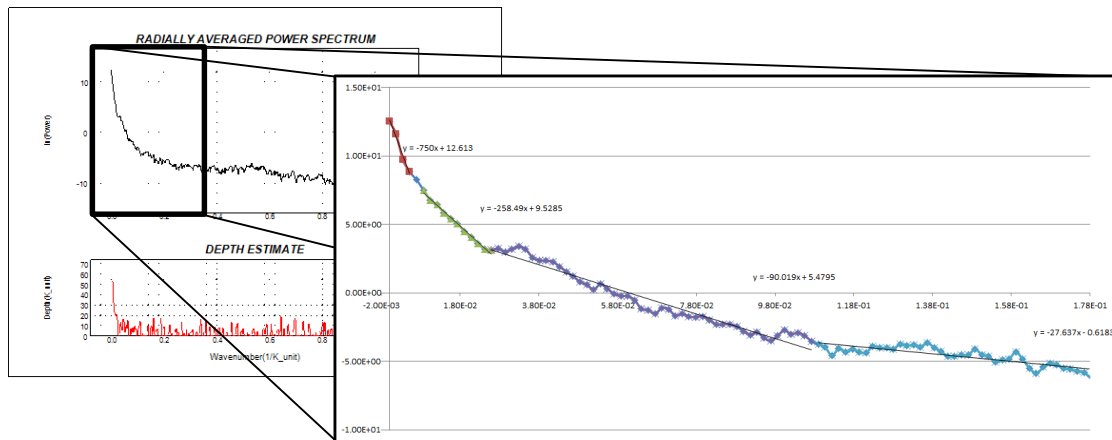
Ya que este mapa mide la anomalía magnética (nT) pueden marcarse las estructuras que fueron generadas en la misma época ya que, cuando la roca se enfrió quedó con la orientación magnética existente de ese momento. Esta información junto con la gravimétrica permitirá establecer las direcciones de las estructuras predominantes (Figura 3.13).



**Figura 3.14.** Mapa de Anomalía Magnética.

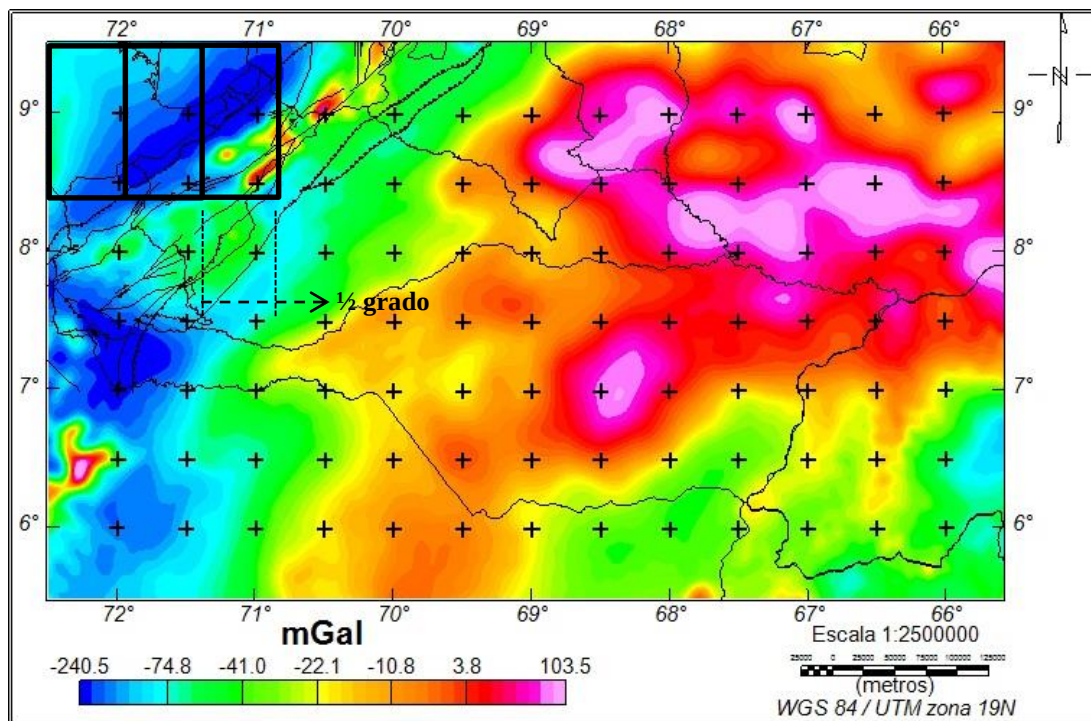
### 3.3.1.2 Análisis del espectro de potencia de los datos gravimétricos:

Basado en el método descrito por Spector y Grant (1970), el cual consiste en utilizar la representación gráfica del logaritmo de la potencia (energía) en función del número de ondas, y en él, seleccionar el ancho de banda donde la relación entre estas dos variables sea lineal, partiendo del hecho de que la pendiente de esta línea es proporcional a la profundidad de la fuente que genera la anomalía (Alberti, 2012). Para este trabajo primero se realizó el espectro de potencia de toda la ventana de datos de AB (Figura 3.14) después de haberle aplicado el filtro gaussiano. De este método se logra identificar 4 tramos correspondientes a la respuesta de la fuente profunda, dos fuentes intermedias y una fuente somera, donde cada uno de estos rangos está limitado por un intervalo de número de onda que lo caracteriza. Después de esta fuente somera el dato que se observa es muy aleatorio, lo que se denomina ruido blanco.



**Figura 3.15.** Análisis espectral de la AB para toda la ventana de datos.

Este procedimiento se subdivide en ventanas de  $1^\circ \times 1^\circ$  a la cual se le realizó el espectro de potencia. Estas ventanas poseen un desplazamiento horizontal y vertical de  $\frac{1}{2}$  grado de distancia, con la finalidad de obtener mayor información de la profundidad de cada fuente gravimétrica con una mayor precisión (figura 3.15).



**Figura 3.15.** Desplazamiento de las ventanas utilizadas y ubicación del punto central de cada ventana realizada.

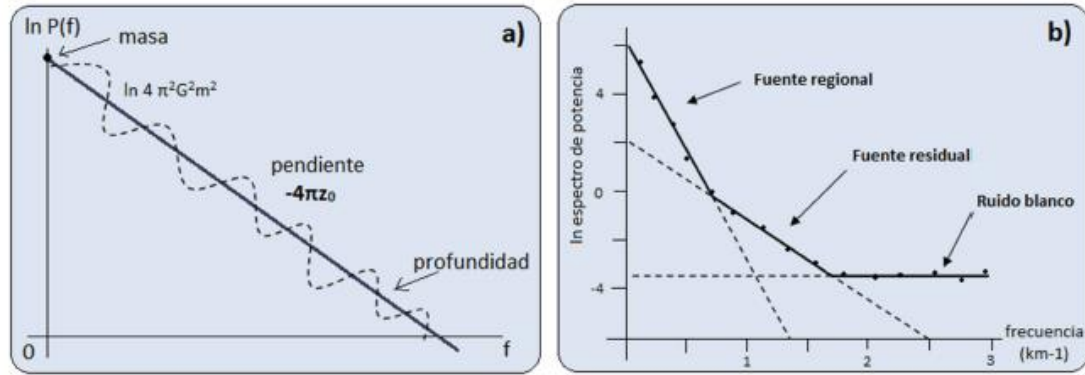
Para cada espectro obtenido se dividió en diversas pendientes, y posteriormente para cada pendiente se calculó la profundidad.

Estimación de profundidad:

Las profundidades se obtienen mediante un ajuste por mínimos cuadrados a los puntos del espectro de potencia, que quedan entre cada intervalo de frecuencias, calculando la pendiente de dicho ajuste lineal y transformándolo en profundidad (González, 2014) (Figura 3.16).

**Tabla 3.2.** Profundidades promedios de 4 fuentes gravimétricas estimadas por el análisis espectral.

| Fuente Gravimétrica | Profundidad (km) |
|---------------------|------------------|
| Profunda            | -59.683          |
| Intermedia 2        | -20.570          |
| Intermedia 1        | -7.163           |
| Somera              | -2.199           |



**Figura 3.16.** a) Representación gráfica del logaritmo neperiano del espectro de potencia respecto a la frecuencia. b) Representación ideal del espectro de potencia frente a la frecuencia. Tomado de González (2014).

### 3.3.2 Deconvolución de Euler:

Este método también es utilizado para estimar la profundidad y la posición de un cuerpo que genere anomalías gravimétricas. El mismo se basa en relacionar el campo y los gradientes de las componentes en el punto donde se estima la posición con el índice de la Ecuación de Homogeneidad de Euler, el cual es interpretado como un índice de la geometría de la fuente o índice estructural, que es una medida de la tasa de cambio del potencial con la distancia (Reid *et al.*, 1990).

La ecuación de Euler general con la cual se realiza este método es descrita en la Ecuación 6:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad (\text{Ec 4.6})$$

Al tomar en cuenta las características de un campo potencial, la misma se puede escribir como se muestra en la Ecuación 4.7.

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (\text{Ec 4.7})$$

Donde  $(X_0, Y_0, Z_0)$  es la posición de la fuente, “T” es el campo total medido en  $(X, Y, Z)$ . Este campo posee un valor regional “B”, y “N” denota al índice estructural (Thompson, 1982). Esta ecuación de Euler se resuelve por el método de

mínimos cuadrados para un índice estructural “N”, dado simultáneamente para cada posición de los puntos del mallado de datos dentro de un sub mallado o ventana seleccionada. Como se puede observar, este método usa las derivadas del campo potencial para generar imágenes en profundidad de una fuente gravimétrica (Hsu, 2002).

En cuanto al índice estructural “N”, Alberti (2012) comenta: el mismo es una medida de la tasa de cambio con la distancia (gradiente) de un campo y por ende es una función de la geometría asociada a un cuerpo, de manera que el campo magnético de un cuerpo dipolar disminuye con el inverso de la distancia al cubo, dando así un valor de índice 3, mientras que una fuente lineal y vertical da una disminución de la distancia al cuadrado y por ende el índice estructural es de 2.

En general los cuerpos extendidos se forman a través de la unión de dipolos y por ende tendrán índices entre 0 y 3 (Mushayandebvu *et al.*, 2001).

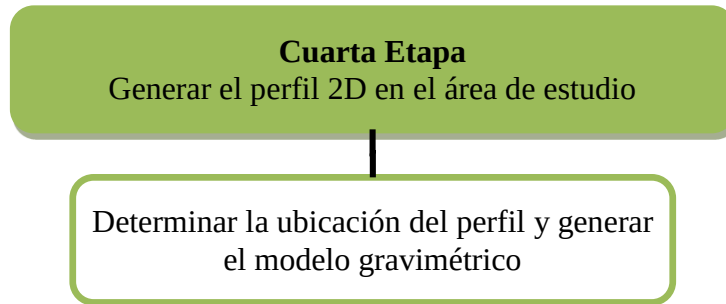
Según Reid (1990) y Alberti (2012) los índices estructurales para las diferentes estructuras se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Índice estructural asociado a las estructuras geológicas (tomado y modificado de Alberti 2012).

| Índice Estructural | Estructura Geológica |
|--------------------|----------------------|
| 0                  | Contacto             |
| 0.5                | Capa gruesa          |
| 1                  | Dique                |
| 2                  | Cilindro vertical    |
| 3                  | Esfera               |



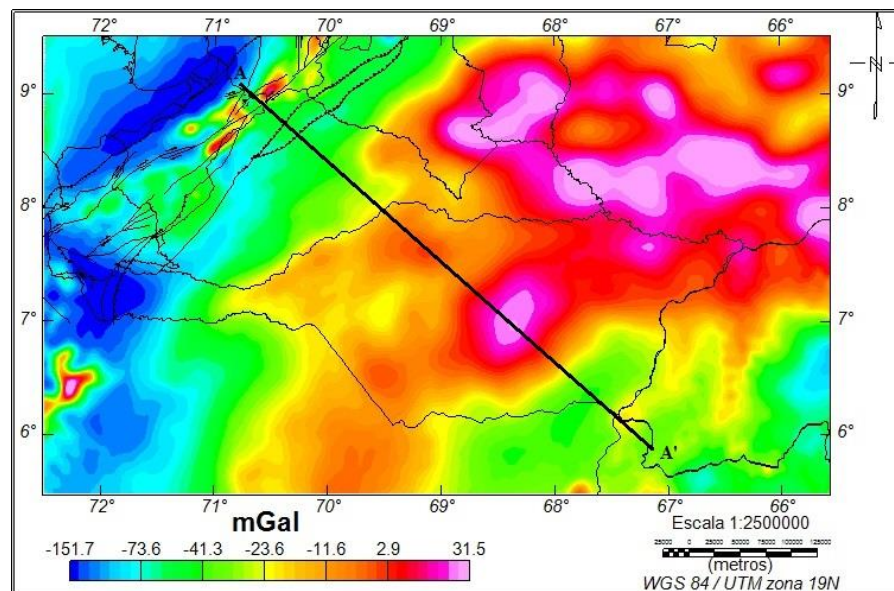
### 3.4 Cuarta etapa: generar el perfil 2D en el área de estudio



**Figura 3.17.** Diagrama de flujo sobre la metodología a seguir para generar el perfil 2D en el área de estudio.

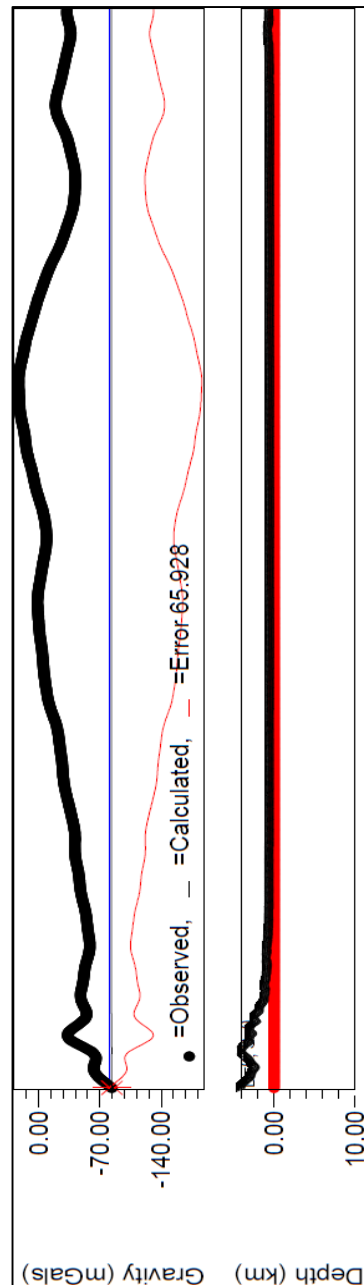
Determinar la ubicación del perfil y generar el modelo gravimétrico:

A partir de toda la información recopilada y generada, se determinó la zona de mayor interés dentro del área de estudio. Sobre esta zona de interés se trazó un perfil que atraviesa por completo esta área. Para este trabajo el perfil se trazó perpendicular a los Andes de Mérida, atravesando completamente la cuenca de Barinas-Apure. Como se puede ver en la figura 3.18, se muestra la ubicación del perfil que se va a modelar. Este modelado se realizó utilizando el módulo de *GM-SYS Profile modelling*, el cual se encuentra integrado dentro del software de Oasis Montaj.



**Figura 3.18.** Ubicación del Perfil gravimétrico.

El perfil (Figura 3.19) posee una longitud de 544 km, a partir de éste se generará el modelo de anomalía gravimétrica, este modelo posee un error de 65.928 mGal y debe ser ajustado hasta que la curva teórica (roja) y la curva de Anomalía de Bouguer (negra) de los datos gravimétricos posean un error inferior a los 10 mgals.

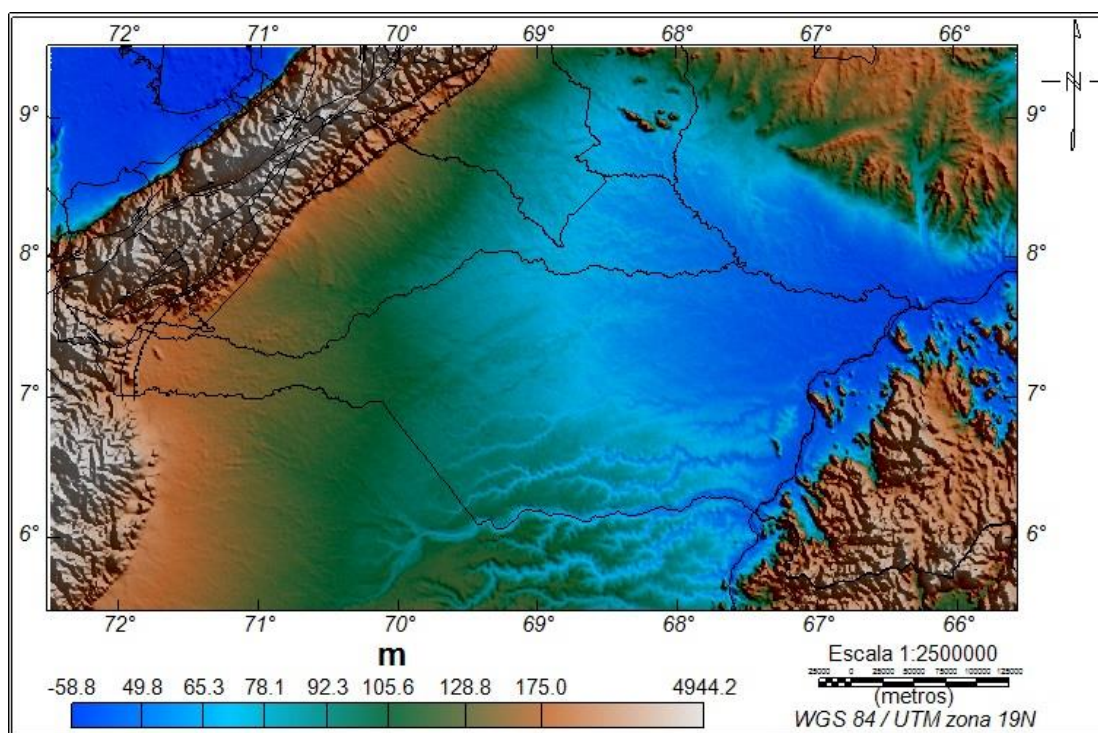


**Figura 3.19.** Perfil gravimétrico a modelar.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

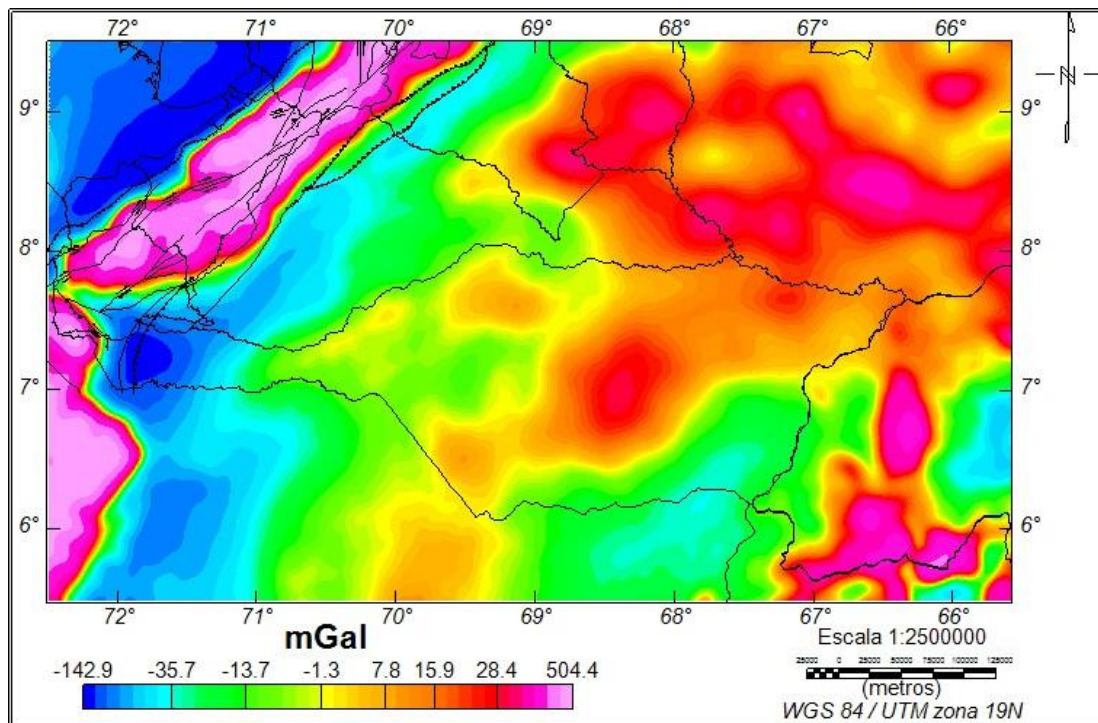
En la figura 4.1 se muestra la topografía del área de estudio, ésta varía entre 58 m por debajo del nivel del mar, hasta 4944 m por encima del mismo. Las provincias fisiográficas resaltantes en esta región son Los Andes de Venezuela, ubicados al noroeste y limitando al norte con el Lago de Maracaibo. Al sureste aflora el cratón de Guayana y en la zona central se observan los llanos venezolanos, esta llanura se extiende hasta Colombia.



**Figura 4.1:** Mapa de topografía del área de estudio.

La figura 4.2 corresponde al mapa de Anomalía de Aire Libre, en éste se observa que los valores máximos y mínimos son de 504.4 y -142.9 mGal

respectivamente. Hacia el noroeste se encuentran los valores máximos para la Cordillera de los Andes y mínimos para el Lago de Maracaibo, ambas expresiones poseen un rumbo aproximado de N45E. Hacia el sureste se observan altos valores de anomalía y, de igual manera hacia el noreste del mapa. Hacia el centro de Apure se refleja una anomalía que rompe con la uniformidad relativa presente en toda la zona adyacente.



**Figura 4.2:** Mapa de Anomalía de Aire Libre.

Tomando en cuenta que el mapa de Anomalía de Aire Libre se encuentra relacionado con la topografía de la zona, ya que en este punto de la investigación no se han realizado las correcciones de Bouguer y topográfica, se pueden comparar las figuras 4.1 y 4.2, detallando en ellas que los altos valores de gravedad corresponden a las zonas con alta topografía, y los bajos valores se corresponden de igual manera con las zonas de baja topografía. Cabe destacar que desde la zona central de Apure hasta la Cordillera de los Andes, en la figura 4.2 existen variaciones gravimétricas que

difieren de la topografía, ya que en la figura 4.1 no existe un relieve topográfico significativo.

#### **4.1 Mapa de Anomalía de Bouguer**

El mapa de Anomalía de Bouguer (Figura 4.3) presenta un rango de valores comprendido entre -151.7 y 31.5 mGal, ubicando los valores máximos entre los estados Apure, Barinas, Cojedes, Guárico, y Portuguesa. Los valores mínimos se encuentran hacia el noroeste, y comprende la depresión en donde se encuentra el Lago de Maracaibo, esta cuenca posee un rumbo aproximado N45E, además, se observa cómo La Cordillera de los Andes aparece reflejada con la misma dirección, cambiando su orientación y su respuesta gravimétrica hacia Colombia, alcanzando unos valores que oscilan entre -73 y 140 mGal aproximadamente.

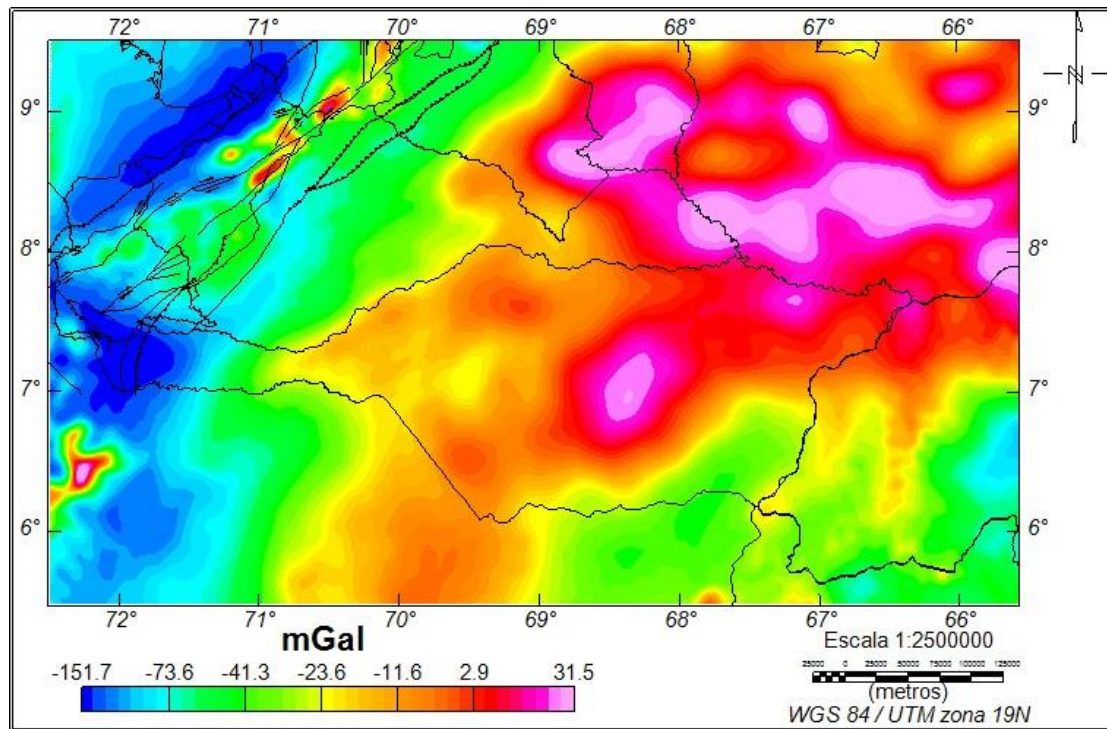
Hacia el sureste la anomalía gravimétrica disminuye hasta alcanzar valores cercanos a -73.6 mGal, donde se ubica parte del Cratón de Guayana. Hacia el noreste se concentran los altos gravimétricos con orientaciones de N15E y N30E, que corresponden según González (2009) a fallas de corrimiento reactivadas, dentro de las cuales se focaliza un sector que posee una significativa disminución de la anomalía. Este sector se encuentra asociado a un bajo estructural el cual, según el autor mencionado anteriormente se debe al Graben del Baúl. Las fallas anteriormente mencionadas constituyen el borde del graben.

En la cuenca Barinas-Apure se observa la variación el valor de anomalía en sentido creciente, de izquierda a derecha desde -41.3 a 31.5 mGal aproximadamente. Dentro de esta cuenca resalta un alto gravimétrico ubicado hacia la parte central de Apure, asociado a un alto estructural; este alto se encuentra separado del conjunto de los altos gravimétricos del noreste, debido al Arco del Baúl.

Al comparar las figuras 4.3 y 4.2 se observa como las altas anomalías que se encontraban asociadas a los altos topográficos en el mapa de Anomalía de Aire Libre se redujeron al aplicar las correcciones de Bouguer y topográfica, resaltando los elementos asociados a estructuras presentes en el área como se puede observar en la cuenca de Maracaibo que se encuentra al noroeste, debajo de este, se encuentra la



Cordillera de los Andes, así como la cuenca de Barinas-Apure, y los grábenes de apure y el Mantecal.



**Figura 4.3:** Mapa de Anomalía de Bouguer, para una densidad de 2.67 g/ml.

#### 4.2 Análisis estadístico de los datos

Se realizó un análisis estadístico de los datos gravimétricos para evaluar la distribución poblacional del estudio, además se calcularon los diferentes estadísticos descriptivos como lo son: mínimo, máximo, media, mediana, etc. Adicionalmente se utilizaron herramientas gráficas para efectuar el análisis.

Durante el análisis se calcularon los estadísticos descriptivos de los datos de Anomalía de Bouguer (Tabla 4.1)

**Tabla 4.1:** Estadísticos descriptivos de los datos de AB.

|    | Numero de muestras | Mínimo   | Máximo  | Media   | Mediana | Desviación estándar | Varianza |
|----|--------------------|----------|---------|---------|---------|---------------------|----------|
| AB | 100845             | -243.487 | 104.151 | -32.680 | -20.595 | 43.188              | 1865.160 |

De los estadísticos descriptivos resalta que el rango de los valores es de 347,638 mGal, variando de valores negativos a positivos, con una desviación estándar de 43.188, la cual indica una moderada dispersión de los datos con respecto a la media aritmética.

Para visualizar la distribución de los datos se construyó el histograma de frecuencias (Figura 4.4) y como se puede apreciar en la tabla 4.2, éste fue realizado al dividir el rango de valores obtenidos en 20 clases, además se observa en ella el intervalo que comprende cada clase y la frecuencia con la que se repite esta clase dentro del número total de muestras.

**Tabla 4.2:** División de clases del histograma de frecuencias de los datos de AB.

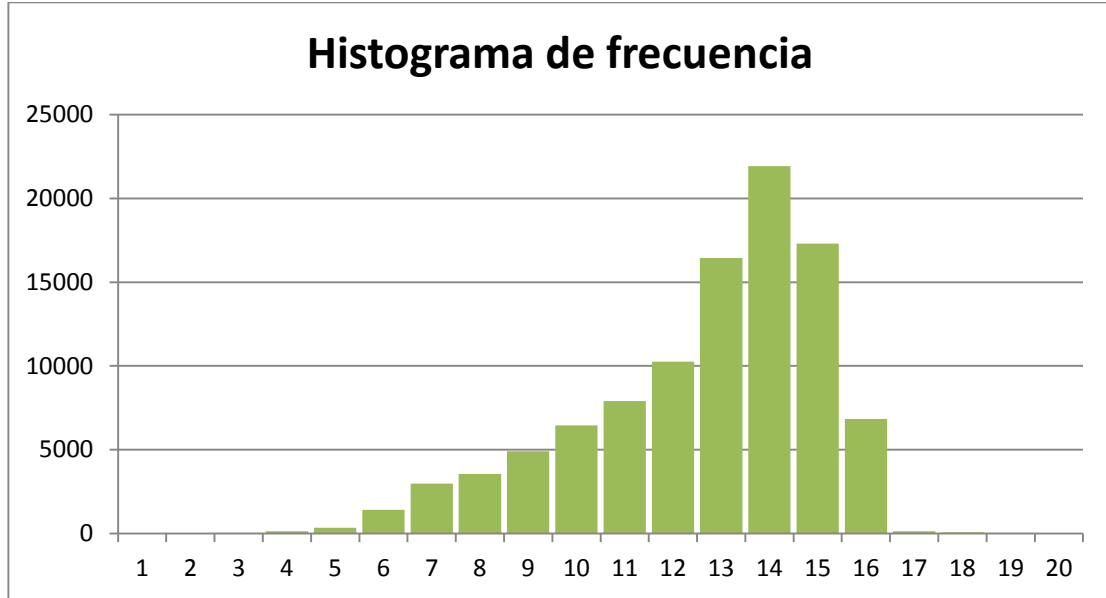
| Clase | Intervalo (mGal) |              | Frecuencia | Clase | Intervalo (mGal) |             | Frecuencia |
|-------|------------------|--------------|------------|-------|------------------|-------------|------------|
|       | Inferior         | Superior     |            |       | Inferior         | Superior    |            |
| 1     | -243.4869367     | -226.1050290 | 5          | 11    | -69.6678593      | -52.2859516 | 7902       |
| 2     | -226.1050290     | -208.7231212 | 22         | 12    | -52.2859516      | -34.9040438 | 10262      |
| 3     | -208.7231212     | -191.3412135 | 51         | 13    | -34.9040438      | -17.5221361 | 16447      |
| 4     | -191.3412135     | -173.9593057 | 143        | 14    | -17.5221361      | -0.1402283  | 21925      |
| 5     | -173.9593057     | -156.5773980 | 342        | 15    | -0.1402283       | 17.2416794  | 17311      |
| 6     | -156.5773980     | -139.1954903 | 1424       | 16    | 17.2416794       | 34.6235871  | 6830       |
| 7     | -139.1954903     | -121.8135825 | 2982       | 17    | 34.6235871       | 52.0054949  | 133        |
| 8     | -121.8135825     | -104.4316748 | 3560       | 18    | 52.0054949       | 69.3874026  | 84         |
| 9     | -104.4316748     | -87.0497670  | 4920       | 19    | 69.3874026       | 86.7693104  | 39         |
| 10    | -87.0497670      | -69.6678593  | 6456       | 20    | 86.7693104       | 104.1512181 | 7          |

En el histograma de frecuencia de los datos de Anomalía de Bouguer (Figura 4.4) el eje X lo representa el número de clase, y el Y la frecuencia de repetición. Se observa que los datos poseen una distribución normal, asimétrica hacia la derecha y sesgada hacia la izquierda, en donde los datos corresponden, en este caso, a los valores mínimos de AB.

La clase que posee más frecuencia de repetición es la 14.

La zona que corresponde a los valores que se encuentran dentro de las clases 13, 14 y 15, las cuales poseen mayor frecuencia de repetición, se encuentran concentrados en toda la zona sur y norte hacia el este. Hacia el noroeste se encuentran

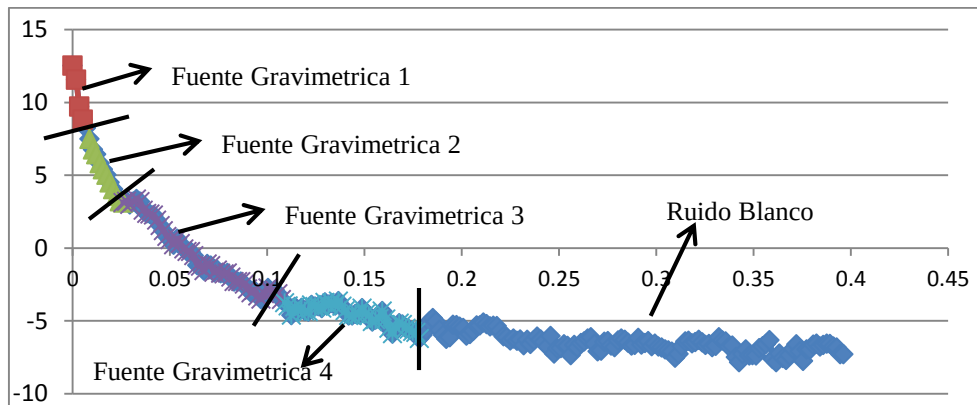
las primeras clases que corresponden a la zona sesgada en el histograma, en esta parte se ubican los valores de anomalía generados por la cuenca del Lago de Maracaibo y parte de la Cordillera Andina.



**Figura 4.4:** Histograma de frecuencia de los datos de AB.

### 4.3 Espectro de potencia de los datos gravimétricos

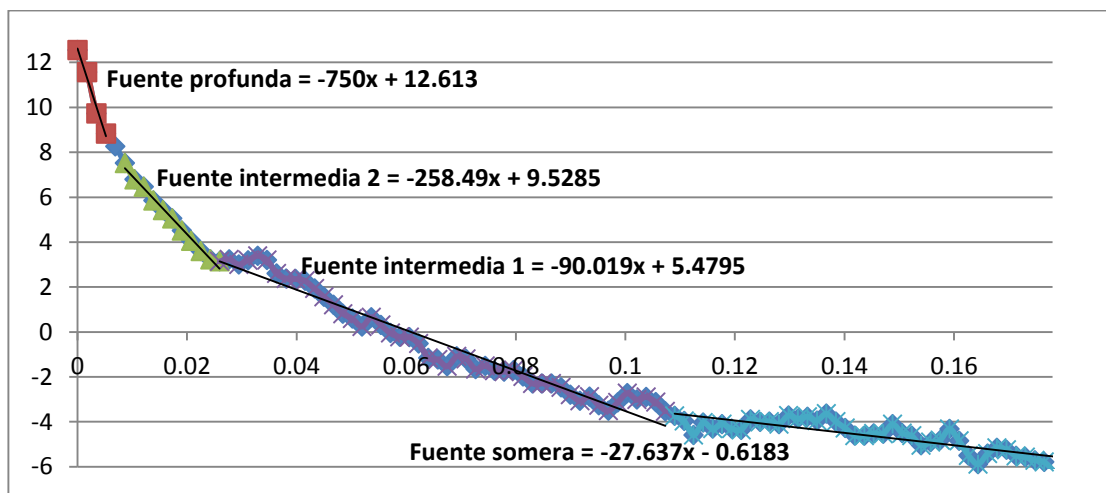
Para el mapa de Anomalía de Bouguer se le realizó el espectro de potencia a toda el área de datos (Figura 4.5). En esta gráfica, el eje X corresponde al número de onda y el eje Y al neperiano de la potencia. Se pueden observar entonces, cuatro fuentes gravimétricas diferentes más el ruido blanco existente en los datos.



**Figura 4.5:** Espectro de potencia de los datos de AB.



Al eliminar el ruido blanco de la gráfica del espectro de potencia, debido a que no aporta información relevante para el estudio, se analizaron las cuatro tendencias dominantes en el espectro (Figura 4.6). Las ecuaciones trabajadas con el programa Excel 2010 correspondientes a cada línea de tendencia, fueron obtenidas a partir de cada intervalo de frecuencias que corresponde a una fuente gravimétrica. Las frecuencias de corte que dividen una fuente de otra son: para la profunda 0.00519, intermedia 1: 0.026, intermedia 2: 0.107 y finalmente para la somera 0.178.



**Figura 4.6:** Análisis del espectro de potencia.

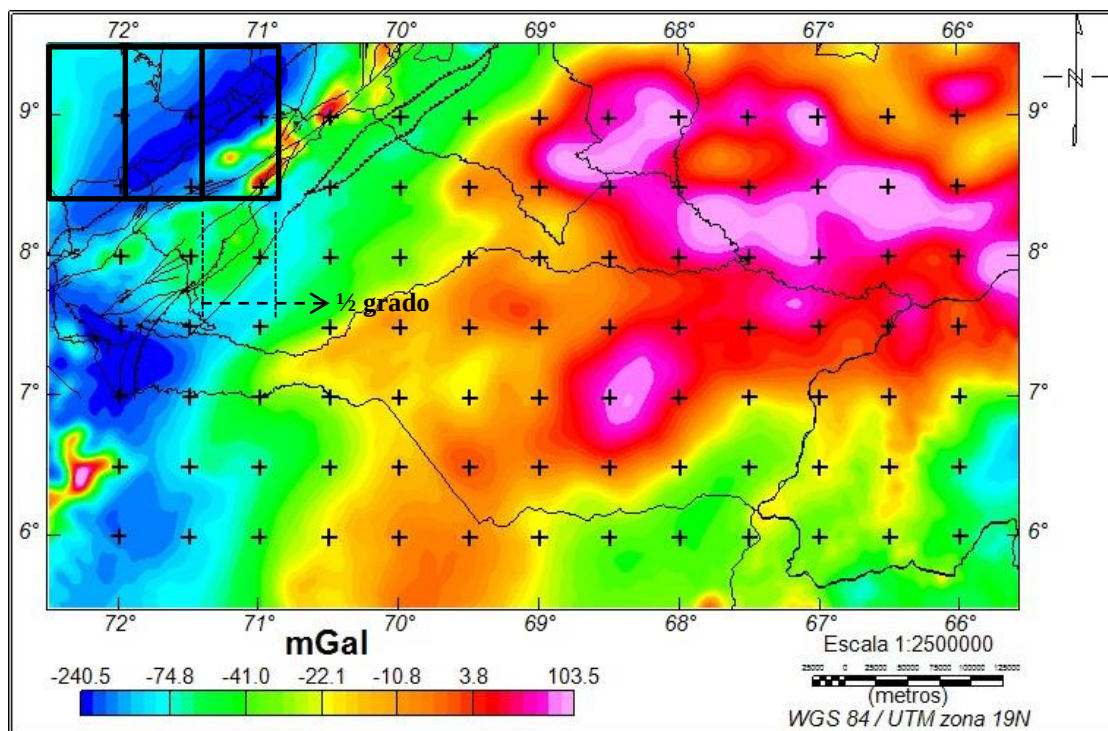
Se estimó la profundidad para cada línea de tendencia como se observa en la tabla 4.3

**Tabla 4.3:** Profundidad de fuentes gravimétricas a partir del análisis espectral.

| Fuente Gravimétrica | Profundidad (km) |
|---------------------|------------------|
| Profunda            | -59.683          |
| Intermedia 2        | -20.570          |
| Intermedia 1        | -7.163           |
| Somera              | -2.199           |

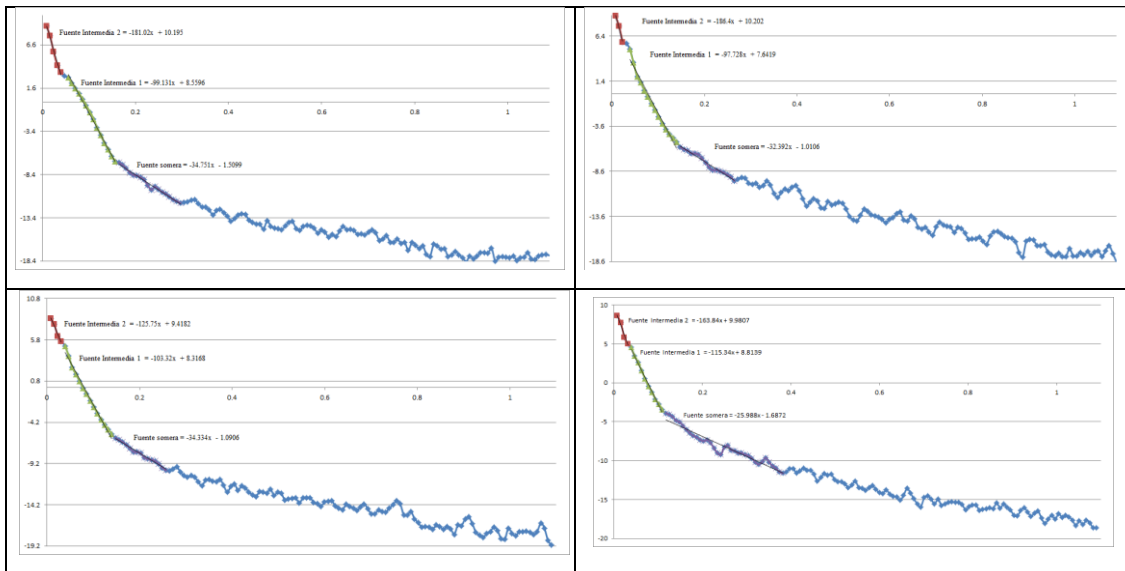
Para el caso de la fuente intermedia 2 se asocia con la discontinuidad de Conrad, para la intermedia 1, con el basamento cristalino y para el caso de la fuente somera, con el basamento pre-cretácico.

Estas estimaciones de profundidad se realizaron utilizando todos los datos de Anomalía de Bouguer. Para obtener una mayor exactitud en cuanto a la profundidad de las diversas fuentes gravimétricas, a lo largo de toda el área se dividió el mapa en ventanas de  $1^\circ \times 1^\circ$ , donde cada ventana solapa a la anterior por medio grado (Figura 4.7) generando así un punto de información en el medio de cada ventana. Como resultado de ello, se generó un total de 91 ventanas, donde a continuación se muestra la ubicación del punto medio de cada una de ellas.



**Figura 4.7:** Ubicación del punto medio de cada ventana de datos realizada.

Seguido de ello, se realizó el análisis espectral para cada ventana (Figura 4.8) y se generó la tabla 4.4 que muestra la ubicación geográfica de cada punto, junto con las fuentes gravimétricas encontradas en las 91 ventanas.



**Figura 4.8:** Ejemplos del espectro de potencia realizado para cada ventana.

**Tabla 4.4:** Análisis espectral a las 91 ventanas generadas del área de estudio.

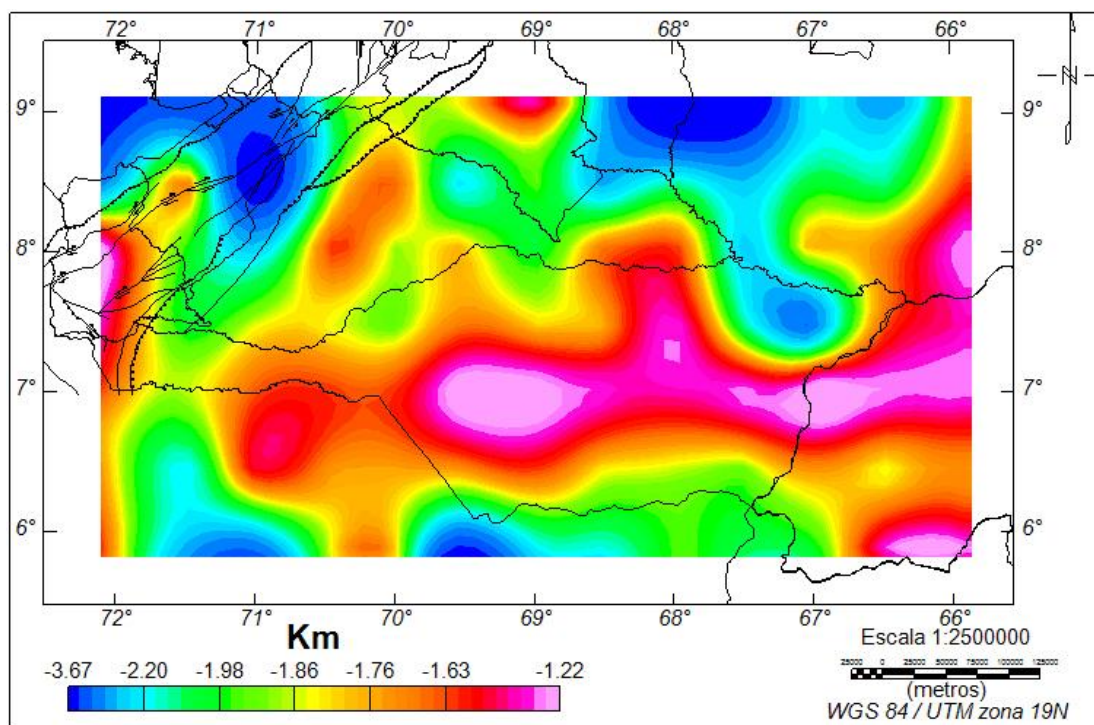
| V  | Coord Geográficas |     | Fuentes gravimétricas(km) |              |        | V  | Coord Geográficas |     | Fuentes gravimétricas(km) |              |        |
|----|-------------------|-----|---------------------------|--------------|--------|----|-------------------|-----|---------------------------|--------------|--------|
|    | Long              | Lat | Intermedia 2              | Intermedia 1 | Somera |    | Long              | Lat | Intermedia 2              | Intermedia 1 | Somera |
| 1  | -72               | 9   | -14.41                    | -7.89        | -2.77  | 47 | -68.5             | 7.5 | -11.93                    | -8.88        | -1.77  |
| 2  | -71.5             | 9   | -14.83                    | -7.78        | -2.58  | 48 | -68               | 7.5 | -10.51                    | -10.36       | -1.39  |
| 3  | -71               | 9   | -10.01                    | -8.22        | -2.73  | 49 | -67.5             | 7.5 | -11.18                    | -8.85        | -2.12  |
| 4  | -70.5             | 9   | -13.04                    | -9.18        | -2.07  | 50 | -67               | 7.5 | -12.44                    | -7.59        | -2.64  |
| 5  | -70               | 9   | -11.25                    | -8.55        | -1.85  | 51 | -66.5             | 7.5 | -13.99                    | -7.77        | -1.65  |
| 6  | -69.5             | 9   | -11.24                    | -8.35        | -1.85  | 52 | -66               | 7.5 | -13.56                    | -6.89        | -1.48  |
| 7  | -69               | 9   | -13.26                    | -7.99        | -1.65  | 53 | -72               | 7   | -9.14                     | -7.87        | -1.66  |
| 8  | -68.5             | 9   | -16.11                    | -8.42        | -      | 54 | -71.5             | 7   | -11.02                    | -7.90        | -1.86  |
| 9  | -68               | 9   | -15.11                    | -8.48        | -3.22  | 55 | -71               | 7   | -15.49                    | -7.81        | -1.63  |
| 10 | -67.5             | 9   | -14.40                    | -9.24        | -3.03  | 56 | -70.5             | 7   | -12.37                    | -8.17        | -1.59  |
| 11 | -67               | 9   | -14.46                    | -9.32        | -2.26  | 57 | -70               | 7   | -12.97                    | -7.76        | -1.59  |
| 12 | -66.5             | 9   | -14.90                    | -8.57        | -2.33  | 58 | -69.5             | 7   | -12.15                    | -8.56        | -1.25  |
| 13 | -66               | 9   | -14.00                    | -6.06        | -1.86  | 59 | -69               | 7   | -12.44                    | -8.54        | -1.28  |
| 14 | -72               | 8.5 | -14.77                    | -7.70        | -2.24  | 60 | -68.5             | 7   | -14.84                    | -8.54        | -1.40  |
| 15 | -71.5             | 8.5 | -8.98                     | -6.43        | -1.68  | 61 | -68               | 7   | -13.73                    | -8.56        | -1.45  |
| 16 | -71               | 8.5 | -9.05                     | -8.47        | -3.13  | 62 | -67.5             | 7   | -15.14                    | -8.41        | -1.36  |
| 17 | -70.5             | 8.5 | -                         | -7.96        | -1.97  | 63 | -67               | 7   | -14.53                    | -8.67        | -1.15  |
| 18 | -70               | 8.5 | -13.12                    | -7.60        | -1.65  | 64 | -66.5             | 7   | -14.69                    | -8.30        | -1.36  |
| 19 | -69.5             | 8.5 | -13.66                    | -7.90        | -2.26  | 65 | -66               | 7   | -11.53                    | -6.69        | -1.36  |
| 20 | -69               | 8.5 | -12.92                    | -8.58        | -1.93  | 66 | -72               | 6.5 | -                         | -8.70        | -1.79  |
| 21 | -68.5             | 8.5 | -15.07                    | -8.42        | -2.38  | 67 | -71.5             | 6.5 | -10.41                    | -8.05        | -2.22  |
| 22 | -68               | 8.5 | -15.87                    | -9.04        | -2.09  | 68 | -71               | 6.5 | -17.60                    | -7.95        | -1.46  |

|    |       |     |        |       |       |    |       |     |        |        |       |
|----|-------|-----|--------|-------|-------|----|-------|-----|--------|--------|-------|
| 23 | -67.5 | 8.5 | -17.89 | -8.97 | -2.32 | 69 | -70.5 | 6.5 | -13.96 | -8.60  | -1.71 |
| 24 | -67   | 8.5 | -14.80 | -8.24 | -2.01 | 70 | -70   | 6.5 | -13.02 | -7.68  | -1.73 |
| 25 | -66.5 | 8.5 | -15.77 | -8.28 | -2.11 | 71 | -69.5 | 6.5 | -13.20 | -8.48  | -1.67 |
| 26 | -66   | 8.5 | -13.07 | -6.45 | -1.67 | 72 | -69   | 6.5 | -12.13 | -10.25 | -     |
| 27 | -72   | 8   | -13.11 | -7.51 | -1.57 | 73 | -68.5 | 6.5 | -13.27 | -8.57  | -1.81 |
| 28 | -71.5 | 8   | -12.93 | -7.13 | -     | 74 | -68   | 6.5 | -11.91 | -8.60  | -1.84 |
| 29 | -71   | 8   | -9.17  | -7.59 | -2.27 | 75 | -67.5 | 6.5 | -19.22 | -7.75  | -1.89 |
| 30 | -70.5 | 8   | -      | -7.17 | -1.58 | 76 | -67   | 6.5 | -10.79 | -7.81  | -1.69 |
| 31 | -70   | 8   | -      | -8.70 | -1.91 | 77 | -66.5 | 6.5 | -15.23 | -7.84  | -1.84 |
| 32 | -69.5 | 8   | -10.83 | -8.90 | -1.71 | 78 | -66   | 6.5 | -12.19 | -7.19  | -1.71 |
| 33 | -69   | 8   | -13.02 | -8.72 | -2.02 | 79 | -72   | 6   | -10.69 | -7.13  | -1.71 |
| 34 | -68.5 | 8   | -14.28 | -8.24 | -1.60 | 80 | -71.5 | 6   | -9.93  | -7.84  | -2.28 |
| 35 | -68   | 8   | -12.86 | -9.12 | -1.54 | 81 | -71   | 6   | -12.07 | -8.05  | -2.31 |
| 36 | -67.5 | 8   | -14.50 | -8.40 | -2.32 | 82 | -70.5 | 6   | -15.40 | -7.77  | -1.83 |
| 37 | -67   | 8   | -15.45 | -8.43 | -1.71 | 83 | -70   | 6   | -10.53 | -8.37  | -1.81 |
| 38 | -66.5 | 8   | -13.80 | -8.06 | -1.69 | 84 | -69.5 | 6   | -12.74 | -8.42  | -2.51 |
| 39 | -66   | 8   | -12.56 | -7.29 | -1.38 | 85 | -69   | 6   | -12.05 | -8.40  | -2.08 |
| 40 | -72   | 7.5 | -10.91 | -7.36 | -1.51 | 86 | -68.5 | 6   | -12.05 | -8.40  | -2.08 |
| 41 | -71.5 | 7.5 | -13.89 | -8.24 | -2.01 | 87 | -68   | 6   | -11.22 | -8.37  | -1.94 |
| 42 | -71   | 7.5 | -15.34 | -8.37 | -1.84 | 88 | -67.5 | 6   | -11.15 | -7.91  | -2.02 |
| 43 | -70.5 | 7.5 | -15.34 | -8.37 | -1.84 | 89 | -67   | 6   | -13.64 | -8.76  | -1.90 |
| 44 | -70   | 7.5 | -13.07 | -8.22 | -1.93 | 90 | -66.5 | 6   | -10.83 | -8.06  | -1.52 |
| 45 | -69.5 | 7.5 | -15.67 | -7.87 | -1.68 | 91 | -66   | 6   | -9.37  | -7.41  | -1.44 |
| 46 | -69   | 7.5 | -13.49 | -8.93 | -1.81 |    |       |     |        |        |       |

De la tabla anterior se puede establecer un promedio para las diferentes profundidades gravimétricas, las cuales dieron como resultado para las fuentes intermedia 2: 13.04 km, intermedia 1: 8.17 km y somera: 1.89 km por debajo del nivel del mar.

Partiendo de las diferentes profundidades gravimétricas obtenidas del análisis espectral de cada ventana, se realizó un mapa para cada fuente.

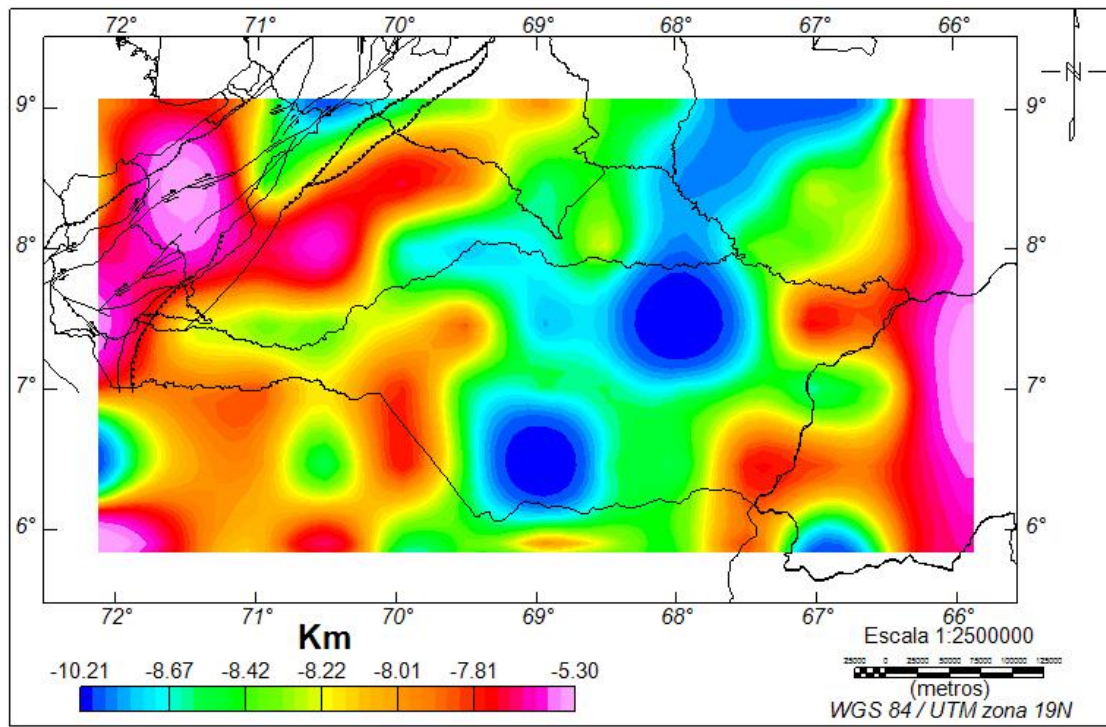
En la figura 4.9 correspondiente al mapa de fuente somera, éste varía entre 3.67-1.22 km por debajo del nivel del mar, los valores mínimos se encuentran hacia el norte y noroeste del mapa y los valores máximos en la zona central, en los estados Apure y Bolívar. La dirección de los Andes así como el alto estructural que se encuentra en el estado Apure se observan marcados en el mapa. Del mismo modo se observa el rumbo de la antefosa surandina, así como el alto estructural presente en el estado Apure.



**Figura 4.9:** Mapa generado a partir de las profundidades someras obtenidas en el análisis espectral.

La figura 4.10 corresponde al mapa de fuente intermedia 1, en cuyos valores de profundidad obtenidos varían entre 10.21-5.30 km por debajo del nivel del mar. Al compararlo con la figura 1 se observa una inversión en cuanto a la relación de profundidades puesto que los valores máximos se encuentran en los Andes y los mínimos en el estado Apure. Se sigue marcando el rumbo de Los Andes y se encuentra bien definida la fosa surandina, generada a partir del levantamiento de ésta con una profundidad máxima alrededor de los 5 km.

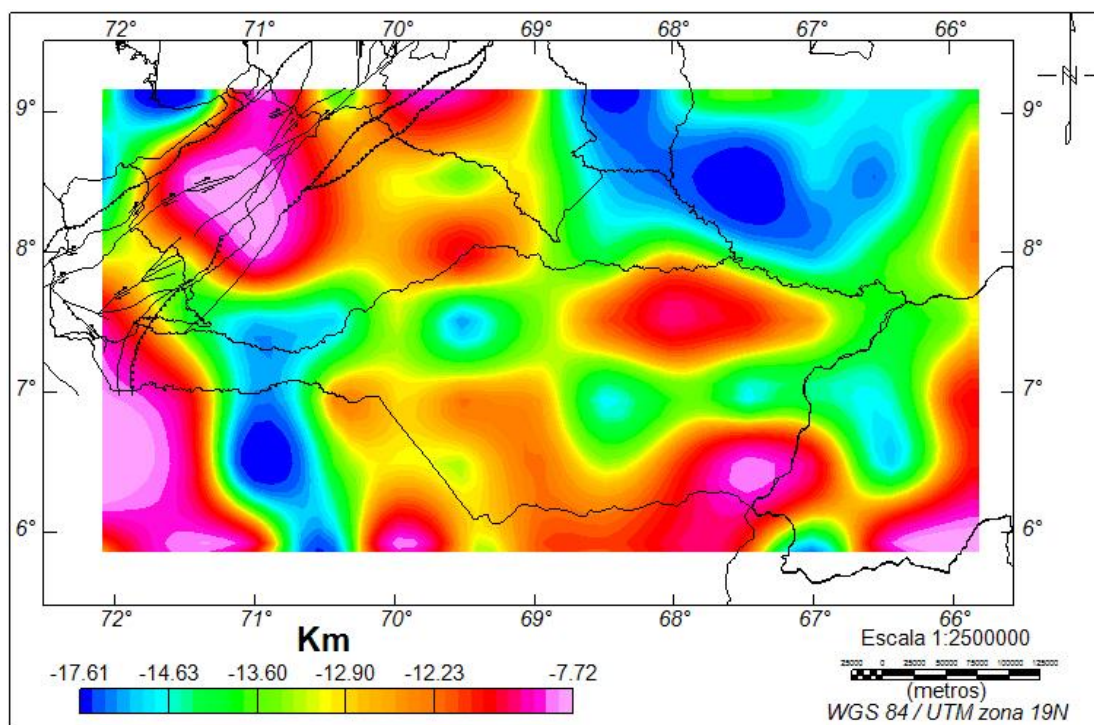
En este mapa además se observa el alto estructural que se encuentra entre el graben de Arauca y la Antefosa andina, así como el graben de Arauca y un posible engrosamiento de la cuenca sedimentaria en el estado Apure que se prolonga hasta Guárico.



**Figura 4.10:** Mapa generado a partir de las profundidades intermedia 1 obtenidas en el análisis espectral.

En la figura 4.11 se observa el mapa de la fuente intermedia 2, encontrando valores de profundidad entre 19.05-7.74 km por debajo del nivel del mar, los valores máximos se encuentran principalmente en la parte oeste del mapa. Hacia el noroeste estos valores mantienen la dirección de la cordillera andina, hacia Apure se observa un valor máximo en el noreste del estado y, hacia el sur del mismo las profundidades aumentan y disminuyen nuevamente. Al igual que en la figura 4.9 se observa el rumbo de la antifosa surandina, el graben de Arauca y en graben del Mantecal, además se observa el rumbo del Arco del Baúl.





**Figura 4.11:** Mapa generado a partir de las profundidades intermedia 2 obtenidas en el análisis espectral.

#### 4.4 Separación Regional Residual

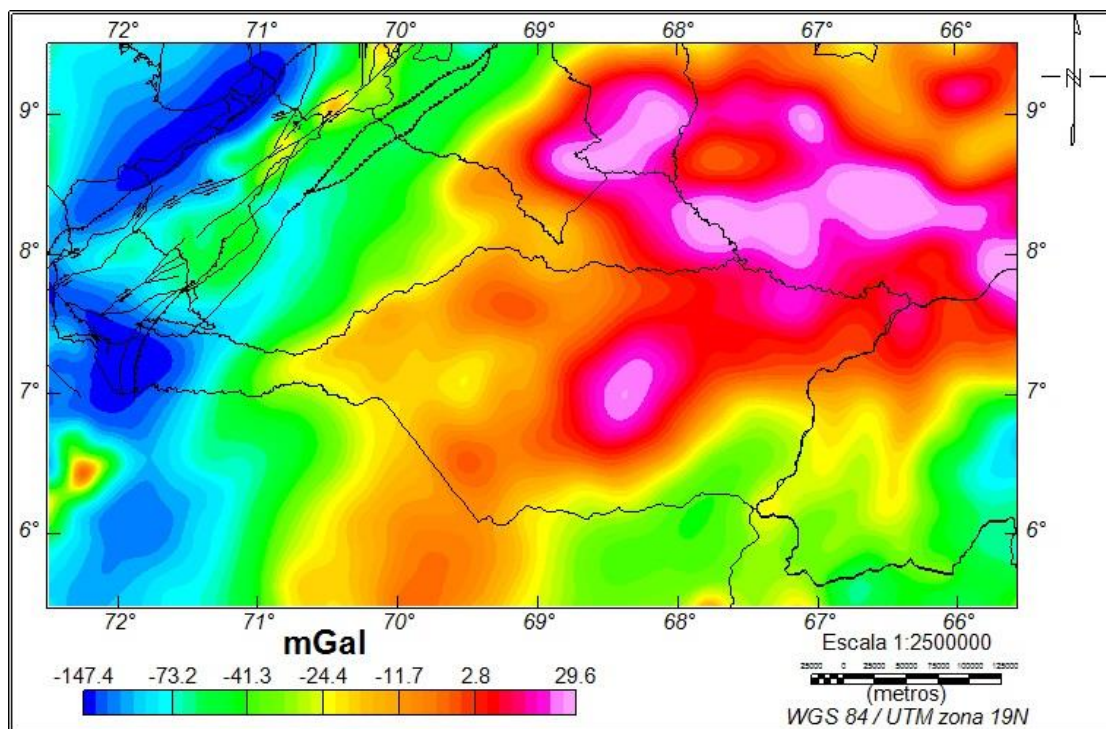
A partir del análisis espectral de todos los datos se realizó la separación regional-residual del mapa de Anomalía de Bouguer, utilizando las frecuencias de corte que dividen cada fuente gravimétrica del análisis de toda la ventana de datos.

De todas los posibles métodos para realizar la separación regional-residual se observó que la que aportó un mejor resultado de análisis fue la separación mediante un filtro gaussiano. La frecuencia que se utilizó para generar los mapas de separación regional/residual fue 0.026.

En la figura 4.12 se muestra el mapa regional de Anomalía de Bouguer utilizando una frecuencia de corte de 0.026.

En esta figura de Anomalía Regional se presentan valores que varían entre -147.4 y 29.6 mGal, observándose que al noroeste dominan los valores mínimos con una alineación de N45E, ésta corresponde con la cuenca de Maracaibo; debajo de ella se observa levemente la Cordillera de los Andes. Al este dominan los altos

gravimétricos, concentrados desde la zona central hacia el noreste del mapa al igual que en el mapa de Anomalía de Bouguer (Figura 4.3), esto se puede deber a un graben en el cual la disminución parcial es el techo del graben y este se encuentra rodeado por el borde del mismo. Se puede apreciar cómo el Arco del Baúl corta la anomalía del alto estructural ubicada en el estado Apure; de igual manera se observa que este alto gravimétrico posee una orientación, lo cual puede dar indicio de la longitud que posee este alto estructural.

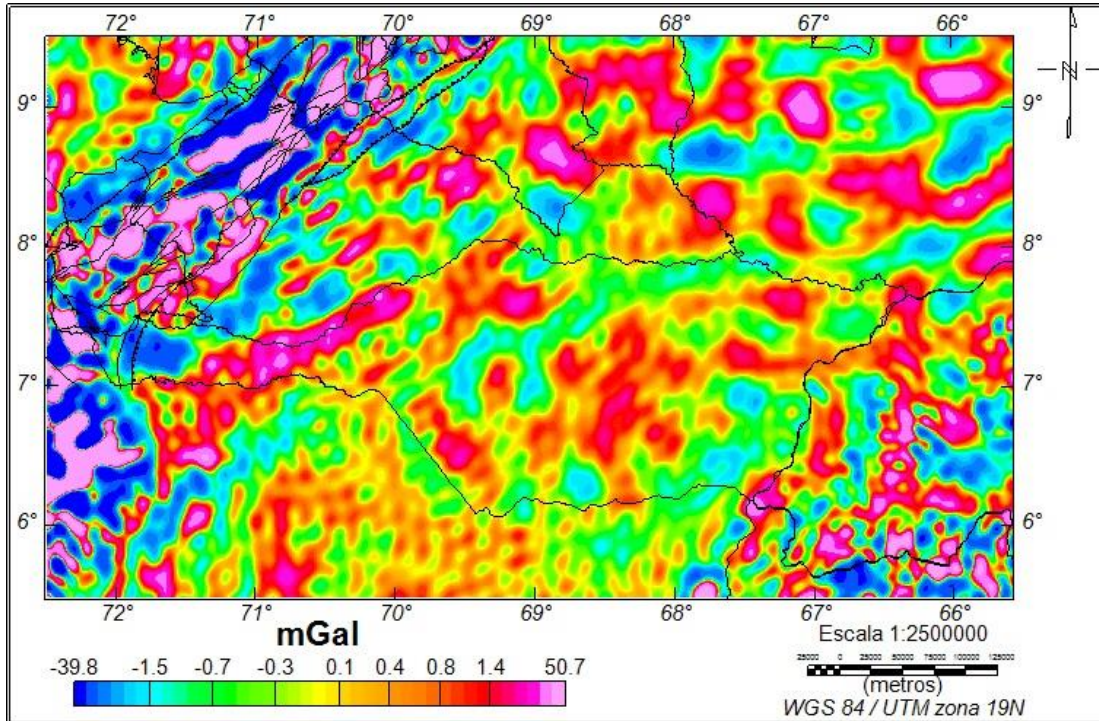


**Figura 4.12:** Mapa de Anomalía de Bouguer regional con filtro gaussiano de 0.026.

En el mapa de Anomalía Residual (Figura 4.13) se muestran todas aquellas anomalías generadas por fuentes someras, los valores varían desde -39.8 a 50.7 mGal, se observan cambios de mínimos y máximos en La Cordillera de los Andes, dichos cambios están alineados al sistema de fallas de esa zona. Debajo de la Cordillera puede observarse una orientación de un alto gravimétrico aproximado a N30E. Los valores mínimos observados hacia el sureste, se deben a la presencia de parte del Cratón de Guayana en esta zona, ubicando encima del Cratón una alineación NS



conformada por valores con una gravedad entre 1.4 y 40 mGal. Al compararlo con la figura 4.12 se puede notar como la anomalía presente en la zona central de Apure se encuentra vagamente marcada en el mapa de anomalía regional, esto permite afirmar que el origen del alto gravimétrico existente en la cuenca Barinas-Apure es profundo, no somero, ya que el mismo se aprecia de una mejor manera en la figura que muestra la Anomalía Regional.



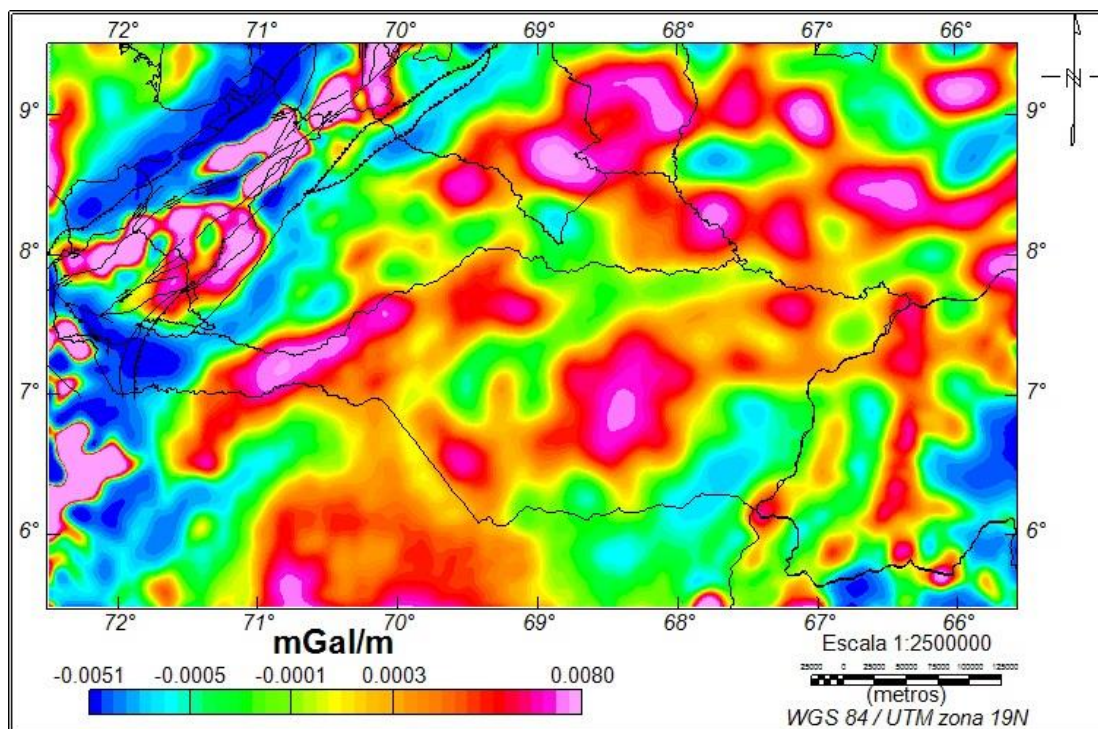
**Figura 4.13:** Mapa de Anomalía de Bouguer residual.

#### 4.5 Derivadas en el eje Z

La primera derivada direccional representa el gradiente de la anomalía gravimétrica de un punto de medición a otro, estos son producidos por contrastes de densidad cuyas orientaciones se alinean con la dirección de la derivada. Aunque se realizaron las derivadas en los tres ejes, en el eje Z en particular fue la que aportó más información.

La primera derivada en Z (Figura 4.14) muestra el gradiente existente en la zona, éste varía entre 8 y -5 mGal/km. Los gradientes positivos se encuentran asociados a altos estructurales, y los negativos se asocian a cuencas, por ejemplo: en

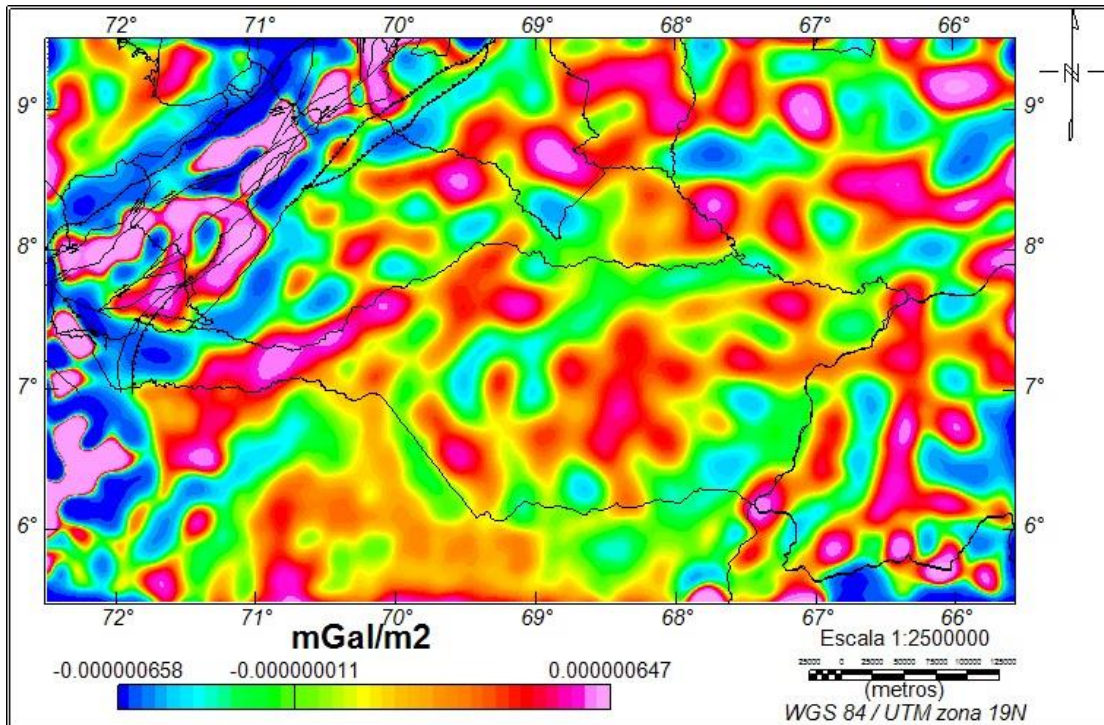
la cuenca del Lago de Maracaibo, o en el posible Graben que se encuentra en el estado Guárico. Para la Cordillera de los Andes se observan unas intercalaciones de máximos y mínimos y, aunque tienden a predominar los gradientes positivos con un rumbo N45E, en la frontera entre Barinas y Apure se observa una orientación de N30E, lo que podría deberse a un alto estructural. En la parte central del estado Apure se observa el alto gravimétrico, este se encuentra entre el graben de Apure y el Mantecal y todo este sistema de altos y bajos estructurales parece tener una continuidad hacia el suroeste, observándose cómo esta anomalía se encuentra separada por los gradientes positivos del noreste, esta separación la genera el Arco del Baúl.



**Figura 4.14:** Primera derivada en el eje z de la Anomalía de Bouguer.

Los cambios de temperatura que se generan a estas profundidades, traen como consecuencia cambios de densidades de la roca. La segunda derivada en el eje Z (Figura 4.15) muestra indirectamente el flujo térmico existente en la zona, y puede observarse cómo en la Cordillera de los Andes ocurren grandes cambios del flujo,

esto se debe al sistema de fallas existente a lo largo de toda la cordillera. Por debajo de ella, la estructura es marcada por un flujo positivo, con dirección N30E, notándose en el estado Apure la constante anomalía positiva de la zona central que se separa de las variaciones de flujo positivo del noroeste, lo que demuestra que la anomalía positiva de Apure no se relaciona con las anomalías del noreste.



**Figura 4.15:** Segunda derivada en el eje z de la Anomalía de Bouguer.

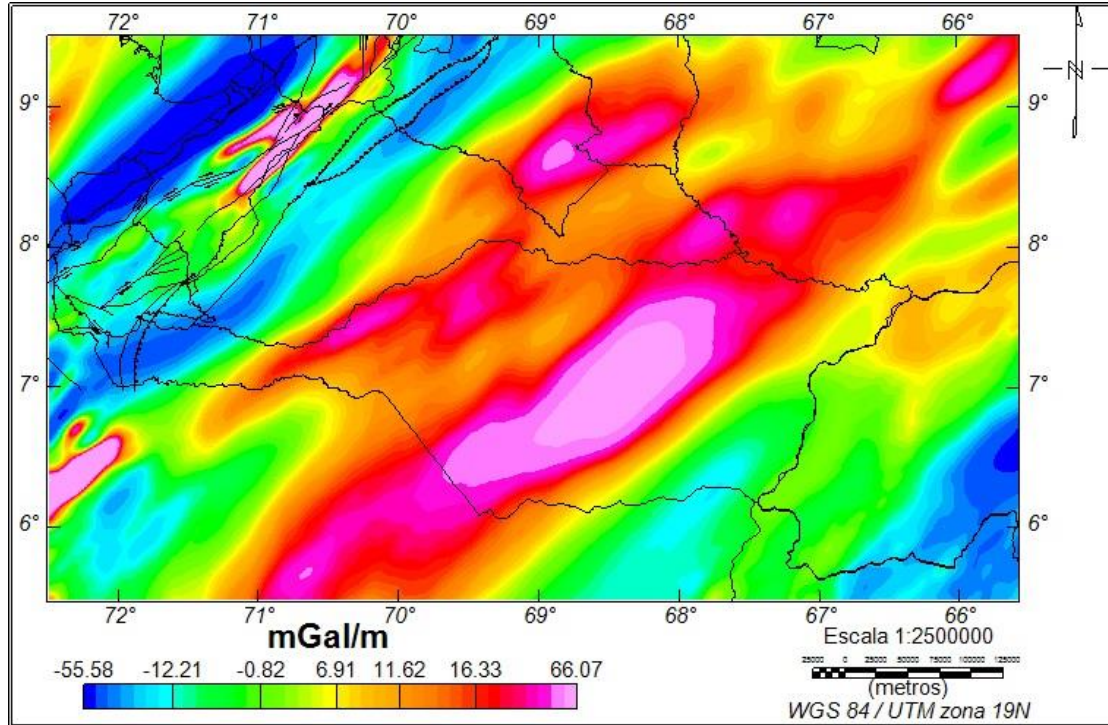
#### 4.6 Coseno direccional

En vista de que existen estructuras con orientaciones distintas a los ejes X, Y, Z, se realizó una derivada del coseno direccional de 45° para resaltar dichas estructuras, orientadas en este ángulo.

La figura 4.16 corresponde a la primera derivada direccional realizada al mapa de Anomalía de Bouguer; en esta dirección el gradiente del mapa varía de -55.58 a 66.07 mGal/m. También puede apreciarse la Cuenca de Maracaibo, que se caracteriza por los valores negativos de gradientes. Los Andes de Mérida poseen una expresión que varía de -0.82 a 55 mGal/m, observándose por debajo de ellos la antefosa generada por el levantamiento de los Andes.



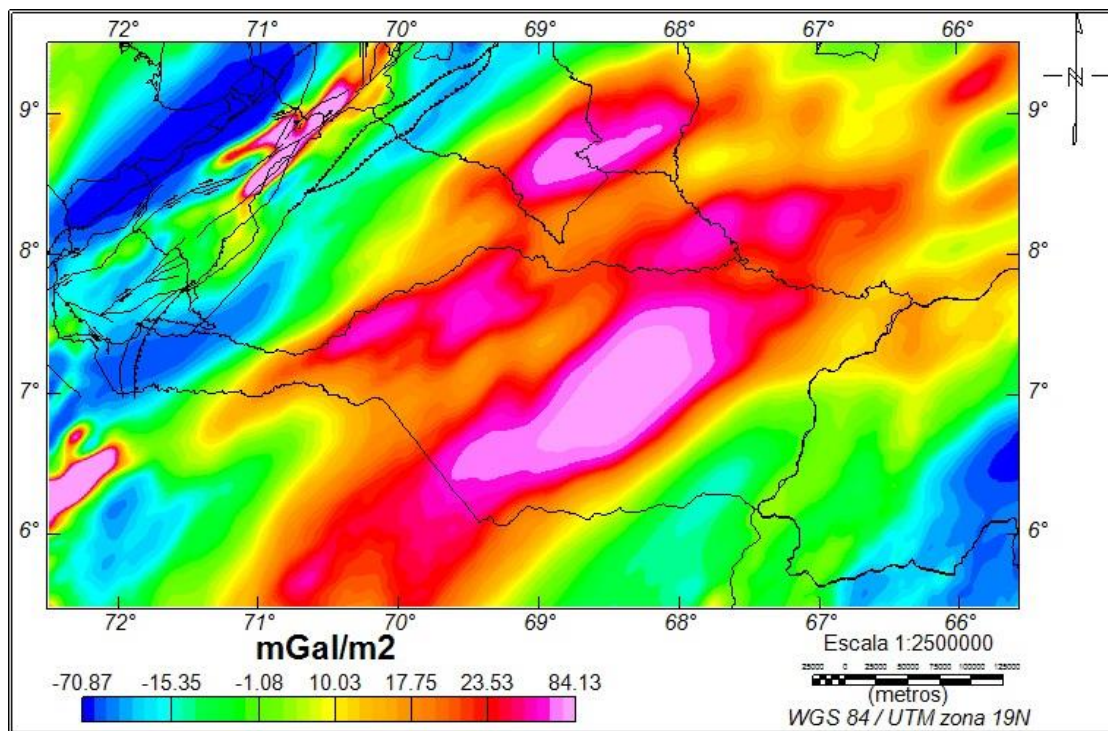
En el estado Apure se muestra la expresión completa del alto estructural que no podía apreciarse en figuras anteriores, esta estructura posee un gradiente elevado, entre 20 y 66 mGal/m y se extiende hasta los llanos colombianos.



**Figura 4.16:** Mapa de coseno direccional de 45° de la Anomalía de Bouguer.

Al igual que en la segunda derivada en el eje Z, el coseno<sup>2</sup> direccional (Figura 4.17) representa el flujo en ese sentido, representando el flujo térmico pero con un rumbo N45E.

En esta figura se observa que la estructura existente en Apure posee un alto flujo térmico, que permite definir su extensión total que abarca desde la zona noroeste del estado Apure hasta llegar a los llanos colombianos.



**Figura 4.17:** Mapa de coseno<sup>2</sup> direccional de 45° de la Anomalía de Bouguer.

#### 4.7 Deconvolución de Euler

Para la Deconvolución de Euler se trabajó con un índice estructural de 3; este índice en la ecuación asume que las respuestas gravimétricas son generadas por objetos con una geometría esférica.

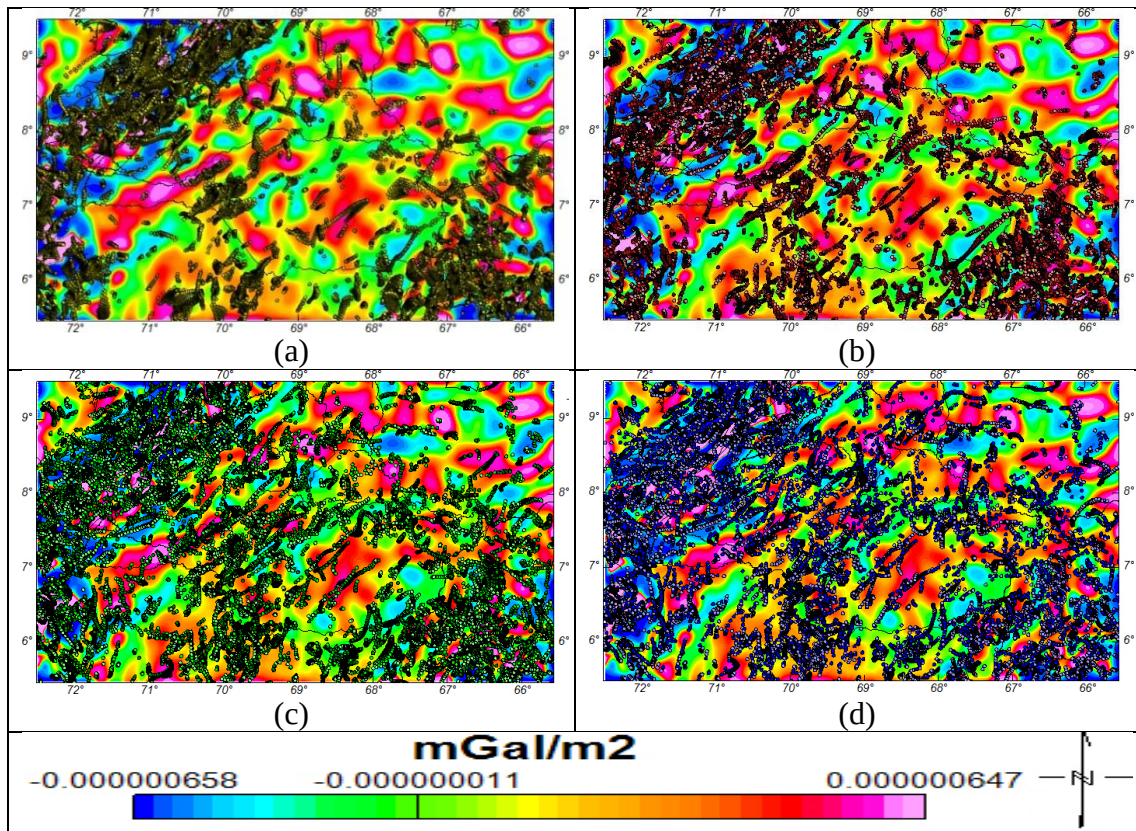
Se generó un total de 8 mapas, de los cuales los primeros cuatro se trabajaron con una medida de ventana de 10 y alcanza una profundidad máxima de 20 km. Estos datos fueron truncados ya que a partir de 20 km se generaron tantas soluciones en el mapa que impedía realizar un análisis al mismo.

Entre 20 y 40 kilómetros se trabajó con el mismo índice estructural, pero con una medida de ventana de 3, como la ventana es más pequeña disminuyó la cantidad de soluciones mostradas, obteniendo como consecuencia una mejor interpretación de estos mapas.

En la figura 4.18 se muestran los resultados de las profundidades obtenidas en la deconvolución de Euler sobre el mapa de segunda derivada en Z hasta un máximo

de 20 km de profundidad. La sección (a) abarca de 0-12 km, la (b) de 12-15 km, la (c) de 15-18 km y la (d) entre 18-20 km.

Puede observarse en los siguientes 4 mapas que debido al gran sistema de fallas presentes en la cordillera andina, éstos poseen una gran densidad de soluciones. También sobresalen las líneas de tendencias generadas, en la cual la mayoría se mantiene con el mismo rumbo de los Andes de N45E. De igual manera puede apreciarse cómo en los valores máximos presentes en Apure; por estar asociados a altos estructurales, se observa que a medida que se profundiza el rumbo de estos se muestra con mayor detalle. Por lo anterior expuesto, se puede afirmar que estos altos estructurales no son de origen somero, sino profundo.



**Figura 4.18:** Deconvolución de Euler con índice estructural de 3 sobre el mapa de segunda derivada de Anomalía de Bouguer. (a) Soluciones de 0 a 12 km, (b) soluciones de 12 y 15 km, (c) soluciones de 15 a 18 km y (d) soluciones de 18 a 20 km de profundidad.

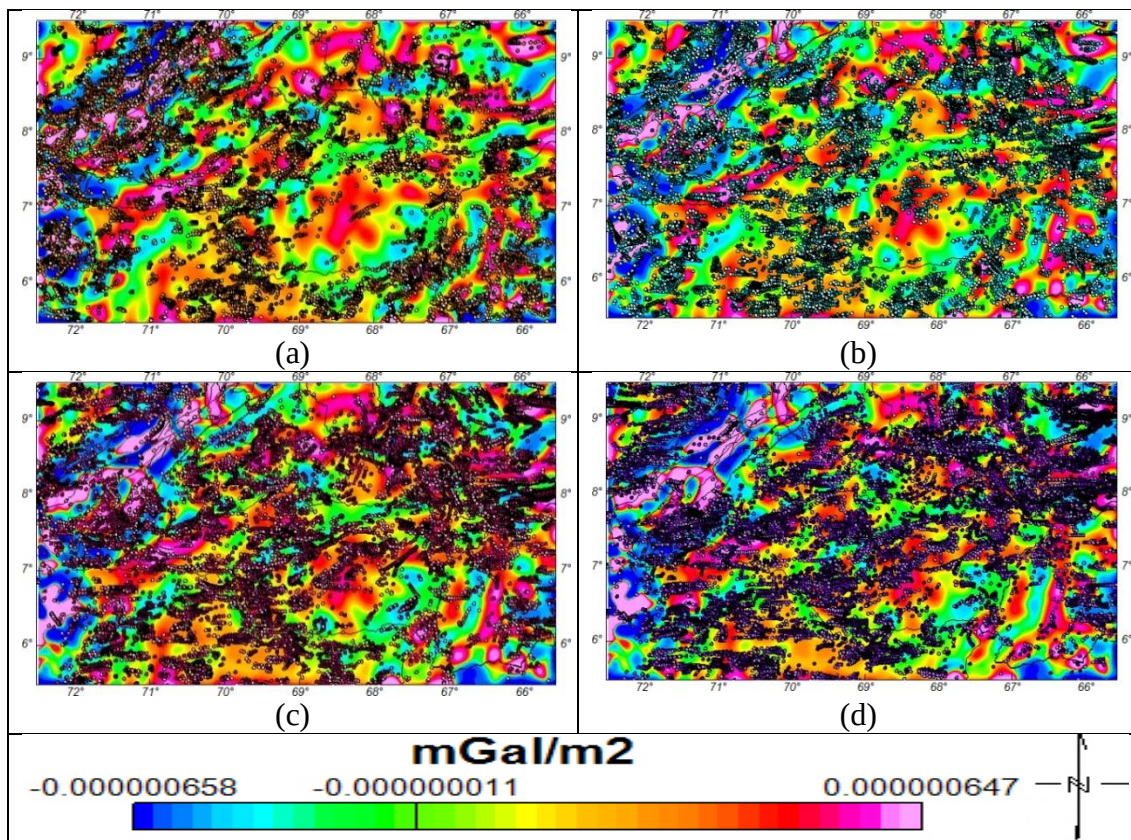
En la figura 4.19 se observan las soluciones generadas entre los 20 y 40 km, seccionadas cada 5 km. En estos mapas se aprecia, al contrario de la figura 5.18 que



la densidad de puntos generados en los primeros 20 km en la Cordillera de los Andes disminuye; sin embargo, aumenta la respuesta generada por el graben de Apure que, en los primeros 20 km no se apreciaba.

Entre los 20 y 30 km disminuye la respuesta generada por los altos estructurales pero, entre los 30-40 km estos vuelven a aparecer, con mayor énfasis en la el alto estructural que se encuentra el medio de Apure.

Esta respuesta es aún más notoria entre los 35-40 km lo que pudiese dar indicios de que en este punto se tiene un adelgazamiento cortical, el cual puede ser generado por la deformación que surge a partir del choque del bloque de Maracaibo con la placa suramericana.

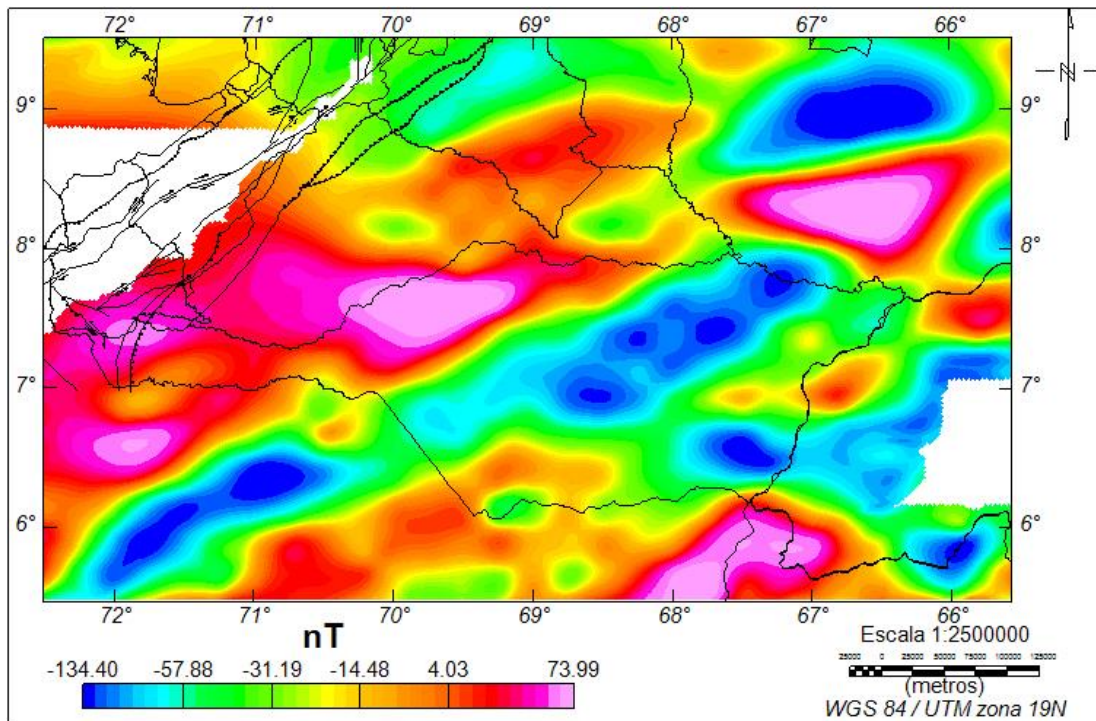


**Figura 4.19:** Deconvolución de Euler con un índice estructural 3 sobre el mapa de segunda derivada de Anomalía de Bouguer. (a) Soluciones de 20 a 25 km, (b) soluciones de 25 y 30 km, (c) soluciones de 30 a 35 km y (d) soluciones de 35 a 40 km de profundidad.

#### 4.8 Anomalía Magnética

En la figura 4.20 se muestra el mapa de anomalía magnética, al cual se le realizó una reducción al Ecuador para desplazar el valor de la anomalía magnética a su verdadera posición. En este mapa resalta la cupla magnética presente en el estado Apure, la cual posee un rumbo aproximado de N30E. Esta cupla marca cambios de pendiente y su zona mínima está asociada a su alto estructural, pudiendo establecer que los cambios de valores de negativos a positivos muestran cambios de pendiente. Dichos cambios significan que van desde un alto hasta un bajo estructural.

La presencia de bajos estructurales es de dos grábenes; así mismo, se observa hacia el noreste la existencia de otra cupla magnética, posiblemente asociada a otro graben.



**Figura 4.20:** Mapa de Anomalía Magnética con reducción al Ecuador.

#### 4.9 Modelado gravimétrico del perfil A-A'

En el modelo gravimétrico estructural generado para el perfil A-A' (Figura 4.21) se plasmó toda la información recopilada y generada a lo largo de la investigación. En éste se aplicó todo el conocimiento tanto geológico como geofísico



del cual se disponía. Se incorporó además, información tomada de interpretaciones geológicas, y geofísicas así como toda la información producida a partir del análisis de la Anomalía de Bouguer.

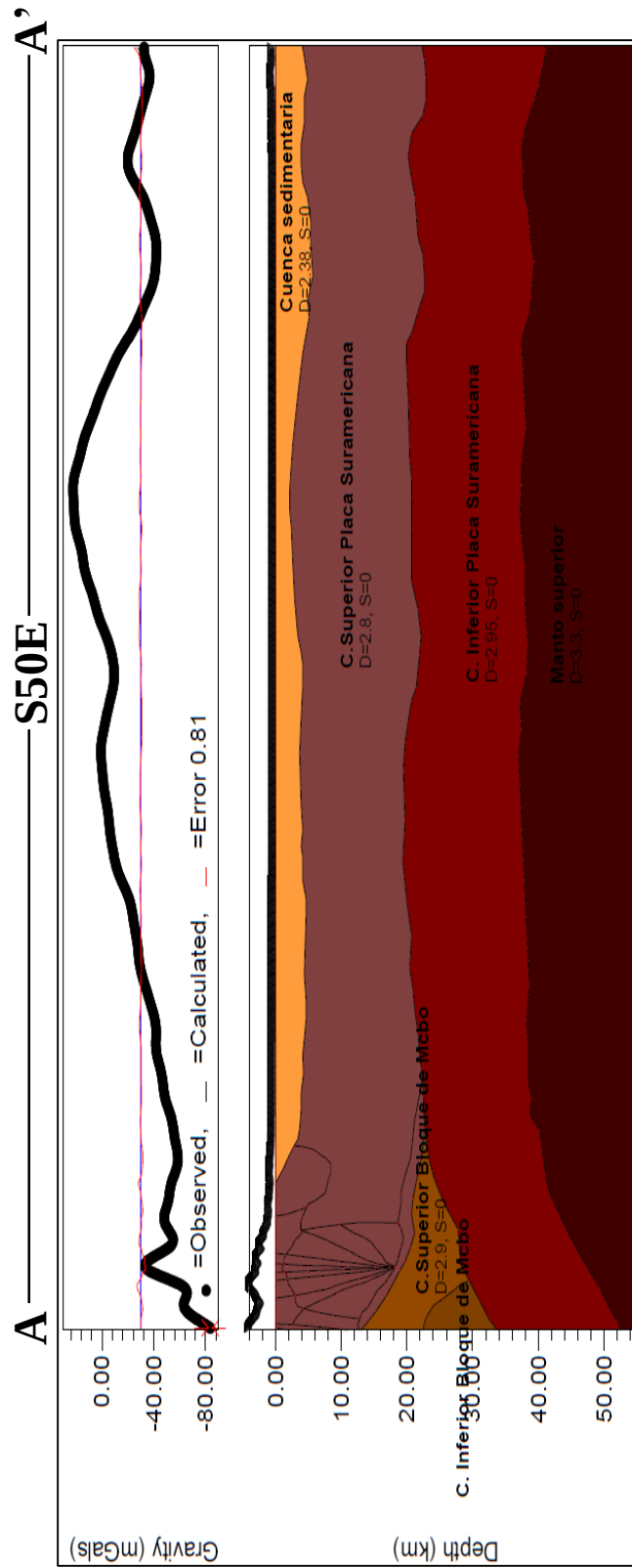
Respondiendo al objetivo general de este Trabajo Especial de Grado, se generó un modelo geológicamente posible, en el cual se plasmaron las principales estructuras (grábenes, cuencas, altos estructurales); además se realizó la posible estructura intracortical de Los Andes de Mérida, descrita como una estructura en flor positiva, ésta es una posibilidad de contacto entre el Bloque de Maracaibo y la Placa Suramericana. También fueron localizadas las interfaces de Conrad (discontinuidad entre la corteza superior e inferior de la Placa Suramericana) y de Mohorovicic.

Como se puede apreciar, el espesor de la cuenca sedimentaria varía a lo largo del perfil alcanzando su punto de mayor profundidad hacia la izquierda, y a medida que se avanza hacia el otro extremo del modelo, esta profundidad comienza a disminuir hasta alcanzar su espesor mínimo en la segunda mitad del perfil. Estos cambios en la cuenca se asocian a grábenes y altos estructurales de la zona.

El máximo valor de anomalía presente en el perfil, se asocia a la flexión de la placa por la subducción con el Bloque de Maracaibo, el cual se muestra tanto en las interfaces de Conrad como de Moho, así como en la cuenca sedimentaria. Por otra parte, se tiene que el origen de los grábenes es de tipo profundo, deformando la placa desde el límite de Mohorovicic hasta la cuenca sedimentaria.

**Tabla 4.5.** Capas y densidades utilizadas en el perfil A-A'

| <b>Capa</b>                                     | <b>Densidad (g/ml)</b> |
|-------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Corteza superior del bloque de Maracaibo</b> | 2.9                    |
| <b>Corteza inferior del bloque de Maracaibo</b> | 2.93                   |
| <b>Corteza superior Placa Suramericana</b>      | 2.8                    |
| <b>Corteza inferior Placa Suramericana</b>      | 2.95                   |
| <b>Cuenca sedimentaria</b>                      | 2.38                   |
| <b>Manto superior</b>                           | 3.3                    |



**Figura 4.21:** Modelado gravimétrico del perfil A-A'.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

- A partir del análisis espectral de datos se determinan cuatro interfaces en la zona, en donde el promedio de profundidades de estas son: para la somera 1.89 km asociada al basamento pre-cretácico, intermedia 1 8.17 km el cual marca el tope del basamento cristalino e intermedia 2 13.4 km que podría marcar la interface entre la corteza superior e inferior; estas diferentes fuentes gravimétricas se encontraron presentes a lo largo de toda el área de estudio. Mientras que para la interface profunda se observa únicamente al realizar el análisis espectral a toda la ventana de datos.
- En el caso del mapa de la fuente somera del análisis espectral de datos, se obtiene la geometría de la cuenca del basamento pre-cretácico, la cual se muestra claramente la dirección de la antefosa andina con una profundidad de 3.67 km, la misma al avanzar hacia el este tiende a disminuir, pero en el estado Apure existe una disminución del espesor de la cuenca alcanzando una profundidad mínima de 1.22 km.
- A través del modelado del perfil se determinó que el espesor sedimentario de la cuenca Barinas-Apure no es constante, éste posee fluctuaciones debido a los elementos estructurales del área. Cercano a los Andes alcanza los 5 km de profundidad, esta es la zona más profunda de la cuenca, a medida que se avanza al sureste esta cuenca pierde profundidad. En el estado Apure alcanza su espesor mínimo de 2 km de profundidad.
- Mediante la Deconvolución de Euler se determina la continuidad de los elementos en profundidad, esto demuestra que los elementos estructurales importantes no son de origen somero, ya que los mismos poseen una respuesta definida en algunos casos hasta Mohorovicic. En este caso se observa como el graben de Arauca y de El Mantecal tiene su origen en esta discontinuidad así como el alto estructural que se encuentra entre estos dos grábenes. Los mismos deforman el subsuelo hasta llegar a la cuenca sedimentaria.

- En el mapa de Anomalía Magnética se puede observar que estos grábenes poseen continuidad en los llanos Colombianos

Con el modelado gravimétrico se encontró que el posible origen del alto gravimétrico del estado Apure lo origine un alto estructural que se encuentra entre el graben de Apure y el Mantecal, este alto puede marcar el punto de flexura de la placa que se genera como consecuencia del choque entre el Bloque de Maracaibo y la Placa Suramericana. Debido a que este evento ocurrió posterior a la formación de los grábenes, los mismos se encuentran deformados por este evento llegando hasta la discontinuidad de Moho.

Este hecho indica que el punto de flexura de la placa se origine en este punto y no en el Cratón de Guayana.

## **5.2 Recomendaciones.**

- Tomar en cuenta la importancia de integrar toda la información presente en el área de estudio al momento de realizar modelados geofísicos, ya que esto ayuda a nutrir los modelos y contribuye a generar resultados de mayor calidad.
- Resulta indispensable solapar las ventanas entre si más de 50% de su tamaño al realizar el análisis espectral por ventanas, de esta manera se obtendrá mayor información, obteniendo datos con interpolaciones más precisas.
- Es importante realizar la separación regional residual mediante varios métodos, para escoger entre ellos el más óptimo a utilizar.

## BIBLIOGRAFÍA

Albert, H (2012) “Generación de un mapa de basamento de la cuenca Barinas-Apure de Venezuela a partir de datos gravimétricos y magnéticos de origen satelital” Trabajo Especial de Grado, Inédito, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, pp 109.

Andrade, H. (2001). “Interpretación sísmica estructural 3D en la cuenca Barinas Apure, Edo. Barinas” Trabajo Especial de Grado, Inédito, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, pp 167.

Arminio, J., Audemard, F. y Serrano, I. (2001). “*The Espino-San Fernando Mesozoic Rift Basin: New Exploration Concepts*”. AAPG Hedberg Research Conference: New Technologies and New Play Concepts in Latin America, Mendoza, Argentina.

Arminio, J., Hernández, M., Pilloud, A. y Audemard, F. (2004). “*New insights on the jurasic rift succession of the Mérida Andes, Venezuela: Implications for new petroleum system in northern South America*”. Memoir AMPG/AAPG international conference, Cancún, México.

Arnaiz, M. (2011). “Modelado gravimétrico cortical de la zona noroccidental de Venezuela” Trabajo Especial de grado, Inédito, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela pp 114.

Audemard, F.E. (1991). “*Tectonics of western Venezuela; Rice University*” (Tesis Doctoral) Houston-Texas, 245 p.

Audemard, F. A. (1993). “*Néotectonique, Sismotectonique et aléa Sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (Système de failles d’Oca-Ancón)*” Tesis de Doctorado no publicada. Universidad de Montpellier II, Francia.

Audemard, F. E., y Audemard, F. A. (2002). “*Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction*”. *Tectonophysics* 345: 299–327.

Audemard, F. A. (2003). “*Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela*”. *Quaternary International*, 101-102: 43-65.

Bermúdez, M. (2011). “*Asynchronous Miocene–Pliocene exhumation of the central Venezuelan Andes*” primera publicación en línea 5 de enero de 2011, doi:10.1130/G31582.1 v.39 no 2 p139-142.

Bucher, W. (1952) “*Structure and orogenic history of Venezuela*”. *Memoir of the Geological Society of America* 49, p 1-113.

Chacín, L., Jácome, M., Izarra, C. (2005). “Flexural and Gravity modelling of the Mérida Andes and Barinas – Apure Basin, Western Venezuela”. *Tectonophysics*, v 405, p. 155-167.

Campos, V. M., (1977). “Estratigrafía de la secuencia post-paleozoica en la región de Calderas”. *Mem., II Congr. Latinoamericano de Geología*, Minis. Min. e Hidrocarb., Caracas, 1977, (III): 1724-1741.

Colletta, B., Roure, F., De Toni, B., Lourerio, D., Passalacqua, H., Gou, Y. (1997). “*Tectonic inheritance, cristal architecture, and contrasting structural styles in the Mérida Andes (western Venezuela)*” 3rd International Symposium on Andean Geodynamics, Saint.Malo, France Orstom editions, Paris, p. 323-326.

De Cizancourt, H. (1933). “*Tectonic structure of Northern Andes in Colombia and Venezuela*”. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 17 (3), p. 211-228.

De Toni, B y Kellogg, J. (1993). “*Seismic evidence for blind thrusting of the northwestern flank of the Venezuelan Andes*”. *Tectonics* 12 (6), p 1393-1409.

Feo-Codecido, G., Smith, F., Aboud, N. y Di Giacomo, E. (1984). “*Basement and Paleozoic rocks of the Venezuelan Llanos basins*”. *Geological Society of America*, M. 163, p 175-187.

Foster D. Smith, Jr. (1980). “El Basamento y las Rocas Paleozoicas en la parte norte de Venezuela”. Gerencia de estudios especiales e investigación. CORPOVEN.

González de Juana, C. (1952). “Introducción al estudio de la geología de Venezuela”. Boletín de Geología (Caracas) 2, p.407-416.

González de Juana, C., J. Iturralde y X. Picard. (1980). “Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas”. Caracas: Ediciones Foninves, pp 1031.

González, D (2014). “Modelado Estructural Integrado de la Cuenca Barinas Apure” Trabajo Especial de Grado, Inédito, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, pp 95.

González, W (2009). “Interpretación del basamento precretácico en las cuencas Barinas-Apure y oriental de Venezuela” Tesis de maestría, Inédito, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, pp 180.

Gou; Yves. (2009). “*Structural Geology in Venezuelan Petroleum exploration. Prepared for: PDVSA, Proyecto EFAI. Beicip Franlab*”. Caracas.

Henriques, L. (2004) “Modelado Geodinámico integrado de la Cuenca Barinas Apure y los Andes de Mérida, estado Barinas” Trabajo Especial de Grado, Inédito, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, pp 88.

Hsu S (2002) “*Imaging magnetic sources using Euler’s equation*” Geophysical Prospecting Vol 50 pag 15-25, enero 2002.

Kiser, G. D., (1961). “*Review of the cretaceous stratigraphy of the southwest Barinas mountain front*”. *Asoc. Venez. Geol., Min., Pet., Bol. Inf.*, 4(2): 335-359.

Kiser, G. D. y Bass, I (1985). “La Reorientación del Arco de El Baúl y su Importancia Económica”. VI Congreso Geológico Venezolano, pág. 5122-5135.

Kiser, G. D., (1989). “Relaciones estratigráficas de la Cuenca Apure-Llanos, con áreas adyacentes, Venezuela Suroeste y Colombia Oriental”. Monografía. *Soc. Venez. Geol.*, (1): 77.

Kiser, G. D., (1997). “Nuevas contribuciones a la geología de Barinas-Apure y su frente de montañas”, en prensa.

Mapas de Anomalías Magnéticas de Venezuela (1989). Edición I – CORPOVEN. Escala 1:500.000.



Lugo, J. y Mann, P. (1995). "*Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo basin, Venezuela*". En A.J. Tankard., R. Suarez., y H. J. Welsink, Petroleum basins of South America, AAPG Memoir 62, p 699-725.

Martínez, Y. (2012). "Caracterización geológica mediante la integración de información geofísica del sector Mantecal-La estacada, estado Apure" Trabajo Especial de Grado, Inédito, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, pp 154.

MENEVEN (1983). Informe inédito para CORPOVEN: "*Aeromagnetig Survey 1981-1982*", Contract CAR-62. Ottawa-Canadá. Presentado por la GEOTERREX LTD, pp 120.

Mushayandebvu, M.F, Van Driel, P, Reid, A. B., y Fairhead J.D. (2001) "*Magnetic source parameters of 2D structures using extended Euler deconvolution*" Geophysics, 66, 814-823.

Notestein, F. B., C. W. Hubman and J. W. Bowler, (1944). "*Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America*", *Geologist Society America. Bull.*, 55: 1165-1216.

Ostos, M., Yoris, F. y Ave Lallemant, H. (2005). "*Overview of the southeast Caribbean-South American plate boundary zone*". Geological Society of America, special paper, p. 53-89.

Parnaud, F., Gou, Y., Pascual, J-C., Truskowki, I., Gallango, O., Passalaacqua, H. y Roure, F. (1995). "*Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuelan basin*". En A.J. Tankard., R. Suarez., y H. J. Welsink, Petroleum basins of South America", AAPG Memoir 62, p 741-756.

PDVSA EFAI (2006). "Estudio integrado de la Cuenca de Maracaibo y Cuenca Barinas-Apure". Beicip-Franlab.

Pierce, G. R., (1960). "Geología de la cuenca de Barinas". *III Cong. Geol. Venez.*, Caracas, 1960, Mem., 1: 214-276.

Reid, A., Allsop, J., Granser, H., Millett, A., y Somerton, W. (1990) "*Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution*" *GEOPHYSICS*, vol 55, enero 1990, p80-91

Renz O., (1959). "Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental". Bol. Geol., Caracas, 5(10): 3-48. Resumen (1960) en: Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform., 3(7): 209.

Salvador, 1961-b. "Guidebook to the geology of northeastern Trujillo". Soc. Geol. Venez. Occid., Guidebook N° 3, 33 p.

Spector, A. y Grant, F. S., (1970) "Statistical models for interpreting aeromagnetic data" *GEOPHYSICS*, vol 35, 293-302.

Thompson, D. (1982) "EULDPH- Anew technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data" *GEOPHYSICS*, vol 47, 31-37

Van Andel, 1958. "Origin and classification of Cretaceous, Paleocene and Eocene sandstones of western Venezuela". *American Asoc. Pet. Geol., Bull.*, 42(4): 734-763.

Von Der Osten, E., 1966. "The stratigraphy of Sinco Field". Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform., 9(9): 253-272.

Schlumberger Oilfield Services (1997). WEC Venezuela 1997 - Evaluación de Pozos.1.

Yoris, F. y Ostos, M. (1997). "Geología de Venezuela: Geología General y Cuencas Petrolíferas. Em Singer, J., ed., WEC 1997. Evaluación de Pozos: Schlumberger – Surencó C.A. 1ra., ed., Español; Jolley Printing, Texas, Capítulo 1.