

Evaluación De Las Propuestas De Cortes Geológicos De La Mesa De Los Santos Empleando
Gravimetría

Alvaro Sergio Osma Duarte.

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Geofísica

Director

José David Sanabria Gómez

Físico PhD.

Codirector

Sergio Andrés García Arias

Geólogo Mgtr.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a la lucha incansable de mi madre y padre, por siempre buscar que los días sean mejores y enseñarme que la felicidad solo se encuentra cuando es compartida.

Agradecimientos

A los directores de este proyecto, el Profesor José David y el Profesor Sergio Andrés, por el especial acompañamiento durante todo este proceso. A mis amigos y todas las personas que hicieron parte de las diversas etapas de este trabajo, los cuales de una u otra manera brindaron su tiempo y apreciaciones.

Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Antecedentes	16
2.1 Geología.....	16
2.1.1 Estratigrafía.....	16
2.1.2 Geología Estructural	21
2.1.3 Cortes Geológicos	22
2.2 Geofísica	27
3. Marco Teórico.....	29
3.1 Método Gravimétrico.....	29
3.1.1 Correcciones A Los Valores Medidos De La Gravedad.....	30
3.1.2 Ondulación del Geoide	33
3.1.3 Anomalía Gravimétrica.....	34
4. Metodología	35
5. Limitaciones Y Control De Calidad De Los Datos.	39
6. Análisis de Datos	41
6.1 Corrección De Deriva Instrumental	42

6.2	Corrección de Aire Libre	42
6.3	Corrección placa de Bouguer.....	43
6.4	Corrección de Curvatura Terrestre.....	44
6.5	Corrección del Terreno	44
7.	Resultados	45
7.1	Mapa de Anomalía Total de Bouguer.....	45
7.2	Separación anomalías gravimétricas regional y residual.	46
7.2.1	Mapa de Anomalía Regional de Bouguer	47
7.2.2	Mapa de Anomalía Residual de Bouguer	48
7.3	Modelado Gravimétrico de los Cortes Geológicos.....	49
8.	Discusión.....	65
9.	Conclusiones	71
10.	Recomendaciones.	73
	Referencias Bibliográficas.....	74

Apéndices

Lista De Tablas

Tabla 1 <i>Valores de densidad medidas en laboratorio y espesor para las unidades que afloran en LMS.</i>	28
Tabla 2 <i>Corrección de aire libre calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.</i>	42
Tabla 3 <i>Corrección de placa de Bouguer calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.</i>	43
Tabla 4 <i>Corrección gravimétrica por curvatura terrestre calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.</i>	44
Tabla 5 <i>Corrección del Terreno calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.</i>	45
Tabla 6 <i>Error en mGal obtenido para cada uno de los modelos gravimétricos asociados a los cortes geológicos evaluados.</i>	50

Lista De Figuras

Figura 1. <i>Localización LMS en el flanco Occidental de la Cordillera Oriental y distribución de los 44 puntos de gravimetría medidos en LMS.</i>	13
Figura 2 <i>Geología LMS.</i>	17
Figura 3. <i>Columna estratigráfica generalizada de LMS.</i>	18
Figura 4. <i>Localización de los cortes geológicos propuestos para LMS.</i>	23
Figura 5. <i>Corte Geológico 1.</i>	24
Figura 6 <i>Corte geológico 2.</i>	25
Figura 7. <i>Corte geológico 3.</i>	26
Figura 8. <i>Corte geológico 4.</i>	26
Figura 9. <i>Corte geológico 5.</i>	27
Figura 10. <i>Corte geológico 6.</i>	27
Figura 11 <i>Diferencia entre geoide y elipsoide.</i>	34
Figura 12. <i>Metodología para el desarrollo de este trabajo de investigación.</i>	37
Figura 13. <i>Mapa geología estructural y unidades geológicas LMS, junto con el valor promedio de la densidad de las unidades geológicas</i>	38
Figura 14. <i>Espectro de potencias radialmente promediado para LMS, resaltando los puntos de inflexión considerados para la estimación de la profundidad de las fuentes de anomalía.</i>	40
Figura 15. <i>Mapa de anomalía total de Bouguer para LMS.</i>	46
Figura 16. <i>Mapa del componente regional de la anomalía total de Bouguer para LMS.</i>	48
Figura 17. <i>Mapa del componente residual de la anomalía total de Bouguer para LMS</i>	49
Figura 18. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico Vargas (2008).</i>	51
Figura 19. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico INGEOMINAS-UIS (2007e).</i>	52
Figura 20. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico García-Arias et al. (2024).</i>	53

Figura 21. <i>Modelo gravimétrico LMS3.</i>	54
Figura 22. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico INGEOMINAS-UIS (2007b).</i>	55
Figura 23. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico Casadiegos (2023).</i>	56
Figura 24. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico Gómez & Cuervo (2012).</i>	57
Figura 25. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico LMS2.</i>	58
Figura 26. <i>Modelo gravimétrico del corte geológico LMS1.</i>	59
Figura 27. <i>Resultados producto de la inversión para el modelo de García-Arias et al. (2024).</i>	60
Figura 28. <i>Comparación entre modelos gravimétricos LMS1 con densidad promedio y cambios de espesor.</i>	62
Figura 29. <i>Comparación modelos gravimétricos LMS 1 con cambio en el ángulo de inclinación de las principales fallas.</i>	63
Figura 30. <i>Modelos gravimétricos considerando el escenario para un cuerpo intrusivo.</i>	64
Figura 31. <i>Modelos gravimétricos con variación lateral de la densidad considerados para los ajustes del nuevo modelo gravimétrico para LMS.</i>	67
Figura 32. <i>Modelo gravimétrico ajustado para LMS</i>	68
Figura 33. <i>Comparación entre corte geológico García-Arias et al. (2024) y corte geológico propuesto a partir del modelo gravimétrico ajustado.</i>	70

Lista De Apéndices

Apéndice A. Corrección de deriva calculada para cada circuito.

Apéndice B. Correcciones gravimétricas y anomalía total de Bouguer calculada.

Apéndice C. Modelos gravimétricos evaluados

Nota: Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

RESUMEN

Título: Evaluación De Las Propuestas De Cortes Geológicos De La Mesa De Los Santos

Empleando Gravimetría. *

Autor: Alvaro Sergio Osma Duarte**

Palabras Clave: Geofísica, Oasis Montaj, Geología Aplicada, Anomalía de Bouguer.

Descripción: En este trabajo se evaluaron y compararon diversas propuestas de cortes geológicos para la Mesa de Los Santos (LMS), Santander (Colombia), mediante la aplicación del método gravimétrico, con el objetivo de analizar su coherencia con la respuesta gravimétrica observada y proponer ajustes fundamentados en criterios geofísicos. A partir de datos gravimétricos recolectados en campo en el proyecto 2534 financiado por la UIS a través de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, en enero 2023. Se calculó la anomalía total de Bouguer, junto con sus componentes regional y residual, aplicando las correcciones de deriva, de mareas, aire libre, placa de Bouguer, curvatura terrestre y corrección topográfica.

La separación de las anomalías regional y residual se realizó mediante filtrado digital, empleando un filtro de Butterworth en el dominio de las frecuencias, lo que permitió un control adecuado del grado de atenuación. El análisis espectral del campo gravimétrico, a través del espectro de potencias radialmente promediado, permitió considerar que la distribución espacial resulta adecuada para capturar las tendencias regionales y residuales de la anomalía total de Bouguer y permite alcanzar los objetivos planteados en este trabajo, centrados en el análisis comparativo de modelos geológicos.

Se evaluaron seis cortes geológicos previamente propuestos en la bibliografía y se desarrollaron tres nuevos cortes (LMS1, LMS2 y LMS3), seleccionados en función de su mayor cobertura de puntos gravimétricos. Para cada corte se realizaron modelos gravimétricos 2D utilizando el módulo GM-SYS del software Oasis Montaj, considerando escenarios de densidad mínima, máxima, promedio y con variación lateral de densidad, encontrando que el error de estos modelos puede variar entre 1.686 y 11.39 mGal. Los resultados indican que los modelos con variación lateral de densidad presentan los menores errores, lo que resalta la importancia de las heterogeneidades laterales en la respuesta gravimétrica. Adicionalmente, el aumento del error al reducir el ángulo de buzamiento de las fallas sugiere que estas estructuras presentan buzamientos elevados en LMS. En conjunto, los resultados evidencian la utilidad de la gravimetría como herramienta de apoyo para la validación y ajuste de modelos geológicos en contextos estructuralmente complejos.

* Trabajo de investigación.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: José D. Sanabria G., Físico PhD.
Codirector: Sergio A. García A. Geólogo Mgtr.

ABSTRACT.

Title: Evaluation of the Proposed Geological Sections of the Mesa de Los Santos Using Gravimetry. *

Author: Alvaro Sergio Osma Duarte**

Key Words: Geophysics, Oasis Montaj, Applied Geology, Bouguer anomaly.

Description: In this study, several proposed geological cross sections for the Mesa de Los Santos (LMS), Santander (Colombia), were evaluated and compared using the gravimetric method, with the aim of assessing their consistency with the observed gravimetric response and proposing adjustments based on geophysical criteria. Gravimetric data collected in the field during Project 2534, funded by the Universidad Industrial de Santander (UIS) through the Office of Research and Extension, in January 2023, were used. From these data, the total Bouguer anomaly was calculated, along with its regional and residual components, applying corrections for instrumental drift, tides, free-air, Bouguer slab, Earth curvature, and terrain effects.

The regional and residual anomalies were separated through digital filtering using a Butterworth filter in the frequency domain, which provided adequate control over the degree of attenuation. Spectral analysis of the gravity field, based on the radially averaged power spectrum, indicated that the spatial distribution of the data was adequate for capturing the regional and residual trends of the total Bouguer anomaly and for achieving the objectives of this study, which focused on the comparative analysis of geological models.

Six geological cross sections previously proposed in the literature were evaluated, and three new cross sections (LMS1, LMS2, and LMS3) were developed, selected based on their greater coverage of gravimetric measurement points. For each cross section, 2D gravimetric models were constructed using the GM-SYS module of the Oasis Montaj software, considering scenarios with minimum, maximum, average, and laterally varying density values, finding that the error of these models can range between 0.64 and 11.39 mGal. The results indicate that models incorporating lateral density variations yield the lowest errors, highlighting the significance of lateral heterogeneities in the gravimetric response. Additionally, the increase in error observed when reducing the fault dip angle suggests that faults in the LMS area are characterized by high dip angles. Overall, the results demonstrate the usefulness of gravimetry as a supporting tool for the validation and refinement of geological models in structurally complex settings.

* Bachelor Thesis

** Science Faculty. School of Physics. Director: José D. Sanabria G., Physicist PhD. Co-director: Sergio A. García A. Geologist MSc.

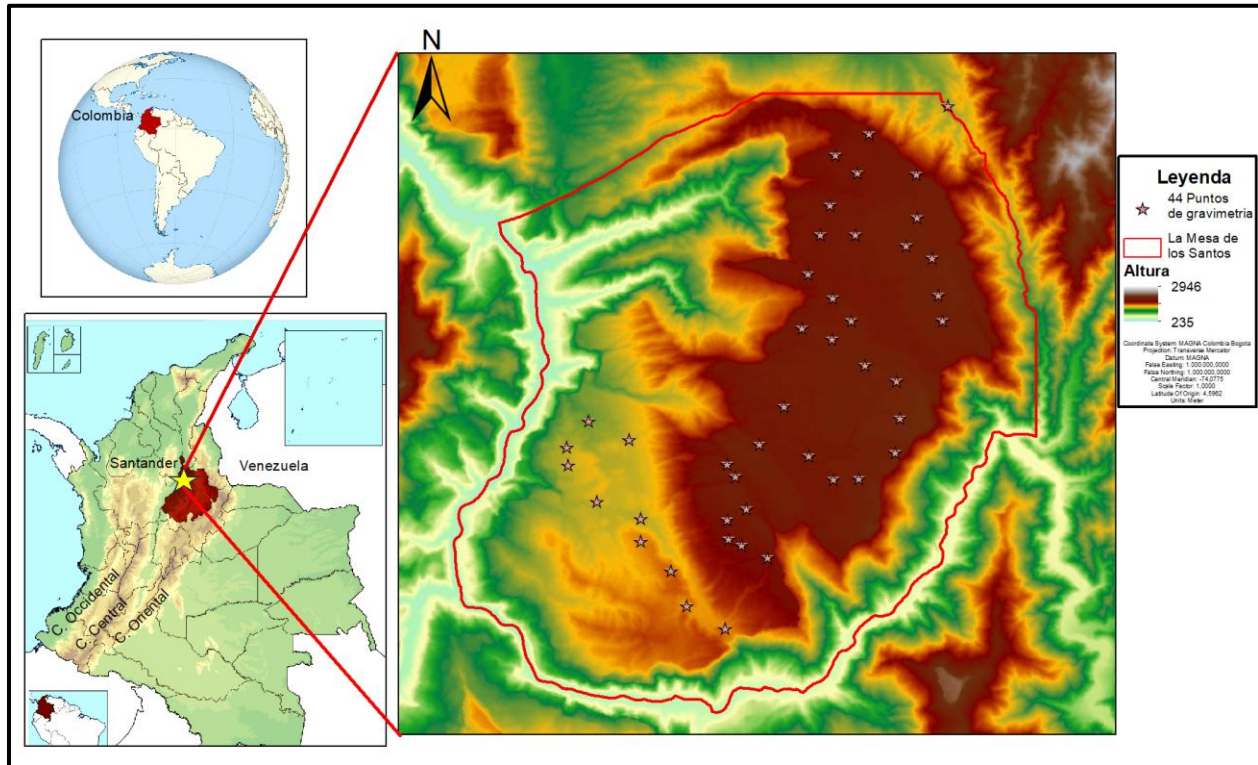
Introducción

Un corte geológico es un modelo que esquematiza, en el plano vertical, la forma y distribución de las rocas en el subsuelo, empleando información de fallas, estructuras, discordancias, discontinuidades y el tipo de roca (Weijermars, 2016). Los cortes geológicos permiten interpretar la distribución en profundidad de las rocas, a partir de la configuración geológica actual de un lugar.

La Mesa de Los Santos (LMS) (Figura 1) está ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, en la región central del departamento de Santander y es un área que ha experimentado una evolución geológica compleja asociada a la orogenia de los Andes del Norte (INGEOMINAS, 2010b). Diversos autores han propuesto cortes geológicos para LMS (Casadiegos, 2023; García, 2022; García-Arias et al., 2024; Gómez & Cuervo, 2012; INGEOMINAS-UIS, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2007f, 2007g, 2007h, 2007i, 2007j; C. Y. Vargas, 2008), integrando diferentes aspectos de las unidades geológicas presentes. Todos los cortes propuestos a la fecha cuentan con un grado de incertidumbre en lo que respecta a la distribución en profundidad de las unidades geológicas, ya que ninguna de las propuestas cuenta con datos de profundidad sobre los contactos geológicos y distribución espacial. En el actual trabajo de investigación se analizó e integro información geológica, hidrogeológica y geofísica actualizada de LMS mediante la integración de información gravimétrica.

Figura 1.

Localización LMS en el flanco Occidental de la Cordillera Oriental y distribución de los 44 puntos de gravimetría medidos en LMS.



El método gravimétrico es una técnica geofísica que permite estudiar el subsuelo midiendo pequeñas variaciones en el campo gravitacional terrestre originadas por contrastes laterales de densidad en las rocas del subsuelo (Telford W et al., 1990). Estas variaciones se denominan anomalías gravimétricas y permiten inferir la distribución de masas en el interior de la Tierra y, por tanto, identificar estructuras geológicas como fallas, cuerpos intrusivos o variaciones en el espesor cortical mediante el análisis de las anomalías gravimétricas (Reynolds, 2011). Para este trabajo fueron empleados 44 puntos de gravimetría, recolectados en el marco del proyecto 2534 “Estudio Integral del Agua en La Mesa de Los Santos” financiado por la UIS a través de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión. Haciendo uso de estos puntos de gravimetría, se generó el mapa de anomalía total de Bouguer, posteriormente fueron elaborados modelos gravimétricos

de seis cortes geológicos propuestos por estudios previos y tres modelos gravimétricos de los cortes propuestos propios por este trabajo.

La metodología de este trabajo se desarrolló en dos etapas principales. En la primera, se realizó el análisis de los datos gravimétricos recolectados en campo, con el fin de identificar y descartar posibles valores atípicos que no siguieran la tendencia general de la información en cada estación. Posteriormente, se aplicaron las correcciones estándar de deriva, mareas, aire libre, placa de Bouguer, curvatura terrestre y corrección topográfica, con el propósito de calcular la anomalía total de Bouguer y sus componentes. En la segunda etapa, se llevó a cabo el modelado gravimétrico de los cortes geológicos evaluados en este estudio, con el fin de analizar la correspondencia entre cada modelo geológico y la respuesta gravimétrica observada. Finalmente, mediante la integración de la información geológica y gravimétrica, y considerando las limitaciones inherentes al método gravimétrico, se establecieron relaciones entre las estructuras geológicas inferidas y la respuesta gravimétrica modelada, lo que permitió proponer ajustes a los cortes geológicos de la Mesa de Los Santos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Comparar los modelos de cortes geológicos propuestos para La Mesa De Los Santos usando el método gravimétrico.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las propuestas de corte geológico para La Mesa De Los Santos, evaluando sus rasgos estructurales y estratigráficos.
- Calcular y comparar las anomalías totales de Bouguer de los datos recolectados en campo y las correspondientes a la modelación directa de los cortes geológicos propuestos.
- Realizar la inversión geofísica de la anomalía total de Bouguer de los datos obtenidos en campo para generar modelos de distribución de densidad en profundidad y compararlos con los correspondientes modelos geológicos propuestos.
- Evaluar la posibilidad de sugerir ajustes a los cortes geológicos propuestos para el área de estudio, considerando las limitaciones del método gravimétrico.

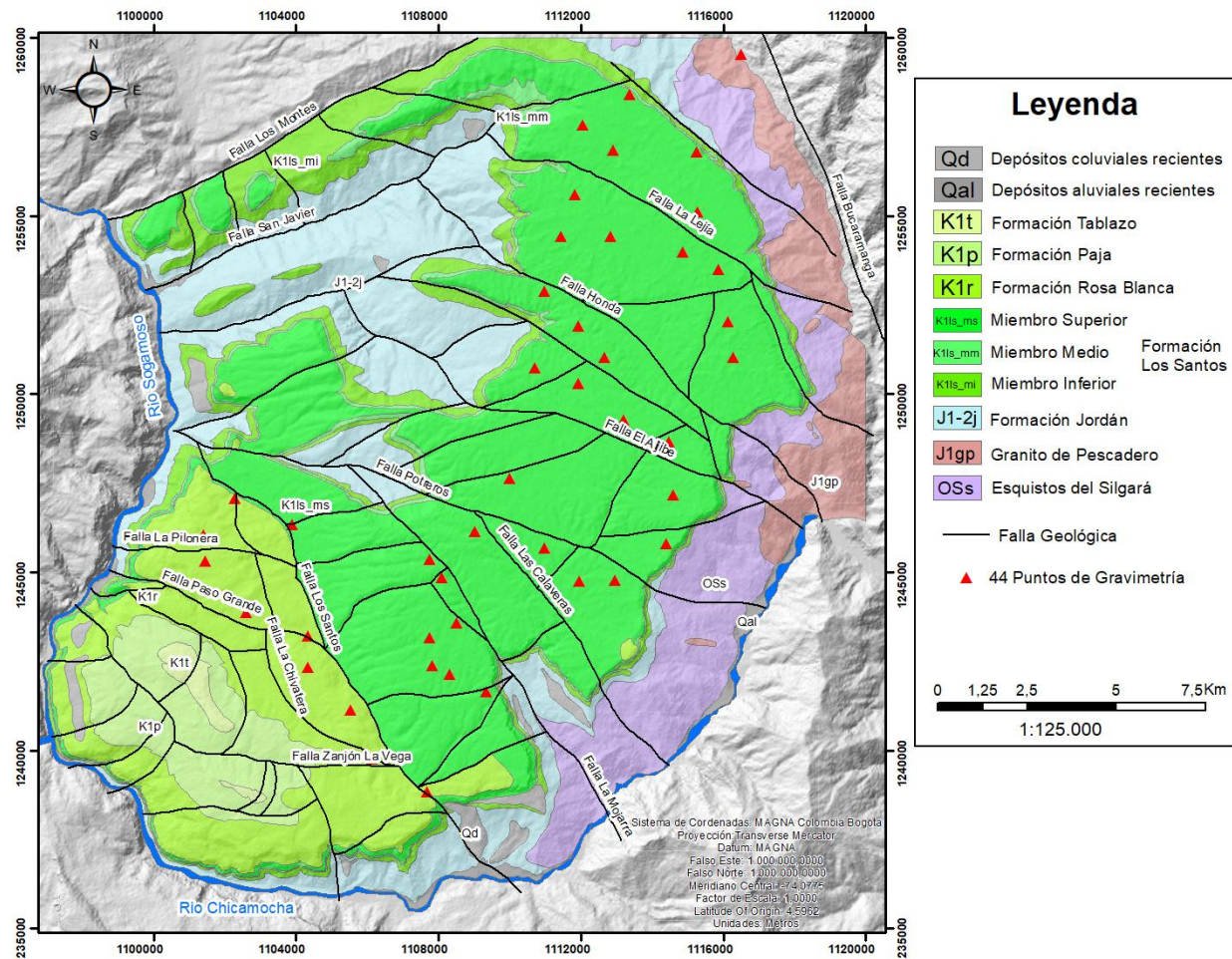
2. Antecedentes

2.1 Geología

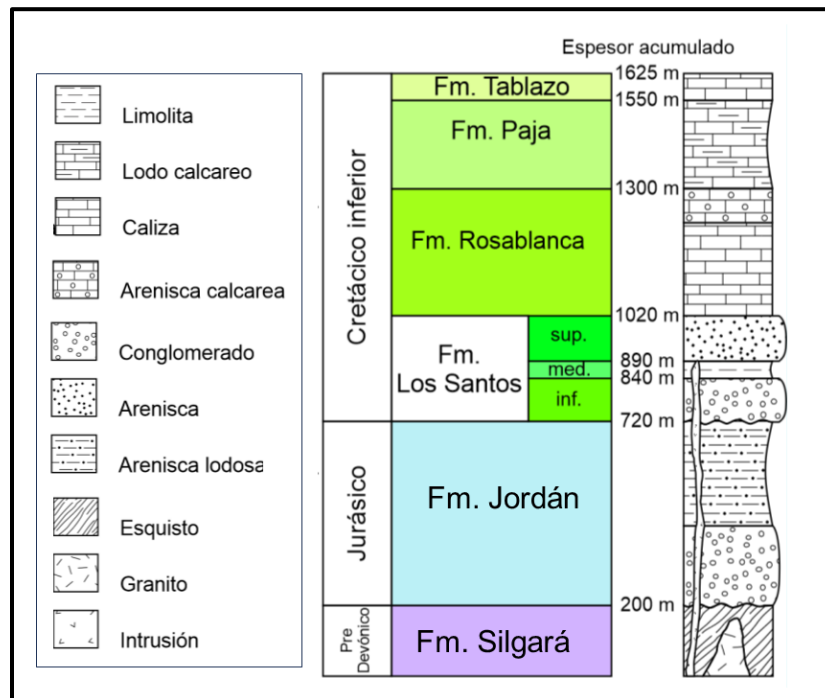
Los primeros trabajos de caracterización geológica de LMS fueron desarrollados por Julivert (1958) y Julivert et al. (1964), los cuales buscaban conocer la evolución morfoestructural de la Zona de Mesas de la vertiente occidental de la Cordillera Oriental. Trabajos posteriores se enfocaron en conocer la petrología de las calizas asociadas a la Formación Rosa Blanca (Zamarreño, 1963), trabajos posteriores aportaron información de la geología, estratigrafía y geología estructural de LMS (Aldana, 2008; Contreras, 2008; García, 2022; Tarazona & Vargas, 2020b; Vargas, 2008). Los trabajos más recientes se han centrado en evaluar y entender la hidrogeología de LMS debido a la falta del recurso hídrico (Arguello et al., 2018; Becerra & Parra, 2016; García-Arias et al., 2024; INGEOMINAS, 2007a, 2010d, 2010e, 2010b).

2.1.1 Estratigrafía

En LMS afloran las unidades geológicas correspondientes a los Esquistos del Silgará (OSs), Granito de Pescadero (J1gp), Formación Jordán (Jj), Formación Los Santos (K1ls), Formación Cumbre (K1c), Formación Rosablanca (K1r), Formación Paja (K1p) y Formación Tablazo(K1t) (Vargas, 2008) (Figura 2 y Figura 3).

Figura 2*Geología LMS.*

Nota. Adaptado de la información geológica de los trabajos Alcaldía Municipio Los Santos (2003) y García-Arias et al. (2024). Los puntos de gravimetría empleados son representados por los triángulos rojos y las líneas negras continuas representan de manera general las fallas de LMS.

Figura 3.*Columna estratigráfica generalizada de LMS.**Nota.* Adaptado de García (2022).

2.1.1.1 Esquistos del Silgará (OSs): De acuerdo con Cediel et al. (2003), los Esquistos del Silgará corresponden a una secuencia supra-cortical con deformación y metamorfismo regional orogénico de tipo Cordillerano, asociado a la Orogenia Quetame. La edad de esta unidad ha sido ampliamente discutida. Algunos autores la sitúan entre el Cámbrico y el Ordovícico (Ward et al., 1973) o pre-Devónico (Ríos et al., 2017). Estudios más detallados proponen una edad estratigráfica máxima aún más antigua, ubicándolos en el Neoproterozoico, alrededor de 720 Ma (Mantilla-Figueroa et al., 2016). Las rocas han sido descritas como pizarras, filitas, metalimolitas, metarenisca impura, metawaka y metawaka guijarrosa de estratificación delgada a laminada (Royero & Clavijo, 2001; C. Y. Vargas, 2008) y un espesor aproximado de 3.700 m (Ward et al., 1973).

2.1.1.2 Granito de Pescadero (J1gp): También llamado Granito Rosado (Royero & Clavijo, 2001). Constituido por un granito leucocrático rosado naranja, con un tamaño de los cristales de fino a muy fino y una distribución de equigranular a ligeramente porfíritico, compuesto por plagioclasa de tipo albita, ortoclasa, micropertita y cuarzo en cantidades casi iguales, con minerales accesorios como los óxidos de hierro, moscovita, biotita y zircón (Royero & Clavijo, 2001; Servicio Geológico Colombiano, 2015; Ward et al., 1973).

2.1.1.3 Formación Jordán (J1-2j): De acuerdo con Arguello & Guerrero (2015), la parte superior de esta unidad corresponde a areniscas de grano muy fino, intercalada con limolitas y en la parte inferior de la unidad se encuentran conglomerados con clastos de composición ígnea. Estratigráficamente esta unidad se encuentra infrayaciendo de manera discontinua a la Formación Los Santos, por sus relaciones estratigráficas se considera de edad jurásico inferior y medio (Royero & Clavijo, 2001). El espesor puede variar entre 300 y 660 m, llegando incluso a 800 m en la parte occidental de LMS (Ward et al., 1973).

2.1.1.4 Formación Los Santos (K1ls): Llamada anteriormente como formación Tambor (Julivert et al., 1964), es descrita por Cediel (1968) como una formación compuesta por tres niveles, donde el espesor total de la formación puede variar entre 130 m al E y 280 m al W de LMS. Aldana (2008) describe los tres niveles que componen esta formación como:

Nivel Inferior (K1ls_mi): Está compuesto por sublitoconglomerados alternados con sublitoarenitas conglomeráticas con entre un 50 y 90% de matriz areno-arcillosa. El espesor máximo identificado corresponde a 152 m y el mínimo a 56 m.

Nivel Medio (K1ls_mm): Compuesto por limolitas y arcillolitas de color marrón rojizo con manchas verdes grisáceas, con intercalaciones de areniscas de grano muy fino a medio, laminación plano paralela y cruzada. Para LMS el espesor es de 40 m.

Nivel Superior (*K1ls_ms*): conformado por cuarzoarenitas y sublitoarenitas en capas medias a gruesas de color amarillo pálido, con un espesor de 54 m.

El contacto inferior de la Formación Los Santos es discontinuo estratigráficamente con la Formación Jordán y el contacto superior es concordante con la Formación Cumbre. Se considera que la Formación Los Santos tiene una edad Berriasiano (Cediel, 1968).

2.1.1.5 Formación Cumbre (*K1c*): Ha sido descrita como capas de arenisca de grano medio de color gris verdoso claro, intercaladas con capas gruesas de limolitas con laminación plana paralela y areniscas calcáreas de grano fino a medio (Royero & Clavijo, 2001; Vargas, 2008). Para LMS esta formación aflora únicamente al Oeste, en la vereda El Calicho, con un espesor de 8 m (Vargas, 2008). Debido a su tamaño no es posible representarla en el mapa geológico (Figura 2) y en la columna estratigráfica generalizada (Figura 3) de LMS.

2.1.1.6 Formación Rosa Blanca (*K1r*): Para LMS la unidad es observada al suroeste (Hincapié & Veloza, 2009) y descrita de base a techo así: el nivel inferior conformado por capas tabulares gruesas y muy gruesas de lodolitas calcáreas de color gris oscuro, con capas tabulares de yeso. El nivel medio presenta intercalación de capas tabulares de calizas fisiles rojizas con calizas de tipo mudstone y packstone. El nivel superior formado por una alternancia de areniscas lodosas calcáreas y calizas masivas con recristalización de calcita. El espesor de esta unidad puede variar llegando a tener un máximo de 425 m (Royero & Clavijo, 2001).

2.1.1.7 Formación Paja (*K1p*): Aflora al suroeste de LMS, con un espesor total de 250 m. Hacia la base está compuesta por limolitas de color café oscuro con concreciones de caliza de 0.1 a 1 m de diámetro con amonites y láminas de yeso, intercaladas con capas de arenisca arcillosa y limolita calcárea (Royero & Clavijo, 2001; Vargas, 2008).

La Formación Paja infrayace a la Formación Tablazo y suprayace a la Formación Rosa Blanca, siendo el contacto en ambos casos de tipo concordante transicional. La edad ha sido determinada del Barremiano Inferior al Aptiano Inferior (Royero & Clavijo, 2001).

2.1.1.8 Formación Tablazo (K1t): Para LMS esta formación presenta poca exposición, encontrándose principalmente hacia las partes más altas del SW (Vargas, 2008) y ha sido descrita como calizas grises a negra fosilíferas, localmente glauconitas y arcillosas de color negro con niveles intercalados de arcillolitas calcáreas fosilíferas en capas medianas a gruesas con intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio arcillosas (Royero & Clavijo, 2001). La edad es considerada como Aptiano Superior-Albiano Inferior y espesor de 75m (Royero & Clavijo, 2001; Vargas, 2008).

2.1.2 Geología Estructural

LMS tiene su origen asociado a complejos procesos sedimentarios y tectónicos correspondientes a la orogenia de los Andes del Norte (INGEOMINAS, 2007), la cual fue controlada por la interacción entre las placas tectónicas Nazca, Suramericana y Caribe. LMS está ubicada en la provincia tectónica Cordillera Oriental de acuerdo Royero & Clavijo (2001). Limitando al Oeste con la Falla Suarez, la cual es una falla inversa con dirección N20-25E y al Este con el Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta, la cual corresponde a una cinemática de rumbo sinistral con un componente inverso y dirección N20W (Royero & Clavijo, 2001; Tarazona & Vargas, 2020a).

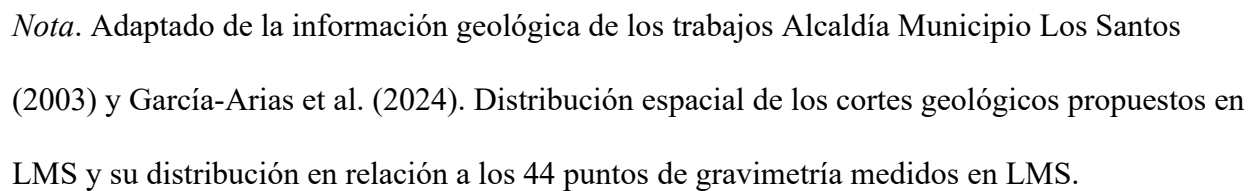
A escala de LMS se identifican tres sistemas de fallas: un sistema longitudinal con dirección NW, un sistema transversal con dirección NE y fallas del sistema menor EW (INGEOMINAS, 2010c).

- **Sistema longitudinal:** Afecta la secuencia sedimentaria del Jurásico y Cretácico, así como el basamento, comprende las fallas Los Santos, La Chivatera, La Mojarra, Honda y Calaveras.
- **Sistema transversal:** El sistema de fallas transversales está compuesto principalmente por las fallas Los Montes y San Javier.
- **Sistema de fallas menores:** Este sistema de fallas está compuesto por las fallas La Pilonera, Zanjón de la Vega y Zanjón de Pardo.

2.1.3 Cortes Geológicos

Para la LMS se han propuesto, hasta la fecha, 15 cortes geológicos, los cuales han buscado evaluar rasgos como: geomorfología (Gómez & Cuervo, 2012), hidrogeología (Arguello et al., 2018; Casadiegos, 2023; García-Arias et al., 2024), geología estructural y estratigrafía (García, 2022; INGEOMINAS-UIS, 2007a, 2007b, 2007c, 2007f, 2007g, 2007h, 2007i, 2007j, 2007e; Vargas, 2008). De estos cortes existentes, los propuestos por García-Arias et al. (2024), Casadiegos (2023), Gómez & Cuervo (2012), Vargas (2008), INGEOMINAS-UIS (2007b) y INGEOMINAS-UIS (2007e) cuentan con la mayor cantidad de información en lo relacionado a geología estructural, espesor, distribución y relación espacial de las unidades geológicas (Figura 4).

Localización de los cortes geológicos propuestos para LMS.

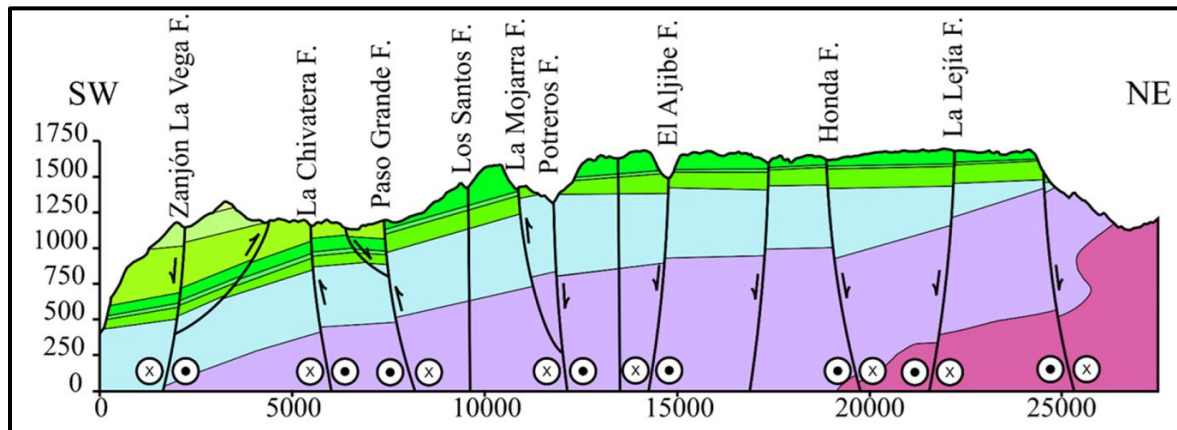


2.1.3.1 Corte geológico 1: García-Arias et al. (2024). El objetivo de este trabajo fue contribuir al modelo hidrogeológico conceptual de LMS, buscando entender el flujo potencial del

fluido, empleando la inversión de tensores de estrés y cuantificación de los patrones de fractura de LMS (Figura 5).

Figura 5.

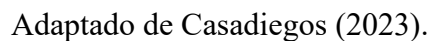
Corte Geológico 1.



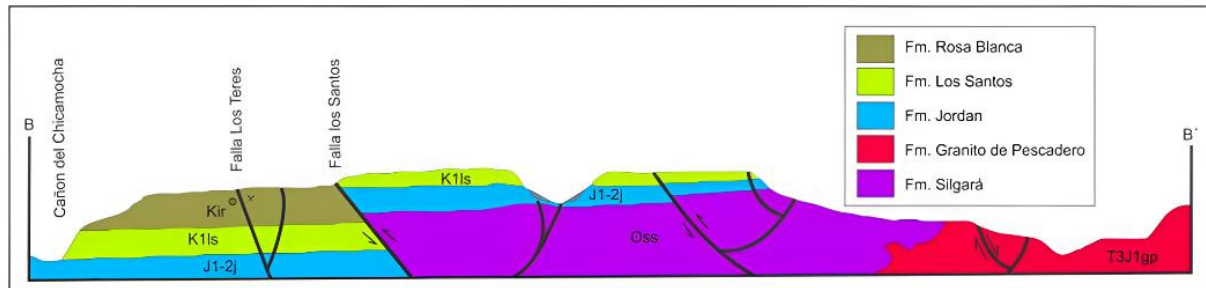
Nota. Adaptado de García-Arias et al. (2024)

2.1.3.2 Corte geológico 2: Casadiegos (2023). El objetivo de este trabajo fue establecer el modelo hidrogeológico conceptual preliminar para LMS y evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en LMS (Figura 6). Este modelo, al tener un enfoque hidrogeológico, emplea el termino de Unidad Hidrogeológica (U), la cual de acuerdo a sus propiedades como acuífero está asociada al miembro superior de la Formación Los Santos.

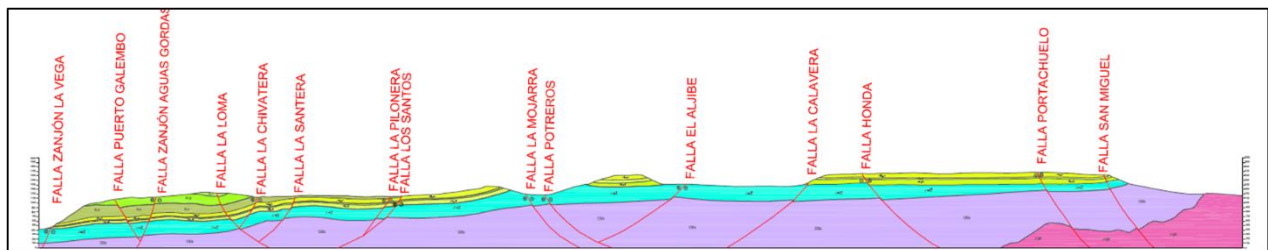
Corte geológico 2.



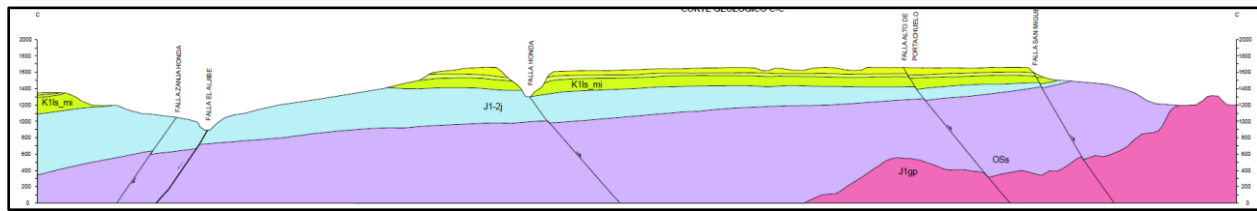
2.1.3.3 Corte geológico 3: Gómez & Cuervo (2012). Este trabajo consistió en un estudio geológico de las características litológicas, estructurales y geomorfológicas de LMS. Donde realizan una síntesis de la cartografía a escala 1:25.000 (Figura 7) con un levantamiento detallado de las unidades geomorfológicas y de Unidades del Paisaje.

Figura 7.*Corte geológico 3**Nota.* Adaptado de Gómez & Cuervo (2012)

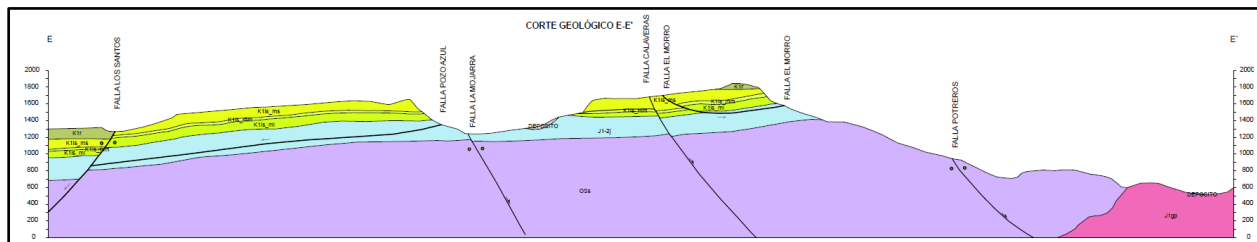
2.1.3.4 Corte geológico 4: Vargas (2008). Este trabajo buscaba describir las características geológicas, con énfasis en el control estructural de LMS. Integrando fotografías aéreas, imágenes satelitales y trabajo de campo (Figura 8).

Figura 8.*Corte geológico 4.**Nota.* Adaptado de Vargas (2008)

2.1.3.5 Cortes geológicos 5 y 6: (INGEOMINAS-UIS, 2007b, 2007e). Por último, se tienen los cortes geológicos realizados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (anteriormente INGEOMINAS) en los mapas geológicos 120-IV-B (Figura 9) y 120-IV-D (Figura 10) de escala 1:25.000.

Figura 9.*Corte geológico 5.*

Nota. Corte en el mapa 120-IV-B. Adaptado de INGEOMINAS-UIS (2007b)

Figura 10.*Corte geológico 6.*

Nota. Corte en el mapa 120-IV-D. Adaptado de INGEOMINAS-UIS (2007e)

2.2 Geofísica

La exploración geofísica en LMS ha tenido diferentes enfoques, trabajos más reciente tenían como objetivo evaluar las propiedades geofísicas de las unidades geológicas (García, 2022; Moreno & Zárate Martínez, 2023; Vergel Navarro & Remolina Rivero, 2023); otros trabajos han buscado identificar y evaluar elementos del sistema hidrogeológico, evaluar el estado de las fracturas y conocer más la dinámica del agua subterránea (Díaz & Duarte, 2019; García & Gómez, 2015; INGEOMINAS, 2009, 2010b, 2010c, 2010a; Moreno & Zárate Martínez, 2023; Sánchez & Farfán, 2015; Vargas Cáceres, 2021; N. Vargas, 2016). Estos trabajos han empleado ensayos de laboratorio, métodos geoelectricos (SEV, Sondeos Eléctricos Azimutales, Tomografías de Resistividad), sísmica de refracción (Vergel Navarro & Remolina Rivero, 2023) y algunos sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (Díaz & Duarte, 2019; García & Gómez, 2015).

García (2022), empleando análisis de laboratorio determina los valores de densidad (Tabla 1), porosidad, resistividad eléctrica, cargabilidad eléctrica, velocidad de la onda P y susceptibilidad magnética, de las formaciones geológicas que afloran en LMS. Cabe aclarar que algunos valores de densidad pueden corresponder a datos atípicos para las litologías asociadas, como resultado de algún proceso humano durante la medición u otros factores, tales como errores instrumentales, de lectura o de preparación de las muestras. Por esta razón, se consideraron los valores mínimos, máximos y promedio de densidad para garantizar un rango coherente con la variabilidad esperada para cada Formación.

Tabla 1

Valores de densidad medidas en laboratorio y espesor para las unidades que afloran en LMS.

Formación	Densidad [g/cm ³]			Espesor (m)
	Mínima	Promedio	Máxima	
Tablazo	2.42	2.62	2.69	75
Paja	2.00	2.63	2.9	250
Rosa Blanca (Arenisca)	2.65	2.68	2.76	280
Rosa Blanca (Caliza)	1.96	2.56	2.77	
Los Santos (Miembro Superior)	2.24	2.59	2.76	130
Los Santos (Miembro Medio)	2.03	2.21	2.45	50
Los Santos (Miembro Inferior) (Arenisca)	2.45	2.62	3.11	120
Los Santos (Miembro Inferior) (Conglomerado)	2.36	2.52	2.64	
Jordan (Lodolitas)	1.77	2.44	2.67	300-600
Jordan (Arenisca)	2.34	2.58	2.86	
Jordan (Conglomerados)	2.21	2.56	3.07	
Granito de Pescadero	2.4	2.53	2.68	Intrusivo
Silgara	2.4	2.67	3.36	3700

Nota. Información de densidades adaptada de García (2022) y espesores adaptados de (Vargas, 2008).

3. Marco Teórico

3.1 Método Gravimétrico

El método gravimétrico, o gravimetría, es un método de exploración geofísica que busca determinar la distribución de la densidad de las rocas del subsuelo mediante la medición de las anomalías del campo gravitatorio de La Tierra, las cuales son generadas por las estructuras geológicas (IGME, 2007; Pedraza, 2017). Los usos de la gravimetría en la exploración geofísica han sido ampliamente diversos. Sus primeras aplicaciones se enfocaron en la identificación de domos salinos mediante balanzas de torsión, y posteriormente se extendieron a la prospección minera. Con los avances tecnológicos recientes, la gravimetría se ha consolidado como una herramienta versátil capaz de aplicarse a cualquier objetivo que presente un contraste de densidad en profundidad, incluyendo la exploración de hidrocarburos y minerales, el estudio de volcanes y cuencas sedimentarias, y la caracterización de estructuras de escala regional (Pedraza, 2017).

Gravímetro es como se denomina al instrumento empleado para medir la magnitud de la componente vertical de la aceleración de la gravedad (Niebauer, 2011). Sobre cada punto de la corteza terrestre se puede calcular el valor teórico de la gravedad o gravedad normal (γ) en función de la latitud ($\emptyset$), asumiendo una distribución homogénea de densidades (IGME, 2007; Vajda et al., 2020). En campo, este valor se verá modificado por cambios en la densidad que están asociados a las estructuras geológicas y será detectado en las mediciones del gravímetro, siendo la localización de estas anomalías el objetivo de la exploración gravimétrica (IGME, 2007; Niebauer, 2011). La unidad más común de medida para los valores de las anomalías gravimétricas es el Gal, el cual equivale a 1 cm/s^2 , y sus submúltiplos en particular el mGal (10^{-3} Gal) y el μGal (10^{-6} Gal). El

valor teórico de la gravedad (γ) en un punto a una latitud $\emptyset$ dada sobre el elipsoide de referencia, para el World Geodetic System 1984 está dado por la formula (1) (ver Long & Kaufmann, 2013)

$$\gamma = 978,93267714 \frac{1,0 + 0,00193185138639(\sin \emptyset)^2}{\sqrt{1,0 - 0,00669437999013 (\sin \emptyset)^2}} \quad (1)$$

3.1.1 Correcciones A Los Valores Medidos De La Gravedad

La diferencia entre el valor de gravedad medido y el valor teórico en un punto de la superficie de La Tierra (γ), con las debidas correcciones (de deriva, de mareas, de latitud, de aire libre, placa de Bouguer y del terreno), se conoce como Anomalía Gravimétrica y permite detectar la existencia de variaciones del componente vertical de la aceleración de la gravedad (SGC, 2012; Torres, 2002). Las correcciones para los datos de gravedad tomados en campo de acuerdo con Long & Kaufmann (2013), se pueden estimar de la siguiente manera:

- **Deriva del gravímetro:** Corresponde a desviaciones que se pueden tener en los datos debido a factores que afectan el sensor que realiza la medida, como pueden ser el desgaste del gravímetro, la relajación elástica del instrumento y cambios en la temperatura ambiental. La deriva es calculada, haciendo un análisis estadístico de los datos adquiridos. Para calcular esta corrección, se empleó la formula (2)

$$Deriva(t) = \frac{(Lectura_f - Lectura_i)}{t_{total}} \left[\frac{\text{mGal}}{\text{hora}} \right] \quad (2)$$

Esta fórmula da el valor de la deriva por hora y se calcula para la estación base de cada circuito o loop, siendo $Lectura_f$ el valor de la lectura de cierre del circuito y $Lectura_i$ el valor de la lectura de apertura del circuito, con t_{total} la diferencia de tiempo en horas, entre la medición de cierre y de apertura del circuito. Una vez determinada la deriva, se procede a corregir cada lectura gravimétrica restando, del valor observado por el gravímetro ($g_{observada}$), el producto entre la

deriva calculada y el intervalo de tiempo transcurrido ($t_{transcurrido}$) correspondiente a la medición que se está corrigiendo (formula 3). De este modo, se obtiene el valor de gravedad corregido por deriva.

$$g_{deriva} = g_{observada} - (Deriva(t) * t_{transcurrido})[\text{mGal}] \quad (3)$$

- **Corrección de mareas (δg_{tide}):** Consiste en eliminar los efectos gravitacionales del Sol, La Luna y las mareas en el mar. Esta corrección, es calculada empleando el modelo ETGTAB (Tabla de gravedad de marea terrestre), el cual considera modelos potenciales de mareas para predecir la corrección con la ayuda del software con que cuenta el gravímetro Scintrex modelo CG-6-Autograv (Ossama et al., 2020), considerando el día y coordenadas de la adquisición. NOTA: En adelante, se usará la expresión g_{OBS} para denotar el valor de la gravedad medido y corregido por deriva instrumental y mareas.

- **Corrección de aire libre (δg_{FA}):** corrige el decrecimiento en la aceleración gravitacional debido al cambio en la distancia al centro de la Tierra, de acuerdo a la formula (4).

$$\delta g_{FA} = 0,3087691h \text{ mGal/m} \quad (4)$$

siendo h la altitud. Se debe sumar para compensar la disminución del valor con la altura.

- **Corrección de placa de Bouguer (δg_{BB}) (Bullard A):** Esta corrección busca eliminar el efecto de atracción causado por la roca entre la estación y el nivel de referencia (geoide o elipsoide). Está dada por la formula (5).

$$\delta g_{BB} = 2\pi G\rho h \quad (5)$$

Donde G es la constante de gravitación universal, ρ la densidad de reducción, h la elevación de la estación en metros. Los dos métodos más populares para estimar la densidad de reducción (ρ) son el método tradicional o estándar y el método de Nettleton (Hinze, 2003; Nettleton, 1939). El método tradicional, considera un valor de 2.67 g/cm^3 para ρ , debido a que este valor representa

la densidad media de los materiales de la corteza (Long & Kaufmann, 2013; Sánchez-Aguililla et al., 2021). El método de (Nettleton, 1939) consiste en graficar las anomalías de Bouguer calculadas con diferentes densidades a lo largo de un perfil, luego compararlas con el perfil topográfico y seleccionar la densidad que posea una menor correlación directa o inversa con el respectivo perfil topográfico.

Considerando que el mapa de anomalías total de Bouguer para Colombia, desarrollado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) versión 2008 y 2010, emplea el método tradicional, este valor de ρ (2.67 g/cm^3) se utilizó tanto para la corrección de placa Bouguer, como la corrección de terreno.

- **Corrección de Curvatura Terrestre (Bullard B) (δg_{BP}):** El objetivo es convertir la geometría de la loza infinita en la corrección de placa de Bouguer a un casquete esférico con espesor de la altura de la estación o punto de gravimetría (Long & Kaufmann, 2013), con el propósito de corregir el efecto de la curvatura terrestre. Para su cálculo, fue empleada la formula (6), donde h es la altura del gravímetro en kilómetros.

$$\delta g_{BP} = -0.3527404h^2 + 1.46365h \quad (6)$$

- **Corrección del Terreno (Bullard C) (δg_{TER}):** Busca considerar el efecto de atracción gravitacional generado por el relieve alrededor del punto de medición, efecto que no es considerado por la corrección de placa de Bouguer (Telford W et al., 1990). Debido a que la corrección de placa de Bouguer asume una topografía plana, se tendrán zonas con exceso (elevaciones) o déficit de masa (valles o depresiones) con respecto a la placa de Bouguer. En consecuencia, se obtendrían valores subestimados en zonas de montaña y valores sobrestimados para zonas de valle. En ambos casos debe sumarse la corrección topográfica, para compensar estos efectos (Gordillo, 2014; Martínez, 2014).

La corrección de terreno, δg_{TER} , se calcula tradicionalmente usando la ecuación para el efecto de atracción de un segmento de cilindro vertical, con centro en la estación gravimétrica. Las primeras correcciones de terreno fueron basadas en el sistema o plantilla de Hammer, el cual divide el terreno que rodea la estación gravimétrica en zonas y compartimientos de igual área y estimando las elevaciones medias de cada compartimiento, se realiza el cálculo de la corrección (Neiza, 2011). Un método más reciente para el cálculo de esta corrección es el incorporado en el software de procesamiento Oasis Montaj, el cual sigue el algoritmo basado en Nagy (1996) y Kane (1962), y también considera la información topográfica definida por el Modelo Digital del Terreno (DEM), para calcular esta corrección (IGME, 2009).

El módulo para el cálculo de la corrección del terreno, empleado en el software Oasis Montaj, deriva el cálculo a partir de la aproximación de una serie de prismas cuadrados concéntricos al punto de muestreo (zona cercana, intermedia y lejana) y el efecto total es la suma de los efectos de cada una de estas zonas.

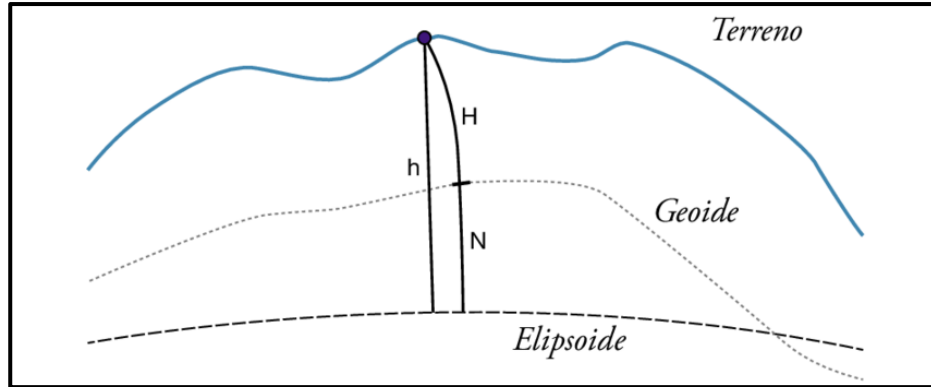
3.1.2 Ondulación del Geoide

El geoide es una superficie equipotencial del campo de gravedad de la Tierra y se ve afectado por la composición de la Tierra, lo que significa que es una superficie irregular y no una superficie matemática idealizada como el elipsoide (Figura 11). La relación entre el geoide y el elipsoide está definida por la ondulación del geoide, la cual determina para cada punto la distancia lineal a la que se encuentra el geoide en relación con el elipsoide (Moya & Dörries, 2004). En otras palabras, la ondulación del geoide (N) (formula 7) es la distancia entre el elipsoide (h) y el geoide (H) en una localización concreta. De acuerdo con el modelo geoidal para Colombia (Sánchez, 2003), LMS está ubicada en la zona de 10 a 12 metros para la ondulación del geoide. Cabe aclarar que las correcciones calculadas (formulas 3 a 5), fueron calculadas empleando la altura elipsoidal.

$$N = h - H \text{ [m]} \quad (7)$$

Figura 11

Diferencia entre geoide y elipsoide.



Nota. Adaptada de Quirós (2014).

3.1.3 Anomalía Gravimétrica

El tipo de anomalía gravimétrica calculada va a depender de las correcciones que sean sustraídas de los datos medidos en campo (anomalía de aire libre, de Bouguer e Isostática). La anomalía de aire libre (δg_{FAA}) (8) es una función de las variaciones laterales de masa (SGC, 2012) y representa la medición gravimétrica hecha a la elevación de la estación, pero sin tomar en cuenta la atracción de las rocas entre la elevación de la estación y el nivel de referencia:

$$\delta g_{FAA} = g_{OBS} - \gamma + \delta g_{FA} \quad (8)$$

donde g_{obs} es el valor de la gravedad medido con la corrección de mareas y deriva, γ es el valor teórico de la gravedad y δg_{FA} es la corrección de aire libre.

Por otro lado, la anomalía de Bouguer es la anomalía gravimétrica más útil para la interpretación de estructuras geológicas (Torres, 2002). Remueve la influencia de la masa entre la estación y la superficie de referencia (geoide o elipsoide). De acuerdo con el tipo de corrección considerada la anomalía de Bouguer puede ser simple o total. La anomalía simple de Bouguer

considera solamente la corrección por latitud, altura y la corrección de placa de Bouguer (δg_{SBA}), mientras que la anomalía total de Bouguer (δg_{CBA}) (9) considera la corrección por altura, corrección de placa de Bouguer y adicionalmente la corrección del Terreno (Timothy & Douglas, 2013; Torres, 2002):

$$\delta g_{CBA} = g_{OBS} - \gamma + \delta g_{FA} + \delta g_{BP} + \delta g_{TER} \quad (9)$$

Para el cálculo de la profundidad de las fuentes de anomalía gravimétrica se empleó el espectro de potencias radialmente promediado, una técnica ampliamente utilizada de análisis espectral en el dominio de la frecuencia. De acuerdo con el método propuesto por Spector y Grant (Abdullahi, 2014), existe una relación proporcional entre el logaritmo del espectro de potencias, la profundidad de la fuente y el número de onda radial. Esta relación permite estimar la profundidad de las fuentes gravimétricas a partir de la pendiente de la gráfica del espectro de potencias en escala logarítmica en función del número de onda.

4. Metodología

Los datos de gravimetría utilizados fueron tomados en enero de 2023, en el marco del proyecto de investigación 2534 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS, titulado “Estudio Integral del Agua en La Mesa de Los Santos”, dirigido por el Profesor Francisco Velandia de la Escuela de Geología-UIS. Fueron tomados 44 puntos de gravimetría en LMS, empleando un gravímetro Scintrex modelo CG-6-Autograv. Los datos están distribuidos en 13 circuitos, con un total de 6 estaciones base. Cada punto, tuvo un tiempo de muestreo de 10 minutos, con un intervalo de muestreo de 15 segundos, tomando un total de 40 muestras. Luego estos datos fueron organizados por circuitos y punto de gravimetría, donde fueron eliminados los valores atípicos y

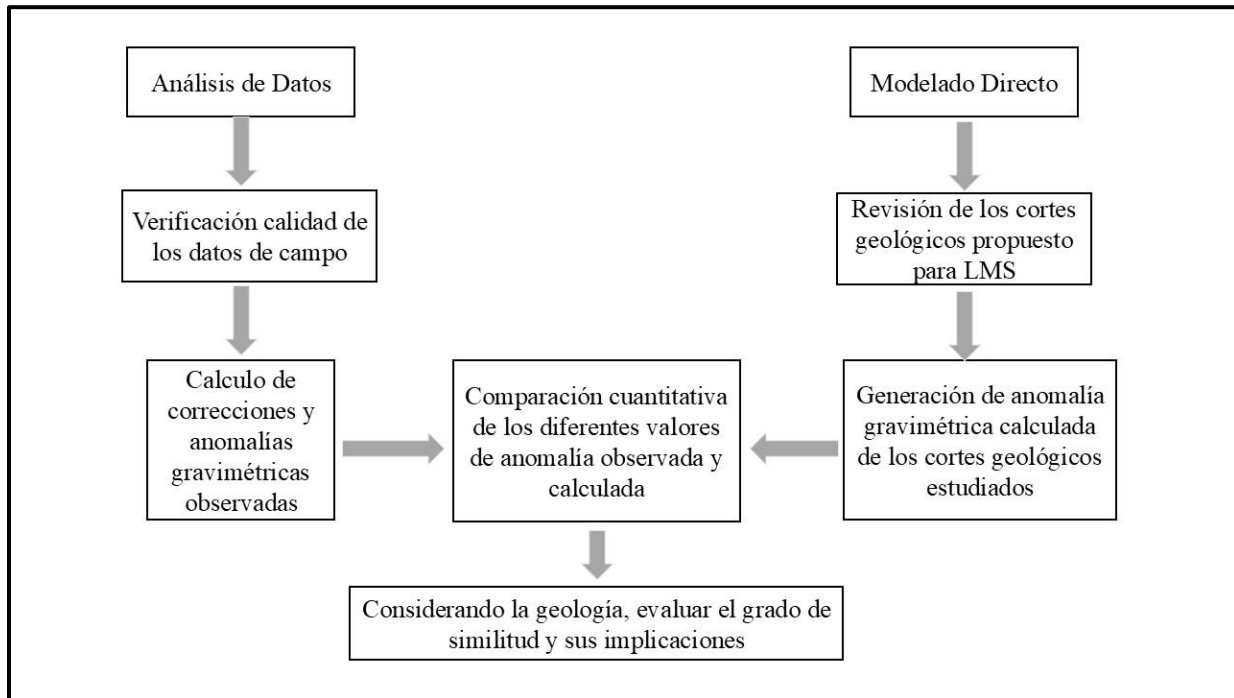
luego fueron promediados los valores para obtener el valor medido en cada uno de los 44 puntos gravimétricos medidos en campo.

Las actividades desarrolladas en este trabajo de investigación se concentraron en la generación del mapa de anomalía total de Bouguer para LMS, en la elaboración de 6 modelos gravimétricos basados en los 6 cortes geológicos seleccionados de los estudios previos y en la propuesta de 3 nuevos modelos gravimétricos de los cortes propios de este trabajo (LMS1, LMS2 y LMS3). Estos últimos fueron definidos considerando los trazos que presentan la mayor cobertura de puntos gravimétricos, con el fin de optimizar la comparación entre la gravedad observada y la respuesta calculada por los modelos. Finalmente, se procedió a la interpretación de los resultados obtenidos.

El desarrollo del trabajo se llevó a cabo en dos etapas principales: en una primera etapa se realizó el análisis y procesamiento de los datos gravimétricos, y en una segunda etapa se efectuó el modelado gravimétrico de los cortes geológicos seleccionados (Figura 12).

Figura 12.

Metodología para el desarrollo de este trabajo de investigación.



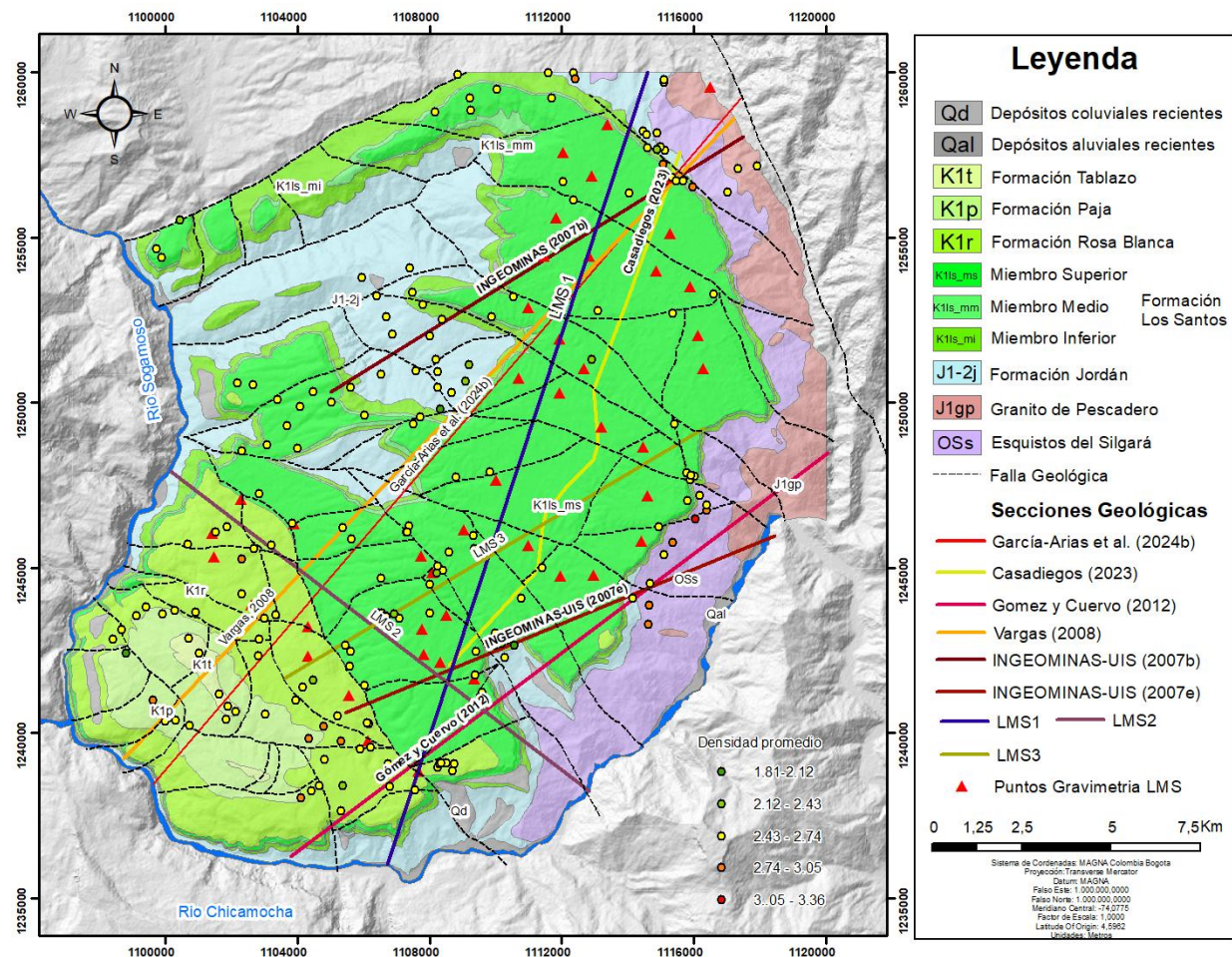
En la primera etapa, fueron analizados los datos de gravimetría medidos en campo, y fueron aplicadas las correcciones de deriva, aire libre, placa de Bouguer, de curvatura y de terreno. Con las correcciones gravimétricas realizadas se procedió a obtener el valor de la anomalía total de Bouguer. En esta misma etapa, se realizó un análisis espectral de las anomalías para lograr una separación regional-residual y así determinar las componentes regional y residual del mapa de anomalía total de Bouguer.

En la segunda etapa o etapa de modelado gravimétrico, se realizó el modelado gravimétrico directo empleando el paquete de modelamiento GM-SYS del software Oasis Montaj (versión 9.6) de Seequent. Teniendo en cuenta los contactos geológicos entre las formaciones presentes en LMS, los diferentes sistemas de fallas reportados para el área de estudio y los valores de densidad de las

formaciones presentes en LMS de acuerdo con el trabajo de García (2022). Toda la información anteriormente mencionada se encuentra resumida en la Figura 13.

Figura 13.

Mapa geología estructural y unidades geológicas LMS, junto con el valor promedio de la densidad de las unidades geológicas



Nota. Adaptada de García-Arias et al. (2024) y el valor promedio de la densidad de las muestras analizadas por García (2022) junto la ubicación de los 6 cortes geológicos seleccionados de la bibliografía y 3 cortes geológicos propuestos por este trabajo (LMS1, LMS2 Y LMS3).

Al comparar la ubicación de los seis cortes geológicos seleccionados de la bibliografía con la distribución de los puntos de gravimetría, se observa que el corte de Casadiego (2023) cuenta

con la mayor cobertura de puntos gravimétricos. En contraste, los cortes de García-Arias et al. (2024), INGEOMINAS-UIS (2007b) y Vargas (2008) carecen de cobertura gravimétrica en sus extremos sur-occidentales, mientras que los cortes de Gómez & Cuervo (2012) e INGEOMINAS-UIS (2007e) son los que cuentan con una menor cobertura en términos generales. Debido a esta situación, se proponen los cortes LMS1, LMS2 y LMS3, seleccionados considerando que sus trazos son los que mejor se ajustan a la distribución de los puntos gravimétricos medidos.

Fueron considerados los siguientes 4 escenarios para realizar el modelado gravimétrico: modelos con valores máximo y mínimo de densidad, tenían el objetivo de evaluar los escenarios extremos en cuanto a la variación de la densidad; los modelos con densidad promedio buscaban considerar un escenario para la distribución homogénea de la densidad y los modelos con variación lateral del valor de la densidad buscaban evaluar un escenario más ajustado a la realidad geológica de LMS, de acuerdo a la distribución de la densidad planteada por García (2022) para las formaciones geológicas en LMS. Con los resultados de estos modelos gravimétricos, se procedió a realizar la interpretación para considerar ajustes a los cortes geológicos evaluados.

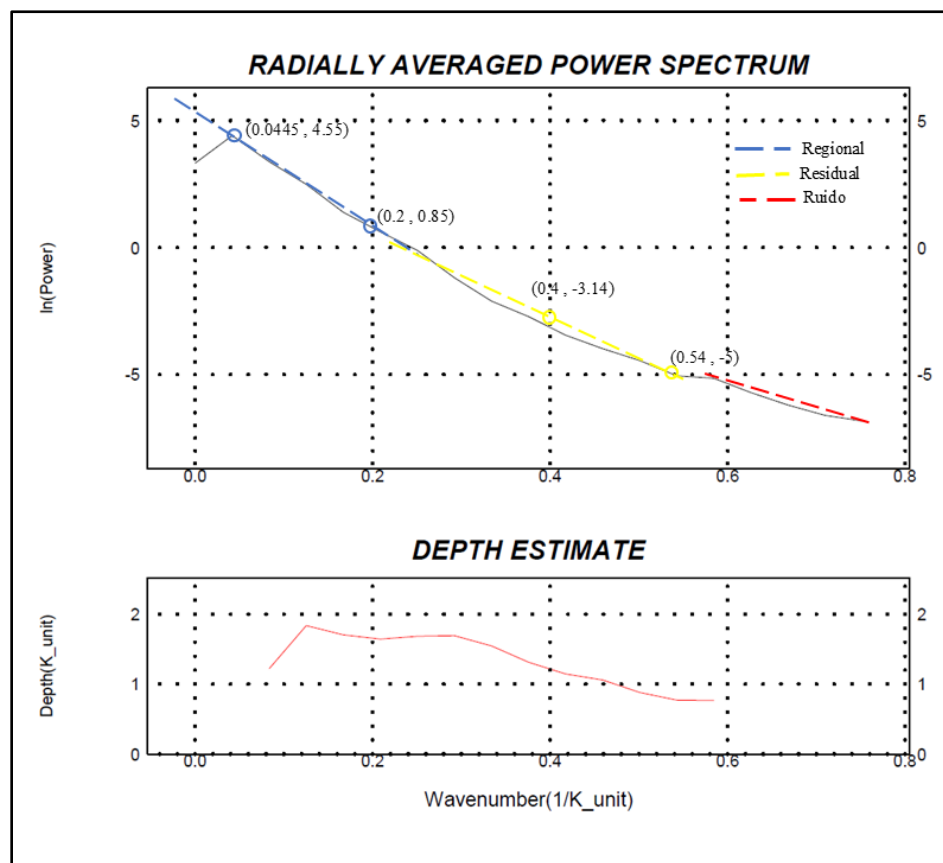
5. Limitaciones Y Control De Calidad De Los Datos.

La red gravimétrica utilizada en el programa de investigación 2534 de la Vicerrectoría de la UIS, estuvo conformada por 44 puntos de gravimetría a lo largo de LMS, con un espaciamiento medio entre puntos de 1 a 2 km (Figura 13). Esta campaña previa fue desarrollada con propósitos distintos a los de este trabajo de investigación, por lo que la malla no fue diseñada específicamente para la comparación de modelos estructurales. Sin embargo, su distribución espacial resulta

adecuada para capturar las tendencias regionales y residuales de la anomalía total de Bouguer y permite alcanzar los objetivos planteados en este trabajo, centrados en el análisis comparativo de modelos geológicos. Considerando el análisis del espectro de potencias radialmente promediado (Figura 14), el espaciado entre puntos de gravimetría es coherente con la escala de muestreo adoptada.

Figura 14.

Espectro de potencias radialmente promediado para LMS, resaltando los puntos de inflexión considerados para la estimación de la profundidad de las fuentes de anomalía.



Las zonas con mejor cobertura corresponden al sector centro-oriental y al corredor central con orientación S-N, donde la distribución sigue las principales estructuras geológicas, permitiendo capturar las tendencias regionales y los contrastes entre las densidades asociados a las

fallas. También en el sector sur y suroccidental la red mantiene una disposición regular y continua, garantizando un control adecuado de la tendencia regional del campo gravimétrico. En contraste, se identifican áreas con cobertura limitada o dispersa en el noroccidente y el extremo norte, donde la separación entre puntos supera los 2 km y se evidencian brechas significativas en zonas de alta complejidad estructural, especialmente en los contactos con el Granito de Pescadero y en los sectores donde convergen varias fallas. Por último, se tienen algunos sectores sin cobertura ubicados hacia el centro-occidente y los extremos norte y oriente.

Esta heterogeneidad en la distribución de los puntos gravimétricos implica ciertas limitaciones en la resolución lateral, particularmente en zonas donde se presentan gradientes gravimétricos elevados, cambios bruscos de densidad o contactos estructurales complejos. En estos sectores, una malla de 1-2 km puede suavizar o promediar, e incluso puede impedir la detección de señales de corta longitud de onda, lo que reduce la capacidad del modelo para representar con precisión estructuras locales de pequeña escala, como pliegues menores, fallas locales o pequeñas intrusiones.

6. Análisis de Datos

El análisis de los datos observados para calcular el valor de la gravedad en cada uno de los puntos, consistió en calcular y aplicar las correcciones de deriva, de aire libre, de placa de Bouguer, curvatura de Bouguer y del Terreno. A continuación, se describe el proceso realizado para el cálculo de cada una de las correcciones.

6.1 Corrección De Deriva Instrumental

Para el cálculo de la corrección por tiempo o de deriva, los datos fueron agrupados por circuito y luego fueron ajustados mediante una regresión lineal, con excepción del circuito 3, el cual fue ajustado mediante una regresión cuadrática debido a que estos datos tienen una distribución parabólica. La deriva fue calculada de acuerdo a la fórmula (2), obteniendo un valor de deriva para cada uno de los 13 circuitos. Los resultados muestran un valor mínimo de la deriva de -0.0169 mGal/hora y un valor máximo de 0.0091 mGal/hora, en el Apéndice A se detallan los valores calculados para cada uno de los 13 circuitos medidos, con la corrección de deriva empleando la fórmula 3.

6.2 Corrección de Aire Libre

Esta corrección busca eliminar el efecto de la disminución de la atracción gravitacional con el aumento de la altura en los datos medidos. Fue calculada empleando la fórmula (4), encontrando que el valor oscila entre un mínimo de 310.52 mGal y un máximo de 546.46 mGal. A continuación, se presentan los valores calculados para los puntos base de cada circuito (Tabla 2) y en el Apéndice B se detallan los valores calculados para la corrección de aire libre en cada uno de los 44 puntos medidos.

Tabla 2

Corrección de aire libre calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.

Punto Gravimetría	Coordenada X	Coordenada Y	Altura Gravímetro (m)	Corr Aire Libre (FA)[mGal]
B0 (Curos)	1116499.043	1259548.07	1077.3658	332.66
B01 (Peaje)	1115244.045	1256801.02	1688.0248	521.21

Punto Gravimetría	Coordenada X	Coordenada Y	Altura Gravímetro (m)	Corr Aire Libre (FA)[mGal]
B02 (CAI)	1112682.886	1251037.71	1696.7648	523.91
B03 (Los Santos)	1107679.322	1238865.32	1287.2084	397.45
B19	1109997.446	1247657.37	1679.3878	518.54
B35	1108511.668	1243582.01	1699.8958	524.88

6.3 Corrección placa de Bouguer

Para calcular la corrección de la placa de Bouguer se empleó la formula (5), considerando una densidad de reducción de 2.67 g/cm^3 , de acuerdo, a las consideraciones anteriormente descritas. Encontrando que esta corrección varía entre 112.53 mGal y 198.04 mGal. A continuación, se presentan los valores calculados para los puntos base de cada circuito (Tabla 3) y en el Apéndice B se detallan los valores calculados para la corrección de placa de Bouguer en cada uno de los 44 puntos medidos.

Tabla 3

Corrección de placa de Bouguer calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.

Punto Gravimetría	Coordenada X	Coordenada Y	Altura Gravímetro (m)	Corr Bouguer (CB)[mGal]
B0 (Curos)	1116499.043	1259548.07	1077.3658	120.557233
B01 (Peaje)	1115244.045	1256801.02	1688.0248	188.8899751
B02 (CAI)	1112682.886	1251037.71	1696.7648	189.8679811
B03 (Los Santos)	1107679.322	1238865.32	1287.2084	144.03862
B19	1109997.446	1247657.37	1679.3878	187.9234948
B35	1108511.668	1243582.01	1699.8958	190.21834

6.4 Corrección de Curvatura Terrestre

Esta corrección fue calculada empleando la formula (6), encontrando que varía entre 1.115 mGal y 1.485 mGal. En la Tabla 4 se presentan los resultados para el cálculo de los puntos base de los circuitos. En el Apéndice B se encuentran detallados los valores calculados para cada uno de los 44 puntos registrados.

Tabla 4

Corrección gravimétrica por curvatura terrestre calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.

Punto Gravimetría	Coordenada X	Coordenada Y	Altura Gravímetro (m)	Altura Gravímetro (km)	Corr Curvatura (CBP)[mGal]
B0 (Curos)	1116499.043	1259548.067	1077.3658	1.0773658	1.167454651
B01 (Peaje)	1115244.045	1256801.023	1688.0248	1.6880248	1.465569223
B02 (CAI)	1112682.886	1251037.707	1696.7648	1.6967648	1.467926383
B03 (Los Santos)	1107679.322	1238865.316	1287.2084	1.2872084	1.299565078
B19	1109997.446	1247657.37	1679.3878	1.6793878	1.4631869
B35	1108511.668	1243582.013	1699.8958	1.6998958	1.468757697

6.5 Corrección del Terreno

Con el propósito de considerar el efecto de atracción de masa dado por la topografía, se empleó el módulo para el cálculo de la corrección del terreno del software Oasis Montaj (versión 9.6). Empleando para el área cercana un DEM de 90 km en X y 110 km en Y, con centro en LMS y para el área lejana un DEM de 190 km en X y 240 km en Y, con centro en LMS. A continuación, en la Tabla 5, se presentan los valores calculados para los puntos base de los circuitos. En el Apéndice B se detallan los valores para los 44 puntos medidos.

Tabla 5

Corrección del Terreno calculada para las estaciones base de los circuitos. Sistema de coordenadas usado Magna Colombia Bogotá.

Punto Gravimetría	Coordenada X	Coordenada Y	Altura Gravímetro (m)	Corr Terreno (mGal)
B0 (Curos)	1116499.043	1259548.067	1077.3658	13.766757
B01 (Peaje)	1115244.045	1256801.023	1688.0248	1.5819876
B02 (CAI)	1112682.886	1251037.707	1696.7648	14.613321
B03 (Los Santos)	1107679.322	1238865.316	1287.2084	6.1143256
B19	1109997.446	1247657.37	1679.3878	5.2141053
B35	1108511.668	1243582.013	1699.8958	4.5084679

7. Resultados

Una vez calculadas las respectivas correcciones para los datos gravimétricos tomados en campo, se procedió a calcular la anomalía total de Bouguer para LMS, siguiendo la formula (9).

7.1 Mapa de Anomalía Total de Bouguer

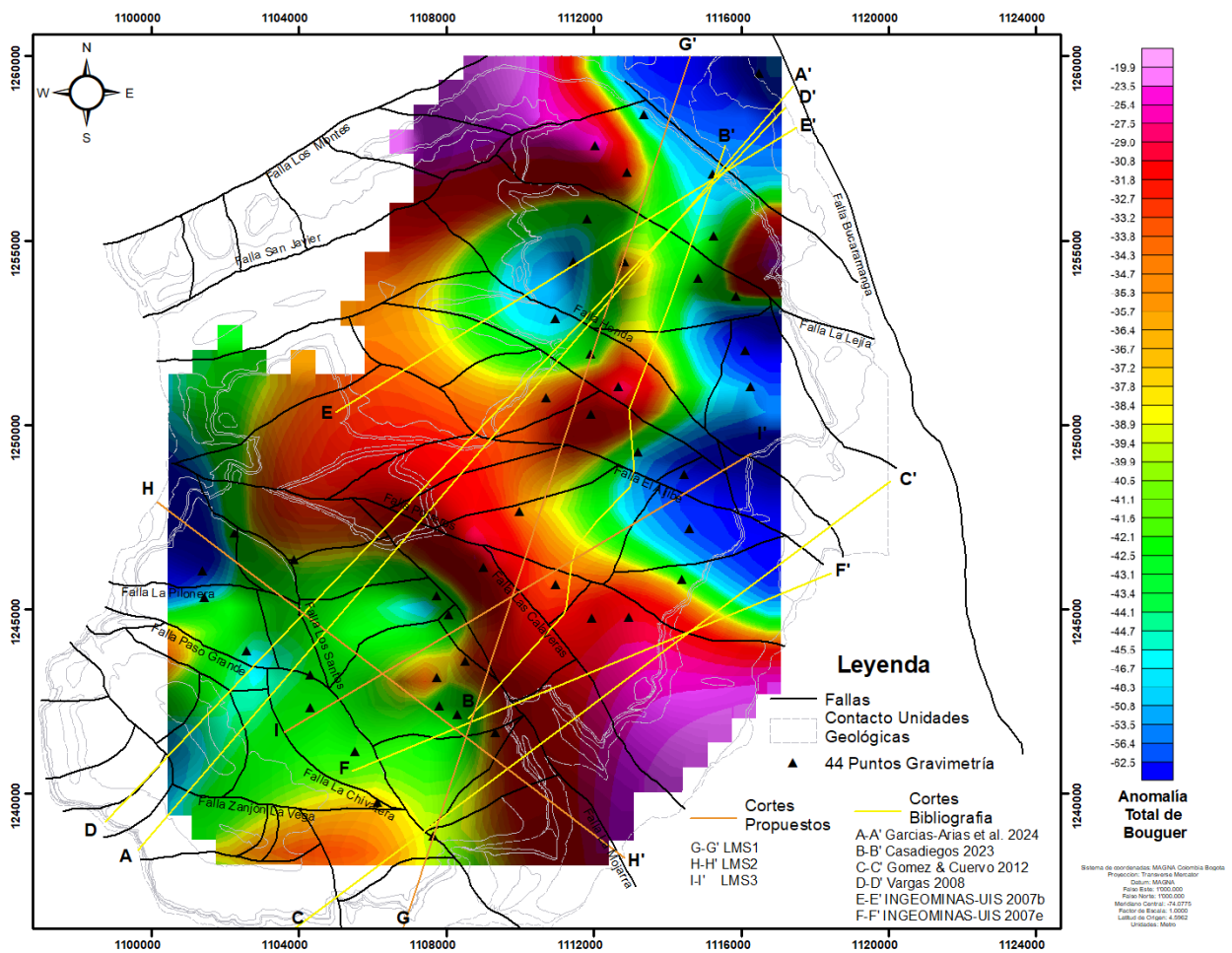
Una vez realizado el cálculo y aplicación de las correcciones gravimétricas durante el análisis de los datos, se ha empleado el método de interpolación de mínima curvatura para obtener el mapa de anomalía total de Bouguer para LMS (Figura 15). El método de interpolación de mínima curvatura, es un algoritmo que busca obtener una superficie suavemente variable y físicamente coherente, evitando la generación de picos o discontinuidades no justificadas por los datos (Briggs, 1974).

Se tiene que para LMS el valor de la anomalía total de Bouguer varia desde -62.5 hasta -19.9 mGal, encontrando que los mayores valores se encuentran en la zona central del área de estudio, en cercanías de las fallas La Mojarra, Las Calaveras, Potreros y en el extremo NW de las

fallas el Aljibe, Honda y Lejía, mientras que hacia el extremo SE de las fallas El Aljibe y Honda se encuentran los valores más bajos.

Figura 15.

Mapa de anomalía total de Bouguer para LMS.



7.2 Separación anomalías gravimétricas regional y residual.

El mapa de anomalía total de Bouguer integra las anomalías producidas por diversas fuentes en profundidades, por lo cual es necesario separar la anomalía gravimétrica en sus componentes regionales y residuales. Existen dos maneras para realizar esta separación, el método gráfico y el método matemático. En nuestro trabajo empleamos el método matemático,

considerando que este método permite una separación controlada entre la anomalía regional y residual, reduce el ruido para las altas frecuencias y minimiza la generación de artefactos al separar señales.

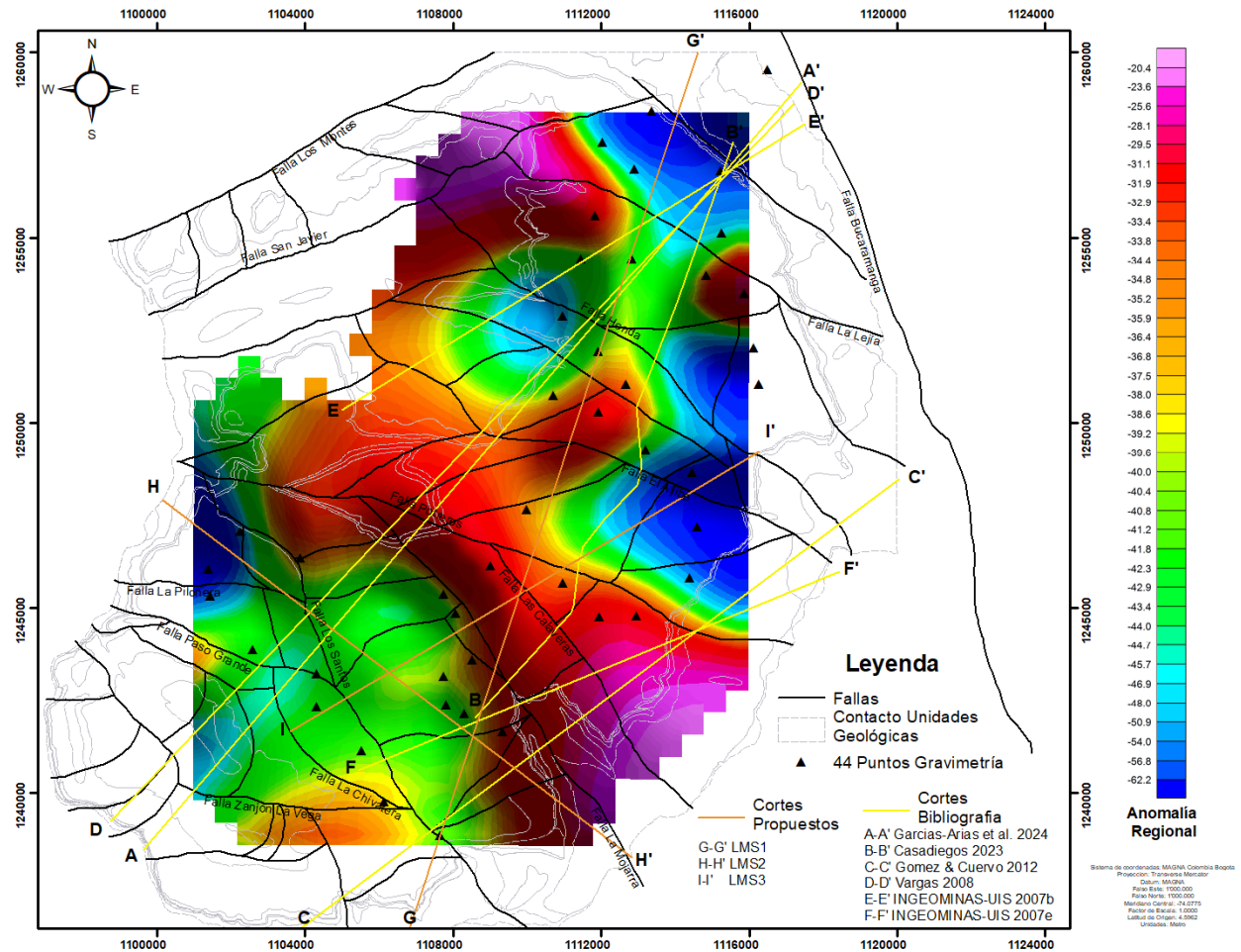
De acuerdo con IGME (2009), los métodos matemáticos, más usados para realizar la separación de las anomalías gravimétricas son: ajuste de superficies polinómicas, derivación del campo potencial, filtrado digital y continuación de campos. En nuestro trabajo fue empleado el filtrado digital, considerando que este método permite controlar fácilmente el grado de atenuación del filtro y reduce el ruido de alta frecuencia, a diferencia de los métodos gráficos. El filtrado se realizó con ayuda del módulo de corrección de gravedad y del terreno del software Oasis Montaj (versión 9.6). Se aplicó el filtro de Butterworth, considerando que este filtro ofrece una transición suave entre frecuencias y minimiza los artefactos que se puedan crear durante el proceso de filtrado, a diferencia del filtro Gaussiano o el filtro Chebyshev. El valor de número de longitud de onda central utilizado fue 2660 y 8 para el grado de filtro, considerando que el punto de inflexión en la pendiente del espectro de potencias (Figura 14) se encuentra aproximadamente en 2660. A continuación, se presentan los mapas obtenidos para las anomalías regional y residuales.

7.2.1 Mapa de Anomalía Regional de Bouguer

La componente regional para el área de estudio LMS, varía en un intervalo de -62.2 a -20.4 mGal, estando los mayores valores de la anomalía regional asociados a las fallas La Mojarra, Las Calaveras, Potreritos y el extremo NW de la falla el Aljibe. Mientras que los menores valores para la anomalía regional se encuentran hacia el norte, en cercanías del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta (Figura 16).

Figura 16.

Mapa del componente regional de la anomalía total de Bouguer para LMS.



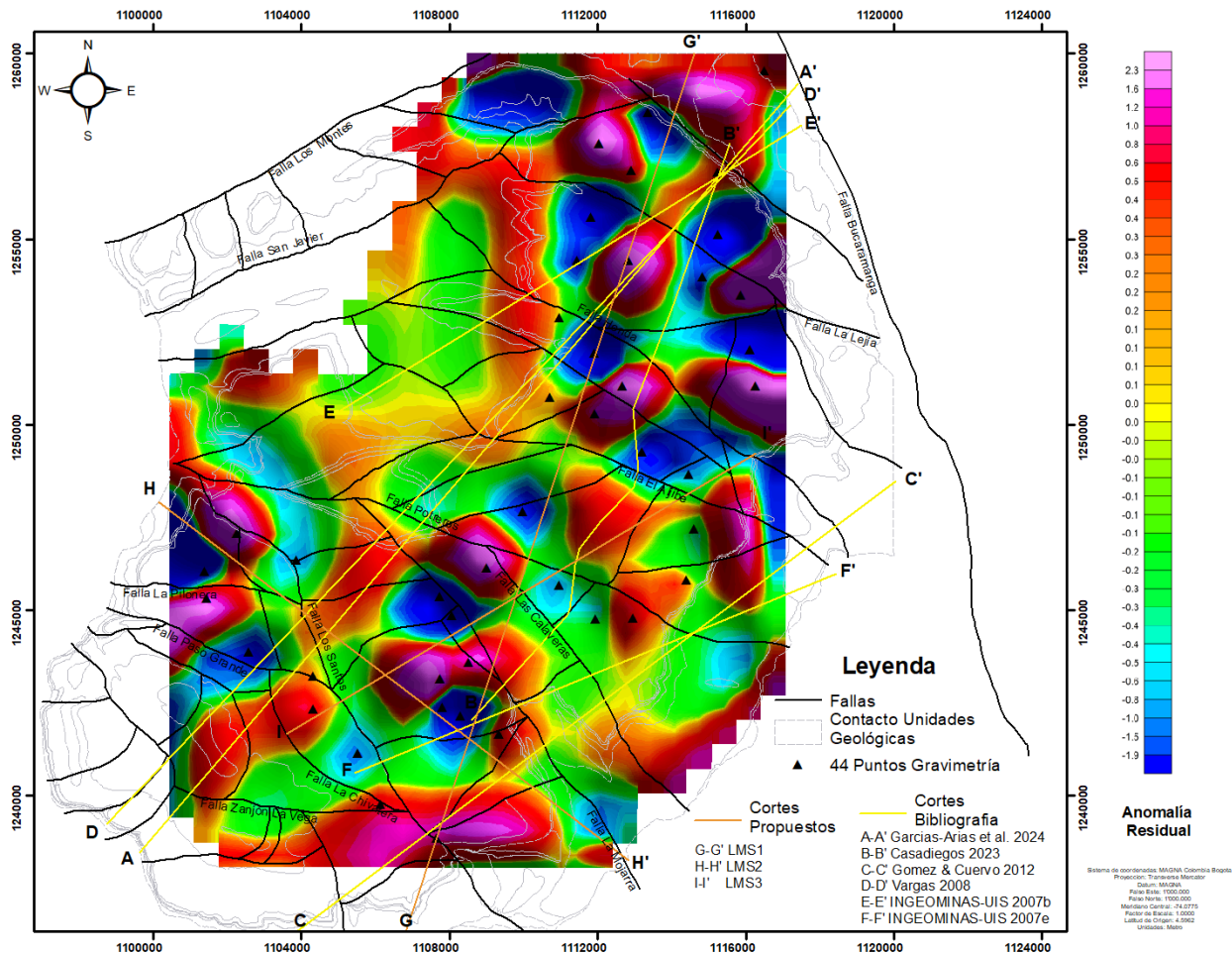
7.2.2 Mapa de Anomalía Residual de Bouguer

Una vez removido el efecto de la anomalía regional de gravedad, se obtuvo la anomalía gravimétrica residual (Figura 17). Los resultados muestran valores que varían entre -1.9 y 2.3 mGal, con una distribución irregular de máximos y mínimos gravimétricos a lo largo de LMS. Las zonas con los mayores contrastes entre anomalías positivas y negativas se concentran principalmente en el centro y el oriente de LMS, coincidiendo con áreas de convergencia entre el

sistema de fallas longitudinales (fallas Los Santos, La Chivatera, La Mojarra, Honda y Calaveras) y el sistema de fallas menores (Figura 17).

Figura 17.

Mapa del componente residual de la anomalía total de Bouguer para LMS



7.3 Modelado Gravimétrico de los Cortes Geológicos

Los modelos gravimétricos 2D fueron elaborados empleando el paquete de modelamiento GM-SYS del software Oasis Montaj (versión 9.6) de Seequent. En la Tabla 6 se encuentran los errores obtenidos para cada uno de los modelos gravimétricos asociados a los cortes geológicos evaluados. Considerando que el error corresponde a la diferencia, expresada en mGal, entre el

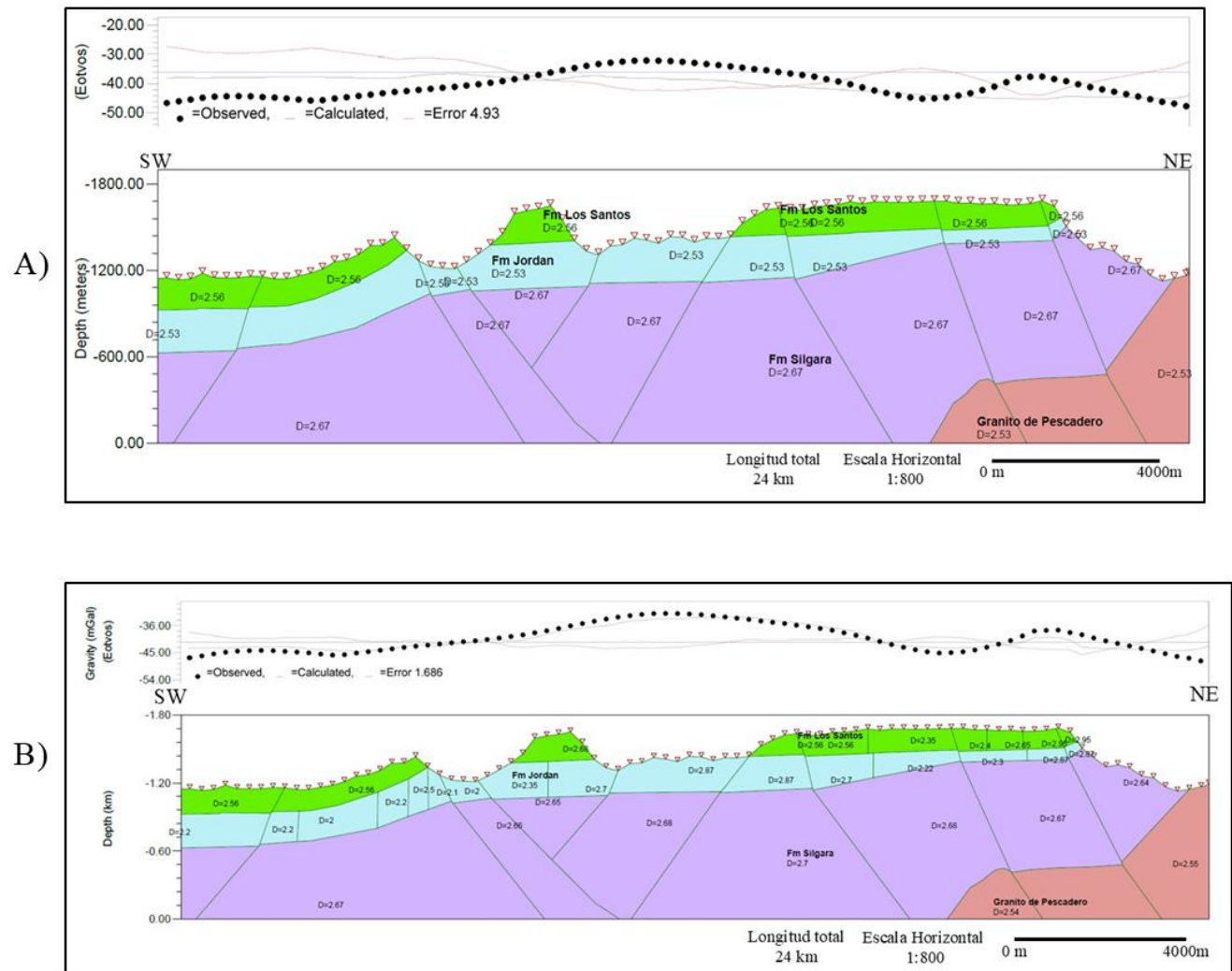
valor de la gravedad observado y el calculado para cada modelo. Todos los modelos gravimétricos son detallados en el Apéndice C.

Tabla 6

Error en mGal obtenido para cada uno de los modelos gravimétricos asociados a los cortes geológicos evaluados.

Modelos Gravimétricos	Error Anomalía Total BA [mGal]			
	Densidad Mínima	Densidad Máxima	Densidad Promedio	Variación lateral de densidad
Vargas 2008	8.174	5.236	4.93	1.686
INGEOMINAS UIS 2007d	9.817	6.51	5.451	4.509
García Arias et al 2024	10	5.634	8.175	4.172
LMS 3	11.375	6.593	8.143	1.756
INGEOMINAS UIS 2007b	8.101	5.396	3.522	3.054
Casadiegos 2023	8.804	5.093	5.027	4.942
Gómez y Cuervo 2012	11.391	6.236	6.436	6.161
LMS 2	10.406	8.122	7.386	7.215
LMS 1	10.412	3.543	5.615	5.142

A continuación, se presentan los modelos gravimétricos correspondientes a los escenarios con valor promedio de la densidad y con variación lateral de la densidad, considerando que estos son los modelos que registran el menor nivel de error. El corte de Vargas (2008) presenta, en el escenario con valor promedio de la densidad, un error de 4.93 mGal, mientras que el escenario con variación lateral de la densidad el error disminuye a 1.686 mGal (Figura 18).

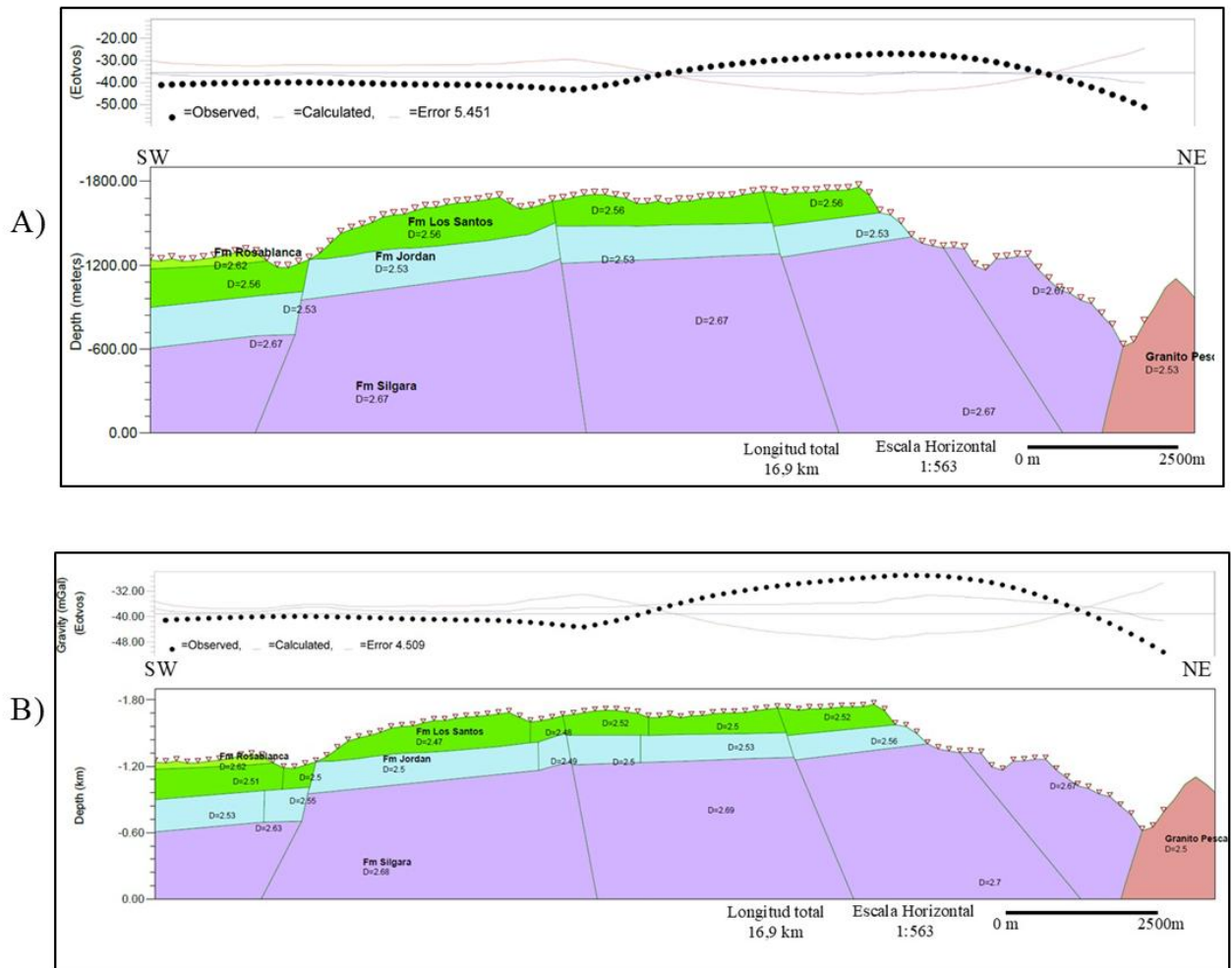
Figura 18.*Modelo gravimétrico del corte geológico Vargas (2008).*

Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 4.93 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 1.686 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte de INGEOMINAS-UIS (2007e) presenta un error de 5.451 mGal para el escenario con valor promedio de densidad y 4.509 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 19).

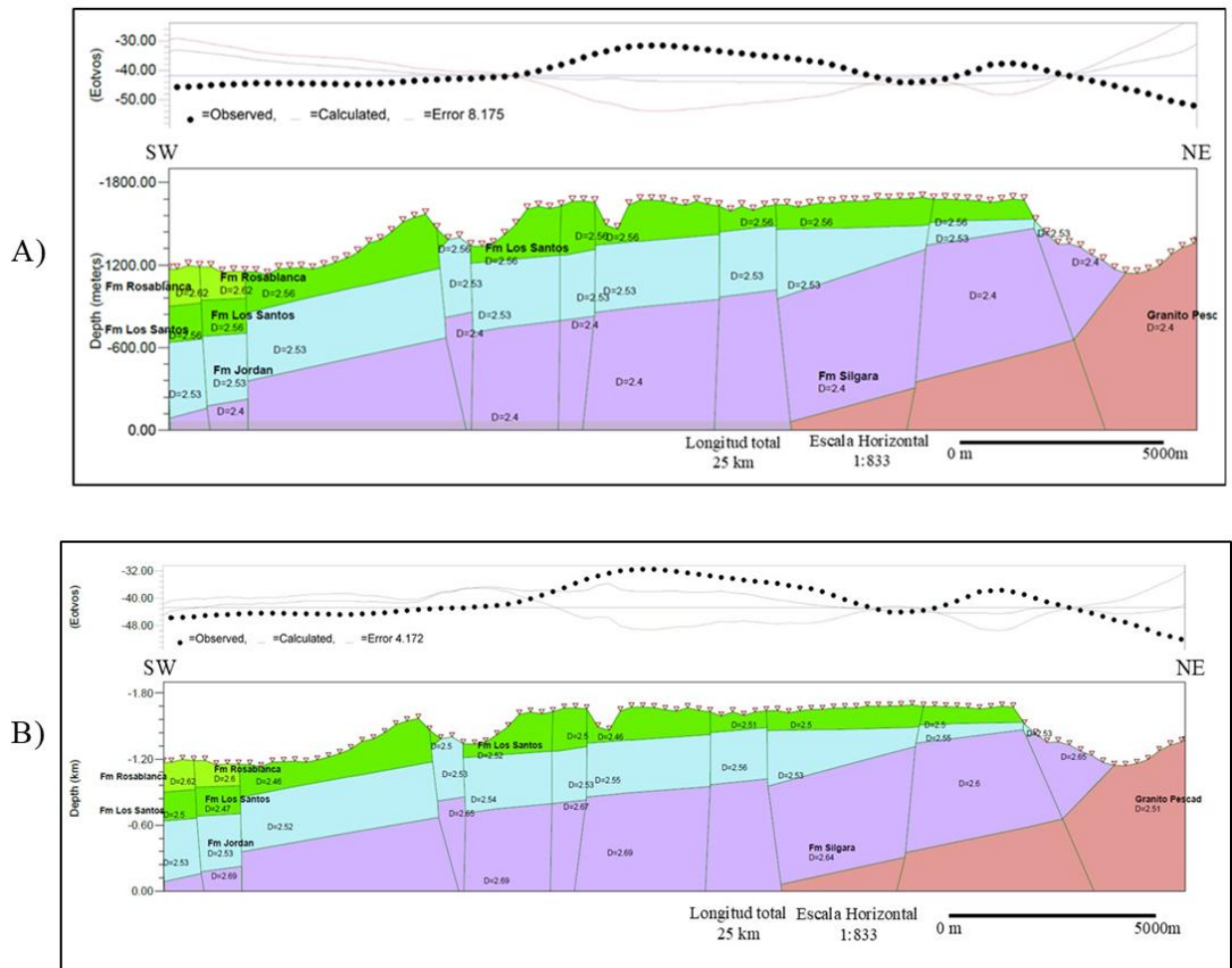
Figura 19.

Modelo gravimétrico del corte geológico INGEOMINAS-UIS (2007e).



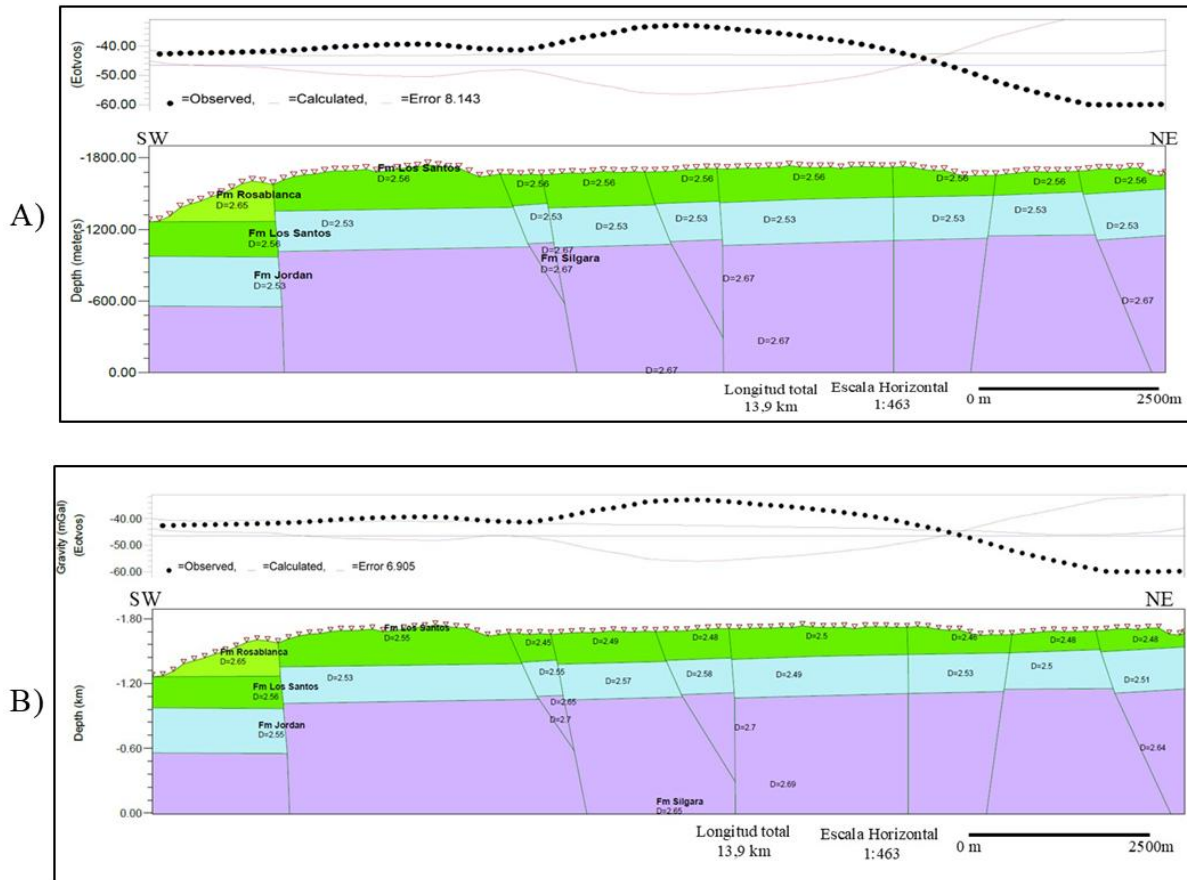
Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 5.451 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 4.509 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte de García-Arias et al. (2024) presenta, en el escenario con valor promedio de la densidad, un error de 8.175 mGal, mientras que en el escenario con variación lateral de la densidad el error disminuye a 4.172 mGal (Figura 20).

Figura 20.*Modelo gravimétrico del corte geológico García-Arias et al. (2024).*

Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 8.175 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 4.172 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte propuesto LMS3 muestra un error 8.143 mGal para el escenario con densidad promedio y de 6.905 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 21).

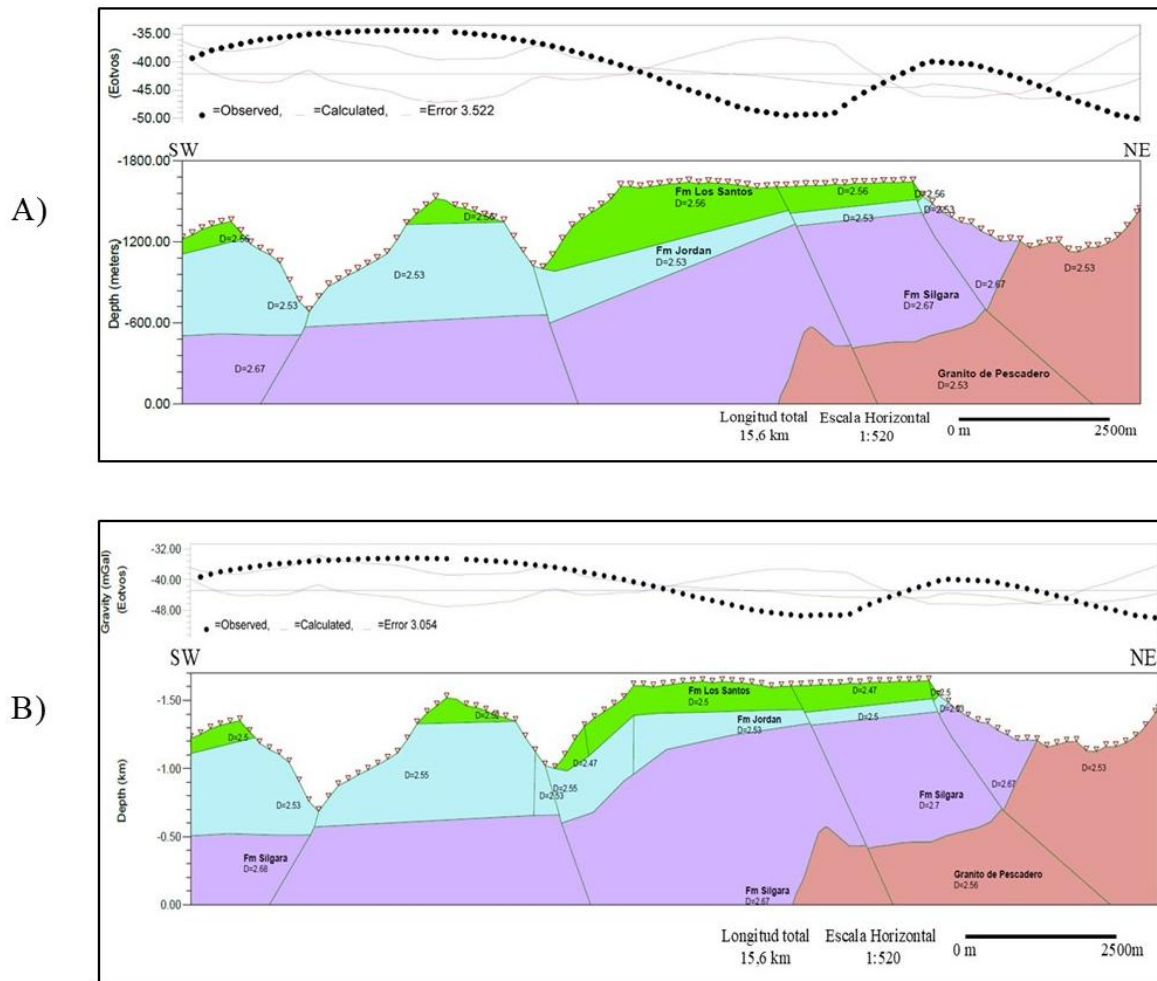
Figura 21.*Modelo gravimétrico LMS3.*

Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 8.143 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 6.905 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte de INGEOMINAS-UIS (2007b) muestra un error 3.522 mGal para el escenario con densidad promedio y de 3.054 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 22).

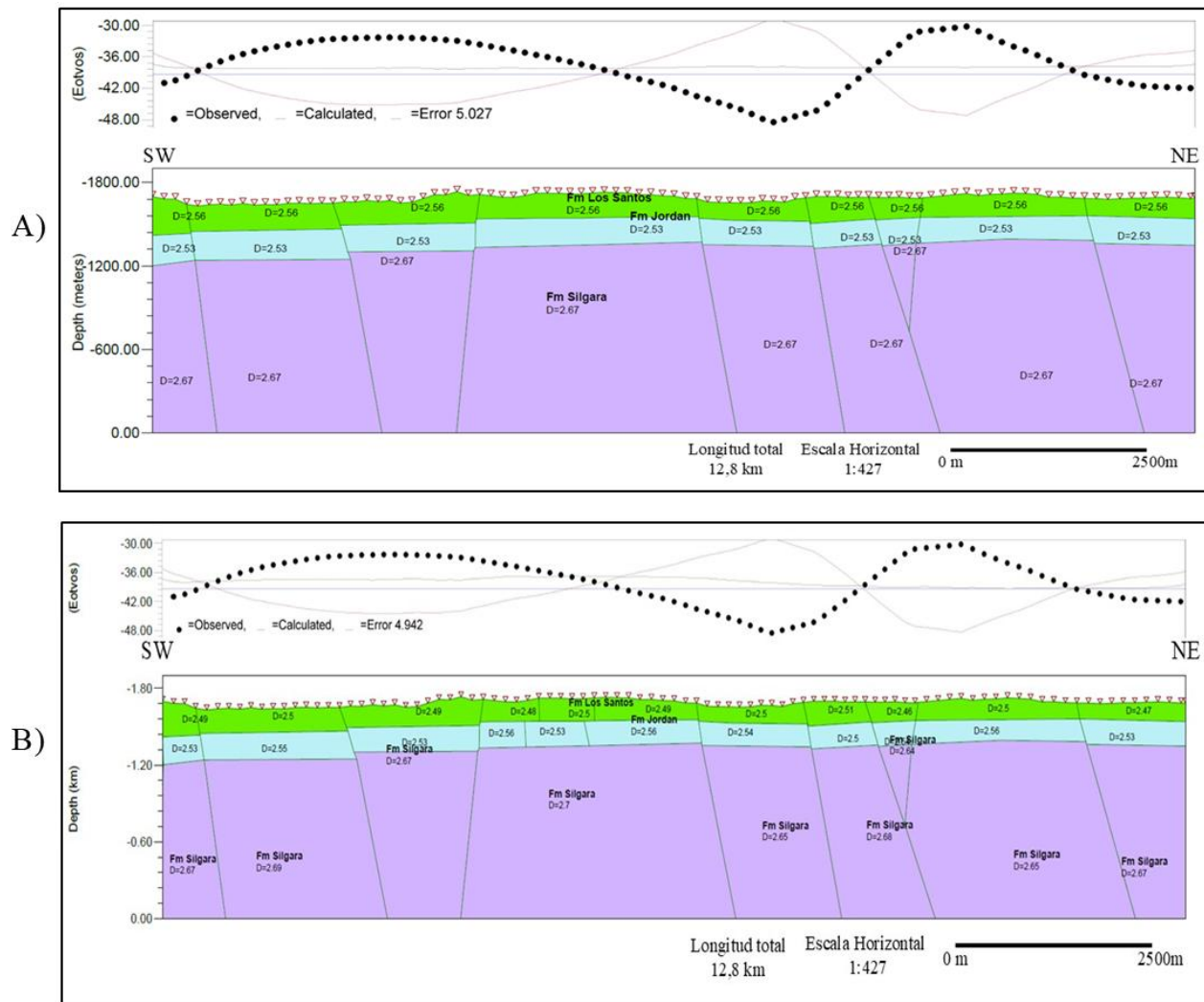
Figura 22.

Modelo gravimétrico del corte geológico INGEOMINAS-UIS (2007b).



Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 3.52 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 3.054 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte de Casadiegos (2023) muestra un error 5.027 mGal para el escenario con densidad promedio y de 4.942 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 23).

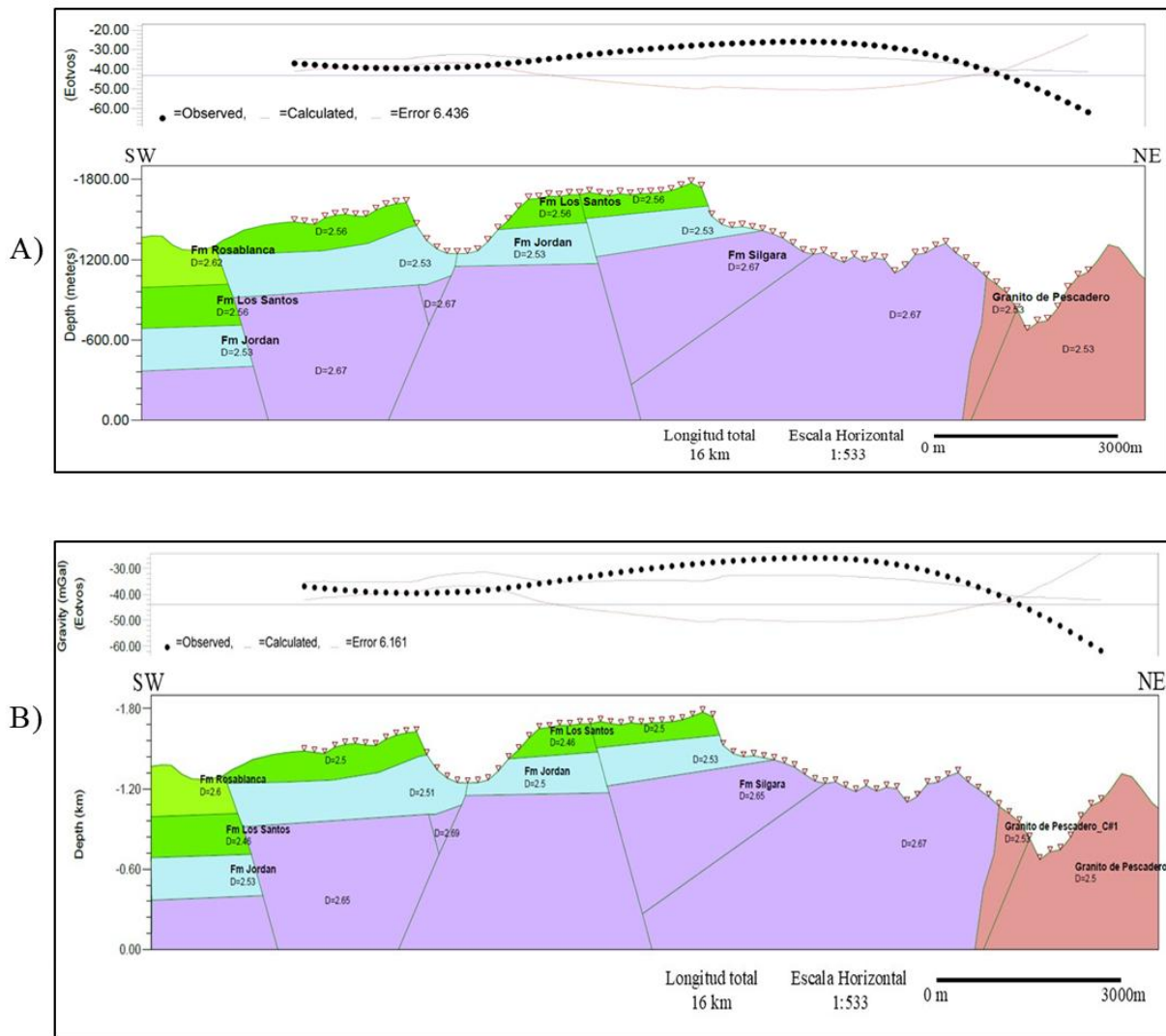
Figura 23.*Modelo gravimétrico del corte geológico Casadiegos (2023).*

Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 5.027 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 4.942 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte de Gómez & Cuervo (2012) muestra un error 6.436 mGal para el escenario con densidad promedio y de 6.161 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 24).

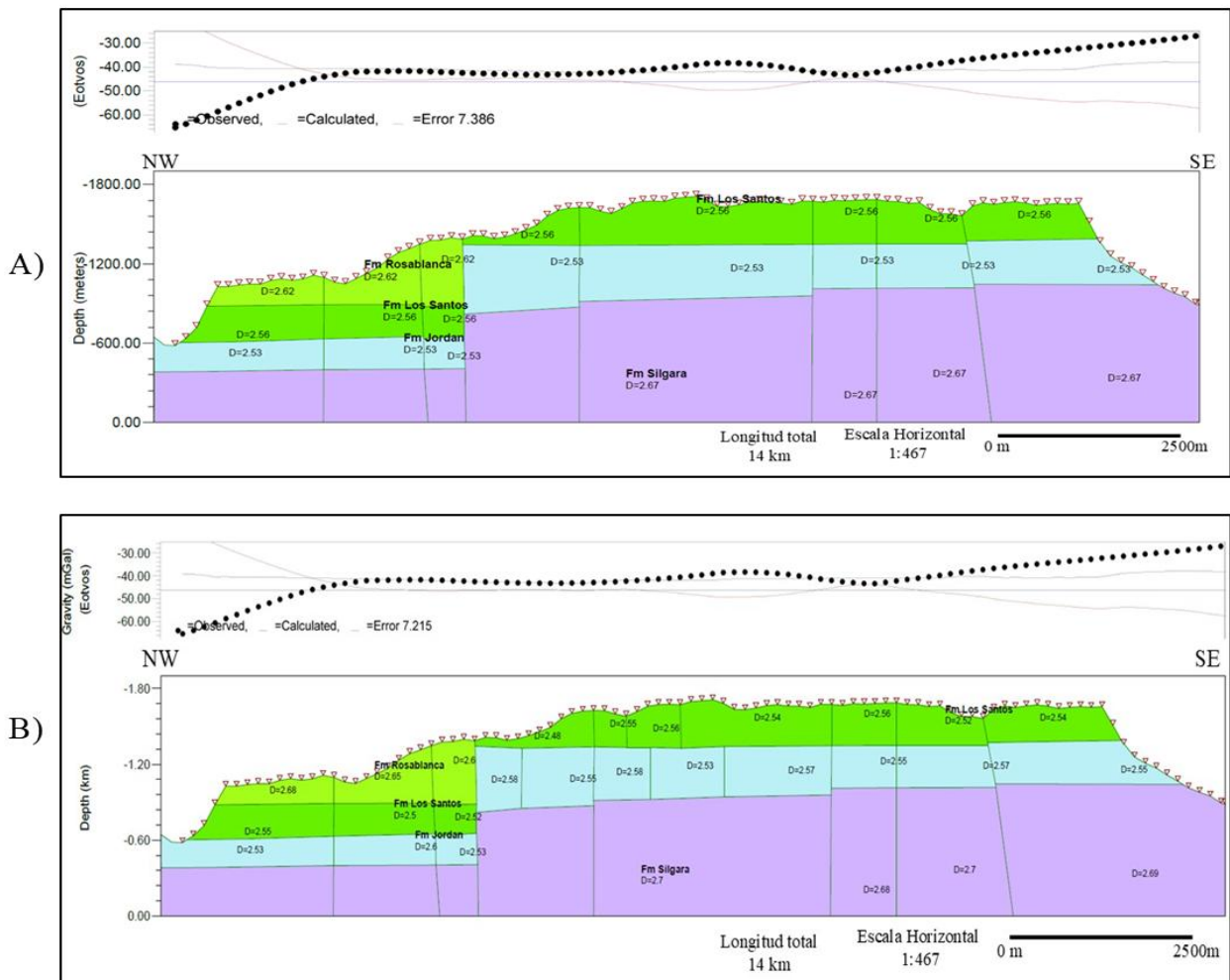
Figura 24.

Modelo gravimétrico del corte geológico Gómez & Cuervo (2012).



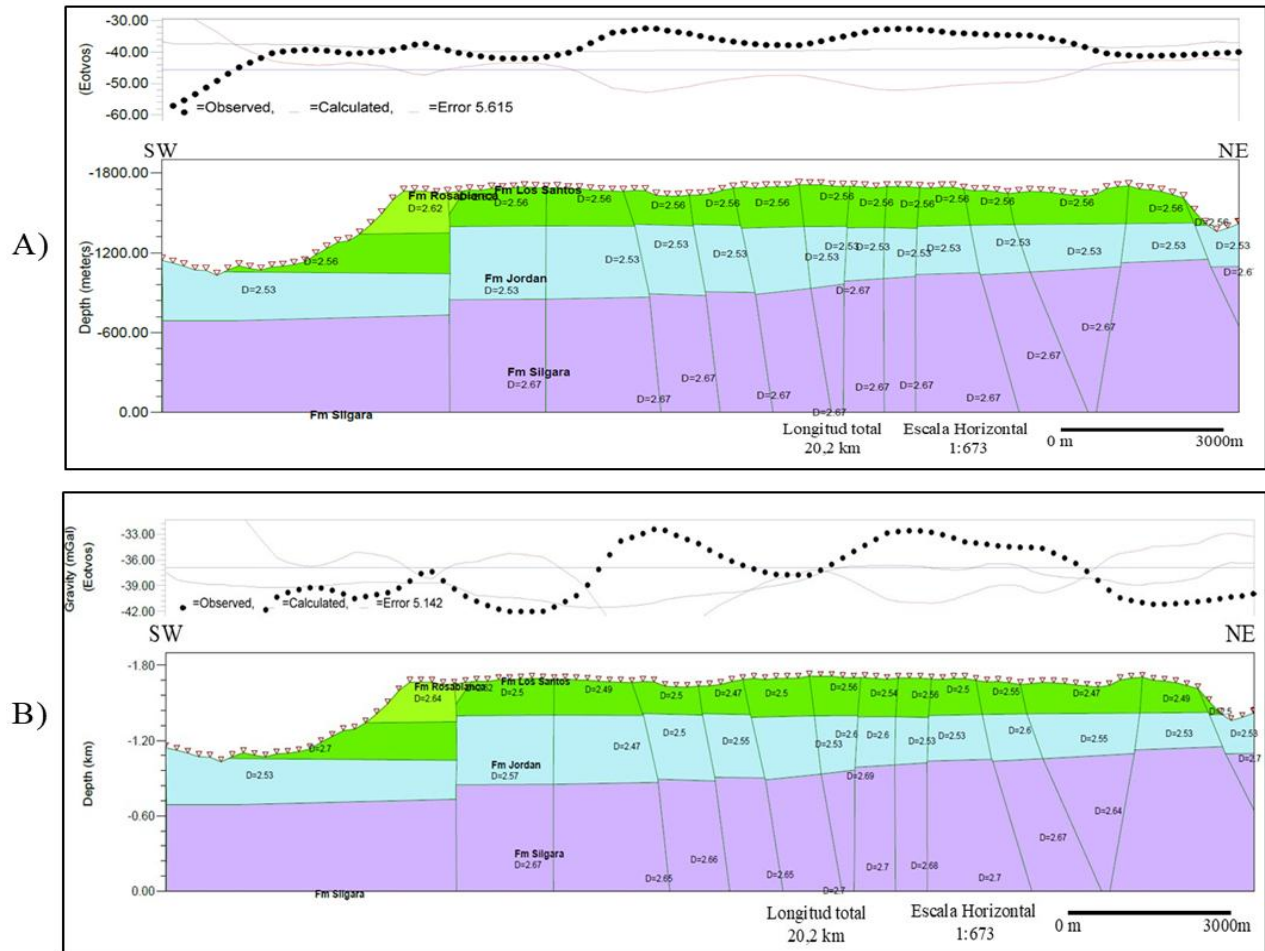
Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 6.436 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 6.161 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte propuesto LMS2 muestra un error 7.386 mGal para el escenario con densidad promedio y de 7.215 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 25).

Figura 25.*Modelo gravimétrico del corte geológico LMS2.*

Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 7.386 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 7.215 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

El corte propuesto LMS1 muestra un error 5.615 mGal para el escenario con densidad promedio y de 5.142 mGal para el escenario con variación lateral de la densidad (Figura 26).

Figura 26.*Modelo gravimétrico del corte geológico LMS1.*

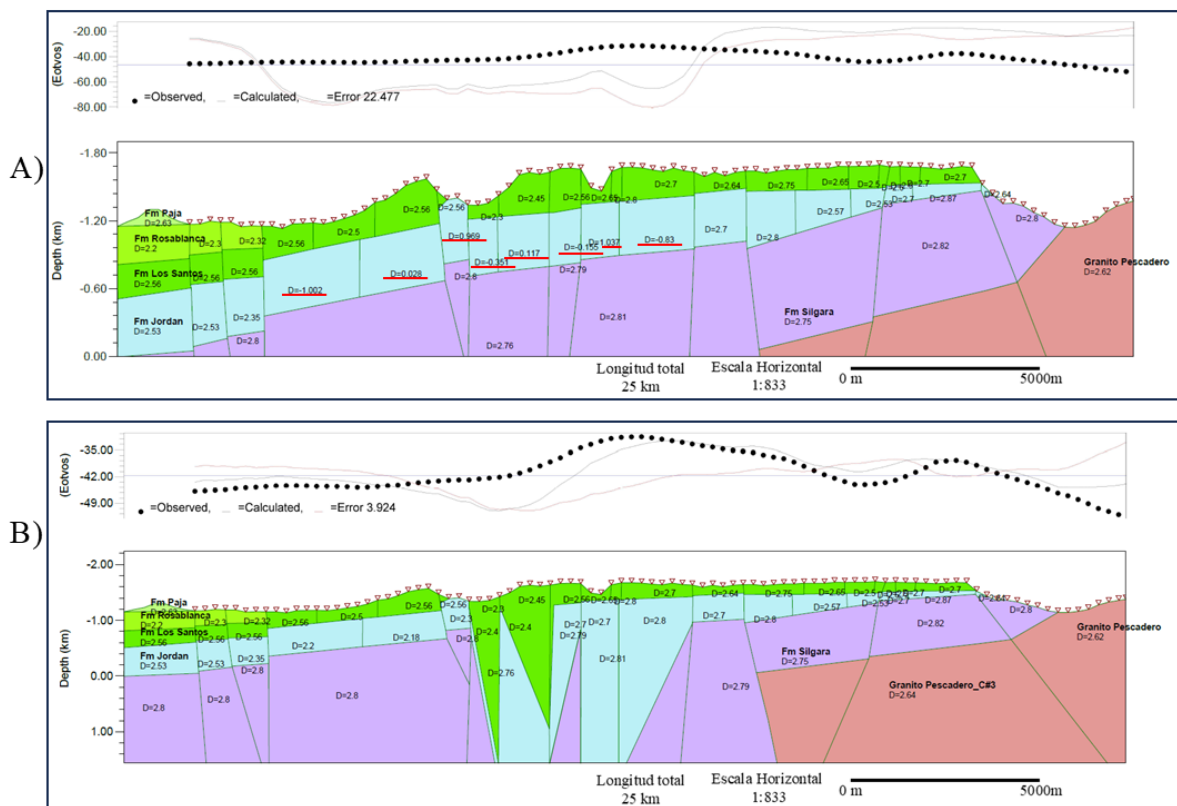
Nota A) modelo gravimétrico empleando valor promedio de la densidad con un error de 5.615 mGal y B) modelo gravimétrico empleando variación lateral para los valores de la densidad con un error de 5.142 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

Por último, se empleó el módulo de inversión 2D GMSYS desarrollado por Seequent, en los modelos con menor valor de error, para evaluar la posibilidad de sugerencias en los valores de la densidad o la distribución en profundidad de los bloques. Realizando la inversión para la densidad a partir del modelo del corte de García-Arias et al. (2024) con variación lateral de la

densidad (Figura 27A), fueron encontrados valores de densidad de 1.002 o 0.969 g/cm³ para la Formación Jordán, valores que no se encuentran ajustados a los valores medidos en laboratorio por García (2022), por esto no fueron considerados los resultados obtenidos de esta etapa y para la evaluación de la distribución en profundidad (Figura 27B), se encontraron espesores de hasta más de 1000 metros para la Formación Jordán. Estos resultados obtenidos en la inversión no son coherentes con las geometrías planteadas por los cortes geológicos y con la geología estructural de LMS, por este motivo tampoco fueron considerados estos resultados, para realizar consideraciones sobre los cortes geológicos evaluados.

Figura 27.

Resultados producto de la inversión para el modelo de García-Arias et al. (2024).



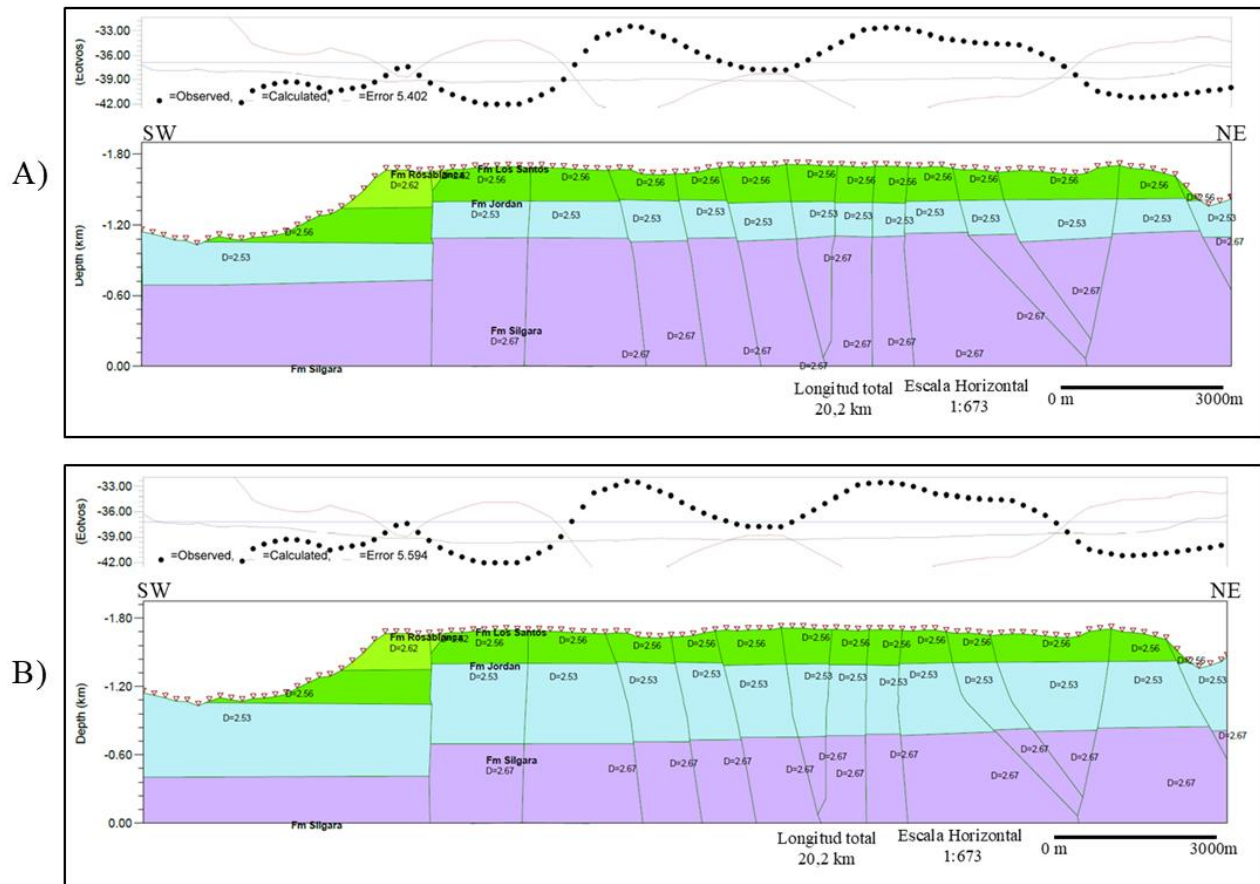
Nota A) Resultado de la inversión para los valores de densidad de la Formación Jordán y B)

Resultado de la inversión para la profundidad de algunos segmentos de la Formación Jordán.

Debido a que los resultados de la inversión iterativa de la densidad no aportan información concluyente para realizar consideraciones sobre los cortes geológicos, se evalúa el efecto del cambio en el espesor de las formaciones sedimentarias, empleando el valor mínimo de 300 metros (Figura 28A) y máximo de 600 metros para la Formación Jordán (Figura 28B) para el modelo LMS1 con valor promedio de la densidad, teniendo solo una diferencia en el error de 0.192 mGal entre los dos escenarios. De igual manera, se evaluó el efecto de reducir el ángulo de buzamiento de las fallas a 60° , siguiendo la propuesta presentada en los cortes de INGEOMINAS-UIS (2007b, 2007e) y Vargas (2008). Se encontró que, para el modelo LMS1 con variación lateral de densidad (Figura 29A), este cambio en el ángulo de buzamiento genera un incremento en el error en comparación con el modelo original con variación lateral de densidad, alcanzando un valor de 4.072 mGal (Figura 29B). Dado que la variación en el espesor no produjo diferencias significativas y que la reducción del ángulo de buzamiento de las fallas incrementó el error, estos escenarios no se evaluaron para los modelos LMS2 y LMS3.

Figura 28.

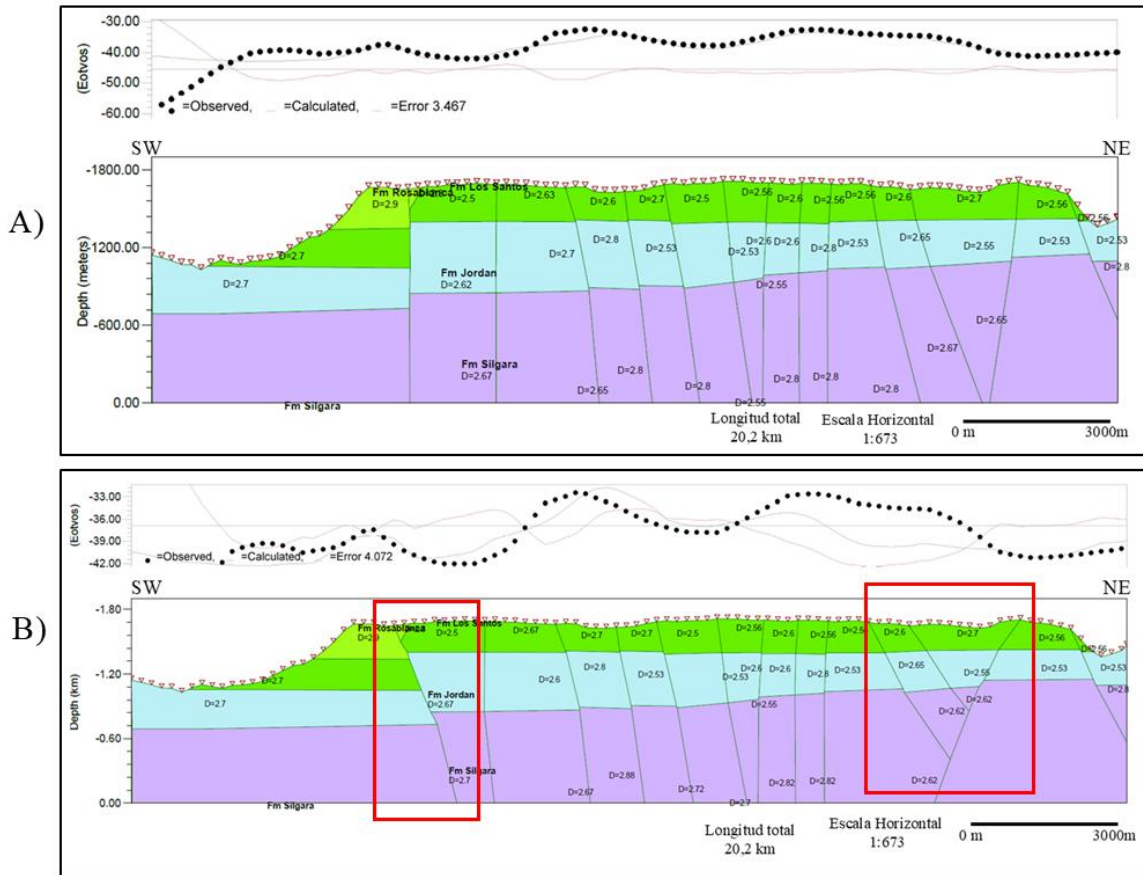
Comparación entre modelos gravimétricos LMS1 con densidad promedio y cambios de espesor.



Nota A) modelo gravimétrico LMS1 con espesor de 300 metros para la formación Jordán, con un error de 5.402 mGal y B) modelo gravimétrico LMS1 con espesor de 600 metros para la formación Jordán, con un error de 5.594 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

Figura 29.

Comparación modelos gravimétricos LMS 1 con cambio en el ángulo de inclinación de las principales fallas.



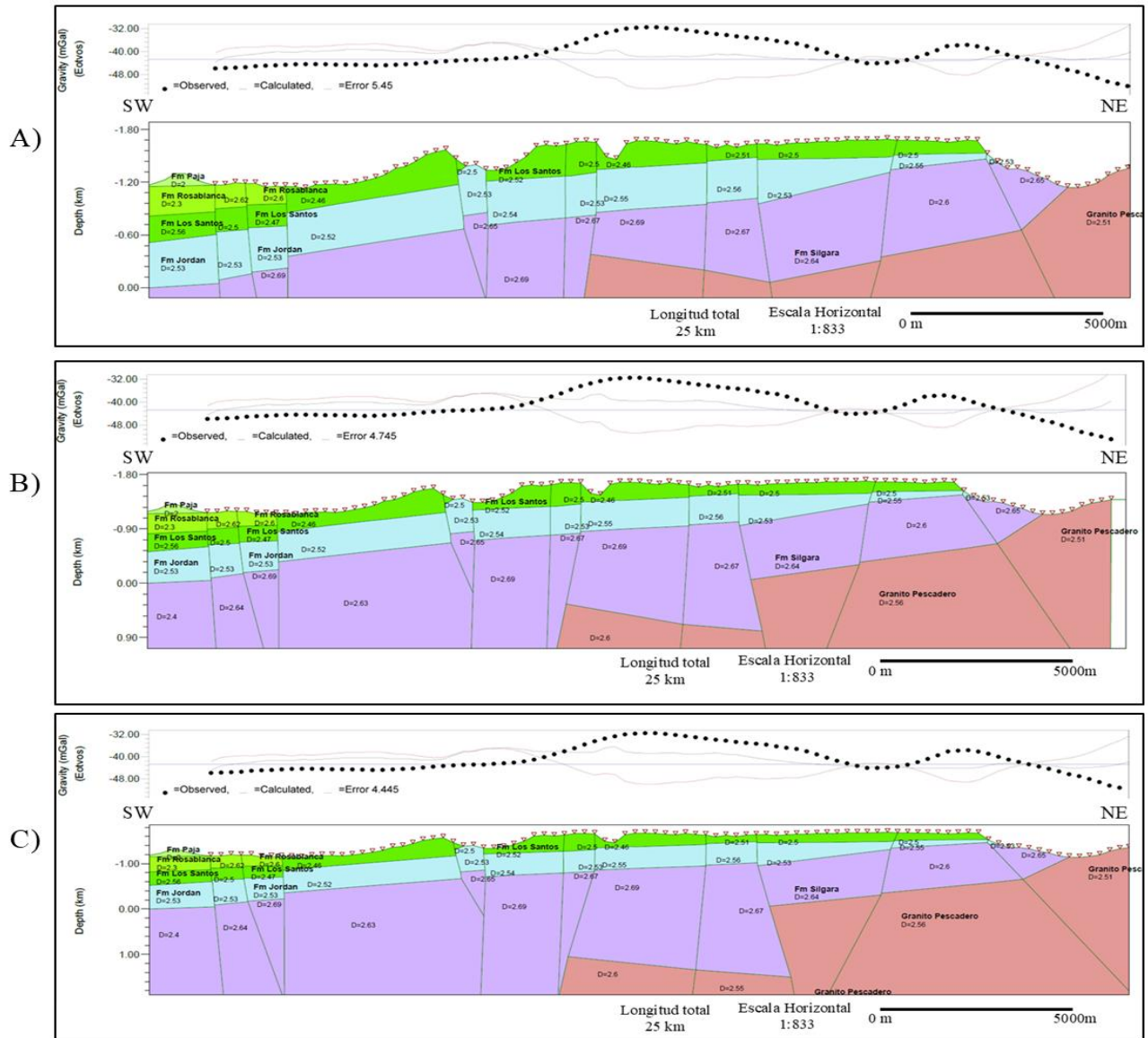
Nota A) Modelo gravimétrico LMS1 con variación lateral de la densidad, con un error de 3.467 mGal B) Modelo gravimétrico LMS1 con variación lateral de la densidad y un ángulo de 60° para las principales fallas (recuadro rojo), con un error de 4.072 mGal. Elaborado con Oasis Montaj 9.6.

Por último, fue realizada la consideración para el efecto de posibles cuerpos intrusivos (Figura 30), donde se consideraron tres escenarios, de acuerdo con la profundidad del cuerpo intrusivo: intrusivo somero a 0 m de profundidad (Figura 30A), intrusivo medio a 500 m de

profundidad (Figura 30B) e intrusivo profundo a 1.5 km de profundidad (Figura 30C). Evidenciando que los tres escenarios presentan desajuste, aumentando el error en comparación con el modelo de García-Arias et al. (2024).

Figura 30.

Modelos gravimétricos considerando el escenario para un cuerpo intrusivo.



Nota Modelos gravimétricos a partir del corte geológico García-Arias et al. (2024), para los escenarios: A) un cuerpo intrusivo somero, B) un cuerpo intrusivo medio y C) un cuerpo intrusivo.

8. Discusión

Considerando la anomalía total de Bouguer calculada conformada por los componentes residual y regional, la respuesta de los modelos gravimétricos de los cortes geológicos evaluados y la geología de LMS, es posible establecer una correlación para las fuentes de las diferentes anomalías gravimétricas en LMS. La anomalía regional varía entre -62.2 y -20.4 mGal. Los valores de la anomalía regional son coherentes con los valores esperados entre -20 y -60 mGal para la respuesta al contraste de densidad entre un basamento metamórfico y unidades sedimentarias (Abdullahi, 2014; Hinze W et al., 2013). La distribución heterogénea de la anomalía regional en LMS puede estar asociada principalmente a dos factores. En primer lugar, a la complejidad estructural y la naturaleza heterogénea del basamento metamórfico, representado por la unidad Esquistos del Silgará, compuesta por filitas, metalimolitas y metarenisca. En este sentido, García (2022) reporta para LMS variaciones en la densidad entre 2.44 y 2.80 g/cm³ para los Esquistos del Silgará, valores que se encuentran dentro del rango medio típico para este tipo de roca, el cual suele oscilar entre 2.5 a 3.0 g/cm³ (Schön, 2011). La segunda causa se relaciona con la acción de la unidad intrusiva Granito de Pescadero, la cual tiene una distribución irregular y no se tiene información en profundidad de la misma.

Por su parte, la anomalía residual varía entre -1.9 y 2.3 mGal, presentando una distribución irregular de máximos y mínimos gravimétricos a lo largo de la Mesa de Los Santos. Este rango de valores es consistente con anomalías generadas por contrastes de densidad asociados a unidades sedimentarias de pocos kilómetros de espesor (Abdullahi, 2014; Hinze W et al., 2013; Telford W et al., 1990).

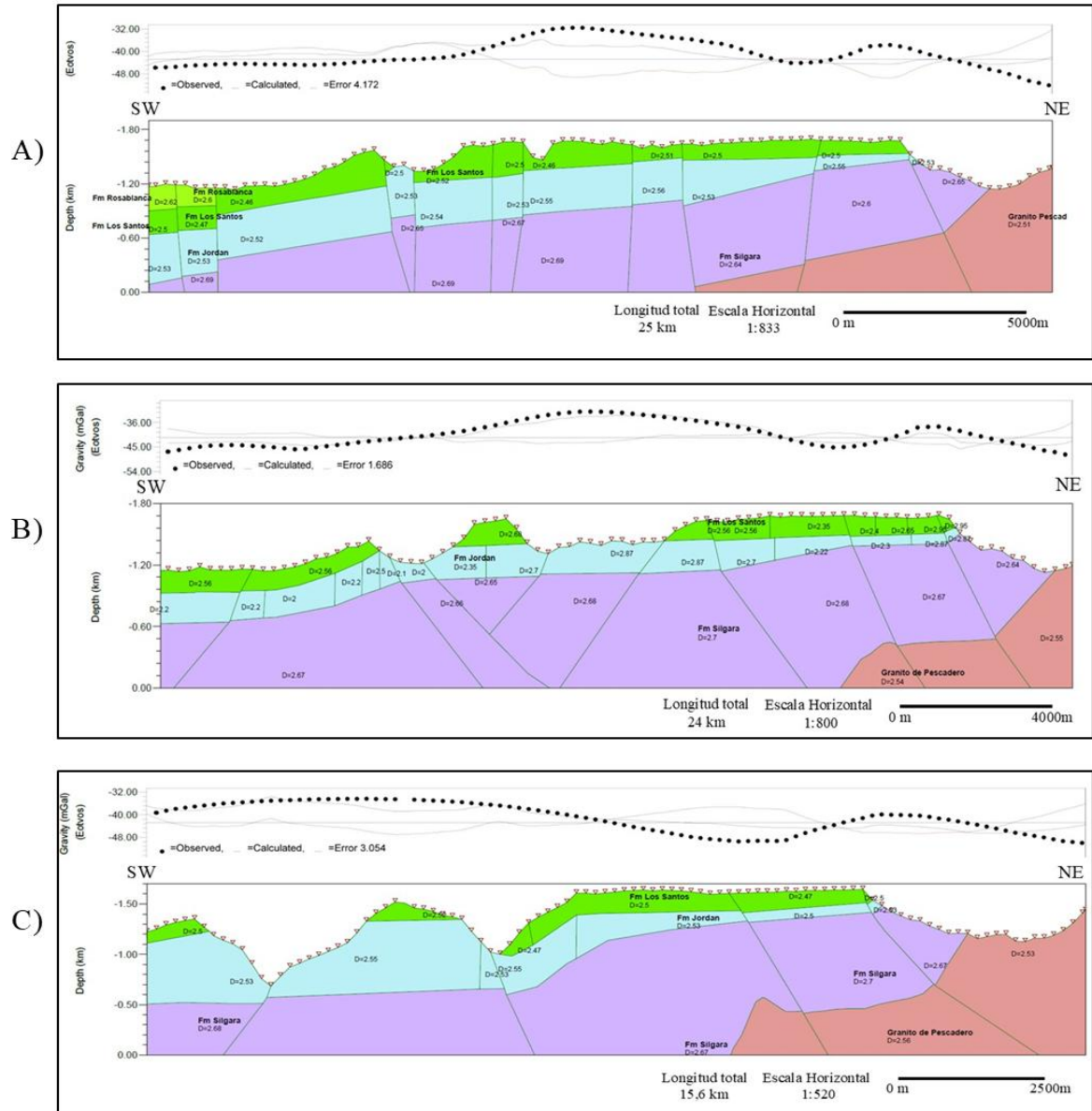
Como se vio en la sección 7.3, se evaluaron 6 cortes geológicos seleccionados de la bibliografía y 3 cortes propuestos en este trabajo. Cada uno de estos fue analizado para los escenarios con mayor densidad, menor densidad, densidad promedio y con variación lateral de la densidad. Encontrando que el error asociado a los modelos gravimétricos puede variar desde 0.64 hasta 11.37 mGal. Comparando el grado de ajuste entre los cortes geológicos evaluados, se observa que los modelos con variación lateral de densidad presentan el menor nivel de error. Esto indica que la distribución de densidades no es homogénea a lo largo de los perfiles y que las heterogeneidades laterales desempeñan un papel significativo en la respuesta gravimétrica.

De los modelos gravimétricos con variación lateral de densidad, los correspondientes a los cortes de García-Arias et al. (2024), Vargas (2008) e INGEOMINAS-UIS (2007e) son los que registran los menores valores de error. Al realizar la inversión con ayuda del módulo de gravimetría del software Oasis Montaj, para obtener consideraciones para la distribución de la densidad y de la geometría de las unidades en profundidad, no se obtuvieron resultados coherentes con la configuración geológica de LMS. Por lo tanto, no fueron considerados los resultados de estas inversiones dentro de los modelos gravimétricos evaluados.

Los cortes geológicos evaluados, aunque desarrollados a diferentes escalas, coinciden en la ubicación del basamento metamórfico y en la presencia de una secuencia sedimentaria suprayacente de un espesor aproximado de 1 km. De acuerdo a los resultados de los modelos gravimétricos de García-Arias et al. (2024), Vargas (2008) e INGEOMINAS-UIS (2007b, 2007e) se puede considerar que las fallas en la LMS tienen un alto ángulo de buzamiento y que el intrusivo Granito de Pescadero tiene una influencia considerable en la zona N-E (Figura 31).

Figura 31.

Modelos gravimétricos con variación lateral de la densidad considerados para los ajustes del nuevo modelo gravimétrico para LMS.



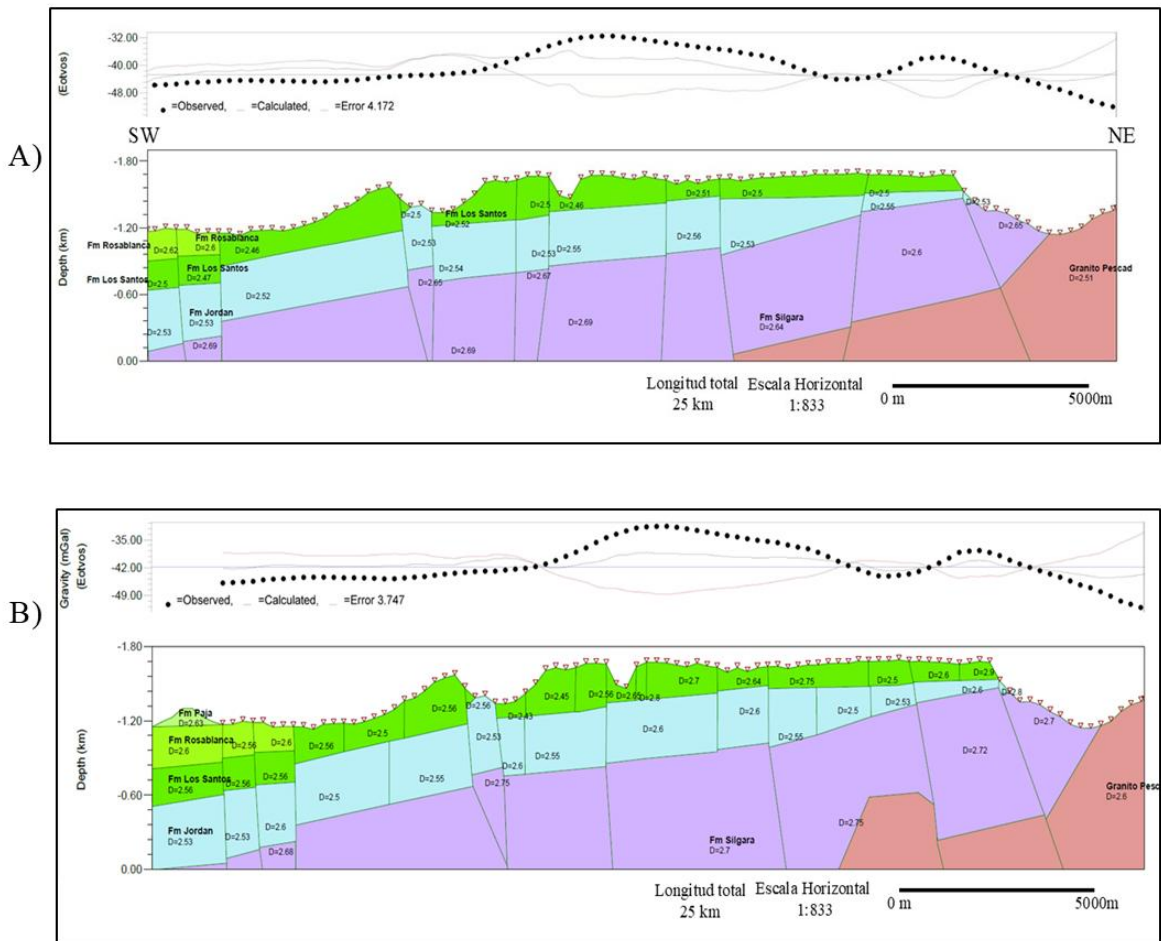
Nota A) García-Arias et al. (2024). B) Vargas (2008) y C) INGEOMINAS-UIS (2007b).

Basados en las respuestas de los modelos gravimétricos evaluados, la geología estructural y estratigrafía de LMS, es propuesto un modelo gravimétrico ajustado para LMS del corte de

García-Arias et al. (2024) (Figura 32A y B), considerando que esta zona tiene la mayor información en cuanto a estudios previos. Los ajustes están relacionados a la distribución de la unidad intrusiva Granito de Pescadero y a la geometría de las fallas El Aljibe, Honda y Lejía. Mientras que el modelo gravimétrico para el corte de García-Arias et al. (2024) presenta un error de 1.341 mGal (Figura 32A), el modelo ajustado (Figura 32B) tiene un error de 0.808 mGal.

Figura 32.

Modelo gravimétrico ajustado para LMS

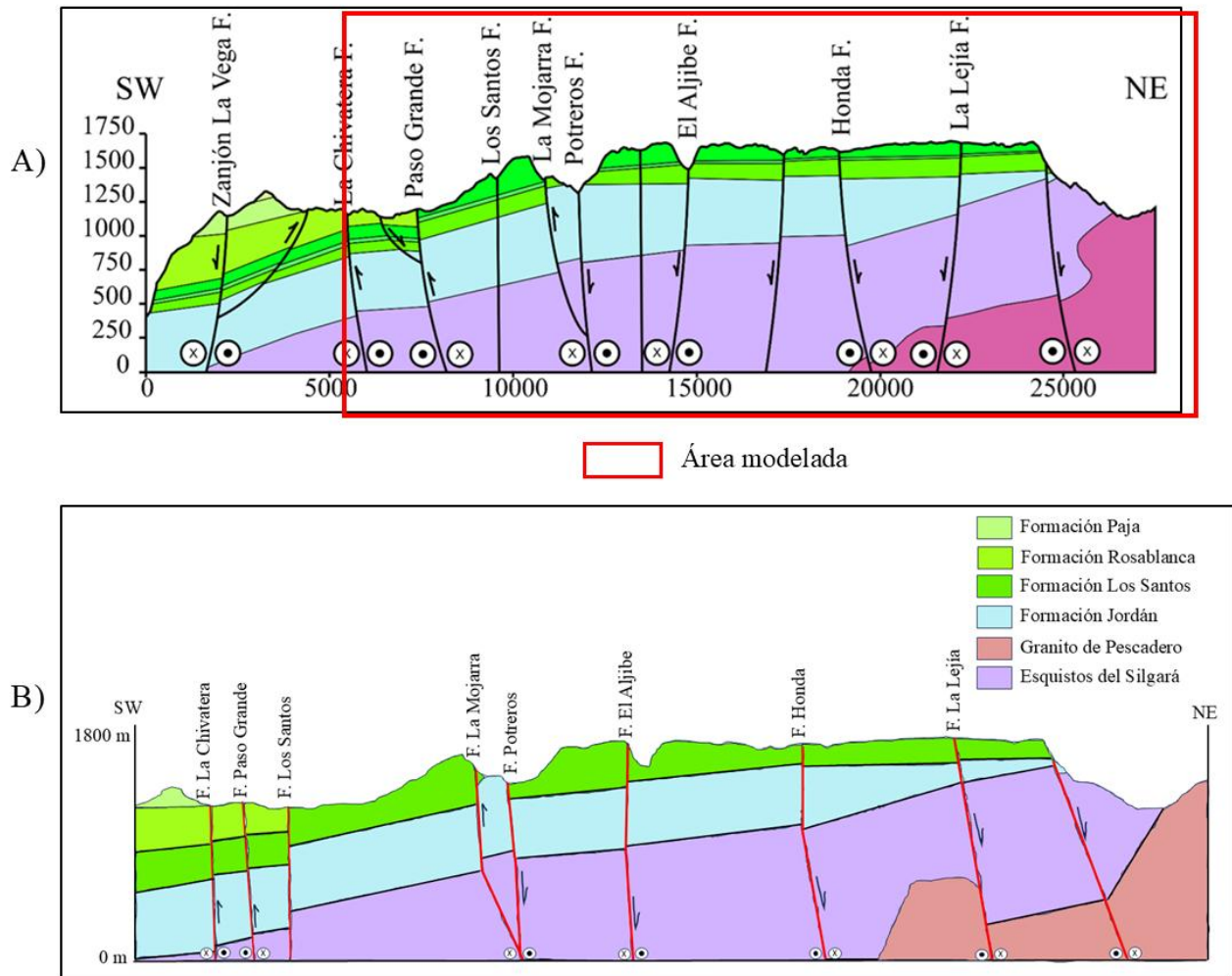


Nota A) Modelo con variación lateral de la densidad de García-Arias et al. (2024) y B) Modelo gravimétrico ajustado para LMS, a partir de las consideraciones estructurales, estratigráficas y de la respuesta de la anomalía gravimétrica calculada.

A partir de los ajustes realizados al modelo gravimétrico de LMS (Figura 32B), es propuesto el corte geológico de la Figura 33B, con ajustes que están relacionados a la geometría de las fallas, considerando que el modelo gravimétrico ajustado (Figura 32B) permite considerar que las fallas tienen un alto grado de buzamiento. La cinemática de las fallas sigue la propuesta por García-Arias et al. (2024), teniendo para las fallas La Lejía, Honda, El Aljibe y Potreros un componente de tipo normal, mientras que las fallas Paso Grande y La Chivatera tienen un componente de tipo inverso. También es posible considerar que la intrusión ígnea de la unidad Granito de Pescadero se encuentra ubicada a una menor profundidad de la considerada por todos los cortes propuestos para LMS.

Figura 33.

Comparación entre corte geológico García-Arias et al. (2024) y corte geológico propuesto a partir del modelo gravimétrico ajustado.



Nota A) Corte geológico de García-Arias et al. (2024) y B) Corte geológico propuesto para LMS a partir de las consideraciones de la respuesta de la anomalía de Bouguer calculada para el modelo gravimétrico ajustado. La cinemática de las fallas fue tomada de García-Arias et al. (2024).

9. Conclusiones

- El análisis comparativo de los 15 cortes geológicos propuestos hasta la fecha para LMS evidencia que, pese a las múltiples interpretaciones, estas coinciden en la configuración estratigráfica regional, caracterizada por un basamento metamórfico sobre el cual se dispone una secuencia sedimentaria. Sin embargo, las principales diferencias entre los cortes radican en la geometría en profundidad de las unidades y en la interpretación del estilo estructural, particularmente en la disposición y el ángulo de buzamiento de las fallas. Los cortes propuestos por García-Arias et al. (2024), Casadiegos (2023), Gómez & Cuervo (2012), Vargas (2008), INGEOMINAS-UIS (2007b) y INGEOMINAS-UIS (2007e) presentan la mayor cantidad de información en relación a la geología estructural, estratigrafía y geometría en profundidad de las unidades geológicas. En particular, García-Arias et al (2024) analizaron la relación entre la geología estructural y el flujo potencial del fluido; Casadiegos (2023) propuso un modelo hidrogeológico conceptual preliminar para LMS; Gómez & Cuervo (2012) realizaron una síntesis de la cartografía a escala 1:25.000; Vargas (2008) describió las características geológicas, con énfasis en el control estructural de LMS; y, finalmente, INGEOMINAS-UIS (2007b) e INGEOMINAS-UIS (2007e) desarrollaron cartografía geológica detallada a escala 1:25.000 para LMS.

- La anomalía total de Bouguer obtenida a partir de los datos gravimétricos registrados en campo presenta valores que oscilan entre -62.5 y -19.9 mGal. Estos resultados, en conjunto con los bajos valores de error registrados en los modelos gravimétricos que incorporan variación lateral de densidad (≤ 1.9 , 0.9 y 0.64 mGal), evidencian una adecuada correspondencia entre el campo gravimétrico observado y la respuesta modelada

- Los resultados obtenidos a partir de la inversión 2D automática disponible en el software no resultaron coherentes desde el punto de vista geológico. Por esta razón, se desarrollaron modelos alternativos que incorporan variaciones en el espesor de la Formación Jordán (Figura 28 A y B) y un cambio en el ángulo de buzamiento de las fallas a 60° (Figura 29B), con el fin de evaluar el efecto de estos ajustes en la respuesta gravimétrica. Para el modelo con menor espesor de la Formación Jordán (Figura 28A) se obtuvo un error de 5.402 mGal; para el modelo con mayor espesor (Figura 28B), un error de 5.594 mGal; y para el modelo con el ángulo de buzamiento modificado (Figura 29B), un error de 4.072 mGal.

- Considerando el incremento en el error obtenido para el modelo gravimétrico LMS1 al reducir el ángulo de buzamiento de las fallas a 60° (Figura 29), se infiere que las fallas geológicas en LMS presentan, en general, altos ángulos de buzamiento.

- Se ajustó del corte de García-Arias et al. (2024) la geometría de la unidad intrusiva Granito de Pescadero, para el sector N-E, siendo más acorde a la propuesta por Vargas (2008) e (INGEOMINAS-UIS, 2007b) considerando el bajo error obtenido de sus modelos gravimétricos y se puede considerar a una menor profundidad de la planteada por estos autores, según el modelo gravimétrico ajustado (Figura 32B).

10. Recomendaciones.

Para futuras campañas gravimétricas o etapas de refinamiento, se recomienda la intensificación del muestreo en las áreas donde el campo residual presenta gradientes más pronunciados (identificados en la Figura 17), tales como:

- El flanco noreste del área de estudio, donde convergen varias fallas de rumbo.
- El corredor central con orientación W-E, donde se evidencian contrastes bruscos en las densidades.
- El sector oriental, en contacto con el Granito de Pescadero, cuya heterogeneidad interna podría generar variaciones locales significativas.
- Para el caso sur se evidencia ausencia de información y se recomienda aumentar los puntos

Para los anteriores sectores, se podría considerar una malla con espaciamiento de 300 a 500 m entre puntos gravimétricos, y en el caso de los perfiles LMS1, LMS2 y LMS3, intervalos de 150 a 250 m a lo largo del trazo lo que permitiría mejorar la resolución espacial, disminuir la no unicidad de los modelos y refinar la correlación entre las anomalías gravimétricas y las estructuras geológicas.

Con el objetivo de mejorar el conocimiento de la distribución en profundidad de las unidades geológicas, se recomienda emplear sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo y/o magnetotelúrica para la estimación de los espesores de las unidades geológicas.

Referencias Bibliográficas.

- Abdullahi, M. (2014). *Gravity Anomaly and Basement Estimation Using Spectral Analysis*. IntechOpen.
- Alcaldía Municipio Los Santos. (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial de Los Santos*.
- Aldana, C. (2008). *Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones de la Navarra y El Calicho en la Mesa de los Santos*. 29.
- Arguello, A. S., Becerra, N., Herrera, L. Y., & Avellaneda, F. (2018). *Estudio del recurso hídrico subterráneo en la zona sur occidental del municipio de Los Santos, Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Arguello, C., & Guerrero, J. (2015). *Estratigrafía De La Formación Jordán Entre El Municipio De Piedecuesta Y La Punta De La Mesa De Los Santos, Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Becerra, N., & Parra, C. (2016). Balance Hídrico para Estimar Recarga Potencial en la Mesa de los Santos y Dirección de Flujo de Agua Subterranea. *UIS*, 31–48.
- Briggs, I. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39, 39–48.
- Casadiegos, L. (2023). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos, Mesa de los Santos - Santander (Colombia)*. Universidad Industrial de Santander.
- Castaing, C., & Debeglia, N. (1992). *A new method for combining gravimetric and geological data*. 151–162.

- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*.
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block. In: Bartolini, C., Buffler, T., Blickwede, J. (Eds.), The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics. *AAPG Memoir*, 815–848.
- Contreras, N. M. (2008). Análisis del Fracturamiento Presente en la Formación Los Santos al Noreste y Centro de la Mesa de los Santos, Departamento de Santander. *Tesis UIS*, 11(75), 23–26.
- http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2020.pdf
<http://revistas.ucm.es/index.php/CUTS/article/view/44540/44554>
- Díaz, A. J., & Duarte, A. F. (2019). *Evaluación geofísica en rocas cretácicas sedimentarias de los municipios de Barichara, Mogotes y el sector conocido como la Mesa de Los Santos en el departamento de Santander, mediante sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y sondeos eléctricos verticales (SEV)*. Universidad Industrial de Santander.
- García, S. (2022). *Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de las propiedades físicas de la roca*. Universidad Industrial de Santander .
- García, S., & Gómez, E. (2015). Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos-Santander, Colombia. En *UIS: Vol. II*. Universidad Industrial de Santander.

- García-Arias, S., Velandia, F., Alvarez, A., Sanabria-Gómez, J., Tarazona, Y., & Vargas, M. (2024). Stress tensors and quantification of fracture patterns to analyze connectivity and potential fluid flow in a mesa landform of the Northern Andes. *Journal of Mountain Science*.
- Gómez, J., & Cuervo, R. (2012). *Estudio Geológico enfocado en la caracterización paisajística de la Mesa de Los Santos, Santander, Colombia*. Universidad Industrial de Santander.
- Gordillo, O. (2014). *Levantamiento de Datos Tectónico - Estructural del Borde Oriental de la Cuenca de la Loja, Zona Sur Oriental*. Universidad Católica de Loja.
- Hincapié, G., & Veloza, J. (2009). Informe Hidrogeológico de la Mesa de Los Santos. *INGEOMINAS*.
- Hinze, W. J. (2003). Bouguer reduction density, why 2.67? *GEOPHYSICS*, 68(5).
- Hinze W, Von Frese R, & Saad A. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- IGME. (2007). Informe de los trabajos de gravimetría en el maestrazgo para el proyecto Hiproma. *Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*.
- IGME. (2009). Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1:50.000. Aplicación a la modelización 2D y 3D en varias zonas de la Península Ibérica. *Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*, 1–13.
- INGEOMINAS. (2007). Memoria explicativa investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de los Santos y sector nordeste de Curití. *INGEOMINAS*.
- INGEOMINAS. (2009). *Informe Hidrogeológico de la Mesa de los Santos*. 75.
- INGEOMINAS. (2010a). Exploración de aguas subterráneas en la región central de Santander.

INGEOMINAS. (2010b). *Integración Geológica E Hidrogeológica Del Centro De Santander*.

INGEOMINAS. (2010c). Memoria integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS. (2010d). Prospección geoeléctrica en La Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e interpretación de sondeos eléctricos verticales. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS. (2010e). Síntesis exploración de aguas subterráneas en la región central de Santander. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007a). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 120-IV-A. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007b). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 120-IV-B. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007c). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 120-IV-C. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007d). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 120-IV-D. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007e). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 120-IV-D. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007f). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 135-II-A. *INGEOMINAS*.

INGEOMINAS-UIS. (2007g). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 135-II-B. *INGEOMINAS*.

- INGEOMINAS-UIS. (2007h). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 135-II-D. *INGEOMINAS*.
- INGEOMINAS-UIS. (2007i). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 135-IV-B. *INGEOMINAS*.
- INGEOMINAS-UIS. (2007j). Mapa geológico de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander Plancha 136-I-C. *INGEOMINAS*.
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de las mesas al SW de Bucaramanga . *Boletín De Geología*, 7–43.
- Julivert, M., Barrero, D., & Navas G., J. (1964). Geología de la Mesa de Los Santos. *Boletín de Geología*, 18, 5–11.
- Kane, M. F. (1962). A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics*.
- Long, L., & Kaufmann, R. (2013). *Acquisition and analysis of terrestrial gravity data*. Cambridge University Press.
- Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., & Valencia, V. A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada ‘Formación Silgará’ (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38, 33–50.
- Martínez, P. (2014). *Prospección Geofísica - Métodos de Campo Natural* (Universidad Politécnica de Cartagena, Ed.).

- Moreno, J. A., & Zárate Martínez, P. S. (2023). *Caracterización de perfiles de meteorización del miembro superior de la Formación Los Santos y su correlación mediante modelamiento geoelectrico y de georradar en La Mesa de Los Santos*. Universidad Industrial de Santander.
- Moya, J., & Dörries, E. (2004). Estudio de la ondulación del geoide. *UNICIENCIA*, 151–155.
- Nagy, D. (1996). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*.
- Neiza, N. (2011). *Metodología para la realización de la corrección topográfica en los estudios gravimétricos, utilizando datos de radar y el Modelo digital de Elevación -DEM*. Universidad Nacional de Colombia.
- Nettleton, L. L. (1939). Determination of density for reduction of gravimeter observations. *Geophysics*, 4(3), 176–183.
- Niebauer, T. M. (2011). *Gravity survey with relative and absolute gravimeters* (Patent US 8,028,577).
- Ossama, A., Basem, E., & Eman, K. (2020). Practical Experiences with the First Relative Gravimeter of Type Scintrex CG-6 Autograv in Dubai, The United Arab of Emirates. *Scientific Research*, 237–247.
- Pedraza, A. (2017). *Análisis gravimétrico del volcán Puracé*. Universidad de Los Andes.
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Universidad de Extremadura .
- Reynolds, J. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (second edition).
- Ríos, C., Mantilla, L., & Castellanos, O. (2017). Petrogénesis de venas de cuarzo y cianita en rocas metapelíticas de la formación Silgará, región central del macizo de Santander en los Andes

- colombianos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41, 230–243.
- Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). Memoria Explicativa Generalizada del Departamento de Santander. En *Ingeominas*.
- Sánchez, L. (2003). *Determinación de la superficie vertical de referencia para Colombia*. Technische Universität Dresden.
- Sánchez, L., & Farfán, A. (2015). Caracterización Geoelectrica en la Vereda “La Esperanza” Sector de la Mesa de los Santos, Municipio de Piedecuesta, Santander. *UIS, II*, 1–15.
- Sánchez-Aguililla, F., Rey Moral, M. del C., Ayala Galán, C., & Pueyo Morer, E. (2021). *Bases Metodológicas Para La Obtención De Cartografía Gravimétrica. Petrofísica Y Modelización Gravimétrica 2D y 3D* (Vol. 9). Instituto Geológico y Minero de España .
- Schön, J. (2011). *Physical Properties of Rocks* (Vol. 8).
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). Anexo A. Susceptibilidad por geología plancha 120, Bucaramanga. *Servicio Geológico Colombiano*.
- SGC. (2012). Anomalías gravimétricas y magnetométricas de los flancos norte y occidental del Volcán Nevado del Ruiz. *Servicio Geológico Colombiano*.
- Tarazona, Y., & Vargas, M. (2020a). *Análisis Cuantitativo de Sistemas de Fracturas como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico de la zona Sur de la Mesa de Los Santos, Santander – Colombia*. Universidad Industrial de Santander.
- Tarazona, Y., & Vargas, M. C. (2020b). Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander -

- Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3), 107–123. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021005>
- Telford W, Geldart L, & Sheriff R. (1990). *Applied Geophysics* (second). Cambridge University Press.
- Timothy, L., & Douglas, R. (2013). Acquisition and analysis of terrestrial gravity data. En *Cambridge University Press*.
- Torres, A. (2002). *Estructura de la zona de subducción de Oaxaca a partir de datos gravimétricos*. Instituto Politécnico Nacional.
- Vajda, P., Foroughi, I., Vaníček, P., Kingdon, R., Santos, M., Sheng, M., & Goli, M. (2020). Topographic gravimetric effects in earth sciences: Review of origin, significance and implications. *Earth-Science Reviews*.
- Vargas, C. Y. (2008). Cartografía Geológica a Escala 1:25.000 de la Mesa de los Santos, Departamento de Santander. *UIS*, 11(75), 23–26. http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2020.pdf <http://revistas.ucm.es/index.php/CUTS/article/view/44540/44554>
- Vargas Cáceres, M. I. (2021). *Comparación de la anisotropía de la resistividad del subsuelo fracturado en zonas aledañas a diferentes tipos de estructuras, e implicaciones hidrogeológicas para un área rural del municipio de Los Santos, Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Vargas, N. (2016). Elabración y Formulación del Plan de Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Sector de la Mesa de los Santos. Municipio de los Santos Jurisdicción de

la Corporación Autónoma Regional de Santander “CAS” Segunda Fase. Practica Empresarial. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 2071–2079.

Vergel Navarro, S., & Remolina Rivero, B. Y. (2023). *Estudio del nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, vereda La Fuente, municipio Los Santos del departamento de Santander, mediante los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Refracción*. Universidad Industrial de Santander.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, XXI.

Weijermars, R. (2016). Chapter 4: Geological Cross-Sections. En *Structural Geology and Maps Interpretation* (pp. 49–64).

Zamarreño, I. (1963). Estudio petrográfico de las calizas de la Formación Rosablanca de la región de la Mesa de Los Santos (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 15, 5–34.