



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

Informe Técnico

Estudio gravimétrico en la localidad de Huancabamba, Piura.



Lima, diciembre 2020

Presidente Ejecutivo

Dr. Hernando Tavera Huarache

Director Científico

Dr. Danny Scipión Castillo

Responsable del proyecto

Juan Carlos Gómez Ávalos

Ejecución del estudio

Juan Carlos Villegas Lanza
Mijaell Alex Berduzco Ancco

Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa
Teléfono +51 1 317 23 00

RESUMEN

Este informe presenta los resultados de la interpretación geofísica de los datos de gravedad obtenidos en la localidad de Huancabamba, el objetivo principal es conocer las propiedades gravimétricas y la profundidad del basamento rocoso presentes en dicha localidad.

El estudio de gravedad contiene 43 datos distribuidos en tres perfiles con separación normalmente de 200 metros, Tras la fase de adquisición, los datos son convertidos a anomalías de Bouguer y se ha separado en anomalía residual y regional, donde resaltan las anomalías más negativas de -2.6 y -553 mGal para anomalías residuales y de Bouguer respectivamente, las cuales están ubicadas en la zona de Jimaca, de igual manera encontramos valores más altos de anomalía residual y Bouguer de 2.6 y -545.5 mGal respectivamente ubicados en inmediaciones del cerro Witoligun.

El modelado de gravedad se realizó con el uso del módulo GM-SYS del software Oasis Montaj, los resultados muestran la variación de potencia de ~ 200 - 300 metros de materiales volcánicos y cuaternarios, por ende la morfología del basamento varía entre este rango, en resumen los sedimentos parecen más profundos (~ 400 a 500 metros) y con densidad baja en la zona conocida como Jimaca, además se presentan rangos de densidad para el lecho rocoso que varía de 2.3 a 2.75 gr/cm³ y para el relleno sedimentario – volcánico con densidades que varían de 1.1 a 1.5 gr/cm³.

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

2. OBJETIVO

3. ANTECEDENTES

3.1.- Contexto Geológico de la localidad de Huancabamba.

3.2.- Contexto Geológico de la localidad de Huancabamba.

4. METODOLOGÍA Y DATOS

4.1.- Estudio gravimétrico

4.2.- Recoleccion de datos

4.3.- Procesamiento – correcciones gravimétrivas

4.4.- Interpretación

5. RESULTADOS

5.1.- Anomalia de Bouguer.

5.2.- Anomalia residual.

5.3.- Analisis espectral – trabajo Huancabamba.

5.4.- Deconvolución de Euler – trabajo Huancabamba.

5.5.- Modelamiento y descripción.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

1.- INTRODUCCIÓN

La localidad de Huancabamba, provincia del mismo nombre ubicada en la región de Piura (Figura 1), actualmente viene siendo afectada por la ocurrencia de procesos geomorfodinámicos externos los cuales pueden ser catalogados como deslizamientos y reptaciones, presentes principalmente en la parte central de la localidad y lugares aledaños, estos procesos se manifiestan por el movimiento de grandes volúmenes que se desplazan ladera abajo en dirección al río, debido a ese escenario se intensifican los estudios geológicos, geofísicos entre otros, que tienen el objetivo de brindar información técnico científica que permita una base sólida de conocimientos para tomar las mejores decisiones; es por ello que se consideró realizar este estudio enfocado en el análisis gravimétrico de Huancabamba.

La prospección gravimétrica, a partir de mediciones efectuadas sobre la corteza terrestre o satelitales, permiten obtener valores distintivos de gravedad, conocidos como valores de anomalías de Bouguer, a partir de estos, se elaboran mapas que proporcionen información cualitativa de la tendencia gravimétrica y su relación con la geología local presente y aplicando modelos teóricos matemáticos podemos realizar una estimación cuantitativa de espesores sedimentarios.

En el presente estudio se utilizan 43 datos de estaciones gravimétricas medidas en el año de 2019 en Huancabamba, adquiridos con un gravímetro terrestre marca Lacoste&Romberg modelo G, la data obtenida paso por la etapa de procesamiento y al final se pudo obtener mapas de anomalía de Bouguer completa, Bouguer residual, Bouguer regional y modelos simples de profundidad.

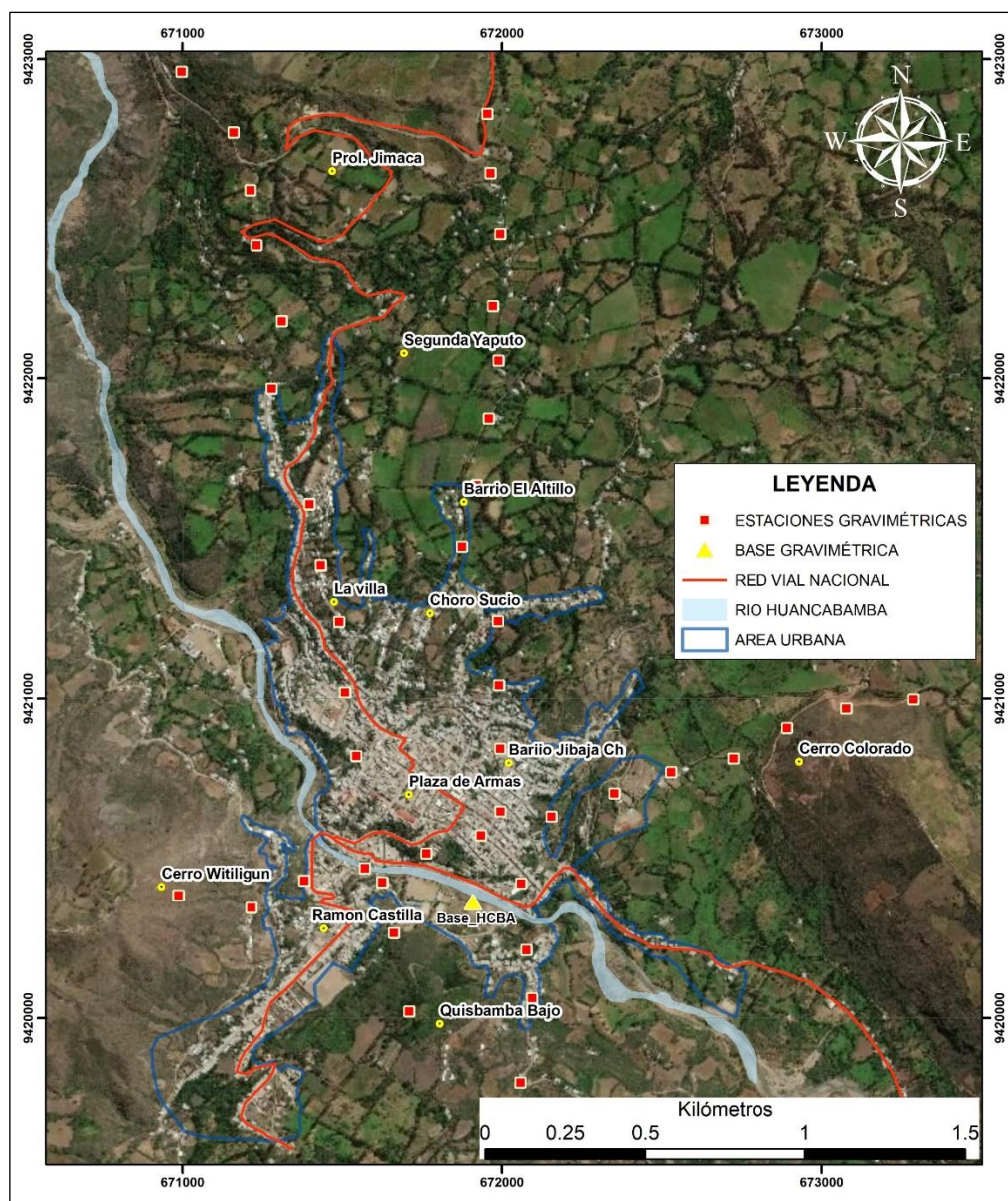


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, se observa el área urbana de la ciudad de Huancabamba, las estaciones gravimétricas medidas y la estación base HCBA

2.- OBJETIVO

El objetivo principal del presente estudio es proporcionar información gravimétrica para caracterizar contrastes de densidad en superficie y en profundidad mediante mapas de anomalía gravimétrica para zonas de movimiento de masa.

3.- ANTECEDENTES

3.1.- Contexto Geológico de la localidad de Huancabamba.

La localidad de Huancabamba, ubicada en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, que a la vez se encuentra asentada en la parte baja del valle interandino del Rio Huancabamba forma un graben o cubierta sedimentaria desarrollado por fallamiento gravitacional. Según (Reyes & Caldas, 1987), la zona de estudio presenta rocas antiguas del paleozoico inferior, constituidos por secuencias de rocas metamórficas como filitas y pizarras, pertenecientes al grupo Salas, siguiendo con el paquete metamórfico se presenta la formación Rio Seco la cual está conformada por cuarcitas grises con intercalaciones de filitas y pizarras lustrosas. En marcada discordancia angular sobre materiales paleozoicos afloran formaciones con edad terciaria constituidas por las unidades de material volcánicos denominados como: Llama, Purculla y Shimbe, los cuales están constituidos por brechas y tobas grises, por último, se presentan depósitos cuaternarios que mezclan su composición entre materiales sedimentarios, volcánicos, metamórficos, etc.; según Rodríguez et al., (2012), el espesor de la unidad Llama en el sector Oriente es de 500 metros, y la datación no es exacta pero, estimaciones desarrolladas por Wilson, (1984), sugieren una pertenecía al Cenozoico inferior.

La localidad de Huancabamba sufre de constantes movimientos geodinámicos provocados por diversos factores como: la litología, morfología del relieve y la acción del agua, así lo demuestra, el estudio realizado por Cordova, A., (2018), donde también explica, tres tipos de fenómenos que afectan a la ciudad: deslizamientos rotacionales, traslacionales y de reptación lenta, concluyendo que la zona más crítica es el área urbana, evidenciando fracturas en viviendas ubicadas en los sectores de: "Jibaja Che", "La Laguna", sector "El altillo", "barrio Chalaco" al sur de la ciudad, sector "La villa" al noreste y destaca la plaza de armas de Huancabamba donde infiere la presencia de un promontorio aparentemente fijo flanqueado por ambos lados por deslizamientos rotacionales y sería un claro ejemplo del fenómeno de reptación, este y los anteriores deslizamientos se manifiestan de manera especial en la ladera del margen izquierdo del rio Huancabamba donde se ubica el sector urbano de la ciudad.

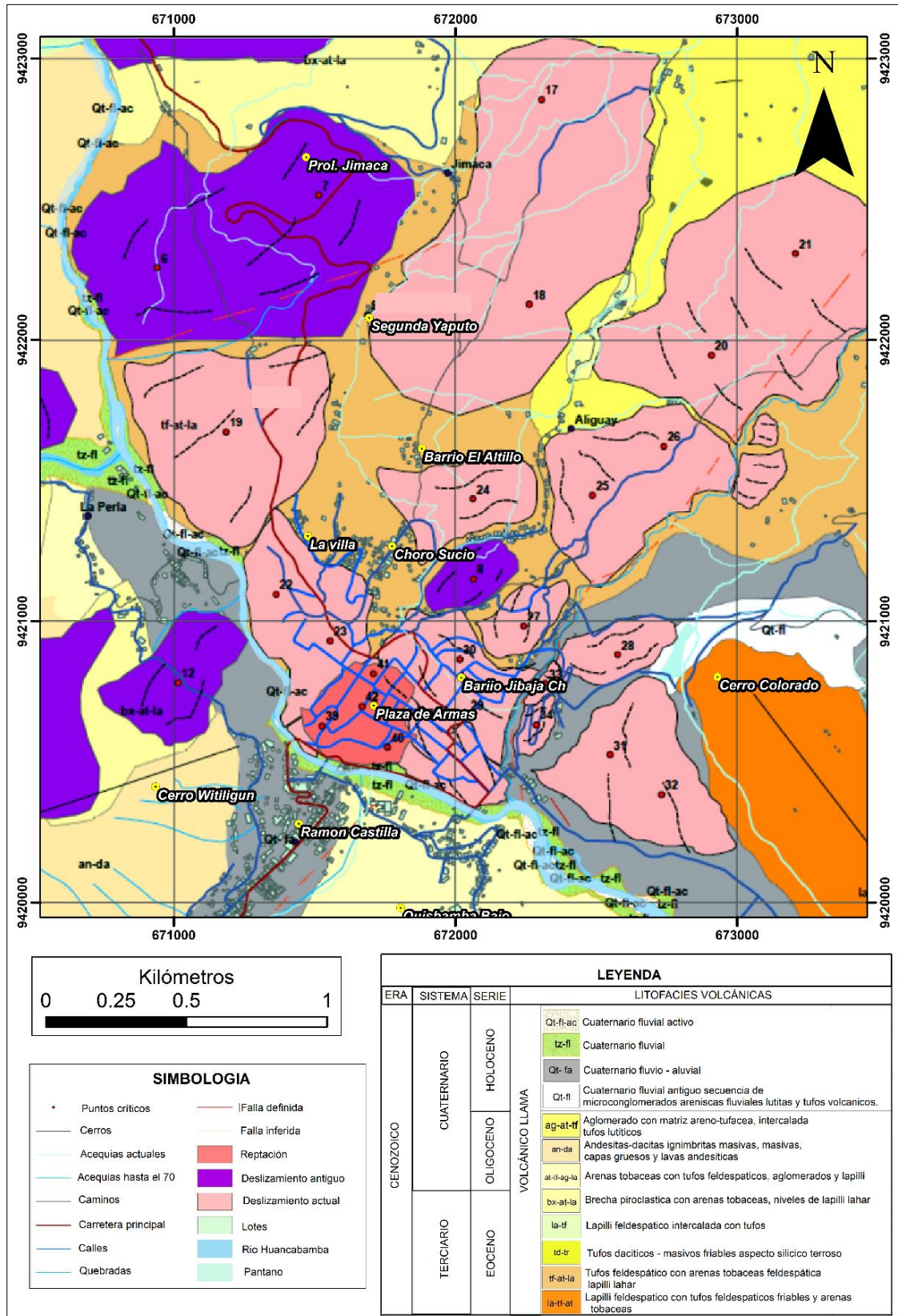


Figura 2. Mapa de geológico – geodinámico del Huancabamba (Modificado de N. Cordova, 2018).

3.2.- Contexto Tectónico de la localidad de Huancabamba.

Tectónicamente la zona de estudio se encuentra influenciada por la deflexión de Huancabamba, la cual es definida como una mega estructura de deformación cortical, caracterizada por la presencia de estructuras plegadas y graveniformes, está ubicada entre los departamentos de Piura, Cajamarca, Tumbes y parte de Amazonas y su origen estaría relacionado a la tectónica compresional OSO – ENE del Albiano medio – Cenomaniano, definida como fase Mochica (Myers, 1974; Cobbing et al., 1981; Megard et al., 1984).

El área de estudio se encuentra entre la cordillera occidental y a la cordillera del Sallique, esta intersección de ambas cordilleras daría origen a un mega-graven, relleno por materiales de diversas edades, lugar donde se emplazaría la ciudad de Huancabamba (CEREN, 2000).

La actividad neotectónica en el área de estudio, es relativamente baja, ya que el buzamiento de la zona de Benioff para el norte del Perú es por debajo de los 15° (Grange et al., 1978), lo que supone que la actividad sísmica en el norte es baja con respecto al sur y centro, dentro del historial de ocurrencia de principales sismos en Huancabamba se tiene, el sismo de 1912 de M6.5, sismo de 1928 de M7, 1937 de M6, recientemente ocurrieron sismos cercanos a nuestra zona de estudio, por ejemplo: 17/08/2010 Lambayeque magnitud de M5.0, 31/10/2005 Amazonas magnitud de M5.4 y el más importante en estos últimos años en la zona norte del Perú: 26/05/2019 Lagunas- Amazonas magnitud M8.0, cabe resaltar que la zona de estudio esta propensa a reaccionar de manera negativa ante un sismo de magnitud superior lo que denotaría un serio riesgo para la población.

4.- METODOLOGÍA Y DATOS

Para el análisis de movimientos de masa y su posterior correlación con la respuesta geofísica, en este estudio se aplicó la técnica geofísica de gravimetría, donde se realiza un riguroso trabajo de campo y procesamiento. Los resultados permiten diferenciar zonas con contraste de densidad relacionados a afectos morfodinámicos. A continuación, se describe el método utilizado, los procedimientos para la obtención de los datos, análisis e interpretación de los resultados.

4.1 Estudio gravimétrico.

En el estudio gravimétrico las mediciones obtenidas están basadas en la medición del campo gravitacional terrestre; en la cual se producen variaciones ocasionadas por cambios en la densidad de los materiales, debido a un aumento o disminución de la masa, las cuales son registradas con un instrumento llamado: gravímetro, dicho de forma general, la prospección gravimétrica se emplea extensamente al resolver los más diversos problemas geológicos y constituye uno de los métodos fundamentales de prospección geofísica en las investigaciones zonales (Mironov, 1977).

La magnitud de la gravedad depende de 5 factores: latitud, elevación, topografía, mareas y las variaciones de densidad de los materiales del subsuelo (Telford et al., 1990), todos estos factores pueden corregirse de acuerdo a las correcciones gravimétricas.

4.2. Recolección de datos

Se realizaron mediciones en un total de 46 estaciones gravimétricas, los cuales fueron debidamente ubicados en tres perfiles (dos en dirección NS y otro SE-NO), el intervalo de medición fue de 200 metros y el método de levantamiento usado fue Go and return (inicio de mediciones en una base, consiguiente medición de las estaciones y finalización del circuito en la misma base inicial), cabe resaltar que la base gravimétrica fue ubicada en terreno compactado y al SE de la plaza de Huancabamba (671908.951 m. E y 9420362.7 m.) y el periodo de cada circuito no supera las 6 horas de duración.

El instrumento usado para la realización de las mediciones fue un gravímetro relativo marca LaCoste & Romberg modelo "G", con precisión de 0.01 mGal, se realizaron tres y

cuatro lecturas en cada estación y base respectivamente y para encontrar la ubicación de cada estación fue necesario el uso de un GPS navegador marca Garmin.



Figura 3. Imagen de la base gravimétrica HCBA, ubicada en la parte baja del río Huancabamba, al SE de la plaza.

4.2. Procesamiento - Correcciones gravimétricas

El procesamiento se llevó a cabo con 43 datos, donde se usó tablas de calibración incluidas en el gravímetro Lacoste&Romberg y las correcciones gravimétricas trabajadas a nivel de la cota más baja, asimismo, se hace hincapié en la corrección por terreno, la cual se pudo llevar a cabo con la utilización de un DEM (modelo digital de terreno) de alta resolución y con la combinación de este con las coordenadas de las estaciones se pudo obtener las coordenadas de precisión. A continuación, las correcciones aplicadas en el procesamiento:

4.2.1 Corrección de deriva

Las mediciones gravimétricas, pueden sufrir variación en una misma estación a través del tiempo, esta variación puede darse por la fatiga de resortes y el cambio interno de temperatura del gravímetro, una forma de calcular esta variación y corregir los datos, es utilizando la formulación siguiente:

$$Cd = \left(\Delta t_b * \left(\frac{g_{b2} - g_{b1}}{\Delta t_2 - \Delta t_1} \right) \right) + g_p \dots (1)$$

Donde, Cd: corrección de deriva, Δt_b : diferencia de tiempo con respecto a la base, g_{b2} : Lectura en la base 2, g_{b1} : Lectura en la base 1, Δt_2 : tiempo base 2, Δt_1 : Tiempo base, g_p : Gravedad del punto.

4.2.2 Corrección por mareas terrestres

La ubicación y constante movimiento en espacio del sol y la luna, inciden directamente en el campo gravitatorio terrestre, lo que se traduce en pequeñas variaciones cíclicas, dichas variaciones pueden ser calculadas de forma precisa y en función del tiempo, aplicado por ejemplo la formulación descrita por Longman, (1959), para el presente estudio se usó el programa SOLID, que se fundamenta en el código fuente desarrollado por Dehant, (2003).

4.2.3 Corrección por latitud o gravedad teórica

La corrección de latitud se basa en hallar la gravedad producida según la forma matemática de la tierra (elipsoide de revolución), en el presente estudio se obtuvo a través de la ecuación formulada por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, (IUGG, por sus siglas en inglés), (1980):

$$G_{teo} = 978032.7 * (1 + 0.0053024\text{sen}^2\phi - 0.0000058\text{sen}^2(2\phi)) \text{ mGal ... (2)}$$

Donde: G_{teo} : Gravedad teórica, 978932.7 es la gravedad medida en el ecuador en mGal y ϕ es la latitud del punto medido en radianes.

4.2.4 Corrección por Aire Libre

En términos generales, esta corrección traslada el valor obtenido en superficie hacia la posición que debiese tener en el elipsoide proyectado de forma ortogonal, este valor se considera como una gradiente de altura y no toma en cuenta el material solido entre superficie y datum, este gradiente se ha calculado y se ha evaluado en mGal/m con la siguiente formulación:

$$CAL \text{ (mGal)} = \Delta h \text{ (m)} * 0,3086 \text{ (mGal/m)} \text{ (3)}$$

Donde, **CAL** corrección por aire libre, Δh : Diferencia de alturas entre la cota más baja y la superficie.

4.2.5 Corrección por Bouguer

Considera la atracción gravitatoria de una capa horizontal infinitamente extendida lateralmente con un espesor y densidad determinado, en este caso se asume que la variación de la topografía es despreciable. Para el espesor Δh en metros, la densidad ρ en gr/cc, la corrección en mGal resulta:

$$\text{CB (mGal)} = \Delta h * 0,0419088(\text{mGal/m}) * \rho \dots (4)$$

Donde, **CB**: Corrección de Bouguer, **Δh** : Diferencia de alturas entre la cota más baja y la superficie. **ρ** : Densidad de la capa (en nuestro caso se asume la densidad promedio de la corteza continental: 2.67 gr/cc (Dubois y Diament, 2001))

4.2.6 Corrección topográfica

Toma en cuenta el efecto gravimétrico (repulsión o atracción) de valles, montañas o estructuras semejantes cercanas a la estación de medida, que anteriormente habían sido depreciadas por la corrección de Bouguer.

La corrección la podemos realizar por medio del software como el Oasis Montaj (Geosoft Inc., 2015), con su módulo gravity.omn, que se basa en métodos ideados por Nagy (1966) y Kane (1962), para poder realizar el procesamiento en este software, se requiere de modelos de elevación digital (DEM) y una densidad de referencia (en este caso se usó 2.67 gr/cc).

4.3. Interpretación

Para realizar la interpretación de los resultados es necesario trabajar con valores de anomalía de Bouguer, con el fin de diferenciar anomalías residuales y regionales que muestren cambios de densidad a nivel superficial y profunda respectivamente, así mismo, también se realiza la interpretación cuantitativa en términos de un modelamiento en profundidad para lo cual es necesario aplicar metodologías como: la de convolución de Euler, análisis espectral, estos dos últimos con el fin de obtener profundidades de fuente de manera aproximada y por último se vale de diferentes estudios de índole geológico geotécnico, importantes a la hora de asignar densidades a las diferentes unidades geológicas y así calibrar del modelo geológico-geofísico propuesto.

4.3.1. Separación de la tendencia de anomalía regional - residual

Para la eliminación de la tendencia regional se aplicó el método de continuación analítica ascendente (Geosoft Inc, 2006b), debido a que, las anomalías de fuentes pequeñas que yacen a poca profundidad decrecen con mayor rapidez que las anomalías de fuentes más grandes y de mayor profundidad, por ello se considera este método donde se utiliza un filtro de limpieza que no produce efectos secundarios que requieran la aplicación de otros filtros o procesamiento para corregir, por lo que este filtro es utilizado muy seguido para atenuar los efectos de fuentes superficiales y ruido de los mallados (Geosoft Inc, 2006b).

Para la obtención de la anomalía residual fue necesario la resta de la anomalía de Bouguer completa con la anomalía regional, así se obtiene una diferencia clara entre la respuesta gravimétrica superficial y profunda que ayuda a los objetivos del presente estudio.

4.3.2. Análisis espectral.

Utiliza la transformada de Fourier para obtener un espectro de potencia radial, donde al graficar la longitud de onda ($1/k$, inverso del número de onda) en función del logaritmo de la potencia $\ln(P)$, ubicamos longitudes de onda que mantengan una relación lineal y en función de ello se seleccionan pendientes de la curva presente en el gráfico para calcular la profundidad del contraste o tope de un cuerpo geológico, el cálculo se realiza con la siguiente fórmula:

$$z = \frac{m}{4 * \pi}$$

Donde: z es la profundidad y m es la pendiente del logaritmo del espectro (Spector y Grant, 1970).

4.3.3. Deconvolución de Euler.

Procedimiento matemático que calcula las profundidades de los distintos cuerpos geológicos de interés basados en la ecuación de homogeneidad de Euler, la cual está fundamentada en el índice estructural (SI) que mide la atenuación del campo con el aumento de la distancia a la fuente (Thompson, 1982; Geosoft Inc, 2005).

Tabla 1. Índices estructurales para fuentes gravimétricas acorde a su geometría (modificado de Reid et al., 2013).

Índice Estructural (SI)	Campo Gravimétrico
0	Sill/diques/saltos
0.5	Laminaciones mineralizadas
1	Cilindros vertical u horizontal
2	Esferas

4.3.4 Modelamiento de anomalía gravimétricas.

El modelamiento es la interpretación cuantitativa que explica las anomalías obtenidas en términos de profundidad y extensión de las respectivas fuentes, a partir de cálculos matemáticos, los cuales están basados en los trabajos de Talwani et al. (1959), estas interpretaciones requieren la descripción de los resultados y explica los principales rasgos revelados por el estudio en términos de litología y estructuras probables que puedan dar lugar a las anomalías, es decir, se requiere de información adicional para una buena interpretación.

Para el presente estudio se usó el programa GM-SYS que utiliza el algoritmo de inversión de Marquardt (1963) para linealizar e invertir los cálculos, donde se asignan valores de densidad de acuerdo a lo establecido por la geología geotecnia y estudios anteriores de la zona de estudio.

5.- RESULTADOS

5.1. Anomalía de Bouguer

Se define como la diferencia del valor gravimétrico observado insitu y el valor gravimétrico teórico, para hallar los valores es necesario haber realizado todas las correcciones anteriormente descritas (4.2), los valores de anomalía de Bouguer fueron interpolados con el método mínima curvatura con el programa Oasis Montaj v 8.5 (Geosoft Inc., 2015).

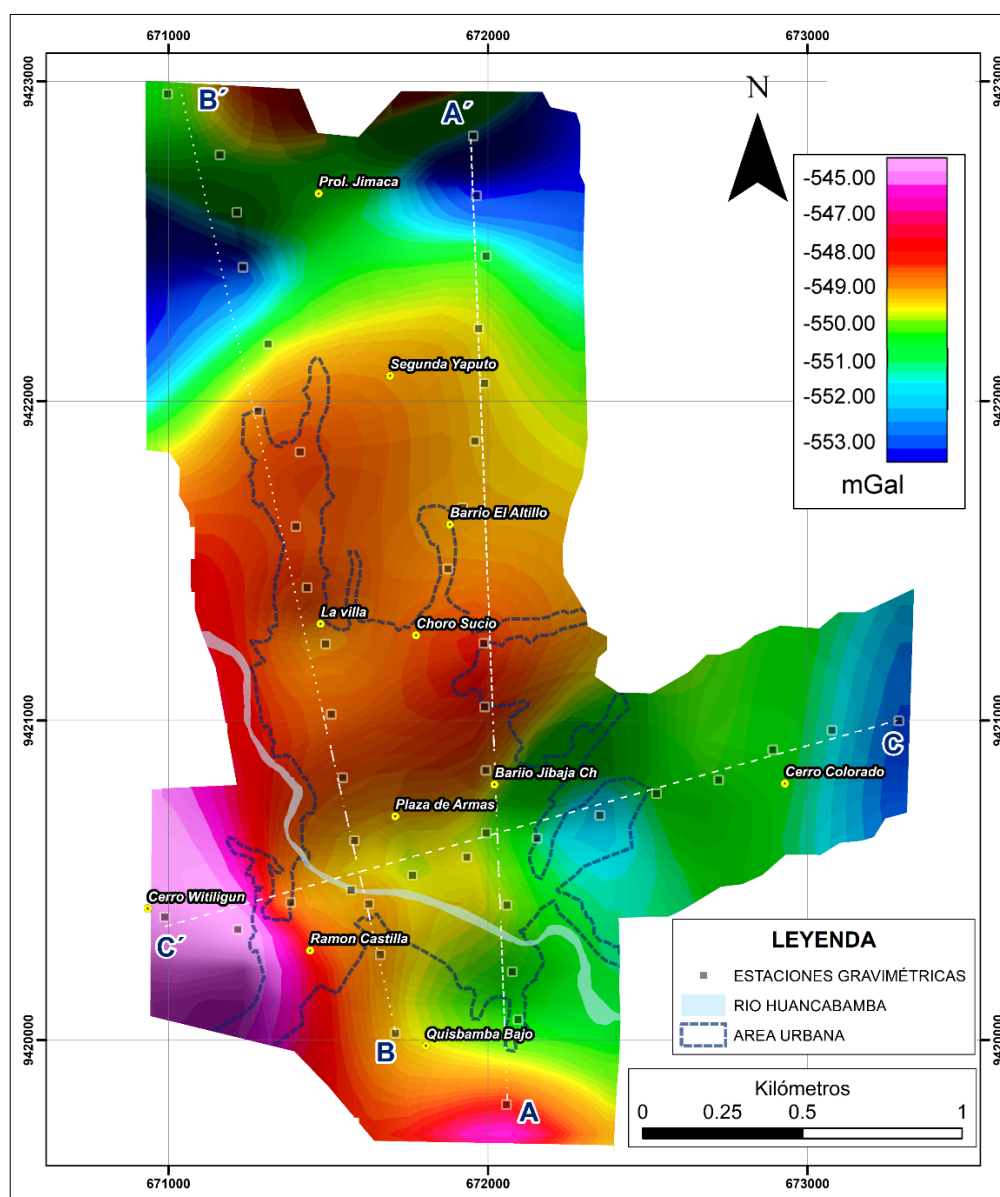


Figura 4. Mapa de anomalía de Bouguer, donde se resalta los perfiles A-A', B-B' Y C-C' con las estaciones gravimétricas (puntos negros) emplazadas sobre ellos, asimismo, se observa la zona urbana de Huancabamba (polígono color azul).

El mapa de anomalía de Bouguer (Figura 4), representada por valores que van desde -545.5 hasta -553.0 mGal, donde se marcan tendencias, por ejemplo presentando los más bajos gravimétricos de hasta -553 mGal ubicados en la zona **N** (zona de azul intenso alrededor de prolongación **Jimaca**), también encontramos valores bajos en la parte sur que van descendiendo desde la plaza de armas en dirección NE hacia el cerro Colorado, por otro lado, los más altos valores, se muestran notoriamente de color magenta intenso con valores de -545.5 mGal y se encuentran en la parte **SW** del **cerro Witiligun**, también se puede observar zonas con valores altos de -549 mGal, ubicados en la parte central del área de estudio: Choro sucio, Barrio el Altillo, La villa.

5.2. Anomalía residual.

Para este estudio, la anomalía de residual o local es de mucha importancia, para lo que debió eliminarse primero la anomalía de Bouguer regional, cometido que se llevó a cabo, utilizando el método de continuación analítica ascendente, descrito en el apartado (4.3.1), utilizando el módulo MAGMAP del software Oasis Montaj (V 7.2) se pudo restar el efecto regional de la anomalía de Bouguer para así obtener el efecto residual.

El mapa de anomalía residual (Figura 5), presenta valores negativos y positivos que varían en un rango de -2.6 a +2.6 mGal y se puede diferenciar por ejemplo: los valores más negativos que van desde -0.1 mGal a -2.6 mGal ubicados en alrededores de prolongación Jimaca (zona norte del mapa) que podrían correlacionarse con un cambio litológico o la presencia de un gran deslizamiento de baja compactación, en la parte central del mapa emplazadas en lugares como: Segunda Yaputo, barrio El Altillo y Choro Sucio se presentan valores gravimétricos medios con un rango de -0.1 a 0.7 mGal que representarían materiales de mediana compactación, en la parte sur desde lugares como La Villa, Plaza de Armas, Ramon Castilla hasta Quisbamba Bajo presentan valores negativos medios de -1.4 a -0.1 mGal y podrían explicarse como materiales someros cuaternarios no consolidados, por último, encontramos los valores más altos positivos de 0.5 a 2.6 mGal al sureste de la zona de estudio emplazada en el cerro Witiligun y serian producto de la presencia de materiales con una gran compactación y densidad.

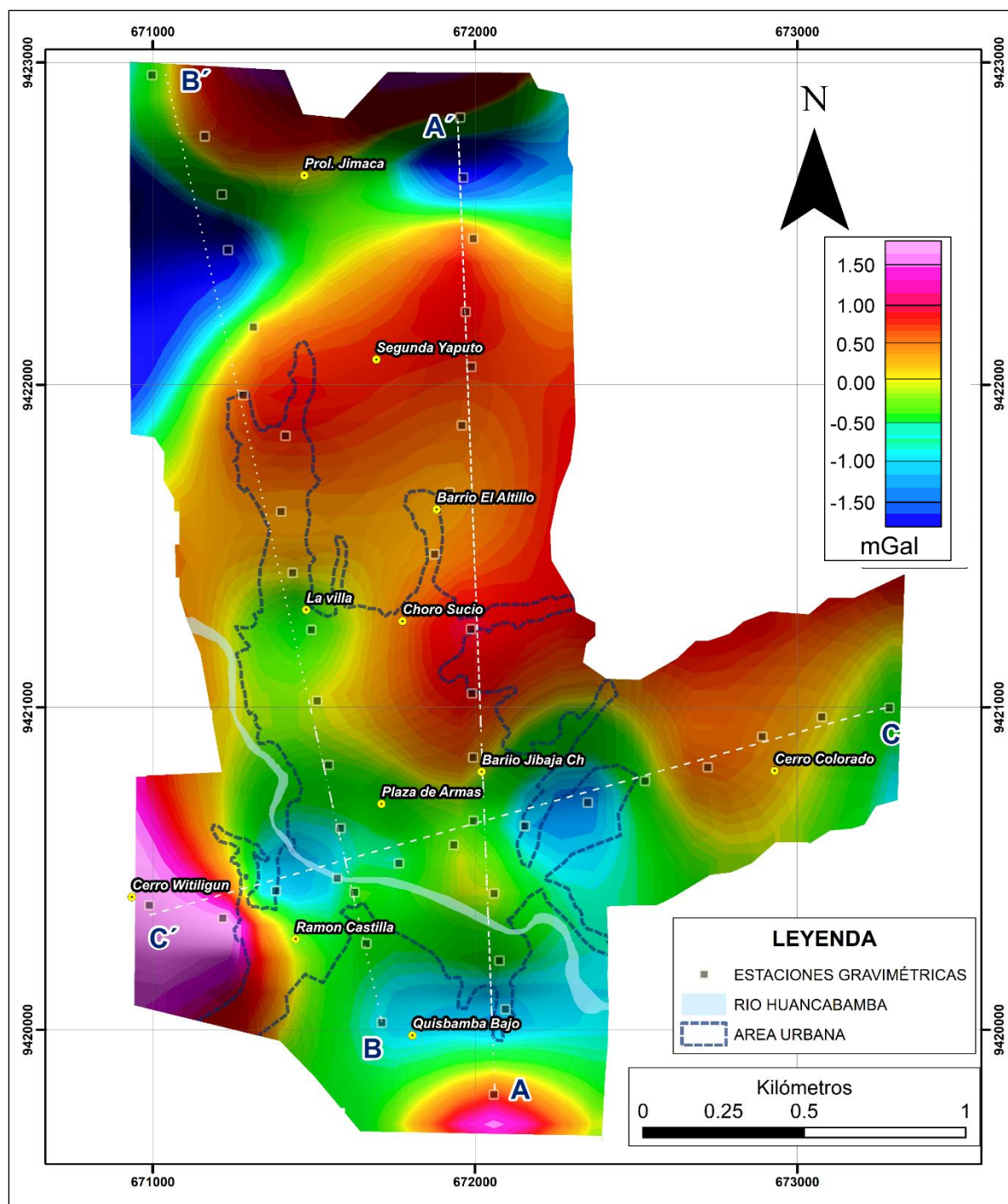


Figura 5. Mapa de anomalía de Bouguer residual (obtenida de la resta de la anomalía de Bouguer y la anomalía regional), las líneas punteadas de color blanco, muestran los perfiles a modelar con las estaciones gravimétricas (puntos de color negro) y se observa el área urbana de Huancabamba

5.3. Análisis espectral – trabajo Huancabamba

Después de la obtención de la anomalía de Bouguer, se obtuvo el espectro de potencia radial, cuyos datos fueron trabajados en el software Excel, para tener un punto de apoyo en la aproximación de profundidades de las estructuras, los resultados son mostrados en la figura 6.

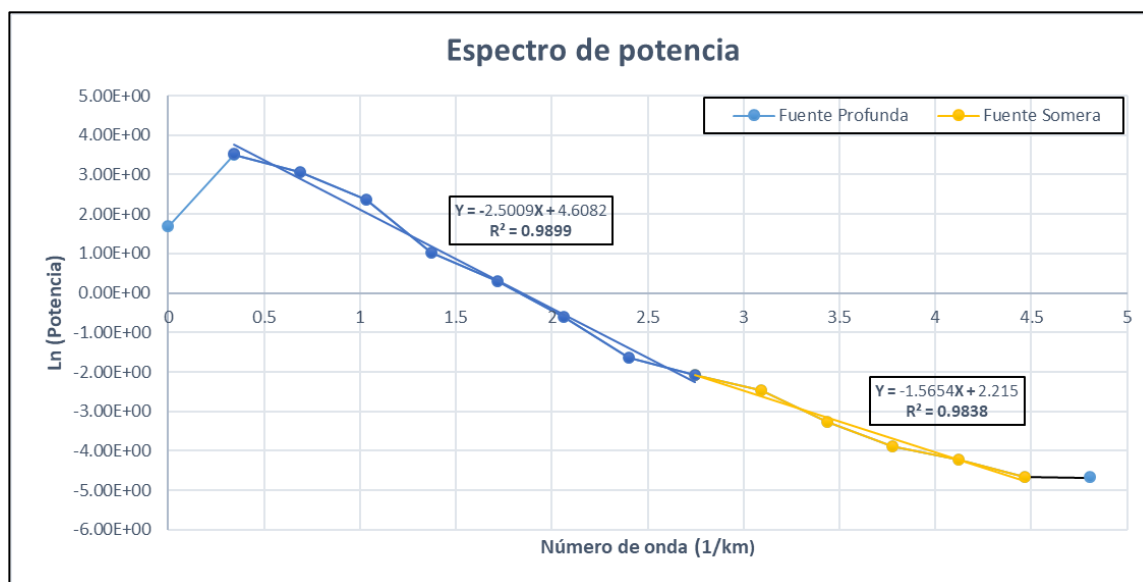


Figura 6. Espectro de potencia resultado del análisis y aplicación de filtros en la anomalía de Bouguer, donde se muestra las pendientes de dos fuentes principales con sus ecuaciones: somera y profunda.

En la figura 6 se busca la correlación de los datos a una recta que tengan un ajuste aceptable y el menor error posible, en consecuencia, se obtiene pendientes matemáticas y de acuerdo a la ecuación vista en el capítulo 4.3.2 se puede obtener una profundidad aproximada de las fuentes que causan las anomalías de Bouguer, el resultado indica la presencia de fuentes que varían aproximadamente desde 199 a 124 metros la profunda y somera respectivamente, los resultados las profundidades y sus pendiente matemáticas se observan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resultados del análisis espectral de las anomalías de

Fuente	Pendiente	Profundidad (m)
Profunda	-2.5009	-199.015
Somera	-1.5654	-124.571

5.4. Deconvolución de Euler – trabajo Huancabamba

Para el presente estudio, la deconvolución de Euler se realizó con el modulo Euler3D de Oasis Montaj, tomando como índice estructural (SI) de capas semi-planas cuyo valor es 0.5, con una tolerancia de 30% y ventana de 3; este procedimiento se realiza a partir de la anomalía de Bouguer y al final obtenemos una distribución aleatoria de soluciones de Euler (figura 7).

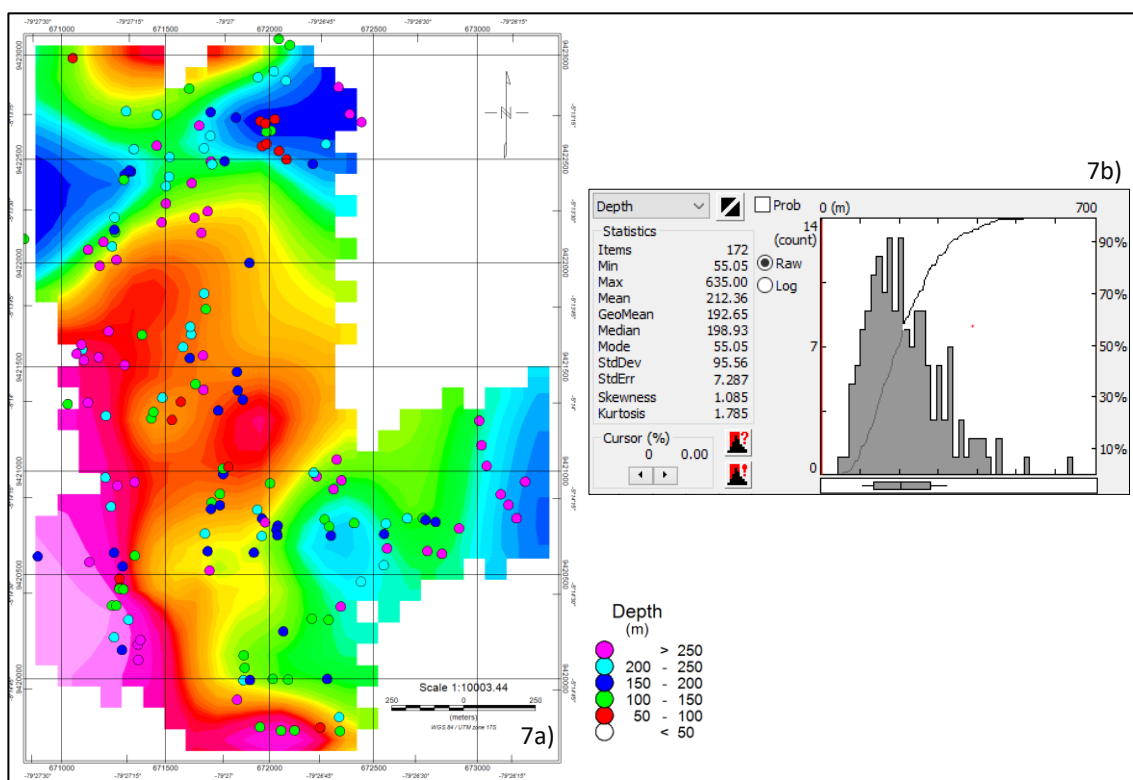


Figura 7. (7a) Mapa de la distribución de soluciones de Euler de acuerdo a la anomalía de Bouguer y (7b) histograma de las soluciones de Euler con los rasgos estadísticos de ellos (valor alto, bajo media, desviación, etc)

En la figura 7a, se observan las profundidades que varían de 55.05 a 635 metros, llamadas soluciones de Euler emplazados en todo el mapa con una distribución no tan regular y de acuerdo al histograma (figura 7b) se muestra un promedio de 212.36 y que la mayor parte de soluciones varían entre 100 - 250 m, lo que se asemeja a lo calculado en el espectro de potencia, por otro lado, encontramos valores atípicos de aproximadamente 625 m, que no se consideran importantes debido a la poca cantidad de soluciones presentes en la figura.

5.5. Modelamiento y descripción

Cada perfil interpretado se ilustra en cuatro partes. La parte inferior contiene la sección de geología, la que sigue la curva de anomalía de Bouguer (curva roja), después la anomalía residual (curva verde) y al final en la parte superior la curva de topografía (curva negra), El comienzo y el final de cada perfil, así como la dirección general, se dan en la tabla II en WGS84, zona UTM 17S.

Tabla II. Coordenadas de inicio y final de cada perfil trabajado, asimismo, se muestra la dirección general y longitud total de cada uno

Nombre del perfil	Inicio del perfil		Final del perfil		Dirección	Longitud total en metros
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)		
A-A'	672149.576	9419777.645	671923.221	9422819.234	SE-NW	3050
B-B'	671765.227	9419923.205	671096.261	9422939.923	SE-NW	3090
C-C'	671031.461	9420321.442	673271.572	9420997.831	SW-NE	2340

5.5.1 Sección A-A'

La sección A-A' que sigue la dirección SE-NW, presenta la variación de valores de altura la topografía de 1875 a 2175 metros, la anomalía residual varía de -2.7 a +0.6 mGal y también se presenta la sección A-A' emplazada en el mapa geológico presente en la zona de estudio.

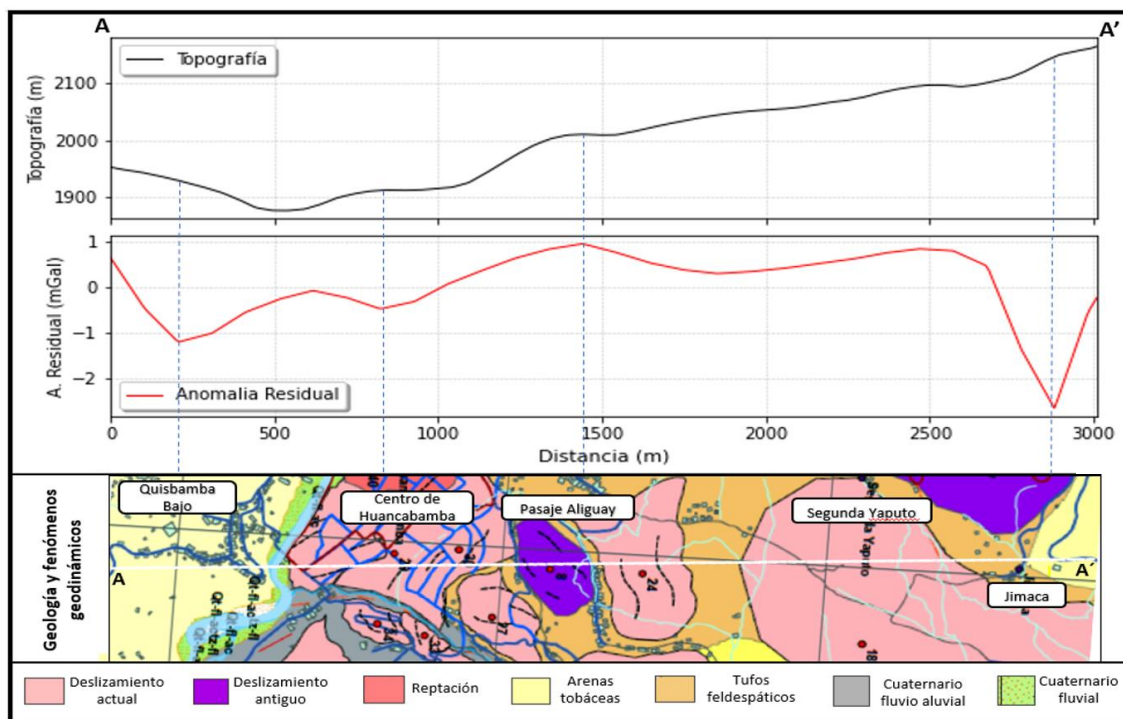


Figura 6. Parte inferior: sección del mapa geológico que cruza el perfil A-A' para contrastar los afloramientos y/o la variabilidad de fenómenos geodinámicos con las anomalías residuales (curva roja) y la topografía (curva negra).

La anomalía gravimétrica presentes (figura 6), plasman por ejemplo los más bajos gravimétricos de anomalía residual en la zona llamada Jimaca (zona norte del perfil), que llegan a valores de -2.6 mGal, lo que indicaría la presencia de densidad baja con respecto a su alrededor correlacionándose geológicamente con el cambio de litología de tufos feldespáticos a arenas tobáceas y en el aspecto geodinámico se correlaciona con un antiguo gran deslizamiento posiblemente susceptible a eventos geodinámicos y filtración de agua, en cuanto a la topografía presenta elevaciones máximas. El perfil muestra un aumento de valores de anomalías gravimétricas conforme se avanza hacia el sur (Segunda Yaputo) hasta el punto máximo en la parte central del perfil (Pasaje Aliguay) con valores de anomalía residual de aproximadamente 1.0 mGal y valores de elevación de 2010 metros, dichos valores se correlacionan geológicamente con materiales volcánicos que debido a sus propiedades gravimétricas serían de una densidad mayor con respecto a sus alrededores y podrían interpretarse como terrenos menos susceptibles a posibles eventos de gran envergadura, desde el punto de vista geodinámico se relacionan con deslizamientos antiguos y recientes, y por último, se presenta la disminución de los valores de anomalías gravimétricas y topografía en dirección sur, es decir, del centro de la localidad de Huancabamba hacia la localidad de Quisbamba Bajo, que geológicamente se correlaciona con material volcánico a cuaternario reciente respectivamente y presentaría un contraste de densidad bajo con presencia de evidencias de un deslizamiento actual y próxima al fenómeno de reptación descrita por Córdova, (2019).

5.5.2 Modelado Sección A-A'

Como se puede observar en la figura 7, el modelo se caracteriza por la presencia de dos tipos estructuras predominantes: materiales de naturaleza metamórfica (densidades de 2.3 a 2.75 gr/cm³) que representarían el lecho rocoso (basamento) y materiales en principio volcánicos y sedimentarios (densidades de 1.3 a 1.5 gr/cm³) que representarían el relleno o sedimento susceptibles a deslizamientos; dentro del modelo se pudo observar que la mayor profundidad del basamento se da en dirección NW de la zona conocida como Jimaca con una profundidad de ~1650 metros sobre el nivel del mar (~500 metros de espesor), donde, también, presenta un cambio de litología y densidad, que sumado a la potencia del sedimento produciría ese bajo gravimétrico característico. Luego la formación de sedimentos se reduce gradualmente hacia la dirección SE, en la parte central encontramos

un espesor sedimentario de ~250 metros y estaría compuesto principalmente por materiales volcánicos de mediana densidad y para el extremo SE encontramos un ligero contraste de densidad y un espesor de ~200, el error calculado para este resultado de modelado es de 0.381, lo que significa que está dentro del margen preciso para el sentido matemático.

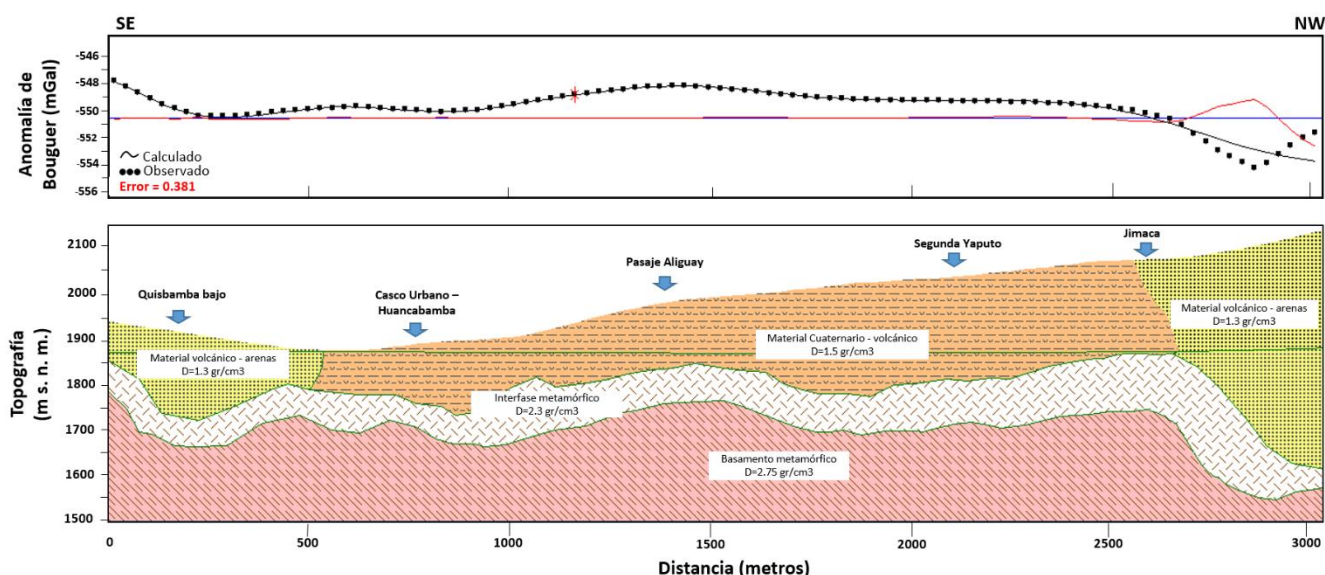


Figura 7. Modelo de profundidad y espesor sedimentario - SECCION A-A'. Parte inferior: Sección transversal que muestra las dimensiones aproximadas (m) del material de cobertura y basamento, así como también las densidades utilizadas (gr/cm^3). Parte superior: Comportamiento de la curva de anomalía de Bouguer con los valores calculados y observados según el modelo, además, de la estimación de error matemático.

5.5.3 Sección B-B'

La sección B-B', en dirección SE-NW cruza parte de la ciudad y zonas aledañas, sus valores de anomalía residual varía de -2.1 a +0.8 mGal y la topografía desde 1884 a 2120 metros.

En la sección B-B' (figura 7), resalta dos bajos gravimétricos de la anomalía residual que presentarían densidad aparentemente menor, la primera y más importante con valor que llega a -2.2 mGal y elevación de 2045 metros ubicada al SW entre la zona de La Villa y Jimaca que se correlaciona con la presencia de un gran deslizamiento antiguo y también en cercanías se presenta un cambio litológico de material de tufos feldespáticos a arenas tobáceas, avanzando hacia SE encontramos un alto gravimétrico en la zona conocida como La Villa con valores de anomalía residual que bordean los +0.8 mGal exponiendo

probablemente zonas de mayor densidad con respecto a los extremos del perfil y se correlaciona con materiales volcánicos, desde pasaje Aliguay hasta Ramon Castilla los valores de anomalía gravimétrica presentan un descenso considerable llegando a su valor más bajo en la zona del río Huancabamba de -1.2 mGal, estos bajos se correlacionarían con la presencia de cuaternarios fluvio aluviales no consolidados por aporte del río, arenas tobáceas y también según Córdova A (2019) en la plaza de armas se presentaría el fenómeno de reptación y deslizamientos actuales.

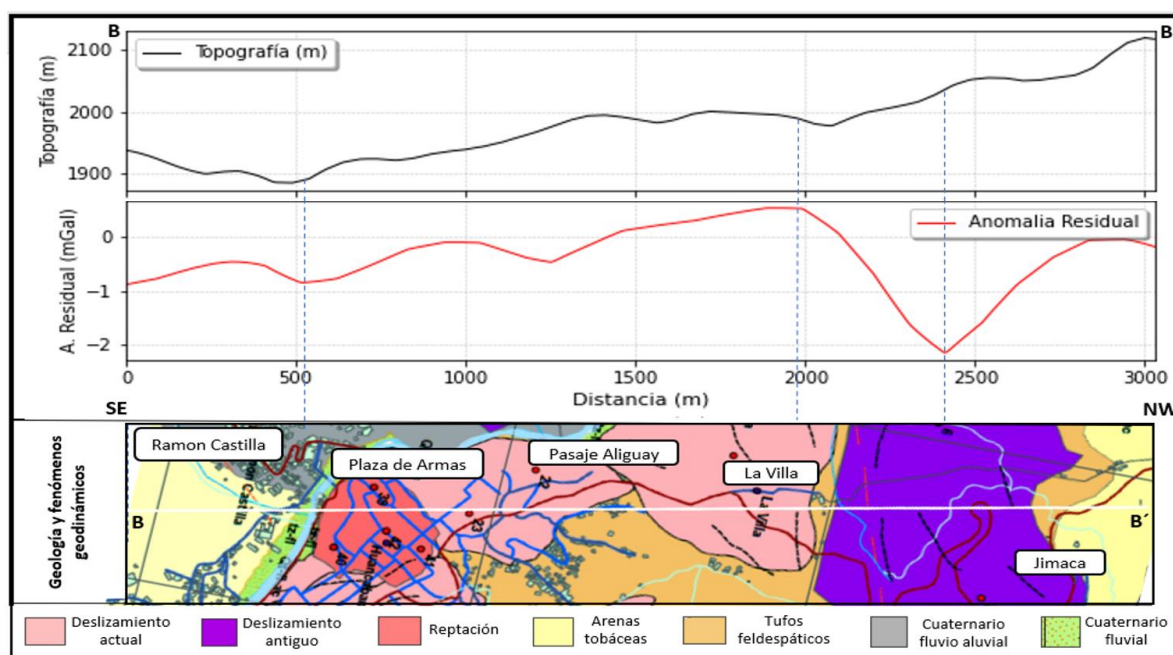


Figura 7. La sección B-B', relaciona los afloramientos geológicos y los fenómenos geodinámicos (parte inferior) con la respuesta de anomalía residual (curva roja) y la topografía situada en la parte superior de la figura (curva negra).

5.5.4 Modelado Sección B-B'

Dentro del modelo presentado en la figura 8, se expone un comportamiento similar a la sección A – A', con un lecho rocoso cubierto de materiales volcánicos sedimentarios con la misma variabilidad de densidades, en ese escenario podemos observar una máxima profundidad de basamento de ~1600 metros sobre el nivel del mar (~450 metros de potencia de cobertura) que se encuentra debajo de las zonas de La Villa y Jimaca, donde se presenta una bajo gravimétrico característico que hace suponer la presencia de una potencia mayor y una densidad baja con respecto a sus alrededores, de igual modo, hacia la dirección SE hay un decrecimiento del espesor, por ejemplo en la zona llamada Pasaje

Aliguy se observa una profundidad de lecho rocoso de ~1850 m s. n. m. (espesor de aproximadamente 200 metros); de igual manera debajo de la zona conocida como Ramon Castilla, expone una cobertura de potencia menor (~100 metros) encontrando el lecho rocoso a una profundidad de ~1800 m s. n. m., el error para este modelo es de 0.455 que es relativamente alto debido a que los valores de gravedad observados siguen un patrón irregular en la zona NW.

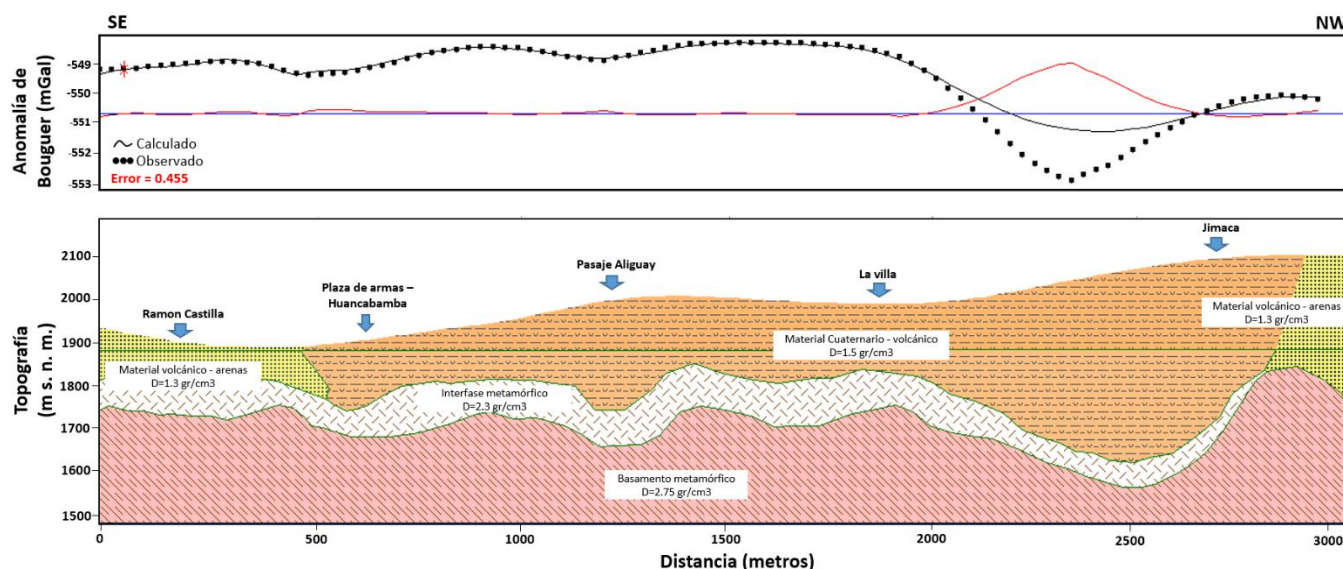


Figura 8. Modelo de profundidad y espesor sedimentario - SECCION B-B'. Parte inferior: Sección transversal que muestra las profundidades aproximadas (m) del material de cobertura y basamento, así como también las densidades propuesta y utilizadas (gr/cm^3). Parte superior: Comportamiento de la curva de anomalía de Bouguer con los valores calculados y observados según el modelo, además, de la estimación de error matemático.

5.5.5. Sección C-C'

La sección C-C' tiene una dirección de SW-NE, cruza en dirección perpendicular a los dos perfiles ya trabajados, presenta valores con anomalía residual que varía de -1.3 a +2.6 mGal y los valores de elevación rondan los 1885 a 2160 metros.

La figura 8 presenta la sección C-C', en la parte NE se puede observar anomalías positivas altas que corresponden a la zona de Cerro Colorado con valores de +0.4 mGal y se correlaciona con materiales volcánicos y cuaternarios, más hacia el SW encontramos un bajo gravimétrico con valores en promedio de -1.2 mGal ubicado en la zona del Cementerio de Huancabamba donde destacan los materiales cuaternarios fluvio aluviales, avanzando más al SW encontramos un aumento de valores de anomalía residual y probablemente se expliquen por el cambio de litología de material cuaternario a material volcánico más

compacto, también encontramos otro bajo gravimétrico de -1.3 mGal en la zona de la plaza de armas y el río Huancabamba y de acuerdo a la geología se correlaciona con materiales cuaternarios inconsolidados y por aporte del río Huancabamba, por último, en el extremo SW encontramos el más alto gravimétrico de la sección con valores de +2.6 mGal y se correlaciona con el cerro Witiligun que según la geología estaría compuesto de andesitas compactas y no se evidencia la presencia eventos morfodinámicos.

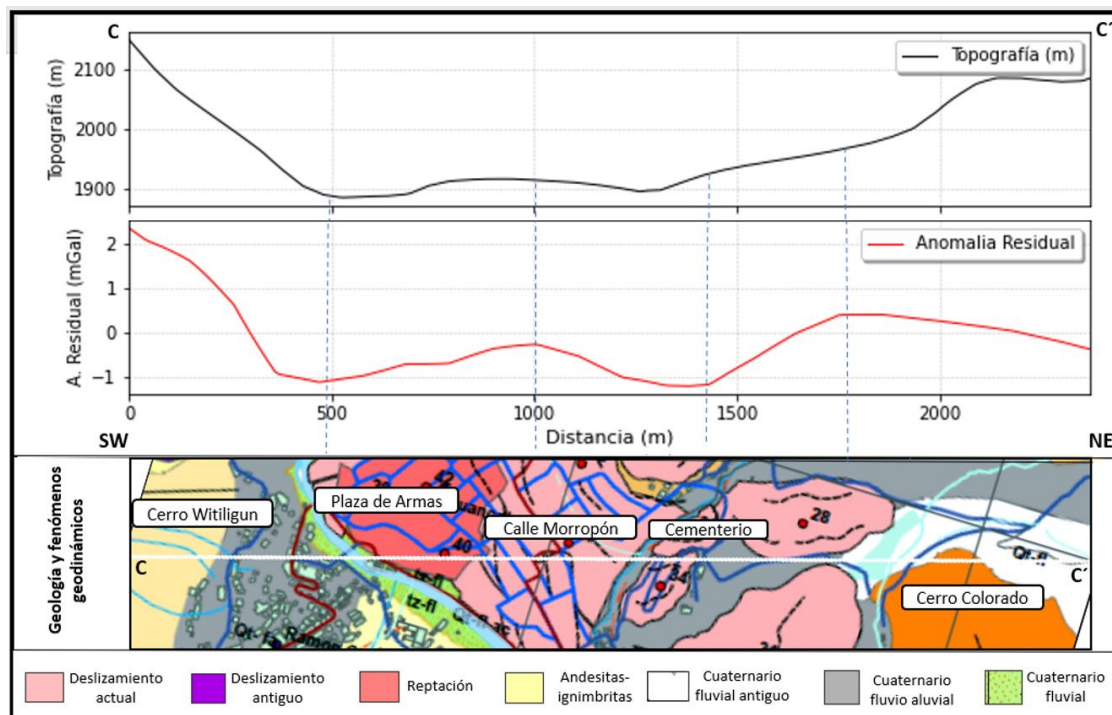


Figura 8. La sección C-C', correlacionando los afloramientos geológicos y los fenómenos geodinámicos (parte inferior) con la respuesta de la anomalía residual (curva roja) y la topografía (curva negra).

5.5.6 Modelado Sección C-C'

Los resultados del modelado se pueden observar en la figura 09; el modelo está parametrizado por dos zonas en profundidad importantes: el superior corresponde a material en su mayor parte sedimentario con aportes en menor proporción de materiales volcánicos (densidades de 1.1 a 1.5 gr/cm³) y el inferior que corresponde a rocas del basamento con un rango de densidades de 2.3 a 2.75 gr/cm³. Dentro de la sección encontramos zonas importantes como: en la parte NE predomina la presencia de material fluvio aluvial con una profundidad de ~1650 m s. n. m. (potencia de ~350 metros), otra zona importante ubicada debajo del lugar de emplazamiento del Cerro Witiligun al SW de la

sección, donde se puede deducir la presencia de materiales rígidos (densidad 2.4 gr/cm^3) hasta una profundidad de $\sim 1700 \text{ m s. n. m.}$ (~ 400 metros de potencia) esto sustentaría la nula presencia de deslizamientos en dichas zonas (Córdova A. 2019), la gravedad calculada coincide con el campo observado con bastante éxito, el cual se puede deducir por el pequeño error obtenido de 0.143 .

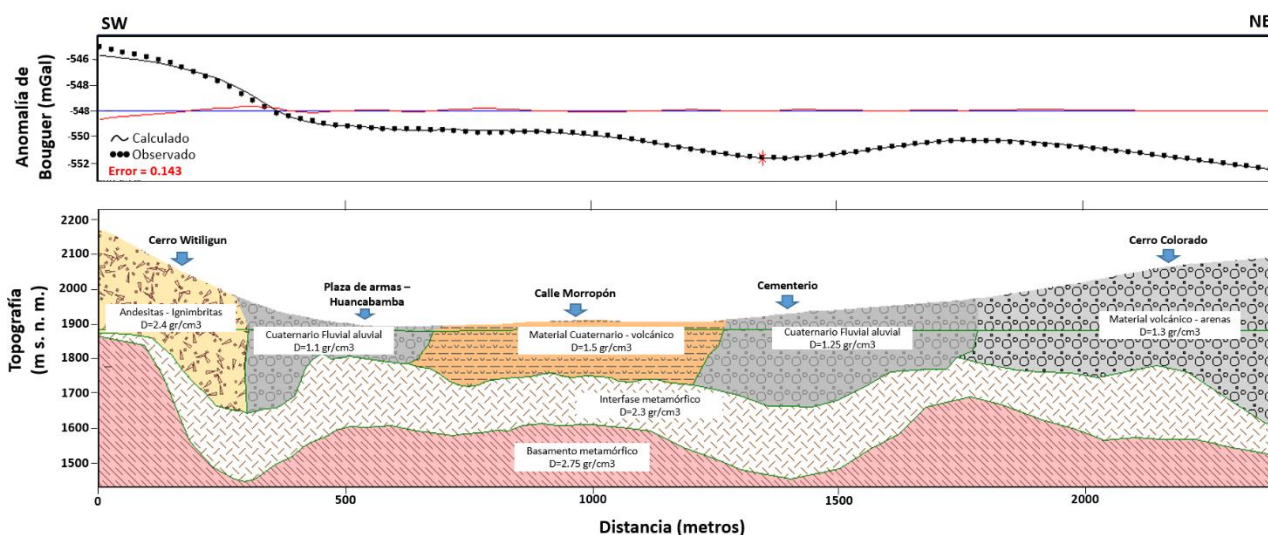


Figura 9. Modelo en profundidad de la sección C-C'. En la parte inferior observamos el ordenamiento y disposición propuesta de las estructuras geológicas con las densidades ensayadas para cada una. En la parte superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía gravimétrica y la respuesta geológica (con línea continua negra la anomalía calculada, con líneas de puntos representa a las anomalías observadas y la línea de color rojo presenta el error de ajuste).

CONCLUSIONES

El mapa de anomalías de Bouguer generado, muestran magnitudes que varían de forma somera con valores negativos de -545.5 hasta -553.0 mGal característicos de zonas montañosas y cuencas sedimentarias, las regiones con valores mínimos de -553.0 mGal se asocian a estructuras geológicas de baja densidad (ejemplo zona de Jimaca) y en caso contrario presenta valores máximos de -545.5 mGal (cerro Witiligun) y se asocia a una diferencia de densidad positiva, lo que indicaría una densidad mayor con respecto a su alrededor.

Con respecto a las anomalías de Bouguer residuales, la cual se obtuvo mediante el método de continuación analítica ascendente, los valores de gravedad que se obtuvieron van desde -2.6 a +2.6 mGal, los valores positivos se correlacionan con deslizamientos antiguos y la presencia de materiales sedimentarios y volcánicos y su valor más alto se da en el cerro Witiligun. En la zona de Jimaca presenta los valores más negativos a la vez tenemos esa tendencia en la plaza de armas, lo que indicaría la presencia de materiales con densidad baja y presencia de deslizamientos recientes y antiguos en menor proporción.

El modelamiento indica que tenemos la mayor profundidad del basamento en la zona de Jimaca con el rango de variación de 400 a 500 metros, además, obtenemos un promedio de profundidades del lecho rocoso que varían de 200 a 300 metros en toda la zona de estudio y se observa las densidades propuestas que varían de 1.1 a 1.5 gr/cm³ en la parte superficial y para el basamento metamórfico varia de 2.3 a 2.75 gr/cm³, estos valores de densidad están de acuerdo al criterio geológico y nos ayudamos de estudios anteriores de geología parte superficial, con eso nos hemos asegurado de que nuestros modelos compartan propiedades de la base de datos con las formaciones reales presentes en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- Avendaño, M.S., Araneda, M., (1988). Gravimetría de la cuenca de Santiago Parte I, Sector Padre Hurtado-Talagante. V Congreso Geológico Chileno. Vol.II, p. F153-170.*
- Blakely R (1996). Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 455 pp.*
- Córdova N., (2019). Evolución morfodinámica de las laderas montañosas y su relación con el desplazamiento del terreno en la ciudad de Huancabamba Piura Perú (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Piura, Perú.*
- Córdova A., (2019). Estudio morfodinámico del ámbito de la ciudad de Huancabamba y alrededores comprendiendo las zonas con afectación originada por el movimiento desplazatorio del terreno, provincia de Huancabamba, Piura. Informe técnico, Instituto Geofísico del Perú.*
- Dubois, J., Diament, M., (2001). Géophysique. Dunod, Paris, p.8*
- Geosoft (2015). Oasis Montaj v .8.5 (HJ), S tandard ed. Geosoft Inc. Toronto, Canadá.*
- Hammer S (1939) Terrain corrections for gravimeter surveys. Geophysics 9: 184-194.*
- Kennerley, J.B. (1973) - Geology of Loja Province Southern Ecuador. London: Institute of Geological Sciences, Overseas Division, Report 23, 34 p.*
- QGIS Development Team. (2013). QGIS geographic information system. Open Source Geospatial Foundation. See <http://qgis.osgeo.org>.*
- Mironov V (1977). Curso de Prospección Gravimétrica. Reverté. Barcelona, España. 542 pp.*
- Nettleton L (1976). Gravity and Magnetics in Oil Prospecting. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 464 pp.*
- Longman, I.M., 1959. Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. Journal of Geophysical Research. 64 (2): 2.351 - 2.355.*
- Rodriguez, I., Villareal, E., Valencia, M., Sánchez, V. (2012). Metalogenia, geología económica y potencial minero de la deflexión de Huancabamba: Noreste Perú. Boletín N° 29 del INGEMEET serie B, p 21-XX*
- Talwani, M., Worzel, J.L. y Landisman, M., (1959). Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture zone. Journal of Geophysical Reserch, 64(1): 49-58.*
- Telford W, Geldart L, Sheriff R (1992). Applied Geophysics. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 770 pp.*

