

MODELAMIENTO GEOFÍSICO 2D EN UN ÁREA DE LA VEREDA LOS ARRAYANES, MUNICIPIO DE FACATATIVÁ (CUNDINAMARCA)

2D geophysical modelling in an area of Los Arrayanes village, Facatativá town (Cundinamarca)

Yerson Pardo López¹ y Alejandra Vásquez²

¹ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá ² Servicio Geológico Colombiano.

Correspondencia: yjpardol@unal.edu.co; mavasquez@sgc.gov.co

Recibido: 20 de febrero de 2012 Aceptado: 15 de julio de 2012

Resumen

Este artículo muestra los resultados de un levantamiento gravimétrico llevado a cabo en un área del municipio de Facatativá para la Agencia Nacional de Hidrocarburos, en el ámbito del proyecto “Capacitación en Gerencia de Proyectos Sísmicos FF. MM. de Colombia”, como parte del convenio Piisco XXI entre la Universidad Nacional de Colombia, la Brigada Especial de Ingenieros de las Fuerzas Militares de Colombia y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

Se realizó el respectivo procesamiento de los datos adquiridos, se aplicaron rutinas de filtrado como continuación analítica y derivadas del campo potencial; se generó un modelo geológico con base en parámetros que se definieron previamente y a partir de las anomalías obtenidas. Estos resultados señalan variaciones que, de acuerdo con la estructura geológica de la zona, se relacionan con fallas presentes.

Palabras clave: gravimetría, modelamiento gravimétrico, anomalías, filtros, geología.

Abstract

This article shows the results of a gravity survey carried out in a town area Facatativá for the National Hydrocarbons Agency under the project “Training in management project of seismic FF.MM Colombia” as part of the agreement PIISCO XXI between National University of Colombia, Engineer Special Brigade of the Armed Forces of Colombia and the ANH.

We performed the respective processing of the acquired data and we applied routines of filter and the geologic model was generated based on pre-defined parameters and based on the results obtained. These results indicate that anomalous variations according to the geological structure of the area are related to faulting present.

Keywords: gravimetry, modelling, anomaly, filters, geology.

Introducción

La medición del campo de gravedad permite definir rasgos generales de la geología de un lugar gracias a las anomalías gravimétricas detectadas, ya que estas indican un déficit o exceso de masa.

La gravimetría es un método geofísico que logra caracterizar el subsuelo a partir de las distribuciones de densidad de masa de los materiales existentes con base en mediciones del campo gravitacional. La gravimetría tiene dos campos de acción: la geodesia y la geofísica.

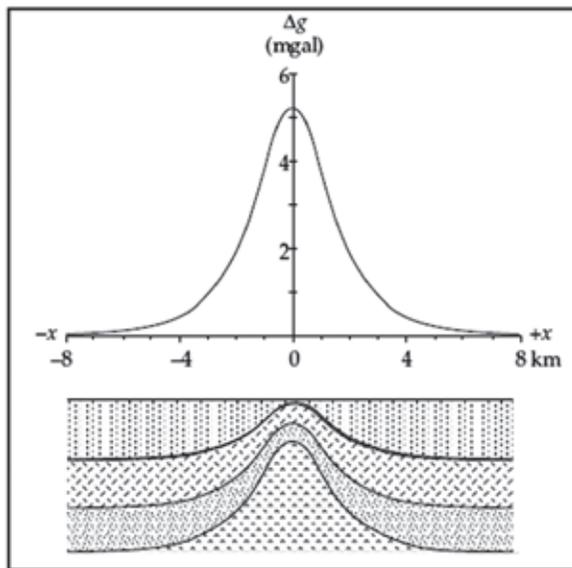
Desde la geodesia, la gravimetría se dedica al estudio de la forma de la Tierra; en la geofísica, la gravimetría se involucra con el análisis y estudio de la distribución de las masas del planeta.

Las variaciones de densidad detectadas por medio de la gravimetría ocurren como consecuencia de:

- *Contrastes laterales de densidad*, siendo estas variaciones de densidad consecuencia de la presencia de estructuras enterradas a cierta profundidad (figura 1).
- La presencia de *interfaces existentes* entre dos formaciones geológicas *de diferente densidad*.

A partir del concepto de gravimetría como medición de la gravedad en un punto, aparece otro conocido como *prospección gravimétrica*, donde esa medición de gravedad se realiza en muchos más puntos de la superficie terrestre, con el fin de obtener un mapa que ilustre la distribución de gravedad del área (Mironov, 1977).

Figura 1. Respuesta en la curva gravimétrica por contrastes de densidad.



Fuente: Lowrie, 2007.

El diseño y geometría de adquisición de los datos, es decir, el número de puntos de adquisición gravimétrica, depende directamente del tipo de estudio que se requiera realizar de acuerdo con el objetivo de exploración.

En un levantamiento gravimétrico lo que se busca es determinar las diferencias de gravedad con respecto a una estación base que ya tiene un valor de gravedad medido de forma absoluta.

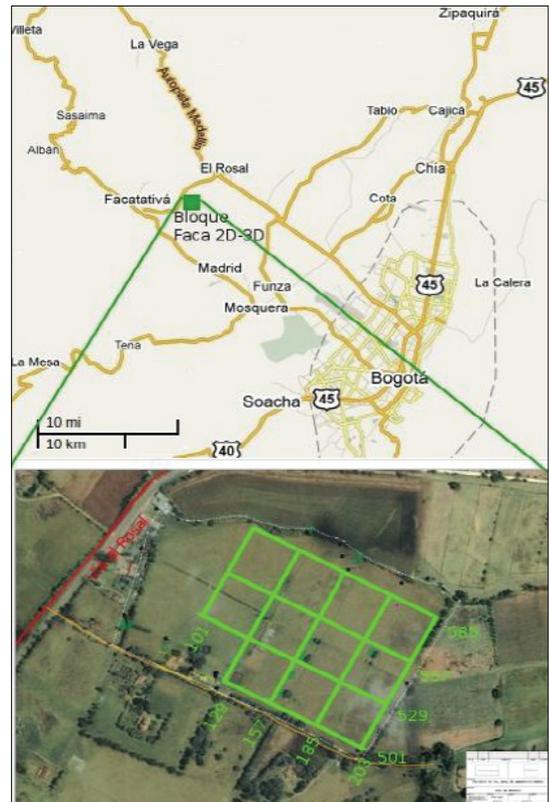
Este estudio logra describir cada una de las etapas relacionadas a la prospección gravimétrica, por lo cual es válido como una referencia en la adquisición y tratamiento de datos en cualquier estudio con uso de este método geofísico.

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la hacienda Los Naranjos, del municipio de Facatativá, ubicado en el extremo occidental de Bogotá (figura 2).

El proyecto se llevó a cabo en un área de 33.275 m² de baja complejidad topográfica, caracterizado por terreno ondulado y circundado por franja montañosa. La elevación se encontró en el rango de 2.614 a 2.642 metros sobre el nivel del mar.

Figura 2. Localización del proyecto Faca 2D.



Fuente: Imagen tomada y modificada de Google Earth.

Marco geológico

La región de Facatativá se encuentra ubicada en uno de los brazos del antiguo lago pleistocénico que conformaba la Sabana, rodeada por una serie de rocas del Cretácico.

En el municipio de Facatativá afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, cuyas edades están comprendidas entre el Cretáceo Superior y el Holoceno, relacionadas con la nomenclatura definida por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas) para la cuenca de la sabana de Bogotá y que se denominan Grupo Guadalupe, Formación Guaduas y Depósitos Cuaternarios (figura 3).

Geología estructural

La tectónica del área es compleja, se presentan fallas de rumbo y fallas de cabalgamiento, las primeras transversales a la dirección de las estructuras principales y las segundas longitudinales, con dirección dominante noreste; localizadas a lo largo de los flancos de los anticlinales y sinclinales.

Entre los principales rasgos se encuentran:

Pliegues

- *Sinclinal El Dintel*. Estructura con rumbo aproximado N20E, constituido en los flancos por rocas del Grupo Guadalupe, y en su núcleo la formación Guaduas. Su flanco oriental no se presenta completo ya que se hunde bajo la falla del río Sabaneta, el cierre se presenta al noreste de la cuenca Bojacá-Balsillas (Robles y Sáenz, 1991).
- *Sinclinal de Barroblanco*. Estructura con rumbo aproximado noreste, el núcleo formado por arcillolitas de la Formación Guaduas y en su flanco izquierdo alcanza a aflorar un poco la Formación Labor y Tierna. Esta estructura se encuentra afectada por una falla inversa, que corta el eje del sinclinal desplazándolo un poco al sureste.
- *Anticlinal de Mancilla*. Esta estructura se encuentra al noroeste del área, con una dirección aproximada N10E, formada por rocas del Grupo Guadalupe, en su núcleo se encuentra la Formación Arenisca Dura y en sus flancos las formaciones Plaeners y Labor y Tierna; esta última presenta sus flancos en contacto fallado con la Formación Guaduas.

Figura 3. Ubicación del municipio de Facatativá en el mapa geológico de Colombia.



Fuente: Ingeominas, 2007.

- *Anticlinal de Sabaneta*. Estructura paralela a las anteriores, con dirección aproximada noreste, conformada en su núcleo por la Formación Guaduas, afectada en sus dos flancos por fallas inversas, que ponen en contacto las rocas del Grupo Guadalupe del Anticlinal de Mancilla con la Formación Guaduas.

Fallas

- *Falla de Cerro Cuadrado*. Estructura inversa de cabalgamiento, corre con dirección aproximada de sur a norte, pone en contacto las formaciones Guaduas y Labor y Tierna. Esta falla levanta el bloque oriental que por su forma adquiere el nombre de Cerro Cuadrado (Robles y Sáenz, 1991).
- *Falla de Facatativá*. Estructura regional de dirección N45W, aproximadamente pasa al sur del municipio de Facatativá afectando los Depósitos Cuaternarios de la zona y siguiendo el curso del río de los Andes, hasta su nacimiento y se prolonga hasta la vereda El Corzo.
- *Falla de Río Sabaneta*. Falla inversa a vertical, que pone en contacto las formaciones Labor y Tierna y Guaduas, con una dirección aproximada N20E. En su movimiento hundió el flanco oriental del Sinclinal El Dintel y levanta el bloque oriental sobre el occidental.

Metodología

Este trabajo se realizó en tres fases: en la primera se *adquirieron* los datos en campo gravimétrico terrestre en el área de estudio; la segunda corresponde con el *procesamiento* de la información adquirida y en la última se realizó el modelamiento geológico que logra caracterizar en términos de distribución de densidad el subsuelo correspondiente a la zona que se está evaluando.

Adquisición

Antes de iniciar la adquisición de datos en campo se hizo una recopilación de la información geológica y cartográfica de la zona de estudio.

También, de manera previa, se efectuó la calibración de los gravímetros en la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia.

El trabajo de campo se inició con la ubicación topográfica y materialización de los puntos por parte de una cuadrilla de topografía en días previos.

Entre los días 9 y 14 de agosto de 2010 se llevó a cabo la adquisición gravimétrica en 101 estaciones definidas dentro de una grilla diseñada previamente.

Se tomaron mediciones con dos gravímetros de gravedad relativa tipo Worden Texas Instruments, uno de constante 0.0433 y otro con constante 0.0959, los cuales pertenecen al Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia. Estos gravímetros cuentan con una precisión de 0,1 mgal.

Este levantamiento gravimétrico se referenció a la Red Gravimétrica Nacional del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a partir de una estación base de referencia de esta red, la cual está ubicada sobre la vía Facatativá-Madrid en las siguientes coordenadas geodésicas: latitud 4° 48, 20' norte y longitud 74° 20, 49' oeste.

En el área de investigación se materializó el mojón geodésico llamado GPS-3, cuyas coordenadas son latitud 4° 49' 44.2'' norte y longitud 74° 18' 26.7'' oeste como punto para el amarre, al cual se le determinaron las coordenadas geodésicas y la altura.

Diseño de adquisición

La adquisición y procesamiento de los datos se realizó en el sistema de coordenadas Magna, origen WGS84, y las coordenadas cartesianas obtenidas con Proyección Gauss Kruguer origen Bogotá.

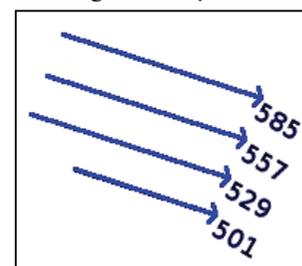
Líneas W-E:

Intervalo entre estaciones: 20 m

Total de líneas: 4

Longitud: las líneas 585, 557 y 529 tienen una longitud de 220 m; la línea 501 cuenta con una longitud de 165 m.

Figura 4. Leyendo



Fuente: Autores

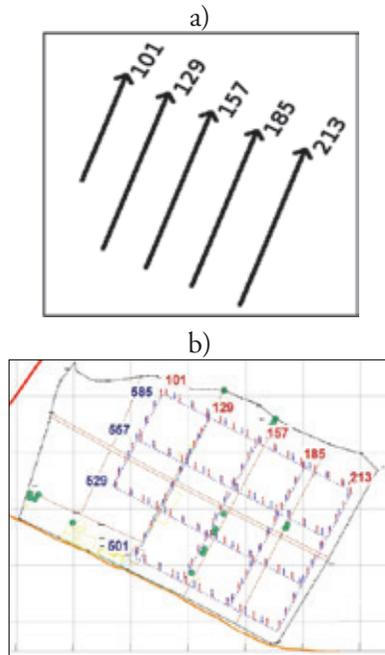
Líneas S-N:

Intervalo entre estaciones: 20 m

Total de líneas: 5

Longitud: las líneas 129, 157, 185 y 213 tienen una longitud de 165 m; la línea 101 tiene una longitud de 110 m.

Figura 5. Diseño de la grilla de adquisición.



Fuente: Autores

Se realizó la lectura de datos midiendo en 101 estaciones dispuestas en 4 líneas W-E y 5 líneas S-N, cada una formada por puntos-estaciones distanciados 20 metros entre sí. En cada estación se realizaron tres lecturas diales y se recopilaban los datos por escrito en una cartera de campo diseñada previamente; en esta se registraron el nombre de cada estación, las tres lecturas y la hora de cada lectura.

La adquisición de los datos se realizó con base en el método de *circuito cerrado*, el cual consiste en referir las lecturas de un grupo de estaciones a una sola estación base. El proceso es el siguiente: lectura en la estación base al comenzar el circuito, lectura de las estaciones que forman parte del circuito y lectura en la estación base al finalizar el circuito (ANH 2007).

El tiempo transcurrido entre la lectura en la estación base al comenzar el circuito y nuevamente allí al cerrar fue de dos horas.

El tiempo transcurrido entre cada medición en una misma estación fue de aproximadamente dos minutos, y el tiempo de lectura entre cada estación fue en promedio de diez minutos, tiempo en el cual el equipo se traslada, se nivela y se inicia la medición.

Procesamiento

Luego de haber realizado las mediciones en campo, es necesario corregir los diferentes efectos que puedan intervenir en el valor de las medidas de campo, con el fin de tratar con unos datos más depurados sin efectos temporales, geográficos o propios del equipo y así lograr finalmente obtener la anomalía de aire libre, anomalía simple de Bouguer y anomalía total de Bouguer.

Se aplicaron correcciones de tipo temporal (deriva y efecto mareas) y de tipo espacial (aire libre, Bouguer, topografía). Para estas correcciones se utilizaron diferentes paquetes de procesamiento, entre ellos hojas de cálculo Excel, Gravedat 3.7 y Oasis Montaj 6.4.2.

Para el cálculo de la gravedad teórica se usó la fórmula dada por la International Gravity Formula de 1967, cuya expresión es:

$$g_t = 978.03185 (1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi - 0.000023462 \sin^4 \varphi) \quad (1)$$

Para el cálculo de la corrección de Bouguer se usó una densidad de 2.67 g/cm^3 , estimada a partir del promedio de densidades en rocas sedimentarias.

Filtrado

Con el fin de distinguir las fuentes de anomalía y separarlas de aquellas que alteran o aportan ruido a la señal, se hace necesaria la aplicación de filtros que permitan trabajar con señales directamente relacionadas con las fuentes anómalas de interés, por lo cual el filtro que apliquemos dependerá de lo que queramos obtener.

Los datos adquiridos en campo se encuentran en el dominio del espacio y para poder aplicar los filtros necesitamos trabajar en el dominio de Fourier o dominio del número de onda.

Al convertir nuestros datos, que se encuentran en el dominio del espacio–tiempo, al dominio de las frecuencias, a través de la Transformada de Fourier se pueden realizar algunas operaciones y para el caso particular empezamos a trabajar con números de onda en unidades de ciclo/metro.

Matemáticamente la transformada de Fourier de una función en el dominio del espacio $f(x, y)$ está definido como:

$$f(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot e^{-i(\mu x + \nu y)} dx dy \quad (2)$$

Donde μ y ν son los números de onda en las direcciones x , y , respectivamente, medidos en radianes por metro si x , y , están medidos en metros.

Se aplicaron los siguientes filtros:

1. Primera derivada vertical.
2. Continuación analítica hacia arriba y hacia abajo.
3. Señal analítica.

Primera derivada vertical. La derivada vertical mejora la longitud de onda corta y suprime longitudes de onda larga; se realiza multiplicando la transformada de Fourier del mapa del campo potencial por el número de onda.

$$F_0 \left(\frac{\partial^n f}{\partial z^n} \right) = k^n * (f) \quad (3)$$

donde:

- F_0 = Campo de Fourier.
- f = Campo potencial.
- k = Número de onda.
- n = Orden de la derivada.

Con la aplicación de este filtro se obtiene el equivalente a un mapa de anomalías residuales, permitiendo acentuar y mejorar las anomalías de alta frecuencia o de baja longitud de onda debidas generalmente a fuentes someras que quedan enmascaradas por las anomalías de larga longitud de onda (regionales) que son debidas sobre todo a fuentes más profundas (Granja et al., 2005).

Continuación analítica hacia arriba y hacia abajo. Se basa en plantear matemáticamente la medición del campo potencial gravitatorio de un área ya revelada a niveles suce-

sivamente más elevados (continuación ascendente) o más profundos (continuación descendente). Permite extrapolar el valor que tendría un campo potencial a un determinado nivel diferente del observado.

Los resultados son mapas de anomalías más suaves en el primer caso o más agudas en el segundo, asimilables a componentes regionales o residuales, respectivamente.

Lo interesante de este filtro es que a mayor altura de la fuente las anomalías van disminuyendo de acuerdo con la profundidad y las dimensiones de la fuente, las anomalías de objetos pequeños y que yacen a poca profundidad decrecen con mayor rapidez que las anomalías de objetos más grandes y de mayor profundidad (Miranov, 1977).

Continuación analítica hacia arriba. La continuación a un nivel superior minimiza los efectos de las fuentes superficiales (longitudes de onda más cortas) y el ruido aparente. Se convierte así en una técnica de suavizado, lo cual facilita la obtención de las anomalías provocadas por fuentes profundas. Se define como:

$$L(k) = e^{2\pi k z} \quad (4)$$

donde:

z = distancia de continuación hacia arriba a partir del plano de observación.

k = número de onda.

- **Continuación analítica hacia abajo.** Permite resolver o discriminar el número de fuentes que provocan la anomalía. En el caso de que el nivel de proyección sea mayor al de profundidad del objeto de más entidad nos encontraremos con un campo con fluctuaciones extremas. El nivel en el cual se empiezan a dar las fluctuaciones podría en algunos casos indicarnos el nivel superior de la fuente.

Se define como:

$$L(k) = e^{-2\pi k z} \quad (5)$$

donde:

z = distancia de continuación hacia abajo a partir del plano de observación.

k = número de onda.

Señal analítica. Se define la señal analítica del gradiente vertical de la gravedad producida por una fuente en 3D de la siguiente manera:

$$|A(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} F(x,y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} F(x,y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} F(x,y)\right)^2} \quad (6)$$

donde:

$A(x,y)$ = Señal analítica.

$F(x,y)$ = Campo potencial.

La técnica de señal analítica permite resaltar las anomalías de gravedad producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda (Salem, 2005).

A partir de un modelo conocido, se evalúa su respuesta gravimétrica y posteriormente se le aplica señal analítica. Para ello es necesario evaluar las derivadas direccionales, ya que estas enfatizan las anomalías.

Modelamiento

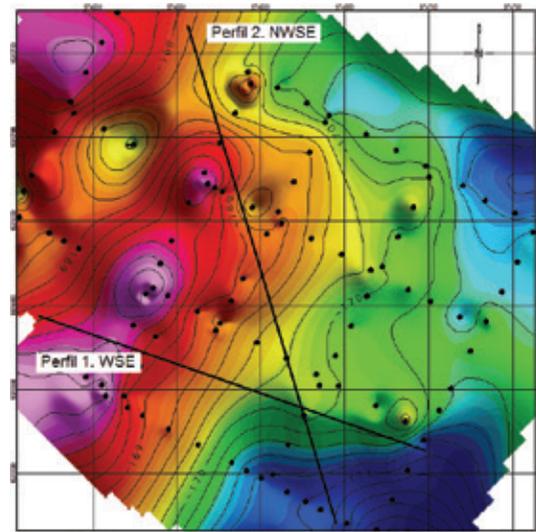
El modelamiento gravimétrico, que puede traducirse en un modelo de densidades, consiste en la disposición de las estructuras geológicas propias del subsuelo de la región a partir del análisis de las formas y densidades de los cuerpos presentes, ya que cada cuerpo o estructura geológica en un modelo gravimétrico se simplifica en figuras geométricas a las que se les asigna un valor de densidad, dimensiones y posición a lo largo del perfil.

El modelamiento se realizó utilizando la extensión GM-SYS v.5.01 (Geosoft Inc., 2007). Este software permite simular el comportamiento de las estructuras geológicas en profundidad, de tal manera que se ajusten a la respuesta gravimétrico-magnética lo más cercano posible (Gomes et al., 2008).

Se trabajaron varios perfiles para iniciar el modelamiento, pero se escogieron dos bajo el criterio del mayor contraste presente en sus trazados. El primero, con sentido W-SE, de aproximadamente 300 m, recorre de forma transversal las anomalías más significativas vistas en los mapas obtenidos; el segundo, en dirección NW-SE, tiene una extensión de 300 m aproximadamente, siendo así una diagonal sobre el extendido de la grilla. La figura 6 corresponde a la disposi-

ción de los perfiles sobre el mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer total.

Figura 6. Perfiles trazados sobre el mapa de anomalía de Bouguer total.



Fuente: Autores

La etapa inicial del modelamiento geológico consistió en el empleo de varias figuras geométricas y de densidades de cuerpos regulares con el fin de determinar el tipo de respuesta que se obtiene al modelar figuras básicas como esferas, cilindros, láminas, polígonos, etc., las cuales se asocian a estructuras geológicas conocidas.

Dado que la geología sedimentaria se caracteriza por la disposición de estratos homogéneos de forma paralela, se dispuso de franjas de distintas densidades una encima de otra sucesivamente hasta alcanzar el mejor ajuste, partiendo del hecho de que aquello que es más denso estará a mayor profundidad y lo menos denso se dispondrá en una ubicación más superficial.

Una vez dispuestas las figuras geométricas de dos dimensiones que logran caracterizar la disposición de los cuerpos de acuerdo con la curva de anomalía observada, es momento de analizar la densidad propia de la zona de estudio, a partir de la bibliografía recolectada para tal fin. Dado que el proyecto se encuentra en un ambiente sedimentario, las densidades propias corresponderán a valores entre 1.3 y 2.9 g/cm³.

El modelamiento contempla una etapa iterativa en la que se busca alcanzar el mejor ajuste entre las curvas observada y calculada de la anomalía gravimétrica, y en dicho caso

esta iteración logró acotar los rangos de densidad para el modelo propuesto, definiéndose así los siguientes valores:

Tabla 1. Parámetros iniciales de modelamiento.

	Densidad (g/cm ³)
	1 - 1,3
	1,5 - 1,8
	2 - 2,5
	2,6 - 2,7

Fuente: Autores

Hasta este punto el resultado ha sido producto de la iteración realizada progresivamente y se logró definir qué tipo de figura geométrica y por ende que estructura se asocian a la geología objeto de estudio, además del rango de densidades que mejor se ajusta a las anomalías observadas, pero es necesario ya revisar la documentación existente acerca de la geología regional de tal manera que se tenga concordancia al obtenerse resultados netamente locales.

Con la intención de desarrollar un modelo de caracterización del subsuelo, es importante contextualizar el proyecto en la región, para lo cual es necesario conocer buena parte de la información geológica de la región donde se ubique el proyecto, ya que esto nos permite hacer interpretaciones y análisis coherentes.

La figura 7 corresponde al mapa de esquema geológico del municipio de Facatativá a partir de un estudio realizado por Ingeominas; este esquema permite definir la geología estructural que caracteriza el subsuelo de la región, siendo una herramienta importante y necesaria para el modela-

miento. A partir de este esquema se pasó de trabajar con figuras geométricas a manipular curvas delineantes de estructuras litológicas.

Este proceso iterativo permite adquirir un grado de destreza en la manipulación de las figuras dispuestas bajo el perfil, logrando pasar de un modelo geométrico a un modelo de líneas curvas y coherentes con las anomalías observadas y, por supuesto, con las estructuras litológicas propias de la región.

El ajuste de la curva observada con la teórica está sujeto a la asignación de densidades de los cuerpos y a la extensión y forma de las curvas modeladas.

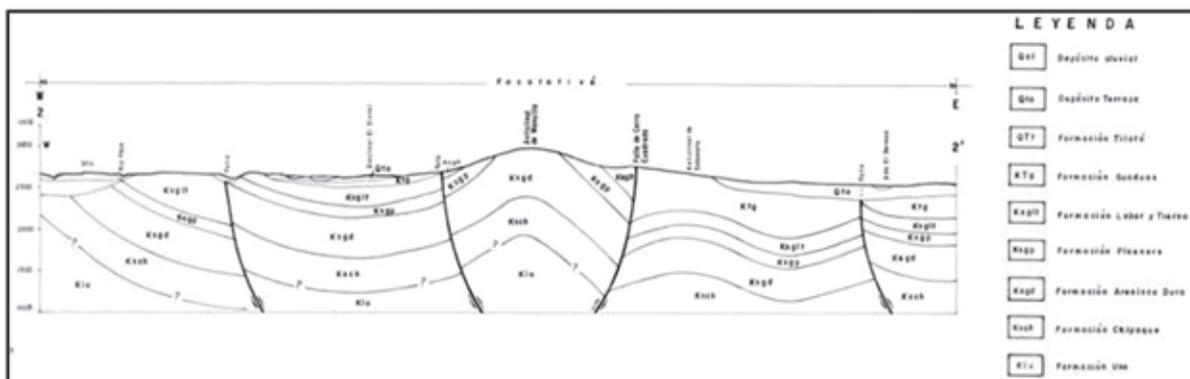
Finalmente, las densidades que mejor se ajustaron a las curvas anómalas se muestran en la tabla 2. Estos valores corresponden al mejor ajuste de las curvas de anomalía observada y calculada, tomados de tablas de densidad promedio propias de la formación sedimentaria de la región de la sabana de Bogotá.

Tabla 2. Parámetros finales de modelamiento.

	Unidad litoestratigráfica	Densidad (g/cm ³)
	Strc3. Depósitos coluviales recientes.	1,3
	Ksglt. Formación Labor-Tierna.	1,6
	Ksgp. Formación Plaeners.	2,2
	Ksgd. Formación arenisca dura.	2,63

Fuente: Autores

Figura 7. Corte geológico regional para el municipio de Facatativá.



Fuente: Ingeominas, 1995.

Criterio de anomalías y filtros

Para el modelamiento geológico, además de los parámetros descritos anteriormente, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos a partir de las anomalías gravimétricas y los filtros aplicados. A continuación se reseñan los criterios definidos a partir de los filtros y anomalías que participaron en el diseño de los modelos propuestos.

Anomalía de Bouguer total

El mapa de anomalía de Bouguer total contribuye en el modelo mostrando dos discontinuidades marcadas por fuertes anomalías, una ubicada al este de la grilla, caracterizada por valores anómalos máximos, y la otra ubicada al oeste, conformada por valores mínimos; estas discontinuidades indican cómo cambia la densidad en la estructuras que conforman el modelo.

Primera derivada vertical de la anomalía de Bouguer total

Del mapa de la primera derivada vertical de la anomalía de Bouguer total se observa un alto contraste que permite inferir la presencia de varios cuerpos anómalos. Notamos que los mayores valores de deriva vertical se agrupan al oeste de la grilla y, dado que la derivada nos indica variación, se infiere que esta zona presenta un mayor contraste de densidad de acuerdo con la distribución de las unidades litológicas. Al NO también se ubica un mínimo, lo cual implica un menor contraste que permite concluir que se trata de una anomalía baja producto de poca variación en las densidades de acuerdo con el contacto de los materiales que en esta zona reposan, o de hecho, se trata de un único material dispuesto en esta parte caracterizado por una baja densidad (figura 10).

Señal analítica de la anomalía de Bouguer total

De acuerdo con el mapa de la señal analítica se pueden tener los primeros indicios de las discontinuidades en la litología de la zona, esto confirmado por el modelamiento con geometría y dejando en evidencia fuertes contrastes que infieren la presencia de estructuras falladas (figura 11).

Continuación analítica hacia arriba 2.000 m

Este filtro muestra una tendencia regional de la respuesta gravimétrica, definiendo dos fuertes discontinuidades al

oeste y al este de la grilla que tienden a converger hacia el SO. Dado que se trata de una respuesta regional, estos contrastes se ven reflejados en el modelo con fallas continuas en profundidad (figura 12).

La aplicación de las reducciones, filtros e interpretación a nuestros datos obtenidos en campo permitieron definir:

- Unidades litológicas dentro de la zona de estudio.
- Estructuras causantes de anomalías y su posible geometría.
- Tendencias de aumento o disminución de anomalías.

Lo anterior permitió un modelamiento geológico “sólido”, y a partir de métodos no invasivos como en el caso de este proyecto se llegó a una caracterización del subsuelo que permite el modelamiento de dos fallas que se ajustan a las anomalías registradas; este resultado se corroboraría con un estudio sísmico realizado más adelante y con la geología estructural de la zona.

Resultados

En la figura 8 se presenta el mapa de gravedad observada, con un rango de valores que oscila entre un mínimo de 977383.5 mGales y un máximo de 977384.9 mGales.

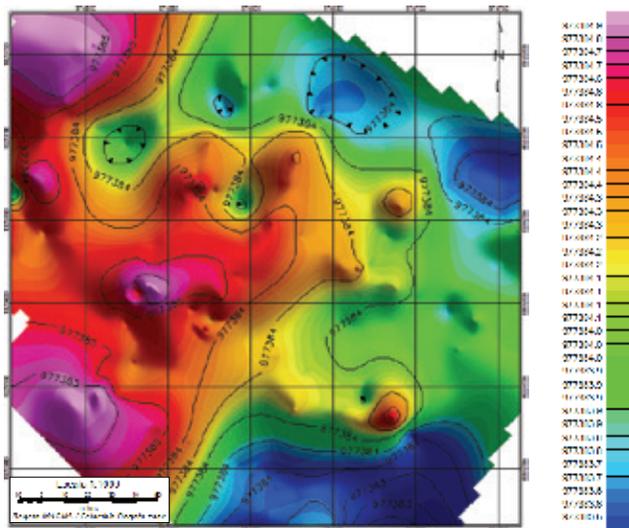
Se observa una tendencia de incremento en la gravedad observada hacia el oeste, alcanzando valores altos significativos al NW y SW. Por su parte, los valores de gravedad observada más bajos se localizan al sur, entrando en contraste en dirección SE-SW con los valores de mayor magnitud ya mencionados.

A partir del procesamiento de los datos se calcularon los valores de la anomalía de Bouguer total y se realizó el respectivo mapa usando el método de interpolación *kriging* y una densidad de 2.67 g/cm³ (figura 9).

Los valores anómalos están entre -171 y -168 miligales, marcando una tendencia SW-NE, tanto de valores bajos como en valores altos.

Las magnitudes de la anomalía gravimétrica señalan un aumento en sentido SE-NW, distinguiéndose una transición en el centro de la grilla que marca el contacto de la diferencia de densidades, pasando de un material menos denso a uno de mayor densidad.

Figura 8. Mapa de gravedad observada.



Fuente: Autores

En la parte este de la grilla son notables los valores más bajos de anomalía de Bouguer total (tono azul), evidenciando estructuras con menor densidad o quizás un déficit de masa que asociamos hipotéticamente con las muestras encontradas en campo que aparentan la presencia de un antiguo drenaje de aguas lluvias, un desagüe o un escurriero ubicado justamente donde se marca la tendencia de valores bajos de anomalía de Bouguer total, pero lo anterior se comprobó con el modelo generado.

Figura 9. Mapa de anomalía de Bouguer total.

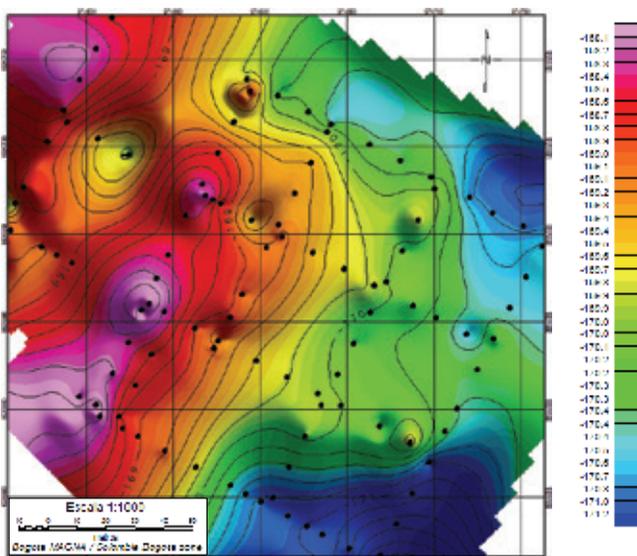
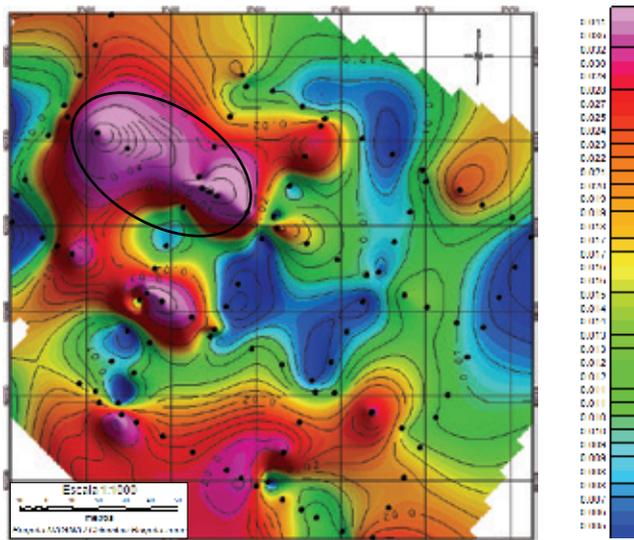


Figura 11. Mapa de señal analítica de la anomalía de Bouguer total.



Fuente: Autores

Encontramos valores altos de señal analítica que están entre los 0.033 y 0.055 miligales, concentrados principalmente en la zona delimitada por el círculo negro.

La continuación analítica hacia arriba (figura 12a), realizada cada 1.000 metros en dos intervalos nos muestra que los valores de anomalía de Bouguer total más altos son realmente significativos y que esa lectura de altas densidades es registrada aun desde observaciones a mayor altura, pues se conserva la geometría de la anomalía, infiriendo que existe una fuente profunda.

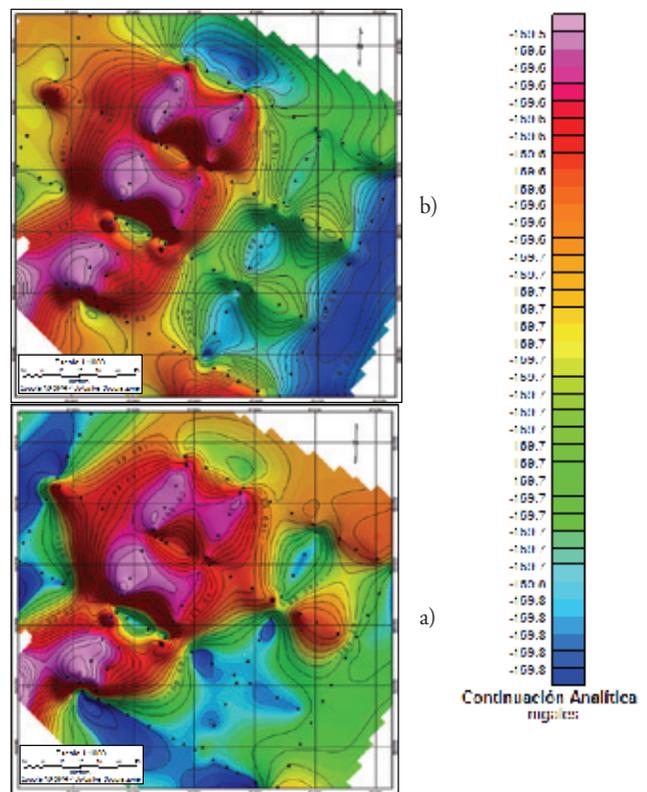
Los valores más bajos de la anomalía de Bouguer total ubicados originalmente al sur se ven mayormente afectados, pues se dejan de registrar al aumentar en altura, indicándonos que no corresponden a estructuras de tamaño significativo.

Las anomalías observadas fuertemente marcadas tienen su respuesta en el hallazgo de dos fallas geológicas que recorren la grilla en la misma dirección de estas, ya que el contraste de densidad asociado al contacto entre estructuras de composiciones y edades diferentes genera estas fuertes anomalías gravimétricas, llevándonos a inferir la alta correlación entre las observaciones y las estructuras geológicas presentes en la zona de estudio.

A continuación se presentan los modelos geológicos a los que finalmente se llegó después de realizar el análisis geofísico-geológico y de trabajar en las rutinas de modelamiento, desde cuerpos geométricos hasta formas consistentes con

la geología del sitio en el que se logra detallar el modelo de fallas presentes y que se registran por respuesta de los valores de gravedad observados, por las disposiciones de las densidades y por las formas litológicas en la zona de estudio, convirtiéndose así cada modelo en una buena aproximación a la geología del sitio determinada desde la geofísica.

Figura 12. Mapa de la anomalía de Bouguer total con continuación analítica hacia arriba a). 1.000 m (arriba), y 2.000 m (abajo) b).



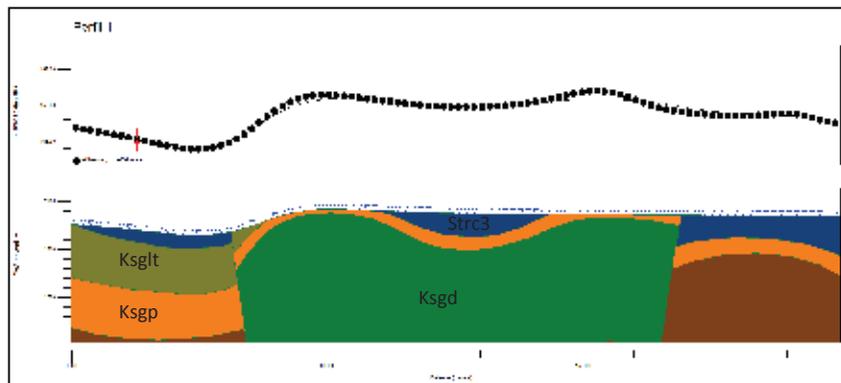
Fuente: Autores

Los valores más altos de densidad corresponden a unidades litológicas consolidadas correspondientes al Terciario, entre ellas cuarzoarenitas y areniscas; las unidades menos densas están asociadas a depósitos conformados por materiales no consolidados y de alta porosidad.

La figura 13, corresponde al perfil trazado en dirección W-SE sobre la grilla de adquisición y la figura 14 al perfil en dirección NW-SE.

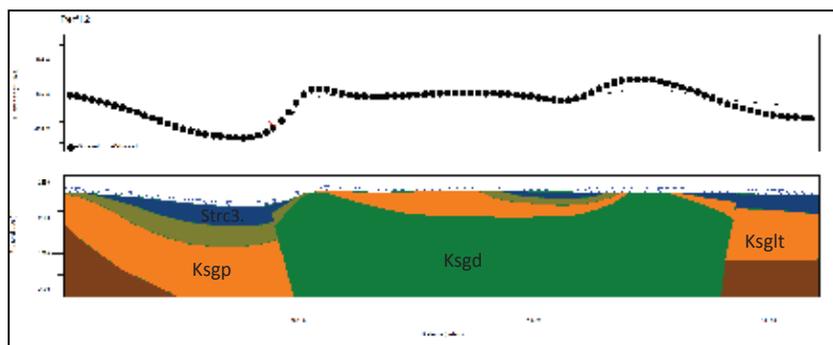
En estas figuras se identifica, en el primer recuadro, la curva observada de anomalía de gravedad (puntos) contra la curva teórica (línea continua), y en el segundo, el modelo geológico que mejor se ajustó a los datos.

Figura 13. Modelo gravimétrico del perfil 1 (W-SE). En la parte superior se muestra la curva de anomalía de Bouguer observada y la respuesta calculada del modelo. En la parte inferior se muestra el modelo de densidades ajustado.



Fuente: Autores

Figura 14. Modelo gravimétrico del perfil 2 (NW-SE). En la parte superior se muestra la curva de anomalía de Bouguer observada y la respuesta calculada del modelo. En la parte inferior se muestra el modelo de densidades ajustado.



Fuente: Autores

La figura 13 muestra el modelo propuesto de densidades, el cual se caracteriza por un contraste fuertemente marcado dada la disposición de los cuerpos litológicos, y con ello la disposición de sus densidades. Este perfil, trazado en dirección W-SE, revela una fuerte concavidad hacia el oeste, asociada a la depresión registrada en la topografía y a la composición litológica de esta (sedimentos aluviales).

Al este del perfil se presenta una continuidad de valores mínimos alrededor de -165 y -166 mgales. Es notorio el resultado en las anomalías que produce el contacto de materiales altamente densos (dentro del rango propio del medio) con aquellos no tan densos.

La curva es ajustada con un error de 4.9%.

El perfil 2 (figura 14) correspondiente al trazado en dirección NW-SE se modeló de acuerdo con el mejor ajuste obtenido a partir de la distribución de densidades ya mencionadas.

La forma y espesor de las capas que componen este perfil son similares a las del perfil 1, al igual que la curva de la anomalía observada, que define una concavidad al oeste del perfil, asociado de igual manera a la topografía, donde se registran valores mínimos cercanos a los -168.8 mgales.

En esta parte del perfil vemos que dicha fluctuación en los valores anómalos responde propiamente a la topografía que presenta una depresión, y según lo observado en campo se debe principalmente a un drenaje liviano que recorre esta zona del perfil. Inicia un ascenso en la curva, alcanzando un valor de -164.53 mgales propio del cuerpo litológico, que aflora con una densidad alta de 2,63 g/cm³.

La curva empieza a mantener una tendencia horizontal y de nuevo asciende hasta alcanzar los valores máximos presentes en este perfil, de -163.72 mgales, que resultan del mayor contraste de densidad hallado en este perfil, dándose un contacto entre materiales de densidad fuertemente diferen-

ciadas, uno de 1.3 g/cm^3 y otro de 2.63 g/cm^3 . Finalmente, la curva cae al este del perfil, llegando a los -167.101 mgals . La curva es ajustada con un error de 4.9% .

Discusión de resultados

Con base en los mapas y perfiles presentados, se resaltan las siguientes observaciones:

El mapa de gravedad observada muestra dos zonas definidas por valores que contrastan entre ellas. Por un lado, al W se tiene un región marcada con valores altos y hacia el E la presencia de valores más bajos se hace evidente, aun cuando la zona de estudio no presenta en general una alta variabilidad en valores observados de gravedad.

Los valores de anomalía de Bouguer total corresponden a un rango entre -168 y -171 miligales, lo cual se confirma con los valores obtenidos por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, entidad que en 2010 generó el mapa de anomalía de Bouguer total para Colombia y muestra que estos valores bajos se presentan en la zona Andina, especialmente en las cuencas sedimentarias, entre ellas la cuenca de la Sabana de Bogotá, a la cual pertenece la zona de referencia.

La herramienta de señal analítica, como filtro aplicado a los campos potenciales medidos, nos brindó excelentes resultados al mostrarnos la ubicación y las dimensiones de las anomalías presentes en el área de estudio.

Dado que el área de estudio no abarca grandes extensiones, y aun encontrando algunos contrastes interesantes, los filtros aplicados dejan ver con mayor detalle que, en efecto, la densidad en la zona no es homogénea y que por tanto es válido definir distribuciones de densidad acordes a la geología regional, como en el caso del filtro de continuación analítica, que, incluso a una altura de observación bastante superior a la real (1.000 y 2.000 m), evidencia que las anomalías registradas en el mapa de Bouguer total corresponden a cuerpos profundos que pueden llegar a hacer parte de una anomalía regional que solo podrá ser corroborada en un estudio de mayor extensión.

Con el fin de obtener la imagen que mejor representa las distribuciones de densidad se hizo uso del modelamiento inverso, basado en el siguiente planteamiento: conocida la fuente y la respuesta que produce, hay que caracterizar las

propiedades del medio. Pero previo a la inversión, se modeló de manera directa, manipulando cuerpos geométricos que lograran definir las respuestas obtenidas por observación del campo gravimétrico ayudando en el ajuste del modelo con la geología regional.

Conclusiones

Los gradientes, o variaciones gravimétricas observadas, corresponden a respuestas de estructuras de carácter regional, que necesariamente implican un estudio con una extensión de área superior al estudiado para definir con mayor detalle su geometría, sus lineamientos y su interacción con las demás estructuras.

El trabajo de campo permitió tener resultados más confiables a la hora de procesar datos ya que se logra tener una visión clara del terreno y sus estructuras, garantizando un sustento fuerte a los resultados obtenidos.

La iteración más confiable en la realización del modelo se genera invirtiendo los datos de los métodos potenciales a la geología existente, tanto de Ingeominas en su estudio hidrogeológico de la sabana de Bogotá, como información recopilada de la empresa privada; esto reafirma la calidad de la información recopilada en la sabana de Bogotá pero estudios como este permiten fundamentar la geología a un nivel local aportando nueva información para la prospección del subsuelo.

A partir de este método potencial y su modelamiento directo se pueden inferir estructuras geológicas como fallas, lo que resulta de gran utilidad para estudios geofísicos futuros de sísmica, geoeléctrica y demás, con el fin de optimizar la documentación y la investigación geocientífica de una zona de estudio.

El método geofísico usado en este proyecto se caracteriza por ser operado de manera rápida y sencilla, sin alterar la naturaleza propia del medio al ser un método no invasivo, lo que se convierte en una ventaja alta en etapas geofísicas exploratorias, pues se reducen riesgos, tiempos y costos.

Agradecimientos

Agradecemos al doctor Luis Castillo, docente de la Universidad Nacional de Colombia por su colaboración y orientación en el desarrollo de este trabajo; al profesor Andrés

Cárdenas por su invitación a participar en este proyecto; y al coronel Gómez, del batallón de Sísmica del Ejército Nacional de Colombia, por su amable disposición y ayuda en la logística de nuestra investigación.

Referencias

- Agocs, W. (1951). Least-squares residual anomaly determination. *Geophysics*, 686-696.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH. (2009). *Conceptos básicos de geología y geofísica*.
- ANH (2009). *Consultoría para la adquisición, cubrimiento completo, procesamiento e interpretación sísmica para el programa sísmico Línea Transandina 4B 2D/09*.
- ANH (2010). *Magnetic total intensity anomalies map for Colombia*.
- ANH (2010). *Mapa de anomalía de Bouguer total de la República de Colombia*.
- Audemard, F.; Ollarves, R. y Díaz, G. (2006). El georradar como herramienta para la definición de fallas activas: aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela. *Revista Facultad de Ingeniería*, 21(4), p. 57-70.
- Batista, J.; Rodríguez, A.; Blanco, J.; Proenza, J. (2002). Estructura del macizo ofiolítico de Moa (NE de Cuba) según la interpretación del levantamiento aeromagnético 1:50 000. *Acta Geológica Hispánica* 37(4) 369-387.
- Caicedo, B., Mancera, E. y Alfonso, J. (2008). Aplicaciones del georradar de subsuelo en obras civiles. *Revista de Ingeniería* 18, 32 a 40.
- Cantos, J. (1987). *Tratado de prospección geofísica aplicada*. 3ª edición. Madrid, España: Escuela de Minas.
- Cuevas, J.; Díaz, L. y Polo, B. (2010). Regionalización gravimétrica en el Caribe centro-occidental (i): nuevos mapas de anomalías de Bouguer total y aire libre de Cuba, a escala 1: 500 000. *Memorias Geomin 2001, La Habana, 19-23 de marzo*, 93-104.
- Dobrin, M. B. y Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill.
- Duzgit, Z.; Hisarli, N. y Orbay, N. (2006). Correlation between gravity and magnetic anomalies of Western Anatolia and its relation to tectonic structures. *Earth Planets Space* 58, 943-949.
- Durán, E. (2007). *Inversión gravimétrica 3D en el Graben de Espino*. (Tesis de grado), Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- Giménez, M.; Martínez, P.; Ruiz, F. e Introcaso, A. (2005). Auscultamiento de estructuras geológicas en la cuenca chacoparanense a partir de la aplicación de métodos potenciales. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (2), 311-315.
- Giraldo, R. (2010). *Geoestadística. Aplicación en la caracterización de yacimientos*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- GM-SYS Profile Modeling. *Gravity & Magnetic Modeling Software for Oasis montaj™. User Guide V 4.1*. Geosoft Inc. Toronto, Canadá.
- GPR Slice V6.0. (2009). *Ground Penetrating Radar Imaging. User's Manual.*, California.
- Granja, J. L.; Carbó, A. y Muñoz-Martín, A. (2005). *Análisis de mapas de anomalías gravimétricas en el borde NE de la placa caribe*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Ihaka R. y Gentleman, R. (2006). R: a language for data analysis and graphics. Artículo. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5, 299-314.
- Ingeominas (2004). *Mapa geológico para ingeniería Sabana de Bogotá. Plancha 227-II-C*. Bogotá, Colombia.
- Ingeominas. *Atlas geológico de Colombia. Plancha 5-09*.
- Ingeominas. (1995). Estudio hidrogeológico de la periferia de Bogotá y en algunas poblaciones cercanas para el abastecimiento de agua. *Perfiles hidrogeológicos A-A', B-B', C-C', D-D', municipio de Facatativá*.
- Lazaro, R. (2001). *Prospección gravimétrica para zonas urbanas: aplicación al caso de estudio del subsuelo de la ciudad de Barcelona*. (Tesis doctoral inédita). Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Longman, I. M. (1959). Formulas for Computing the Tidal Accelerations due to the Moon and the Sun. *Journal of Geophysical Research*, 2351-2355 (6ª ed.).
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge, RU: Cambridge University Press.
- Maya, Buenaventura y Salinas. Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas. Bogotá, Colombia. 2004.
- Mironov, V.S. Curso de Prospección Gravimétrica. Ed. Reverté. Barcelona, España. 1997.
- Montesinos, E., Vieira, R. Detección gravimétrica de anomalías del subsuelo en una zona urbana afectada por hundimientos. Artículo. *Revista Física de la Tierra*, Número 8. Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM). Facultad de Ciencias Matemáticas, Ciudad Universitaria, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 25 p. 1996.

- Montoya, D., Reyes, G. Geología de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS. 104 p. 2005.
- Namibighian, M. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Artículo, revista Geophysics; número 37, p. 507-217. 1974.
- Oasis Montaj. Processing, Analysis and Visualization System for 3D Inversion of potential field data for Oasis Montaj v7.1. Tutorial and User guide. Geosoft Inc. Toronto, Canadá. 73 p.
- Oasis Montaj. Quick Start™ Tutorials. Geosoft Inc. Toronto, Canadá. 297 p.
- Oldenburg, D., LI, Y. Inversion for applied geophysics: a tutorial. University of British Columbia, Vancouver, Canadá. p. 85. 2005.
- Rivera, A. Un algoritmo de transformada Hough para el análisis de radargramas. Tesis, maestría en ciencia. Universidad Autonoma de Mexico. p. 121. 2008.
- Ruiz, C. Inversión Sísmica y Estudio de Atributos Sísmico Post Apilamiento de los niveles I3 y TU de la formación oficina en el Campo Guico Guara, Estado Anzoátegui. Trabajo de Grado. Inédito. Ingeniería Geofísica. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela. 83 p. 2007.
- Sánchez, N., Gómez, D., Bergamin, J.F., Tejero, R. Aplicación del análisis espectral para la separación regional-residual de anomalías gravimétricas y aeromagnéticas en el SO del Macizo Ibérico. Artículo, revista Geogaceta número 23. Madrid, España. 1998.
- Seigel, H. O. "A Guide to High Precision Land Gravimeter Surveys". 1995.
- Smith, R., Thurston, J., Dai, T., MacLeod, I. ISPI The improved source parameter imaging method. Artículo, revista Geophysical Prospecting; número 46, p. 141-151.1998.
- Talwani, M., Lamar, J., Landisman, M. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine fracture zone. Artículo, revista Journal of Geophysical Research. Volumen 64, número 1. Pag 49-59. 1959.
- Udías, A., Mezcuca, J. Fundamentos de Geofísica. Ed. Alhambra. Madrid, España. 1986.
- Vasquez, M.A., Pardo, Y. Adquisición, procesamiento y modelamiento geofísico 2D en un área de la vereda Los Arrayanes, municipio de Facatativá (Cundinamarca). Tesis de pregrado en Ingeniería Catastral y Geodesia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 2011.
- Won, I., Bevis, M. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. Artículo, revista Geophysics, volumen 52, número 2; p. 232-238. 1987.
- Xiong, Li Hans-Jurgen Gotzez. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. Artículo, revista Geophysics volumen 66, número 6. 2001.

