

MODELO ESTRUCTURAL DE LA FALLA DE SOAPAGA A PARTIR DE CORRELACION ESPECTRAL DE ANOMALIAS GRAVIMETRICAS Y MAGNETICAS EN LA CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA

Diana Marcela Rodríguez¹, Orlando Hernández¹, Andreas Kammer¹

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es la aplicación de correlación espectral, índices locales de favorabilidad y el teorema de Poisson, cómo métodos numéricos para el procesamiento e interpretación de datos de campos potenciales asociados a características estructurales, estas técnicas son aplicadas a datos gravimétricos y magnéticos, teóricos y reales de la Falla de Soapaga, ubicada en el Departamento de Boyacá, en la Cordillera Oriental. Los datos teóricos de la Falla de Soapaga se obtuvieron a partir de secciones de modelamiento geológico y estructural. Los datos reales de la Falla de Soapaga incluyen datos compilados de gravedad y datos magnéticos adquiridos a lo largo de cuatro perfiles perpendiculares a la dirección de buzamiento de la Falla. A partir de todo esto, la geometría de la falla y sus características estructurales se obtuvieron por medio de modelamiento directo e inverso. Esta metodología permite resaltar las anomalías asociadas con la densidad y contraste de susceptibilidad magnética que ocurren a lo largo de la zona de la Falla de Soapaga. Además, este trabajo ofrece un enfoque cuantitativo para establecer la relación entre la gravedad y las anomalías magnéticas, con el apoyo de una rigurosa metodología matemática en lugar de la interpretación de los datos aislados para comprender mejor las respuestas gravimétrica y magnética, de afloramientos y características estructurales ocultas.

Palabras clave: Correlación espectral, gravedad, magnetometría, Falla de Soapaga.

STRUCTURAL MODEL OF THE SOAPAGA FAULT FROM SPECTRALLY CORRELATED GRAVITY AND MAGNETIC ANOMALIES, EASTERN ANDEAN MOUNTAINS, COLOMBIA

ABSTRACT

The aim of this research is to apply spectral correlation, local favorability indexes and Poisson's theorem as numerical methods for data processing and interpretation of potential field data associated with structural features; these techniques are applied to theoretical and real gravity and magnetic data of the Soapaga fault, located in the Boyacá Department, in the eastern Andean Mountains. Theoretical data of the Soapaga fault was obtained by forward modeling of geological and structural sections. Real data of the Soapaga fault included compiled gravity data and acquired magnetic data along four profiles oriented perpendicular to the fault. As a result, the geometry of the fault and its structural characteristics were obtained by interactive forward and inverse modeling. This methodology allows highlighting anomaly trends associated with density and magnetic susceptibility contrast that occur along the Soapaga fault zone. Additionally, this work provides a quantitative approach to establish the relationship between gravity and magnetic anomalies, supported by a rigorous mathematical methodology rather than isolated data interpretation to better understand the gravity and magnetic signatures of outcropping and hidden structural features.

Keywords: spectral correlation, gravity, magnetic, Soapaga Fault

¹Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá
dimarcero@gmail.com, ohernandezp@unal.edu.co, akammer@unal.edu.co
Ciudad Universitaria, Edificio Manuel Ancizar of 335, Telephone: 571 3165000 ext 16568 Fax 571 3165390

INTRODUCCION

El área de estudio corresponde a la Cordillera Oriental, ubicada dentro del Departamento de Boyacá, Colombia. La cual limita al Norte con el Municipio de Susacón, al sur con el Municipio de Gámeza, al occidente con Duitama y al oriente con el Municipio de Jérico y el Páramo de Pisba. El polígono cubre un área total de 1226 Km² aprox. El cual es atravesado por la Falla de Soapaga en sentido sur-oeste nor-este. Ver FIGURA 1.

El problema planteado fue la utilización de análisis numéricos que ayudaran a determinar las características geológicas de las fallas, mediante una integración de modelos geofísicos y métodos matemáticos. En este caso la Falla de Soapaga por disponibilidad de información previa e inquietudes sugeridas durante un proyecto desarrollado entre la Universidad Nacional de Colombia y la Agencia Nacional de Hidrocarburos. De esta forma, el objetivo de este estudio fue modelar las características estructurales de la Falla de Soapaga y su incidencia en el control de espesor de sedimentos y profundidad del basamento cristalino mediante la correlación espectral de campos potenciales, incluyendo índices de favorabilidad y basados en el Teorema de Poisson.

La metodología desarrollada para dar respuesta al problema y objetivo planteado fue inicialmente, escoger un modelo geológico reciente de la zona, determinar cual sería la respuesta inicial de los campos gravimétrico y magnético mediante el modelamiento directo sobre perfiles estructurales preexistentes en la zona de estudio, diseño y adquisición de datos de campo magnético sobre cuatro perfiles perpendiculares a la Falla de Soapaga, procesamiento de los datos de campo, aplicación de los coeficientes de correlación espectral, procesos de normalización e índices de favorabilidad a cada uno de los set de datos trabajados y por ultimo la inversión de las anomalía de campos potenciales para la generación de los modelos 2D de la Falla de Soapaga a lo largo de la zona.

MARCO GEOLOGICO

Teniendo en cuenta que lo mejor era tener el modelo más reciente y certero de la zona, se trabajó con el mapa geológico elaborado por el Doctor A. Kammer, para un convenio entre la Universidad Nacional de Colombia y la Agencia Nacional de Hidrocarburos y que aparece publicado en la página de la ronda Colombia 2008. FIGURA 2.

El contraste de colores al lado oeste de la Falla con respecto al lado este, indica una gran diferencia entre las edades litológicas de las formaciones que se encuentran en contacto a través de la Falla de Soapaga, al lado oeste se encuentra el Macizo de Floresta, compuesto por rocas que van desde el precámbrico hasta el triásico-jurásico, son de origen ígneo y metamórfico, mientras que al lado este de la Falla se encuentran rocas que van desde el cretácico inferior, hasta el paleógeno, en su mayoría de origen sedimentario.

Adicional a esto se puede observar que es una zona estructural compleja, al oeste con gran cantidad de fallas noreste suroeste y al este fallas con la misma dirección, casi paralelas a la Falla de Soapaga, intermedio de las cuales se encuentran anticlinales y sinclinales cuyos ejes también se encuentran paralelos a la Falla en las zonas vecinas. En el mapa se puede observar que la Falla de Soapaga esta cartografiada como una falla inversa que buza hacia el este.

METODOLOGIA

Para determinar la respuesta gravimétrica y magnética de este tipo de estructura se utilizaron algunos de los perfiles realizados por el Doctor A. Kammer en el área de estudio, los cuales se encuentran amarrados a las líneas sísmicas SOA-2005-24, SOA-2005-106, SOA-2005-22, PDR-88-16, SOA-2005-18, SOA-2005-14 y PDR-88-06. Para el estudio se utilizaron solo los perfiles llamados Sátiva, Socotá, Divaquia y Buntia. Ver FIGURA 3. Para el modelamiento directo se mantuvieron constantes los espesores y la geometría planteada por el autor, se aplicaron densidades y susceptibilidades a las formaciones, teniendo en cuenta su litología; algunas de ellas extraídas de los registros de densidad, de los pozos corrales y Bolivar-1. Se utilizaron estaciones cada 300m y una densidad de 2,67g/cm³ para la corrección de Bouguer.

A partir de los resultados del modelamiento directo se diseñó una adquisición que permitiera evidenciar el comportamiento geofísico de la Falla, y teniendo en cuenta que en el modelamiento directo el cambio de pendiente en la respuesta gravimétrica y magnética no era significativo, se plantearon perfiles lo más cercanos posible a los realizados por el Doctor A. Kammer, que tuvieran estaciones cada 200m y para mejorar la resolución cerca de la Falla, un kilómetro antes y después de ella, estaciones cada 50m. La ubicación de los 4 perfiles escogidos para el modelamiento directo y la adquisición se encuentran en la FIGURA 3.

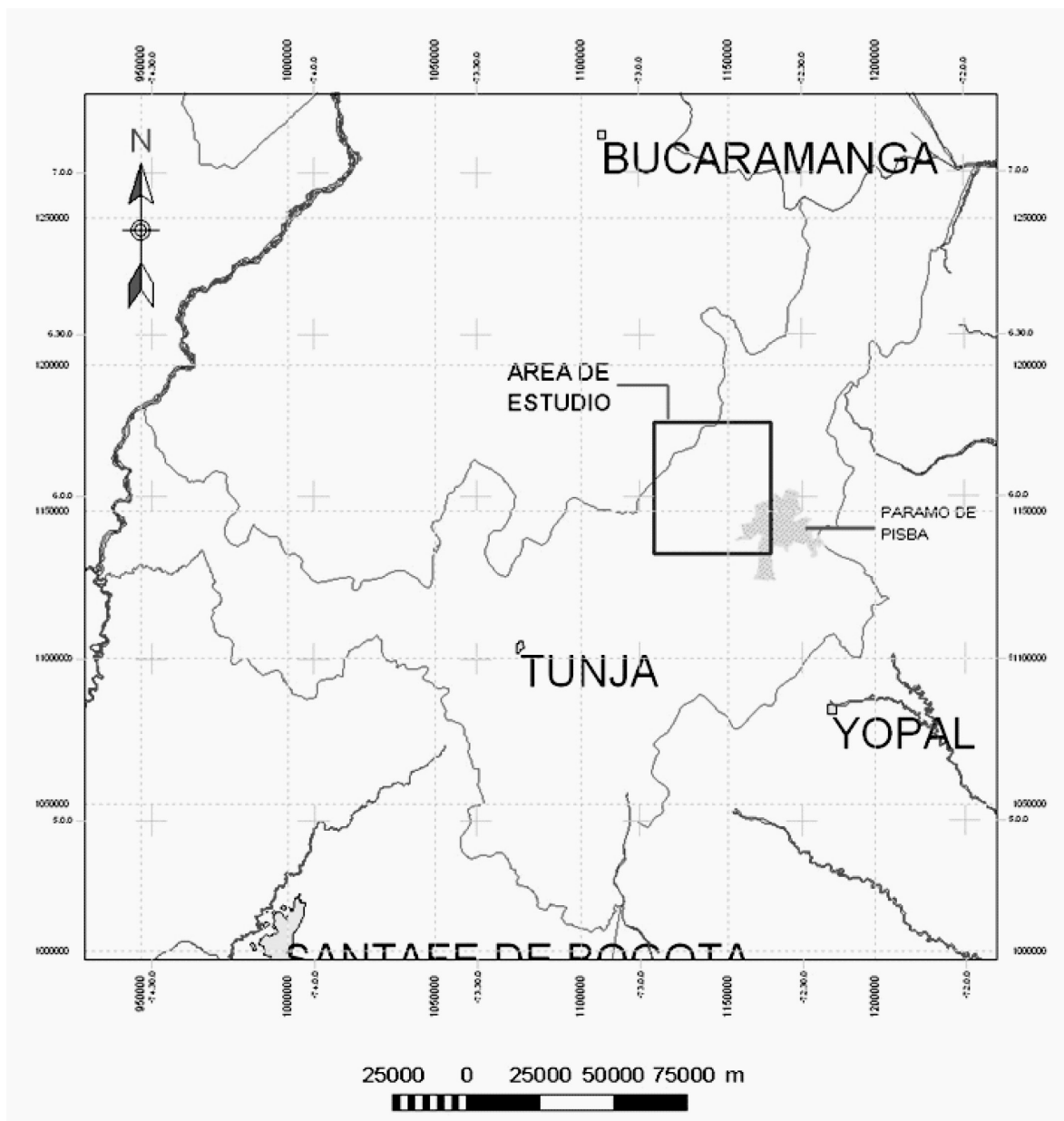


FIGURA 1. Mapa del Departamento de Boyacá en el cual se resalta la zona de Estudio. Estos datos se relacionan con las planchas a escala 1:100000 de INGEOMINAS.

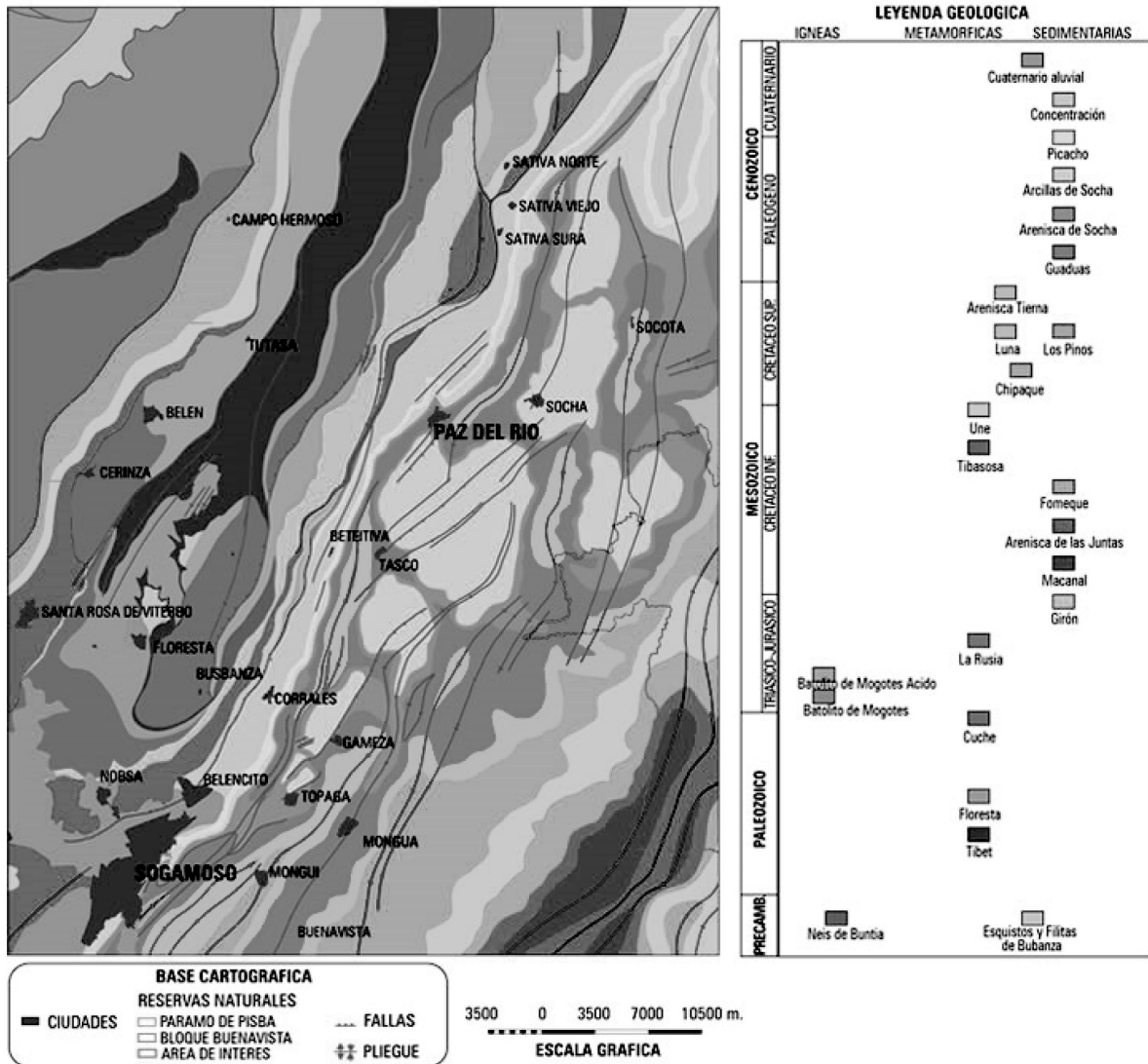


FIGURA 2. Mapa geológico de la zona de estudio. Bloque Soapaga. Cordillera Oriental. Tomado de www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg. Elaborado por Andreas Kammer.

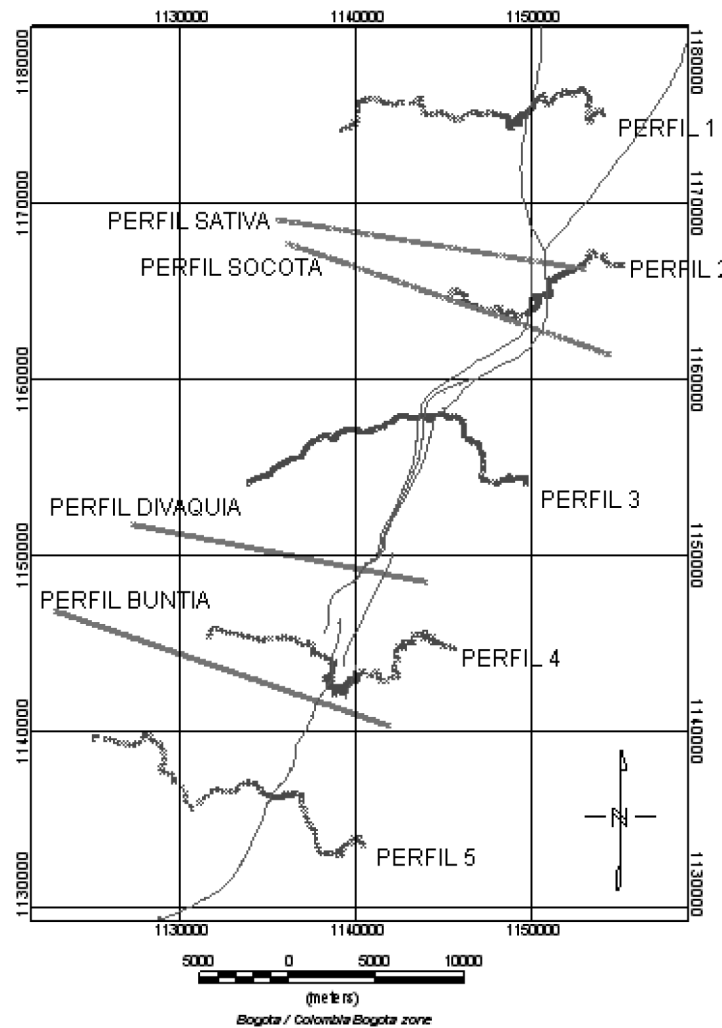


FIGURA 3. Mapa de perfiles utilizados, en Magenta para el modelamiento directo, y en azul los utilizados para la adquisición en campo; adicional se observa el lugar en el que cruzan la falla de Soapaga.

Para poder trabajar con datos de campo gravimétrico de la zona de estudio, se extrajo una ventana del área de estudio, de los puntos del IGAC, sobre la cual se encontraron 99 estaciones con las que se generaron grillas de interpolación de anomalía de aire libre, Bouguer completa y su primera derivada en la vertical. En cuanto al procesamiento de los datos magnéticos; de campo y del modelamiento directo, se generaron grillas de campo magnético total y campo magnético reducido al polo. Los datos de campo fueron corregidos por variación diurna, la corrección de referencia internacional con el IGRF del 2005, y una eliminación de picos, teniendo en cuenta la tendencia de la relación señal-ruido. Y se determinó una pseudo gravedad por

medio del software de Geometrics Magpick. Luego de todo esto, para seguir con la correlación, fue necesario extraer una ventana cuadrada de cada una de las grillas de resultados, de 64x64.

Posteriormente se determinaron los coeficientes de correlación espectral, la idea principal de esta metodología es esclarecer ambigüedades de interpretación, trabajando con anomalías en el dominio de la frecuencia y separando aquellas que se correlacionan directa o inversamente o no se correlacionan. Para la correlación de anomalías gravimétricas y magnéticas es necesario basarse en el Teorema de Poisson descrito por medio de la siguiente expresión (e.g., von Frese et al., 1982):

$$\Delta T(r) = \left[\frac{\Delta m}{G\Delta\sigma} \right] \left[\frac{\partial \Delta g}{\partial r} \right] \quad (1)$$

Dónde la intensidad del campo magnético total reducido al polo es igual a la relación ente el contraste de magnetización inducida de la fuente y el contraste de densidad de la misma, por la primera derivada en la vertical de la anomalía de campo gravimétrico.

A partir de este resultado, la reducción al polo del campo magnético está relacionada con la primera derivada de la anomalía gravimétrica para cualquier punto de observación dónde la relación entre los contrastes de densidad y magnetización de la fuente, sean constantes. La implementación efectiva de esta aproximación requiere la determinación de puntos comunes de observación de anomalías gravimétrica y magnética, es por esta razón que con cada uno de los datos se generó una grilla de celdas cuadradas, igualmente espaciadas. Para facilitar la interpretación gráfica de los dos campos a correlacionar y una mejor visualización de las correlaciones, se utilizó la siguiente transformación, (e.g., von Frese et al., 1997):

$$Z_i(x) = \sigma Z \left(\frac{x_i - \mu x}{\sigma x} \right) + \mu Z \quad (2)$$

Dónde μx y σx representan los valores de la media y desviación estándar de x , y la expresión en el paréntesis estandariza los coeficientes x_i con valores de promedio cero. La normalización solo modifica el gradiente por un factor NF, sin alterar su comportamiento. En resumen, cualquier X se puede expresar en términos de la señal Y.

Luego de tener los datos normalizados, se determinaron los coeficientes de correlación, estos en su forma más simple se definen como la relación entre la covarianza de dos señales X y Y y la raíz cuadrada del producto de sus varianzas (e.g., Bevington, 1969; Davis, 1986). Estos coeficientes están entre ± 1 . Pero como el objetivo era correlacionar las señales en el dominio de la frecuencia, lo que se hizo fue determinar la transformada de Fourier en coordenadas de número de onda común. De esta forma, si se toma cada transformada en cada número de onda K, como vector en el plano complejo, representado en polares cómo:

$$\bar{X}(k) = |X(k)| \exp(-j\theta_{x(k)}) \quad (3)$$

Dónde las transformadas correspondientes a los números de onda k $|\bar{X}(k)|$ y $|\bar{Y}(k)|$ son las amplitudes y $\theta_{\bar{X}(k)}$ y $\theta_{\bar{Y}(k)}$ son los ángulos de fase y por tanto $\Delta\theta_k$ será la diferencia de fase.

Luego de tener los coeficientes de correlación se aplicaron los índices locales de favorabilidad que son una simple medida estadística para mejorar la interpretación de las salidas de los coeficientes de correlación. Básicamente se resaltan los puntos en los cuales existe correlación directa o inversa. Las características positivas de la correlación pueden ser mapeadas por la expresión SLFI, punto por punto de las señales con SLFI)0 para pico con pico, y para valle con valle cuando SLFI)0. De forma similar, para las características de correlación negativa se grafican los DLF)0 cuando X es positivo y Y negativo y DLF)0 cuando X es negativo y Y es positivo.

A partir de las grillas cuadradas para el procedimiento anteriormente descrito, se extrajeron perfiles aproximadamente lineales sobre la posición de los perfiles magnéticos adquiridos en campo. Se extrajo campo magnético total y la anomalía completa de Bouguer. Este procedimiento se realizó por medio de la herramienta Gmsys, respetando la geología de superficie del modelo geológico escogido, luego se hizo un ajuste a la geometría y parámetros iniciales y se mantuvieron los datos de amarre, que son los datos de densidad de pozo, el resto cambiaron de magnitud con la profundidad.

RESULTADOS

A partir del procesamiento de los datos de gravimetría y magnetometría, tanto directos, cómo los adquiridos en campo y los datos del IGAC, se generaron grillas de igual tamaño con las cuales se generaron los productos finales que se muestran más adelante.

En la grilla de datos de campo magnético reducido al polo, adquirido en campo, se puede observar el contraste en el corredor de influencia de la Falla en los perfiles 2, 3 y 4. Estos datos podrían estar reflejando anomalías magnéticas superpuestas de cuerpos ubicados desde el núcleo terrestre, manto, corteza inferior y superior, esto se concluye debido a que no se resaltan anomalías magnéticas positivas al oeste de la Falla sino al lado este de ella, contradiciendo el comportamiento previsto a las formaciones del macizo de Floresta las cuales poseen mayor susceptibilidad magnética. FIGURAS 4A. En cuanto a los datos obtenidos por medio del modelamiento directo se marca claramente el trazo de falla, evidenciando que al lado oeste de la Falla se encuentran formaciones con mayor susceptibilidad magnética que en el lado Este de la Falla, dónde la litología es en gran parte de origen sedimentario, también se evidencia que es una falla inversa de alto ángulo por el gran gradiente de campo magnético reducido al polo paralelo al trazo de Falla. FIGURA 4B. Al observar el

mapa de anomalía completa de Bouguer se evidencia un claro contraste en el corredor de influencia de la Falla en cada uno de los perfiles, pero adicional a esto, indica que la profundidad del basamento es mayor al lado este de la Falla, por los bajos valores de la anomalía de Bouguer. Al igual que resalta mayores densidades en los lugares en los cuales se encuentran cartografiados intrusivos. FIGURA 4C.

A partir de estas grillas se determinaron los coeficientes de correlación almacenados en la TABLA 1. Es a partir de esta tabla de coeficientes que se generaron toda una serie de conclusiones sobre la metodología utilizada y el objetivo principal. En el texto, se encuentran las definiciones de cada una de las convenciones utilizadas en esta tabla.

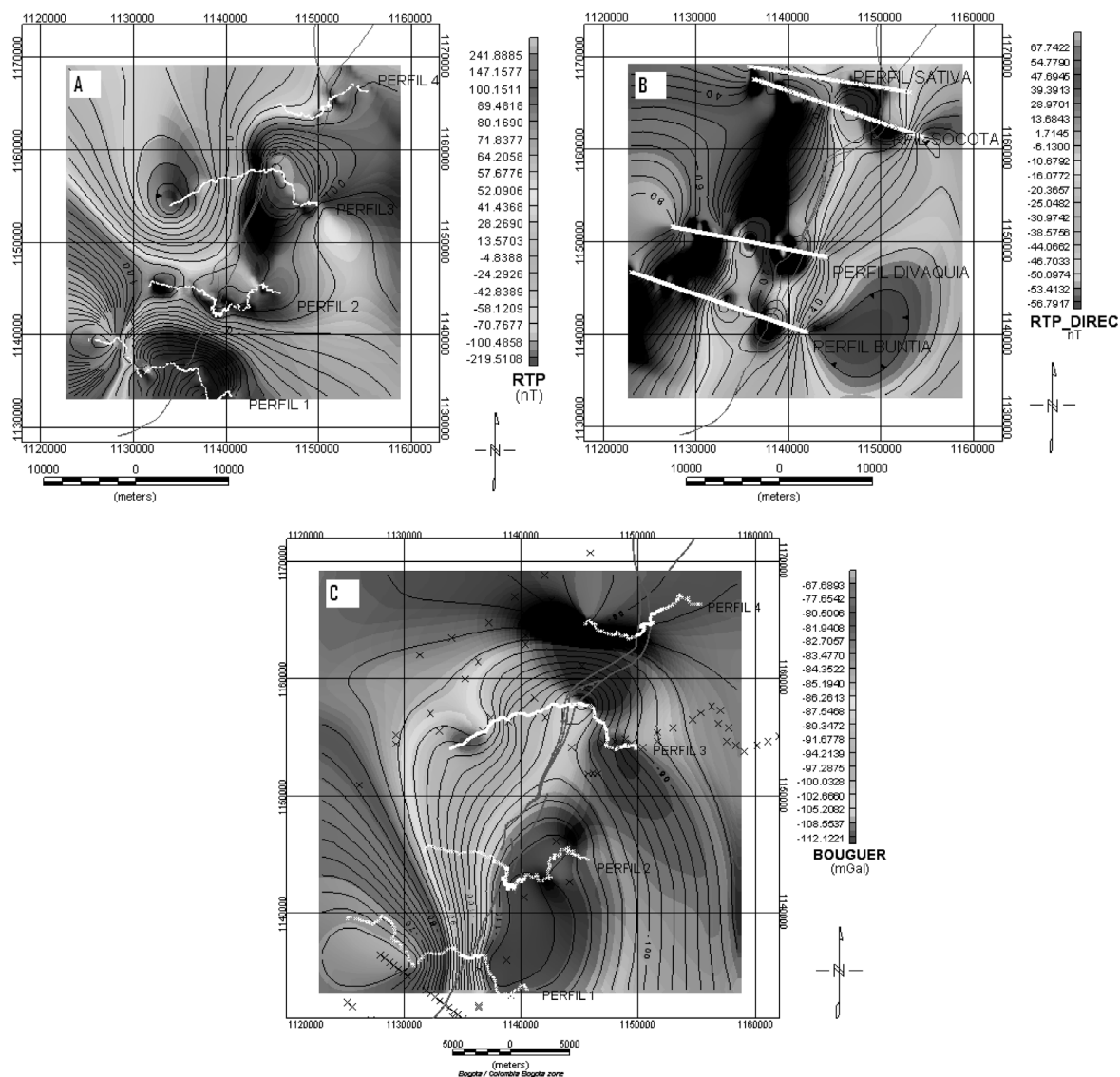


FIGURA 4A. Reducción al Polo de los datos de campo magnético total. ($I = 31.24^\circ$ y $D = -7.33^\circ$). Se observa el contraste de anomalía en la mayor parte del corredor de la Falla de Soapaga. **FIGURA 4B.** Reducción al Polo de los datos de campo magnético total, obtenidos por medio del modelamiento directo. ($I = 31.24^\circ$ y $D = -7.33^\circ$). Se observa el contraste a través del corredor de la Falla de Soapaga. **FIGURA 4C.** Anomalía completa de Bouguer graficada a partir de los puntos del IGAC. (Densidad representativa de la corteza terrestre $2,67\text{g/cm}^3$).

Tabla 1. Coeficientes de correlación determinados a partir de los set de datos trabajados. En verde se encuentran las casillas con mayores correlaciones inversas y en rojo las casillas con mayor correlación directa.

CC	FAA	$\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$	CBA	$\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$	TF	RTPMA G	PSEUDO MAG	CBA_D	$\frac{\partial(CBA_D)}{\partial Z}$	PSEUDO D	TF_D	RTPMAG D
FAA	1	0.3294	0.3754	0.3292	-0.5216	-0.2696	-0.4641	0.2848	0.2340	0.1461	-0.1511	-0.4210
$\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$	0.3294	1	0.2803	0.9314	0.0192	-0.0946	0.4512	0.0282	0.0972	0.4512	0.1511	-0.1611
CBA	0.3754	0.2803	1	0.3937	-0.4961	-0.0776	0.2413	0.1836	0.2146	0.2389	-0.1945	-0.2512
$\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$	0.3292	0.9314	0.3937	1	-0.0450	-0.0907	0.13	0.1105	0.1836	0.4193	-0.0437	-0.1259
TF	-0.5216	0.0192	-0.4961	-0.0450	1	-0.2253	0.4271	0.0045	-0.0079	-0.2288	0.0136	-0.0261
RTPMAG	-0.2696	-0.0946	-0.0776	-0.0907	-0.2253	1	0.2241	-0.4195	-0.1996	0.3878	0.4123	0.3522
PSEUDO MAG	-0.4641	0.4512	0.2413	0.13	0.4271	0.2241	1	0.0926	0.1233	0.2658	0.1372	-0.2106
CBA_D	0.2848	0.0282	0.1836	0.1105	0.0045	-0.4195	0.0926	1	0.7211	-0.1208	0.3918	0.0079
$\frac{\partial(CBA_D)}{\partial Z}$	0.2340	0.0972	0.2146	0.1836	-0.0079	-0.1996	0.1233	0.7211	1	0.0944	0.2477	-0.0421
PSEUDO D	0.1461	0.4512	0.2389	0.4193	-0.2288	0.3878	0.2658	-0.1208	0.0944	1	-0.2185	-0.2081
TF_D	-0.1511	-0.1511	-0.1945	-0.0437	0.0136	0.4123	0.1372	0.3918	0.2477	-0.2185	1	0.4665
RTPMAG D	-0.4210	-0.1611	-0.2512	-0.1259	0.4665	0.3522	-0.2106	0.0079	-0.0421	-0.2081	0.4665	1

Antes de este análisis se debe recordar que el comportamiento gravimétrico y magnético muestran características diferentes de un lugar, y en este caso, de una estructura, mientras que el campo gravitacional evidencia la respuesta de todo un cuerpo ya que se basa en la densidad de las rocas y de esta forma me puede dar una visión más de la geología y estructura de un lugar, el campo magnético por depender de los materiales o minerales magnéticos dentro de las rocas; que equivale a menos del 5% del tamaño de la roca, solo puede permitir ver el tipo de estructura que se está modelando.

Lo primero que se observa al leer los valores de correlación, es que el 95% están por debajo de 0.6, lo que en términos generales se esperaba obtener, debido a la falta de mediciones de campo gravimétrico y magnético, co registradas en campo, lo que hubiese permitido obtener datos con la misma resolución y valores mayores de correlación.

Se empezará describiendo el comportamiento de las variables que se correlacionan directamente, es decir, su coeficiente es positivo, y adicional a esto es alto en relación con los demás. Las anomalías de Aire Libre y Bouguer (FAA y CBA, respectivamente) se correlacionan con un coeficiente del 0.3754, que al ser bajo evidencia claramente que mientras que una no tiene la corrección por topografía la otra si. Al contrario, cuando se correlacionan sus primeras derivadas en la vertical, $(\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$ y $\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$, respectivamente), su coeficiente es de 0.9314, lo cual evidencia que tienen continuación y que su anomalía es generada por el contraste en la zona de falla.

La anomalía de campo magnético con el campo pseudo gravimétrico, determinado por medio del Teorema de Poisson del software Magpick, tiene un coeficiente relativamente alto, con respecto a los demás, de 0.4271, y al correlacionar el último con la reducción al polo del campo magnético total, el coeficiente baja a (0.2241), lo que demuestra que aunque el pseudo campo gravitatorio es resultado de la reducción al polo del campo magnético total, el tipo de algoritmo utilizado por el software Magpick, no esta siendo lo suficientemente efectivo para la determinación de un campo pseudo gravitatorio, o que las relaciones de densidad de magnetización y densidad, establecidas por el mismo programa no son las apropiadas para dicho procesamiento. Siguiendo con el análisis anterior, al correlacionar el pseudo campo gravimétrico con la derivada en la vertical de la anomalía de aire libre regional, su correlación se encuentra dentro de las más altas, 0.7211, lo cual sugiere que el tipo de pseudo campo

generado se parece más una anomalía de aire libre, que a una continuación de la anomalía de Bouguer en la vertical, cómo sugiere la Teoría propuesta por Poisson. En cuanto a la correlación existente entre los modelos teóricos, los datos de anomalía del IGAC y los datos obtenidos en campo, se citarán los que obtuvieron los mayores coeficientes. Al correlacionar la reducción al polo de los datos obtenidos en campo, con los datos de campo magnético del modelamiento directo, el coeficiente es de 0,4123, lo que podría evidenciar que la respuesta del modelamiento directo se refiere más a anomalías residuales que regionales; pautas que fueron muy útiles en la realización del modelamiento inverso, donde los contrastes de campo magnéticos vendrían de pequeños contrastes entre unidades y no de una respuesta regional, cómo sería la Falla de Soapaga.

Adicional a los coeficientes que muestran una correlación directa y alta entre nuestras variables de campos potenciales, también se encuentran las correlaciones inversas, es decir, de signo negativo. Entre las que vale destacar, esta, la correlación entre campo magnético medido en campo, con la anomalía de aire libre y de Bouguer del IGAC, (-0.5216, -0.4961), que aunque se encuentran altamente de-correlacionadas, no es bueno buscar similitudes entre sus respuestas, cómo se tiende a hacer cuando se observan dos mapas de anomalías magnéticas y gravimétricas, ya que estas anomalías corresponden a características diferentes de una zona, cómo ya se había explicado anteriormente. Pero son en gran manera útiles para validar que se pueden correlacionar dos campos, cuyas anomalías son el resultado de la misma fuente.

En cambio, al correlacionar, las derivadas de las anomalías de gravedad con la reducción al polo, es cuando se pueden evidenciar respuestas un poco más coherentes ya que en este momento se estará trabajando con dos campos potenciales monopoles y se evitará la confusión en la interpretación. En estos datos, las correlaciones entre estas variables es muy baja, el 52% de las correlaciones está por debajo de 0.1, lo cual indica que estos dos campos pierden contraste en profundidad.

Los índices de favorabilidad son los que finalmente indican los lugares en los cuales existen correlaciones cresta a cresta, es decir, positivo y positivo, o correlaciones valle a valle, negativo y negativo, entre los dos paquetes de datos que fueron mapeados. Los coeficientes SLFI extraen las características positiva o directamente correlacionables, mientras que suprimen las características negativas o no correlacionadas entre los datos suministrados al programa. Los coeficientes

(DLFI) extraen las características inversamente correlacionadas obtenidas a partir de números de onda con coeficientes de correlación negativa. Los datos normalizados y escalados fueron sustraídos celda a celda para los índices de favorabilidad local diferenciados (DLFI). A continuación se muestran algunos de los gráficos obtenidos durante el procesamiento de índices de favorabilidad, cresta a cresta y valle a valle.

Cómo se puede observar, FIGURA 5A, 5B, 6A, 6B y 6C, al graficar los índices de favorabilidad directa e inversamente correlacionados, entre la anomalía gravimétrica de Bouguer y la anomalía de campo magnético total, es poco o casi nada lo que se puede observar, verificando una vez más que la relación entre el campo magnético y el gravimétrico no se debe hacer directamente.

Algo completamente diferente sucede cuando se grafican los índices para la anomalía de Bouguer y para la reducción al polo de los datos magnéticos FIGURA 7, en este caso se puede observar cómo con los índices de correlación inversa, se marca el corredor de la Falla de Soapaga, mostrando que aunque su coeficiente de correlación es bajo; como se dedujo en el numeral anterior, se alcanza a evidenciar el contraste perteneciente a este tipo de estructura regional y se podrá entonces tener en cuenta para realizar el modelamiento inverso de los datos adquiridos en campo FIGURA 8.

El mismo comportamiento descrito en el párrafo anterior se presenta también al graficar los índices de favorabilidad para las siguientes relaciones: Derivada en la vertical de Bouguer con la Reducción al Polo, anomalía de Aire Libre con la Reducción al Polo y la derivada en la vertical de la anomalía de Aire Libre con la Reducción al Polo, lo que verifica los datos obtenidos, analizados y descritos en el numeral anterior.

En cuanto a las características estructurales obtenidas como resultado de las correlaciones espectrales entre los dos campos potenciales y los índices de favorabilidad, no son tan detalladas como se esperaba inicialmente, solo dan un indicio del tipo de anomalías que presenta la zona, en cuanto a la continuación de contrastes en profundidad, relacionadas a anomalías regionales y no residuales. Esto se sustenta teniendo en cuenta que los campos potenciales (gravimétrico y magnético) en el modelamiento directo, se correlacionan altamente con las derivadas en la vertical o continuaciones en profundidad de los datos de campo. Este comportamiento también da un claro resultado del tipo de estructuras presentes

en la zona, además de validar una vez más los perfiles geológicos desarrollados por el profesor Andreas Kammer, utilizados para el desarrollo de este estudio.

Es a partir de estas determinaciones que se realizaron las siguientes inversiones que dieron como resultado un modelo de la Falla a lo largo de su corredor de influencia FIGURAS 9 y 10, empezando cerca al Municipio de Corrales y finalizando en vecindades del Municipio de Susacón. A continuación se muestran dos de los perfiles.

CONCLUSIONES

Las características estructurales obtenidas como resultado de las correlaciones espectrales entre los dos campos potenciales y los índices de favorabilidad, dan un indicio del tipo de anomalías que presenta la zona, en cuanto a la continuación de contrastes en profundidad, relacionadas a anomalías regionales y no residuales y la influencia y la dirección de buzamiento de la Falla aunque no son tan detalladas como se esperaba inicialmente. Los resultados obtenidos muestran una tendencia de gradientes en la dirección de rumbo de la falla consistentes con el modelamiento directo de la gravimetría, más no en la magnetometría.

Los resultados obtenidos permiten determinar el rumbo, la dirección de buzamiento de la falla corroborando que es de tipo inverso, aunque no se puede determinar el ángulo exacto de buzamiento, solamente que es alto, lo cual corrobora la teoría de evolución de la cordillera oriental. El espesor de la cuenca sedimentaria y profundidad del basamento, está directamente correlacionado con las anomalías gravimétricas y no se correlaciona con las anomalías magnéticas. Los índices de favorabilidad indican fuentes de origen regional cómo el caso del índice de favorabilidad DLFI DV Bouguer y RTP, dónde se resalta la influencia de la Falla de Soapaga y cuerpos más cercanos a la superficie.

Los mapas en los cuales se evidenciaron altos contrastes entre los índices de favorabilidad resaltaron zonas con algún atractivo particular. Las metodologías utilizadas proveen de un mayor control visual de los procesos mediante la elaboración de mapas temáticos que facilitan la interpretación.

Por medio de este método la correlación se muestra cómo un proceso en el cual se pueden diferenciar correlaciones directas e inversas y establecer alternativas cuando dos tipos de datos no evidencian correlación numérica.

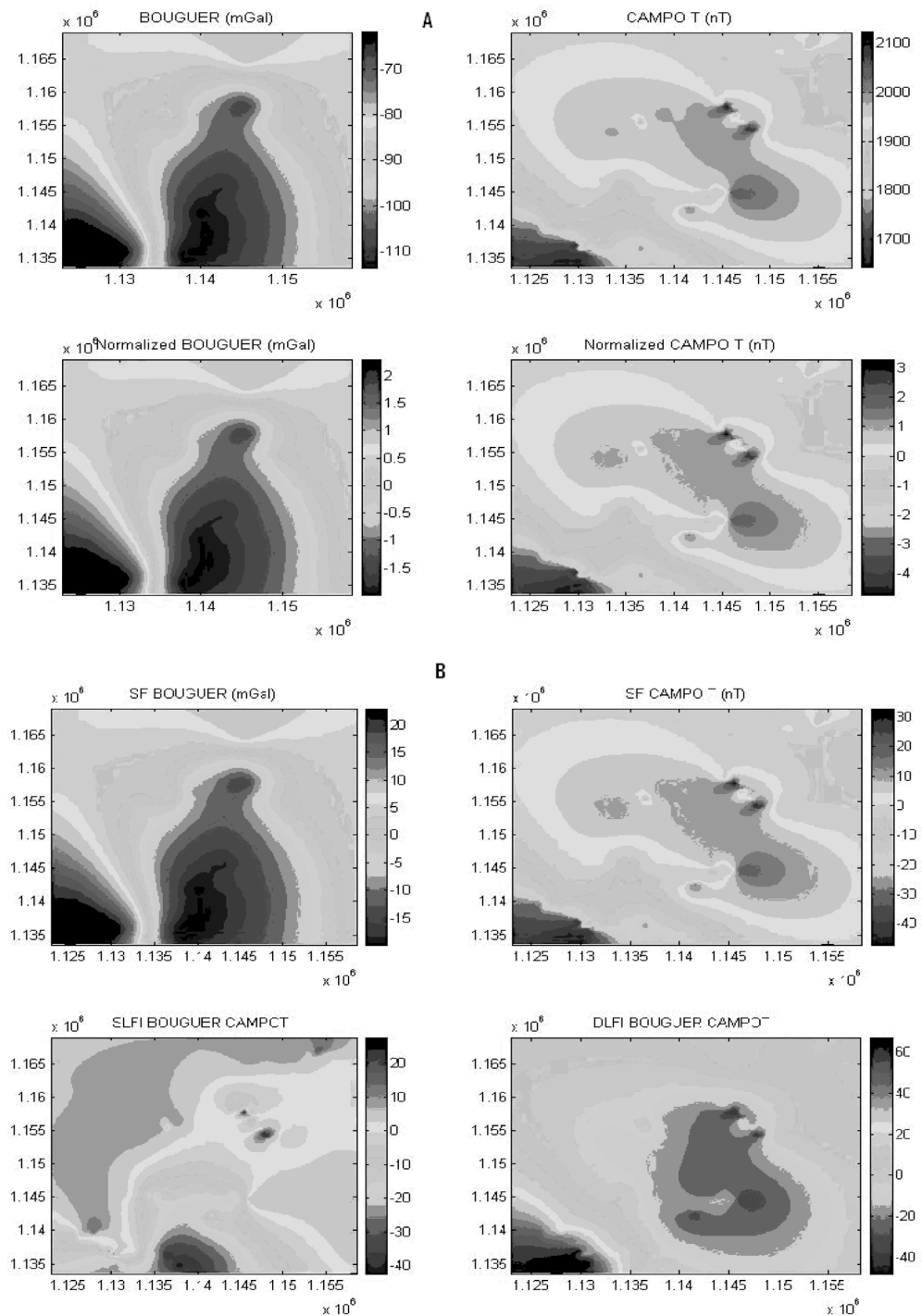


FIGURA 5A. Mapas de anomalía de Bouguer y campo magnético total, en sus dimensiones convencionales y normalizadas, para determinar los índices de favorabilidad y visualizar las correlaciones directas e inversas. Se puede observar que el comportamiento no cambia, solo la escala en la que se miden las anomalías. **FIGURA 5B.** Mapas de los índices de favorabilidad de correlación directa e inversamente para anomalía de Bouguer y campo magnético total. En las gráficas SLFI y DLFI, se pueden observar algunos lugares en los que se enmarcan altas correlaciones directa e inversa.

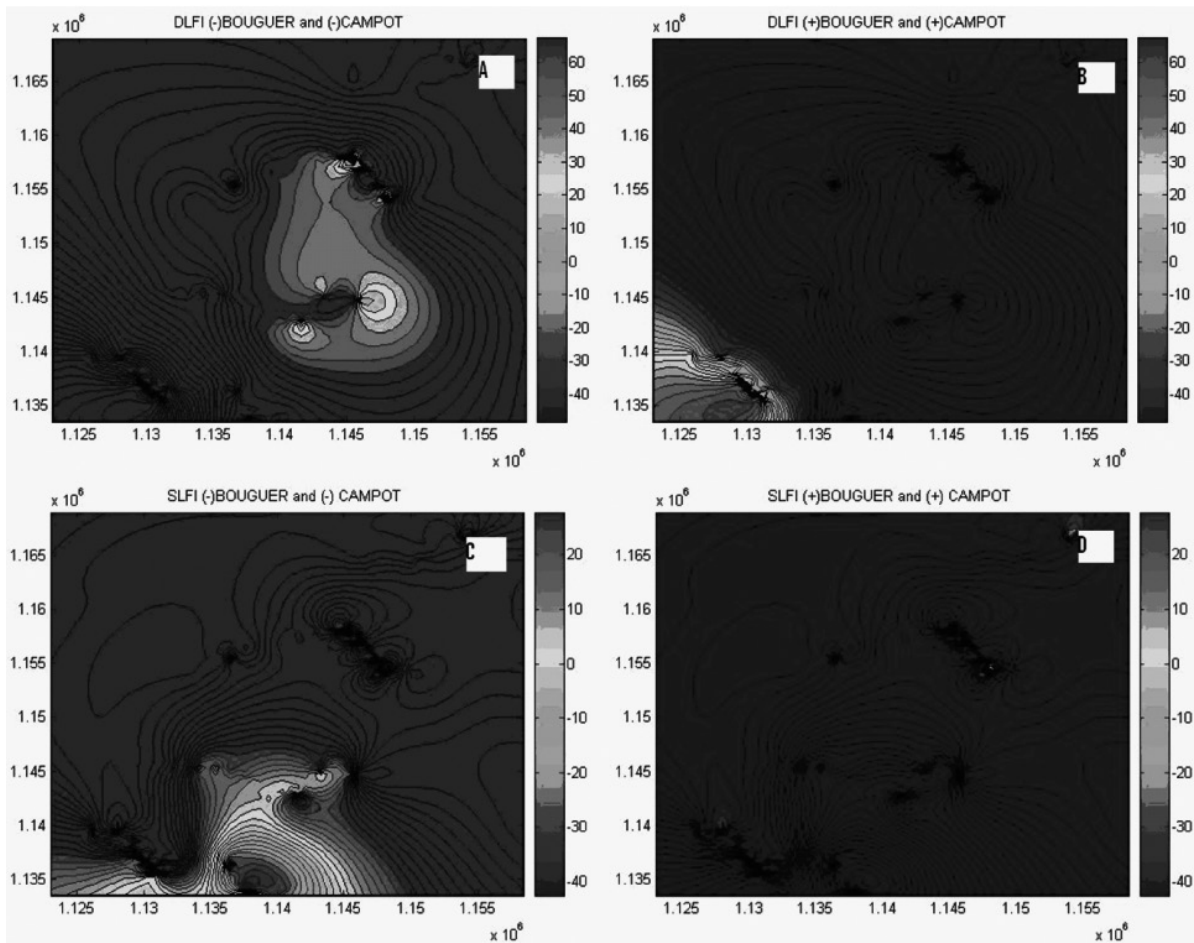


FIGURA 6A. Coeficientes $DLFI \leq 17.2979$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético Total. Mostrando la correlación inversa, valle con valle. **FIGURA 6B.** Coeficientes $DLFI \geq 17.2979$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Mostrando la correlación inversa, cresta con cresta. **FIGURA 6C.** Coeficientes $SLFI \leq 10.0391$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con valle. **FIGURA 7D.** Coeficientes $SLFI \geq 10.0391$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta.

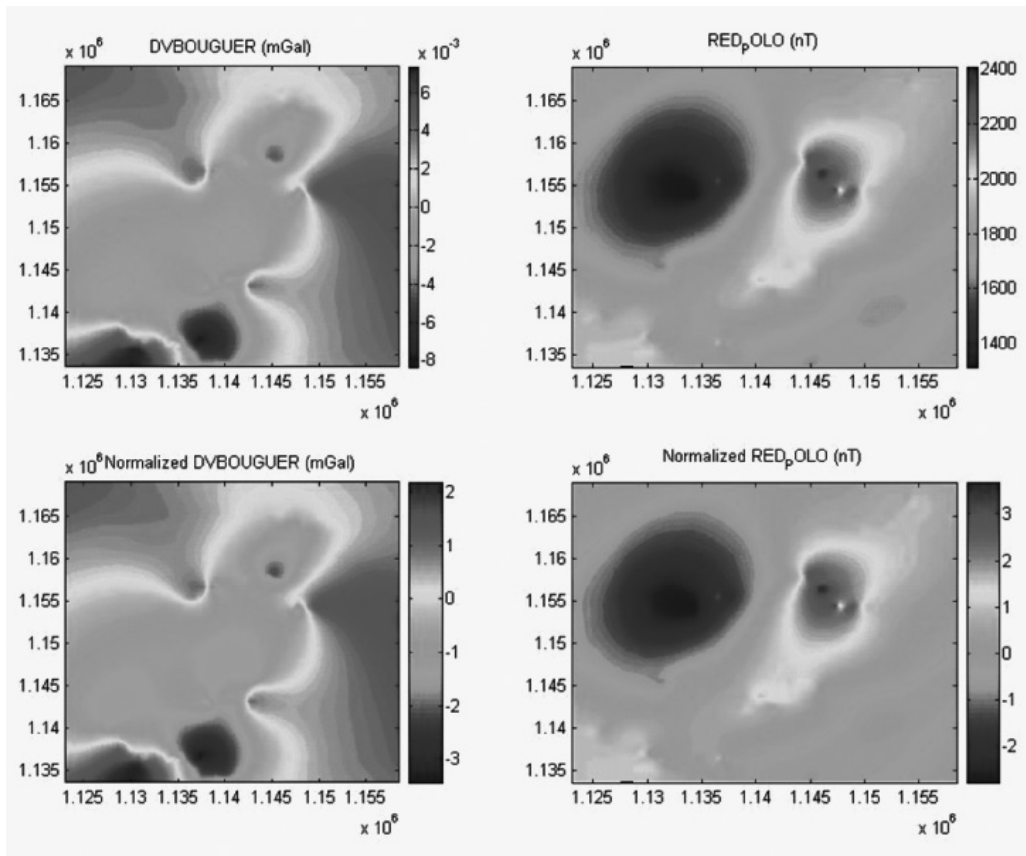


FIGURA 7. Mapas de la primera derivada en la vertical de la anomalía completa de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total, en sus dimensiones convencionales y normalizadas.

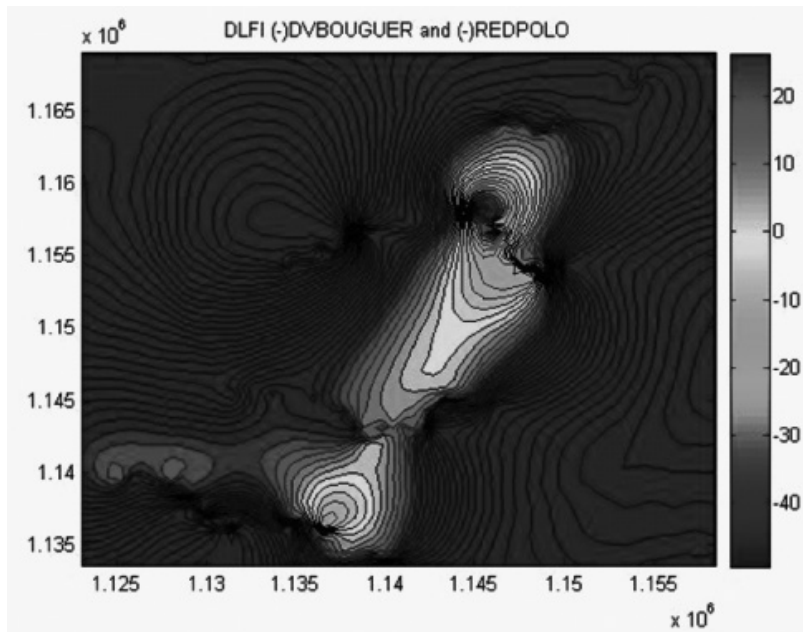


FIGURA 8. Coeficientes $DLFI \leq 14.7695$. Para primera derivada en la vertical de la anomalía completa de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con cresta.

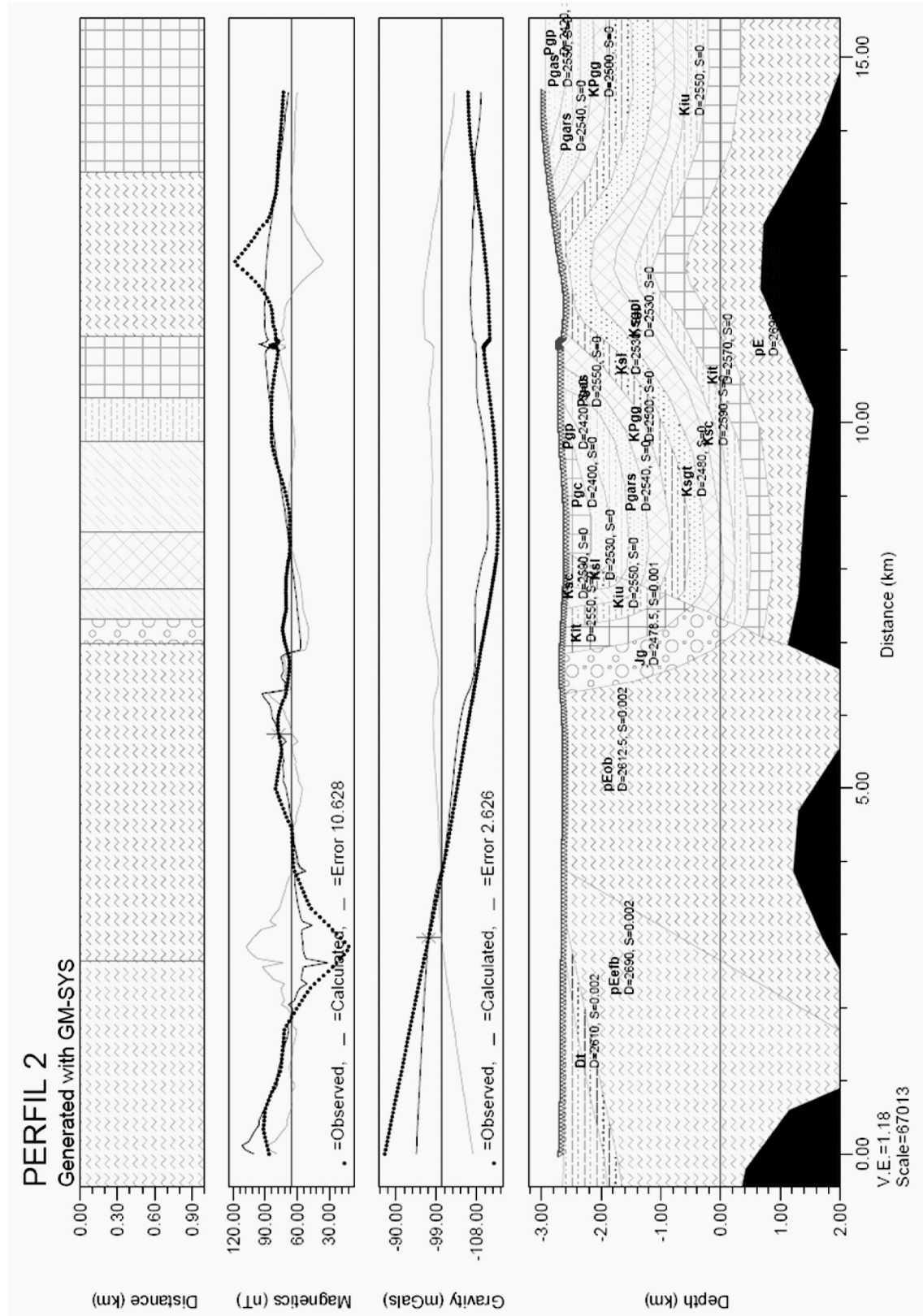


FIGURA 9. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Tasco.

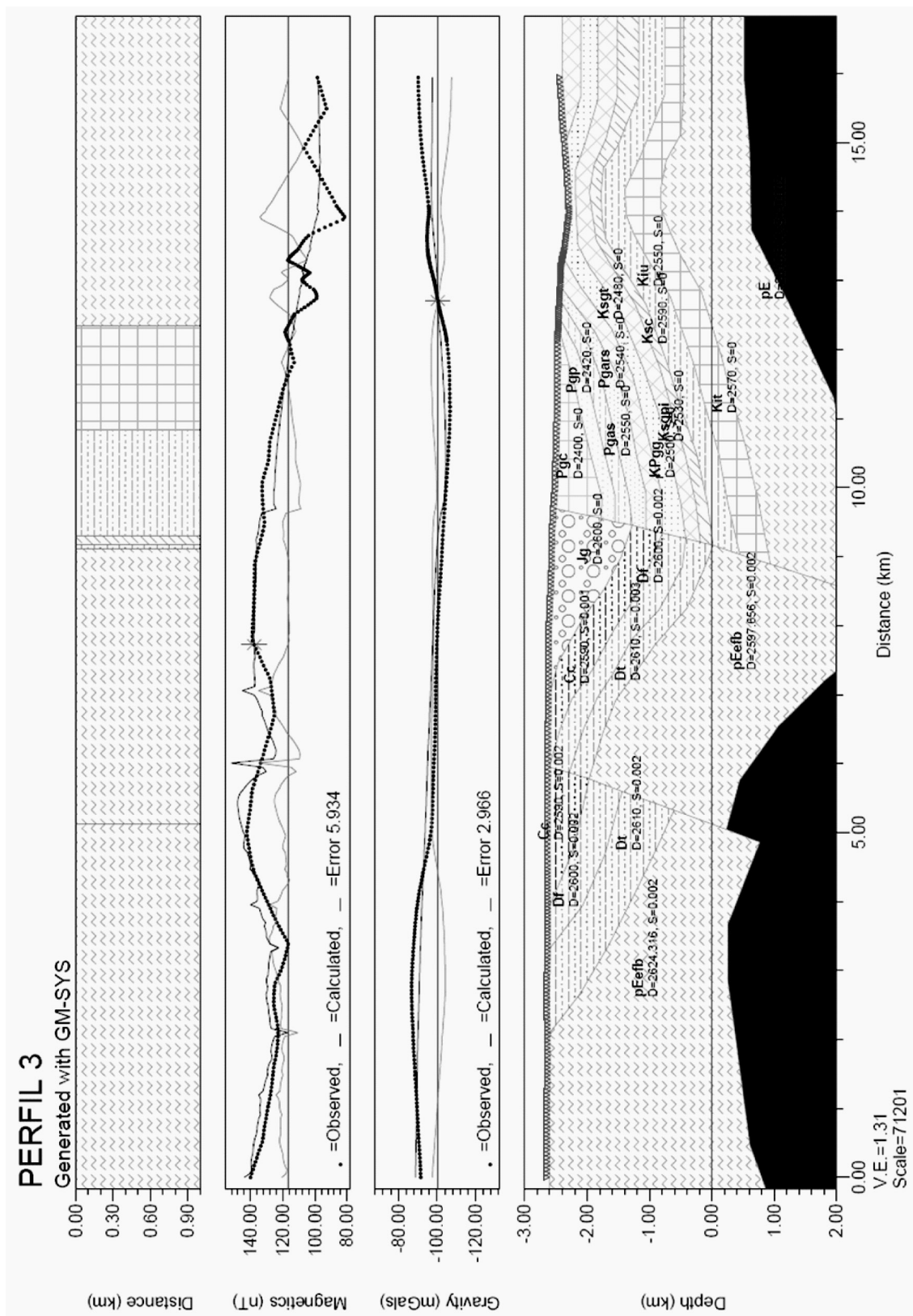


FIGURA 10. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Paz del Río.

REFERENCIAS

Agencia Nacional de Hidrocarburos, Ronda Colombia 2008. Cuenca Cordillera Oriental.
http://www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg.

Bevington, P. R. 1969. Data reduction and error analysis for the physical sciences. McGraw-Hill Book Co.

Chandler, V. W., Koski, J. S., Hinze, W. J., and Braile, L. W. 1981. Analysis of multisource gravity and magnetic anomaly data sets by moving-window application of Poisson's theorem. *Geophysics*, (46): 30-39.

Davis, J.C. 1986. Statistics and data analysis in geology: John Wiley & Sons, Inc.

Von Frese, R.R.B., Jones, M.B., Kim, J.W., Kim, J.H. 1997. Analysis of anomaly correlations, *Geophysics* (62): 342-351.

Von Frese, R.R.B., Hinze, W. J., and Braile, L.W., 1982, Regional North American gravity and magnetic anomaly correlations: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, (69): 745-761.

Trabajo recibido: Junio 17 de 2009

Trabajo aceptado: Septiembre 4 de 2009