

PROCESAMIENTO Y ANALISIS CUALITATIVO DE DATOS AEROMAGNETICOS CON VISTAS A LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS HIDROTERMALES TIPO LODE GOLD - PROVINCIA DE LA RIOJA, ARGENTINA

PROCESSING AND QUALITATIVE DATA ANALYSIS WITH VIEWS AEROMAGNETIC EXPLORATION TYPE HYDROTHERMAL DEPOSITS LODE GOLD - LA RIOJA PROVINCE, ARGENTINA

Gerardo Fanton¹, Patricia Martínez^{1,2}, Mario Giménez^{1,2}

¹ Instituto Geofísico Sismológico Volponi – Universidad Nacional de San Juan. Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET). Argentina.

E-mail: gfanton@unsj-cuim.edu.ar

RESUMEN

La interpretación de los datos aeromagnéticos regionales de las Sierras de Chepes y Ulapes- Las Minas requirió el uso de técnicas relevantes de realce para definir con precisión rasgos geológicos que se relacionan con la presencia de yacimientos auríferos en la región. Los nuevos mapas magnéticos, del campo anómalo reducido al polo, filtro pasa alto, derivadas verticales, derivadas fraccionales, amplitud de señal analítica y fase de la señal analítica, fueron usados para delinear zonas de cizalla, que en esta región representan el principal control metalogénico.

Palabras claves: aeromagnetismo; vetas auríferas; zonas de cizalla; procesamiento de datos magnéticos.

ABSTRACT

The interpretation of regional aeromagnetic data of the Sierras de Chepes and Ulapes-Las Minas required the use of relevant enhancement techniques to precisely define geological features that are related to the presence of gold deposits in the region. New maps of the magnetic anomalous field reduced to the pole, high-pass filter, vertical fractional derivative, analytic signal amplitude and phase of the analytical signal were used to delineate shear zones, which in this region represent the main metallogenic controlling factors.

Keywords: aeromagnetismo; lode gold; shear zones; magnetic data processing.

INTRODUCCIÓN

Sistemas de vetas de cuarzo que almacenan mineralización de Au y minoritariamente Cu y Ag ocurren ampliamente a través de las Sierras de Las Minas, Ulapes y Chepes, Argentina (Cravero y Rios Gómez, 1988; Cravero et al., 1995; Cravero, 1999; JICA-MMAJ, 1993, 1994, 1995).

El potencial minero de ésta región ha sido analizado desde principios del siglo XX con los estudios realizados por Bodenbender (1911, 1912), Braccacini (1946, 1948), Frenguelli (1946, 1949 y 1950), Turner y de Alba (1968), Caminos (1979) y últimamente por Pieters et al. (1997).

En base a la morfología de los depósitos, alteración hidrotermal, composición isotópica y estudios de inclusiones fluidas (Cravero, 1999), se determina que los yacimientos auríferos de las sierras de Chepes y Ulapes-Las Minas son mesotermiales.

Los depósitos de oro Devoniano se localizan en fallas transcurrentes y reversas, y zonas de cizalla que pueden estar relacionadas a una colisión entre el terreno Chilena, con el margen occidental de Gondwana durante la orogenia Achaliana. Estos depósitos, son considerados miembros de la familia vetas de oro mesotermal (Lode gold mesothermal) de sistemas localizados a nivel mundial (Skirrow et al., 2000).

Durante 1995-1996 se realizaron en las Sierras de Chepes, Las Minas y Ulapes vuelos geofísicos regionales (magnetométricos y espectrometría gamma) conjuntamente con un relevamiento geológico de detalle, dentro del Proyecto de Cooperación científica entre AGSO y SEGEMAR (Pieters et al., 1997). Como resultado de este

proyecto, se obtuvo un modelo metalogenético para las Sierras de Chepes y Las Minas y potenciales zonas de mineralización de Au±Cu. Se centró la atención en zonas potenciales de oro y cobre, sobre un conjunto conjugado de zonas de cizalla Devonianas con rumbo noroeste y noreste, caracterizadas por alteración sericita-pirita y hematites (Pieters et al., 1997).

Los datos aeromagnéticos regionales de la Sierra de Ulapes exhiben una zona amplia y ancha de respuesta magnética aparentemente baja, limitada al oeste y al este por zonas miloníticas. La mayoría de los grandes depósitos explotados de Au-Cu-Ag ocurren dentro de un dominio regional magnético bajo. Los Gneiss granodioríticos y migmatitas dentro de este dominio aparentan ser composicionalmente y mineralógicamente similares al del Complejo Ígneo Chepes en la sierra de Chepes. Sus susceptibilidades magnéticas medidas en ambas áreas son relativamente altas, excepto dentro de zonas de cizalla intensamente alteradas. Se considera un enigma a la existencia de esta zona ancha, de supuestamente baja respuesta magnética. Pieters et al., (1997), plantean tres teorías para explicar el origen de esta respuesta aeromagnética: (1) las rocas de la sierra de Ulapes poseen polarización reversa. (2) magnetita dentro de rocas de esta zona están parcialmente alteradas a hematita u otros minerales de baja susceptibilidad magnética. (3) un gran cuerpo intrusivo situado a gran profundidad de baja susceptibilidad magnética está enmascarando el signo aeromagnético normal del Complejo Ígneo Chepes.

El presente trabajo tiene como objetivo principal la verificación de interpretaciones geofísicas para las Sierras de Chepes y Sierra de Ulapes-Las Minas, a partir de un reprocesamiento de los datos aeromagnéticos y así de esta manera brindar una respuesta a lo planteado por Pieters et al. (1997), en referencia a las teorías enumeradas anteriormente. Con este propósito, los datos fueron transformados al dominio de la frecuencia, aplicándoles filtros como ser reducción al polo (RTP), derivada vertical de orden 1 y 2, derivada fraccional de orden 0.75, derivadas horizontales (DX y DY), amplitud de señal analítica (ASA) e inclinación de señal analítica (ISA) del campo magnético anómalo (CMA). Ampliando de esta forma en esta primera investigación, los estudios hasta ahora efectuados.

GEOLOGIA

Las Sierras de Los Llanos, Chepes y Ulapes-Las Minas, situadas en el NO de Argentina forman parte de la provincia geológica de Sierras Pampeanas (Figura 1). Este conjunto serrano constituye una serie de bloques de basamento cristalino intruido por diversas rocas de edad paleozoica, las cuáles fueron expuestas como resultado de una tectónica compresional andina desarrollada desde el Mioceno al Presente. Las sierras son limitadas por escarpas de fallas normales e inversas de buzamiento medio a abrupto que se desarrollaron durante el levantamiento andino Cenozoico (Jordan y Allmendinger, 1986).

El basamento Paleozoico de las Sierras Pampeanas de Chepes y Ulapes contiene un número de dominios de distinta litología y estructura, los cuales son atravesados por zonas de cizalla (Pieters et al., 1997).

Dos dominios principales son definidos: Pampeano Cambriano temprano y Famatiniano Ordoviciano temprano, los cuales están yuxtapuestos en forma compleja. Ambos comparten una historia geológica común desde el Ordoviciano temprano (Pieters et al., 1997). En el área de estudio metasedimentos y rocas metaígneas del basamento están agrupados juntos en el complejo metamórfico Olta, que pertenecen al dominio Pampeano. Estas rocas metamórficas están intrusionadas por granitoides y cuerpos máficos menores del complejo ígneo Chepes y al mismo tiempo fueron sometidas a metamorfismo de alta temperatura y baja presión y anatexis. Los intrusivos y las migmatitas marcan arriba el dominio Famatiniano el cuál fue formado durante una fase de subducción hacia el este bajo el terreno Pampeano. Estos dominios estuvieron sujetos a deformación no coaxial compresiva y metamorfismo retrogrado en el Ordoviciano tardío. Subsecuentemente, fueron intrusionados por granitos del Devoniano y cubiertos por sedimentos del Carbonífero y del Pérmico (Pieters et al., 1997).

Las rocas ígneas de las Sierras de Los Llanos, Chepes y Ulapes-Las Minas fueron generadas durante la orogenia Famatiniana y formaron parte del importante arco magmático desarrollado en el Ordovícico Inferior, a lo largo de la margen protoandino de Gondwana (Dahlquist et al., 2005).

LEVANTAMIENTO AEROGEOFÍSICO

Se contó con los datos proporcionados por SEGEMAR del levantamiento aeromagnético y gamma aerospectrométrico del bloque La Rioja de coordenadas: A: 30°40' S / 66°45' O, B: 30°40' S / 66°00' O, C: 32°00' S / 66°00' O, D: 32°00' S / 66°30' O, E: 31°20' S / 66°30' O, F: 31°20' S / 66°45' O, que se ilustra en la Figura 1. El levantamiento de los datos aerogeofísicos presenta las siguientes características: líneas de vuelo este-oeste, con espaciamiento de 500 m entre ellas y líneas de control de orientación norte-sur con espaciamiento cada 5000 m. La altitud de vuelo fue de aproximadamente 100 m sobre el terreno; el intervalo de muestreo a lo largo de las líneas de vuelo es de 0.1 segundos (7.3 m); para posicionar el avión durante el vuelo se utilizó un sistema GPS en modo diferencial con una lectura por segundo. El magnetómetro aéreo utilizado fue de vapor de cesio (sensibilidad 0.001 nT), rango de medición de 15000 a 105000 nT con un intervalo de muestreo de 0.1 segundos. El magnetómetro usado de base fue de características idénticas, con un intervalo de muestreo de un segundo (Chambers, 1996).

Los archivos de datos magnéticos en formato ER-Mapper fueron transformados en matrices GEOSOFT. Los datos magnéticos fueron interpolados en una grilla regular de 120 m de lado utilizando el método de mínima curvatura (Briggs, 1974; Swain, 1976).

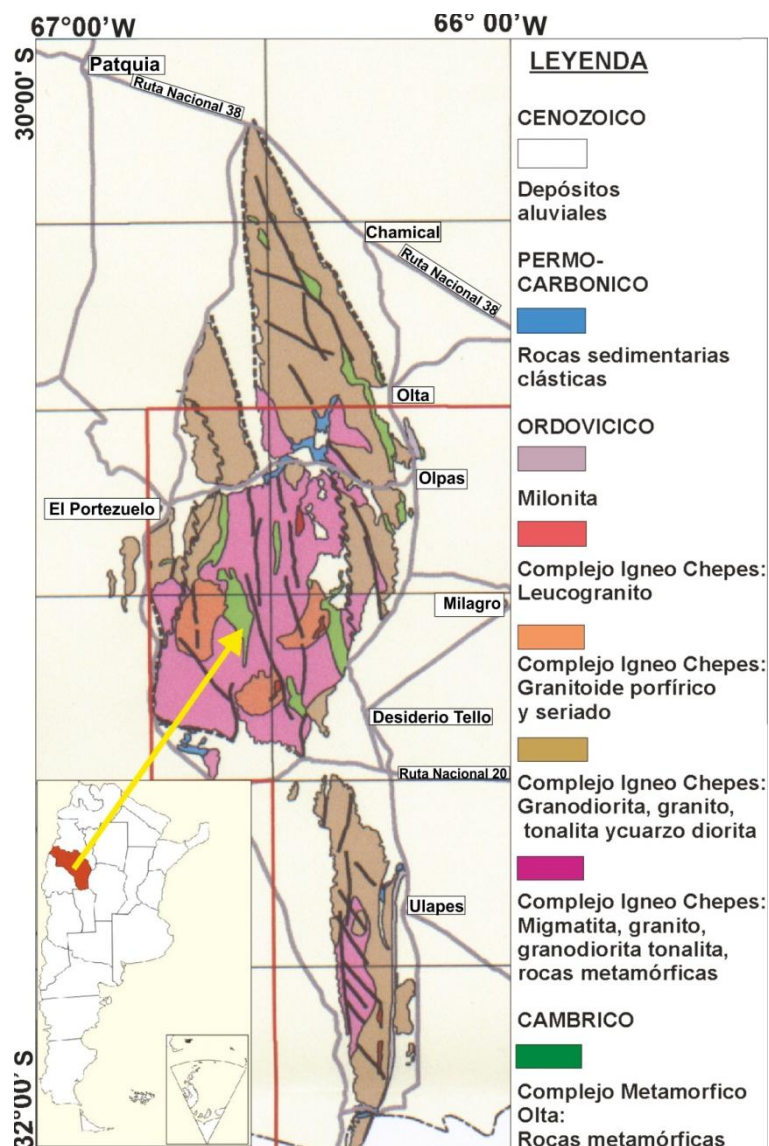


Figura 1. Mapas de ubicación y geología regional (tomado y modificado de Pieters et al., 1997).

Figure 1. Location maps and regional geology (taken and modified from Pieters et al., 1997).

MÉTODOS UTILIZADOS

A los datos aeromagnéticos, se le aplicaron las reducciones del IGRF (International Geomagnetic Reference Field), época 1995, para obtener la anomalía del campo magnético (Figura 2). Una serie de rutinas de procesamiento de imágenes puede ser especificada para realzar los efectos de algunas fuentes geológicas en detrimento de otras, mediante el uso de técnicas de realce matemático (Milligan y Gunn, 1997). A continuación se describen algunas técnicas de realce y sus resultados. Es sabido que importantes concentraciones de depósitos minerales están por lo general relacionadas con respuestas magnéticas de números de onda altos (El Sadek, 2009). Por lo tanto, el filtro de pasa alto fue aplicado a los datos aeromagnéticos con el fin de mejorar los números de onda altos y definir los bordes del cuerpo.

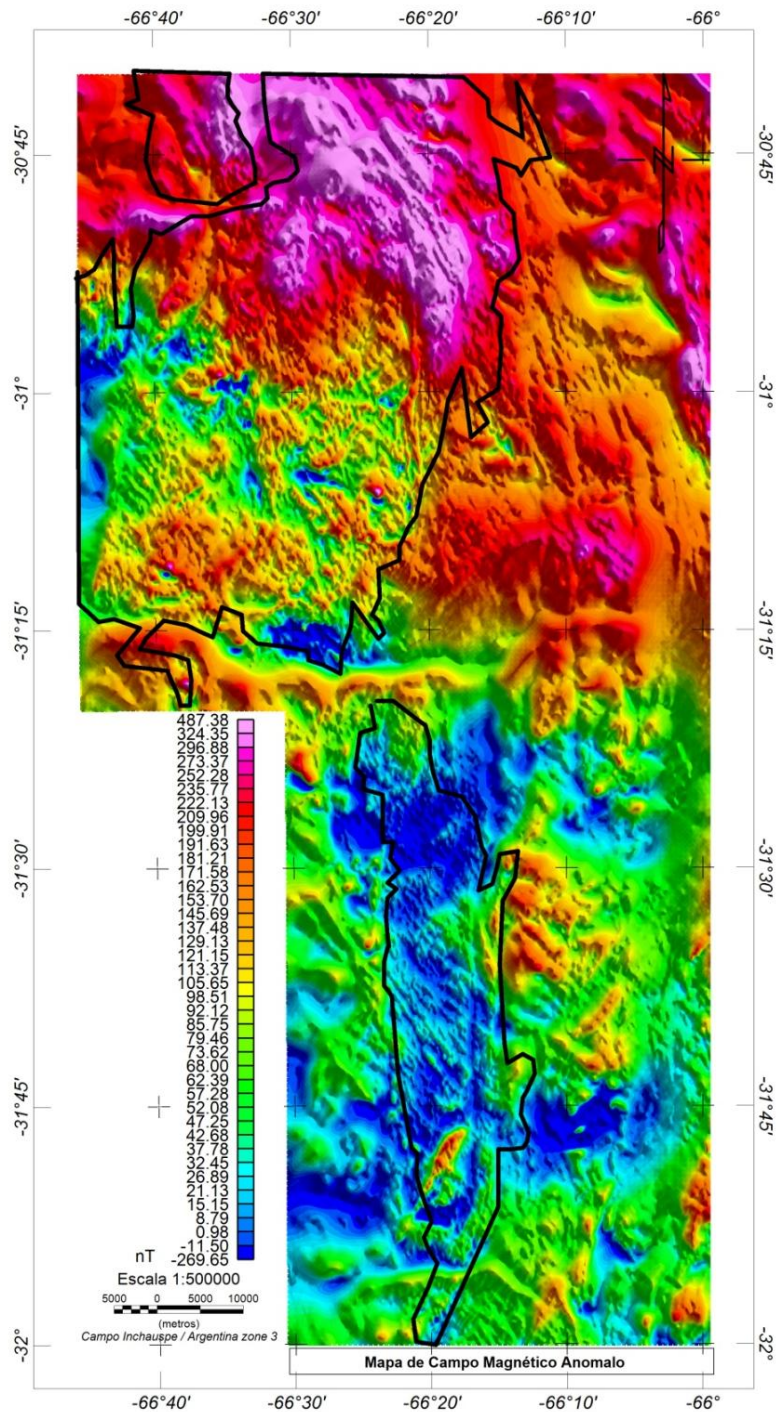


Figura 2. Mapa de Campo Magnético Anómalo.
Figure 2. Map of Anomalous Magnetic Field.

Método de Reducción al Polo (RTP)

Un filtro de reducción al polo para bajas latitudes geomagnéticas fue aplicado al mapa de la anomalía magnética (Philips, 1997). Esta aproximación utiliza un filtro acimutal en el dominio de número de onda para minimizar el ruido direccional causado por la latitud geomagnética baja. Como el área bajo estudio se encuentra en una región de baja latitud, los valores positivos indican la posición de fuentes más fuertemente magnéticas o de mayor magnetización. El análisis del campo magnético anómalo reducido al polo muestra los conjuntos de fuentes en su posición física verdadera.

La inclinación magnética en las Sierras de Chepes y de Ulapes-Las Minas es de -30° aproximadamente. Como consecuencia de dicha inclinación, las anomalías magnéticas inducidas están situadas considerablemente fuera

de sus fuentes magnéticas y dan una falsa posición física de la estructura geológica verdadera. Este problema se resolvió calculando la anomalía magnética reducida al polo (asumiendo un campo vertical) el cuál ubica la anomalía magnética sobre su fuente, de modo que las anomalías magnéticas coincidan con los cambios litológicos y estructuras que las originan.

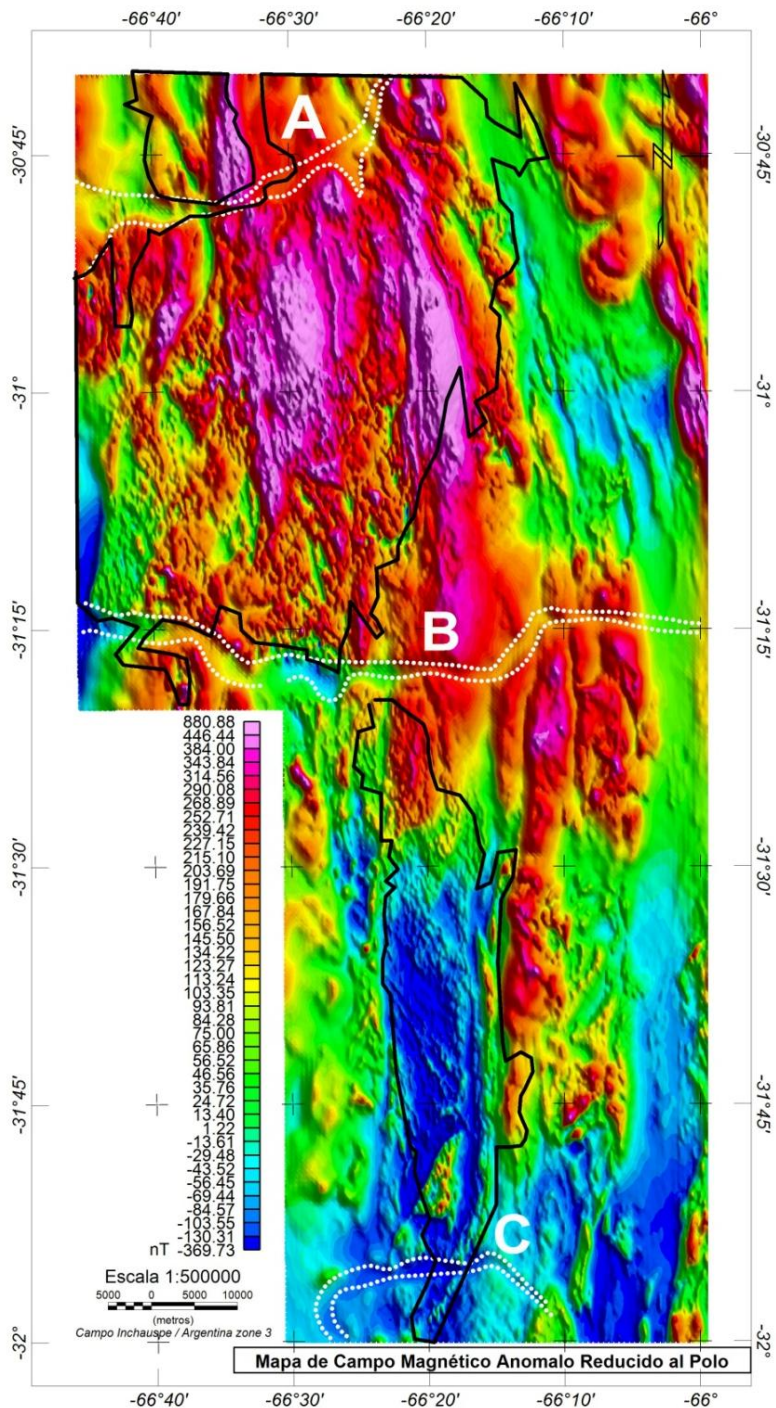


Figura 3. Mapa de Campo Magnético Anómalo reducido al polo.
Figure 3. Map of Anomalous magnetic field reduced to the pole.

Filtro pasa-alto del Campo Magnético Anómalo RTP

Algunas frecuencias pueden ser removidas de los datos magnéticos, simplemente eliminando un rango especificado del rango total de frecuencias del espectro de los datos (Milligan y Gunn, 1997). Si el conjunto de datos magnéticos contiene una serie de anomalías de alta frecuencia, coherentes con fuentes superficiales y la

alta frecuencia es de especial interés (como en este caso de estudio), es posible eliminar las anomalías profundas, representada con las bajas frecuencias aplicando el proceso de filtrado de paso alto.

La mayoría de los filtros, obtienen los mejores resultados cuando las fuentes emisoras (superficial y profunda) proveen señales que no contengan frecuencias comunes. Este filtro se realizó utilizando la transformada rápida de Fourier (en el dominio de la frecuencia).

El mapa de filtro pasa alto de anomalía reducida al polo en esta investigación (Figura 4) se obtuvo de la siguiente manera:

- Prolongación ascendente de los datos de la anomalía reducida al polo, a 120 m de altitud.
- Se aplicó el filtro pasa alto con valor de número de onda de corte = 0.1 ciclos/km.
- Como resultado se logran las anomalías magnéticas residuales que están relacionadas y asociadas con fuentes poco profundas o cerca de la superficie.

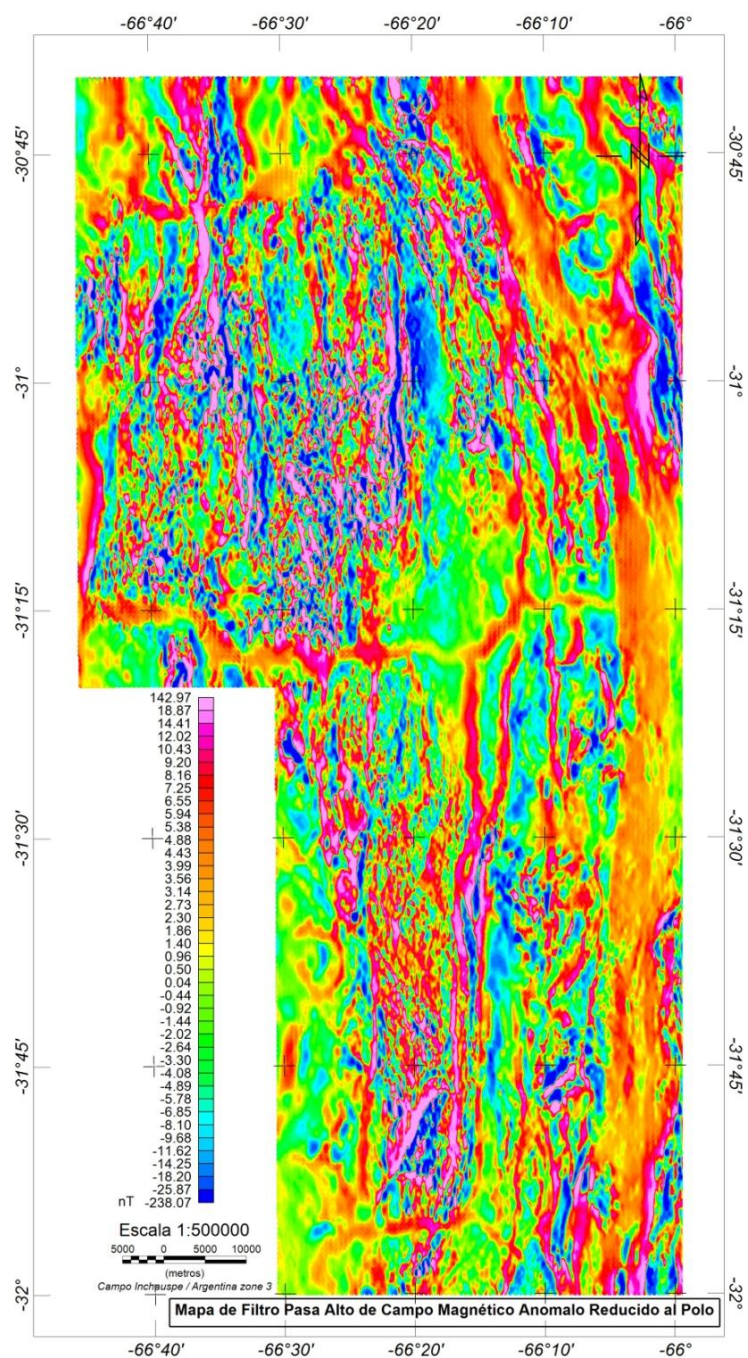


Figura 4. Mapa de Filtro Pasa Alto de Campo Magnético Anómalo reducido al polo.

Figure 4. Map of High Pass Filter Anomalous Magnetic Field reduced to pole.

Amplitud de la Señal Analítica

El concepto de señal analítica o energía envolvente de las anomalías magnéticas fue introducido por Nabighian (1972). Una característica importante es la independencia en la dirección de la magnetización de la fuente potencial (Nabighian, 1974; Roest et al., 1992; Ansari y Alamdar, 2009). La amplitud de la señal analítica está relacionada con la amplitud de la magnetización (Nabighian, 1972; Roest y Pilkington, 1993), ver ecuación 1. Cabe destacar también que es una función simétrica en forma de campana cuyo máximo se ubica encima del contacto entre cuerpos, siendo el ancho de la curva de amplitud proporcional a la profundidad del mismo (Salem y Smith 2005).

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

Donde:

A: es la amplitud de la señal analítica.

M: es el campo magnético anómalo observado en x,y.

Esta técnica, permite resaltar las anomalías magnéticas producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda (Salem, 2005).

En el presente trabajo de investigación consideramos que si bien la señal analítica se puede emplear como un operador de la Reducción al Polo (Ansari y Alamdar, 2009) mitigando el ruido inducido en la operación. También se la puede aplicar a datos de campo magnético total reducidos al polo, de esta forma se localizan con mayor precisión los cuerpos causantes de las anomalías magnéticas de interés (Figura 5).

Fase de la Señal Analítica (Tilt)

Según Thurston y Smith (1997), la fase permite la estimación de la inclinación de la fuente causante y por lo tanto el contraste local de susceptibilidad, es una extensión de la teoría de la señal analítica compleja inicialmente presentada por Nabighian (1972), ver ecuación 2.

Se define como el ángulo Φ_n , al formado entre la componente real (Re) y la componente imaginaria (Im) de la señal analítica en el dominio de Fourier:

$$\Phi_n = \arctan\left[\frac{\text{Im}(A_n(x, y))}{\text{Re}(A_n(x, y))}\right] \quad (2)$$

Donde:

$n = 0, 1, 2, \dots$ orden de la señal analítica.

$A_n(x, y)$: es la derivada enésima de la señal analítica.

El método del tilt utiliza las derivadas horizontales y la derivada vertical del campo magnético para identificar contactos geológicos. Presenta la ventaja de resaltar los contactos de cuerpos de distintas características magnéticas, que se ubican en el cruce por el valor cero del tilt. Éstos son independientes de la dirección de magnetización, ya que la amplitud de la señal depende solo de la intensidad de magnetización y del rumbo de las estructuras geológicas (Miller et al., 1994).

En la Figura 7 se muestra el mapa de Fase de la Señal Analítica que más adelante analizamos.

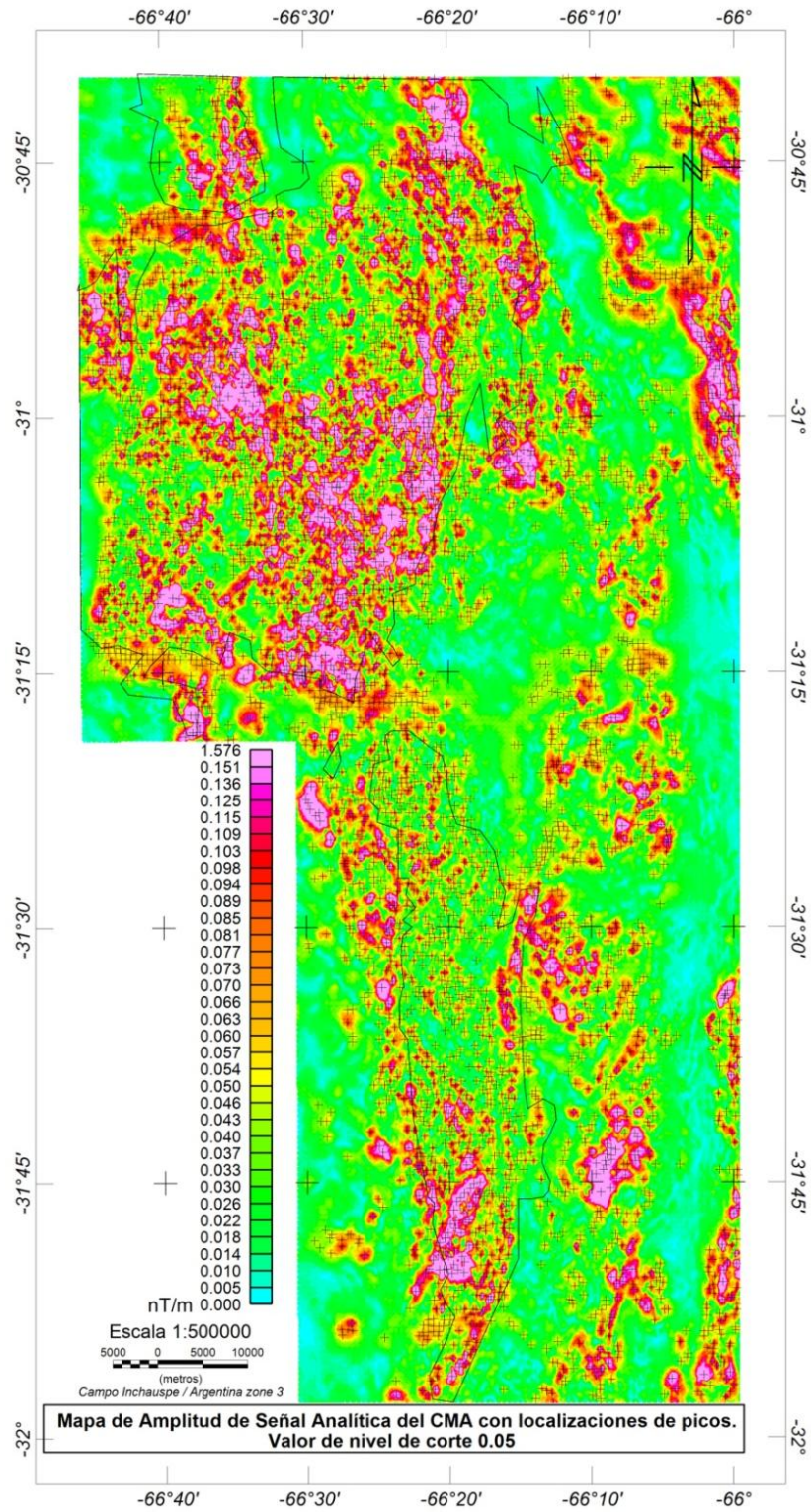


Figura 5. Mapa de Amplitud de Señal Analítica de Campo Magnético Anómalo reducido al Polo.
Figure 5. Map of Signal Amplitude Anomalous Magnetic Field Analytical reduced to Polo.

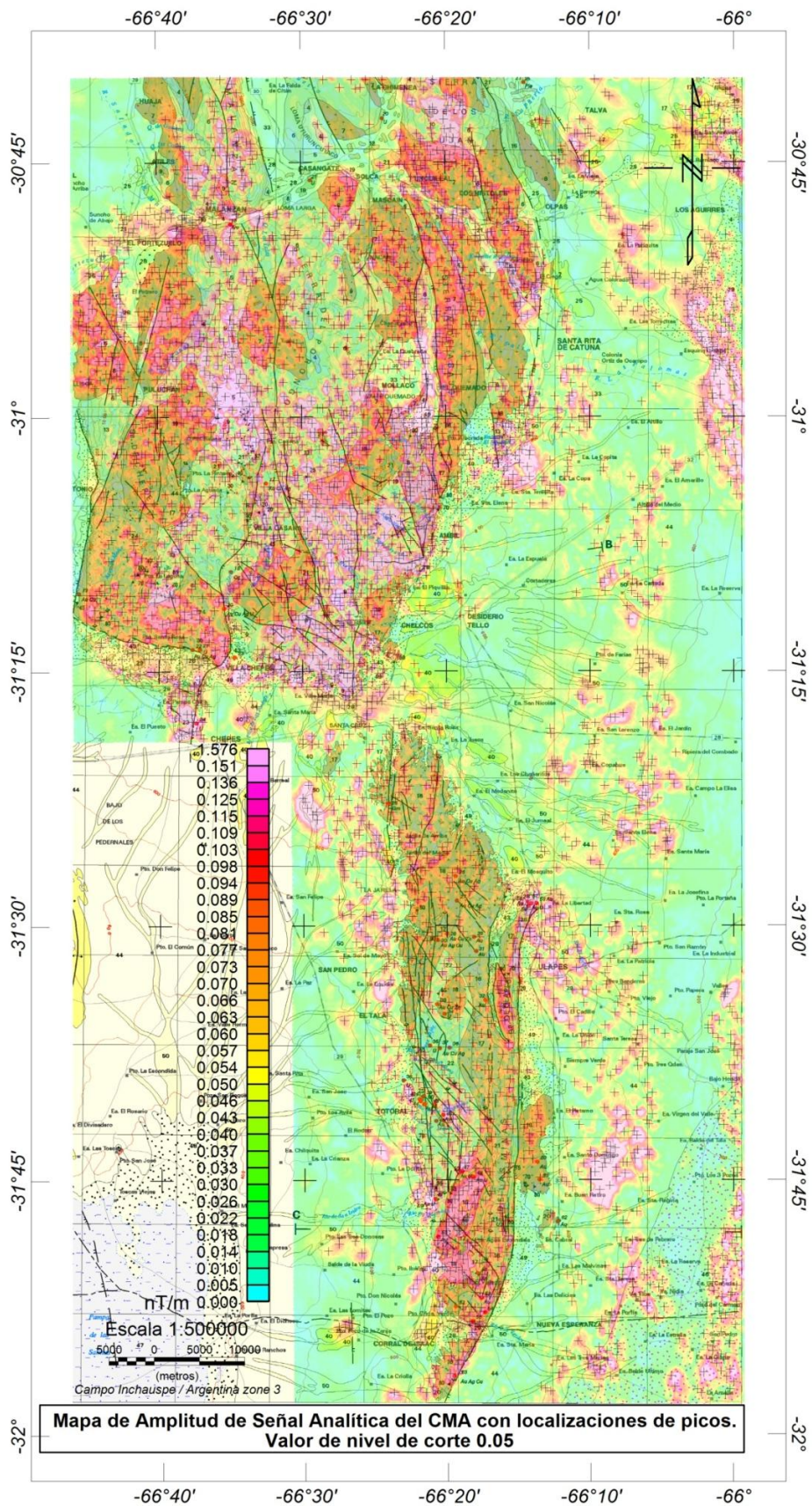


Figura 6. Mapa de Amplitud de Señal Analítica de Campo Magnético Anómalo sobre la carta geológica.

Figure 6. Map of Analytical Signal Amplitude Anomalous Magnetic Field on the geological map.

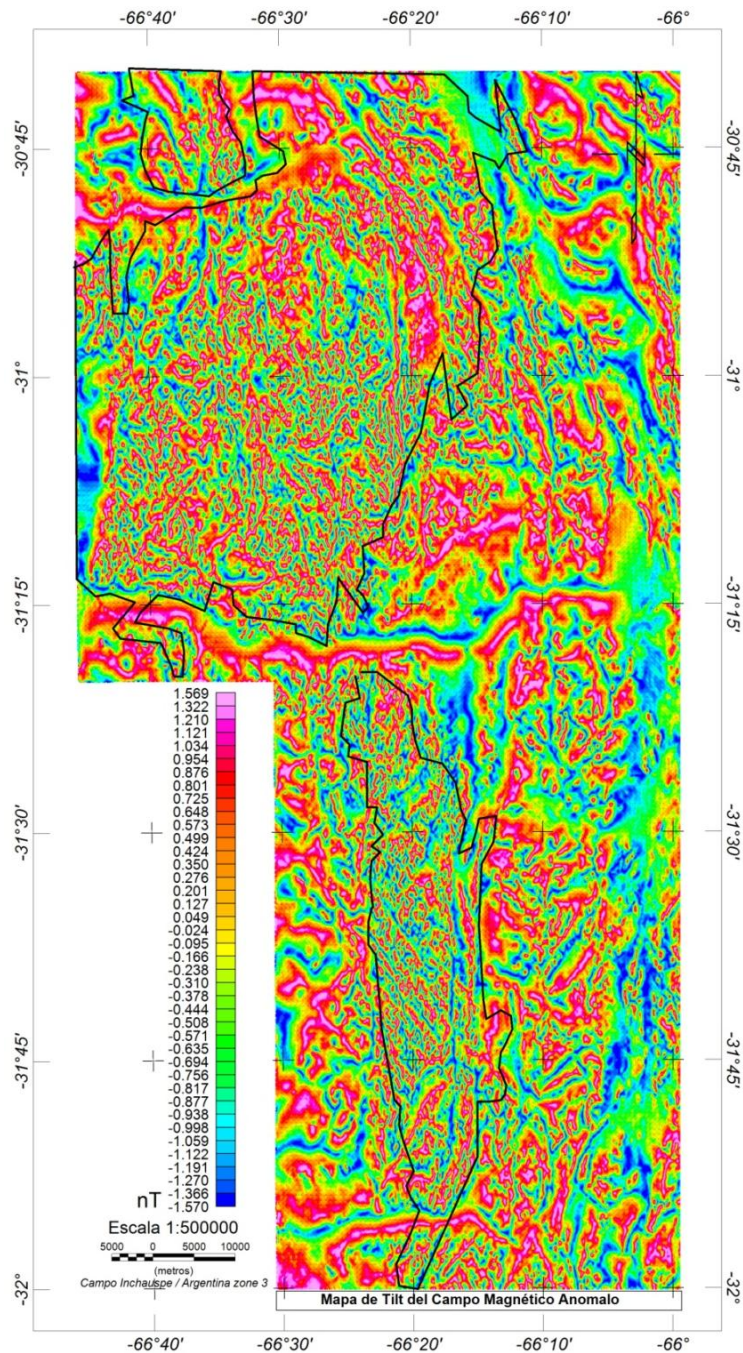


Figura 7. Mapa de Fase de la Señal Analítica (Tilt).
Figure 7. Map of Phase Analytical Signal.

Derivadas Verticales

Diversas derivadas verticales del campo magnético pueden ser calculadas multiplicando el espectro de amplitud del campo por un factor de forma:

$$VD = \frac{1}{n} [(\mu^2 + \nu^2)^{1/2}]^n \quad (3)$$

Donde:

VD : es la derivada vertical, n es el orden de la derivada vertical.
 μ y ν : son los números de onda según la dirección x e y .

La primera derivada vertical (gradiente vertical), es físicamente equivalente a medir el campo magnético simultáneamente en dos puntos verticales, uno por arriba del otro, restando los respectivos valores y dividiendo el resultado por la separación vertical espacial entre ambos puntos de medición (Figura 8).

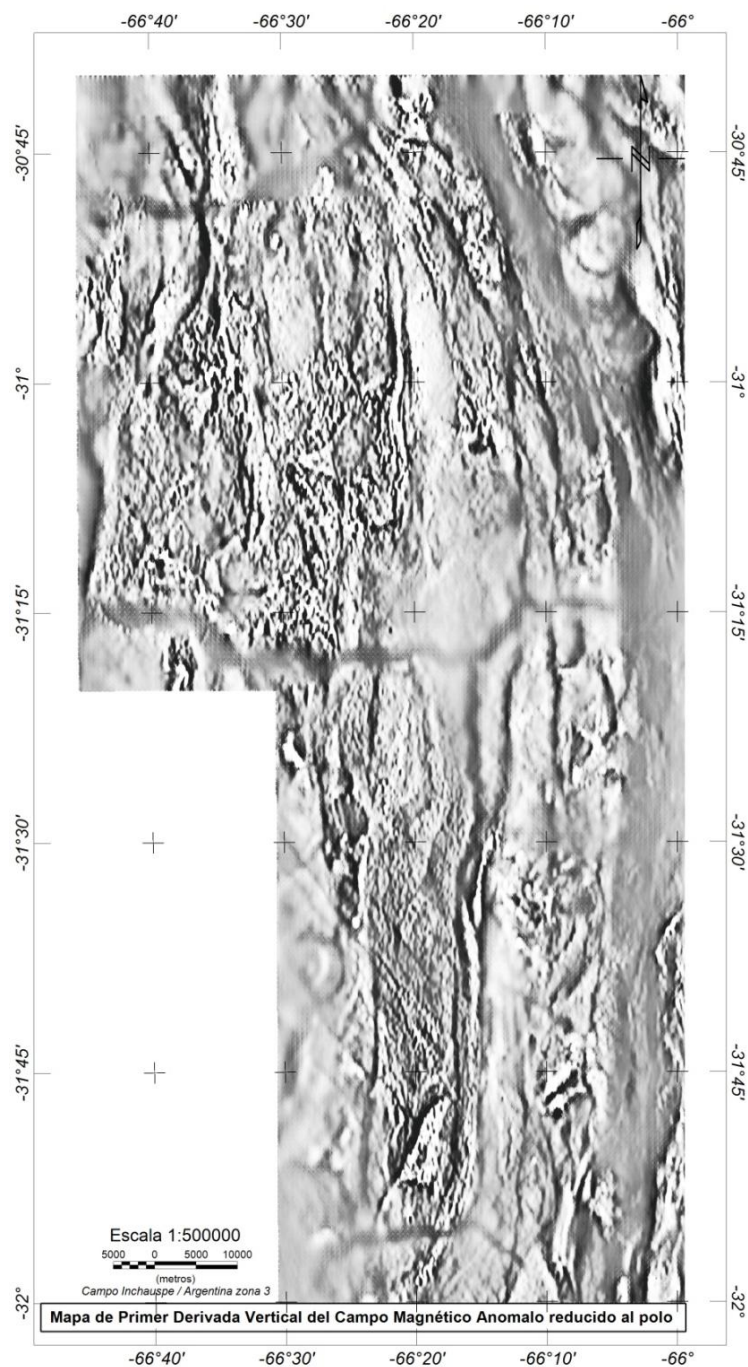


Figura 8. Mapa de Primera Derivada Vertical.
Figure 8. Map of First Vertical Derivative.

La segunda derivada vertical (Figura 9), es el gradiente vertical de la primera derivada vertical y así sucesivamente. La fórmula para la frecuencia de respuesta de estas operaciones, muestra que el proceso realza altas frecuencias relativas a bajas frecuencias. Esta propiedad es la base para la aplicación del proceso de derivada, el cual elimina los efectos regionales de gran longitud de onda y resuelve los efectos de anomalías someras. La segunda derivada vertical tiene mayor poder de resolución que la primera derivada vertical, pero requiere para su aplicación de datos de mayor calidad, ya que su mayor realce de altas frecuencias resulta en mayor realce de ruido (Milligan y Gunn, 1997).

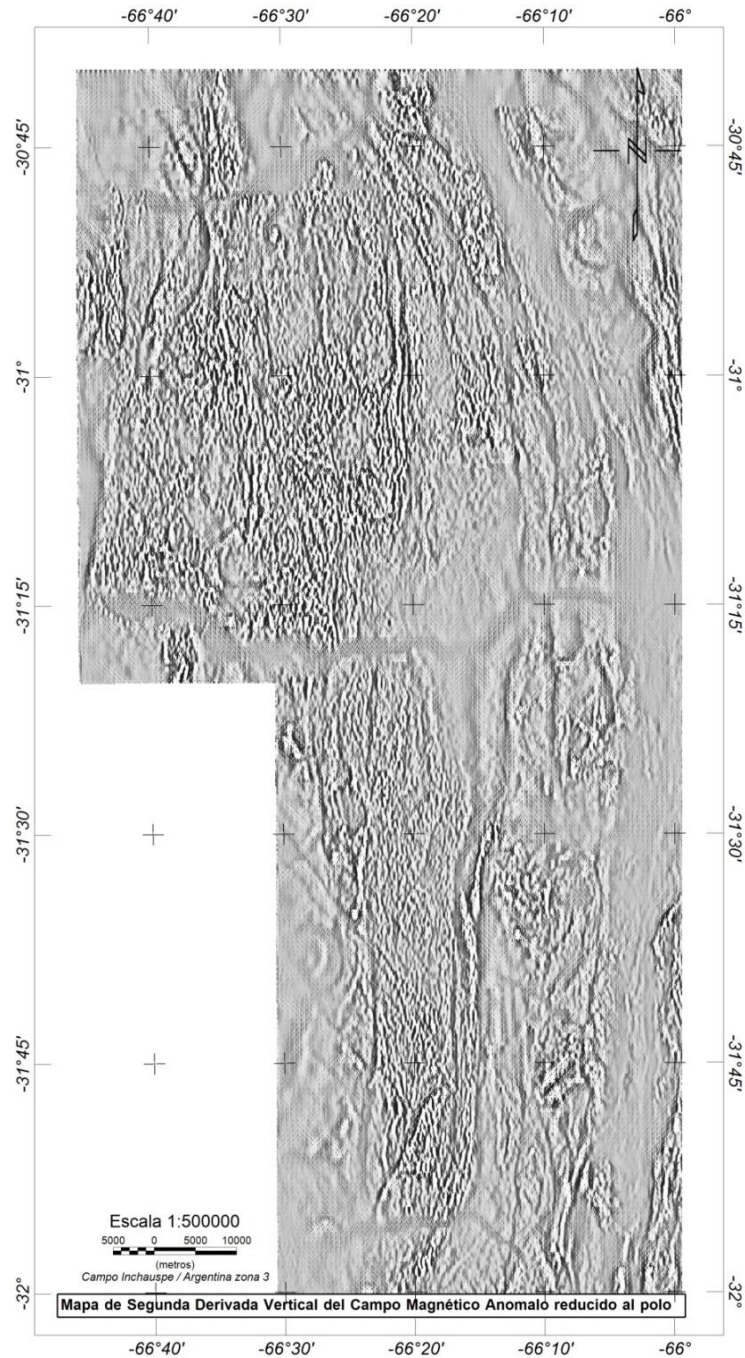


Figura 9. Mapa de Segunda Derivada Vertical.

Figure 9. Map of Second Vertical Derivative.

Derivadas Verticales Fraccionales

Actualmente, se ha demostrado un gran interés en el uso de derivadas de orden fraccional para lograr un mapa de derivada, que contenga el balance correcto entre realce de la señal y el ruido. Cooper (2003, 2004) demostró la eficacia en la solución de este problema basado en el método estadístico de desviación estándar local de los datos (ver ecuación 4).

$$F \left[\frac{\partial^n f}{\partial z^n} \right] = k^n \cdot F(f) \quad (4)$$

Donde:

F : es la representación en el dominio de Fourier del campo potencial.

f : es el campo potencial.

k : es el número de onda ó frecuencia.

n : es un valor fraccional.

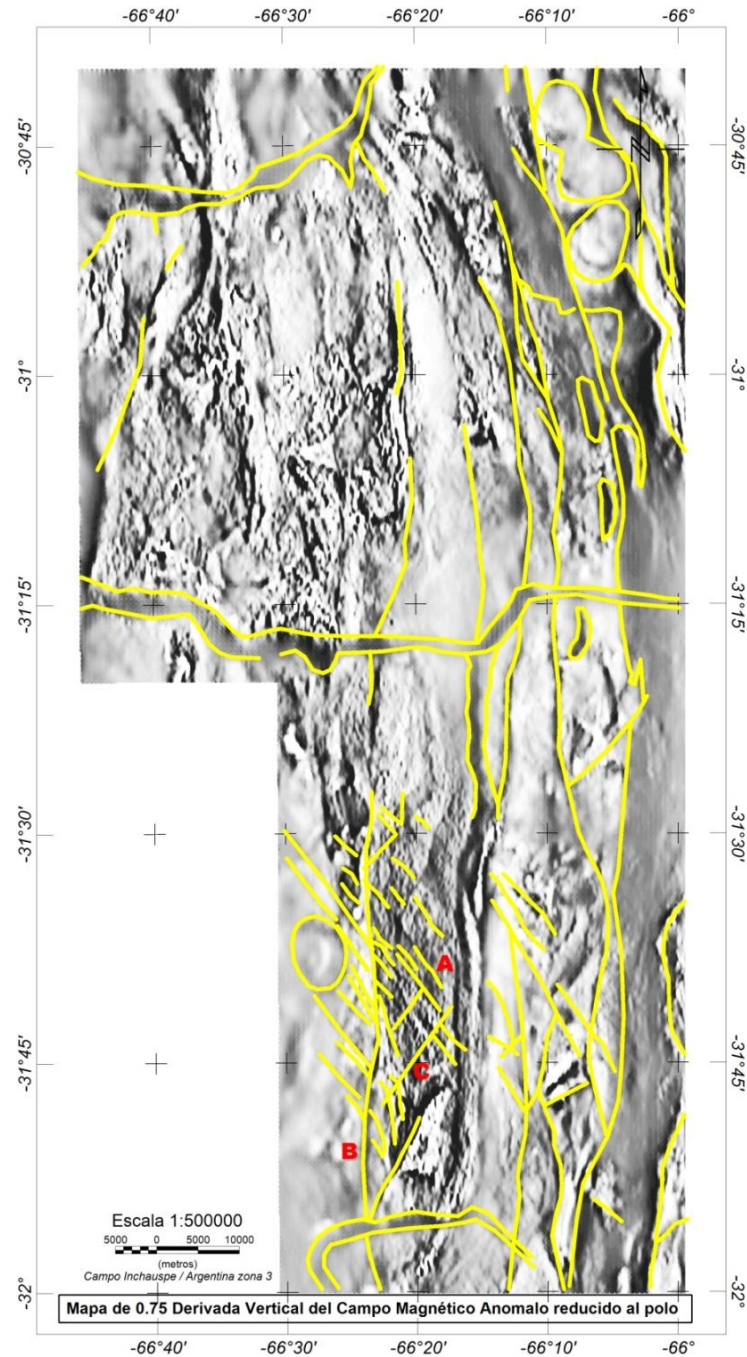


Figura 10. Mapa de Derivada Fraccional Vertical de orden 0.75.

Figure 10. Map of Vertical Fractional Order Derivative 0.75.

Derivadas horizontales

Los filtros respuesta para calcular las n ésimas derivadas horizontales en las direcciones x ó y son: $(j_u)^n$ y $(j_v)^n$. Este proceso incluye una transformación de fase tanto como un realce de altas frecuencias. La transformación de fase generalmente tiene el resultado de producir picos de anomalía localizados sobre los extremos de cuerpos

anchos, y el realce de altas frecuencias agudiza estos picos para incrementar la definición de los extremos del cuerpo. Algunos intérpretes usan la cualidad de las derivadas horizontales para delinear cuerpos geológicos en mapas, pero este proceso se vuelve ambiguo para cuerpos angostos. Sin embargo, la ventaja que poseen las derivadas horizontales sobre las derivadas verticales, es que las derivadas horizontales proporcionan picos sobre la parte superior de las fuentes e indican fuentes contorneadas por gradientes abruptos e inflexiones (Milligan y Gunn, 1997).

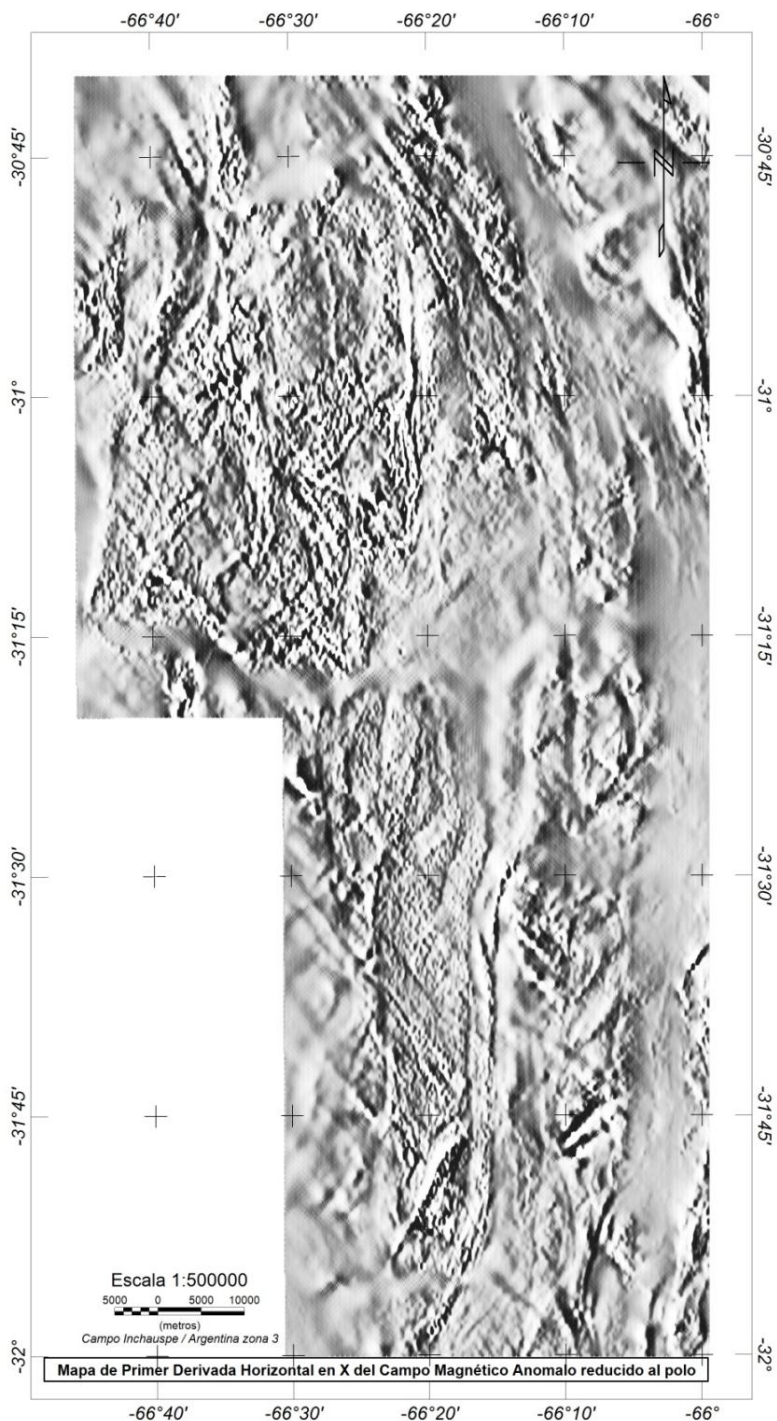


Figura 11. Mapa de Derivada Horizontal en X.
Figure 11. Horizontal Derivative map on X.

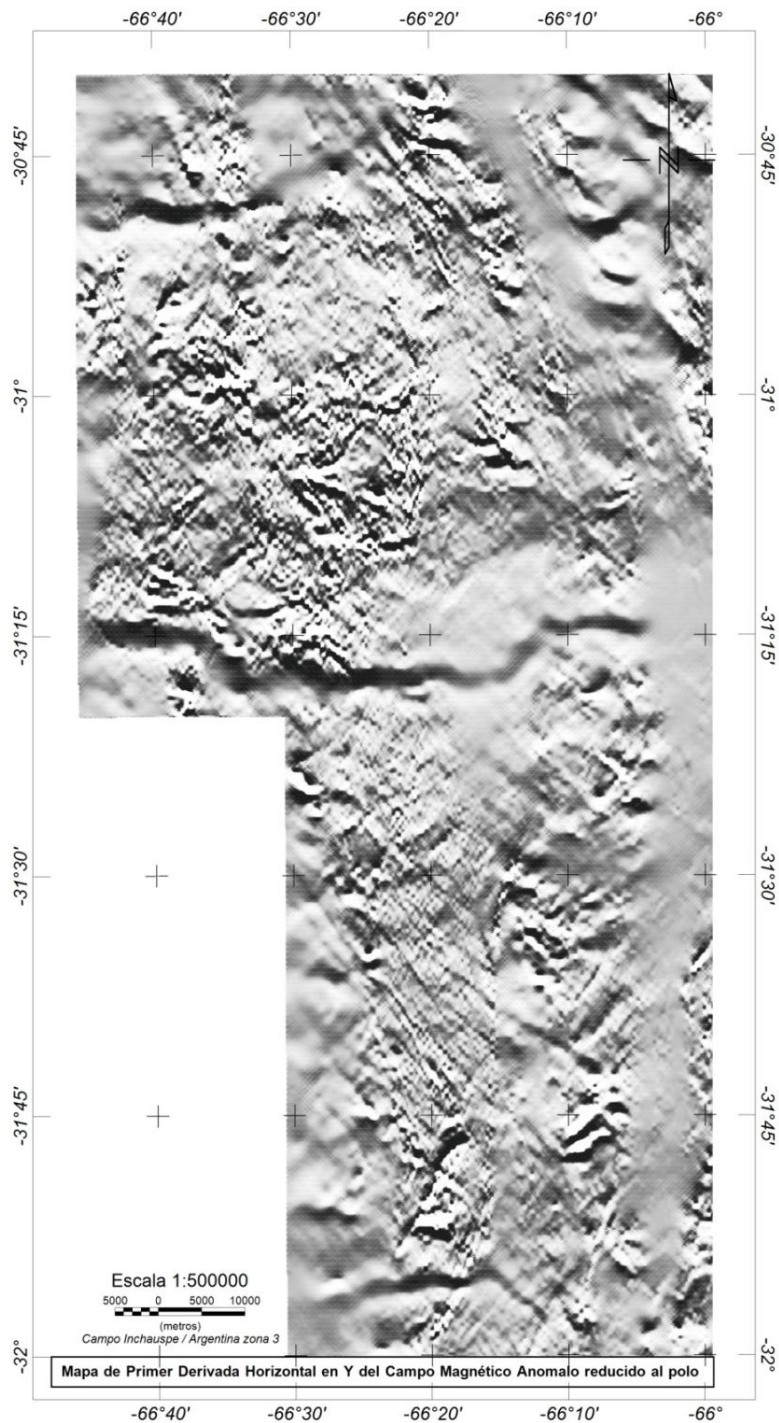


Figura 12. Mapa de Derivada Horizontal en Y.

Figure 12. Horizontal Derivative map on Y.

Relación de Poisson

La relación de Poisson entre los potenciales magnético y de gravedad ha sido ampliamente utilizado para convertir las anomalías magnéticas a anomalías pseudogravedad (Baranov, 1957) y en la interpretación conjunta de datos gravimétricos y magnéticos (Chandler et al., 1981).

La relación de Poisson ayuda a transformar los datos magnéticos en datos de pseudogravedad y de esta manera obtenemos la pseudo anomalía gravimétrica (Figura 13). Se supone que las señales observadas de gravedad y las de magnetismo son causadas por el mismo cuerpo anómalo (con la misma geometría); y que las anomalías magnéticas son totalmente inducidas por el campo geomagnético actual (no hay magnetización remanente).

La relación de Poisson, para fuentes puntuales simples expresa que el potencial magnético causado por un cuerpo de densidad y magnetización uniformes es proporcional a la componente de la atracción gravitacional en la

dirección de la magnetización (Cordell y Taylor, 1971; Chandler et al., 1981; Blakely, 1995), ver ecuación 5.

$$\Delta Z = \frac{Jz}{G\sigma} \left(\frac{\partial g_z}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Donde:

- ΔZ : intensidad magnética en la dirección z.
- $\partial g_z / \partial z$ = gradiente vertical de gravedad.
- Jz: densidad de magnetización en la dirección z.
- σ : densidad del cuerpo.
- G: Constante de Gravitación de Newton.

$$\Delta Z = Cte \left(\frac{\partial g_z}{\partial z} \right)$$

Para la aplicación de ésta relación se considera que la relación magnetización – densidad es invariable.

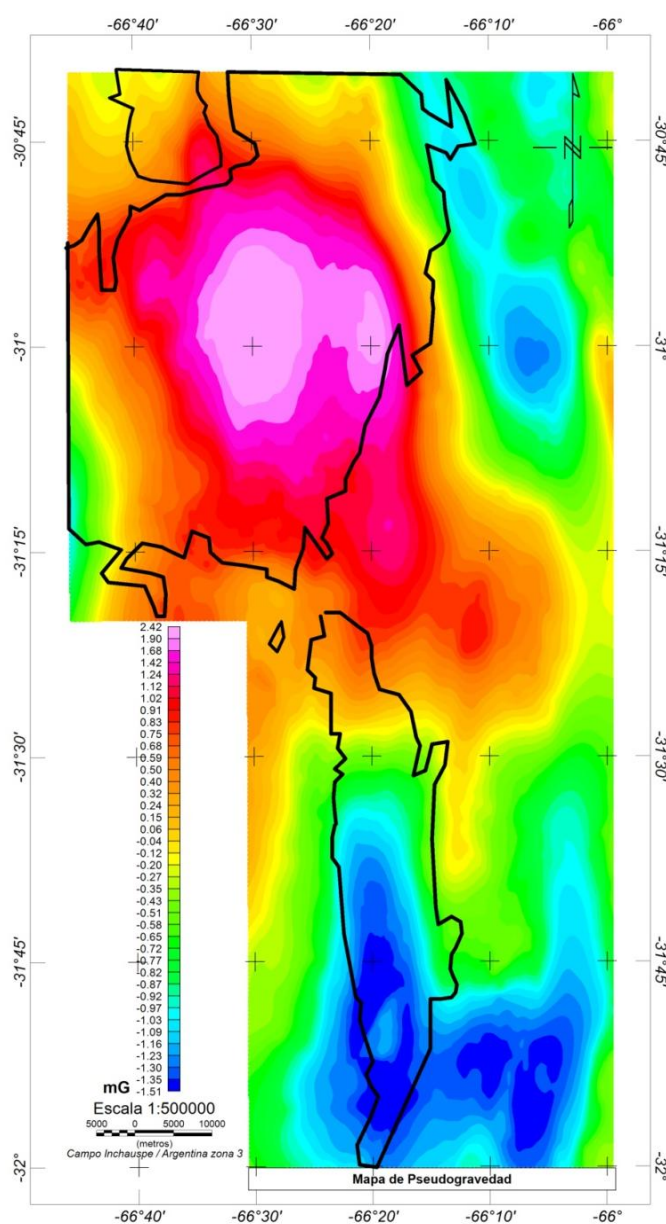


Figura 13. Mapa de Pseudogravedad.

Figure 13. Map of Pseudogravity.

RESULTADOS

El mapa de anomalía magnética reducido al polo (Figura 3) del relevamiento aeromagnético del área La Rioja, muestra datos interesantes, donde se observa predominio de longitudes de onda cortas. En el análisis se denotan alternancia de bandas con valores muy altos (magenta), valores bajos (verdes), siempre positivos con tendencia general N-S y con predominio de valores muy altos para la Sierra de Chepes. Dicha anomalía puede denominarse alto magnético Chepes.

Un análisis detallado de la Sierra de Chepes, en su región central hacia el este, muestra lineamientos N-S que separan bandas de valores altos entre 880 y 290 nT. Para la región centro, hacia el oeste se observan bandas con valores altos de 880 nT y bandas con valores bajos del orden de 1 nT y negativos de 370 nT en su extremo oeste.

En el centro del área de estudio, los lineamientos provenientes del norte son cortados por un lineamiento de dirección casi O-E. En el extremo norte de la Sierra de Las Minas, se observan valores altos del orden de 300 nT, luego en dirección sur existe una disminución gradual de valores en fajas magnéticas desde 75 nT hasta -370nT. También, en esta sierra es destacable un bajo magnético extenso que denominaremos bajo magnético Las Minas.

El bloque correspondiente a la Sierra de Chepes es el que presenta mayor magnetismo del área. Se observan valores altos al este y al sureste de la mencionada sierra, como así también al este de la sierra de Las Minas. En cambio, en el resto de la zona se observan valores negativos. Se reconocen una variedad de dominios elongados con tendencia norte-sur asociados con cuerpos de granitoides y afloramientos de metasedimentos. Las rocas en la zona norte son en general magnéticas y en el sur, hay evidencia de un gran dominio magnético asociado con granitoides.

Por último, a partir del análisis del campo magnético anómalo reducido al polo de la región bajo estudio, se observan tres zonas de bajos magnéticos que se mencionan en la Figura 3 como A, B y C. La zona A se relaciona con la megafalla Salinas Grandes (Baldis et al. 1979), también percibida con la alineación de soluciones de Euler en los datos gravimétricos (Giménez et al. 2008). La zona B, en dirección este-oeste, corresponde a un bajo magnético que separa la Sierra de Chepes de la Sierra de Las Minas y que se advierte en los primeros estudios de gradiente gravimétrico (en preparación, Fanton et al., 2014). En el extremo sur de la Sierra de Las Minas es visible un corredor (zona C), el cual se vincularía con la megafalla de Quilmes (Giménez et al., 2008).

Las principales conclusiones obtenidas a partir de la interpretación del mapa de filtro pasa alto (Fig. 4) se podrían resumir de la siguiente manera: el área objeto de estudio se caracteriza por diversas anomalías magnéticas que tiene características diferentes (es decir, el relieve, la amplitud, el número de onda y la susceptibilidad). Se observan lineamientos en dirección N-S y lineamientos en dirección NW-SE, como así también en dirección y NE-SW. Los granitoides más viejos se caracterizan porque presentan anomalías magnéticas bajas. Es posible observar que la ubicación de las mineralizaciones de oro se asocia con anomalías magnéticas bajas.

A partir de la aplicación de la señal analítica a los datos del campo magnético reducido al polo, podemos advertir la diferencia entre el carácter dipolar de las señales producidas por el campo magnético anómalo reducido al polo (ver Figura 3), y el carácter monopolar de las anomalías luego de aplicar la señal analítica (ver Figura 5).

Keating y Sailhac (2004) muestran la Tabla de Correlación entre la profundidad y el radio del cilindro, para describir las anomalías magnéticas debidas a la presencia de pipes de kimberlita a diferentes latitudes magnéticas. En este trabajo se realiza el análisis de los picos en la grilla de la señal analítica mediante la aplicación del algoritmo de selección de Blakely (1995) con el fin de localizar los máximos. Luego, estos máximos se graban en la base de datos y se muestran con símbolos (cruces) en el mapa de señal analítica. Un resultado muy interesante puede verse en la Figura 6. Allí se observa claramente, que la mayoría de los depósitos minerales en esta área, se relacionan con amplitudes altas de señal analítica.

En la Figura 10, se muestra la derivada fraccional de orden 0.75 en escala de grises. En la parte sur, se puede observar un sistema de alineamiento NW-SE (indicado con A) con una densidad muy alta, sobrepuesto a dos lineamientos más regionales. El primero tiene orientaciones N-S (indicado con B), el segundo es más sutil tiene una orientación NE-SW (indicado con C); el cuál se hace más evidente con la derivada horizontal en X y verticales.

En la Sierra de Ulapes-Las Minas, entre las zonas de cizallas mapeadas por trabajos geológicos, podemos citar las que se encuentran en el distrito minero Las Callanas, latitud 31° 41' 59" S y longitud 66° 21' 18" O, las cuáles fueron mapeadas y descriptas por Cravero (1999).

Los contornos de las Sierras de Chepes y Ulapes-Las Minas han sido delimitados de manera muy eficiente, como así también los rasgos estructurales menores como zonas de cizallas al aplicar las derivadas horizontales (Figura 11 y 12). A partir de este procesamiento, se puede inferir la continuación de la Sierra de Las Minas, tanto hacia el este como el oeste.

A partir de una extensa base de datos gravimétricos pertenecientes al Instituto Geofísico Sismológico Volponi, se elaboró la carta de anomalía simple de Bouguer para el área de estudio (Figura 14) y se la comparó con la carta de anomalías pseudogravimétricas. Si bien entendemos que son escasos los datos gravimétricos terrestres incluidos en esta porción, vemos que existe buena coincidencia entre ambas cartas.

Cotejando las Figuras 13 y 14 (mapa de pseudogravedad y mapa de anomalía simple de Bouguer), observamos: 1) para la Sierra de Ulapes-Las Minas que las anomalías crecen desde el extremo sur hacia el extremo norte de la

misma; 2) para la Sierra de Chepes las mismas crecen desde el extremo sur hacia el centro de la misma. Este comportamiento similar en ambos mapas muestra que la distribución de masas causantes de anomalías sería la misma. De esta manera, quedaría descartada la primer hipótesis planteada por Pieters et al. (1997) acerca de la polarización reversa para la Sierra de Ulapes-Las Minas.

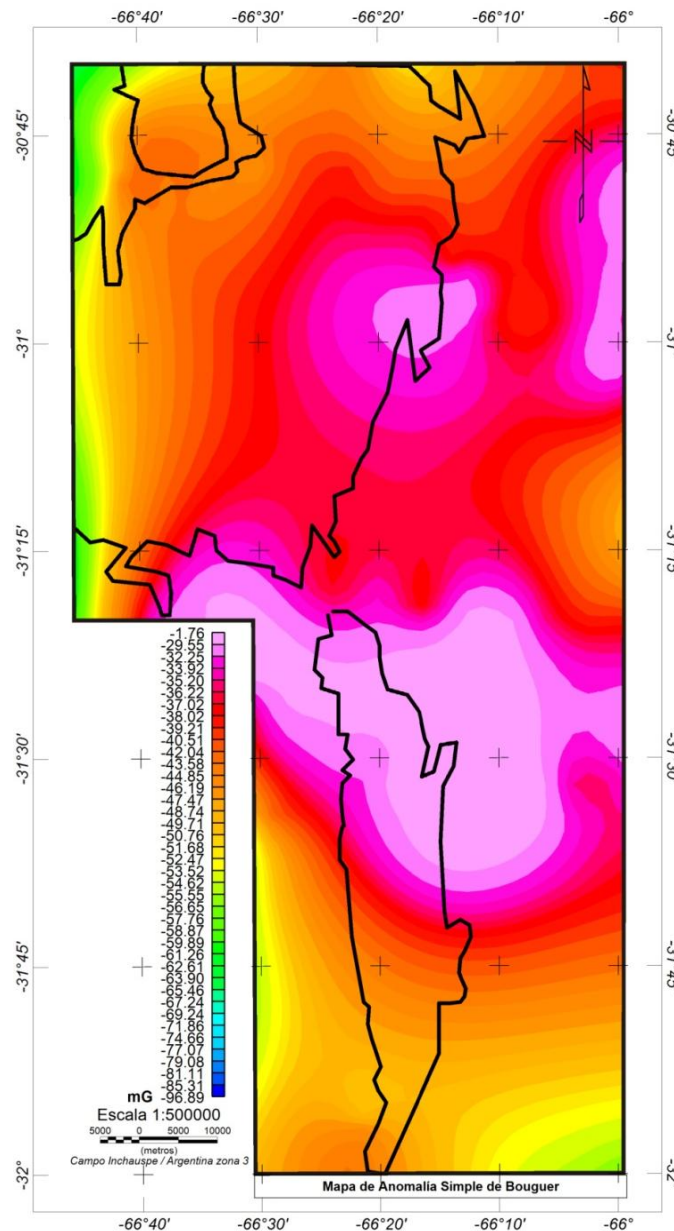


Figura 14. Mapa de Anomalia Simple de Bouguer.

Figure 14. Map of Simple Anomaly of Bouguer.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis, la zona bajo estudio muestra diferentes grados de magnetización y la disposición de las fuentes causantes se pone de manifiesto.

Los mapas generados a partir de los datos aeromagnéticos fueron utilizados para ampliar el conocimiento estructural del área de estudio. Se delinearon las zonas de cizalla, siguiendo los valores magnéticos máximos de amplitud e inclinación de la señal analítica (ASA e ISA), derivadas verticales de orden 0.75, 1 y 2 del campo magnético anómalo, y también a partir de la observación de los mapas de las derivadas horizontales (DX y DY). Los lineamientos principales observados arrojan dos direcciones principales NW-SE y NE-SW y pueden representar zonas de cizalla que son fuertes controladores de mineralización en la región. En cambio, los de

segundo orden, presentan dirección en general E-O.

A partir de lineamientos magnéticos revelados fueron seleccionadas fallas conjugadas mediante imágenes sombreadas en escala de grises provenientes del mapa de derivadas verticales de orden 0.75; 1 y 2 y del mapa de Señal Analítica (ASA) del campo magnético anómalo reducido al polo. En particular, se puede apreciar que la fábrica de lineamientos magnéticos define tres bloques que incluyen las sierras de: Los Llanos al norte; la de Chepes en el medio del área bajo estudio y la de Ulapes-Las Minas al sur.

A partir de la relación de Poisson creemos haber descartado la primera hipótesis propuesta por Pieters. Por otro lado, las zonas de cizalla se pudieron delinear magnéticamente y se corresponden con bajos magnéticos. Esto implicaría cambios físico-químicos en los minerales ferromagnéticos, tales como magnetita que estaría parcialmente alterada a hematita u otros minerales de baja susceptibilidad magnética, por ello no se descartaría la segunda hipótesis planteada por Pieters (1997).

La existencia de esta zona ancha de baja respuesta magnética (susceptibilidad magnética), se puede justificar pensando que: hubo circulación de fluidos hidrotermales a través de las zonas de cizalla, desde un plutón emplazado en profundidad. Esta idea se sustenta en que Granitos Devónicos no están expuestos en las Sierras de Chepes, de Los Llanos y de Las Minas, sin embargo, a partir del análisis de los distintos mapas aeromagnéticos (ver Figura 10), se observan formas ovales de tamaños que van desde stock a plutón. Dichas estructuras sugieren la presencia de granito Devoniano bajo las planicies aluviales en el extremo NE del mapa del área y al O del margen centro Oeste de la Sierra de Las Minas. En otras partes de las Sierras Pampeanas (al Sur), Skirrow et al. (2000) informan que los granitos Devónicos muestran firmas aeromagnéticas similares a las de la Figura 10.

La datación isotópica ^{40}Ar - ^{39}Ar realizada a muestras de sericita en la región se ajustan a la ocurrencia de un evento metalogénico de Au, Ag, Pb, Zn, W, Cu de edad Devónico inferior en el sur de las Sierras Pampeanas (Skirrow et al., 2000). Por lo cual los cuerpos de granito Devónico ocultos en el área del mapa pueden haber proporcionado la fuente de calor que induce la circulación convectiva de fluidos hidrotermales.

Actualmente nos encontramos trabajando sobre modelos gravimagnetométricos que podrían avalar la presencia de los cuerpos plutónicos mencionados anteriormente.

Agradecimientos: A las siguientes instituciones SEGEMAR, CONICET, Instituto Geofísico Sismológico Volponi y al Departamento de Geofísica y Astronomía de la Universidad Nacional de San Juan. Y a la colaboración desde los proyectos financiados por CICITCA-UNSJ y PICT 2010 Bicentenario 2401 ANPCYT. Finalmente a los evaluadores anónimos por sus interesantes y valiosos aportes.

REFERENCIAS

- Ansari, A.H. and K. Alamdar, (2009). Reduction to the Pole of Magnetic Anomalies Using Analytic Signal. *World Applied Sciences Journal*, 7 (4): 405-409.
- Baldis, B., E. Uliarte, y A. Vaca, (1979). Análisis estructural de la comarca sísmica de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 4: 294-311.
- Blakely, R., (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press. 461 p.
- Bodenbender, G., (1911). Constitución geológica de la parte meridional de La Rioja y regiones limítrofes, República Argentina Academia Nacional de Ciencias. Córdoba. *Boletín XIX* (1): 5-221.
- Bodenbender, G., (1912). Parte meridional de la provincia de La Rioja y regiones limítrofes. Constitución geológica y recursos naturales. Ministerio de Agricultura, Secretaría de Geología y Minería. *Anales VII* (3): 9-116.
- Braccacini, I.O., (1946). Los estratos de Paganzo y sus niveles plantíferos en la sierra de los Llanos (Provincia de La Rioja). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 1 (1): 19-61.
- Braccacini, I.O., (1948). Sobre la presencia del Carbonífero inferior en la sierra de los Llanos. *Boletín Informativo Petrolero*. 281 p.
- Briggs, I.C., (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39 (1): 39-48.
- Caminos, R., (1979). Descripción geológica de las Hojas 21f, Sierra de Las Minas y 21g, Ulapes, Provincias de La Rioja, Córdoba, San Juan y San Luis. Secretaría de Estado de Minería, Servicio Geológico Nacional. *Boletín 172*. 56 p.
- Chambers, P., (1996). Survey details, technical specifications and Surrey logistics report for airborne geophysical Survey Córdoba, La Rioja, San Luis. Australian Geological Survey Organisation, Geoscientific Mapping of the Sierras Pampeanas Argentine-Australia Cooperative Project, Report 14.
- Chandler, V.W., Koski, J.S., Hinze, W.J., Braile, L.W., (1981). Analysis of multi source gravity and magnetic anomaly data set by moving-window application of Poisson's theorem. *Geophysics*, 46 (1): 30-39.
- Cravero, O.V. y Ríos Gómez, J.A., (1988). Distrito Minero El Abra, Provincia de La Rioja: Un ejemplo de zona de cizalla aurífera (shear zone) en nuestro país. *Tercer Congreso Nacional de Geología Económica*, 3: 129-140.
- Cravero, O.V., Ríos Gómez, J.A., Loredó J., García Inglesias, J. (1995). Gold-bearing shear zones in Sierra de Chepes, de Las Minas and Ulapes, La Rioja, Argentina. Paper presented at Lake Tahoe, California, Conference.

- Cravero, O.V., (1999). Yacimientos auríferos en Sierras de Las Minas y Ulapes, La Rioja. En: Zappettini, E. (Ed). Recursos Minerales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. Anales, 35: 637-646.
- Cooper, G.R.J. y Cowan, D.R., (2004). Filtering using variable order vertical derivatives. *Computers & Geosciences*, 30 (5): 455-459.
- Cooper, G.R.J. y Cowan, D.R., (2003). The application of fractional calculus to potential field data. *Exploration Geophysics*, 34 (4): 51–56.
- Cordell, L. y Taylor, P.T., (1971). Investigation of magnetization and density of a North Atlantic seamount using Poisson's theorem. *Geophysics*, 36 (5): 919-937.
- Dahlquist, J.A., Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Baldo, E.G., Saavedra J., Alasino, P.H., (2005). Los granitoides de la sierra de Chepes y su comparación con granitoides paleozoicos de las Sierras Pampeanas: implicancias para el orógeno famatiniano. *Asociación Geológica Argentina, Serie D: Publicación Especial*, 8: 87-108.
- El Sadek, Mohamed. A., (2009). Radiospectrometric and magnetic signatures of a gold mine in Egypt *Journal of Applied Geophysics*, 67: 34-43.
- Fanton, G., Martínez P. y Gimenez M., (2014). Análisis e Interpretación del gradiente gravimétrico de las sierras de Chepes-Las Minas (en preparación).
- Frengüelli, J., (1946). Consideraciones acerca de la serie de Paganzo en las provincias de San Luis y La Rioja. *Revista Museo de La Plata. La Plata. Serie Geológica II*, (18): 313-376.
- Frengüelli, J., (1949). Acerca de un nuevo descubrimiento de plantas en los Estratos del arroyo Totoral en la sierra de Los Llanos de La Rioja. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo IV* (1): 153-164.
- Frengüelli, J., (1950). Incites del Paleozoico superior del oeste argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo V* (1): 136-148.
- Gimenez, M., Martínez, P., Introcaso, A., (2008). Lineamientos Regionales del Basamento Cristalino a partir de un Análisis Gravimétrico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (2): 288-296.
- Gunn, P.J., Fitz Gerald, D., Yassi N., Dart, P., (1997). New algorithms for visually enhancing airborne geophysical data. *Exploration Geophysics*, 28: 220–224.
- JICA-MMAJ, (1993). Informe sobre la exploración de minerales del área oeste de la República Argentina – Fase I. Japan International Cooperation Agency, Metal Mining Agency of Japan, Report 93-043. 167 p.
- JICA-MMAJ, (1994). Informe sobre la exploración de minerales del área oeste de la República Argentina – Fase II. Japan International Cooperation Agency, Metal Mining Agency of Japan, Report 93-040. 111 p.
- JICA-MMAJ, (1995). Nota explicatoria sobre la geología y depósitos minerales en el área oeste de la República Argentina. Japan International Cooperation Agency, Metal Mining Agency of Japan, February 1995.
- Jordan, T.E. y Allmendinger, R.W., (1986). The Sierras Pampeanas of Argentina - a modern analog of Rocky-Mountain foreland deformation. *American Journal of Science*, 286: 737.
- Millier, H.G. y Singh, V.J., (1994). Potential Field tilt - A new concept for location of potential field sources. *Applied Geophysics*, 32: 213-217.
- Milligan, P.R. y Gunn, P.J., (1997). Enhancement and presentation of airborne geophysical data 1. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2): 63-75.
- Nabighian, M., (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37 (3): 507-517.
- Nabighian, M.N., (1974). Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39 (1): 85-92.
- Phillips, J.D., (1997). Potential- field geophysical software for the PC, version 2.2: U.S. Geological Survey Open-File Report, 97-725, 34p.
- Pieters, P., Skirrow, R.G., Lyons, P., (1997). Informe geológico y metalogenético de las Sierras de Chepes, Las Minas y Los Llanos - Provincia de La Rioja., 1: 250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. Buenos Aires. Anales N° 26.
- Roest, W.R. y Pilkington, M., (1993). Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58 (5): 653-659.
- Roest, W.R., Verhoef J., Pilkington, M., (1992). Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57 (1):116-125.
- Roest, W.R., Pilkington, M., (1993). Identifying remanent magnetization effects in magnetic data, *Geophysics*, 58: 653-659.
- Salem, A. y Smith, R., (2005). Depth and structural index from normalized local wavenumber of 2D magnetic anomalies. *Geophysical Prospecting*, 53 (1): 83-89.
- Skirrow, R.G., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P.E., Sims, J.P., Stuart-Smith, P.G., (2000). Metallogeny of the southern Sierras Pampeanas, Argentina: Geologic, 40Ar-39Ar dating and stable isotope evidence for Devonian Au, Ag-Pb-Zn and W ore formation. *Ore Geology Reviews*, 17 (1): 39-81
- Swain, C.J., (1976). A FOTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. *Computers & Geosciences*, 1: 231-240.
- Thurston, J.B. y Smith, R.S., (1997). Automatic conversion of magnetic data to depth, dip and susceptibility

contrast using SPITM method. *Geophysics*, 62 (3): 807-913.
Turner, J.C. y De Alba, E., (1968). Rasgos geológicos de las sierras de Chepes y Ulapes, provincia de La Rioja.
Actas de la 3º Jornadas Geológicas Argentinas, (1): 173-194.

Recibido: 12-8-2013

Aceptado: 25-4-2014