

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO GEOMAGNÉTICO EN EL ÁREA DEL ANTICLINAL EL TRANQUILO, MACIZO DEL DESEADO, SANTA CRUZ, ARGENTINA

Gonzalo Flores^{1,2}, Diego Guido^{3,4}, Sebastián Jovic^{3,4}

¹ Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

² Instituto de Astronomía, Geofísica y Cs. Atmosféricas, Universidade de São Paulo (IAG-USP), Brasil.

³ Instituto de Recursos Minerales (INREMI), Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

RESUMEN

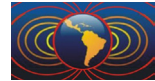
Se presenta un estudio realizado a partir de datos obtenidos por medio del método de magnetometría terrestre en el área del anticlinal El Tranquilo (ubicado en el Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz, Argentina). Se analiza la respuesta obtenida a escala regional (a partir de cartas de magnetometría terrestre con separación entre líneas de 100 metros) haciendo especial hincapié en el análisis de cuerpos intrusivos asociados a mineralizaciones polimetálicas y al tipo de magnetización presente. Se observan, en la región estudiada, cuerpos intrusivos sub-volcánicos y plutónicos someros, de composición básica a intermedia. Se resalta una región de alta magnetización remanente correspondiente a la Falla El Tranquilo (orientación SE-NW). Finalmente, se presentan un análisis del sector Sur a partir de cartas de magnetometría terrestre de detalle (separación de líneas de 10 metros) y posibles soluciones a dos casos particulares que se observan anómalos respecto del resto de los cuerpos intrusivos estudiados. El primero de ellos se ha realizado a partir de una respuesta que se observa en las cartas magnetométricas como un dipolo casi perfecto, posiblemente producto de un cuerpo somero. El otro caso es respecto de un cuerpo aflorante, de composición diorítica y forma subcircular a elipsoidal elongada de orientación noroeste asociado a fallas en la misma dirección (las cuáles posiblemente hayan controlado su intrusión), ubicado en el borde oeste de la falla El Tranquilo. La prospección y el modelado realizados por tal método potencial en esta región, ha resultado de especial interés debido a la relación espacial y genética de las mineralizaciones y los cuerpos intrusivos.

Palabras clave: Modelado Magnético, Masivo Deseado, El Tranquilo, Argentina

ABSTRACT

We present a study using data obtained by the method of ground magnetometry in El Tranquilo anticline area (located in the Deseado Massif, Santa Cruz Province, Argentina). We analyze the magnetic response to regional scale, with an emphasis on the analysis of intrusive bodies associated with polymetallic mineralization. Sub-volcanic and shallow plutonic bodies (basic to intermediate composition) are exposed in the study area. Within it a region of high magnetization corresponding to the El Tranquilo fault (SE-NW orientation) is highlighted. We present also an analysis of the ground magnetometry (line spacing 10 meters) from the southern sector and possible solutions for two particular anomalous cases. The survey and modeling performed is of particular interest for this region because of the spatial and genetical relationship between the mineralization and the intrusive bodies.

Keywords: Magnetic modelling, Deseado Massif, El Tranquilo, Argentina



Introducción

El proyecto Pingüino se encuentra ubicado en el área del anticlinal El Tranquilo (fig. 1), sector central del macizo del Deseado (provincia de Santa Cruz, Argentina) y tiene como característica destacada el hecho de presentar mineralizaciones económicamente explotables de tipo epitermal ricas en metales base y Ag-Au.

El área está caracterizada por una secuencia sedimentaria de edad Triásico medio-tardío a Jurásico temprano, que se compone de sedimentitas continentales, rocas epiclásticas y volcánicas, las cuales se encuentran intruidas por rocas magmáticas de composición intermedia del Jurásico temprano-medio, correspondiente al inicio del evento magmático extensional Jurásico (Guido, Schalamuk, 2003).

Se observan dos eventos magmáticos de composición intermedia (dioritas de 193 Ma de la Formación La Leona, y pórfidos andesíticos de 168 Ma correspondientes a la Formación Cerro León), que dieron origen a dos tipos de mineralización: vetas polimetálicas (Zn, In, Pb, Ag, Au, Cu, con As, Cd, Sn, W, Bi) y argentíferas (Ag y Au, con Zn y Pb) respectivamente, superpuestas en el mismo sistema de fallas NNW, NW y en menor medida ENE.

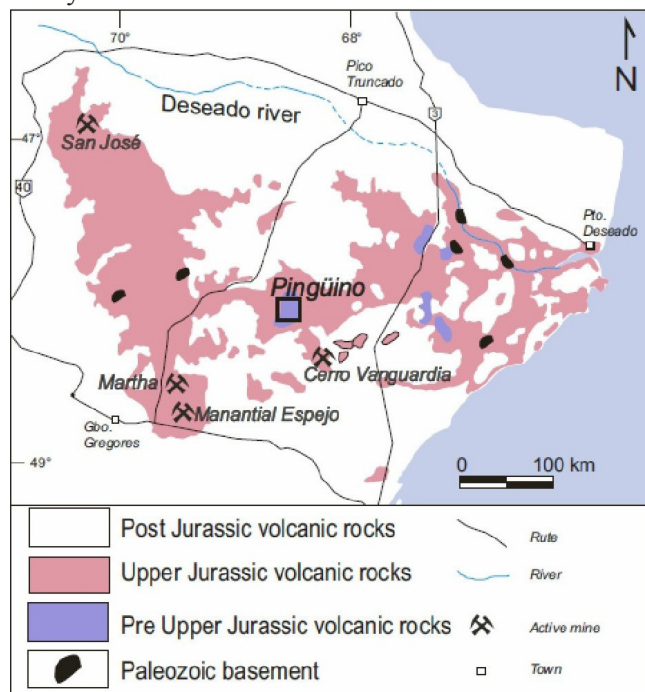
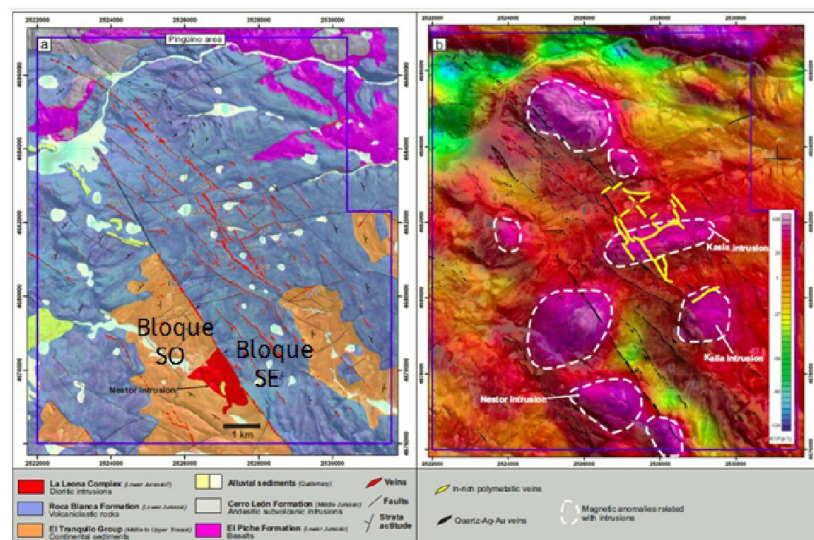


Figura 1. Área de estudio (Jovic 2010)

El domamiento regional (anticlinal El Tranquilo) y los domamientos locales presentes en la región responden al emplazamiento de un cuerpo intrusivo principal profundo (cuya cúpula fue modelada a más de 1500 metros de profundidad, Peñalva *et al.* 2008, fig. 2) e intrusivos menores subvolcánicos, principalmente no aflorantes (emplazados a menos de 200 m de profundidad; Peñalva *et al.* 2008), y que fueron controlados por un régimen extensional durante el Jurásico, que en respuesta a la extensión oblicua NE-SW (Giacosa *et al.* 2010), generó fallas normales dextrales WNW de primer orden, y zonas de extensión pura de orientación NNW, en donde se emplazó el intrusivo principal y los stocks (Jovic *et al.* 2011a). Los cuerpos subvolcánicos están alineados en dirección NNW, en menor medida en dirección ENE.

Figura 2. Mapa geológico con mineralizaciones y RTP Regional (Aeromagnetometría- SEGEMAR) (Jovic, 2010).





Metodología

Se han realizado campañas de magnetometría terrestre a dos escalas distintas de resolución y con un fuerte control geológico en todo momento, utilizándose como herramienta fundamental para vincular la geofísica: imágenes satelitales, datos geológicos de campo y sistemas de información geográficos. El instrumental usado fueron dos magnetómetros Overhauser GSM-19 utilizados como móviles y un magnetómetro de precesión protónica GSM-19T utilizado como base para las correcciones asociadas a las variaciones diurnas.

En una primera fase, se realizó una magnetometría de todo el proyecto con líneas cada 100 metros y con toma de dos datos por segundo (fig. 3). Posteriormente, se realizó una serie de campañas de magnetometría terrestre de mayor detalle (con una separación entre líneas de diez metros y tomando cinco muestras por segundo). Debido a la alta densidad de puntos, se dividió la región en cinco bloques. Con dicha modalidad se obtuvieron cartas de mayor detalle, en las que resaltan las mismas anomalías regionales pero en las que además se pueden observar estructuras y lineamientos más pequeños.

Resultados

Para el presente estudio se han seleccionado dos casos particulares dentro de los bloques del sur del área (fig. 2). En el bloque sudeste se observa una respuesta anómala (figs. 4, 5 y 6), la cual se modeló originalmente como un dique de composición similar al resto de los cuerpos presentes en la región.

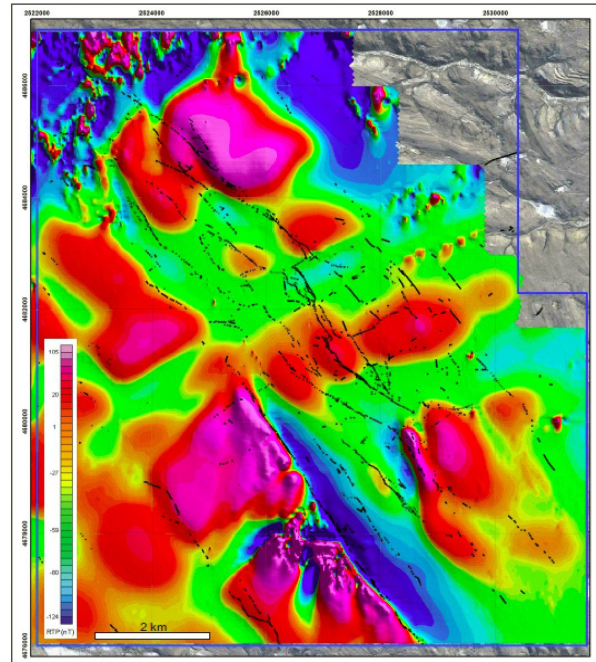


Figura 3. RTP Regional (ground mag de espaciamiento de 100 metros entre líneas)

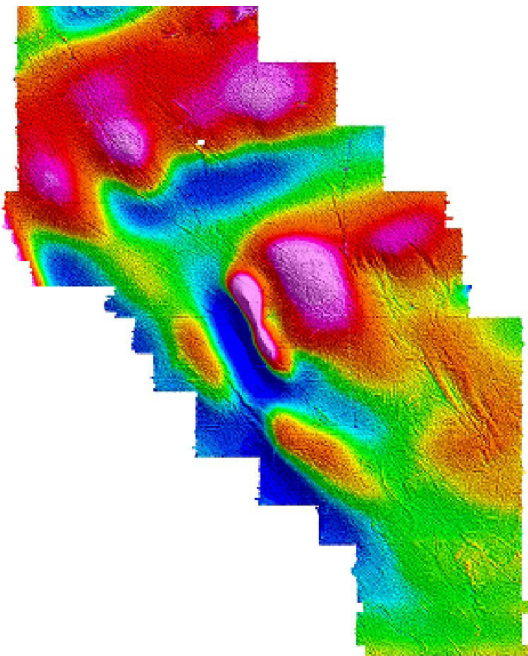


Figura 4. Groundmag detalle. TMI bloque SE

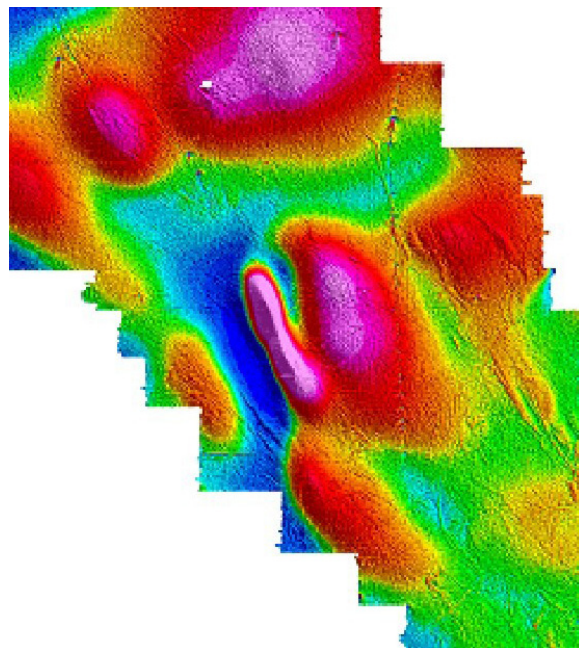


Figura 5. Groundmag detalle. RTP bloque SE

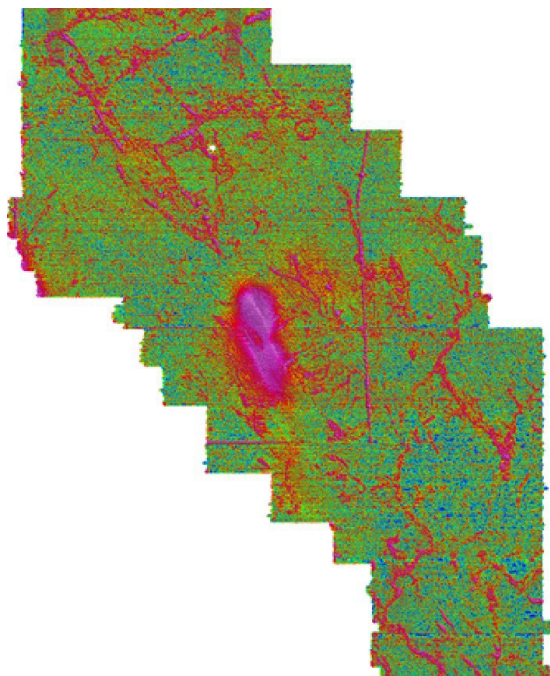
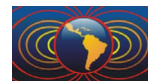


Figura 6. Groundmag detalle. An. Signal bloque SE

puede ser esperable en una carta de campo total (fig. 4) en esas latitudes pero no en la de reducción al polo como la que se observa (fig. 5). Es por ello que aquí debemos prestar particular atención a la magnetización remanente del cuerpo en cuestión.

La componente remanente de las anomalías magnéticas ha sido estudiada y caracterizada en los últimos 30 años por gran cantidad de autores, siendo uno de los trabajos más importantes el de Roest y Pilkington (1993). Pero más allá de la gran

cantidad de publicaciones en la materia, lejos se está aún de tener una línea común en tal sentido. Pueden resaltarse, entre los métodos más populares para interpretar el problema presentado por la magnetización remanente, los métodos de reducción al polo (RTP), el cual centra la anomalía con la fuente como si el cuerpo inducido estuviera ubicado sobre el polo magnético, y el de señal analítica (SA, Nabighian, 1972). Ninguna de ellas utiliza la información de remanencia en forma directa. Es interesante resaltar que la técnica de RTP asume que la misma ni siquiera existe y que la SA no la tiene en cuenta en su cálculo ya que utiliza una combinación de los gradientes horizontal y vertical producidos por la anomalía magnética (depende de la ubicación del cuerpo y no de la dirección de su magnetización). Aun así, representan las herramientas más utilizadas para abarcar esta problemática.

A partir del análisis e interpretación realizados para el presente caso por medio de RTP (fig. 5) y SA (fig. 6), hemos propuesto que debido al evidente alto grado de magnetización remanente (la cual no se observa en ningún otro cuerpo de la región estudiada), el cuerpo, ubicado a poca profundidad, representa un evento distinto, de composición y edad diferentes al resto de todo lo observado en la región y que presenta una falla que inclina hacia el oeste, asociada a su intrusión (se observa su respuesta en la carta de SA con orientación e intensidad idénticas a la del cuerpo), con alto magnetismo remanente pero con una dirección del campo absolutamente diferente al presente, no pudiéndose extrapolar a esta anomalía los estudios realizados en campo sobre el resto de los cuerpos aflorantes.

En magnetometría es necesario trabajar en función de dos propiedades físicas: la susceptibilidad magnética y la magnetización remanente. La primera, que es la variable que cuantifica la magnetización inducida, es función de la posición de la fuente magnética en la Tierra y por tanto puede ser calculada con cierta simplicidad. En cambio la segunda, puede tener a priori, cualquier dirección de magnetización, por lo que significa un parámetro de modelado complejo. Es por esto último que se suele prescindir de su análisis en aplicaciones de exploración mineral.

El método referente para calcular la anomalía magnética producida por inducción sobre un dique fino de naturaleza ígnea fue propuesto originalmente por Talwani y Heirtzler (1964). A partir de los cálculos propuestos por dicho estudio se observa que la misma debería presentar una curva, cuando se hace la reducción al polo, como la presentada en la Figura 7 (se obtuvo una respuesta equivalente utilizando el software MAG3D). Este resultado no es consistente con la respuesta obtenida en este caso particular, en el que se observa un dipolo casi perfecto, cuya existencia

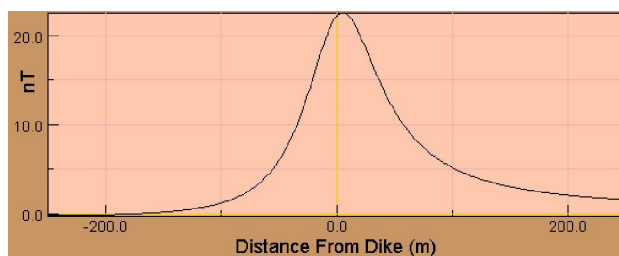


Figura 7. Respuesta magnética esperada para un dique fino en la región de trabajo



En el bloque SW (figs. 8, 9 y 10) se observa el sector central de la falla El Tránsito (caracterizada por un bajo magnético claramente identificable en las figs. 3 y 9). Al oeste de la misma, se reconoce una serie de altos magnéticos que han generado interés ya que no se ha podido interpretar si se trata o no de anomalías generadas por un mismo cuerpo. Con el objetivo de determinar si estas anomalías corresponden al mismo cuerpo se realizó una serie de modelos para estimar la profundidad del sector que no aflora y se calculó la susceptibilidad aparente del mismo, la cuál se comparó con las muestras tomadas de las principales unidades aflorantes en la región de trabajo (Peñalva *et al.* 2008). Para tal fin se utilizaron las ecuaciones de deconvolución de Euler y la deconvolución de Werner (Werner, 1953).

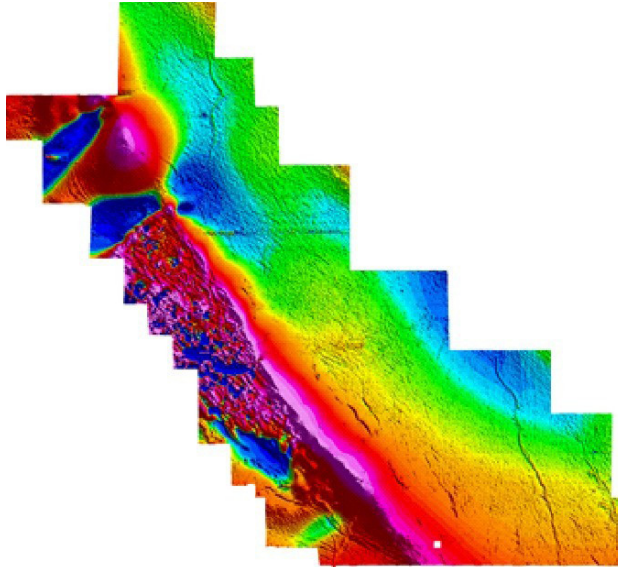


Figura 8. Groundmag detalle. TMI bloque SW

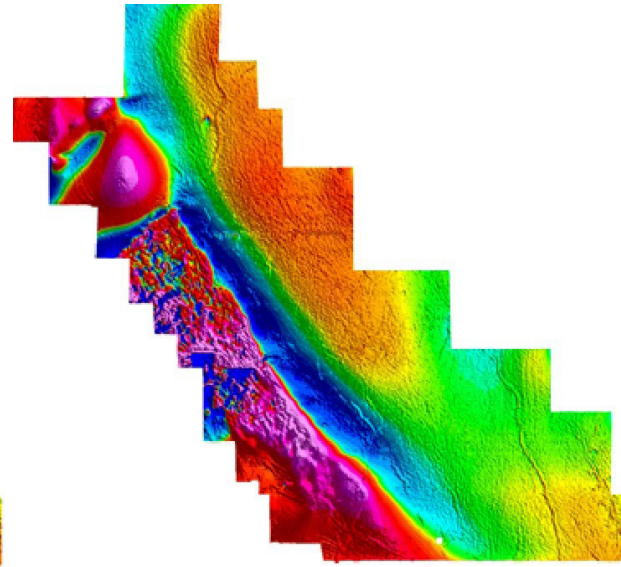


Figura 9. Groundmag detalle. RTP bloque SW

Las ecuaciones de Euler han sido utilizadas por varios autores para analizar anomalías magnéticas, entre los que se puede resaltar Thompson (1982) y Reid *et al.* (1990). Este método es estrictamente válido cuando la anomalía tiene un cociente de atenuación constante con respecto a la distancia a la fuente (Ravat, 1994) y significa una simplificación demasiado grande respecto de algunos modelos. Mientras que la deconvolución de Werner (1953), implementada por Hartman (1971) y su algoritmo más utilizado (que es una optimización del método original) propuesto por Cordell *et al.* (1992), aparece como más adecuada para una gama más amplia de casos de estudio.

El principio de la deconvolución de Werner es relativamente sencillo. Considera que la respuesta magnética de un cuerpo fino es equivalente a plantear una lámina de dipolos (ambos semi infinitos). El cálculo se realiza a partir de la ecuación para una línea simple de dipolos y se la integra desde d (profundidad del cuerpo) hasta el infinito (Blakely, 1995). Para estimar la anomalía de un dique fino vertical de profundidad d se utiliza la siguiente expresión:

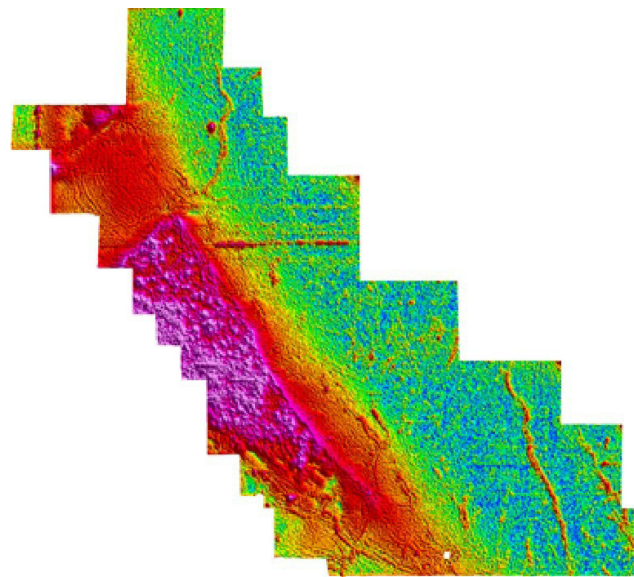
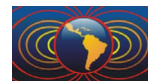


Figura 10. Groundmag detalle. An. Signal bloque SW



$$\Delta T_s = 2C_m M \Delta x \left[\frac{\alpha d - \beta x'}{x'^2 + d^2} \right]$$

Siendo: α y β componentes asociadas con el vector unitario que da las direcciones al campo generado por la anomalía, M magnetización, Δx asociado al ancho del cuerpo, d profundidad del cuerpo y C_m asociada con el momento dipolar.

En base a dichas herramientas se llegó a determinar que la susceptibilidad magnética aparente media hallada asociada a la anomalía correspondiente al cuerpo intrusivo no aflorante es equivalente a la susceptibilidad magnética media medida para las muestras tomadas en campo para el resto del cuerpo (de composición diorítica). La profundidad del techo de dicho cuerpo es menor a 60 metros, está alineado con el sector más alto del resto y tiene una leve inclinación hacia el sudeste. Todas estas evidencias, sumadas a las geológicas dan las herramientas necesarias para modelar a esta anomalía como un solo cuerpo que posterior a su intrusión fue segmentado por fallas WSW, generando tres bloques, hundiéndose el bloque medio.

Consideraciones finales

Las características geológicas tales como la presencia de cuerpos intrusivos y subvolcánicos someros de composiciones básicas a intermedias y de las mineralizaciones con alto contenido de sulfuros del área del anticlinal El Tranquilo, son particulares y poco representadas en el Macizo del Deseado. La relación espacial y genética entre los intrusivos dioríticos con la mineralización polimetálica (Jovic 2010; Jovic *et al.* 2010b), lleva a la magnetometría a ser una herramienta clave para el estudio y la exploración de este tipo de depósitos relacionados con intrusivos en la región.

Si bien la deconvolución de Wenner, y especialmente las ecuaciones de Euler aplicadas al cálculo de profundidades y de susceptibilidad magnética aparente no son los métodos más populares, en este caso en particular, nos han brindado resultados coherentes entre sí, los cuales, apoyados sobre las evidencias geológicas, han significado un aporte fundamental para la caracterización del cuerpo intrusivo “Néstor” como un solo cuerpo afectado por fallamientos.

De la misma manera, el análisis de profundidades y magnetización remanente realizado utilizando las aplicaciones de Señal Analítica y Reducción al Polo han demostrado que, a pesar de no haber sido creadas con tal fin, son herramientas adecuadas para la caracterización cualitativa de dichos parámetros.

Referencias

- Barnett, C.T., 1976. Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrary shaped three-dimensional body. *Geophysics*, 41, 1353-1364.
- Blakely, R.J., 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 441 p.
- Cordell, L. Phillips, J.D. and Godson, R.H., 1992. U.S. Geological Survey Potential Field Software Version 2.0, Open-file report 92-18
- Giacosa, R., Zubia, M., Sanchez, M., Allard, J., 2010. Meso-Cenozoic tectonics of the southern Patagonian foreland: structural evolution and implications for Au-Ag veins in the eastern Deseado Region (Santa Cruz, Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 30 (3-4), 134-150.
- Guido, D. y Schalamuk, I., 2003. Genesis and exploration potential of epithermal deposits from the Deseado Massif, Argentinean Patagonia. In Mineral Exploration and Sustainable Development (D. Eliopoulos, ed.). Balkema, Rotterdam, Vol I, 493-496.
- Hartmann, R.R., Teskey, D.J. and Friedberg, J.L., 1971. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. *Geophysics* 36, 891-918.
- Hsu, S., Coppens, D., Shyu, C., 1998. Depth to magnetic source using generalized analytic signal. *Geophysics* 63, 1947-1957.



- Jovic S., 2010. Geología y Metalogénesis de las mineralizaciones polimetálicas del área El Tranquilo (Cerro León), sector central del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz. Editorial de la Universidad de La Plata (EDULP), La Plata. p. 278
- Jovic, S. M., Guido, D. M., Ruiz, R., Páez, G.N., Schalamuk, I. B. 2011a. Control estructural en el magmatismo jurásico del are del anticlinal El Tranquilo, Macizo del Deseado, Santa Cruz. En: XVIII Congreso Geológico Argentino. Asociación Geológica Argentina, Nequén, p. Actas (CD-ROM).
- Jovic, S., Guido, D., Schalamuk, I., Ríos, F., Tassinari, C., Recio, C., 2011b. Pingüino In-bearing polymetallic vein deposit, Deseado Massif, Patagonia, Argentina: characteristics of mineralization and ore-forming fluids. *Mineralium Deposita* 46, 257-271.
- MAG3D, 2002. A program library for forward modeling and inversion of magnetic data over 3D structures, version 3.1. Developed under the consortium research project Joint/Corporate Inversion of Geophysical and Geological Data, UBC-Geophysical Inversion Facility, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia.
- Nabihian, M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics* 37, 507-517
- Peñalva, G., Jovic, S., Chernicoff, C., Guido, D., Schalamuk, I., 2008. Cuerpos intrusivos asociados a las mineralizaciones polimetálicas del depósito Cerro León, área del anticlinal El Tranquilo, Santa Cruz: Evidencias Geofísicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 63 (1), 14-23.
- Ravat, D. 1994. Use of the fractal dimension to determinate the applicability of Euler's homogeneity equation for finding surce locations of gravity and magnetics anomalies. Proceeding of the Symposium of the Applications of Geophysics to Engineering and Enviromental Problems, Boston, Massachusetts, 41-53.
- Reid, A.B.; Allsop, J.M. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics* 55, 80-91
- Roest, W.R., and Pilkington, M. 1993. Identifying remanent magnetization in magnetic data. *Geophysics* 58, 653-9.
- Talwani, M, and Heirtzler, J.R. 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional structures of arbitrary shape, Stanford University Publications of the Geological Sciences, Computers in the Mineral Industries, Stanford University, Stanford, CA, 464-80.
- Thompson, D.T. 1982. EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth from magnetic data. *Geophysics* 47, 31-7.
- Werner, S. 1953. Interpretarion of magnetic anomalies at sheet-like bodies. *Sveringes Geoliska Undersok, Arsbok* 43, n°6, series C, n°508