

UN NUEVO PROGRAMA BASADO EN MATLAB PARA ANALISIS ESPECTRAL DE DATOS MAGNETOMÉTRICOS

P. Núñez Demarco^{1,2,*}, C. Prezzi¹, L. Sánchez Bettucci²

¹ IGeBA – Universidad de Buenos Aires – CONICET. Departamento de Ciencias Geológicas - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Univ. de Bs. As., Intendente Güiraldes 2160 C.P. C1428EHA, CABA, Argentina.

² Instituto de Ciencias Geológicas - Facultad de Ciencias – UdelaR., Iguá 4225 Esq. Mataojo C.P. 11400, Montevideo, Uruguay.

*e-mail: pnunez@fcien.edu.uy

ABSTRACT

We developed a new MatLab based program that automatically computes the 2-D spectral analysis of magnetic maps, estimates the Curie point depth, the geothermal gradient and heat flux according to the methods established by Spector and Grant (1970), Bhattacharyya and Leu (1977), Okubo *et al.* (1985) and Tanaka *et al.* (1999). The program loads the magnetic data, interpolates the missing data if required, and divides the map in subregions according to the size established by the user. Also, different levels of overlapping between subregions (ranging from 0% to 99.9%) are tested simultaneously, according to the user customization. The 2-D Fast Fourier Transform (FFT) power spectrum is calculated for each subregion. The centroid and top depth of magnetic sources are derived from the slopes of the longest and second-longest wavelength of the radial averaged frequency-scaled power spectra and the radial averaged power spectra, respectively. The Curie point depth is derived from top and centroid depths (Okubo *et al.*, 1985) and the geothermal gradient calculated. All the data are plotted in different visualization forms. In addition, information about the procedure is visualized in order to validate it. This information includes statistical parameters, correlation coefficients and fast visualization of the linear adjustments. This program was tested and compared with the results of other software like Oasis Montaj, obtaining an improvement in resolution and substantial reduction in processing time.

Keywords: Spectral Analysis, Power Spectrum, Curie Point Depth, Geothermal Gradient

RESUMEN

Se desarrolló un programa basado en MatLab que computa automáticamente el análisis espectral en 2-D de mapas magnéticos y estima la profundidad del punto de Curie, el gradiente geotérmico y el flujo térmico, según los métodos y ecuaciones establecidos por Spector y Grant (1970), Bhattacharyya y Leu (1977), Okubo *et al.* (1985) y Tanaka *et al.* (1999). El programa carga el mapa magnético, interpola los datos faltantes si es necesario, y divide el mapa en subregiones de acuerdo con el tamaño establecido por el usuario. Además, diferentes niveles de solapamiento entre las subregiones (de entre 0% y 99.9%) pueden ser evaluados simultáneamente, según las preferencias del usuario. La potencia espectral de la transformada rápida de Fourier en dos dimensiones (FFT 2-D) es calculada para cada subregión. La profundidad del tope y del centroide de la fuente magnética es derivada de la media radial del espectro de potencia escalado por la frecuencia y de la media radial del espectro de potencia, respectivamente. La profundidad de la isoterma de Curie es obtenida a partir de los valores de profundidad del tope y centroide y el gradiente geotérmico calculado. Todos los datos son graficados. Asimismo, se visualiza información sobre el procedimiento que permite su validación. Esta información incluye parámetros estadísticos, coeficientes de correlación y una visualización rápida de los ajustes lineales. Este programa fue testeado y comparado con otros



software como ser Oasis Montaj, obteniendo un aumento en resolución y una reducción substancial en tiempo de procesamiento.

Palabras Clave: Análisis Espectral, Espectro de Potencia, Profundidad de la Isoterma de Curie, Gradiente Geotérmico.

Introducción

Spector y Grant (1970) introdujeron un procedimiento por el cual puede determinarse la profundidad del techo de la fuente magnética, por medio del espectro radial de potencia. El procedimiento fue posteriormente mejorado por otros autores (Bhattacharyya y Leu, 1975a, b, 1977; Okubo *et al.*, 1985; y Tanaka *et al.*, 1999) permitiendo calcular, no solo la profundidad del techo de la fuente magnética, sino también la profundidad de su centroide y de su base.

Suponiendo que la fuente magnética es una capa que se extiende infinitamente en todas las direcciones horizontales, que el espesor de la capa es pequeño comparado con la escala horizontal, y que la magnetización $M(x, y)$ es una función aleatoria de x e y , según Blakely (1996), la media radial del espectro de potencia puede simplificarse como:

$$P(|n|) = Ae^{-2|n|Z_t}(1 - e^{-|n|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (1)$$

donde A es una constante, $|n|$ es el módulo del número de onda radial, Z_t es la profundidad del techo de la capa magnética y Z_b la profundidad de la base de la capa magnética. Aplicando logaritmo a ambos lados de la ecuación se tiene que:

$$\ln [P(|n|)] = \ln [A] - 2Z_t|n| + 2\ln [1 - e^{-|n|(Z_b - Z_t)}] \quad (2)$$

Para valores medios a altos de n (o en otras palabras, para longitudes de onda menores que dos veces el espesor de la capa $\lambda < 2(Z_b - Z_t)$ $n = 1/\lambda > 1/2(Z_b - Z_t)$ esta ecuación corresponde con una recta con pendiente igual a $2Z_t$,

$$\ln [P(|n|)] = \ln [A] - 2Z_t|n|$$

Dividiendo la ecuación por $1/2$ se tiene que:

$$\ln [P(|n|)^{1/2}] = B - Z_t|n| \quad (3)$$

donde n es el número de onda, $P(n)$ el espectro de potencia, Z_t la profundidad del techo de la fuente y B una constante. En consecuencia, se puede calcular la media radial del espectro de potencia de los datos, calcular la pendiente para longitudes de ondas altas y obtener la profundidad del techo de la fuente magnética. Este resultado es en principio válido para una única fuente magnética. En su modelo, Spector y Grant (1970) supusieron que la anomalía es producida por un gran número de bloques dispuestos aleatoriamente y demostraron que la profundidad media de todas las fuentes magnéticas sigue exactamente la misma relación.

Por otra parte, la ecuación 1 puede reescribirse como:

$$P(|n|)^{1/2} = Ce^{-|n|Z_o}(e^{-|n|(Z_t - Z_o)} - e^{-|n|(Z_b - Z_o)})^2$$

donde Z_o es la profundidad del centroide de la fuente magnética. Para longitudes de onda largas (número de onda bajo) se tiene que:

$$P(|n|)^{1/2} = e^{-|n|Z_o}(e^{-|n|(Z_t - Z_o)} - e^{-|n|(Z_b - Z_o)})^2 \sim Ce^{-|n|Z_o}|n|(Z_b - Z_t)$$



donde $(Z_b - Z_i)$ es el espesor de la fuente magnética. Dividiendo por $|n|$ y aplicando logaritmo:

$$\ln \left[\frac{P(|n|)^{1/2}}{|n|} \right] = \ln [D] - Z_o |n| \quad (4)$$

donde n es el número de onda, $P(n)$ el espectro de potencia, Z_o la profundidad del centroide de la fuente magnética y D una constante que depende del número de onda. En consecuencia, se puede calcular la media radial del espectro de potencia escalado por la frecuencia de los datos, calcular la pendiente para los primeros valores de n y obtener la profundidad del centroide de la fuente magnética.

Estos mismos autores determinaron también que la profundidad de la base del cuerpo magnético sigue la relación (Okubo *et al.*, 1985; Tanaka *et al.*, 1999):

$$Z_b = 2 Z_o - Z_t \quad (5)$$

donde Z_b es la profundidad de la base de la fuente, Z_o la profundidad del centroide y Z_t la profundidad del techo. Z_b se relaciona con la profundidad a la cual las rocas pierden su capacidad de magnetizarse debido a la alta temperatura, es decir, cuando se alcanza la temperatura de Curie (550-650°C). Por lo tanto, el valor Z_b permite estimar la profundidad a la isoterma de Curie y, por su intermedio, el gradiente geotérmico en la zona estudiada.

El gradiente geotérmico responde a la diferencia de temperatura entre la superficie y un punto determinado en profundidad según la ecuación:

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta Z} = \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} = \frac{T_c - T_{sup}}{Z_b} \quad (6)$$

donde T_c es la temperatura de Curie, Z_b la profundidad a la base del cuerpo magnético, y T_{sup} es la temperatura media de la superficie (que en trabajos como el de Tanaka *et al.* (1999) es considerada cero). La temperatura de Curie depende de la mineralogía magnética de las rocas, siendo la magnetita el mineral magnético más común en las rocas ígneas con una temperatura de Curie de 580 °C. Además, el gradiente geotérmico está asociado con el flujo térmico q según la ecuación:

$$q = c \frac{\Delta T}{\Delta Z} = c_t \frac{T_c - T_{sup}}{Z_b} \quad (7)$$

donde c_t es la conductividad térmica de las rocas. La conductividad térmica media de las rocas ígneas es 2.5 W °C/m y es usada como estándar en nuestro trabajo.

Programa

El programa desarrollado en MatLab computa automáticamente el análisis espectral en 2-D de mapas magnéticos, estima la profundidad del punto de Curie, el gradiente geotérmico y el flujo térmico según las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y (7).

Con la finalidad de probar el funcionamiento de este código, se trabajó con la anomalía magnética correspondiente al Atilano-Puna de los Andes Centrales (Chile - Bolivia - Argentina), extraída del modelo global EMAG2 (Fig. 1).

El programa carga el mapa magnético en formato ASCII, en coordenadas UTM o geográficas, e interpola los datos faltantes si es necesario.

El mapa se divide en subregiones, de acuerdo con el tamaño de ventana definido por el usuario según la máxima profundidad de investigación deseada. El programa permite establecer diferentes niveles



de solapamiento entre las subregiones (entre 0% y 99.9%) que son evaluados simultáneamente (Fig. 1).

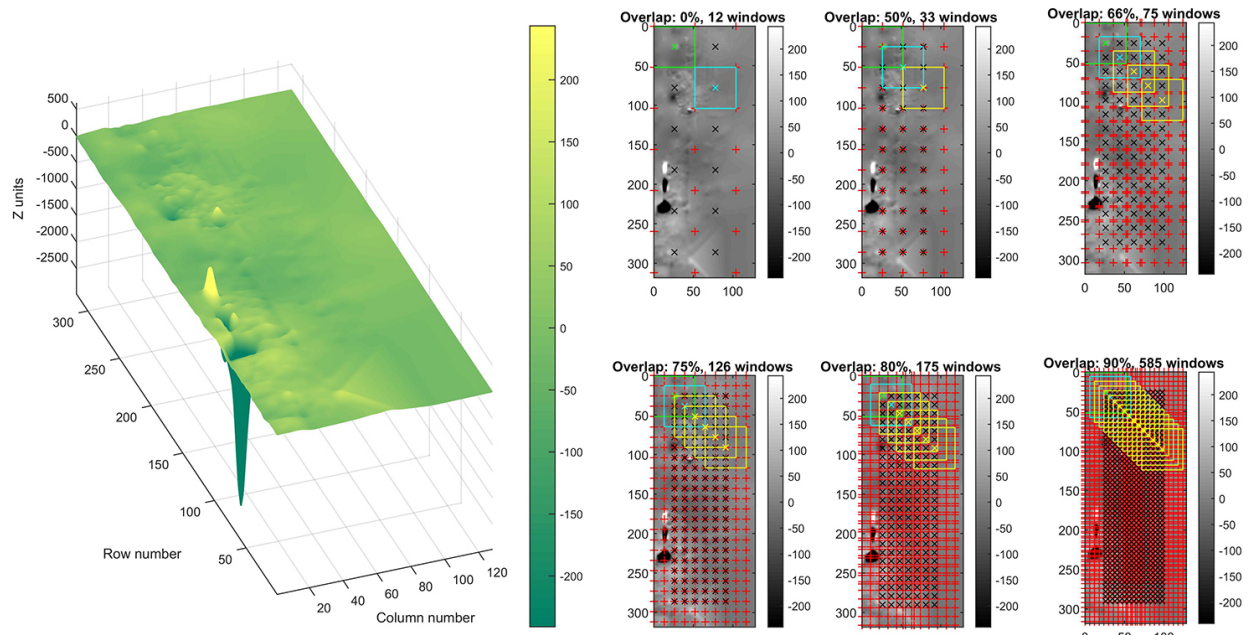


Figura 1. Mapa magnético de la región de la Puna en Argentina y subregiones de 200x200km generadas para distintos solapamientos 0%, 50%, 66% 75% 80% y 90%.

La potencia espectral del FFT 2-D es calculada para cada subregión o ventana. La profundidad del tope de la fuente magnética y del centroide de la fuente magnética es derivada de la media radial del espectro de potencia escalado por la frecuencia y de la media radial del espectro de potencia respectivamente, de acuerdo a las ecuaciones (3) y (4). La profundidad a la isoterma de Curie es derivada a partir de los valores de profundidad del tope y del centroide de la fuente magnética; el gradiente geotérmico es calculado según la ecuación (5). En la Figura 2 se grafican los resultados obtenidos para Z_t y Z_o correspondientes a los diferentes niveles de solapamiento. Puede observarse

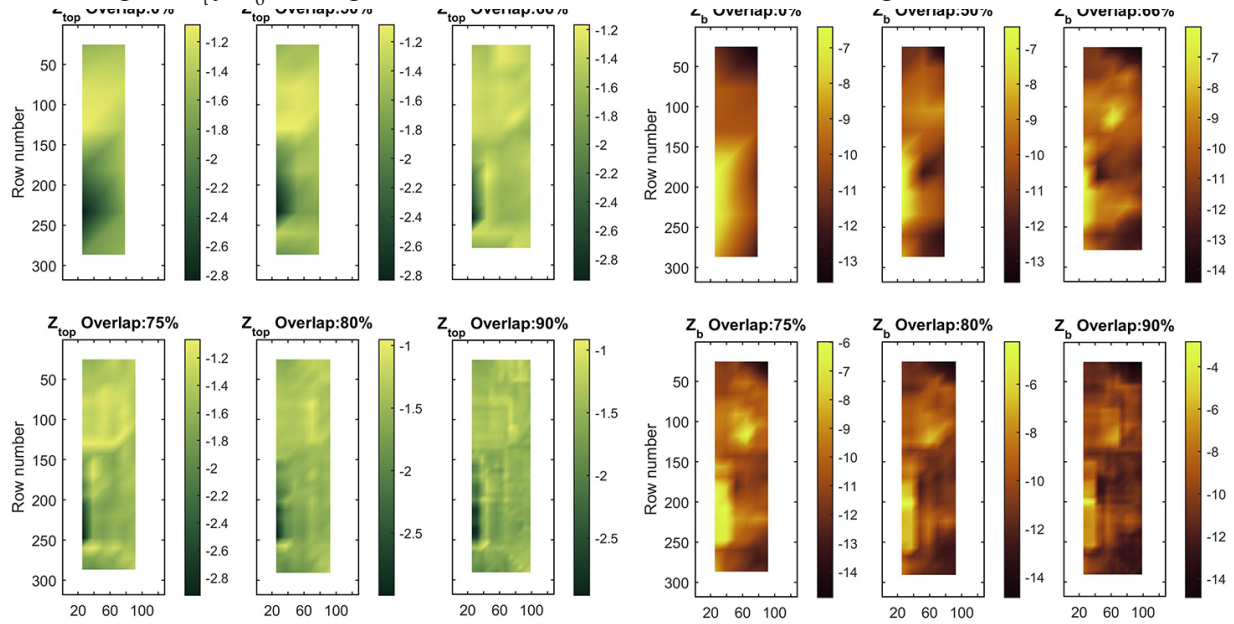
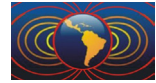


Figura 2. Resultados de Z_t y Z_o para los diferentes niveles de solapamiento.



que la resolución aumenta con el nivel de solapamiento; también se observan patrones rectangulares resultado de artefactos del método en todos los niveles de solapamiento. Aunque visualmente el aumento en resolución produce un mayor contraste de estos patrones, la amplitud general de esta interferencia se reduce contribuyendo a un aumento substancial de la resolución y detalle general.

El gradiente geotérmico puede observarse en la Figura 3. Los resultados obtenidos se muestran acordes con la geología del área y con cálculos realizados previamente para la región (Prezzi e Ibarra, 2017). Las zonas de mínima profundidad de la isoterma de Curie coinciden, parcialmente, con la extensión areal de las zonas midcorticales de fusión parcial y baja velocidad sísmica conocidas como el *Altiplano-Puna Magmatic Body* (APMB) y el *Southern Puna Magmatic Body* (SPMB). También se observa una notable coincidencia entre las profundidades a la temperatura de Curie y las profundidades al techo de estas zonas de baja velocidad estimadas mediante ondas sísmicas (entre 5 y 15 km) (Ward *et al.*, 2014; Beck *et al.*, 2015; Corneau *et al.*, 2016). Además, las profundidades obtenidas para la isoterma de Curie son apoyadas por los valores de flujo térmico superficial estimados a partir de ellas, los cuales coinciden notablemente con los datos medidos disponibles. El gradiente geotérmico medio estimado a partir de la profundidad a la temperatura de Curie, indica que se alcanzan temperaturas de 800°C a profundidades de entre 8 y 20 km. En coincidencia, el modelo geotérmico de Da Silva y Gosnold (2007) para los Andes Centrales indica que se alcanzan temperaturas de ~ 800-1000°C a profundidades de ~ 15-19 km. Currie y Hyndman (2006) con base en datos geofísicos y petrológicos concluyeron que la corteza media de los Andes Centrales se encuentra a temperaturas de ~ 800°C a profundidades de 20-25 km.

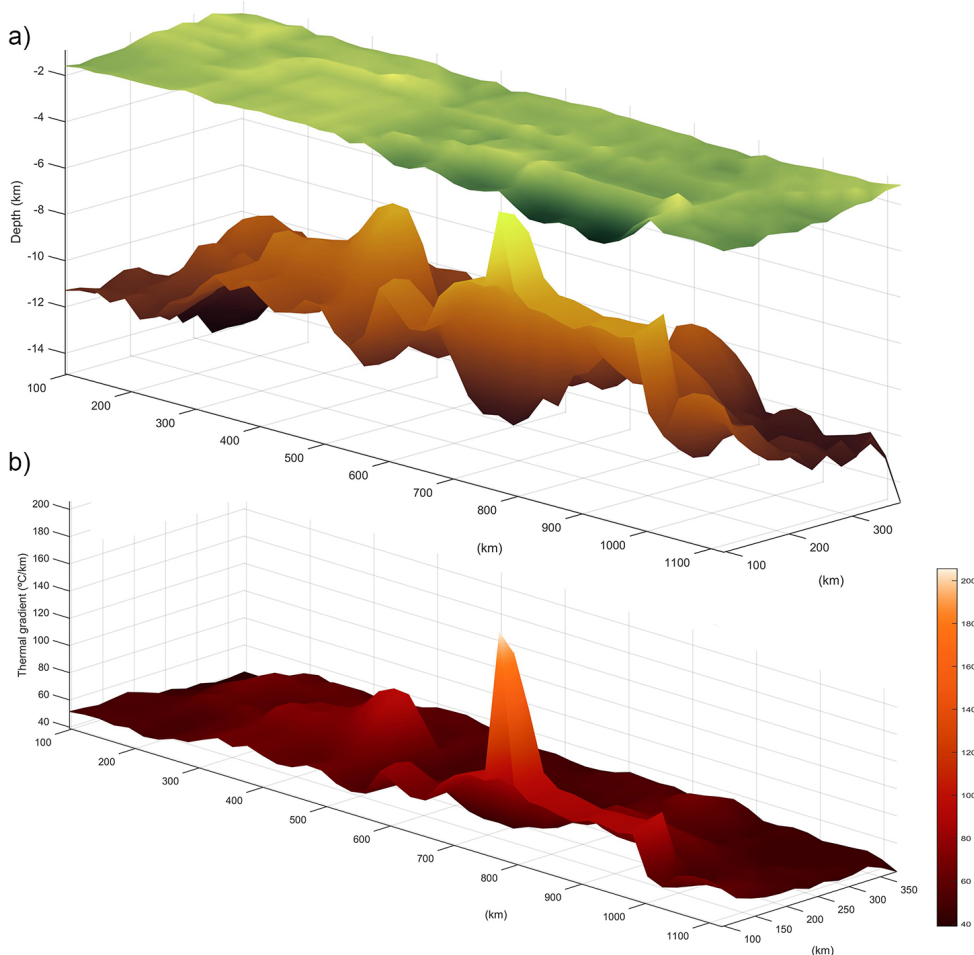


Figura 3. a) Modelo 3D de las superficies Z_t y Z_o para el solapamiento de 90%. b) resultados del gradiente geotérmico para el solapamiento de 90%.



Este primer testeo permitirá continuar mejorando el programa para generar mejores y más confiables resultados.

Referencias

- Blakely R. J., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press.
- Bhattacharyya B. K., Leu L. K., 1977. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies, *Geophysics* 42, 1, 41-50.
- Beck S. L., Zandt G., Ward K.M., Scire A., 2015. Multiple styles and scales of lithospheric foundering beneath the Puna Plateau, central Andes, En DeCelles, P.G., et al. (eds.) Geodynamics of a Cordilleran orogenic system: The Central Andes of Argentina and northern Chile, *Geological Society of America Memoir* 212, 43-60, doi: 10.1130/2015.1212 (03).
- Corneau M. J., Unsworth M. J., Cordell D., 2016. New constraints on the magma distribution and composition beneath Volcán Uturuncu and the southern Bolivian Altiplano from magnetotelluric data. *Geosphere* 12(5), 1-31, doi:10.1130/GES01277.1.
- Currie C., Hyndman D., 2006. The thermal structure of subduction zone back arcs, *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1029/2005JB004024.
- Da Silva S., Gosnold W., 2007. Episodic construction of batholiths: insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 167, 320-335.
- Prezzi C., Ibarra F., 2017. Estructura cortical del noroeste de Argentina a partir de datos gravimétricos y magnetométricos, *Relatorio XX Congreso Geológico Argentino*, San Miguel de Tucumán, Argentina, Agosto 2017.
- Okubo Y., Graf R. J., Hansen R. O., Ogawa K., Tsu H., 1985. Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan, *Geophysics* 50, 3, 481-494.
- Spector A., Grant F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, 35, 2, 293-302.
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O., 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia, *Tectonophysics* 306, 3, 461-470.
- Ward K., Zandt G., Beck S., Christensen D. H., McFarlin H., 2014. Seismic imaging of the magmatic underpinnings beneath the Altiplano-Puna volcanic complex from the joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions, *Earth and Planetary Science Letters* 404, 3-53, doi: 10.1016/j.epsl.2014.07.022.