

ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA ISOTERMA DE CURIE EN PARTE DE LA ZONA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN AZUFRAL BASADA EN DATOS GEOMAGNÉTICOS

Patricia Ponce¹; Orlando Hernández²

Forma de citar: Ponce, P., y Hernández, O. 2014. Estimación de la profundidad de la isoterma de Curie en parte de la zona de influencia del volcán Azufral basada en datos geomagnéticos. Boletín de Geología, 36 (2): 79-90.

RESUMEN

En este estudio se estimó la profundidad de la isoterma de Curie con base en el análisis espectral de los datos de anomalía geomagnética de una parte de la zona de influencia del volcán Azufral, cubriendo un área de aproximadamente 450 km². La profundidad obtenida mostró un rango entre 2,3 y 14,2 km con un promedio de 3,7 km. A partir de las profundidades se estimó el gradiente geotérmico y el flujo de calor de la zona estudiada, obteniéndose valores promedio de 157 °C/km y de 204 mW/m², respectivamente. Los resultados indican que la isoterma no es una superficie horizontal y que existe una relación inversa entre la profundidad de la isoterma de Curie y los valores de gradiente geotérmico y de flujo de calor. En la zona no se han realizado mediciones directas de gradiente geotérmico, por lo que estos datos se constituyen en un aporte a la exploración de recursos geotérmicos en la zona de influencia del volcán Azufral.

Palabras clave: volcán Azufral, datos geomagnéticos, análisis espectral, isoterma de Curie.

ESTIMATION OF THE CURIE ISOTHERM DEPTH IN A PART OF THE AZUFRAL VOLCANO INFLUENCE ZONE BASED ON GEOMAGNETIC DATA

ABSTRACT

In this study the depth of the Curie isotherm was estimated, based on the spectral analysis of geomagnetic anomaly data from one part of the Azufral volcano influence zone, covering an area of about 450 km². The obtained depth showed a range between 2.3 and 14.2 km with an average of 3.7 km. Based on the obtained depths, the geothermal gradient and the heat flow of the study area were estimated, with an average of 157 °C/km and 204 mW/m², respectively. The results indicate that the isotherm is not a horizontal surface and there is an inverse relationship between the depth of the Curie isotherm and the values of geothermal gradient and heat flow. There are not direct measurements of geothermal gradient in the area, so these data constitute a contribution to the geothermal resources exploration in the Azufral volcano influence zone.

Keywords: Azufral volcano, geomagnetic data, spectral analysis, Curie isotherm.

¹ Servicio Geológico Colombiano; pponce@sgc.gov.co

² Universidad Nacional de Colombia; ohernandezp@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

El volcán Azufral tiene asociado un sistema geotérmico cuyas manifestaciones superficiales incluyen manantiales termales, cráteres de erupción hidrotermal, fumarolas en uno de sus domos y zonas de alteración hidrotermal. La ocurrencia de estas manifestaciones y otras condiciones como su edad reciente, la persistencia de su actividad y la evolución completa del magma de composición andesítica a riolítica, han permitido identificar a este sistema como uno de los de mayor interés geotérmico en Colombia (OLADE, 1982). El volcán Azufral se considera un volcán activo con base en la edad de sus depósitos, la cual cubre un rango entre 17.500 y 280 años A.P. según dataciones con Carbono-14 (^{14}C) (Bechon et Monsalve, 1991; Fontaine, 1994; Cortés y Calvache, 1997; Torres *et al.*, 2001).

Durante el año 2008 se realizaron medidas de intensidad del campo geomagnético, en parte de la zona de influencia del volcán Azufral, cubriendo un área aproximada de 450 km², dentro del proyecto de Exploración de Recursos Geotérmicos del Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS, actualmente Servicio Geológico Colombiano, con el fin de ampliar el conocimiento de los sistemas magnético y geotérmico del volcán (Gómez y Ponce, 2009; Gómez, 2012; Ponce, 2013).

MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en el departamento de Nariño, al suroccidente de Colombia, en las

coordenadas geográficas 0°56' N a 1°11' N (X=595.000 a X=620.000) y 77°36' W a 77°48' W (Y=920.000 a Y=940.000), comprendiendo un área aproximada de 450 km², dentro de la región de influencia del volcán Azufral y el Altiplano Nariñense, que comprende los municipios de Túquerres, Sapuyes, Guachucal, Mallama y Santa Cruz. Las coordenadas planas (Gauss-Kruger) tienen como datum Bogotá Observatory (Hayford, 1924) con origen W en el punto 4°35'56.57" de latitud norte y 77°04'51.30" de longitud oeste, las cuales tienen asignado valores de X=1.000.000 m N y Y=1.000.000 m E (FIGURA 1).

Las provincias fisiográficas principales que cubren la zona de estudio son el Altiplano Nariñense y la Cordillera Occidental. En el Altiplano Nariñense se diferencian las unidades geomorfológicas planicie del Cumbal y las colinas bajas alargadas de Túquerres, al centro y sur de la zona estudiada, respectivamente. En la Cordillera Occidental se han identificado como unidades geomorfológicas el edificio volcánico muy antiguo de Pajablanca al suroriente, el edificio volcánico muy antiguo de Cumbal al suroccidente, el edificio volcánico reciente del Azufral al norte y las vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés al nororiente. La erosión y el vulcanismo que configuraron las formas actuales fueron acelerados durante el Pleistoceno-Holoceno por el levantamiento regional, como resultado de la evolución orogénica en relación con la interacción (subducción) de las placas Nazca y Suramericana (González *et al.* 2002).

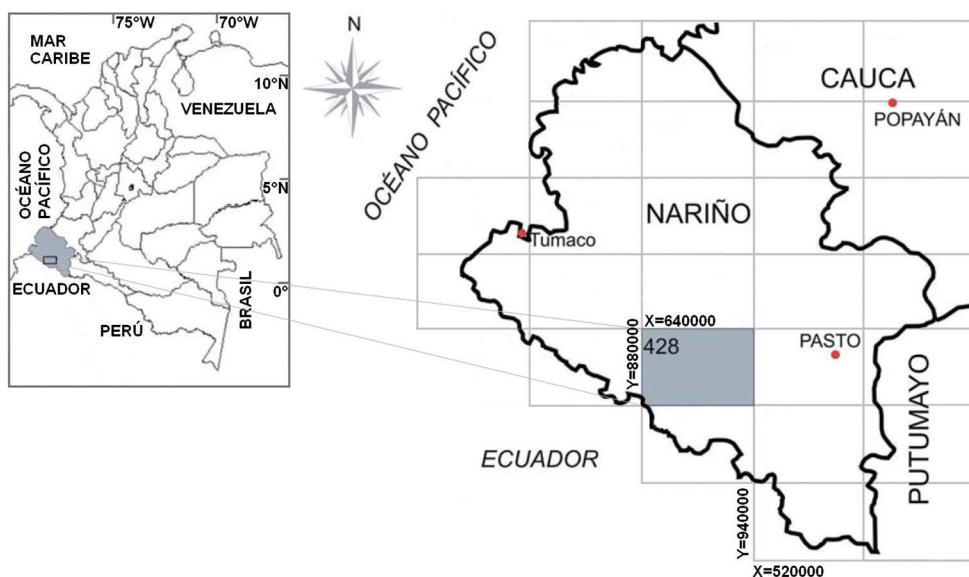


FIGURA 1. Localización general de la zona estudiada, con respecto a Colombia y Nariño. Tomado y modificado de Geología y Geomorfología de la plancha 428, Túquerres (González *et al.* 2002).

En la zona estudiada el basamento de edad cretácica está conformado por rocas del Grupo Diabásico que son rocas volcánicas básicas de afinidad oceánica y por rocas del Grupo Dagua que son sedimentitas marinas, las cuales están suprayacidas por potentes depósitos volcano-clásticos aflorantes, dispuestos de manera inconforme, como las ignimbritas y los flujos de lavas andesíticas provenientes de los volcanes de la zona, entre los que se encuentran el Azufral, el Cumbal y el Pajablanca, suprayacidos a su vez por depósitos de tipo explosivo como flujos piroclásticos, caídas de ceniza y oleadas piroclásticas, producidos desde el Plioceno hasta la actualidad, la mayoría de ellos provenientes del volcán Azufral (Velandia *et al.*, 2008; González *et al.* 2002). En la FIGURA 2 se muestra la geología de la zona estudiada, con los sitios de las estaciones de medición de la campaña 2008.

Los rasgos regionales principales coinciden con las fallas mayores del área, como la Falla Cali – Patía y la Falla Guachucal con tendencia al NE; también sobresalen los lineamientos orientados al NW que se relacionan con fallas transversales y que parecen corresponder con fallas del basamento; adicionalmente existe otra dirección de lineamientos al NEE que corresponden a trazos locales; las estructuras falladas se encuentran cubiertas por depósitos volcano-clásticos en su mayor parte. (Velandia *et al.*, 2006).

El volcán Azufral se localiza en las coordenadas geográficas 1°05' N y 77°43' W (WGS84), con una elevación de 4.070 m.s.n.m. Está clasificado como un estrato volcán truncado, conformado por una caldera de 2,5 por 3 km que contiene un complejo de domos de lava con composición riocacítica y edad Holoceno y sin registros de actividad para tiempos históricos. En su cima existe un lago denominado Laguna Verde, con forma de media luna que ocupa el lado noroccidental de la caldera. Las rocas del volcán Azufral son más silíceas que las de los volcanes que se encuentran cerca y está rodeado por depósitos de flujos piroclásticos riocacíticos (Smithsonian, 2010).

METODOLOGÍA

En campo se adquirieron datos de intensidad de campo geomagnético total, los cuales se corrigieron con el Campo de Referencia Geomagnético Internacional - IGRF10 (International Geomagnetic Reference Field) (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>) (IGRF10, 2009) para obtener la Anomalía Magnética, AM. Utilizando el programa Oasis Montaj™ (Geosoft, 2009), los datos de AM fueron suavizados mediante el

filtro no lineal (Naudy and Dreyer, 1968 en Geosoft, 2009), con el objetivo de remover los picos de ruido y se interpolaron utilizando la técnica de Kriging con el modelo de variograma automático del programa, con lo cual se obtuvo el mapa de AM.

Para estimar la profundidad de la isoterma de Curie, se aplicó el método del Análisis Espectral (Spector and Grant, 1970; Tanaka *et al.*, 1999; Okubo *et al.*, 1985; Connard *et al.*, 1983; Ebbing *et al.* 2009), que asume que las anomalías magnéticas son causadas por un ensamble de prismas verticales, donde la profundidad de la base de la fuente es la profundidad inferida de la isoterma de Curie. Usando mapas de datos magnéticos, se puede expresar el espectro de densidad de potencia del campo magnético total como una función de su magnetización. En caso de que la magnetización sea aleatoria, ésta se puede asumir como constante, al igual que los factores asociados con la dirección de magnetización de los prismas y con la dirección del campo geomagnético. Si se considera el promedio radial del espectro de densidad de potencia, entonces la función se puede expresar como sigue:

$$\Phi_{promedio}(k) \cong [e^{-2kz_{topo}}][(1 - e^{-k(z_{base} - z_{topo})})^2] \quad (1)$$

Para números de onda medios a altos, el segundo término en ésta expresión puede ser ignorado, lo que lleva a la siguiente relación lineal:

$$\ln(\Phi_{promedio}(k)) \cong B - 2kz_{topo} \quad (2)$$

Por lo tanto, la pendiente de $\ln(\Phi_{promedio}(k))$ para números de onda medios a altos, se puede utilizar para estimar la profundidad del tope de un prisma estadístico.

Cuando el pico de frecuencia máxima no es observado, la profundidad del tope del prisma se calcula a partir de la pendiente del espectro radial de potencia para números de onda altos (Okubo *et al.*, 1985; Tanaka *et al.*, 1.999), entonces la ecuación (2) se puede aproximar para números de onda bajos de la siguiente manera:

$$\ln(\Phi_{promedio}(k^{1/2}/k)) \cong B - 2kz_{centroide} \quad (3)$$

La profundidad del centroide del prisma, $z_{centroide}$, es calculada a partir de la pendiente del espectro de potencia radial dividido por los números de onda para bajos números de onda. La profundidad de la base del prisma puede ser calculada a partir de las profundidades del tope y del centroide de los prismas, con la siguiente ecuación:

$$z_{base} = 2z_{centroide} - z_{topo} \quad (4)$$

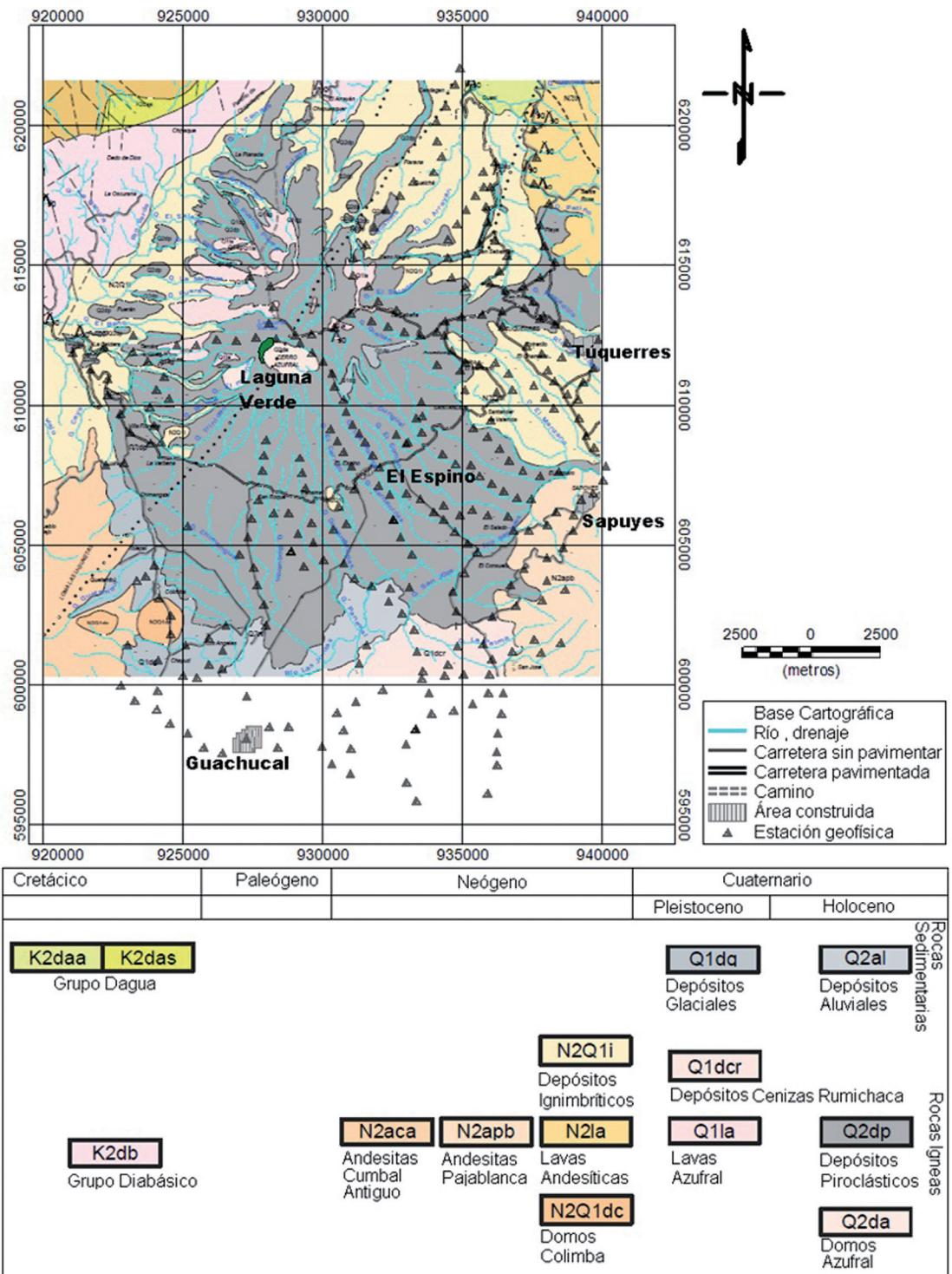


FIGURA 2. Geología de la zona estudiada, tomado y modificado del mapa Geológico, Plancha 428 Túquerres (INGEOMINAS, 2003).

Asumiendo una temperatura de Curie de 580°C, una temperatura de 0°C en la superficie y con los datos de la profundidad de la isoterma, se estimaron los valores de

gradiente geotérmico y de flujo de calor. Entonces, la temperatura de Curie puede ser definida como:

$$\theta_c = \frac{dT}{dz} d \quad (5)$$

Donde θ_c es la temperatura de Curie; dT/dz es el gradiente de temperatura y d es z_{base} , la profundidad de la isoterma de Curie, inferida del análisis espectral.

La conductividad térmica K , definida como la propiedad de los cuerpos que rige la transmisión de calor a través de ellos, es el factor de proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura. Considerando un caso unidimensional, asumiendo que la dirección de variación de la temperatura es vertical y el gradiente de temperatura es constante, la Ley de Fourier para el transporte conductivo de calor (Bunterbarth, 1994), tiene la siguiente expresión:

$$Q = -K \frac{dT}{dz} \quad (6)$$

Donde Q es el flujo de calor; K es la conductividad térmica y dT/dz es el gradiente geotérmico. La conductividad térmica no ha sido medida experimentalmente, por lo tanto para éste estudio se utilizó un valor de K de 1,3 W/(m°C), obtenido del promedio aritmético de los valores mínimos teóricos de K (Wohletz and Heiken, 1992) para las rocas ígneas presentes en la zona. Los valores asignados fueron: 1,69 para las diabásicas basálticas, 1,35 para las andesitas, 0,54 para las dacitas y 1,58 para las riolitas.

En el mapa de AM se trazaron ocho perfiles de trabajo tratando de cubrir toda el área de estudio, cruzando zonas de AM negativa y uniendo puntos de referencia como la Laguna Verde con los poblados, la población de Guachucal con los otros poblados y un perfil que pasa por la Laguna Verde con rumbo N65°E. Se calculó el espectro para cada perfil y el espectro de potencia promediado radialmente de la zona estudiada completa. Los valores obtenidos a partir de la estimación, se interpolaron para producir los mapas de profundidad de la isoterma de Curie, gradiente geotérmico y flujo de calor de la zona estudiada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos interpolados de AM (FIGURA 3) tienen un rango de variación entre -610,4 nT y 269,2 nT, con una media de -32,7 nT, una desviación estándar de 125,4 y un error estándar de 1,94. Se resalta una anomalía magnética negativa importante que se extiende desde la población de El Espino hacia el norte - noroccidente, circundando el volcán Azufral, la cual varía entre 0 y -610,4 nT con un gradiente bajo. Esta anomalía negativa geológicamente corresponde a las lavas del Azufral y los depósitos piroclásticos no consolidados, de edad Pleistoceno y Holoceno, respectivamente. Otra zona

de anomalía magnética negativa se encuentra ubicada al occidente y norte de la población de Túquerres, con una variación entre 0 y -250 nT, con un gradiente bajo, la cual corresponde geológicamente a depósitos ignimbíticos y lavas andesíticas de edad Neógeno y los depósitos piroclásticos no consolidados. La otra zona de anomalía negativa se encuentra al suroriente de la zona estudiada, circundando la población de Guachucal, con una variación de 0 a -150 nT, con un gradiente bajo, que geológicamente corresponde con las andesitas del Cumbal antiguo de edad Neógeno, los depósitos glaciales y depósitos de cenizas de Rumichaca de edad Pleistoceno y con depósitos aluviales de edad Holoceno. Al nororiente de la zona estudiada se destacan dos dipolos de alto gradiente, orientados oeste - este, el primero de ellos con una variación entre -200 y 100 nT; el segundo dipolo que se encuentra hacia el nororiente del primero, tiene una variación entre -200 y 50 nT; ambos dipolos corresponden geológicamente con los depósitos ignimbíticos y con los depósitos piroclásticos no consolidados.

Una zona de anomalía magnética positiva de bajo gradiente se ubica al centro de la zona de estudio, con variación entre 0 y 100 nT, correspondiendo con las colinas bajas alargadas de Túquerres y geológicamente con los depósitos piroclásticos no consolidados. Otra zona de anomalía magnética positiva y bajo gradiente se ubica al occidente - suroccidente, con una variación entre 0 y 269 nT, que corresponde con el edificio antiguo del volcán Cumbal y geológicamente con las andesitas de Cumbal antiguo y los domos de Colimba de edad Neógeno. Otra zona de anomalía magnética positiva y bajo gradiente se ubica al oriente - suroriente, con una variación entre 0 y 269 nT, la cual corresponde al edificio antiguo del volcán Pajablanca y geológicamente a las andesitas de Pajablanca de edad Neógeno y a los depósitos piroclásticos no consolidados. En la FIGURA 3 se muestra el mapa de AM del área estudiada.

La estimación de la profundidad de la isoterma de Curie produjo valores entre 2,3 y 14,2 km, con un error típico máximo de 1,26 para la regresión lineal, lo cual indica un buen ajuste entre los datos de los espectros y los datos pronosticados con las rectas de regresión. En la FIGURA 4 se muestra el espectro de potencia de los datos de AM para el perfil 7, que une la Laguna Verde con la población de Sapuyes; con este perfil se estimó una profundidad de 2,3 km para la isoterma de Curie. En la FIGURA 5 se muestra el espectro de potencia promediado radialmente de la AM del área estudiada completa, con el cual se estimó una profundidad de 3,7 km para la isoterma de Curie.

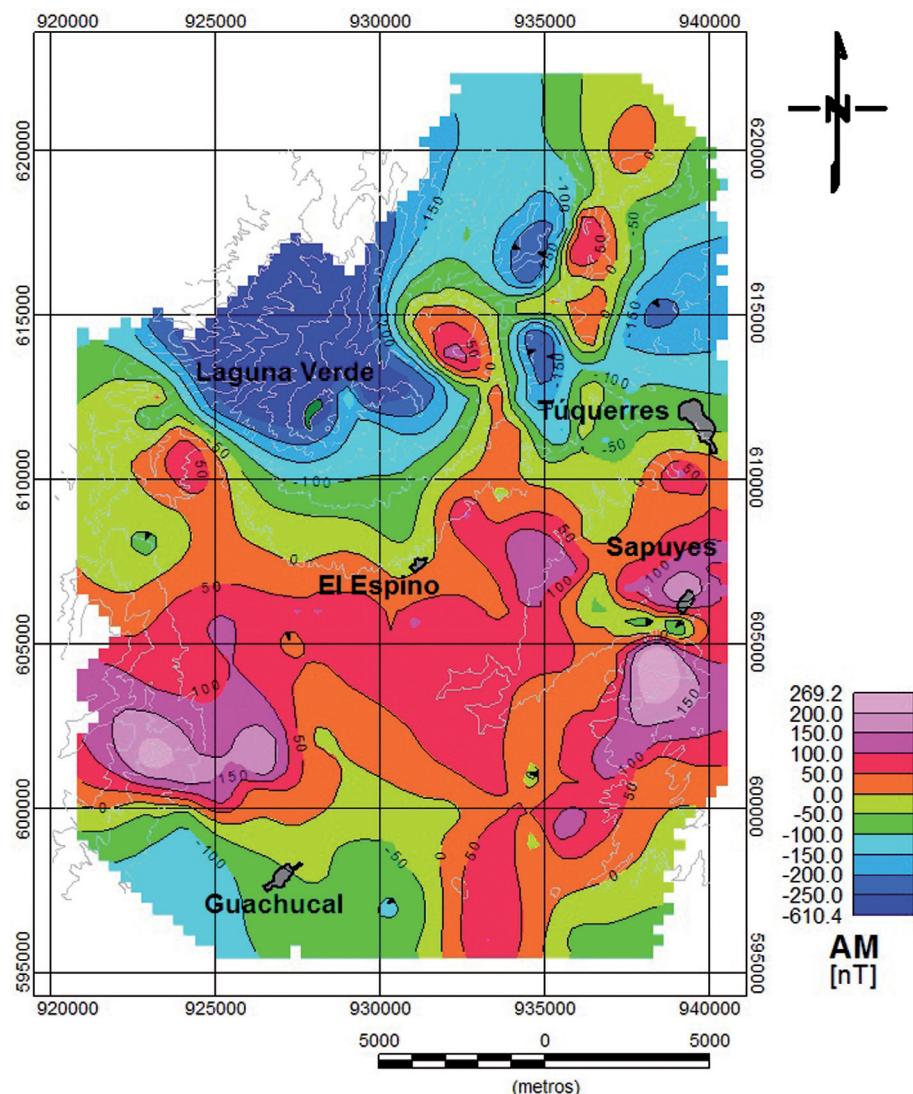


FIGURA 3. Mapa de AM, para una inclinación $I = 24.4^\circ$ y una declinación $D = -2.8^\circ$. Los contornos en gris corresponden a las curvas de nivel cada 200 m.

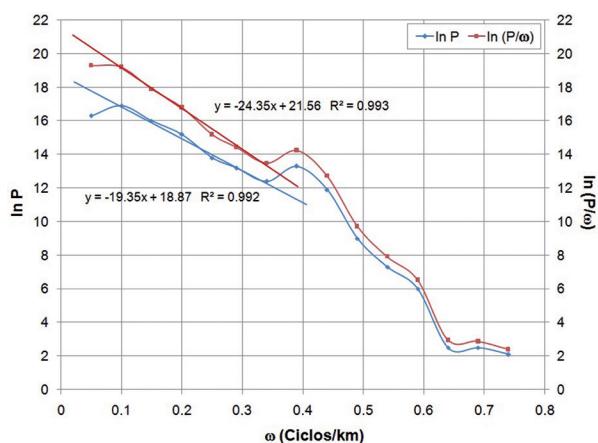


FIGURA 4. Espectro de potencia de los datos de AM del Perfil 7.

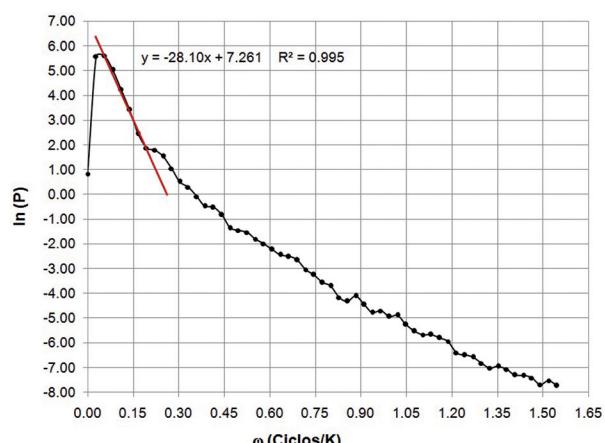


FIGURA 5. Espectro de potencia promediado radialmente de la AM del área estudiada completa.

Los datos interpolados de la profundidad de Curie (FIGURA 6) tienen un rango de variación entre 2 y 15 km, con una media de 7,8 km, una desviación estándar de 4,2 y un error estándar de 0,07. Las zonas donde la isoterma tiene profundidades entre 8 y 15 km corresponden morfológicamente con el edificio volcánico muy antiguo de Pajablanca al suroriental, el edificio volcánico muy antiguo de Cumbal al suroccidente y las vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés al nororiente y geológicamente corresponderían con los depósitos de las andesitas de Cumbal antiguo, los domos de Colimba, las andesitas de Pajablanca y las lavas andesíticas del nororiente, todos de edad Neógeno. En relación con el mapa de AM, estas zonas corresponden con anomalías magnéticas positivas. En cambio las zonas donde la isoterma es más superficial, con profundidades entre 2 y 8 km, corresponden con la planicie del Cumbal al sur, las colinas bajas alargadas de Túquerres al centro y el edificio nuevo de Azufral al norte; estas zonas de isoterma superficial geológicamente corresponden con los depósitos ignimbíticos de edad Neógeno, los depósitos glaciales, los depósitos de cenizas de Rumichaca y las lavas de Azufral todos de edad Pleistoceno, también corresponden con depósitos aluviales, los domos de Azufral y los depósitos piroclásticos no consolidados, todos de edad Holoceno. En el mapa de AM corresponden con zonas de anomalía magnética negativa y con zonas donde se encuentran los dipolos magnéticos. En la FIGURA 6 se muestra el mapa de isolíneas de los estimados de profundidad de la isoterma de Curie en el área estudiada.

Los gradientes geotérmicos obtenidos a partir de los perfiles mostraron un rango entre 41 y 250 °C/km; el gradiente geotérmico obtenido a partir del espectro de potencia promediado radialmente de la AM del área estudiada completa fue de 157 °C/km. Los datos interpolados del gradiente geotérmico (FIGURA 7) tienen un rango de variación entre 3 y 262 °C/km, con una media de 111,5 °C/km, una desviación estándar de 57,7 y un error estándar de 0.89. Las zonas con gradiente geotérmico entre 3 y 100 °C/km tienen coincidencia con las zonas de isoterma de Curie con profundidad entre 8 y 15 km, por lo que se asocian con las mismas características morfológicas y con los mismos depósitos geológicos. De igual manera, las zonas con gradiente geotérmico entre 100 y 262 °C/km guardan coincidencia con las zonas donde la isoterma de Curie tiene profundidades entre 2 y 8 km. En la FIGURA 7 se muestra el mapa de isolíneas de los estimados de gradiente geotérmico en el área estudiada.

Los datos de flujo de calor obtenidos a partir de los perfiles mostraron un rango entre 53 y 325 mW/m²; el flujo de calor obtenido a partir del espectro de potencia promediado radialmente de la AM del área estudiada completa fue de 204 mW/m². Los datos interpolados del flujo de calor (FIGURA 8) tienen un rango de variación entre 2 y 340 mW/m², con una media de 144,6 mW/m², una desviación estándar de 75,3 y un error estándar de 1,17. Las zonas con flujo de calor entre 2 y 140 mW/m², tienen coincidencia con las zonas de isoterma de Curie con profundidad entre 8 y 15 km, por lo que se asocian con las mismas características morfológicas y con los mismos depósitos geológicos. De igual manera, las zonas con flujo de calor entre 140 y 340 mW/m², guardan coincidencia con las zonas donde la isoterma de Curie tiene profundidades entre 2 y 8 km. En la FIGURA 8 se muestra el mapa de isolíneas de los estimados de flujo de calor en el área estudiada.

En el área estudiada no se han llevado a cabo mediciones directas de gradiente geotérmico o flujo de calor, por lo cual este estudio es una aproximación al conocimiento del sistema geotérmico del volcán Azufral. La profundidad estimada de la isoterma varía entre 2,3 km y 14,2 km, con una profundidad promedio para la zona estudiada de 3,7 km, valores que son similares a los estimados con el mismo método para el volcán Galeras, en donde la profundidad de la isoterma de Curie varía entre 2,6 km y más de 10 km (Ordóñez, 1990). La isoterma se profundiza en las zonas de los edificios volcánicos de edad Neógeno, como son el edificio antiguo de Cumbal, los domos de Colimba, las vertientes montañosas escarpadas de Guachavés y el edificio antiguo de Pajablanca y se hace más superficial en las zonas de depósitos de menor edad, Pleistoceno – Holoceno, como son el edificio volcánico reciente de Azufral, la planicie del Cumbal y las colinas bajas alargadas de Túquerres. De igual manera la isoterma parece profundizarse en las zonas de altos magnéticos, donde la AM es positiva y alcanza los mayores valores positivos y se vuelve más superficial en zonas de bajos magnéticos, donde la AM es negativa y alcanza los mayores valores negativos. Esta ondulación de la profundidad de la isoterma tiene implicaciones en la estimación de los gradientes geotérmicos y el flujo de calor, haciendo que éstos también varíen en las mismas zonas. También se observa que cuando la isoterma se profundiza los gradientes geotérmicos y el flujo de calor son menores y cuando la isoterma se vuelve más superficial, los gradientes geotérmicos y el flujo de calor aumentan, mostrando una relación inversa.

Según Stacey and Davis (2008), el gradiente de temperatura de la corteza terrestre medido en los

primeros kilómetros en áreas continentales estables, es típicamente de $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$, en éste estudio se obtuvieron valores de gradiente geotérmico entre $41^{\circ}\text{C}/\text{km}$ y $250^{\circ}\text{C}/\text{km}$, asumiendo una temperatura de Curie de 580°C y temperatura en superficie de 0°C . El flujo de calor puede ser mucho mayor en áreas continentales tectónicas y térmicas, pero es una fracción pequeña del área total de la tierra y tiene pequeña influencia en el promedio global. Existen más de 24.000 medidas de flujo de calor en diferentes

sitios del planeta (<http://www.geophysik.rwth-aachen.de/IHFC/heatflow.html>), con un amplio rango de valores y suficientes datos que hacen confiable un flujo de calor promedio de 65 mW/m^2 para los continentes y 101 mW/m^2 para la corteza oceánica (Pollack *et al.*, 1993). En éste estudio se obtuvieron valores de flujo de calor entre 53 mW/m^2 y 325 mW/m^2 con un promedio general para la zona de 203 mW/m^2 , asumiendo una conductividad térmica promedio de $1,3 \text{ W/(m}^{\circ}\text{C)}$.

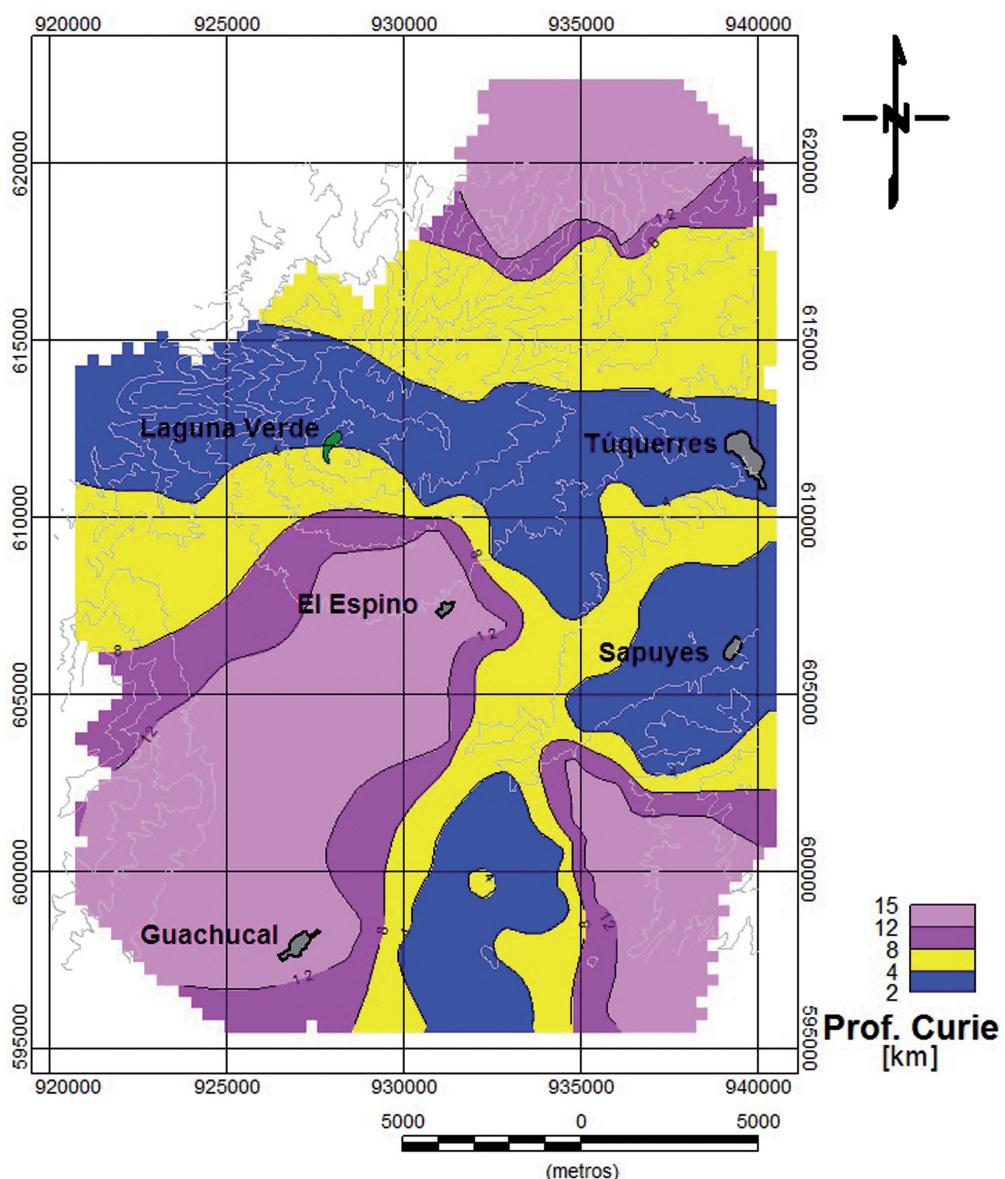


FIGURA 6. Mapa de isolíneas de los estimados de la profundidad de la isoterma de Curie en el área estudiada. Los contornos en gris corresponden a las curvas de nivel cada 200 m.

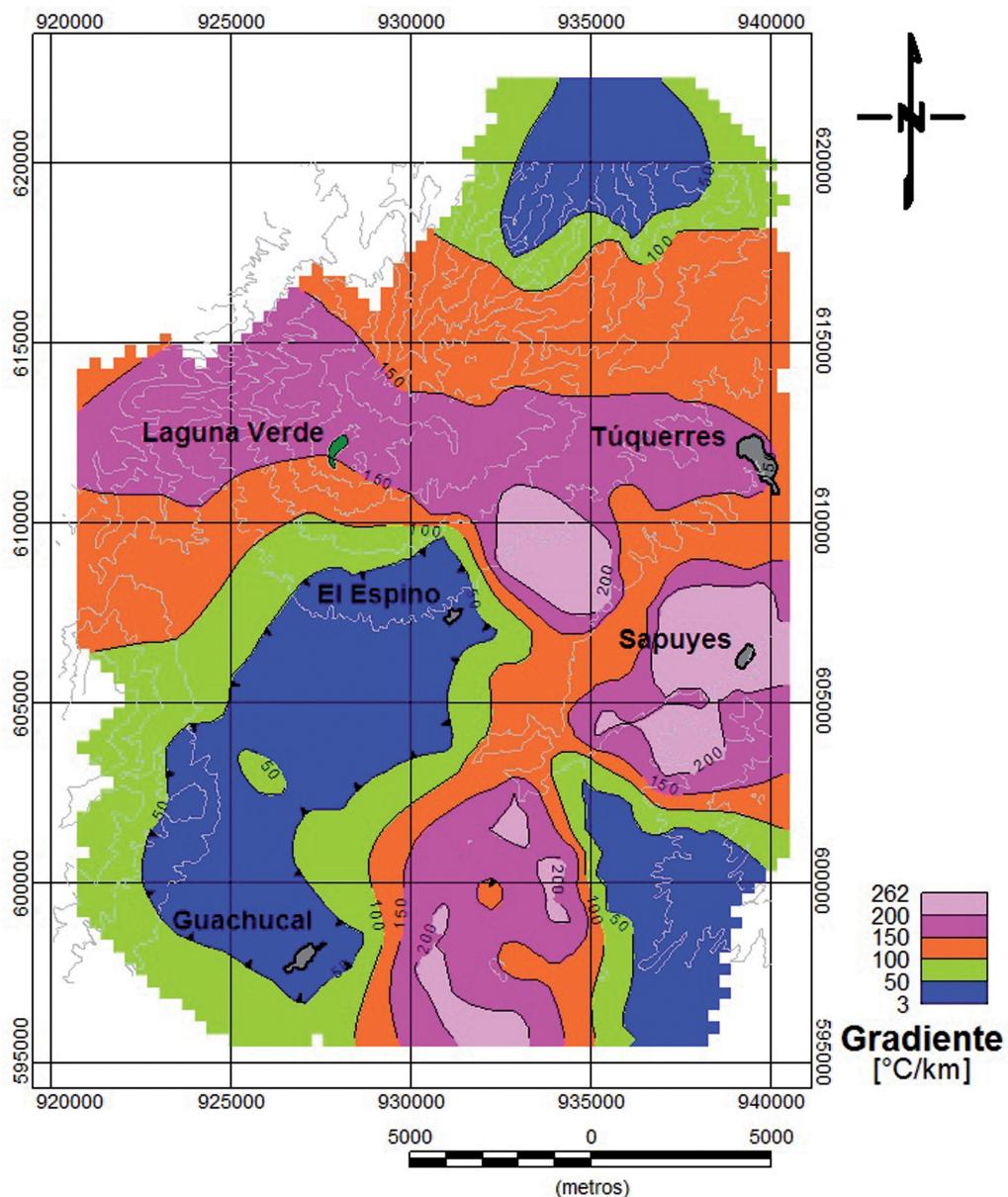


FIGURA 7. Mapa de isolíneas de los estimados del gradiente geotérmico en el área de estudio. Los contornos en gris corresponden a las curvas de nivel cada 200 m.

CONCLUSIONES

La aplicación del análisis espectral a la AM de una parte de la zona de influencia del volcán Azufral fue útil para estimar la profundidad de la isoterma de Curie, cuyos valores oscilaron entre 2,3 y 14,2 km. Las zonas en donde los gradientes geotérmicos y el flujo de calor son menores se relacionan con las profundidades mayores de la isoterma y coinciden con los edificios antiguos de otros volcanes del área, como Pajablanca, Cumbal y Colimba de edad Neógeno. Las zonas en donde los gradientes geotérmicos y el flujo de calor son

mayores se relacionan con las profundidades menores de la isoterma y coinciden con el edificio reciente de Azufral y los depósitos geológicos de edad Pleistoceno-Holoceno. La zona en donde se encontraron los picos negativos máximos de la AM, coincide con las profundidades superficiales de la isoterma de Curie y los valores mayores de gradiente y flujo de calor. Por el contrario, las zonas en donde se encontraron los valores positivos máximos de la AM, coinciden con las mayores profundidades de la isoterma y los menores valores de gradiente y flujo de calor.

Las áreas donde se estima la isoterma superficial podrían indicar zonas probables para exploración geotérmica, porque los gradientes geotérmicos son superiores a 100 °C/km y el flujo de calor es mayor de 140 mW/m², valores que son mucho mayores que los promedios del planeta en zonas continentales.

Estos resultados se convierten en un aporte para enriquecer el conocimiento del sistema geotérmico del volcán Azufral, que ha sido considerado desde la década de 1980 como un importante prospecto para desarrollar proyectos de generación de energía geotérmica.

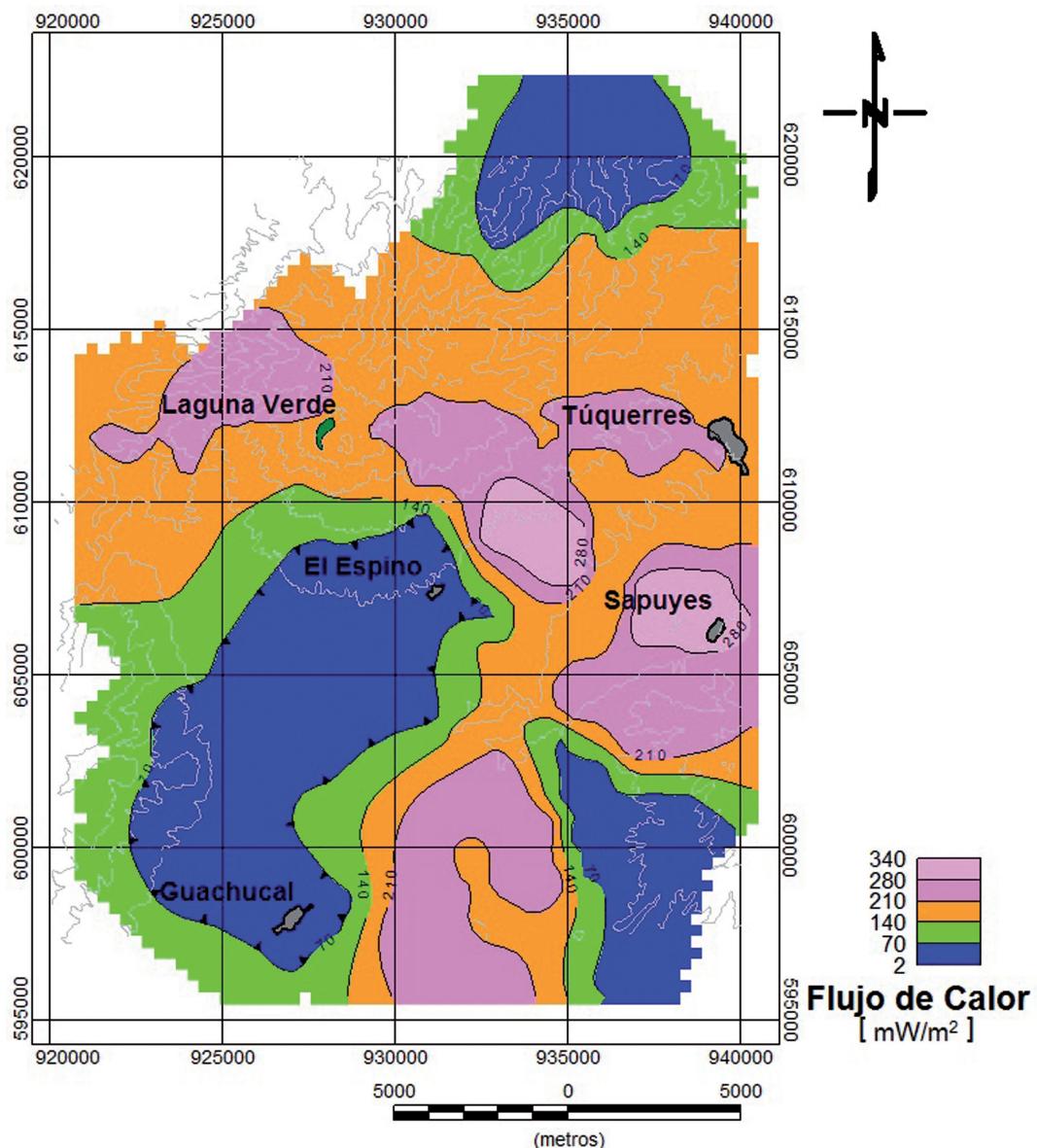


FIGURA 8. Mapa de isolíneas de los estimados del flujo de calor en el área de estudio. Los contornos en gris corresponden a las curvas de nivel cada 200 m.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Geológico Colombiano por facilitar los datos de anomalía magnética del área estudiada. A los jefes de los proyectos de Exploración de Recursos Geotérmicos

e Investigación y Monitoreo de la actividad Volcánica del Servicio Geológico Colombiano por el apoyo a esta investigación. Al programa de Maestría en Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

- Bechon, F., et Monsalve, M. 1991. Activité récente préhistorique du volcan Azufral (S-W de la Colombie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 313 (2): 99-104.
- Butenbarth, G. 1994. Introducción a los aspectos aplicados y teóricos de la conducción del calor en la tierra. Trad. Dr. Oscar campos. Editores Grafos S. A. De C. V. México D. F. 184p.
- Connard, G.C. 1983. Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in central Oregon. *Geophysics*, 48(3): 376-390.
- Cortés, G., y Calvache, M. 1997. Geología del Volcán Azufral Primera Fase. INGEOMINAS, Pasto.
- Ebbing, J., Gernigon, L., Pascal, C., Olesen, O., and Osmundsen, P.T. 2009. A discussion of structural and thermal control of magnetic anomalies on the mid-Norwegian margin. *Geophysical Prospecting*, (57): 665-681.
- Fontaine, E. 1994. Evolution Volcanologique et Géochimique du Volcan Azufral, Colombie, Amérique du Sud. Tesis, Universidad de Montreal, Canadá, pp. 215.
- Geosoft. 2009. Geosoft Company. Consultado el 01 de Septiembre de 2009, de <http://www.geosoft.com/products/oasis-montaj>.
- Gómez, D. 2012. Modelamiento de Reservorios Magmáticos del Volcán Azufral (Departamento de Nariño) a partir de Anomalías de Campos Potenciales. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Pasto.
- Gómez, D., y Ponce, P. 2009. Levantamiento Geofísico (Gravimétrico y Magnético) en el Área Geotérmica del Volcán Azufral, Departamento de Nariño. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Pasto: INGEOMINAS.
- González, H., Zapata, G., y Montoya, D. 2002. Geología y Geomorfología de la Plancha 428 Túquerres, Memoria Explicativa. Medellín: INGEOMINAS.
- IGRF10. 2009. International Geomagnetic Reference Field. Consultado el 15 de Octubre de 2009, en <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.
- IHFC. 2011. International Heat Flow Commission, IASPEI. Consultado el 20 de Agosto de 2011, de RWTH Aachen University en: <http://www.geophysik.rwth-aachen.de/IHFC/heatflow.html>.
- INGEOMINAS. 2003. Mapa Geológico. Plancha 428 Túquerres. Bogotá. Escala 1:100.000.
- Okubo, Y., Graf, R., Hansen, R., Ogawa, K., and Tsu, H. 1985. Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*, 53 (3): 481-494.
- OLADE. 1982. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. En E. Lozano (Ed.), *Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia*, 1995 ed., Tomo XXI. Bogotá, INGEOMINAS.
- Ordóñez, L.A. 1990. Un modelo de la estructura del volcán Galeras con base en datos magnéticos. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Pollack, H., Hurter, S., and Johnson, J. 1993. Heat Flow from the Earth's Interior: Analysis of the Global Data Set. (A. G. Union, Ed.). *Reviews of Geophysics*, 31 (3): 267-280.
- Ponce, P. 2013. Exploración de Recursos Geotérmicos del Volcán Azufral a partir de la interpretación de Anomalías de Campos Potenciales. Tesis. Universidad Nacional de Colombia.
- Smithsonian. 2010. Global Volcanism Program. Consultado el 10 de Abril de 2010, de <http://www.volcano.si.edu/world/list.cfm>.
- Spector, A., and Grant, F. 1970. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data. *Geophysics*, 35(2): 293-302.
- Stacey, F., and Davis, P. 2008. *Physics of the Earth* (Fourth Edition ed., Vol. Fourth Edition). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 513p.
- Tanaka, A., Okubo, Y., and Matsubayashi, O. 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly. *Tectonophysics*, (306): 461-470.
- Torres, P., Cortés, G., Calvache, M., y Monsalve, M.L. 2001. Geología y Estratigrafía del Volcán Azufral, Colombia. VIII Congreso Colombiano de Geología, Manizales, pp.1-11.

Velandia, F., Romero, D., Rodríguez, B., Hincapié, G., y Salazar, E. 2006. Esquema estructural para exploración hidrogeológica en el Altiplano Nariñense. Memorias, II Congreso Colombiano de Hidrogeología, Bucaramanga, pp. 1-6.

Velandia, F., Salazar, E., Pulgarín, B., Forero, H., e Hincapié, G. 2008. Estratigrafía de los depósitos volcánicos del Altiplano Nariñense, Colombia. Geología Colombiana, 33: 57-68.

Wohletz, K., and Heiken, G. 1992. Volcanology and Geothermal Energy. Berkeley, California: University of California Press, 432p.

Trabajo recibido: febrero 21 de 2014

Trabajo aceptado: junio 6 de 2014