Proceedings of the
Latin-American Geothermal Congress 2025
LGC 2025
San Salvador, El Salvador
22–26 Sept. 2025

Modelamiento 1D de Magnetotelúrica Somera (AMT) y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en el Volcán Azufral para la Contribución al Estudio del Potencial Geotérmico

Diana C. León López *[1]

[1] Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, COLOMBIA
E-mail: dileonl@unal.edu.co
Palabras clave: Geotermia, Integración de métodos, Magnetotelúrica, Modelamiento unidimensional, Python, SEV

RESUMEN: Este trabajo contribuye al estudio del potencial geotérmico del Volcán Azufral (Nariño, Colombia) con dos objetivos principales: (1) correlacionar los resultados de magnetotelúrica somera (AMT) y sondeos eléctricos verticales (SEV), y (2) interpretar, a partir de modelos AMT, las zonas con mayor probabilidad de albergar reservorios hidrotermales.
Se analizaron 139 registros AMT y 96 SEV adquiridos por el Servicio Geológico Colombiano. Los datos AMT fueron modelados en WinGLink mediante inversión tipo Occam, mientras que los SEV se invirtieron en Python empleando el método del codo para definir el número óptimo de capas. Ambos conjuntos se interpolaron sobre una malla común y se evaluaron métricas de correlación y error.
Los resultados muestran que la AMT ofrece mayor resolución lateral y vertical entre 10 y 100 m, identificando zonas conductivas persistentes (<10 Ω·m) en el centro-sur del área. Los SEV, aunque limitados en superficie, mostraron convergencia con la AMT en profundidad, alcanzando r = 0.735 y R^2 = 0.541 a los 100 m.
Se reconoció además una franja altitudinal entre 2500 y 2800 msnm con alto potencial geotérmico, en la que se identifican zonas de recarga, capas sellantes y control estructural por fallas. Estos hallazgos reafirman la utilidad de integrar AMT y SEV para la exploración geotérmica en ambientes volcánicos.

1. Introducción:

El Volcán Azufral presenta condiciones favorables para el desarrollo geotérmico de alta entalpía, evidenciadas por manifestaciones como domos dacíticos, fumarolas y manantiales termales [1]. En este contexto, los métodos magnetotelúricos (AMT) y los sondeos eléctricos verticales (SEV) ofrecen herramientas complementarias para caracterizar estructuras clave del subsuelo. Este estudio integra ambos métodos mediante modelamiento 1D e interpolaciones sobre una malla común, para evaluar su correspondencia e identificar anomalías geoeléctricas en el área.

2. Metodología

El estudio se basa en 139 registros de magnetotelúrica somera (AMT) y 96 sondeos eléctricos verticales (SEV) recolectados por el Servicio Geológico

Colombiano entre 2003 y 2017 [2][3]. Los datos AMT fueron procesados en WinGLink, realizando la depuración de curvas y la corrección del *static shift*. Se generaron modelos unidimensionales (1D) mediante inversión tipo Occam [4], interpolados hasta 100 m de profundidad y posteriormente exportados a Python para análisis estadístico e integración.

Los datos SEV fueron organizados en una base unificada y sometidos a inversión en Python [5], evaluando entre 2 y 7 capas por sondeo. El modelo óptimo se definió mediante el método del codo aplicado a curvas Chi² [6], seleccionando el punto de inflexión que representó un balance entre ajuste y estabilidad.

Para la integración, ambos conjuntos de datos fueron proyectados sobre una malla común, empleando interpolación por kriging [7]. Esto permitió comparar resistividades a intervalos regulares de profundidad (10–100 m), construyendo gráficos de dispersión y evaluando métricas de correlación (r, R^2) y error.

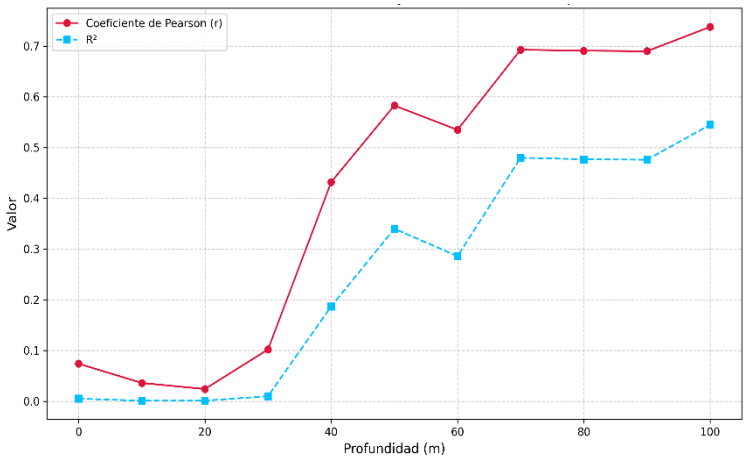
Finalmente, los modelos interpolados se interpretaron con base en los rangos de resistividad definidos por el SGC [1], asociando unidades conductivas y resistivas a elementos clave del sistema geotérmico del Volcán Azufral.

3. Resultados

3.1. Correlación MT vs SEV

El análisis de correlación entre resistividades MT y SEV evidenció una coherencia creciente con la profundidad (*Fig.1*). En los primeros 30 m, los coeficientes de Pearson (r) fueron bajos (<0.10) [8][9], indicando escasa correspondencia entre métodos. A partir de los 40 m, los valores aumentaron progresivamente, alcanzando $r = 0.738$ y $R^2 = 0.545$ a los 100 m (39 puntos). Este patrón sugiere mayor concordancia a mayor profundidad, posiblemente por el mayor alcance efectivo del método MT frente a la resolución limitada del SEV en superficie. Las métricas de error (RMSE y MAE) también disminuyeron desde los 60 m.

Figura 1. Variación del coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2) entre resistividades interpoladas de MT y SEV, en función de la profundidad.



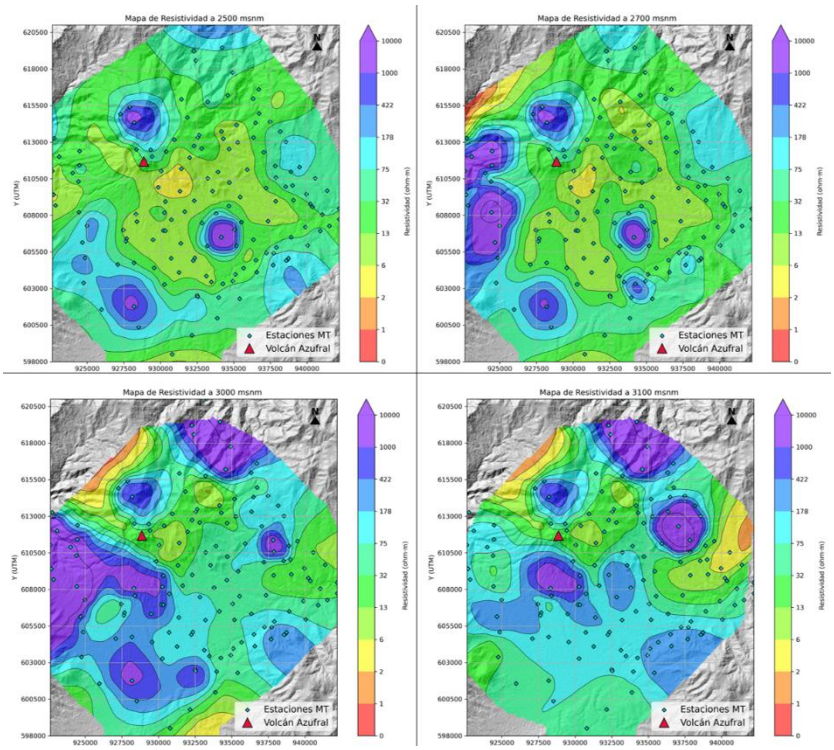
3.2. Distribución de anomalías geoeléctricas a partir de modelos MT 1D

Los modelos AMT interpolados por elevación mostraron variaciones espaciales significativas en el intervalo 900–3200 msnm (*Fig. 2*). Se identificaron zonas conductivas persistentes (<10 Ω·m) en el centro-sur del área, posiblemente asociadas con arcillas hidrotermales, agua termal o zonas de fracturación secundaria [1].

Entre 2500 y 2800 msnm se reconoció una franja altitudinal con alto potencial geotérmico: a 2500 msnm, la alta conductividad en el sector occidental sugiere una zona de recarga activa, mientras que de 2800 msnm el aumento en resistividad podría indicar la presencia de una capa sellante que retiene fluidos en profundidad.

Por encima de los 3000 msnm, los modelos evidenciaron dominios predominantemente resistivos, cuya alineación con estructuras tectónicas sugiere un control estructural en la circulación de fluidos geotérmicos. Este patrón concuerda parcialmente con el modelo conceptual del SGC (2013) [1] y con estudios MT previos en el Azufral [3], aunque en este estudio se resalta con mayor claridad la influencia tectónica en el confinamiento de unidades conductivas.

Figura 2. Modelos de resistividad MT interpolados por elevación (2500–3100 msnm).Se observan zonas conductivas y resistivas, así como la influencia de estructuras tectónicas en la distribución de resistividades.



4. Discusión

La correlación entre AMT y SEV mostró un incremento progresivo con la profundidad, alcanzando valores moderados a los 100 m. Esto confirma que, aunque los SEV presentan limitaciones en niveles someros, pueden complementar los resultados de AMT en mayor profundidad.

La franja conductiva entre 2500 y 2800 msnm coincide con la capa hidrotermal propuesta en el modelo conceptual del SGC (2013) [1], asociada a arcillas hidrotermales y fluidos confinados. Sin embargo, en este estudio se resalta además la presencia de un nivel sellante a 2800 msnm y la influencia de fallas en el control de la circulación de fluidos, lo que aporta un mayor detalle al esquema previo.
En conjunto, los resultados validan la interpretación del SGC y la amplían, mostrando que la integración AMT–SEV constituye una herramienta eficaz para la caracterización geoeléctrica del Azufral y su potencial geotérmico.

5. Conclusiones

La AMT demostró mayor resolución lateral y vertical entre 10 y 100 m, identificando zonas conductivas (<10 Ω·m) asociadas a posibles reservorios hidrotermales.
Los SEV presentaron limitaciones en niveles someros (<40 m), pero mostraron convergencia con la AMT a mayores profundidades, alcanzando correlaciones moderadas ($r = 0.735$; $R^2 = 0.545$ a 100 m).
La franja altitudinal entre 2500 y 2800 msnm coincide con la capa hidrotermal propuesta por el SGC (2013), aunque este estudio resalta además un nivel sellante y el control estructural ejercido por fallas.
La integración AMT–SEV sobre mallas comunes y validación estadística constituye un enfoque replicable para la exploración geotérmica en sistemas volcánicos de alta entalpía.

Reconocimientos:
Agradezco a mis tutores Gilbert Fabian Rodríguez Rodríguez y Luis Fernando Ochoa Gutiérrez, a la Beca José Eduardo Pulido Mancera, y al SGC.

Referencias:

[1] Alfaro Valero, C.M., Monsalve Bustamante, M.L., Ortiz Martín, I.D., et al.: 'Modelo conceptual del sistema geotérmico del Volcán Azufral', SGC, Bogotá, 2013, pp. 220–233.
[2] Franco, J.V., Hincapié, D.: 'Prospección geoeléctrica al sureste del Volcán Azufral, jurisdicción de los municipios de Túquerres, Sapuyes y Guachucal – Nariño. Fase I', Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS, Valledupar, 2009, pp. 14–190.
[3] Rodríguez-Rodríguez, G.F.: 'Modelamiento 1D, 2D y 3D de la estructura resistiva del subsuelo a partir de registros magnetotelúricos para el área geotérmica del Volcán Azufral', Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, 2018, pp. 8 -61.
[4] Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G.: 'Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data', Geophysics, 1987, 52, (3), pp. 289–300
[5] Doyoro, Y.G., Chang, P.-Y., Puntu, J.M., et al.: 'A review of open software resources in python for electrical resistivity modelling', Geosci. Lett., 2022, 9, (3), pp. 1–18.
[6] Kodinariya, T.M., Makwana, P.R.: 'Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering', Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Manag. Stud., 2013, 1, (6), pp. 92.
[7] Oliver, M.A., Webster, R.: 'Kriging: a method of interpolation for geographical information systems', *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 1990, **4**, (3), pp. 313–332
[8] Akoglu, H.: User's guide to correlation coefficients, Turk. J. Emerg. Med., 2018, 18, (3), pp. 91–93. https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001
[9] Hernández Lalinde, J.D., Espinosa Castro, F., Rodríguez, J.E., et al.: 'Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones', Arch. Venez. Farmacol. Ter., 2018, 37, (5), pp. 588–598