



*En el marco del proyecto de investigación “Caracterización termo-mecánica y estructural de la litósfera a partir de métodos gravi-magnetométricos, orientados a explorar nuevos horizontes con potencial hidrocarburífero y geotermal en el noroeste argentino” se realizaron dos campañas geofísicas al NOA en el mes de octubre del año 2022 y en enero del 2023. Un grupo de geólogos y geofísicos del Instituto Geofísico Sismológico Volponi viajó al departamento de Cochinoca ubicado en la provincia de Jujuy para realizar un relevamiento de datos gravimétricos, magnetométricos, audio-magnetotéluricos, geoelectrónicos y sísmicos. El objetivo de estas campañas fue estudiar las características térmicas del sistema hidrotermal regional localizado al norte de la laguna de Guyatayoc. Estos estudios geofísicos locales permitieron sugerir posibles zonas con potenciales geotérmicos y ampliar los horizontes de investigación para su posible utilización como energías alternativas.*

#### Método Sísmico

*En una primera etapa se realizaron cuatro tomografías sísmicas para determinar velocidades de onda P. La materialización de cuatro arreglos de refracción sísmica, distribuidos en perfiles fue escogida en zonas estratégicas en función de los sitios donde se realizaron los sondeos de AMT. Se utilizó un equipo de registración “GEODE” de GEOMETRICS con capacidad para 24 canales, cables de registración de 1200 metros y 24 geófonos de 10 Hz. También se utilizó un radio trigger que permitió conocer el tiempo origen en cada disparo conectado a una fuente con un martillo automático de 500 lb marca GISCO. El dato sísmico fue procesado con el software SeisImager <http://www.geometrics.com>.*



*Figura: Adquisición sísmica*

### Método Audio-Magnetotelúrico

Paralelamente a la adquisición sísmica se midieron veintinueve estaciones de audio-magnetotelúrico, en diferentes campañas. Se utilizó un equipo Stratagem de Geometrics (Figura) diseñado para trabajar con frecuencias en el rango de 10 Hz a 100 kHz. Los campos eléctricos ( $E_x$  y  $E_y$ ) fueron medidos en cada sitio utilizando dos dipolos de acero inoxidable y cable, orientados N-S y O-E para los periodos más altos. Por otro lado, los campos magnéticos ( $H_x$  y  $H_y$ ) fueron medidos con sensores magnéticos Bf-6, para registrar los periodos bajos ( $1 \times 10^{-4}$  a 0,1 s). Las series de tiempo obtenidas fueron registradas usando el software IMAGEM. Luego de la adquisición de los datos en el campo, se continuó con la transformación de las series de tiempo a su forma espectral mediante la transformada de Fourier, como la calidad de la señal presenta variaciones durante el tiempo de registro, cada serie de tiempo se divide en varios segmentos para realizar la descomposición espectral, por lo que para la misma frecuencia se tienen múltiples lecturas sobre las que se estiman los productos cruzados entre las componentes  $H_x$  y  $E_y$  y entre las componentes  $H_y$  y  $E_x$  utilizando el software IMAGEN del equipo para adquirir los datos. A partir de estos pares se calculan las impedancias en los ejes principales,  $Z_{xy}$  y  $Z_{yx}$ , de donde se obtienen las curvas de resistividad aparente ( $xy$ ,  $yx$ ) y las de fase ( $\theta_{xy}$ ,  $\theta_{yx}$ ), utilizando el D+ algoritmo (Parker, 1980; Parker y Whaler, 1981; Beamish y Travassos, 1992; Parker y Booker, 1996), incluido en el software WinGlink®.



Figura: Adquisición Audio-Magnetotelúrico

### Método Gravimétrico

Para estudiar la distribución de densidades en el subsuelo y, de esta manera, explorar las profundidades al basamento técnico, se realizó un estudio gravimétrico (Figura). Las anomalías gravimétricas son sensibles a las densidades de las rocas y éstas están íntimamente relacionadas con sus velocidades sísmicas. Por lo tanto, en una interpretación simplificada, la carta de anomalías de Bouguer obtenida puede interpretarse como la distribución de altos y bajos del basamento

técnico en la cuenca de Guayatayoc. Se midieron 111 estaciones de gravedad, utilizando un gravímetro automático Scintrex CG5 (precisión 0,010 mGal) con un espaciamiento entre estación de aproximadamente 1 km. Las coordenadas precisas de cada estación se determinaron mediante DGPS usando equipos doble frecuencia Trimble 5700 (Figura), la determinación de las coordenadas se realizó empleando metodología post-proceso.



Figura: Operación de medición con un gravímetro automático Scintrex CG5, las coordenadas son determinadas mediante DGPS, con un sistema Trimble 5700 equipado con antena geodésica y controladoras Trimble Recon.

Para eliminar el efecto gravitatorio regional se emplearon diferentes filtros para eliminar las largas longitudes de onda de la señal gravimétrica y conservar las cortas que son vinculables a fuentes emplazadas en corteza superior. Se empleó una frecuencia de corte adecuada para poder vincular ambas respuestas, sondeos de AMT y señal gravimétrica residual.

Finalmente se obtuvieron modelos forward utilizando la señal residual de Bouguer a lo largo de dos perfiles en dirección NO-SE y SSO-NNE. Ambos modelos se construyeron utilizando valores de densidad derivados de velocidades sísmicas obtenidas en los tomogramas. Para ello las VP fueron convertidas a densidad desde las expresiones de Gardner (Broucher 2005). Los modelos de densidad 2D se obtuvieron empleando el módulo GMSYS 2D en la plataforma Oasis montaj.

### Prospección Geoeléctrica

Para determinar la variación de resistividad en el subsuelo de Guayatayoc se realizaron ocho Tomografías Eléctricas Resistivas (TER) 2D utilizando el método de Wenner-alfa. La adquisición de datos se llevó a cabo utilizando un equipo automático con electrodos inteligentes WDJ-4Digital DC

*Resistivity/IP Meter, marca Gold (Figura). El equipo permite utilizar hasta un máximo de 120 electrodos simultáneamente añadiendo el equipo multicanal WDJ-120, con equidistancia máxima de 10m, alcanzando una extensión máxima de hasta 1190m. De este modo utilizando la máxima distancia de separación interelectródica (10m) se relevaron las 8 TER, alcanzando de este modo una profundidad de investigación aproximadamente de 200 m.*

*El procesamiento e inversión de los datos se llevó a cabo mediante la utilización del software "RES2DINV". Para la inversión se diseñó un arreglo con ancho de celda de 5m (unit electrode spacing).*



*Figura: Equipo de medición: WJD-4Digital (derecha) y WDJ-120 (izquierda).*

### Prospección Magnetométrica

*El relevamiento magnetométrico se llevó a cabo simultáneamente a las mediciones de gravedad, con magnetómetros Overhauser de última generación (Figura). Previamente a la adquisición ambos magnetómetros (base y móvil) fueron configurados de la misma manera, realizándose mediciones de control para luego ajustar los datos relevados. Uno de los magnetómetros Overhauser se instaló como estación base de registro continuo desde el comienzo y hasta el final de las operaciones. La base magnética se ubicó en el centro de la zona relevada, en la localidad de Aguas Calientes para obtener el registro del campo magnético de origen externo con el fin de realizar la corrección diurna en las mediciones del magnetómetro móvil. Se relevaron 110 km de producción magnetométrica.*

*El cálculo de las anomalías magnéticas de campo total se efectuó por las expresiones clásicas (Blakely, 1995):  $\Delta T = T_0 + C_{am} - T_t$*

Donde:  $T_0$ : Es el campo magnético total observado;  $T_t$ : componente total teórica (campo magnético de origen interno, IGRF);  $Cam$ , corrección por altura y masa (por su baja incidencia en estudios regionales, ha sido despreciada).

La corrección diurna se realizó empleando los registros de intensidad de campo magnético total de la estación magnética base y calibrando la LBN con la estación magnética permanente de Pilar con 2 meses de registro. La recta de ajuste lineal del magnetograma durante las noches permitió calcular la "línea base nocturna", ajustando los registros nocturnos. En la práctica la corrección diurna se hizo mediante el software GEMLinkw de GEM System, los relojes internos de los magnetómetros base y móviles fueron sincronizados diariamente. Una vez establecido el datum magnético (línea base nocturna) se calcularon las correcciones día por día, ingresando el registro de cada magnetómetro móvil y el correspondiente a ese día de la base magnética. La corrección diurna se calculó para el instante de cada medición (cada 1 segundo), en tiempo exacto o por interpolación. De esta manera se determinaron los valores del campo magnético interno de la tierra en cada estación  $T_0$  o campo magnético observado TMI. Finalmente se calcularon las anomalías magnéticas de campo total  $\Delta T$ , descontando al TMI el campo magnético de origen interno o teórico  $T_t$  desde el desarrollo en armónicos esféricos del International Geomagnetic Reference Field (IGRF).



Figura: Base magnética instalada en Aguas Calientes. Magnetómetros GEM System Overhauser, modelo 19 V7.

## Resultados

*En la carta de anomalías de Bouguer y su residual obtenida por filtrado de la corteza inferior, se observaron mínimos y máximos gravimétricos. Los mínimos valores de gravedad se interpretaron como sitios donde el basamento se encuentra a mayor profundidad cubierto por sedimentos de baja densidad. Por otro lado, los altos gravimétricos fueron interpretados como cuerpos rocosos con altos valores de densidad o un basamento más superficial. Los modelos gravimétricos obtenidos a lo largo de diferentes secciones muestran profundidades al basamento (metasedimentitas de edad Paleozoicas-Cretácicas), alcanzando los 1600 metros. Se modeló una unidad sedimentaria con densidades compatibles con arenas y gravas saturadas que con base en los resultados de AMT, podría tratarse de agua salobre y una subyacente de mayor densidad (arenas y gravas compactadas). Por otro lado, existen afloramientos de cuerpos intrusivos, los mismos fueron extrapolados en profundidad apoyados con los datos magnéticos y modelados con una mayor densidad que el basamento metasedimentario. Es posible dividir la cuenca en dos depocentros oriental y occidental, siendo más profundo el oriental. Para cada AMT se realizó la sección 1-D, donde se visualiza espesores de capas y resistividades. Se construyó un perfil para integrar todos los sondeos AMT. Además, se integraron las TER realizadas a lo largo del perfil, utilizando la misma escala de colores. En varias de las estaciones de AMT se observaron valores de resistividad muy bajos, estos horizontes se encuentran a profundidades que oscilan entre los 90 y 600 metros. Los valores de resistividades obtenidos con AMT y TER permitieron diferenciar acuíferos de agua dulce con los de agua salada. Mediante estas metodologías se conocieron los límites entre ambos acuíferos.*

*Finalmente, los modelos gravimétricos fueron ajustados con información sísmica, magnetométrica y audio-magnetotelúrica. Toda esta información permitió conocer el subsuelo de la cuenca de Guayatayoc, su estructura y geometría, como también la distribución de los acuíferos en el área y su aptitud al consumo humano. Estos modelos geofísicos permitirán diseñar la exploración de un potencial yacimiento geotérmico en la cuenca de Guayatayoc.*

## Anexos

<http://igsv.unsj.edu.ar/wp-content/uploads/2023/04/Perfil-S-N-escala2.pdf>

<http://igsv.unsj.edu.ar/wp-content/uploads/2023/04/Perfil-O-E-escala2.pdf>