

Geofísica aplicada a la caracterización morfoestructural de un sistema hidrotermal: La Laja, San Juan (Argentina)

*Antonella Sottile^{1,2,3}, Aixa I. Rodríguez^{1,3,4}, Diego Winocur⁵,
M. Agostina Grigolo^{1,3}, M. Patricia Martínez^{1,3}

¹ Instituto Geofísico-Sismológico Ing. Volponi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Ruta Provincial 12, km 17, Marquesado, San Juan, Argentina.

antonella.sottile.1989@gmail.com, airodriguezgeo@gmail.com, grigoloagostina@gmail.com, patriciasignos@gmail.com

² Departamento de Geofísica, Astronomía y Física, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, av. Ignacio de la Roza 590 (O), Rivadavia, San Juan, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290, CABA, Argentina.

⁴ Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHA-CONICET), Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan, av. Ignacio de la Roza 590 (O), Rivadavia, San Juan, Argentina.

⁵ Departamento de Ciencias Geológicas, Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber, IDEAN (UBA-CONICET), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria - Pabellón II, CABA, Argentina.
diegowinocur@hotmail.com

* Autor de correspondencia: antonella.sottile.1989@gmail.com

RESUMEN. El Sistema Hidrotermal La Laja se localiza en una región sísmica y tectónicamente activa al sur de los Andes Centrales, en la provincia de San Juan, Argentina. En este estudio se presenta una caracterización geomorfológica y geofísica de este sistema, con el objetivo de construir modelos geológico-estructurales que expliquen su origen, configuración y principales manifestaciones. El análisis geomorfológico permitió identificar conos y terrazas de travertino, barreales, surgencias y canales, los cuales fueron estudiados mediante gravimetría, magnetometría, tomografía eléctrica y audiometrotelúrica. La combinación de estas técnicas, que aportan información a distintas profundidades y resoluciones, junto con datos geológicos de superficie permitió refinar la interpretación y generar modelos robustos en los sitios de interés. Los resultados obtenidos indican que las manifestaciones geotermales se disponen sobre una franja estructural de orientación ~NE-SO, subparalela al frente montañoso, y que su origen sería tectónico. Se identificaron dos sistemas que controlan el flujo del agua termal: al norte la falla El Museo, donde la estructura actúa como vía de circulación de los fluidos hidrotermales, y otro al sur, que involucra una deformación tectónica más compleja con la formación de fallas, pliegues y zonas de debilidad.

Palabras clave: Baja entalpía, Geomorfología, Métodos geofísicos, Travertinos, Geopatrimonio.

ABSTRACT. Applied geophysics to morphostructurally characterize a hydrothermal system: La Laja, San Juan (Argentina). The La Laja Hydrothermal System is located in a tectonically and seismically active area in the southern Central Andes, in the San Juan Province of Argentina. Here we present a geomorphological and geophysical characterization of this system, aimed at constructing geological-structural models to explain its origin, configuration, and main manifestations. The geomorphological analysis allowed the identification of travertine cones and terraces, mudflats, springs, and channels, geoforms that were studied using gravimetry, magnetometry, electrical tomography and audio-magnetotelluric methods. The combination of these techniques, which provide information at different depths and resolutions, together with surface geological data, made it possible to refine the interpretation and generate robust models at the sites of interest. Results suggest that the geothermal manifestations are distributed along a ~NE-SW structural zone, subparallel to the mountain front, and that their origin is tectonic. Two systems controlling the flow of thermal waters were identified: to the north, the El Museo Fault, where the structure acts as a conduit for hydrothermal fluid circulation; and another to the south, which involves a more complex tectonic deformation, including the development of faults, folds, and zones of weakness.

Keywords: Low enthalpy, Geomorphology, Geophysical methods, Travertines, Geoheritage.

1. Introducción

A nivel mundial, 30 países utilizan energía geotérmica para la producción de electricidad, mientras que 88 la emplean para usos directos (IGA, 2024). El reciente desarrollo de tecnologías ha promovido proyectos piloto tangibles para la generación de calor y energía a partir de recursos de baja entalpía. Esto ha permitido ampliar el potencial geotérmico global y hacer frente a la creciente demanda político-social de energía renovable, contribuyendo así a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (e.g., Moeck, 2014; Moeck *et al.*, 2019; Mantei *et al.*, 2024; Gkousis *et al.*, 2025).

En América Latina y el Caribe (región que abarca el segmento del continente americano que se extiende desde México hasta Chile, así como las islas del Caribe) la capacidad geotérmica asciende a aproximadamente 1,7 GW, lo que supone un aporte de alrededor de un 11% de la capacidad instalada en el planeta. Sin embargo, la tasa de crecimiento de la región ha sido inferior al promedio mundial, oscilando entre 1,5 y 2% por año (IRENA e IGA, 2023). La mayoría de los proyectos geotérmicos hacen uso de recursos hidrotermales de alta temperatura alojados en ambientes volcánicos (Castillo *et al.*, 2024). En el caso de América del Sur, se ha visto un progreso limitado en la generación de electricidad geotérmica; Chile, por ejemplo, produce 48 MW y existen proyectos piloto de pequeña escala en Argentina y Colombia (Castillo *et al.*, 2024).

En Argentina, los principales usos de la geotermia se relacionan con el aprovechamiento de las fuentes termales con fines terapéuticos (Pesce y Miranda, 2003; Yáñez *et al.*, 2015). En el centro-oeste del país, en la provincia de San Juan, se encuentra ubicado el Sistema Hidrotermal La Laja (SHLL), caso de estudio en esta investigación. Este sistema se localiza dentro del departamento de Albardón, a unos 23 km al norte de la ciudad capital de San Juan, a una altitud media de 680 m s.n.m., en el piedemonte suroriental de la sierra de Villicum (Fig. 1). El mismo ha sido foco de estudios sismológicos y neotectónicos (e.g., Perucca y Paredes, 2003; Alcacer *et al.*, 2020), y ha sido calificado como un sistema hidrotermal de baja entalpía, con manantiales de aguas termales de aproximadamente 28 °C de temperatura (Orozco *et al.*, 2021). De acuerdo con la clasificación de Moeck (2014), el SHLL sería un *play* geotérmico no magnético, controlado por fallas.

El SHLL como centro de turismo y salud tuvo su auge en la década de 1940. Contaba con instalaciones y diversos baños termales: termas La Laja, surgencia Gruta de Lourdes y termas del Salado (Fig. 1) y un importante hotel que, en el año 1944, fue afectado por un terremoto Ms 7,4 con epicentro en la Falla La Laja (Harrington, 1944). Aunque las instalaciones continuaron en funcionamiento hasta 1970 (Fig. 2A, B), un fuerte descenso en la afluencia de público fue deteriorando la infraestructura y las piletas termales. Recientemente, en el año 2022, comenzó la construcción de un nuevo hotel en el mismo sector a fin de reactivar los baños y generar nuevos usos para la población (Fig. 2C).

En la zona, otra actividad económica relevante que también utiliza recursos asociados a la dinámica del sistema termal es la minería. En efecto, desde el año 1945 se realiza la explotación de depósitos carbonáticos, rocas de aplicación y travertinos. Esta actividad se ubica a unos 8 km al norte del SHLL (Cardó *et al.*, 2012) y tiene impactos ambientales, particularmente en la preservación de formaciones de travertino. Acciones para mitigar estos impactos sobre las aguas geotermales y sus manifestaciones han tenido un fuerte crecimiento en distintos países en los últimos años (Simsek *et al.*, 2000); para ello, han sido fundamentales los estudios geológicos para comprender el contexto estructural e hidrogeológico de los sistemas y así seleccionar los sitios de conservación más apropiados.

En este trabajo, se plantea como hipótesis que el SHLL está controlado geológicamente por estructuras subsuperficiales, las cuales han favorecido el ascenso de los fluidos hidrotermales responsables de las diferentes manifestaciones observadas en superficie. Se postula que la integración de datos geofísicos del subsuelo con el estudio de las geoformas superficiales, afloramientos litológicos y datos estructurales permitirá construir modelos geológico-estructurales válidos para el SHLL. Se espera que las recomendaciones provistas en este estudio puedan servir como herramientas de desarrollo para la comunidad local, para así fomentar acciones orientadas a la preservación de algunos relieves únicos, por ejemplo, los conos de travertino.

2. Marco geológico

La región de estudio se localiza en los Andes Centrales (Fig. 1A), en el segmento de subducción

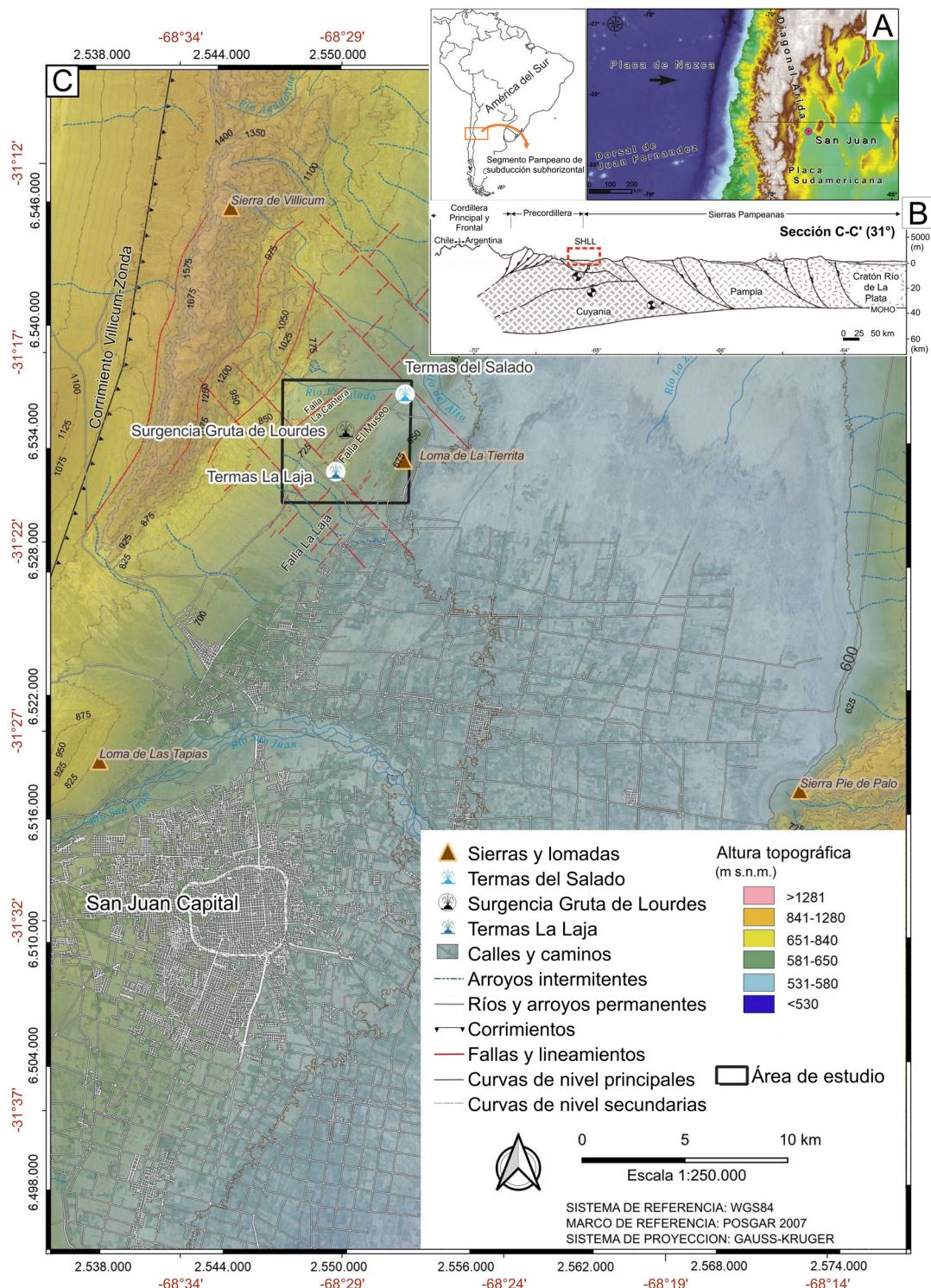


FIG. 1. Localización del Sistema Hidrotermal La Laja (SHLL). A. Contexto tectónico regional dentro del *flat-slab* Pampeano de los Andes Centrales. B. Perfil estructural regional para los 31 °S (modificado de Ramos et al., 2002), donde se ilustran las principales unidades tectónicas y estructuras de relevancia para el área de interés. C. Localización del SHLL en la provincia de San Juan, Argentina.

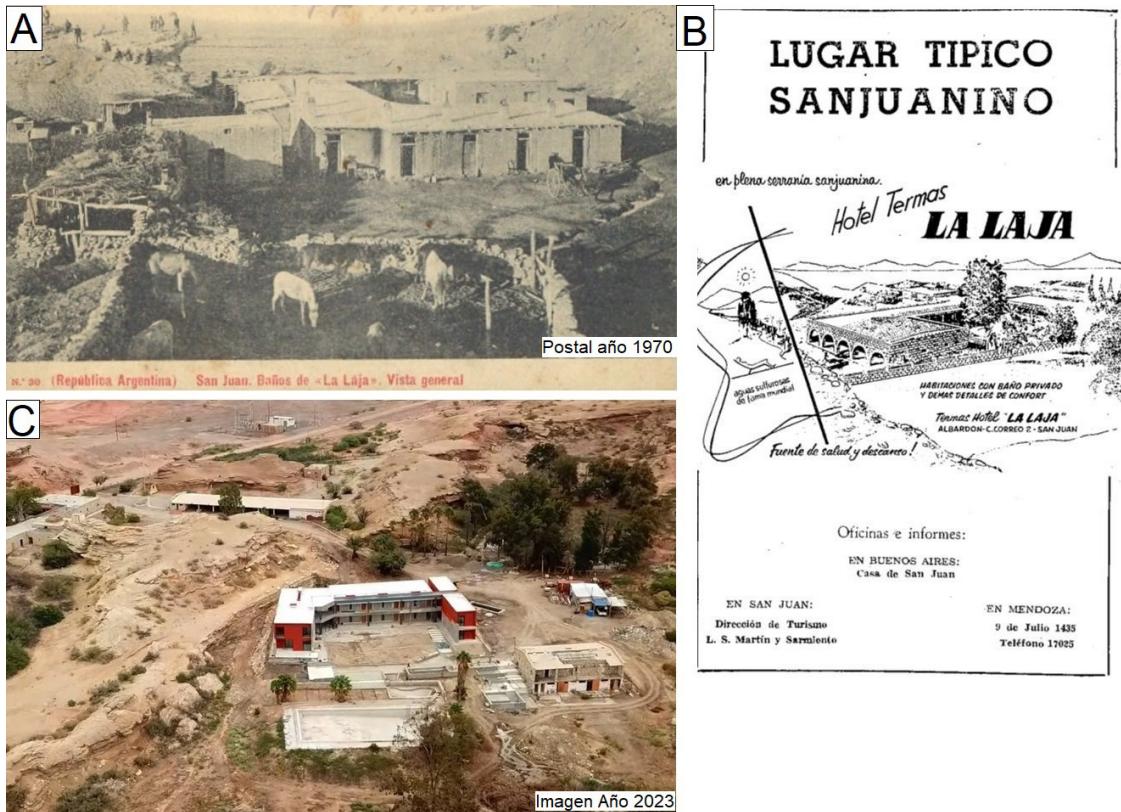


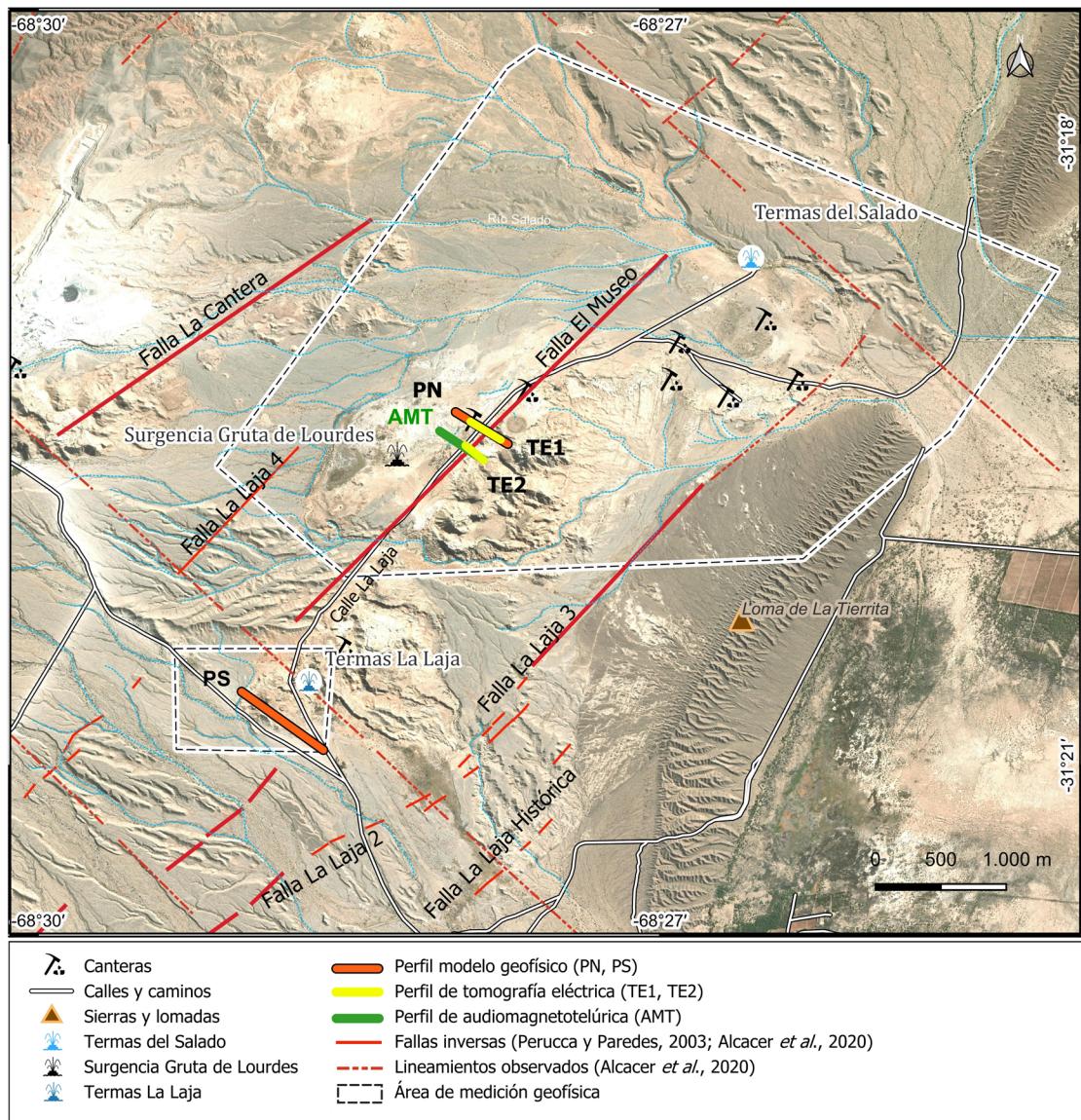
FIG. 2. A. Fotografía histórica del antiguo hotel Termas La Laja. B. Publicidad sobre los baños termales (San Juan Antiguo, 1977). C. Imagen aérea del nuevo hotel.

subhorizontal Pampeano (Ramos *et al.*, 2002), caracterizado por una alta sismicidad, actividad neotectónica y ausencia de volcanismo cuaternario (Costa *et al.*, 2015). El SHLL, en particular, se ubica en la precordillera Oriental (Fig. 1B), la cual presenta un amplio desarrollo de fallas y pliegues, algunos de los cuales tienen características de deformación reciente, con rumbo submeridiano (Perucca y Paredes, 2003; Perucca y Vargas, 2014). Entre los principales sistemas de fallas se reconocen La Laja, El Museo y La Cantera (Perucca y Paredes, 2003; Alcacer *et al.*, 2020). Se destaca el Sistema de Fallas La Laja, asociado al sismo de 1944 (Harrington, 1944), dentro del cual se distinguen la Falla La Laja (histórica) y las estructuras denominadas La Laja 2, La Laja 3 y La Laja 4 (Fig. 3).

La geología de precordillera está integrada por una secuencia paleozoica completa y una secuencia neógena. La unidad más antigua es el Grupo Marquesado, conformado por las formaciones

La Flecha, La Laja, La Silla y Zonda (Bordonaro, 1980; Ramos y Vujovich, 2000). Las rocas de esta unidad son predominantemente carbonáticas, correspondientes a un ambiente de plataforma, y constituyen una secuencia continua de 2.400 m de potencia. La deposición del Grupo Marquesado se extendió desde el Cámbrico temprano hasta el Cámbrico tardío. Posteriormente, durante el Ordovícico se depositaron las rocas de la Formación San Juan (Amos, 1954), compuesta por calizas macizas, calizas lajosas y margas, las que combinadas forman una secuencia de hasta 400 m de potencia. Su relación de contacto con la Formación La Flecha del Grupo Marquesado es concordante.

La columna estratigráfica local se inicia con calizas y margas calcáreas cámbricas correspondientes a la Formación La Laja, las que conforman el extremo austral de la sierra de Villicum (Bordonaro, 1980). Delimitando a este alto topográfico, se extiende una amplia zona



deprimida en la cual se presenta una sucesión neógena compuesta por las formaciones Loma de Las Tapias y Mogna. La superficie de esta sucesión está caracterizada por suaves lomadas, donde la acción erosiva ha elaborado un paisaje típico de huayquerías o *badlands* (Contreras *et al.*, 2019).

Las relaciones estratigráficas de esta sucesión corresponden, hacia su base, a una paraconcordancia con la Formación La Laja (Bordonaro, 1980) y, hacia su techo, a una discordancia angular y locamente por fallamiento, con la cubierta cuaternaria (Serafini *et al.*, 1986; Contreras *et al.*, 2019).

La Formación Loma de Las Tapias está integrada por dos miembros: Limolita La Colmena y Arenisca Albardón. El primer miembro está compuesto por un conglomerado brechoso basal seguido por una sucesión de limolitas pardas-rojizas, las que alternan con areniscas finas y medianas, con un espesor aproximado de 260 m. Por otra parte, el segundo miembro comprende areniscas conglomerádicas, en parte tobáceas, con alternancias de areniscas finas a gruesas intercaladas con limolitas, con un espesor de ~1.350 m. Edades magnetoestratigráficas realizadas por Bercowski *et al.* (1986), calibradas mediante edades en trazas de fisión en los niveles tobáceos, indican para esta formación una edad entre 8,5 y 4 Ma. El ambiente de sedimentación sugiere una elevación periódica del área de aporte, lo que habría provocado una progradación en la parte distal de un abanico aluvial sobre una planicie fluvial anastomosada durante el desarrollo de una cuenca de antepaís (Bercowski *et al.*, 1987).

La Formación Mogna presenta, hacia su base, un pasaje transicional con la subyacente Formación Loma de Las Tapias, mientras que hacia su techo se observa un cambio de facies conglomerádicas fluviales a conglomerádicas aluviales en relación discordante tanto erosiva como angular. Presenta un espesor total de ~120 m y está compuesta por conglomerados de color gris claro a gris oscuro y limo-arcilitas pardas-rojizas. Los clastos de los conglomerados son de origen ígneo y sedimentario, aunque sección arriba se observan más frecuentemente clastos de rocas carbonáticas. Se interpreta para esta formación un ambiente sedimentario formado por grandes abanicos aluviales coalescentes, originados al pie de la precordillera Central (Milana, 1990). Su edad abarca desde el Plioceno Tardío al Pleistoceno Temprano (Milana, 1990; Ramos y Vujovich, 2000).

Finalmente, afloran en la zona depósitos de travertino que se extienden a lo largo del piedemonte oriental de la sierra de Villicum. Estos depósitos son parte de la Formación Torrecitas, de edad pleistocena (Angelelli, 1941; Contreras *et al.*, 1999; Perucca y Paredes, 2003), y se apoyan en discordancia sobre las areniscas de la Formación Loma de Las Tapias (Serafini *et al.*, 1986). Las capas de travertino yacen en forma subhorizontal o con una pequeña (<10°) inclinación al este, tienen entre 20 y 58 m de espesor y su origen está vinculado a fuentes termales (Cardó *et al.*, 2012). Astini *et al.* (2016) señalaron que estos niveles se emplazaron en un ambiente

tectónico diferente al de los travertinos de cuencas extensionales clásicas. Esta situación hace que las geoformas resultantes sean singulares a nivel regional y resalten por su valor para la conservación.

Con respecto a la composición química del agua, el sistema es de tipo Cl-Na (Sussini *et al.*, 1948), presentando aguas ricas en sulfatos, cloruros, calcio y sodio (Albero *et al.*, 1987). Según Orozco *et al.* (2021), los constituyentes más importantes en este sistema son Cl⁻ (concentraciones entre 2.169 y 2.948 mg/l), Na⁺ (concentraciones entre 1.842 y 2.427 mg/l) y SO₄²⁻ (concentraciones entre 120 y 1.501 mg/l). Estos últimos autores indicaron que se trata de un sistema geotérmico carbonatado-evaporítico, con sus aguas sobresaturadas en calcita y dolomita debido a la desgasificación de CO₂.

Finalmente, en la provincia de San Juan existen otros sistemas geotermales de baja entalpía, entre los que se pueden mencionar a Pismanta y Talacasto, ambos en la precordillera (Christiansen *et al.*, 2021; Clavel *et al.*, 2023a, b). En la Cordillera Frontal cabe destacar al valle del Cura, aunque a diferencia de los anteriores se trata de un sistema de alta entalpía (Barcelona, 2015).

3. Metodología

El área del SHLL se estudió mediante levantamiento geológico y geomorfológico de campo y a través de sensores remotos. Posteriormente, se realizaron mediciones geofísicas sobre zonas representativas de cada manifestación geotermal empleando magnetometría, gravimetría, tomografía eléctrica y audiometrotelúrica (AMT) (Fig. 3). Todos los equipos utilizados en este estudio pertenecen al Instituto Geofísico Sismológico Volponi (IGSV) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).

3.1. Caracterización geomorfológica y geológica

La caracterización geomorfológica se realizó mediante modelos digitales de terreno (MDT) provistos por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina. Se utilizaron MDTs de alta resolución espacial (5 m) y precisión vertical submétrica, obtenidos de vuelos aerofotogramétricos del IGN (IGN, 2023). Asimismo, se emplearon MDT de 30 m de resolución espacial (MDE-Ar v2.1) para complementar la cobertura regional, desarrollados por el IGN a partir de la integración de datos de las

misiones satelitales SRTM y ALOS. Se trabajó con cuatro grillas, las que luego fueron integradas en un mosaico que abarcó toda el área de interés.

Se recopilaron también imágenes satelitales Sentinel-2A y Sentinel-2B (Copernicus, 2023). La imagen más representativa de la época seca corresponde a aquella del satélite Sentinel-2B con fecha 19/07/2022, mientras que la más representativa de la época húmeda al satélite Sentinel-2A con fecha 05/01/2023, ambas con cobertura de nubes menor del 10%. Las imágenes fueron procesadas mediante el software SNAP (*Sentinel Application Platform*) de la Agencia Espacial Europea. La imagen Sentinel-2A fue utilizada adicionalmente para la identificación de lineamientos geológicos y para la clasificación supervisada de cuerpos de travertino. Se realizaron combinaciones de bandas para diferenciar agua y suelo. Mediante la combinación de bandas de infrarrojo de onda corta (12/8A/4), fue posible diferenciar zonas de humedad que complementaron los inventarios de vertientes obtenidos de la literatura y de información de campo. Respecto a esto último, el trabajo de campo incluyó también la identificación de unidades litológicas y de estructuras como pliegues y fallas, mientras que el levantamiento geomorfológico se centró en el mapeo de distintas unidades asociadas al sistema geotermal, como conos de travertino, terrazas, vertientes y canales de drenaje.

La identificación de lineamientos geológicos y de cuerpos de travertino se realizó en QGIS aplicando combinaciones de bandas y ajustes de histograma (mín-máx). Para resaltar los lineamientos, se aplicaron filtros a bandas de 10 m de resolución, entre ellas las bandas B4 y B8. De estas dos, la banda B8 fue seleccionada debido a que mostró de manera más clara los lineamientos en la zona de travertinos, además de que abarca un rango de longitud de onda más amplio comparado con el de la banda B4. Los filtros utilizados fueron de tipo convolucional, orientados a mejorar la nitidez y la detección de bordes. Estos consistieron en un filtro de nitidez de 3×3 , en el operador de cruz de Roberts para la detección de lineamientos y bordes (noroeste y noreste), y en el filtro de detección de tipo *right diagonal edge*. Por otra parte, los travertinos se mapearon mediante procedimientos de clasificación digital. Esto implicó asociar clases de información a clases espetrales, las cuales son inherentes a los datos satelitales y corresponden a conjuntos de píxeles que presentan un comportamiento espectral característico para el conjunto de bandas analizadas

(patrón espectral semejante). Para ello, se crearon polígonos con regiones de interés (ROI) sobre los conos de travertinos identificados con antelación y se realizó una clasificación supervisada sobre la imagen obtenida mediante la combinación de bandas 8/4/3. Se registró el valor medio de la firma espectral de los travertinos, el cual entregó los valores de reflectancia más altos (0,45-0,55) en las longitudes de onda 700-900 nm. Dado que la banda B8 comprende esas longitudes de onda, se utilizó para una clasificación no supervisada con 10 clases, que arrojó resultados similares a la clasificación supervisada empleando ROIs.

3.2. Prospección geofísica

Las unidades geomorfológicas identificadas en el sistema geotermal se estudiaron mediante magnetometría, gravimetría, tomografía eléctrica y AMT, lo cual permitió su exploración subsuperficial. Las prospecciones se realizaron sobre áreas representativas a lo largo de perfiles y grillas (Fig. 3). La selección de estas áreas se basó en criterios de accesibilidad para la adquisición de datos, dado que la zona de estudio se ubica en una zona de explotación minera de propiedad privada. Se priorizaron sectores con manifestaciones superficiales del sistema hidrotermal, como travertinos, surgencias, barreales y fallas, así como aquellos con potencial para presentar contrastes significativos en las propiedades físicas del subsuelo. Asimismo, se procuró cubrir sectores tanto hacia el norte como hacia el sur del SHLL, con el fin de obtener una caracterización más integral del sistema.

Los métodos geofísicos seleccionados en este trabajo han sido aplicados con resultados satisfactorios en numerosos estudios enfocados en la caracterización de sistemas geotermales y estructuras subsuperficiales (Barcelona, 2015; Yáñez *et al.*, 2015; Alcacer *et al.*, 2020; Christiansen *et al.*, 2021; Clavel *et al.*, 2023a, b; Zhu *et al.*, 2023). Las técnicas empleadas se describen a continuación.

3.2.1. Magnetometría

El método magnético permite localizar estructuras geológicas como fallas, zonas de cizallamiento y fracturas a partir del análisis de contrastes en la susceptibilidad magnética de los materiales (Hinze *et al.*, 2013). Para la adquisición de datos, se utilizó un magnetómetro GEM Systems modelo GSM-19 V7 Overhauser (sensibilidad: 0,022 nT; resolución:

0,01 nT; rango de medición: 20.000-120.000 nT). Las anomalías magnéticas (ΔT) se calcularon mediante la ecuación:

$$\Delta T = T_0 - T_t \quad (1)$$

Donde T_0 es la componente total medida en el campo, $T_t = T + dT$, T es la componente total medida corregida por variación diurna, dT es la variación diurna, y T_t es la componente total teórica del Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF por sus siglas en inglés). Tanto el magnetómetro utilizado en la estación base como el móvil fueron de idénticas características. La estación base se programó para realizar mediciones cada treinta segundos, mientras que el magnetómetro móvil se configuró en forma continua (*walking mode*) para medir cada dos segundos.

El procesamiento de los datos se realizó mediante el *software* Oasis Montaj v8.4. Se eliminaron los picos espurios presentes en los datos y se aplicaron las correcciones correspondientes (ver ecuación 1). Para el cálculo del IGRF, se utilizaron los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos hasta grado y orden 10, publicado el año 2020. A través del módulo IGRF GX del *software*, se calculó el valor del IGRF para la fecha y la ubicación de las mediciones. Las anomalías magnéticas se regularizaron en grillas de 10×10 m a partir del Método de Curvatura Mínima (Briggs, 1974) y se les aplicó un filtro de reducción al polo.

3.2.2. Gravimetría

La gravimetría es un método geofísico empleado para detectar las diferencias laterales de densidad del subsuelo, midiendo los cambios en el campo gravitacional terrestre. Esta técnica es especialmente útil para identificar estructuras profundas como fallas, cuerpos intrusivos, contactos litológicos y zonas de fracturamiento, entre otras (Hinze *et al.*, 2013). La adquisición de datos se realizó con un gravímetro Scintrex Autograv CG-5 (resolución: 1 μ Gal; desviación estándar: $<5 \mu$ Gal). Las mediciones se realizaron cada 100, 50 y 20 m, todas vinculadas a un punto conocido de gravedad absoluta situado en el IGSV.

Las anomalías de gravedad (Δg) son definidas como la diferencia entre los valores de gravedad observada (g_{obs}) y teórica (g_t), esta última calculada según la latitud de la estación y sobre un elipsode

teórico o normal. No obstante, dado que la superficie de medición por lo general no coincide con la superficie del elipsode, deben realizarse las siguientes correcciones:

$$\Delta g = g_{\text{obs}} - g_t - \delta g_A - g_H - C_{AL} - C_B + C_T \quad (2)$$

Donde δg_A es la corrección atmosférica, g_H es la corrección de Honkasalo por mareas, C_{AL} es la corrección de aire libre de segundo orden, C_B es la corrección de Bouguer y C_T es la corrección topográfica. Los estándares para el cálculo de las correcciones y obtención de anomalías de gravedad fueron según Hinze *et al.* (2005). La gravedad teórica se calculó mediante el elipsode de referencia global de 1980 (GRS80). Para la corrección de Bouguer se consideró una densidad media de 2.670 kg/m^3 (Hinze, 2003), mientras que para la corrección topográfica se utilizaron dos modelos de elevación digital, uno local (IGN, 12,5 m de resolución) y uno regional (SRTM, 90 m de resolución). La corrección topográfica se calculó a través del módulo *Terrain Corrections* del programa Oasis Montaj, el cual combina los algoritmos de Kane (1962) y Nagy (1966). Posteriormente, las anomalías de Bouguer completas fueron regularizadas cada 10 m a través del método de mínima curvatura (Briggs, 1974).

3.2.3. Tomografía eléctrica

Los métodos eléctricos permiten estudiar el comportamiento de rocas y sedimentos en presencia de una corriente eléctrica. El principio en el que se basa este tipo de prospección consiste en interpretar los distintos materiales y estructuras del subsuelo a partir de las variaciones de resistividad al paso de una corriente eléctrica (Orellana, 1982; Milsom y Eriksen, 2011). El método empleado en este caso fue la tomografía eléctrica, la cual modela la resistividad del terreno en 2 o 3 dimensiones usando métodos numéricos, como elementos o diferencias finitas.

Para la adquisición de datos se utilizó un resistivímetro WDJD-4 junto a un commutador multi-electrónico WDZJ-4 marca Gold, sincronizados entre sí. El equipo se configuró para medir con la configuración Wenner-Schlumberger, que es moderadamente sensible a estructuras tanto horizontales como verticales y tiene una buena relación señal/ruido (Loke, 2004).

Las tomografías eléctricas se realizaron a lo largo de perfiles perpendiculares a las estructuras principales, en dirección NO-SE (Fig. 3). En la primera

se usaron 30 electrodos, con una longitud de tendido de 290 m, y en la segunda 20 electrodos, con una longitud de 190 m. El espaciamiento entre electrodos en ambas tomografías fue de 10 m.

Para el procesamiento de datos se utilizó el *software* Res2DInv aplicando el modelo de refinamiento. Durante la inversión se realizaron hasta 5 iteraciones, se incorporó la topografía y se realizó un ajuste entre el modelo medido y calculado, con un error cuadrático medio de menos del 5%.

3.2.4. Audiomagnetotelúrica

El método audiomagnetotelúrico (AMT) es una técnica geofísica que permite caracterizar las propiedades eléctricas del subsuelo, especialmente la conductividad eléctrica, utilizando las fluctuaciones del campo electromagnético que se producen en la ionósfera debido mayoritariamente a la actividad solar. Es utilizado especialmente en la exploración de recursos geotermales y de acuíferos (Pous y Marcuello, 2003).

Para la adquisición de datos se utilizó un equipo de fuente mixta Geometrics StrataGem EH4. Este instrumento permite utilizar tanto una fuente natural como una fuente artificial de alta frecuencia. Posee cuatro canales y registra señales entre 10 Hz y 10 kHz. Las mediciones se realizaron a lo largo de un perfil NO-SE compuesto por 5 puntos distanciados 100 m cada uno, a intervalos de medición de veinticinco minutos por punto (Fig. 3). La fuente se instaló a 450 m del perfil y el equipo registró tres bandas de frecuencias. Las altas frecuencias fueron emitidas por fuente artificial, mientras que las medias y bajas por la fuente natural. El equipo se programó con un *stacking* de 20 mediciones; además, se aplicó un filtro de 50 Hz a fin de disminuir el ruido generado por una línea de tendido eléctrico cercana. El procesamiento de datos se realizó con el *software* WinGLink v2.20 (Geosystem SRL, 2008), se obtuvo como producto final un modelo de resistividades del subsuelo.

3.3. Modelado geofísico

Se construyó un modelo geofísico a partir de la anomalía de Bouguer residual empleando el módulo GM-SYS del *software* Oasis Montaj. Este modelo se realizó sobre el perfil norte (PN, ver ubicación en figura 3), dado que contaba con una mayor cantidad de estaciones medidas.

Para el modelado, se emplearon algoritmos de inversión iterativa basados en la teoría de mínimos cuadrados, los cuales ajustan los modelos de densidad

para minimizar la diferencia entre las anomalías residuales observadas y calculadas. Para ambos perfiles (PN y PS) se consideraron datos tanto de gravedad como de magnetismo y se utilizó el *software* libre Euldep (Durrheim y Cooper, 1997).

Las ubicaciones y profundidades de las fuentes de campos potenciales se calcularon mediante la deconvolución de Euler (Thompson, 1982; Reid *et al.*, 1990), la cual en dos dimensiones se expresa como:

$$\Delta x \frac{\partial f}{\partial x} + \Delta z \frac{\partial f}{\partial z} = -Nf \quad (3)$$

Donde, f corresponde a la intensidad del campo, $\partial f / \partial x$ y $\partial f / \partial z$ a sus gradientes horizontales y verticales, respectivamente, y N al índice estructural, el que depende del tipo de fuente. Las variables desconocidas son Δx y Δz , las cuales representan la distancia desde el punto de observación hasta la fuente en los planos horizontal y vertical. Esta ecuación se resuelve típicamente utilizando una ventana de datos centrada en cada punto de medición y resolviendo un sistema sobredimensionado de ecuaciones lineales (Cooper, 2020). Se obtiene así una aproximación cercana a la geometría real de diferentes cuerpos, como contactos, filones capa, diques y fallas, entre otros (Perucca y Ruiz, 2014).

4. Resultados

En la zona de estudio se reconocieron manantiales, surgencias o vertientes de agua caliente y fría, arroyos nacientes desde vertientes, barreales, depósitos de sales, conos y terrazas de travertinos. Además, se observaron estructuras como fallas, pliegues y contactos litológicos aflorantes. Estas manifestaciones y estructuras se describen a continuación, en conjunto con el método geofísico aplicado para cada caso.

4.1. Barreales, manantiales y arroyos surgentes desde vertientes en el piedemonte

Se reconocieron 19 surgencias, entre las que se incluyen las termas del Salado, la surgencia Gruta de Lourdes y las termas La Laja. Estas presentan distintas cotas altimétricas, que pueden agruparse en dos rangos: uno comprendido entre 665 y 700 m s.n.m. y otro entre 630 y 650 m s.n.m. (Fig. 4A). Los arroyos nacientes de surgencias (Fig. 4B, F) no provienen desde las cuencas altas de la sierra, sino que nacen desde las vertientes de las termas del Salado y La Laja.

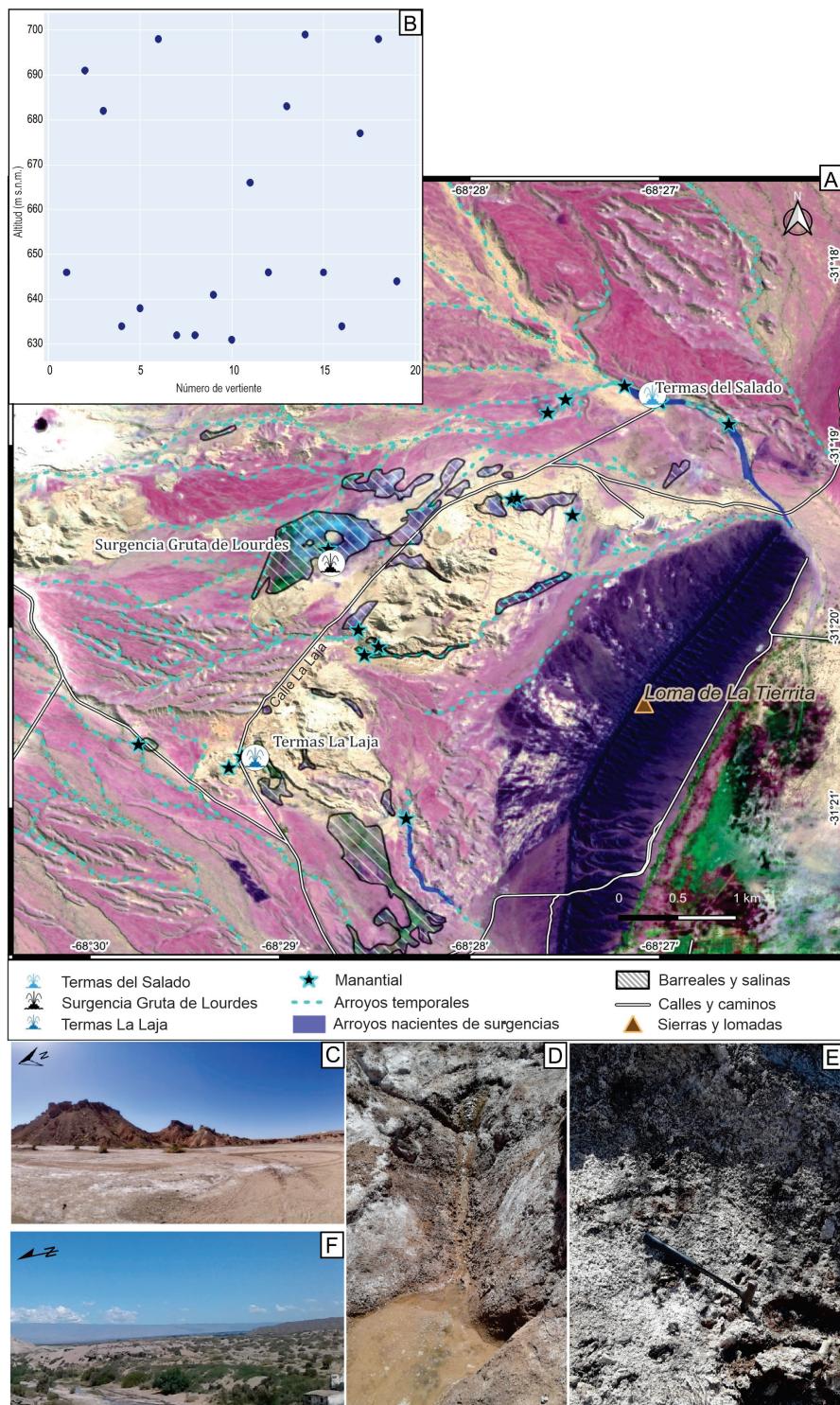


FIG. 4. Mapa de manifestaciones geotermales. **A.** Gráfico con la distribución de las altitudes de las surgencias. **B.** Imagen satelital de la zona de estudio, donde se reconocen barreales, arroyos y manantiales. **C.** Ejemplo de barreal. **D.** Ejemplo de vertiente. **E.** Ejemplo de incrustaciones salinas en un barreal. **F.** Ejemplo de un arroyo naciente desde una vertiente termal.

El resto de los arroyos son temporales, desarrollados en el piedemonte y no están asociados a sistemas de aguas calientes (Fig. 4B).

Se identificaron 6 barreales o encharcamientos. Estos se diferencian por presentar un mayor contenido de humedad o bien por incluir depósitos de sales o incrustaciones salinas. Los depósitos de sales son una de las principales características asociadas a la descarga de manantiales, formados por la sobresaturación de las soluciones acuosas (Fig. 4C, E).

Las vertientes mapeadas provienen de inventarios de trabajos anteriores, que las clasifican según la temperatura del agua y del registro de campo (Fig. 4D).

Sobre los barreales se realizaron mediciones de tomografía eléctrica y AMT. En el perfil de AMT resultante (Fig. 5) se distingue una capa superficial de baja resistividad ($<12 \Omega\text{m}$), la cual se extiende desde la superficie hasta los 50 m de profundidad. Hacia el oeste de este perfil se identificó también una

falla, la cual tendría una inclinación hacia el este. Denominada en este trabajo como Falla La Gruta.

4.2. Conos de travertino

Otras morfologías en la zona de estudio son los conos de travertino, de los cuales se reconocieron 59. Estos son depósitos terrestres de extensión lateral restringida y fácilmente erosionables, lo que les otorga un bajo potencial de conservación (Pentecost, 1995). Las altitudes más frecuentes de estas geoformas oscilan entre 650 y 780 m s.n.m. y sobre los 800 m s.n.m. (Fig. 6). La mayoría presenta depresiones subcirculares en sus cumbres, las que por lo general están mal preservadas (Fig. 7). En planta, el área basal de la mayoría de los conos de travertino es menor de 25 km^2 . En la zona sur del área de estudio, estos conos se apoyan en discordancia sobre las unidades neógenas y las rocas de la Formación Torrecitas.

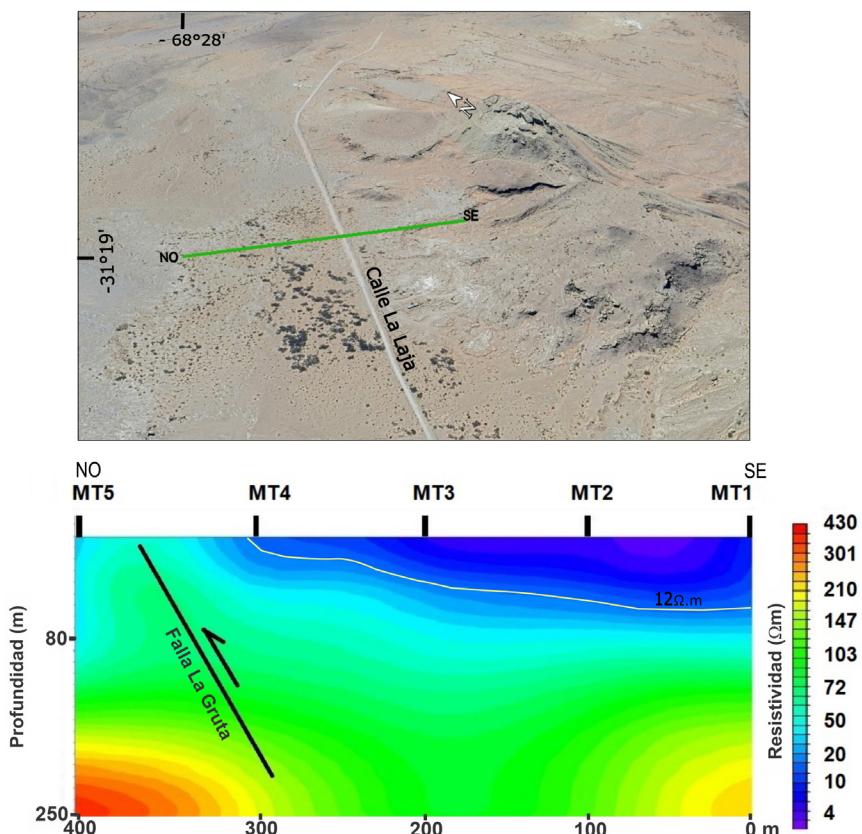
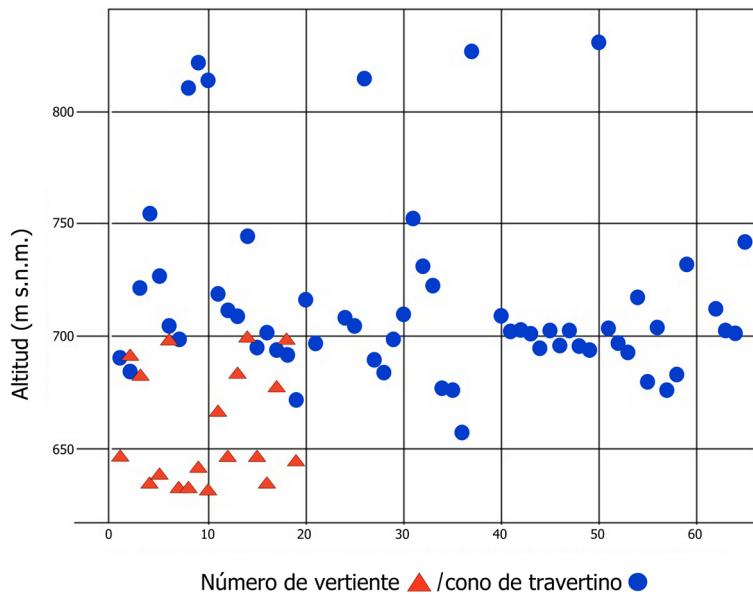


FIG. 5. Perfil de AMT en los barreales cercanos a la surgencia Gruta de Lourdes (ver ubicación regional en figura 3), montado sobre una imagen Google Earth en perspectiva oblicua y exagerada verticalmente. MT1-5 corresponden a los lugares de medición. Línea negra: Falla La Gruta.



Número de vertiente \blacktriangle /cono de travertino \bullet

FIG. 6. Gráfico con la distribución de las altitudes de los conos de travertino. Se muestran también las altitudes de las vertientes (ver figura 4A) a modo de comparación.

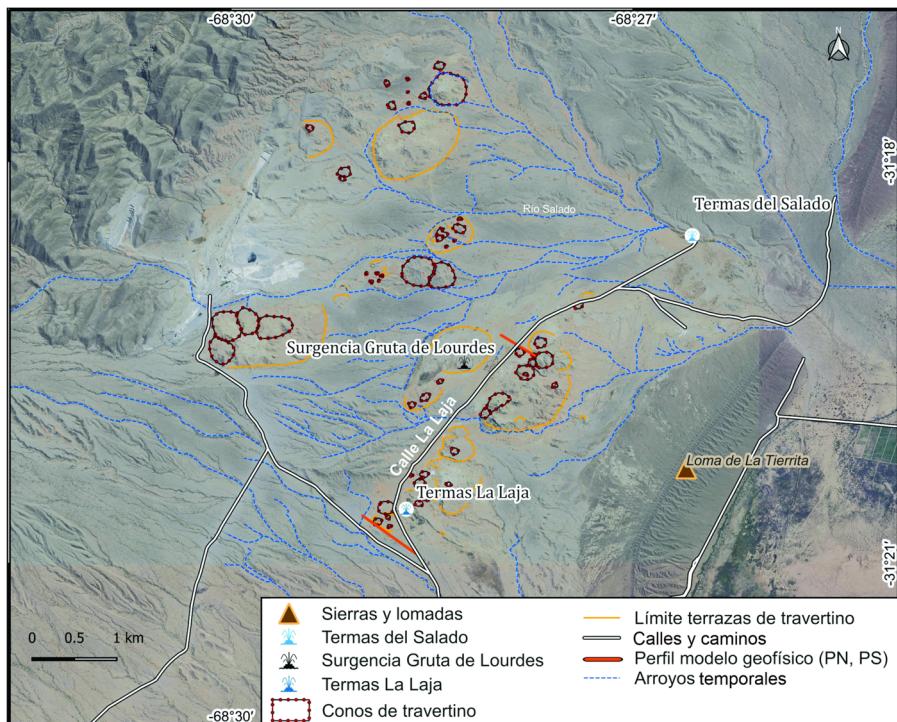


FIG. 7. Mapa de conos de travertino y límites de terrazas de travertino.

La clasificación supervisada realizada sobre la imagen satelital Sentinel-2A permitió identificar una clase espectral coincidente espacialmente con los depósitos de travertino (Fig. 8). Esta misma clase también se reconoció hacia el este de la zona de estudio, sobre depósitos correspondientes a un abanico aluvial, así como hacia el norte, donde afloran sedimentitas miocenas de la Formación Loma de Las Tapias, de reflectancia espectral similar a la de los travertinos.

Los conos de travertino fueron explorados mediante gravimetría, magnetometría, tomografía eléctrica y AMT. Los mapas magnéticos de reducción al polo (Fig. 9) muestran una correspondencia entre los conos y valores bajos de anomalías magnéticas, con transiciones abruptas hacia valores positivos en los sectores norte y este (Fig. 9). Se identificó en este trabajo una falla que representaría la continuación de la Falla La Laja 3 (Fig. 9).

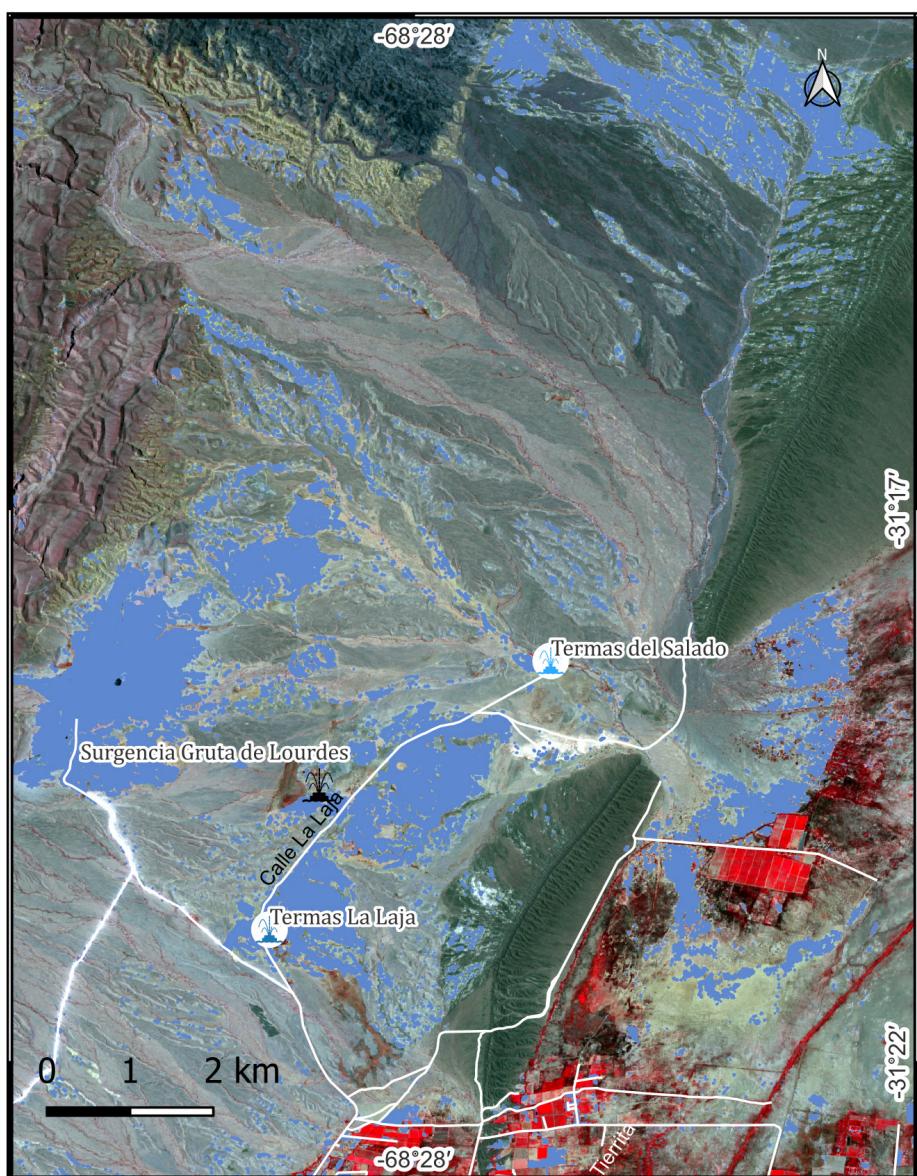


FIG. 8. Clasificación supervisada sobre imagen satelital Sentinel-2A del 05/01/2023, donde se resalta en color azul la distribución de aquellas zonas con señal espectral similar a la de los cuerpos de travertino.

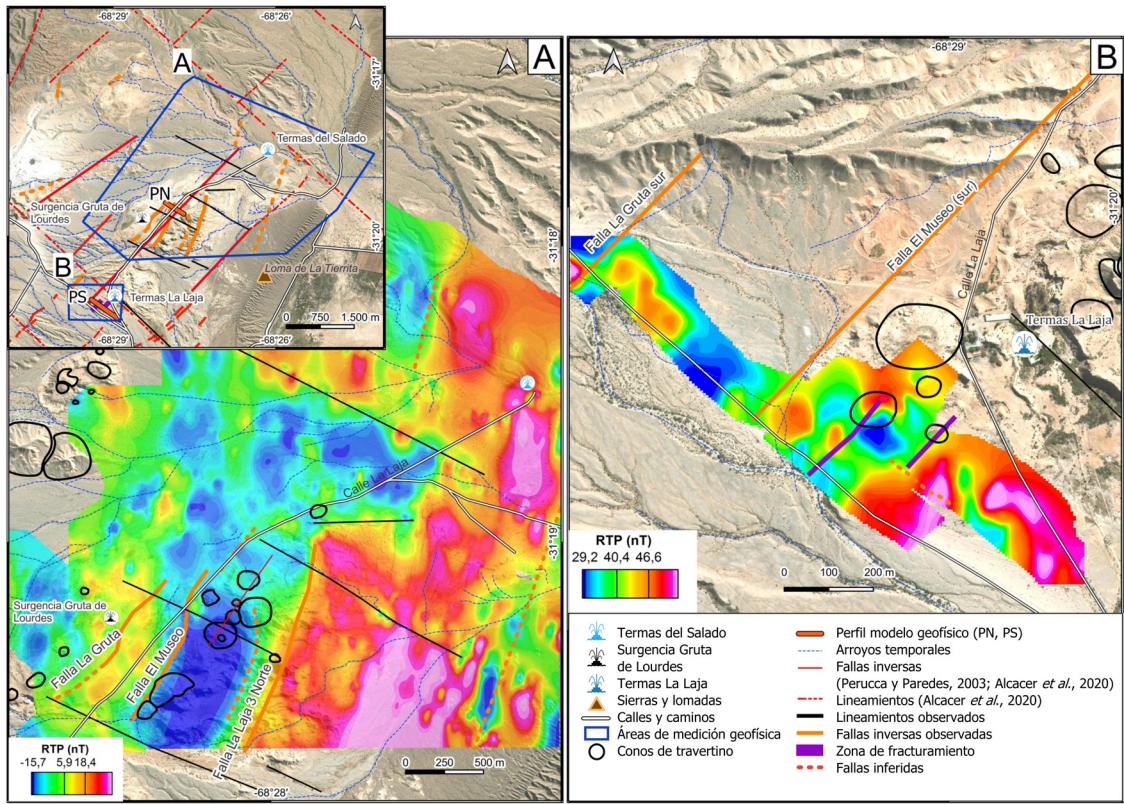


FIG. 9. Mapas de reducción al polo magnético (RTP) de las zonas A (norte) y B (sur), señaladas en el mapa de ubicación en la esquina superior izquierda.

Los datos de gravedad se presentan mediante un mapa de anomalía de Bouguer completa para la zona norte (Fig. 10A). Estos variaron entre -117 y -116,4 mGal, donde los valores mínimos coinciden, en general, con la ubicación de los conos de travertino. La transición entre valores bajos y valores altos se corresponde con la presencia de fallas geológicas. Las tomografías eléctricas TE1 y TE2, por otro lado, alcanzaron los 60 y 40 m de profundidad, respectivamente (Fig. 10B). El rango de resistividades en ambas tomografías eléctricas varió entre 1 y 12 Ω m. En general, los valores de resistividad son más bajos en las capas superficiales, y tal como se aprecia en el perfil de AMT (Fig. 5), el espesor saturado se profundiza hacia el este. Ambas tomografías muestran que la resistividad aumenta hacia el centro de perfil. En superficie, sobre estas áreas se localizan conos de travertino altamente fracturados rodeados por canales de arroyos temporales y suelos arcillosos saturados (Fig. 10B).

4.3. Fallas y lineamientos

El mapeo de estructuras resultante del análisis de la imagen Sentinel-2A (Fig. 11A-C) indica una zona dominada por fallas geológicas, consistente con observaciones previas (Siame *et al.*, 2002; Peruca y Paredes, 2003; Rockwell *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2015; Alcacer *et al.*, 2020), además de elementos geomorfológicos como escarpes de falla, niveles de glaciis o pedimentos elevados en contrapendiente y barreales de falla. En este trabajo se han reconocido nuevas estructuras, como la Falla La Gruta, la continuación de la Falla La Laja 3, y numerosos lineamientos de orientación NO-SE y áreas de fracturamiento (Figs. 5, 9, 10A). La aplicación del filtro de cruz de Roberts noroeste destaca lineamientos con orientación E-O (Fig. 11A), mientras que el noreste indica estructuras orientadas NE-SO (Fig. 11B). Por otra parte, el filtro de detección de tipo *right diagonal Edge* (Fig. 11C) y el filtro de nitidez (Fig. 11D),

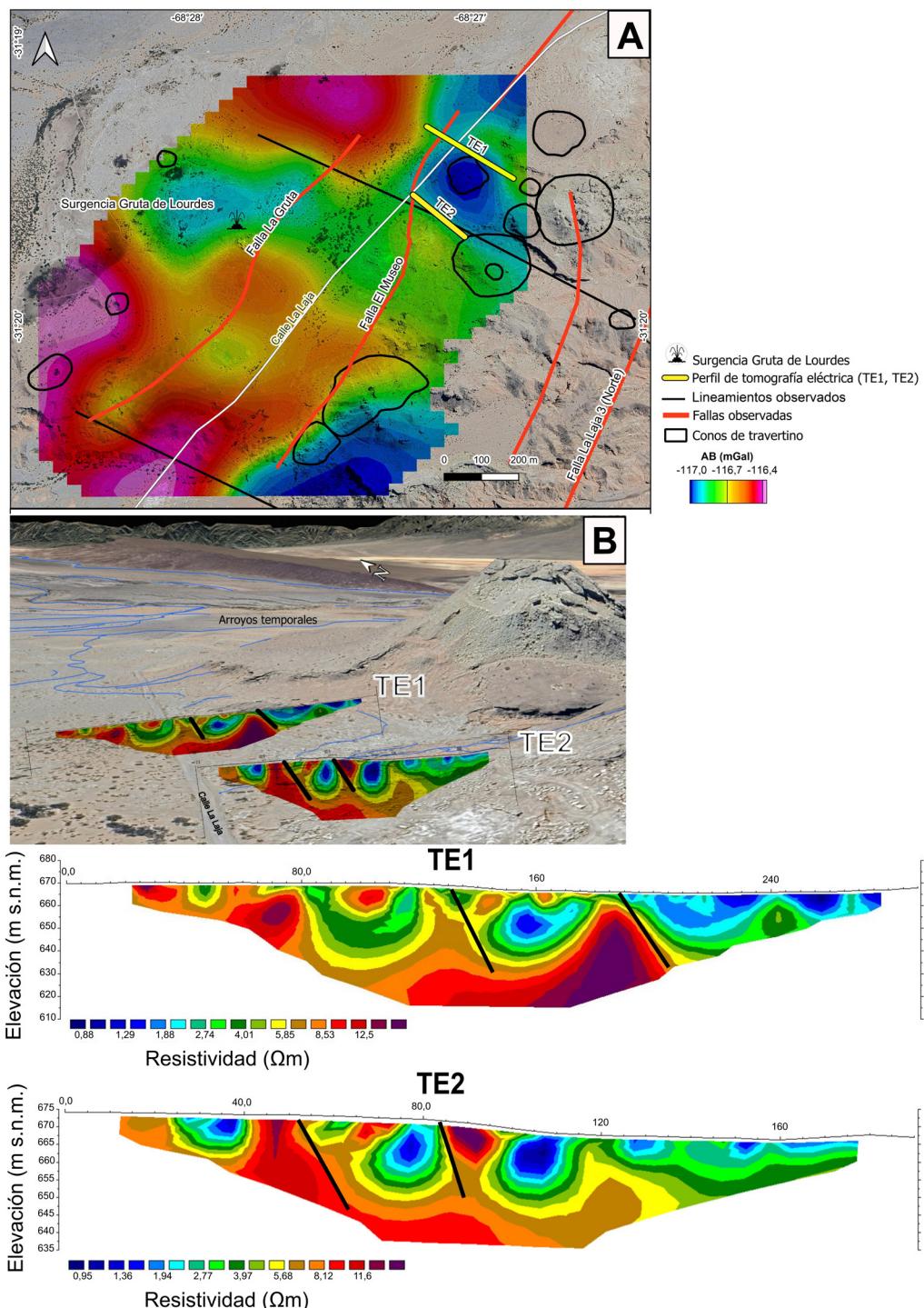


FIG. 10. A. Mapa de anomalía de Bouguer (AB) completa, superpuesta a información estructural y geomorfológica. B. Perfiles de tomografías eléctricas (TE1, TE2). Los valores elevados de resistividad coinciden con la presencia en superficie de conos de travertino. Los trazos negros en el perfil indican potenciales fallas geológicas.

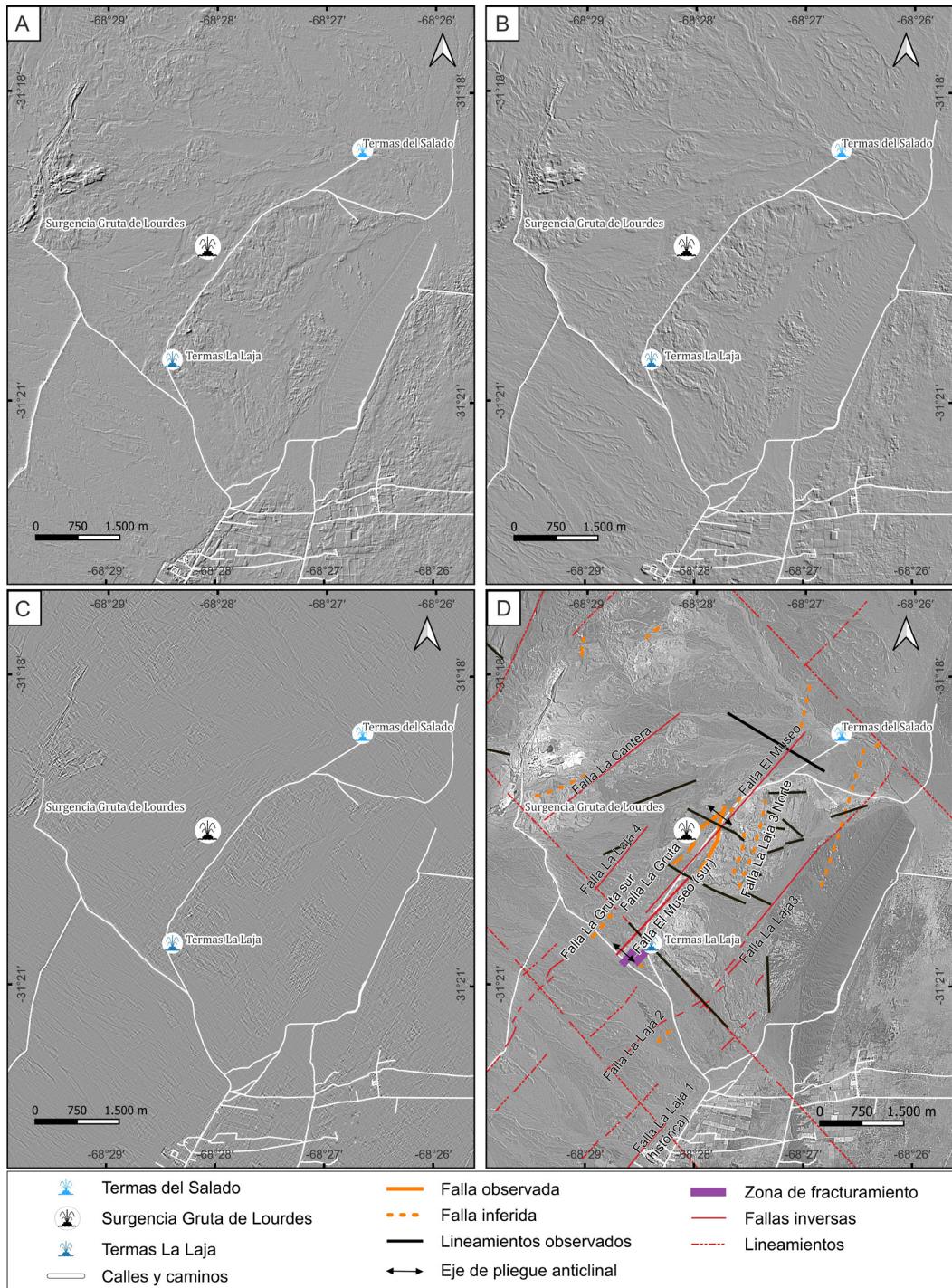


FIG. 11. Fallas y lineamientos para la zona de interés. La información estructural se obtuvo de antecedentes bibliográficos, mapeo de terreno y procesamiento de imágenes satelitales de tipo Sentinel-2A. Se aplicaron los filtros de cruz de Roberts noroeste (A) y noreste (B), *right diagonal edge* (C) y de nitidez (D). La información resumida se muestra en el panel D. En rojo se destacan las fallas inversas y lineamientos reconocidos en trabajos previos (e.g., Perucca y Paredes, 2003; Alcacer *et al.*, 2020), mientras que en negro y naranja se indican las fallas y lineamientos reconocidos en este trabajo.

acentuaron los escarpes de fallas reconocidos. Estos datos estructurales, integrados con la información geofísica recopilada y modelada, permitieron la generación de un nuevo mapa de fallas y lineamientos para la región de estudio (Fig. 11D).

4.4. Modelos estructurales propuestos

De la información recopilada en los apartados previos, se proponen dos modelos geológico-estructurales: uno para la zona norte (Fig. 12) y otro para la zona sur (Fig. 13) (ver ubicación en figura 3). Para el modelo norte se utilizó el módulo GM-SYS del programa Oasis Montaj, el cual consideró la anomalía gravimétrica residual y los resultados de las deconvoluciones de Euler para diferentes índices estructurales. Las densidades empleadas para el ajuste gravimétrico fueron de $2,1 \text{ g/cm}^3$ para el relleno sedimentario holoceno, $2,4 \text{ g/cm}^3$ para los depósitos de travertinos (Formación Torrecitas), $2,5 \text{ g/cm}^3$ para las sedimentitas plio-pleistocenas

(Formación Mogna) y $2,7 \text{ g/cm}^3$ para las rocas miocenas de la Formación Loma de Las Tapias (Perucca y Ruiz, 2014; Rodríguez *et al.*, 2016). Por otro lado, el modelo sur fue realizado teniendo en cuenta los afloramientos de fallas y la inclinación de las estructuras, los datos geofísicos y los resultados de las deconvoluciones de Euler.

5. Discusiones

El SHLL está controlado por fallas inversas de rumbo NE-SO que generan anticlinales y lineamientos NO-SE. La zona ha sido foco de diversos estudios, mayormente centrados en caracterizar la Falla La Laja. Respecto al sistema geotermal, Alcacer *et al.* (2020) y Orozco *et al.* (2021) contribuyeron con información geofísica y geoquímica. Alcacer *et al.* (2020) propusieron que la zona de influencia de los fluidos geotermales estaría controlada por dos grandes lineamientos NO-SE en las termas del Salado y La Laja. Los lineamientos identificados

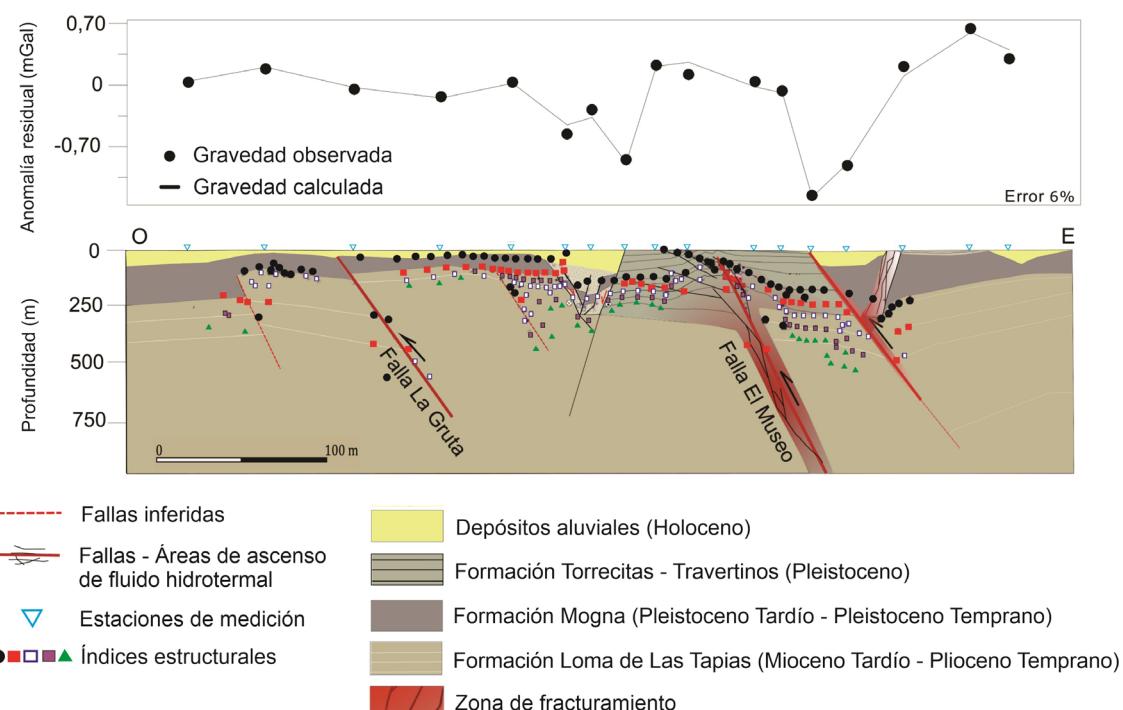


FIG. 12. Modelo geológico-estructural propuesto para la zona norte del área de estudio (perfil PN en figura 3). Los símbolos correspondientes a los índices estructurales se refieren a contactos, lineamientos o fallas (negro=1; rojo=1,5; azul=2; morado=2,5; verde=3).

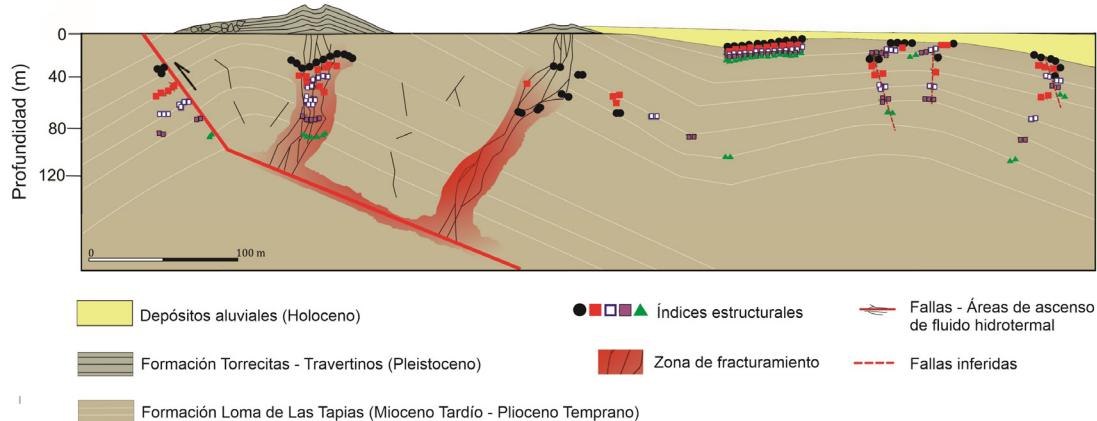


FIG. 13. Modelo geológico-estructural propuesto para la zona sur del área de estudio (perfil PS en figura 3). Los símbolos correspondientes a los índices estructurales se refieren a contactos, lineamientos o fallas (negro=1; rojo=1,5; azul=2; morado=2,5; verde=3). La diferente simbología utilizada en el flanco occidental del cono de la Formación Torrecitas corresponde a zonas erosionadas del cuerpo de travertinos.

en este trabajo son de dimensiones menores que los descritos por Alcacer *et al.* (2020). Estos cortan los depósitos de travertinos y parecen condicionar la ubicación de las surgencias de agua termal. Los lineamientos NO-SE no son exclusivos de la zona de estudio, en el sistema geotermal de Pismanta, por ejemplo, a ~140 km al noroeste de la zona de estudio, también se han reconocido estructuras transversales al orógeno (González *et al.*, 2020; Clavel *et al.*, 2023b).

En cuanto a las manifestaciones superficiales, las surgencias se ubican a altitudes entre 630 y 700 m s.n.m. (Fig. 4A), condicionadas por la presencia de estructuras, en particular donde se intersectan las fallas NE-SO con los lineamientos NO-SE. Por otro lado, los barreales se localizan preferentemente al oeste de la Falla El Museo. Su origen se atribuye a actividad tectónica asociada a esta falla, la que habría generado depresiones de hasta 50 m de profundidad (Fig. 5). Los bajos valores de resistividad en estas depresiones (Fig. 5) sugieren un abundante contenido de arcillas y agua salina saturando el nivel. Algunos de estos barreales se deberían al movimiento del agua meteórica desde el oeste, mientras que Orozco *et al.* (2021) sugiere para los manantiales una impronta hídrica meteórica proveniente del río San Juan asociada a embalsamientos históricos y más antiguos.

De acuerdo a la geofísica, los bajos magnetométricos se interrumpen al igual que la presencia de conos de travertino hacia el norte en las termas del Salado (Fig. 9).

Lo que podría indicar la presencia de una estructura de orientación NO-SE. Estos conos pueden estar relacionados con ascensos de aguas termales a lo largo de zonas de debilidad (*e.g.*, fracturas), conectadas en algunos casos a una estructura mayor profunda o bien directamente vinculadas a zonas de deformación aledañas a fallas mayores. Este control estructural también se sugiere para las terrazas de travertino (Fig. 7A). Las características morfológicas de los conos permiten reconocer dos grupos (Fig. 6), posiblemente atribuibles a pulsos de deformación y de gran actividad del sistema geotermal. Los conos a altitudes más altas se habrían edificado hacia fines del Pleistoceno Tardío, una época con gran aporte y disponibilidad de agua contenida en los glaciares de valle que ocuparon la Cordillera Frontal, así como también un ambiente de permafrost a altitudes más bajas (Blanc y Perucca, 2017). El otro grupo de conos, ubicados a altitudes menores, pueden haberse generado durante épocas de mayor escorrentía superficial, posiblemente consecuencia de condiciones climáticas más cálidas (Blanc y Perucca, 2017). Las altitudes de las surgencias actuales se encuentran mayoritariamente por debajo de los 700 m s.n.m., lo que concuerda con este último grupo.

Los resultados de la clasificación supervisada (Fig. 8) señalan la presencia de materiales con la misma clase espectral detectada para los depósitos de travertino. Los depósitos ubicados hacia el este, correspondientes a un abanico aluvial, se interpretan

como materiales erosionados provenientes desde la zona de los conos de travertino. Por otro lado, los depósitos ubicados al norte corresponderían a sedimentitas de la Formación Loma de Las Tapias. La edad de los depósitos de travertinos se ha estimado en pleistocena tardía (26.400 ± 720 a 25.600 ± 500 años) a partir de fósiles de vertebrados (Contreras *et al.*, 1999) y dataciones por radiocarbono en un nivel afectado por fallamiento (Perucca y Paredes, 2003). En las termas de Talacasto, a ~ 40 km al NO de la zona de estudio, Paredes *et al.* (1997) y Paredes y Perucca (2000) obtuvieron una edad radiocarbono de 28.422 ± 1.335 años en bancos de travertinos.

Durante el Pleistoceno Tardío, los avances glaciares en la región de estudio se debieron principalmente al aumento de la precipitación (Kull *et al.*, 2002, 2008). Esta condición hizo posible contar con una fuente de agua sostenida y continua para la formación de los conos de travertinos ubicados a altitudes relativamente más elevadas. Otros autores, no obstante, sugieren que las modificaciones altimétricas del relieve local estarían condicionadas por procesos de *soil piping* en los sedimentos neógenos, por lo que las diferencias de altitud identificadas se deberían a procesos de disolución, hundimiento y colapso (Suvires, 2004). Bellio (1955), sin embargo, observó un mayor número de vertientes y surgencias en los alrededores de la Falla El Museo, mientras que, hacia el sur, cerca de la Falla La Laja, las emisiones de soluciones de travertinos estaban ausentes o en menor cantidad. En la presente investigación se sugiere que, en la zona de estudio, la Falla El Museo habría actuado durante gran parte del Cuaternario como frente de levantamiento en el piedemonte distal de precordillera Oriental, a contrapendiente, favoreciendo el ascenso de agua y su surgencia, expresada en superficie mediante la alineación de numerosas vertientes y por la presencia de depósitos de travertino. Con respecto a la fuente de aporte del carbonato, Angelelli *et al.* (1980) propusieron como mecanismo la disolución de calizas ordovícicas por aguas termales bicarbonatadas y su posterior precipitación por pérdida de CO_2 en un ambiente lagunar durante el Pleistoceno.

Del análisis de anomalías magnéticas (Fig. 9), se interpreta que los valores bajos de RTP coinciden espacialmente con rocas sedimentarias ricas en carbonatos (Dobrin, 1976; Carmichael, 1989; Clark y Emerson, 1991; Butler, 2005). Los valores altos, en tanto, coinciden con formaciones sedimentarias más antiguas (neógenas) así como con depósitos aluviales

recientes (cuaternarios). El marcado contraste de anomalías RTP podrían señalar el área de influencia geotermal que originó el campo de travertinos.

Se sugiere que la Falla El Museo sería la principal vía de ascenso de fluidos (Fig. 12). Esta estructura, de tectónica compresiva, es atravesada por varios lineamientos NO-SE que se interpretan como de carácter extensional (Fig. 11D). Esto último es consistente con los datos de anomalía gravitatoria residual, donde los valores bajos permiten interpretar un posible depocentro heredado, tal como aquellos reconocidos por otros autores en sectores aledaños (Japas *et al.*, 2008; González *et al.*, 2020; Clavel *et al.*, 2023a). Continuando por la Falla El Museo, hacia el sur, se observan conos de travertino formados en la charnela de un anticlinal, posiblemente asociados a estructuras dilatantes secundarias generadas por el plegamiento (Fig. 13). En este modelo, los conos de travertino poseen menores alturas y estarían relacionados con emisiones de aguas termales por zonas de debilidad tipo fracturas y no por fallas. Esto último concuerda con la propuesta de Christiansen *et al.* (2024) para el sistema geotermal de Pismanta, donde se sugirió que las generaciones de fracturas extensionales en las charnelas de pliegues anticlinales actuarían como vías de ascenso del agua desde una capa confinante, transportando en su movimiento sedimentos hacia la superficie, generando conos de travertino.

Los modelos geológico-estructurales propuestos en este trabajo sugieren que los demás conos de travertino no analizados en este estudio pudieron haberse generado bajo mecanismos similares. Se requieren mayores análisis geofísicos, particularmente relacionados con actividad sísmica, para identificar su control en profundidad, o bien aplicar otros métodos como gravimetría y magnetometría en áreas no exploradas. Un obstáculo es que parte de estos sitios se encuentran en terrenos privados o sujetos a actividad minera.

La formulación de modelos geológicos basados en geofísica resulta útil para analizar la distribución del recurso económico explotado como roca de aplicación, así como proveer información sobre el potencial sísmico de la región mediante la identificación de nuevas estructuras. Contribuye también al diseño de campos termales y al aprovechamiento de vertientes de agua caliente con fines turísticos o terapéuticos. Algunos conos de travertino están expuestos a degradación antrópica debido a la explotación minera,

por lo que se propone que ciertas geoformas próximas a los centros termales sean incorporadas al circuito de geoturismo geológico existente en torno a la Falla La Laja, a fin de garantizar su sostenibilidad.

6. Conclusiones

En la zona del sistema geotermal de La Laja se identificaron conos y terrazas de travertinos, barreales y vertientes. Mediante prospección geofísica, se determinó que todo el sistema se encuentra controlado por estructuras subsuperficiales. Esto permitió construir dos modelos morfoestructurales: uno al norte, controlado por la Falla El Museo, donde la estructura actuaría como vía de circulación de los fluidos hidrotermales; y otro al sur, que comprende una historia tectónica más compleja con presencia de fallas, pliegues y zonas de debilidad, donde estas últimas permitirían el ascenso y circulación de los fluidos hidrotermales. Además, se detectaron nuevas estructuras de orientación NE-SO (Falla La Gruta) y lineamientos de orientación NO-SE, en cuya intersección se observaron vertientes termales. Dentro de los métodos geofísicos empleados, la gravimetría y la magnetometría probaron ser útiles para el modelado de estos *play* geotérmicos, en especial cuando pueden complementarse con información geológica y geomorfológica. La tomografía eléctrica y la audiometrotelúrica, en cambio, poseen un menor alcance en profundidad, pero resultaron útiles para caracterizar suelos saturados, barreales y fallas superficiales, complementando así el conocimiento integral del sistema.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al editor, D. Bertin, al revisor A. Sendrós y a un revisor anónimo por sus valiosos comentarios y recomendaciones, los cuales contribuyeron significativamente a mejorar la calidad, claridad y solidez científica del manuscrito. Asimismo, se agradece especialmente al personal del Instituto Geofísico Sismológico Ing. Volponi (IGSV) por su colaboración durante las campañas de adquisición de datos, el acompañamiento en las tareas de gabinete, el apoyo logístico brindado y la provisión de los equipos geofísicos necesarios para el desarrollo de este trabajo. Este estudio fue financiado en el marco de una beca doctoral cofinanciada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). Adicionalmente, se recibió financiamiento

mediante una beca de posgrado otorgada por la Secretaría de Posgrado y Relaciones Internacionales (SEPRI) de la UNSJ, cuyo apoyo fue fundamental para la concreción de esta investigación.

Referencias

- Albero, M.C.; Levin, M.; Panarello, H.O.; Lohn, P.; García, E. 1987. Isotopic evidence for the different origins of the Tulum valley groundwaters (San Juan, Argentina). *In Isotope techniques in water resources development. IAEA symposium, Proceedings Series STI/PUB/757: 287-299. Vienna.*
- Alcacer, J.M.; Rothis, M.; Haro, F.; Perucca, L.; Miranda, S.; Vargas, N. 2020. Geophysical analysis in a Quaternary compressive environment controlling the emplacement of travertine, eastern piedmont of Argentine Precordillera. *Journal of South American Earth Sciences* 98: 102432. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102432>
- Amos, A.J. 1954. Estructura de las formaciones paleozoicas de La Rinconada, pie oriental de la sierra Chica de Zonda, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 9 (1): 5-38.
- Angelelli, V. 1941. Los yacimientos de minerales y rocas de aplicación de la República Argentina. Su geología y relaciones genéticas. *Dirección de Minería y Geología, Boletín* 50: 384 p. Buenos Aires.
- Angelelli, V.; Schalamuk, J.; Fernández, R. 1980. Los Yacimientos de Minerales no Metalíferos y rocas de Aplicación de la Región Centro-Cuyo. *Provincias de Córdoba, Santiago del Estero, San Luis, Mendoza y San Juan. Secretaría de Estado de Minería*: 266 p. Buenos Aires.
- Astini, R.; Gómez, F.; De Maestri, E. 2016. Los travertinos cuaternarios de La Laja (San Juan): morfología, estratigrafía, facies y paleoambientes. *In Congreso Latinoamericano de Sedimentología No. 7, Reunión Argentina de Sedimentología, No. 15. Libro de resúmenes*: p 28. La Pampa.
- Barcelona, H. 2015. Caracterización del sistema Caracterización del sistema geotermal de Valle del Cura, San geotermal de Valle del Cura, San Juan. *Tesis doctoral (inédita). Universidad de Buenos Aires*: 216 p.
- Bellio, N.E. 1955. Los yacimientos de travertino en la provincia de San Juan, zona El Salado y La Laja, Departamento Albardón. *Revista Minera* 21 (3-4): 13-15.
- Bercowski, F.; Berenstein, L.R.; Johnson, N.M.; Naeser, C.W. 1986. Sedimentología, magnetoestratigrafía y edad isotópica del Terciario en Loma de Las Tapias,

- Ullum, provincia de San Juan. *In* Reunión Argentina de Sedimentología, No. 1, Asociación Argentina de Sedimentología: 169-172. La Plata.
- Bercowski, F.; Berenstein, L.R.; Johnson, N.M.; Naeser, C.W. 1987. Litofacies y paleoambientes del Terciario en Loma de Las Tapias, Ullum, provincia de San Juan, Argentina. *In* Congreso Geológico Argentino No. 10, Asociación Geológica Argentina 2: 101-104. Buenos Aires.
- Blanc, P.A.; Perucca, L. 2017. Tectonic and climatic controls on the late Pleistocene to Holocene evolution of Paleolake Ullum-Zonda in the Precordillera of the central Andes, Argentina. *Quaternary Research* 88 (2): 248-264. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.50>
- Bordonaro, O. 1980. El Cámbrico en la Quebrada de Zonda, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35 (1): 26-41.
- Briggs, I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39: 39-4.
- Butler, D.K. 2005. Near-surface Geophysics. Volume 13. Society of exploration geophysicists: 732 p. Tulsa
- Cardó, R.; Díaz, I.N.; Catnich, J.R.; Herrmann, C.J.; Gozalvez, M.R. 2012. Carta de Minerales Industriales, Rocas y Gemas 3169-IV, San Juan. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 401: 63 p.
- Carmichael, R.S. 1989. Magnetic properties of rocks and minerals. Handbook of physical properties of rocks. CRC Press: 741 p. Florida.
- Castillo-Reyes, O.; Prol-Ledesma, R.M.; Corbo-Camargo, F.; Rojas, O. 2024. Geothermal resources in Latin-America and their exploration using electromagnetic methods. *Geotherm Energy* 12 (34). <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00314-5>
- Christiansen, R.O.; Clavel, F.; González, M.; García, H.P.; Ortiz, D.A.; Ariza, J.P.; Wohnlich, S. 2021. Low-enthalpy geothermal energy resources in the Central Andes of Argentina: A case study of the Pismanta system. *Renewable Energy* 177: 1234-1252. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.065>
- Christiansen, R.; Mebrahtu, T.K.; Aguil, N.; Wohnlich, S. 2024. Numerical modelling of an advective geothermal system in the Central Andes: Sustainable utilization through borehole heat exchangers. *Renewable Energy* 223: 119989. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119989>
- Clark, D.A.; Emerson, D.W. 1991. Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies. *Exploration Geophysics* 22 (3): 547-555.
- Clavel, F.G.; González, M.; Gianni, G.M.; Winocur, D.; Christiansen, R.O.; Klinger, F.L.; Martínez, M.P. 2023a. Pismanta geothermal play in the iglesia basin related to transverse fault systems in the andean orogen. *Journal of South American Earth Sciences* 121: 104143. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104143>
- Clavel, F.; González, M.; Sottile, A.; Christiansen, R.; Gianni, G.; Winocur, D.; Ortiz, D.; García, H.; Lince Klinger, F.; Martínez, M. 2023b. Estudios geofísicos sobre estructuras someras vinculadas al ascenso de las aguas termales de Pismanta en el valle de Iglesia, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 80 (3): 536-557.
- Contreras, V.H.; Pontoriero, S.; Pérez, A.; Perucca, P. 1999. Consideraciones sobre la génesis, fauna y edad de los travertinos de la laja, Albardón, San Juan. CD Síntesis del cuaternario de la Provincia de San Juan. *In* Reunión de Campo del Cuaternario No. 11, Revista digital Ciencias, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. San Juan.
- Contreras, V.H.; Bracco, A.I.; Baraldo, J.A. 2019. Estratigrafía, bioestratigrafía y cronología del Mioceno superior de la provincia de San Juan (Argentina). *Opera Lilloana*, Mioceno al Pleistoceno del Centro y Norte de Argentina 52: 177-206.
- Cooper, G. 2020. Iterative euler deconvolution. *Exploration Geophysics* 52 (4): 468-474. <https://doi.org/10.1080/08123985.2020.1834381>
- Copernicus. 2023. Imágenes satelitales Sentinel. Programa espacial de la Unión Europea. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (última visita 15/01/2023)
- Costa, C.H.; Ahumada, E.A.; Gardini, C.E.; Vázquez, F.R.; Diederix, H. 2015. Quaternary shortening at the orogenic front of the Central Andes of Argentina: the Las Peñas Thrust System. *Geological Society, London, Special Publications* 399 (1): 245-266. <https://doi.org/10.1144/SP399.5>
- Dobrin, M.B. 1976. Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill Book Co.: 630 p. New York.
- Durrheim, R.; Cooper, G. 1997. Euldep: a program for the Euler Deconvolution of magnetic and gravity data. *Computers and geosciences* 24 (6): 545-550. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(98\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(98)00022-3)
- Geosystem SRL. 2008. WinGLink® User's Guide, versión 2.20. GEOSYSTEM SRL: 473 p. Milán.
- Gkousis, S.; Braimakis, K.; Nimmegeers, P.; Karellas, S.; Compernolle, T. 2025. Multi-objective optimization of medium-enthalpy geothermal Organic Rankine Cycle plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 210: 115150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115150>
- González, M.; Clavel, F.; Christiansen, R.; Gianni, G.M.; Klinger, F.L.; Martínez, P.; Díaz, M. 2020. The Iglesia

- basin in the southern Central Andes: A record of backarc extension before wedge-top deposition in a foreland basin. *Tectonophysics* 792: 228590. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228590>
- Harrington, H. 1944. Volcanes y Terremotos. Pleamar: 251 p. Buenos Aires.
- Hinze, W.J. 2003. Bouguer reduction density why 2.67? *Geophysics* 68 (5): 1559-1560. <https://doi.org/10.1190/1.1620629>
- Hinze, W.C.; Aiken, J.; Brozena, B.; Coakley, D.; Dater, G.; Flanagan, R.; Forsberg, T.; Hildenbrand, R.; Keller, J.; Kellogg, R.; Kucks, X.; Li, A.; Mainville, R.; Morin, M.; Pilkington, D.; Plouff, D.; Ravat, D.; Roman, J.; Urrita-Fucugauchi, M.; Véronneau, M.; Webring, D.; Winester. 2005. New Standards for Reducing Gravity Data: The North American Gravity Database. *Geophysics* 70 (4): 25-32. J25-J32. <https://doi.org/10.1190/1.1988183>
- Hinze, W.; Von Frese, R.; Saad, A. 2013. Gravity and Magnetic Exploration. Principles, Practices, and Applications. Cambridge University Press: 525 p. New York.
- IGA. 2024. International Geothermal Association. Base de datos de energía geotérmica. <https://worldgeothermal.org/geothermal-data/geothermal-energy-database> (última visita 10/12/2024)
- IGN. 2023. Instituto Geográfico Nacional. Modelos digitales de terreno. Buenos Aires. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Introduccion>
- IRENA. 2023. International Renewable Energy Agency; International Geothermal Association. Global geothermal market and technology assessment: 136 p. Abu Dhabi. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Global_geothermal_market_technology_assessment_2023.pdf (última visita 11/11/2023)
- Japas, M.S.; Cortés, J.M.; Pasini, M. 2008. Tectónica extensional triásica en el sector norte de la cuenca Cuyana: primeros datos cinemáticos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (2): 213-222.
- Kane, M.F. 1962. A comprehensive system of terrain correction using a digital computer. *Geophysics* 27 (4): 455-462. <https://doi.org/10.1190/1.1439044>
- Kull, C.; Grosjean, M.; Veit, H. 2002. Modeling modern and late pleistocene glacio-climatological conditions in the North Chilean Andes (29-30°). *Climatic Change* 52 (3): 359-381. <https://doi.org/10.1023/A:1013746917257>
- Kull, C.; Imhof, S.; Grosjean, M.; Zech, R.; Veit, H. 2008. Late Pleistocene glaciation in the Central Andes: temperature versus humidity control-a case study from the Eastern Bolivian Andes (17° S) and regional synthesis. *Global Planet Change* 60 (1-2): 148-164. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.011>
- Loke, M.H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 136 p. https://sites.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf
- Mantei, N.; Rioseco, E.M.; Moeck, I.S. 2024. 3D numerical study of geothermal reservoir performance of homogeneous sectors of Mesozoic sandstone formations in the North German Basin developed by smart multi-well systems. *Geothermal Energy*: 81 p. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4808466/v1>
- Milana, J.P. 1990. Facies y paleohidrología de conglomerados aluviales plio-pleistocenos (San Juan, Argentina): evidencias de fases climáticas en los Andes a los 31° Sur. *In Simposio sobre el Terciario de Chile*, No. 2, Actas: 215-224. Santiago.
- Milsom, J.; Eriksen, A. 2011. Field Geophysics. John Wiley & Sons: 297 p. Londres.
- Moeck, I.S. 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37: 867-882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Moeck, I.; Dussel, M.; Weber, J.; Schintgen, T.; Wolfgramm, M. 2019. Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: A modern concept to categorise geothermal resources related to crustal permeability. *Netherlands Journal of Geosciences* 98: e14. <https://doi.org/10.1017/njg.2019.12>
- Nagy, D. 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics* 31 (2): 362-371. <https://doi.org/10.1190/1.1439779>
- Orellana, E. 1982. *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo: 578 p. Madrid.
- Orozco, P.G.; Astini, R.A.; Presa, J.M.; Alvarado, P.; Venerdini, A.; Rivas, C.; Sáez, M. 2021. The La Laja spring system in the Argentine Precordillera: A conceptual model based on geochemical and isotopic data. *Journal of South American Earth Sciences* 109: 103241. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103241>
- Paredes, J.; Perucca, L.; Tello, G. 1997. Fallamiento cuaternario en el área Blanquitos, departamento Ullúm, San Juan, Argentina. *In Jornadas de Geología de Precordillera*, No. 2: 168-173. San Juan.
- Paredes, J.; Perucca, L. 2000. Fallamiento cuaternario en la depresión de Matagusanos, Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina* 55 (1-2): 23-30.
- Pentecost, A. 1995. Geochemistry of carbon dioxide in six travertine-depositing waters of Italy. *Journal*

- of hydrology 167 (1-4): 263-278. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02596-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02596-4)
- Perucca, L.; Paredes, J. 2003. Fallamiento cuaternario en la zona de La Laja y su relación con el terremoto de 1944, Departamento Albardón, San Juan, Argentina. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 20 (1): 20-26.
- Perucca, L.P.; Ruiz, F. 2014. New data on neotectonic contractional structures in Precordillera, south of Río de La Flecha: structural setting from gravity and magnetic data. San Juan, Argentina. Journal of South American Earth Sciences 50: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.11.006>
- Perucca, L.P.; Vargas, N. 2014. Neotectónica de la Provincia de San Juan, centro-oeste de Argentina. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 66: 291-304.
- Pesce, A.H.; Miranda, F. 2003. Catálogo de manifestaciones termales de la República Argentina. Volumen I, Región Noroeste. Provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, La Rioja, San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 36: 165 p. Buenos Aires.
- Pous, J.; Marcuello, A. 2003. El método magnetotelúrico: descripción y aportaciones en investigaciones de ámbito regional. Boletín Geológico y Minero 114 (1): 5-16.
- Ramos, V.; Vujovich, G. 2000. Hoja geológica 3169-IV, San Juan. Provincia de San Juan. Instituto de geología y recursos minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 243: 82 p. Buenos Aires.
- Ramos, V.; Cristallini, E.O.; Pérez, D.J. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. Journal of South American earth sciences 15 (1): 59-78. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00006-8)
- Reid, A.B.; Allsop, J.M.; Granser, H.; Millet, A.J.; Somerton, I.W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics 55: 80-91.
- Rockwell, T.K.; Ragona, D.E.; Meigs, A.J.; Owen, L.A.; Costa, C.H.; Ahumada, E.A. 2014. Inferring a Thrust-Related Earthquake History from Secondary Faulting: A Long Rupture Record of La Laja Fault, San Juan, Argentina. Bulletin of the Seismological Society of America 104 (1): 269-284. <https://doi.org/10.1785/0120110080>
- Rodríguez, A.I.; Christiansen, R.O.; Suvires, G.M.; Klinger, F.L.; Martínez, M.P. 2016. Structural features of the southern Tulum Fault System, western central Argentina, through gravimetric data and geomorphologic analyses. Journal of South American Earth Sciences 72: 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.09.008>
- Serafini, R.L.; Bustos, N.R.; Contreras, V.H. 1986. Geología de la Formación Loma de Las Tapias. In Jornadas sobre Geología de Precordillera, No. 1, Asociación Geológica Argentina, Serie A, Monografías y Reuniones, Actas 2: 77-82. San Juan.
- Siame, L.L.; Bellier, O.; Sébrier, M.; Bourlès, D.L.; Leturmy, P.; Pérez, M.; Araujo, M. 2002. Seismic hazard reappraisal from combined structural geology, geomorphology and cosmic ray exposure dating analyses: the Eastern Precordillera thrust system (NW Argentina). Geophysical Journal International 150: 241-260. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01701.x>
- Simsek, S.; Günay, G.; Elhatip, H.; Ekmekci, M. 2000. Environmental protection of geothermal waters and travertines at Pamukkale, Turkey. Geothermics 29 (4-5): 557-572. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00022-5)
- Sussini, M.; Herrero Ducloux, E.; Brandán, R.; Isnardi, H.; Galmarini, A.; Castillo, M.; Pastore, F.; Corti, H. 1948. Aguas Minerales de la República Argentina, Provincia de San Juan. Ministerio del Interior Comisión Nacional de Climatología y Aguas Minerales (Ley No. 11621), 10: 317 p. Buenos Aires.
- Suvires, G.M. 2004. Procesos de piping en el piedemonte distal de la Precordillera Oriental, provincia de San Juan: factores y relieve. Revista de la Asociación Geológica Argentina 59 (3): 385-393.
- Thompson, D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics 47 (1): 31-37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Yáñez, G.; Muñoz, M.; Flores-Aqueveque, V.; Bosch, A. 2015. Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. Andean Geology 42 (2): 147-172. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV42n2-a01>
- Zhu, J.; Li, P.; Chen, H. 2023. Exploration of geothermal resources using comprehensive electromagnetic method. Energy exploration and exploitation 41 (5): 1676-1696. <https://doi.org/10.1177/01445987231168710>