

Geotermalismo en el Noroeste Argentino

José G. Viramonte^{1*}, Emilce Bustos^{1,2}, Agostina Chiodi^{1,2}, Rubén Filipovich^{1,2}, Carlos Peralta²

¹ Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa-CONICET)

² Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA, UNSa)

*e-mail: joseviramonte@yahoo.com.ar

A medida que descendemos hacia el interior de la Tierra, observamos un incremento en la temperatura (Figura 1). Este aumento térmico se debe tanto al calor residual desde la formación del planeta, como al calor generado continuamente por la desintegración radioactiva de elementos inestables en las rocas, especialmente uranio (U), torio (Th) y potasio (K) (ver [Ortiz, 2021, Temas BGNOA, vol. 11, n°3](#)). Cabe recordar que el núcleo terrestre aún registra temperaturas superiores a los 4000°C. Ello produce dentro del manto una lenta y permanente transmisión térmica por convección, que intenta equilibrar su temperatura. El aumento de temperatura con la profundidad que resulta de todos esos procesos, se denomina gradiente geotérmico y no es igual en toda la superficie, estando condicionado principalmente por la geología, la tectónica y especialmente por la dinámica de las placas litosféricas en que está dividido el planeta (ver Ahumada et al., 2019, [Temas BGNOA, vol. 9, n° 1](#); Figuras 2 y 3).

El gradiente geotérmico, que en los primeros kilómetros de la corteza tiene un promedio de 25-30° C/km, no es el mismo si se mide en un fondo marino, una zona continental estable, una dorsal

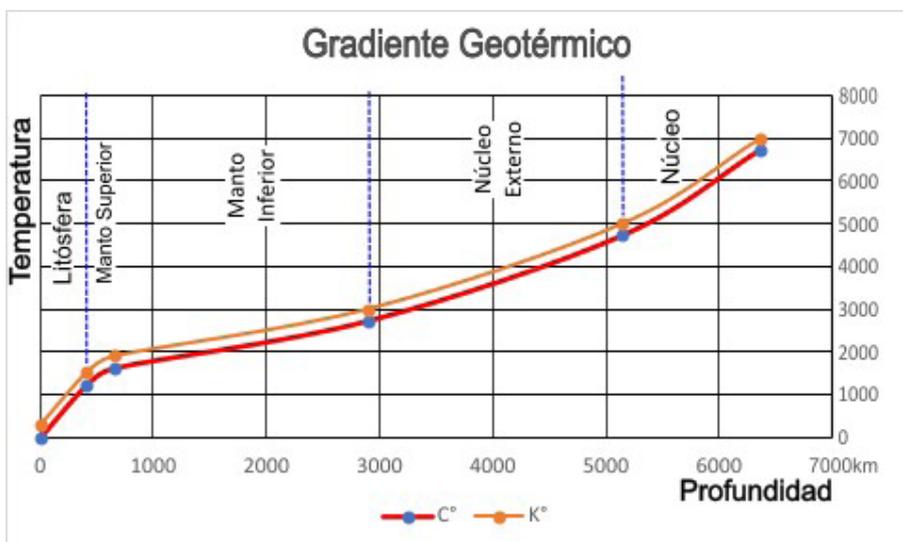


Figura 1. El gráfico muestra la estructura térmica de la Tierra al aumentar la temperatura según la profundidad desde la superficie al Núcleo (tomado de Viramonte et al., 2024).

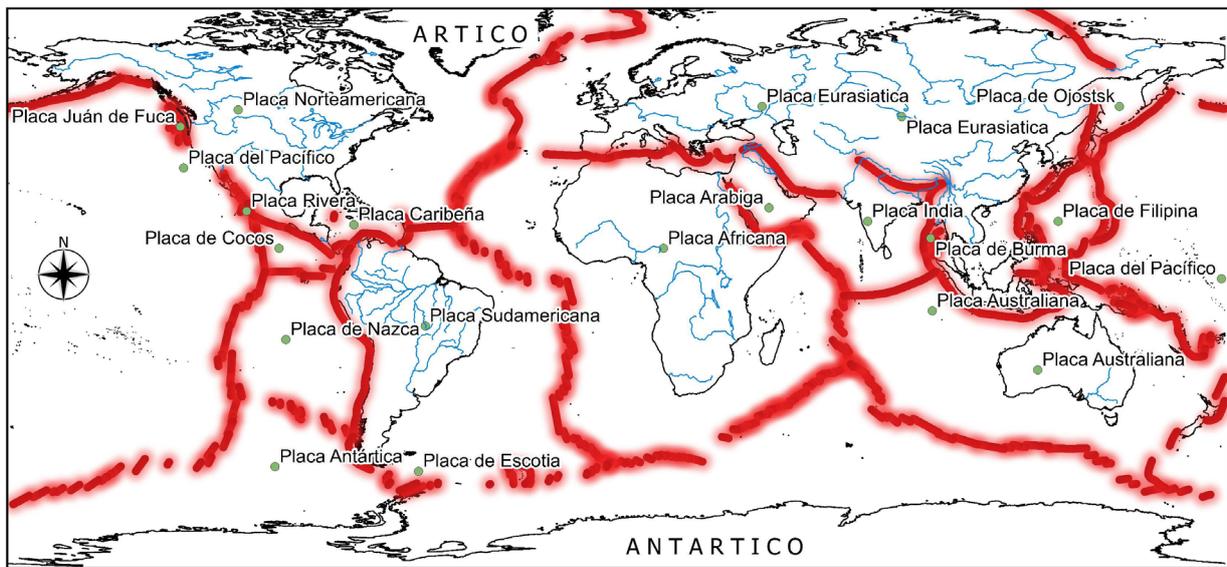


Figura 2. La figura muestra en líneas rojas la estructuración de la litósfera en placas tectónicas. Estas interactúan unas con otras a lo largo de sus límites provocando intensas deformaciones en la corteza de la Tierra. Modificado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Placas_tectonicas_es.svg

oceánica, una zona de subducción o en una zona continental con fuerte tectonismo (Figura 3). Ese gradiente será mucho mayor en una zona con volcanismo activo o fuerte actividad tectónica que en una zona estable y tranquila de la corteza.

Si a este aumento de la temperatura le sumamos la presencia de agua, proveniente de la infiltración desde la superficie, es fácil comprender que, en ciertos lugares de la corteza terrestre, puede producirse un calentamiento importante de esa agua (del orden de los 250-300° C) y por situaciones geológicas y tectónicas especiales, concentrarse y entramparse y conformar lo que denominamos un campo geotérmico (Figura 4).

El geotermalismo se visualiza en la superficie terrestre por la aparición de zonas de *pérdida*, por donde surge el agua caliente y/o vapor de agua, tales como fumarolas, géiseres, manantiales

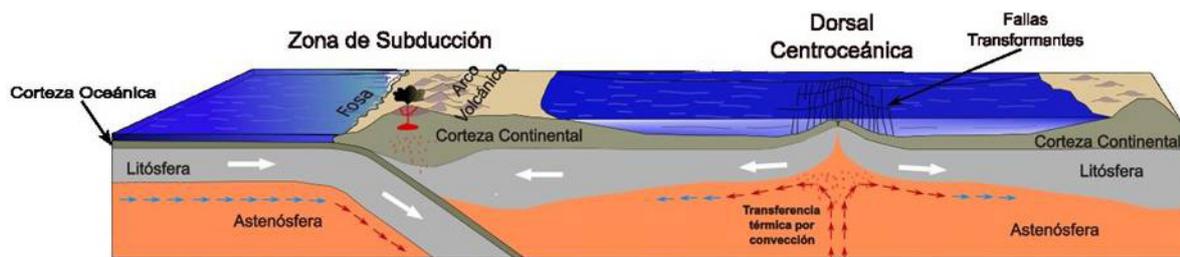


Figura 3. Modelo idealizado del proceso y evolución de la corteza terrestre según la Teoría de tectónica de placas que propone la expansión de los fondos oceánicos. Las flechas rojas/azules representan la convección en el manto semisólido. Las flechas blancas marcan el desplazamiento relativo de las placas litosféricas (tomado de Viramonte et al., 2024).

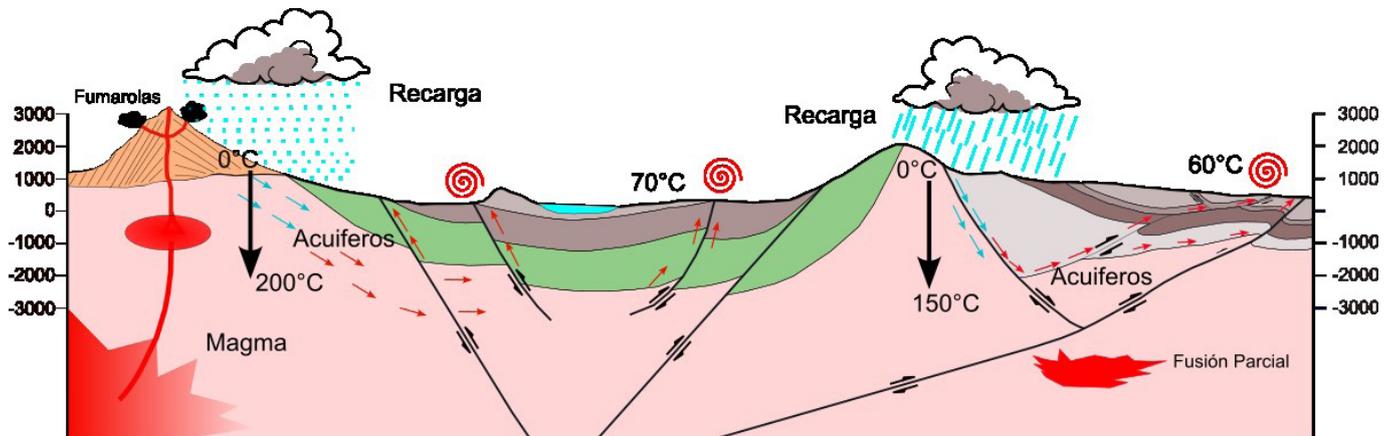


Figura 4. Modelo esquemático general de un campo geotérmico clásico donde en el extremo izquierdo se visualiza una zona de recarga de los acuíferos, la zona de infiltración, una fuente de calor (una intrusión magmática y/o volcanismo activo) que produce una anomalía térmica a su alrededor y calienta el agua del acuífero y una zona impermeable o "caprock" (en marrón) por encima que entrapa el agua y fluidos calientes y produce un yacimiento geotérmico que puede ser perforado y explotado mediante pozos geotérmicos. En el extremo derecho se idealiza un campo geotérmico por emanación de manantiales termales genéticamente relacionados al gradiente geotérmico regional (tomado de Viramonte et al., 2024).

geotermiales, piscinas burbujeantes, etc., que representan diversas formas de manifestación de esas anomalías térmicas existentes en profundidad.

Queda claro entonces que existe una estrecha relación entre el marco geológico, geotectónico e hidrogeológico con el geotermalismo. También es fácil visualizar que las manifestaciones geotermiales pueden representar procesos, situaciones y orígenes muy distintos, por lo cual es preciso realizar su estudio, para conocer el mecanismo que las genera. De esta manera podemos determinar si una manifestación es una fumarola, en el cráter o las laderas de un volcán, o bien en el otro extremo, una fuente termal producida simplemente por la infiltración profunda de agua meteórica, que debido a situaciones tectónicas favorables afloran en superficie (Figura 4). Más complicadas son las manifestaciones híbridas, en donde existe una sumatoria de factores.

Las características físicas, fisicoquímicas y geoquímicas del geotermalismo, serán muy diferentes dependiendo de su origen, pudiendo determinar el verdadero mecanismo que las genera mediante su análisis y estudio.

Por lo antes expuesto, tal como lo señalan Viramonte et al. (2024), el análisis del potencial del geotermalismo en el Noroeste Argentino, debe estar inserto en un estudio en conjunto con el marco geológico, volcanológico y geotectónico de la región, a los que se deben sumar los análisis de sus

características fisicoquímicas, geoquímicas, termodinámicas, etc. Ello nos permitirá conocer el origen y naturaleza de las fuentes termales y de esta manera estimar su potencial regional.

Marco geológico regional

La cordillera de los Andes es el rasgo geológico – geomorfológico más importante producido por la subducción (es decir, el hundimiento) de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa litosférica continental sudamericana (Figura 5). Este fenómeno produce un cordón montañoso de orientación sub-meridiana, siendo el volcanismo durante el Cenozoico allí existente, también el producto de este mismo proceso.

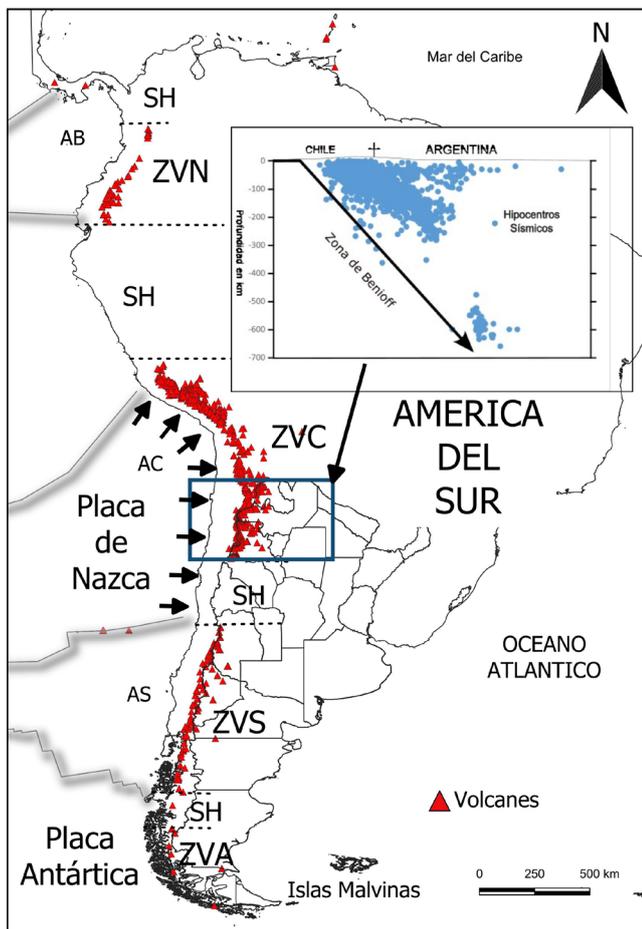


Figura 5. La figura muestra la distribución de volcanes recientes (desde aproximadamente 23 Ma hasta el presente), en la geografía de Sudamérica lo cual define las zonas volcánicas o Arco Magmático (<https://www.insugeo.org.ar/publicaciones>). La ventana de detalle es una sección que muestra la distribución de hipocentros sísmicos históricos (1692-1992) en el NOA (CERESIS, 2024; tomado de Viramonte et al., 2024).

Uno de los rasgos topográficos más sobresalientes de los Andes Centrales es el desarrollo de una altiplanicie denominada *plateau* de la Puna Argentina-Altiplano Peruano-Boliviano o *plateau* Andino, el cual constituye uno de los mayores del mundo, superado solo por el Tíbet.

El magmatismo de los últimos 65 millones de años (Ma) de los Andes Centrales, es coherente con una placa en subducción bajo el Altiplano Austral y la Puna, que aumentó su ángulo a través del tiempo. La información geofísica existente evidencia la presencia de áreas con roca fundida (zonas de fusión parcial) en niveles medios de la corteza, debajo del Altiplano boliviano y del sector norte de la Puna. Las zonas de fusión son muy importantes desde el punto de vista geotermal, ya que están indicando la presencia de una anomalía térmica regional asociada a esas regiones.

Geotermalismo

Los sistemas geotérmicos aparecen normalmente en zonas de la Tierra que tienen

un flujo de calor elevado y configuraciones estructurales que respaldan una eficaz circulación de fluidos a través de redes de fracturas. Cuando el flujo de calor está relacionado con intrusiones magmáticas, el sistema geotermal desarrollado es producto de la interacción entre: a) un cuerpo magmático, que actúa como fuente de calor; b) fluidos meteóricos que se infiltran desde la superficie y se calientan en profundidad; c) fluidos calientes, aportados por el magma (pueden ser ocasionales); d) un reservorio permeable o reservorio geotérmico que contiene a los fluidos calientes, y e) una roca impermeable por encima del reservorio llamada sello o caprock (Figura 4) (e.g., Stimac et al., 2015). Las fallas actúan como vías preferentes para la migración ascendente y la eventual liberación de los fluidos de origen profundo hacia acuíferos someros o directamente a la atmósfera. Las expresiones superficiales hidrotermales pueden ser visibles, como manantiales termales y fumarolas, así como emisiones difusas, no visibles a través de los suelos.

Por otro lado, existen zonas de la Tierra donde por situaciones propicias tanto geológicas, geotectónicas y estructurales, las aguas meteóricas se infiltran a altas profundidades (2-3 km), se calientan por gradiente geotérmico (ya sea normal o anómalo) y, por condiciones tectónicas favorables, ascienden y afloran en superficie. Estas aguas y fluidos calientes por diversas situaciones se pueden acumular y entrapar, formando campos geotermales (Figura 4). Por otro lado, pueden existir innumerables situaciones mixtas y especiales asociadas a la variación del gradiente geotérmico, el cual puede estar influenciado por condiciones geológicas y geotectónicas especiales tales como la presencia de intrusiones magmáticas someras, zonas de adelgazamiento de la corteza

Desde el punto de vista térmico, los fluidos geotermales, al tener diferentes temperaturas, se clasifican generalmente como:

De alta temperatura que son aquellos que presentan temperaturas superiores a 150 °C, denominados *hipertermales*. Son yacimientos de los cuales se puede extraer fácilmente calor para producir energía eléctrica en forma directa. Se localizan principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados, principalmente volcánicos y se sitúan a profundidades muy variables.

De temperatura media que generalmente alcanzan temperaturas entre 100 y 150 °C (*mesotermales*), lo cual permite su aprovechamiento para producción de electricidad mediante procesos especiales, pero con un rendimiento menor que los de alta temperatura. Pueden ser aprovechados directamente en forma de calor para sistemas de calefacción urbanos o usos industriales. Se localizan en áreas con un contexto geológico y estructural favorable y un gradiente superior a la media.

De baja temperatura con temperaturas entre 30 y 100 °C, llamados *hipotermales*. Su utilización está dirigida a usos térmicos en sistemas de calefacción urbanos, en procesos industriales y especialmente en balneoterapia. Se localizan habitualmente en zonas con un contexto geológico favorable con presencia de acuíferos profundos.

De muy baja temperatura son yacimientos localizados unos metros por debajo de la superficie del suelo y la temperatura es inferior a los 30 °C (*atermales*). Se suelen utilizar como intercambiador térmico en sistemas de climatización mediante bombas de calor. Estos yacimientos se pueden localizar en cualquier punto, ya que el gradiente geotérmico sólo condiciona la eficiencia del sistema. El rendimiento de estas bombas de calor es mayor que si se intercambia con el aire exterior.

con zonas de fusión parcial, zonas de fracturamiento profundo, etc. que condicionarán la naturaleza del geotermalismo que se pueda generar (Figura 4).

Relaciones entre la geología y el geotermalismo en el NOA

En la Figura 6 se indican la mayoría de las fuentes y pozos termales al presente conocidos (coloreadas según sus temperaturas), sobre un mapa de las provincias geológicas existentes en el NOA y sus rasgos tectónicos y estructurales más importantes.

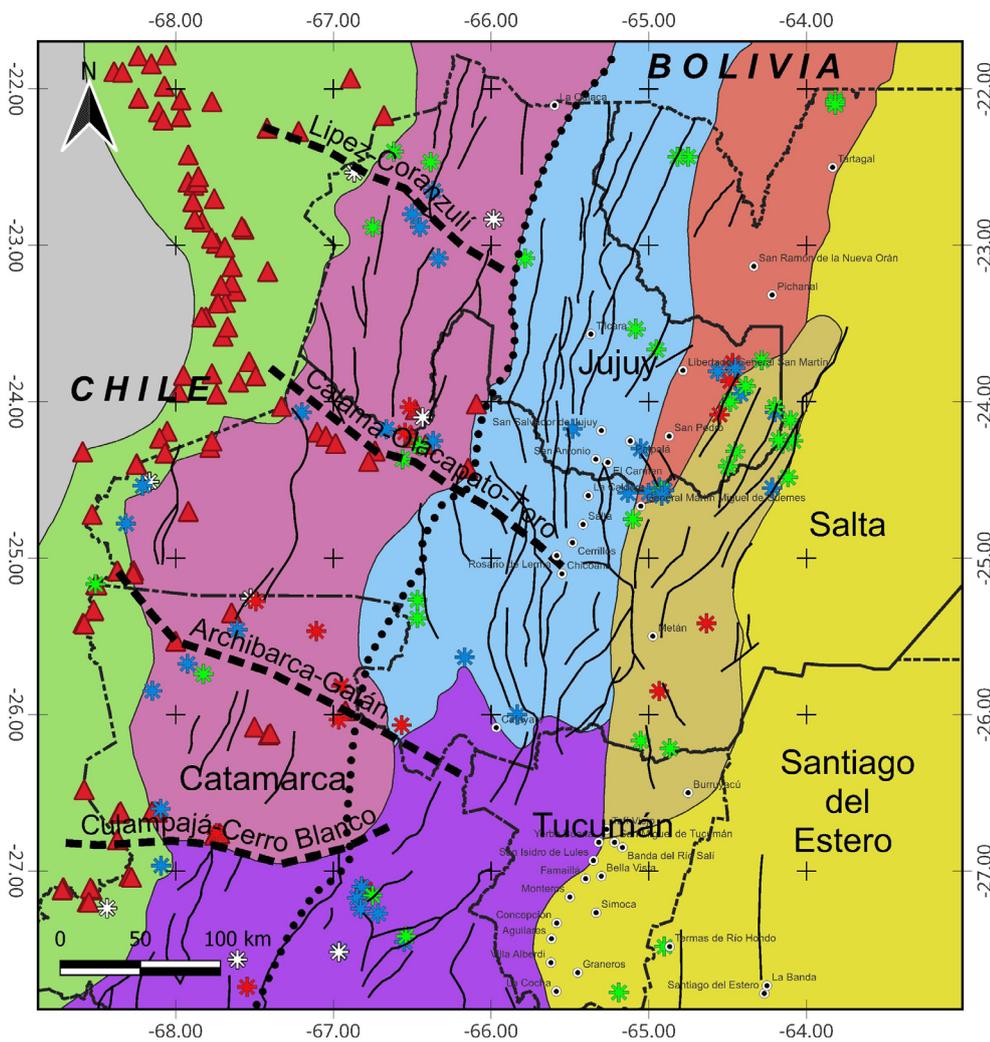
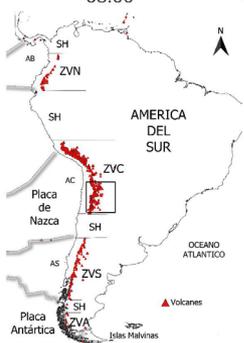


Figura 6. Mapa mostrando las distintas provincias geológicas del NOA (Arco Volcánico activo actual, área de la Puna con volcanismo activo, Área de Cordillera Oriental, Sierras Subandinas, Sistema de Santa Bárbara y Sierras Pampeanas y Área de la llanura Chaqueña), sus principales características tectónicas y las fuentes termales existentes. La línea de puntos separa el área con fuentes termales asociadas al volcanismo activo (hacia el oeste) y las asociadas a infiltración profunda de agua meteórica (hacia el este) con gradiente geotérmico normal o anómalo (tomado de Viramonte et al., 2024).



REFERENCIAS

- | | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| ●●● Limite zonas termales | Unidades Morfoestructurales del NOA |
| — Lineamientos | Arco Magmático |
| ▲ Volcanes | Cordillera Oriental |
| ○ Ciudades | Llanura Chaqueña |
| ▭ Provincias Argentinas | Puna |
| — Estructuras Geológicas | Sierras Pampeanas |
| | Sierras Subandinas |
| | Sistema de Santa Barbara |
-
- | | |
|--|--------------|
| Clasificación Termal según temperatura | |
| ☼ Atermal | ★ Hipotermal |
| ★ Hipertermal | ★ Mesotermal |

En la provincia geológica Puna se observa una marcada asociación del geotermalismo con el volcanismo, como así también al tectonismo. Las características geoquímicas de esas fuentes, señalan que la mayoría de ellas son derivadas y están relacionadas al fenómeno volcánico. Se destaca la presencia de fuentes termales asociadas a la cadena volcánica principal, conformada por grandes estratovolcanes de orientación submeridiana del límite Argentina-Chile-Bolivia, pudiéndose aquí señalar solo a manera de ejemplo, la presencia del importante campo geotermal de Socompa, asociado a la actividad del volcán homónimo que ya ha sido objeto de valoración para su posible explotación económica.

Por otro lado, puede observarse geotermalismo asociado a la penetración de ese volcanismo hacia el este, siguiendo los lineamientos tectónicos de orientación NNO-SSE señalados por Viramonte et al. (1984). En este sentido es de destacar la presencia de importantes campos geotermales asociados, tales como los de Tocomar, Tuzgle y Pompeya (Figura 7), directamente asociados a la megaestructura de orientación NNO-SSE Calama-Olacapato-El Toro (COT). En el yacimiento Tocomar se ha identificado una anomalía térmica reciente asociada al Centro Volcánico Tocomar de edad pleistocena (0,5 Ma) que sería la fuente calórica que produciría la actividad geotermal actual, donde la fracturación generada por el COT brinda las condiciones de permeabilidad y proporciona las vías



Figura 7. Pozo termal en las Termales de Pompeya. Departamento Los Andes, Salta (tomado de Viramonte et al., 2024).

principales para el ascenso de fluidos calientes y profundos a lo largo de fallas de rumbo NNO-SSE y la malla de fracturas asociadas.

Del mismo modo el yacimiento Tuzgle está asociado a la misma estructura transversal y al volcán homónimo, así como las Termas de Pompeya cercanas a San Antonio de los Cobres (Figura 7) y que ya ha sido objeto de valoración para su explotación desde el punto de vista económico. Especial interés presentan las termas Puente del Diablo y Domo Travertínico, localizadas directamente en el Frente Púnico en el extremo norte del Valle Calchaquí (Figura 8).



Figura 8. Termas de la Poma, mantos de travertinos. Valles Calchaquíes, Salta (tomado de Viramonte et al., 2024).

Últimamente, diversos estudios realizados han detectado zonas de favorabilidad geotérmica para toda la región NOA, marcando entre los prospectos más importantes para la región de la Puna el volcán Llullaillaco, laguna Lastarria, Caldera del Cerro Galán, Caldera del Cerro Blanco, entre otros (Figura 9).



Figura 9. Estudio de las emisiones difusas de CO_2 en el sistema geotermal del cerro Galán, Catamarca (tomado de Viramonte et al., 2024).

Todos las investigaciones realizadas marcan, en general, para el geotermalismo de la región Puna, una relación estrecha con el fenómeno volcánico con posibles temperaturas de reservorio altas a muy altas, por lo cual se puede visualizar para esta región la posibilidad de yacimientos geotérmicos aptos para la generación de energía eléctrica por uso directo del vapor de los mismos. El incremento de la demanda energética en la región Puna por el desarrollo de numerosos emprendimientos mineros, especialmente de litio, hace que la explotación de la energía geotérmica sea una opción económicamente posible. Por último, es importante recalcar que la energía geotérmica no solo es una opción económica posible, sino que a su vez tiene la ventaja de ser una energía limpia (con baja huella de carbono), lo que aumenta su valor.

Hacia el este de la Puna se desarrollan las provincias geológicas de Cordillera Oriental, Sierras Subandinas, Sistema de Santa Bárbara, Sierras Pampeanas y llanura Chaqueña (Figura 6). De manera diferente a lo descrito anteriormente, cuando se analiza el geotermalismo allí presente, se observa que las características geoquímicas de las mismas, señalan que el calentamiento está producido solo

por gradiente geotérmico. Este gradiente varía según las zonas, existiendo áreas donde es normal y otros anómalo. Asimismo, es una constante común, que las fuentes termales estén asociadas al sistema de fracturamiento y plegamiento, que constituyen los elementos estructurales más importantes (Figura 4).

Este sistema estructural permite que el agua meteórica se infiltre generalmente aprovechando los sedimentos rojos del Cretácico (aproximadamente 100 Ma) presente en toda la región y alcance profundidades muy grandes, se caliente por gradiente geotérmico que en algunos casos es anómalo, produciendo diferentes campos geotermales, fundamentalmente de temperatura media. Uno de los más conocidos es el de Rosario de la Frontera, provincia de Salta, en donde el reservorio está localizado a profundidades mayores de 2000 m en los sedimentos rojos del Cretácico y con fluidos que presentan temperaturas del orden de 130 °C. Otros campos geotermales importantes presentes en este mismo ambiente son El Sauce: 106 °C, El Galpón: 111 °C, La Quinta/El Palmar: 130-200 °C, Caimancito: 100-177°C, El Jordán, Siete Aguas: 75° C y otros, lo que habla de la importancia del recurso y sus posibilidades de explotación económica en el futuro.

Por último, cabe mencionar las manifestaciones y pozos termales localizados en la Llanura Chaqueña, tales como Termas de Río Hondo en Santiago del Estero y Taco Ralo en Tucumán entre los más importantes. En Termas de Río Hondo desde el punto de vista hidrogeológico posiblemente constituye un sistema multiacuífero inserto en la región denominada "Gran Chaco", limitado hacia el oeste por los acuíferos tucumanos originados en el faldeo oriental de las sierras de Aconquija, la alineación de las sierras de Guasayán y la dorsal Mujer Muerta, denominadas "Dorsal Oriental de Tucumán", de orientación N-S y constituye una barrera natural natural para el flujo superficial que se mueve hacia el este, que solo es sobrepasado a la altura de Termas de Río Hondo por el río Salí. El flujo subterráneo es interrumpido por esta barrera que ocasiona la ascensión de flujos termales justo en el entorno de la ciudad de Termas de Río Hondo. No obstante, otros autores sostienen que no hay evidencias de dicha interrupción y que la surgencia se debe más bien a que los sedimentos que contienen el reservorio de agua (acuíferos) en esta zona tienen tamaño de grano más pequeño.

Diversos estudios tanto hidrogeológicos como geofísicos, han mostrado la existencia de importantes acuíferos geotérmicos asociados a un adelgazamiento de la corteza en dicha región, con presencia de posibles zonas de fusión parcial. Asimismo, es una de las zonas de sismos profundos más importantes de la Argentina (Figura 10). Todos estos elementos estarían indicando la presencia en profundidad de una fuente de calor que produciría el geotermalismo en la región.

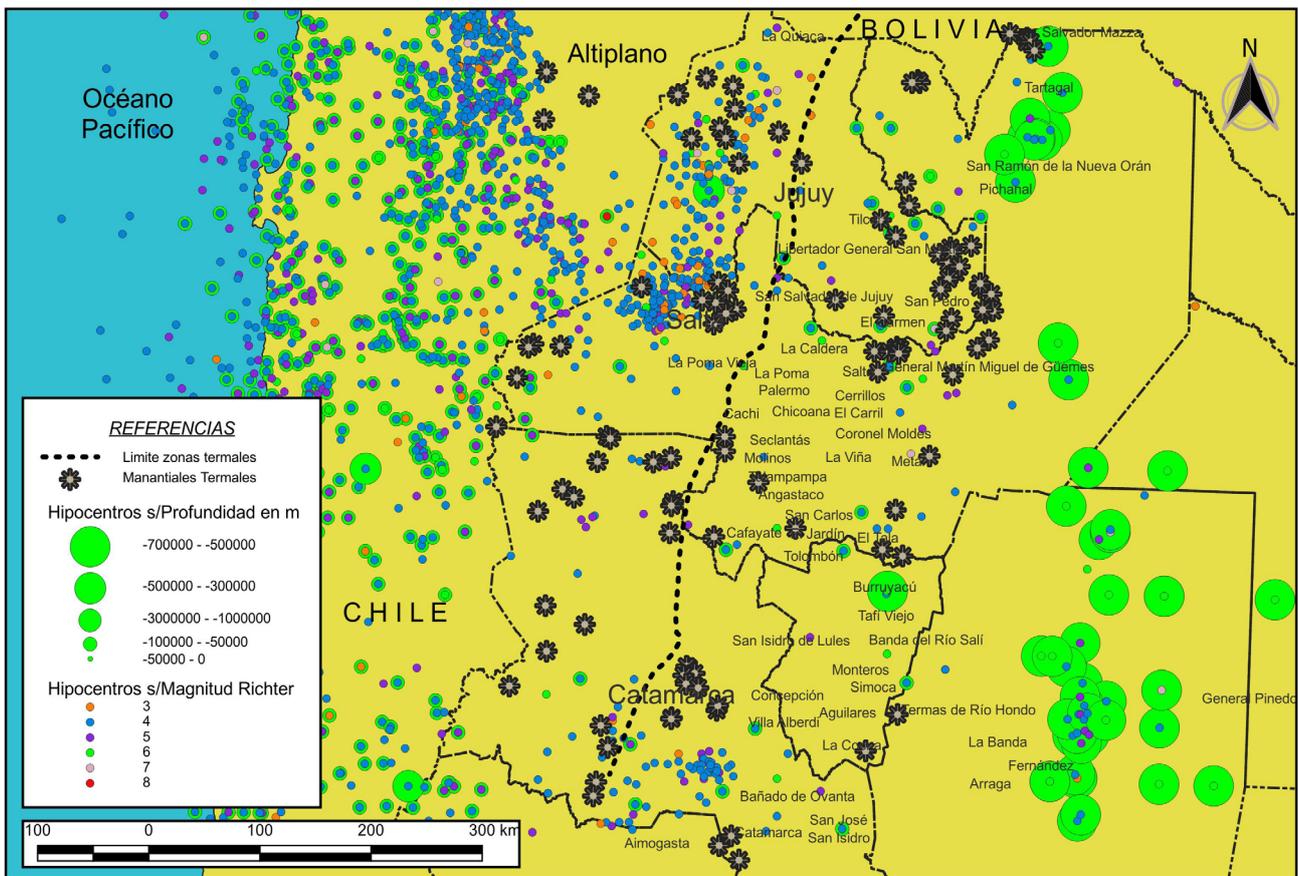


Figura 10. Mapa de distribución de manantiales termales e hipocentros sísmicos históricos del NOA (1692 a 1992) según profundidad y magnitud de Richter (tomado de Viramonte et al., 2024).

En esta área, tradicionalmente se ha utilizado el geotermalismo para su uso directo, constituyendo uno de los más importantes centros de balneoterapia de Argentina. Las temperaturas de las aguas termales son consideradas de temperatura media existiendo importantes caudales en muchos de los pozos perforados evidenciando que esta área termal tiene un elevado potencial de uso, tanto sea para la generación de energía eléctrica como para su uso directo para diversas aplicaciones incluida la balneoterapia.

Todo lo expuesto anteriormente, indica con bastante claridad la existencia de estrechas relaciones entre el geotermalismo, la geología, la tectónica y el ambiente geodinámico.

En el Noroeste Argentino podemos trazar una primera separación (Figura 6) entre la zona de la provincia geológica Puna, donde el geotermalismo está vinculado fundamentalmente al volcanismo activo allí presente, de las provincias geológicas Cordillera Oriental, Sierras Subandinas, Sistema de Santa Bárbara, Sierras Pampeanas y llanura Chaqueña donde el geotermalismo se asocia a infiltración de agua meteórica a grandes profundidades por condiciones tectónicas favorables, en zonas con gradientes geotérmicos ya sea normales o anómalos debido a eventos geodinámicas diversos.

Nota: Esta es una versión resumida y adaptada para divulgación científica del artículo de Viramonte et al. (2024), *Relaciones entre la geología, volcanismo y geotermalismo en el Noroeste Argentino*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta contribución queremos agradecer a las Editoras de esta Revista por sus detallados comentarios que mejoraron sustancialmente la calidad de nuestro artículo.

REFERENCIAS

AHUMADA MF, R FILIPOVICH, A CHIODI, W BÁEZ, J VIRAMONTE. 2019. El aprovechamiento del calor de los Andes para el desarrollo energético sustentable. [Temas de Biología y Geología del NOA, 9 \(1\): 18-26.](#)

CERESIS, Centro Regional de Sismología para América Latina. 2024. <https://ceresis.org>

ORTIZ A. 2021. Circón: un pequeño gran mineral. [Temas de Biología y Geología del NOA, 11 \(3\): 11-20.](#)

STIMAC J, F GOFF, C GOFF. 2015. Intrusion-related geothermal Systems. pp. 800-822. En Sidgurdsson H, B Houghton, S McNutt, H Rymer, J Stix (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*, 2º Edición.

VIRAMONTE JG, MA GALLISKI, V ARAÑA SAAVEDRA, A APARICIO, L GARCÍA CACHO, C MARTÍN ESCORZA. 1984. El finivulcanismo básico de la depresión de Arizaro, provincia de Salta, República Argentina. IX Congreso Geológico Argentino, Actas III: 234-254.

VIRAMONTE JG, A CHIODI, R FILIPOVICH, E BUSTOS, C PERALTA. 2024. Relaciones entre la geología, volcanismo y geotermalismo en el Noroeste Argentino. *Revista Ciencia e Investigación. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias*, 74 (2): 5- 25.