

ESTUDIO MULTIDISCIPLINARIO DEL SISTEMA GEOTERMAL DE ROSARIO DE LA FRONTERA, SALTA, ARGENTINA

Agostina L. CHIODI¹, Walter A. BÁEZ¹, Roberta MAFFUCCI², Lea DI PAOLO², José G. VIRAMONTE¹, Chiara INVERNIZZI³, Sveva CORRADO², PietroPaolo PIERANTONI³, Franco TASSI⁴, Guido GIORDANO²

¹ GEONORTE - INENCO (UNSa – CONICET), Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina. E-Mail: agoch18@hotmail.com

² Department of Earth Sciences, University of “Roma Tre”, 00146 Roma, Italy

³ School of Science and Technology, University of Camerino, 62032 Camerino, Italy

⁴ Department of Earth Sciences, University of Florence, Florencia, Italy

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio multidisciplinario realizado en el sistema geotermal de Rosario de la Frontera (25°50.047'S 64°55.715'O), provincia de Salta, Argentina, en el marco del Proyecto C.U.I.A. 2011-12: “Esplorazione e utilizzo di risorse geotermiche di media e bassa entalpia in area subandina per lo sviluppo energetico sostenibile delle città delle province di Jujuy e Salta”. El enfoque multidisciplinario contempló la utilización de técnicas convencionales en estudios geotérmicos (geofísica, geología estructural, estratigrafía, geoquímica de fluidos, etc.) como así también la aplicación de técnicas más relacionadas a la industria del petróleo (análisis paleotermal de indicadores orgánicos e inorgánicos, modelado numérico de la permeabilidad secundaria del reservorio). El sector de estudio se localiza en el extremo septentrional de la Sierra de La Candelaria (anticlinal Termas), Sistema de Santa Bárbara, donde la deformación compresiva ocurrida desde el Mioceno a la actualidad ha generado una faja corrida y plegada de piel gruesa (Kley y Monaldi 2002 y citas allí). La fase compresional andina, a su vez, provocó la inversión de forma selectiva de fallas normales asociadas al *rift* cretácico (Cristallini *et al.* 1997 y citas allí). La sucesión estratigráfica en el anticlinal de La Candelaria está compuesta por el basamento metamórfico de bajo grado (Formación Medina, Precámbrico-Cámbrico), seguido en discordancia por la secuencia sedimentaria de *rift* del Grupo Salta (Cretácico-Eoceno). La sucesión estratigráfica finaliza con los depósitos *syn-orogénicos* de la cuenca de antepaís del Grupo Orán (Mioceno-Pleistoceno). En el extremo septentrional de la Sierra de La Candelaria se localizan 13 manifestaciones hidrotermales superficiales con temperaturas que varían desde 22.7 a 93.3°C. La mayoría de las muestras de agua son del tipo clorurada alcalina, mientras que algunas son bicarbonatadas sódicas (Chiodi *et al.* 2012a,b). Estimaciones de las temperaturas subsuperficiales realizadas en base a geotermómetros acuosos arrojan valores que varían entre 57 y 137°C, similares a los estimados por Seggiaro *et al.* (1995) entre 90 y 130°C. La fase gaseosa asociada a las fuentes de aguas termales se presenta como gas burbujeante y como gas disuelto. Está compuesta principalmente por CO₂ (entre 139 y 960 mmol/mol) y N₂ (entre 28 y 841 mmol/mol). Los gases que muestran el contenido más elevado en CO₂ (alrededor de 955 mmol/mol) presentan las mayores concentraciones en H₂S (hasta 3.6 mmol/mol), H₂ (hasta 0.022 mmol/mol) y CH₄ (hasta 0.115 mmol/mol), y menores concentraciones en gases atmosféricos (O₂, Ar y Ne) respecto a las muestras de gases ricas en N₂ (Chiodi *et al.* 2012a,b). Los valores de las relaciones isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ promedio = - 6,7 ‰, δD promedio = - 37 ‰ V-SMOW) (Chiodi *et al.* 2012a,b) y del contenido en ³H (promedio = 0.05 U.T.) (Invernizzi *et al.* enviado) obtenidos a partir del análisis de las muestras de agua indican un origen meteórico para la recarga del acuífero termal y un prolongado tiempo de residencia del agua dentro del acuífero (>50 años). Con respecto a la fase gaseosa los valores de las relaciones ¹³C/¹²C en CO₂ ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$ entre - 7.13 y - 3.66 ‰ V-PDB) (Chiodi *et al.*, 2012a,b) son consistentes con un origen predominantemente mantélico para el mismo. Se encuentran en curso determinaciones isotópicas para establecer las relaciones ³He/⁴He, destinadas a corroborar la posible contribución de helio a partir de la desgasificación mantélica. Trabajos previos (Moreno Espelta *et al.* 1975, Seggiaro *et al.* 1997) sugieren como roca reservorio del sistema geotermal al Subgrupo Pirgua. En este sentido se realizaron determinaciones de laboratorio y modelados numéricos (Discrete Fracture Network models) para la caracterización petrofísica del reservorio. Valores de permeabilidad primaria de 81.2 mD (Invernizzi *et al.* enviado) sumada a la permeabilidad secundaria, en el rango de 12 a 15 mD (Maffucci *et al.* 2013), del Subgrupo Pirgua confirman su potencialidad como roca reservorio. El volumen estimado del reservorio (Maffucci *et al.* 2013) es de aprox. 53 km³, con un espesor promedio de 450 m, que en el sector norte del anticlinal alcanza un máximo de profundidad de 2.400 m. El análisis paleotermal de los indicadores orgánicos e inorgánicos (di Paolo *et al.* 2012, Corrado *et al.* 2013) estuvo enfocado principalmente en determinar el potencial como roca sello de diferentes formaciones de *post-rift* y *syn-orogénicas* (ej. Formación Yacoraite, Río Seco, Anta y Jesús María). La signature térmica de cada roca se relaciona directamente con el estado de preservación (zonas sin fracturación vs zonas fracturadas o alteradas) y la distancia al área de las termas. En la Sierra de La Candelaria, en zonas distales del área de las termas, la madurez térmica de las rocas analizadas se debe principalmente al calor transferido por conducción durante el soterramiento.

Los valores obtenidos son mayores en comparación con otras áreas de similares características geotectónicas sugiriendo un gradiente geotérmico actual de 40°C/km, ligeramente menor al propuesto por Seggiaro *et al.* (1995) de 43.3°C/km. En el sector de las termas, la madurez térmica de las rocas estudiadas se debe también al proceso de convección y es mayor en comparación con otras áreas de la Sierra de La Candelaria, debido a la influencia localizada que ejercen los fluidos hidrotermales. Los resultados obtenidos permiten proponer al Subgrupo Metán como la roca sello del sistema geotermal debido a i) su baja permeabilidad ii) su eficacia como aislante térmico (di Paolo *et al.* 2012, Corrado *et al.* 2013). Estudios de audio-magnetotélúrica (Barcelona *et al.* 2013) identificaron dos zonas de elevada conductividad. La primera, a escasa profundidad (~100 m), de aprox. 300 m de espesor, distribuida hacia el norte, este y oeste del anticlinal Termas, la cual representaría acuíferos superficiales de pequeñas dimensiones. La segunda, a mayor profundidad (~500 m), localizada debajo de las termas y hacia el SE, probablemente relacionada al ascenso de fluidos termales profundos a través de las estructuras. Se propone la porción norte de la sierra de La Candelaria como la zona más favorable para la recarga del acuífero termal (Invernizzi *et al.* enviado), como fue sugerido anteriormente por Seggiaro *et al.* (1997). Un balance hidrogeológico local positivo sumado a un prolongado tiempo de residencia en profundidad (>50 años) (Invernizzi *et al.* enviado) son favorables para que el agua alcance temperaturas >100°C y desencadene procesos convectivos dentro del sistema geotermal. Los estudios realizados permiten proponer un modelo conceptual para el sistema geotermal de Rosario de la Frontera en el cual las precipitaciones locales se infiltran en los afloramientos de la Formación Pirgua (reservorio principal profundo) en el sector norte del anticlinal de La Candelaria y circula en sentido sur-norte. En el área de las termas el reservorio alcanza profundidades del orden de los 2.4 km permitiendo al agua alcanzar temperaturas de hasta 137°C en un gradiente geotérmico ligeramente superior al normal (40 °C/km). El Subgrupo Metán actúa como roca sello del acuífero termal profundo, sin embargo dentro del mismo existen acuíferos de pequeño volumen con los cuales el fluido termal profundo se mezcla en diferentes proporciones en su ascenso a superficie a través de las estructuras.

- Barcelona, H., Favetto, A., Peri, V., Pomposiello, C., Ungarelli, C. 2013. The potential of audiomagnetotellurics in the study of geothermal fields: A case study from the northern segment of the La Candelaria Range, northwestern Argentina. *Journal of Applied Geophysics* 88: 83-93.
- Chiodi, A., Tassi, F., Báez, W., Maffucci, R., Di Paolo, L., Viramonte, J.G. 2012a. Características geoquímicas e isotópicas de los fluidos hidrotermales del sistema geotérmico de Rosario de la Frontera, Sierra de la Candelaria, Salta, Argentina. 11° Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y 4° Congreso Colombiano de Hidrogeología, Colombia.
- Chiodi, A., Tassi, F., Báez, W., Maffucci, R., Di Paolo L., Viramonte J.G. 2012b. Chemical and isotope characteristics of the Rosario de la Frontera geothermal fluids, La Candelaria Range (Salta, Argentina). 86° Convegno SGI, Actas 21: 800-801, Arcavacata di Rende-Cosenza, Italia.
- Corrado, S., Aldega, L., Bigi, S., Chiodi, A., Di Paolo, L., Maffucci, R., Invernizzi, C. (submitted). Cap rock effectiveness of geothermal systems in fold and thrust belts: evidence from paleo-thermal and structural investigations in Rosario de La Frontera geothermal area (NW Argentina). *Terra nova*.
- Cristallini, I.E., Cominguez, A.H. y Ramos, V.A. 1997. Deep structure of the Metan-Guachipas region: tectonic inversion in Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 10: 403-421.
- Di Paolo, L., Aldega, L., Corrado, S., Giordano, G., Invernizzi, C. 2012. Modelling of organic and inorganic paleo-thermal indicators to constrain the evolution of the geothermal system of Rosario de La Frontera (La Candelaria Ridge, NW Argentina): a new tool for geothermal exploration. 86° Convegno SGI, Actas 21: 807-808, Arcavacata di Rende-Cosenza, Italia.
- Invernizzi, C., Pierantoni, P.P., Chiodi, A., Maffucci, R., Corrado, S., Báez, W., Tassi, F., Giordano, G., Viramonte, J.G. (enviado). Preliminary assessment of the geothermal potential of Rosario de la Frontera area (Salta, NW Argentina): insight from hydro-geological, hydro-geochemical and structural datasets. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Kley, J. y Monaldi, C.R. 2002. Tectonic inversion in the Santa Barbara System of the central Andean foreland thrust belt, northwestern Argentina. *Tectonics* 21: 1111-1118.
- Maffucci, R., Bigi, S., Chiodi, A., Corrado, S., Di Paolo, L., Giordano, G. 2013. Reconstruction of a “Discrete Fracture Network” in the geothermal reservoir of Rosario de La Frontera (La Candelaria Ridge, Salta province, NW Argentina). *Proceedings of the European Geothermal Congress*, 978-2-8052-0226-1, Pisa, Italy.
- Moreno Espelta, C., Viramonte J.G. y Arias J.E. 1975. Geología del área termal de Rosario de la Frontera y sus posibilidades geotérmicas. 2° Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, Actas IV: 543-548, Buenos Aires.
- Seggiaro, R., Aguilera, N., Gallardo, E. y Ferretti, J. 1995. Structure and geothermal potential of the Rosario de la Frontera termal área. Salta, Argentina. *World Geothermal Congress*, 2:764-767, Florence, Italy.
- Seggiaro, R., Aguilera, N., Ferretti, J., Gallardo, E. 1997. Estructura del área geotérmica de Rosario de la Frontera, Salta, Argentina. 8° Congreso Geológico Chileno. Actas 2: 390-394, Antofagasta, Chile.