

Interacción agua-roca y mezcla de aguas mediante el estudio de la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Pampa Lirima, Altiplano I Región, Chile

Luciano Achurra^{1*}, Emilio Custodio², Igor Aguirre¹, Catalina Mayorga¹, Rodrigo Arcos¹ y Jorge Clavero¹

¹ *Energía Andina S.A. Darío Urzúa 2165, Providencia, Santiago, Chile*

² *Universidad Politécnica de Catalunya. Jordi Girona 1-3, UPC Campus Norte, Edificio D2, 08034, Barcelona, España.*

*Email: lachurra@energiandina.cl

Resumen. En la cuenca de Lirima, ubicada en el Altiplano de la I Región, afloran aguas de distinta salinidad, temperatura (hasta 80°C) y composición química. Mediante el uso de los isótopos de Sr de las aguas se determinó que dos zonas de descarga de aguas de alta temperatura (BPL y BSA) provienen de distintos acuíferos. Las aguas del acuífero aluvial y posiblemente de un acuífero fisurado someros se originan por procesos de mezcla que involucran aguas de mayor profundidad asociadas a actividad geotérmica. El análisis de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ realizados en rocas y aguas subterráneas indican que el acuífero de aguas calientes que descarga en los BSA (<60°C) se compone de lavas dacíticas del Mioceno Superior y el acuífero que descarga las aguas de los BPL (<80°C) estaría asociado a ignimbritas del Mioceno Inferior. La interacción agua-roca que condiciona la composición $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua provendría principalmente de la meteorización de feldespatos.

Palabras clave: Lirima, acuífero, isótopos, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

1 Introducción

Los isótopos de Sr se diferencian de los isótopos estables livianos debido a que no se fraccionan significativamente con la evaporación, disolución o procesos bioquímicos. Por lo tanto, sólo la interacción agua-roca controla la razón isotópica del Sr en el agua (Naftz et al., 1997; Lent et al., 1997; Mook, 2001). Cuando una roca se meteoriza la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la solución producida es la misma que la de los minerales meteorizados (e.g. feldespatos y carbonatos). Esta propiedad hace que la razón isotópica del Sr pueda ser utilizada como un trazador confiable para la determinación de orígenes, evaluar mezclas entre aguas subterráneas y para el estudio del equilibrio isotópico entre el agua subterránea, las rocas y minerales que contienen Sr. Por lo tanto, la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el agua será función del “Sr meteorizable” y de su proporción en el Sr total en el agua (Aberg et al., 1989). De esta manera, uno de los principales problemas en los estudios que utilizan los isótopos de Sr como trazador está en la definición de la composición isotópica de este Sr derivado de la meteorización.

En este trabajo se presentan los resultados de análisis isotópicos de Sr de rocas y aguas subterráneas de la zona de Pampa Lirima, ubicada en el Altiplano de la I Región

(ver Figura 1). Se determina el origen y procesos que afectan las aguas subterráneas de distintos acuíferos, la interacción agua-roca y se correlacionan los valores de agua con los de rocas de forma de determinar la litología de los acuíferos y fase mineral meteorizada, en particular aquellos asociados a actividad geotérmica y de los cuales no se tiene información previa.

2 Antecedentes hidrogeológicos

La cuenca de Lirima (Figura 1) tiene una superficie de 183,5 km², una elevación promedio de 4400 msnm, una mínima de 4000 msnm y máxima de casi 5800 msnm. Forma parte de la cuenca de la quebrada Tarapacá, de la cual es afluente el río Coscaya que lleva mayoritariamente aportes subterráneos a través de quebradas afluentes que descargan acuíferos fisurados en los sectores altos y medios de la cuenca y granulares en la zona baja, totalizando un flujo base en torno a los 115 L/s (Achurra, 2010). La precipitación media anual es de 133 mm, ocurriendo más del 90% de éstas entre los meses de diciembre y marzo durante el invierno boliviano.

La geología de la zona, simplificada de Arcos (2010), se muestra en la Figura 1 y se compone de un basamento de rocas sedimentarias y volcánicas del Jurásico-Cretácico (JK) que aflora fuera del extremo occidental de la cuenca, donde es intruído por un plutón de edad eocena (E). Sobre ellas, mediante discordancia angular, se disponen unidades de ignimbritas con intercalaciones sedimentarias y lavas del Oligoceno-Mioceno Inferior, mientras que al sureste de la cuenca afloran tobas del Mioceno Inferior a Medio (OIMm). Los cerros que rodean la cuenca se componen de unidades volcánicas del Mioceno Medio a Plioceno, en las cuales es posible reconocer 3 franjas de orientación general noroeste-sureste, compuestas por lavas del Mioceno Medio (Mm), lavas dacíticas del Mioceno Superior (Ms) y lavas dacíticas del Plioceno (P), respectivamente. La zona de alteración hidrotermal (Ah) más extensa se encuentra afectando las lavas del Mioceno Superior del este de la cuenca. En este sector se ubican manantiales de aguas sulfatadas cálcico-sódicas (Figura 1 y Figura 2), con temperaturas de hasta 60°C denominados Baños San

Andrés (BSA). La parte central y más deprimida de la cuenca (4000 msnm) corresponde a una planicie compuesta por depósitos no consolidados del Plioceno a Holoceno (PH), de origen principalmente aluvial y fluvial y que forman un acuífero aluvial. En la parte occidental de esta pampa se ubican los Baños Pampa Lirima (BPL) de composición clorurada-sulfatada sódica (Figura 1 y Figura 2) y temperaturas de hasta 80°C.

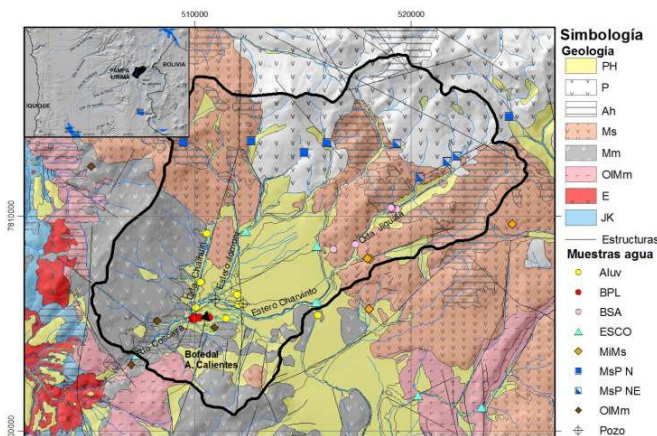


Figura 1. Mapa de ubicación (extremo izquierdo superior) y mapa geológico (simplificado de Arcos, 2010) y ubicación de muestras. Simbología geológica; JK: Basamento Jurásico-Cretácico, E: Plutón Eoceno, OIMm: Ignimbritas y lavas del Oligoceno-Mioceno Medio, Mm: Lavas del Mioceno Medio, Ms: Lavas dacíticas del Mioceno Superior, P: Lavas dacíticas del Plioceno, PH: Depósitos no consolidados del Plioceno-Holoceno, Ah: Alteración hidrotermal. Muestras de agua; BSA: Baños San Andrés y Qda Jiguata, BPL: Baños Pampa Lirima, Aluv: Depósitos aluviales, MsP: Mioceno Superior-Plioceno, MiMs: Mioceno Inferior-Mioceno Superior, OIMm: Oligoceno-Mioceno Medio, ESCO: escorrentía.

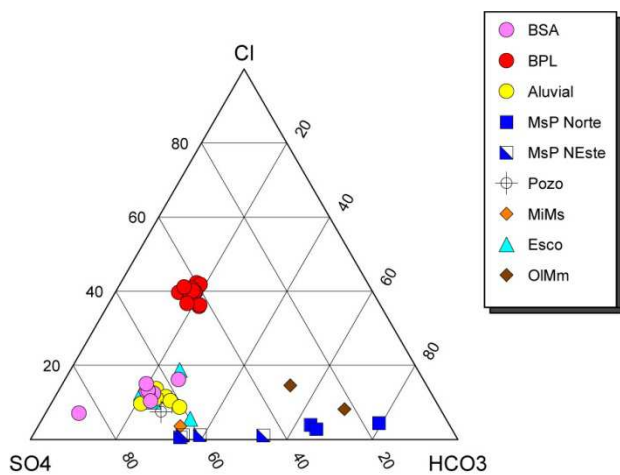


Figura 2. Diagrama de aniones mayoritarios (mg/L) de las aguas de Lirima.

3 Resultados y discusión

Los manantiales y pozos del acuífero aluvial, aguas de baja salinidad de zonas altas y aguas termales de los BSA tienen valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ muy similares (Figura 3), indicando que el origen de las aguas aluviales consiste en una mezcla entre las aguas termales de mayor salinidad que descargan en los BSA y aguas meteóricas de baja salinidad. Las muestras de manantiales y pozos de la pampa, tienen una mayor razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que el resto de las aguas aluviales. Sus mayores temperaturas además evidencian un aporte de aguas termales, lo que se corrobora por una segunda línea de mezcla que tiene como miembro extremo las aguas de los BPL. Una muestra de escorrentía obtenida a la salida de la cuenca recoge todas las aguas que descargan en superficie lo que queda reflejado en su posición intermedia en la segunda línea de mezcla mencionada (Figura 3).

Los valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en biotita, feldespato y hornblenda obtenidos por Victor et al. (2004) en rocas de la zona muestran una mayor similitud entre los de feldespato con los de roca total evidenciando que la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la roca se debe principalmente a la meteorización de feldespatos. Por otra parte, la importancia de la disolución de la plagioclasa relativo a la hornblenda (u otro mineral cálcico ferromagnesiano) en la evolución química del agua subterránea puede ser discriminado a través de la razón Ca/Sr, ya que la disolución congruente de la plagioclasa define una tendencia en un gráfico Ca vs Sr con una pendiente cercana a 100, mientras que para la hornblenda la pendiente es cercana a 1000 (Bullen et al., 1996). En la Figura 4 se observa que las muestras de agua de Lirima, a excepción de las aguas de los BPL, se ajustan de muy buena manera a una recta de pendiente 100. Por lo tanto, concordante con la similitud en la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre roca total y plagioclasa, la relación Ca/Sr evidencia que la fase más meteorizada en las rocas volcánicas más recientes de la cuenca (Mioceno Medio-Plioceno) corresponde a la plagioclasa.

La similitud en la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las aguas de un manantial de agua fría que drena lavas dacíticas del Mioceno Superior con la de aguas de los BSA (Figura 5), sugiere que el acuífero que descarga en éstos últimos estaría compuesto por rocas similares a estas dacitas o incluso en los niveles inferiores de este complejo volcánico.

Como se muestra en la Figura 5 la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las aguas de los BPL coincide con la de ignimbritas del Mioceno Inferior (20 a 16 Ma) sugiriendo como éste el acuífero del cual provendrían las aguas termales que descargan en los BPL.

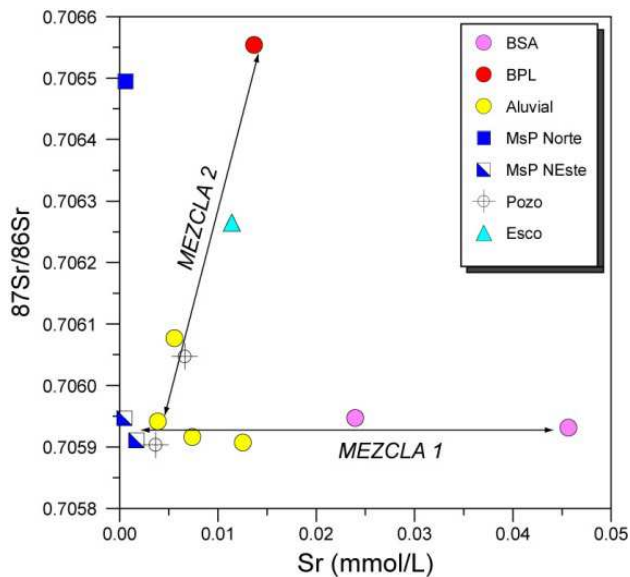


Figura 3. Razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de muestras de agua de Pampa Lirima en función de su concentración de Sr (mmol/L).

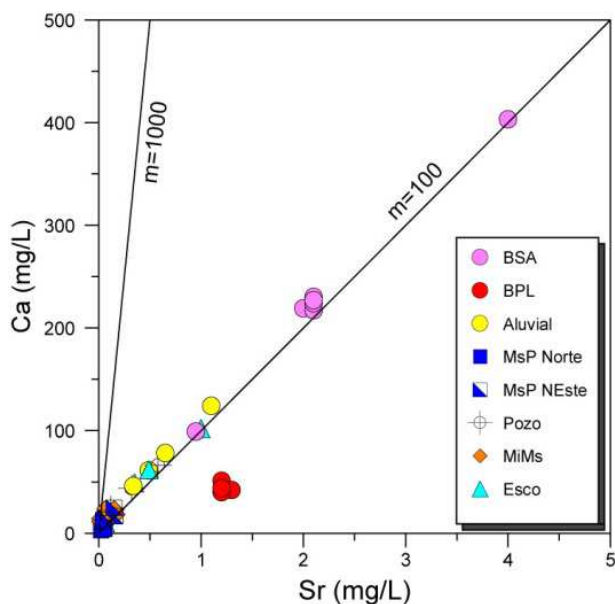


Figura 4. Relación Sr-Ca en las aguas de la cuenca de Lirima. La recta que mejor se ajusta a los datos tiene pendiente 100.

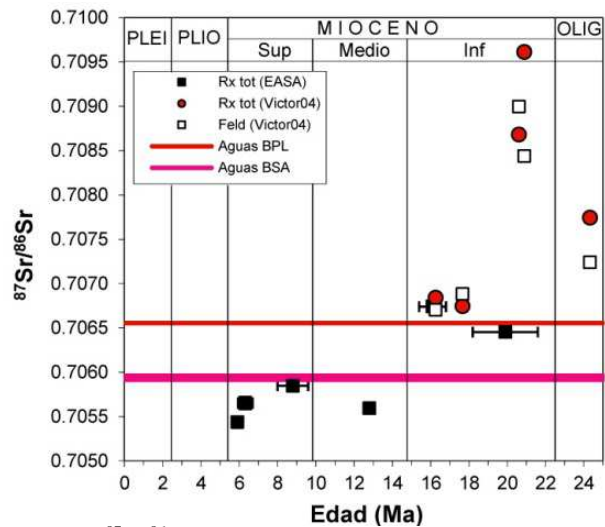


Figura 5. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rocas (símbolos) en función de su edad y de aguas subterráneas (líneas). Se excluyen las aguas originadas por mezcla.

Referencias

- Aberg, G., Jacks, G., Hamilton, P.J. 1989. Weathering rates and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios: an isotopic approach. *Journal of Hydrology* 109: 65-78.
- Achurra, L. 2010. Estudio hidrogeoquímico sobre la interacción de aguas subterráneas profundas y someras en Pampa Lirima, Norte de Chile. Tesis de máster (Unpublished) Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 107 p.
- Arcos, J. R. 2010. Geología de Pampa Lirima, escala 1:50.000. I Región de Tarapacá, Provincia del Tamarugal, Comuna de Pica. Informe Inédito, Energía Andina S.A.
- Bullen, Th., Krabbenhoft, P. y Kendall, C. 1996. Kinetic and mineralogic controls on the evolution of groundwater chemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in a sandy silicate aquifer, northern Wisconsin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60 (10): 1807-1821.
- Mook, W. G. 2001. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications*. International Hydrological Programme. Technical Documents in Hydrology, No. 39, UNESCO/IAEA.
- Naftz, D.L., Peterman, Z.E., Spangler, L.E., 1997. Using $\delta^{87}\text{Sr}$ values to identify sources of salinity to a freshwater aquifer, Greater Aneth Oil Field, Utah, USA. *Chemical Geology* 141: 195-209.
- Shand, P., Darbyshire, D.P., Goody, D. y Haria, A. 2007. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ as an indicator of flowpaths and weathering rates in the Plynlimon experimental catchments, Wales, U.K. *Chemical Geology* 236: 247-265.
- Victor, P., Oncken, O. y Glodny, J. 2004. Uplift of the western Altiplano plateau: Evidence from the Precordillera between 20° and 21°S (northern Chile). *Tectonics* 23, TC4004, 24 p.