

PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS ASOCIADOS A LA INTERACCIÓN AGUA – ROCA EN EL VALLE MANCHANA COVUNCO, SISTEMA HIDROTHERMAL DOMUYO, PATAGONIA ARGENTINA

Esteban Villalba*; Silvina Carretero* y Franco Tassi**

* Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE-FCNyM-UNLP), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Calle 64 #3, (1900) La Plata, Argentina
evillalba@gsuite.fcny.unlp.edu.ar

** Dipartimento di Scienze della Terra (DST-UNIFI), Istituto di Geoscienza e Georisorse (IGG), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Via La Pira 4 #4, (50121) Firenze, Italia.

Resumen

El área de estudio comprende el sistema geotermal Domuyo (Neuquén, Argentina), el cual ha sido referido como el más importante del mundo luego de Yellowstone. El objetivo es identificar los procesos de interacción agua – roca y la hidroquímica de las aguas del valle del arroyo Manchana Covunco. La metodología consistió en la obtención de datos físico-químicos y composicionales de aguas mediante relevamientos de campo y análisis de laboratorio. Los resultados obtenidos permitieron estimar un predominio de los procesos de interacción entre las aguas del arroyo ($\text{SO}_4\text{-Na/Ca}$ y Ca-HCO_3) y agua termal (Na-Cl) con minerales silicáticos, carbonatos y sulfatos presentes en las litologías del área de estudio. Las aguas de los humedales (Ca-HCO_3 y Ca/Mg-HCO_3) evidencian un menor grado de interacción agua – roca, lo cual se vincularía con los tiempos de residencia por el medio que circula y por las condiciones físico-químicas. Asimismo, se determinó que los procesos hidrogeoquímicos de la interacción agua – roca, obliteran la calidad de las aguas para abastecimiento, fundamentalmente aguas abajo de las descargas termales durante el fin de la estación seca.

Palabras Claves: hidroquímica, humedal, manantial termal, agua superficial, Neuquén.

Abstract

The study area includes the Domuyo geothermal system (Neuquén, Argentina), which has been referred to as the most important in the world after Yellowstone. This work aims to identify water – rock interaction processes in the valley of the Manchana Covunco stream, near to Cerro Domuyo. The methodology consisted mainly of water sampling and analysis to obtain physical-chemical and compositional data of waters from wetlands, thermal discharges, and the stream. The results indicates a predominance of the interaction processes between the stream water ($\text{SO}_4\text{-Na/Ca}$ y Ca-HCO_3) and thermal water (Na-Cl) with silicate, carbonate, and sulfate minerals. These minerals are present in the lithological units of the study area. The waters from wetlands (Ca-HCO_3 y Ca/Mg-HCO_3) present a lower degree of water – rock interaction, which could be associated to the water residence times due to the medium that circulates and by their physical-chemical conditions. Besides, the hydrogeochemical processes of water-rock interaction obliterate the quality of water supply, mainly downstream of thermal discharges during the end of the dry season.

Keywords: hydrochemistry, wetland, thermal spring, surface water, Neuquén.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio comprende el sector occidental del Cerro Domuyo, en el extremo norte de la provincia de Neuquén, en donde se desarrolla un gran sistema hidrotermal subterráneo que ha sido referido como uno de los más importantes del mundo, ocupando el segundo lugar luego de Yellowstone (Chiodini *et al.*, 2014). En el área destaca el arroyo Manchana Covunco, uno de los cursos fluviales más caudalosos del área (1,1 m³/s; Villalba *et al.*, 2021), con un valle de importante desarrollo en profundidad y base de poca explanada (Fig. 1). A su vez, en dicho arroyo tienen lugar importantes manifestaciones geotermales en forma de géiseres, fumarolas, piletas burbujeantes, entre otras, que ocurren tanto en el piso del valle (manifestación El Humazo hacia nacientes), como en sus laderas (manifestación Las Olletas hacia aguas abajo) (Fig. 1). Asimismo, parte del sistema hidrológico superficial del área de estudio está comprendido por humedales de montaña conocidos en la región como mallines e identificados como terrenos anegados con densa cobertura herbácea (*e. g.*, Mazzoni y Rabassa, 2013). Dichos mallines suelen alojarse sobre depósitos originados por procesos de remoción en masa y descargan agua superficial en forma de manantiales hacia los valles fluviales (Villalba, 2023).

El valle del arroyo Manchana Covunco, por su parte, se encuentra calado sobre la Granodiorita Varvarco y sobre andesitas (Ciclo Volcánico Inferior) y riolitas (Ciclo Volcánico Superior) (*e. g.*, D'Elía *et al.*, 2020). Estudios petrológicos realizados sobre la primera unidad litológica mencionada indican que los principales componentes minerales son cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas y biotita (JICA, 1983). Por otro lado, las andesitas están constituidas mayormente por plagioclasas, anfíboles y piroxenos, mientras que las rocas riolíticas presentan feldespato potásico, plagioclasas, cuarzo, piroxenos, anfíboles, biotita y vidrio (JICA, 1983). En el sector noreste del área existen también reducidos afloramientos de rocas del Ciclo Precuyano, que incluyen sedimentitas pelítico-psamíticas y evaporíticas de origen marino con abundante yeso y anhidrita (Zanettini, 2001).

Este trabajo tiene como objetivo principal determinar los principales procesos hidrogeoquímicos en el valle Manchana Covunco como producto de la interacción agua – roca para aportar a la comprensión de los procesos que condicionan la composición de sus aguas.

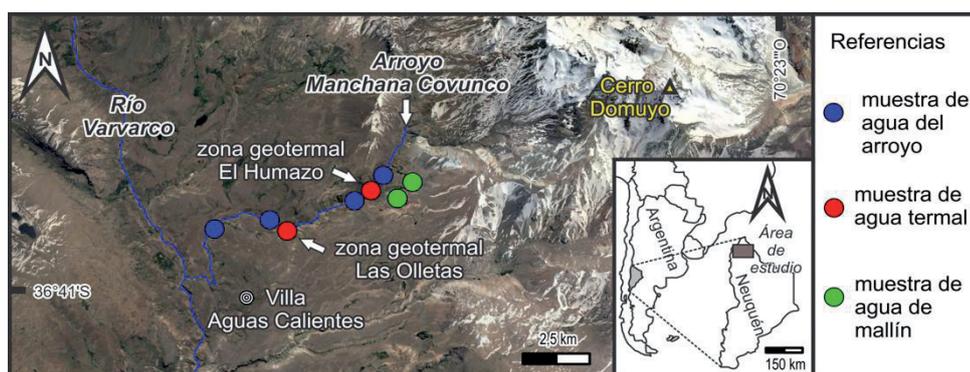


Figura 1. Ubicación regional e imagen satelital del área de estudio con los sitios de muestreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada constó del análisis de antecedentes bibliográficos relativos a la geología regional del área y la petrología de las diferentes unidades litoestratigráficas presentes. Se utilizó como referencia principal el informe provisional del proyecto de desarrollo geotérmico Domuyo, realizado entre la Agencia de Cooperación Internacional de

Japón (JICA, 1983) y la República Argentina, como así también estudios complementarios referidos a estos campos realizados con posterioridad (e. g., Zanettini, 2001; D'Elía *et al.*, 2020; Villalba, 2023). A su vez, previo a los estudios de campo, se interpretaron imágenes satelitales y se diseñó una red de monitoreo que incluye manantiales termales, agua del arroyo Manchana Covunco y mallines. En el caso del agua del arroyo, se recolectaron muestras tanto aguas arriba como aguas abajo de las descargas termales (Fig. 1). Asimismo, los mallines relevados se hallan en el sector superior, en las proximidades del valle del arroyo. Posteriormente, durante marzo y noviembre del año 2018 (finalización e inicio de estación cálida y seca, respectivamente) se llevaron a cabo relevamientos de campo que involucraron el muestreo de aguas para lo cual se utilizaron botellas plásticas estériles de 500 ml. En cada sitio de muestreo se midieron *in situ* el pH, la temperatura (T) y la conductividad eléctrica (CE). Finalmente, se efectuaron análisis cuantitativos en el Laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG-UNLP-CONICET) para determinar la composición mayoritaria bajo normas estandarizadas (APHA, 1998). Se determinaron los iones sodio (Na^+) y potasio (K^+) con el método de fotometría de llama, calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) y cloruro (Cl^-) a través de volumetría, y sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-) con espectrofotómetro UV-Visible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros determinados en campo indicaron condiciones de pH neutros a levemente alcalinos, con poca variabilidad entre las muestras en ambos periodos de extracción y medias que oscilan entre 8,7 (agua termal) y 7,3 (mallin). Se observaron pequeñas diferencias de las T medidas en función a la fecha de muestreo en el arroyo aguas arriba de las descargas termales ($\sim 20,5$ °C en marzo y $\sim 17,7$ °C en noviembre), en las aguas termales ($\sim 79,7$ °C en marzo y de $\sim 65,5$ °C en noviembre) y en los mallines ($\sim 8,2$ °C en marzo y $\sim 16,9$ °C en noviembre). Por su parte, el arroyo aguas abajo de las descargas termales no presentó variaciones de T entre marzo ($\sim 28,7$ °C) y noviembre ($\sim 29,0$ °C). Respecto a las CE, las diferencias entre las mismas muestras en los dos periodos de muestreo fueron más significativas. Se registraron mayores CE en marzo respecto a noviembre en las muestras del arroyo tanto aguas arriba de las descargas termales (~ 1435 y ~ 649 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente) como aguas abajo ($\sim 3360,0$ y $\sim 1971,3$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente), y en las aguas termales ($\sim 6110,0$ y $\sim 4085,0$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente). La CE en los mallines fue menor en marzo ($\sim 40,8$ $\mu\text{S}/\text{cm}$) en relación a noviembre ($\sim 233,3$ $\mu\text{S}/\text{cm}$). Se interpreta que las variaciones de los datos descriptos en las muestras, a excepción de los mallines, están asociados a una menor participación de aporte de agua de deshielo para las muestras de marzo ($>T$ y $>CE$). Esto último estaría generado por el menor volumen de hielo por tratarse del periodo final de la estación cálida. Asimismo, en noviembre aporte de agua de deshielo sería mayor dado que los depósitos de hielo tendrían más relevancia volumétrica debido a que es la etapa de inicio del ciclo de deshielo. En este sentido, podría considerarse que los mallines presentan cierta desconexión con dicho proceso hidrológico y el aporte de deshielo no modifique la sus características fisico-químicas o bien estén condicionados por los sedimentos que los alojan.

La composición hidroquímica del arroyo aguas arriba de las descargas termales determinada para las muestras de marzo fue $\text{SO}_4\text{-Na}/\text{Ca}$, mientras que para noviembre se aprecia una variación a Ca-HCO_3 . Las descargas termales presentaron composiciones Na-Cl para ambas fechas de muestreo, al igual que las muestras del arroyo aguas abajo. Por

último, el agua de los mallines fueron de tipo Ca-HCO₃ en marzo, mientras que en noviembre presentó un aumento del contenido de magnesio con una composición Ca/Mg-HCO₃ (Fig. 2).

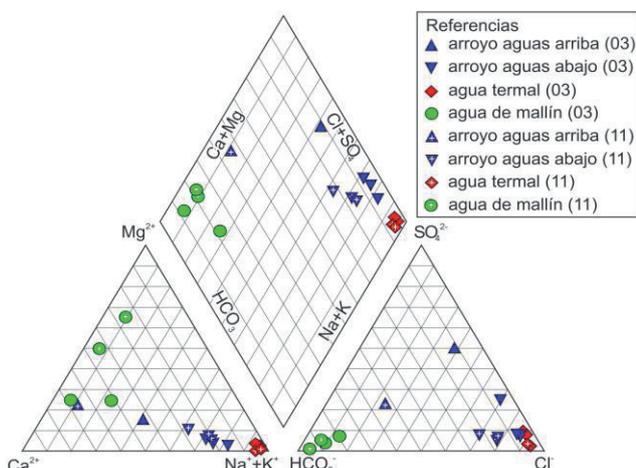


Figura 2. Diagrama de Piper (1944) para las muestras estudiadas. (03): muestras tomadas durante marzo; (11): muestras tomadas durante noviembre.

Sobre la base de los análisis cuantitativos, se confeccionaron diagramas bivariados para observar tendencias que reflejen procesos hidroquímicos en relación a fases minerales. En este sentido, la relación $y = x$ dada por $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ vs. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (Ravikumar *et al.*, 2015), permitiría identificar procesos de meteorización, principalmente de silicatos en las muestras de agua termal, de acuerdo a la tendencia a desplazarse hacia los aniones. A su vez, la tendencia a enriquecerse en SO_4^{2-} , también estaría vinculada a la disolución de yeso y/o gases magmáticos en el caso del agua termal (Villalba, 2023). Las muestras del arroyo tomadas en marzo evidencian dos tendencias, una bien marcada hacia el campo de meteorización de silicatos y otra hacia el campo superior que referiría a la meteorización de carbonatos. Las muestras de agua del arroyo recolectadas en noviembre estarían en cierto equilibrio ya que se ubican próximas a la línea 1:1, aunque una de ellas se vincularía más a la meteorización de silicatos. Las muestras de los mallines caen en el campo de los silicatos, no obstante, dicha interacción sería poco marcada dado que son cercanas a cero (Fig. 3a).

Asimismo, se estableció la relación HCO_3^- vs. Ca^{2+} que alude a la relación estequiométrica $y = \frac{1}{2} x$ representativa de la andesina/calcita (*e. g.*, Lecomte *et al.*, 2011). En líneas generales, el agua de los manantiales termales tomadas en noviembre están próximas a las rectas estequiométricas (Fig. 3a, b). Esto conjuntamente con las condiciones físico-químicas antes establecidas, podría indicar la existencia de procesos de dilución por el aporte de agua de deshielo al sistema hidrotermal subterráneo y de escorrentía superficial fluvial, y un mayor caudal de descarga desde los mallines, aunque en estos últimos no se observan diferencias relevantes (Villalba, 2023). Los mallines y las muestras de aguas termales presentan una correlación significativa a la relación 1:0,5 que sugeriría que el aporte de estos elementos proviene de la interacción con plagioclasas, micas y carbonatos (Fig. 3b). Por otra parte, se calcularon y relacionaron los Sólidos Totales Disueltos (STD) con los aniones Cl^- y HCO_3^- , en donde se reconocen diferentes procesos hidrogeoquímicos en base a lo propuesto por Gibbs (1970). En dicha relación se puede observar que las muestras de agua termal se hallan en el sector del diagrama con valores más elevados de x (1,0) e y (10^4), cuyos procesos predominantes están asociados a la

evaporación. Esto último estaría favorecido por la elevada T registrada en dichas muestras de agua termal, lo que también generaría aún mayor concentración iónica. En el caso de las muestras de los arroyos aguas arriba de las descargas termales se verificarían procesos de tipo roca dominante (muestra de noviembre) y con tendencia hacia la evaporación (muestra de marzo), lo cual podría asociarse al tiempo de acción prolongada de la estación seca (marzo), ya que se trata de la finalización de dicho período. Las muestras de aguas del arroyo aguas abajo se aproximarían al sector de evaporación así como también podría relacionarse a la mezcla con agua termal. Los mallines, a pesar de que están asociados a procesos roca dominante, presentarían baja interacción dada por sus escasos valores aniónicos, e incluso presentarían una leve tendencia hacia la precipitación (Fig. 3c).

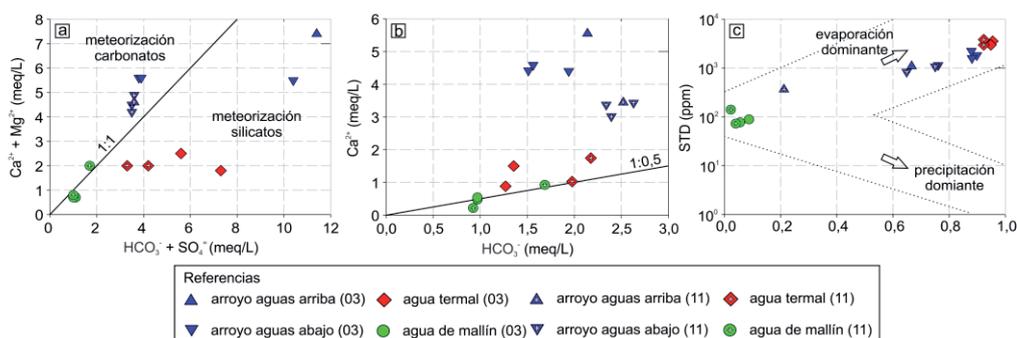


Figura 3. Relaciones iónicas (a, b) y diagrama que alude a procesos hidrogeoquímicos (c). (03): muestras de marzo; (11): muestras de noviembre.

Por otra parte, si se compara la STD de cada muestra con los límites de potabilidad establecidos por el Código Alimentario Argentino (2021), puede establecerse que el agua del arroyo aguas arriba de las descargas termales y los mallines no superan el límite de permisibilidad (1500,0 mg/L) en ambos muestreos. En cambio, los STD de las muestras de agua termal es altamente superior a dicho límite (hasta 3600,0 mg/L). En el caso del arroyo aguas abajo de las descargas termales, las extraídas durante marzo superan el parámetro de potabilidad (hasta 2135,7 mg/L) pero en noviembre no lo alcanza (hasta 1045,0 mg/L). Esto último se explicaría por el efecto dilución desarrollado anteriormente.

CONCLUSIÓN

Cada tipo de muestra presenta características distintivas con respecto a los parámetros físico-químicos y a su quimismo. La cantidad de soluto disuelto, determinado en laboratorio e inferido indirectamente por la CE, es mucho mayor en el agua termal que en el agua del arroyo, y ésta última, mayor que en los mallines. Esto podría interpretarse *a priori* como que el tiempo de circulación e interacción con las rocas, sedimentos o suelo, es característico en cada tipo de muestra e involucran especies minerales o procesos geoquímicos diferentes. El agua del arroyo Manchana Covunco interactuaría con carbonatos, como la calcita, presentes en travertinos e incluso diseminados en otras rocas sedimentarias e ígneas, y con sulfatos, yeso/anhidrita, presentes en sedimentitas del área. Además, el agua del arroyo tiene un comportamiento tendiente al equilibrio entre la meteorización de carbonatos y silicatos, con la excepción de los dos primeros puntos recolectados, en donde posiblemente la interacción con el lecho rocoso y con el agua termal no sea significativo para variar las concentraciones de Ca^{2+} , HCO_3^- y SO_4^{2-} . Las descargas de agua termal presentan elevadas concentraciones de soluto en solución probablemente incorporado durante su prolongada circulación subterránea e interacción con rocas de caja.

En este sentido, predominarían procesos de disolución de silicatos y, en menor medida, de carbonatos, que se evidencian por la presencia de rocas argilizadas (arcillas y zeolitas) y por la relación estequiométrica andesina/calcita determinada. Para estas aguas, el pH alcalino y T elevada tendrían un rol fundamental a favor de estos procesos. Los mallines, por su parte, mantienen prácticamente las condiciones de agua de deshielo sin modificaciones significativas ya que el tiempo de estadía y su recorrido serían menores y lo haría a través de sedimentos poco consolidados o de suelo poco desarrollado en los cuales no habría una destacada interacción agua – roca.

Se pudo establecer que los procesos hidrogeoquímicos están estrechamente vinculados a la calidad de las aguas en base a los STD, así como también el período de muestreo. La menor interacción agua – roca se asocia al inicio de la estación seca (fin de la húmeda), que trae aparejado menores valores de STD y valores permisibles (mallines y arroyo aguas debajo de las descargas termales durante noviembre). La información aportada en este trabajo permite aportar a la comprensión de los procesos hidrogeoquímicos en el valle del arroyo Manchana Covunco, sin embargo, es necesario continuar a futuro con las investigaciones en este campo y complementar con estudios de mayor detalle (e. g. modelado hidrogeoquímico, elementos trazas, isótopos, etc.).

REFERENCIAS

- American Public Health Association (APHA)** (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (20th ed). American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Chiodini, G.; Liccioli, C.; Vaselli, O.; Calabrese, S.; Tassi, F.; Caliro, S.; Caselli, A.; Agosto, M.; D'Alessandro, W.** (2014). The Domuyo volcanic system: An enormous geothermal resource in Argentine Patagonia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 274: 71-77.
- Código Alimentario Argentino** (2021). Capítulo XII. Bebidas hídricas, aguas y agua gasificada. Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica.
- D'Elía, L., Páez, G., Hernando, I. R., Petrinovic, I. A., López, L., Kürten, G., y Vigiani, L.** (2020). Hydrothermal eruptions at El Humazo, Domuyo geothermal field, Argentina: Insights into the eruptive dynamics and controls. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 393, 106786: 1-20.
- Gibbs, R. J.** (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*. 170, 795-840.
- Japan International Cooperation Agency (JICA)** (1983). *Interim report on the Northern Neuquén Geothermal Development Project, Argentina Republic*. Informe inédito, 196 pp.
- Lecomte, K. L., García, M. G., Fórmica, S. M., y Depetris, P. J.** (2011). Hidroquímica de ríos de montaña (Sierras de Córdoba, Argentina): Elementos mayoritarios disueltos. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*. 18(1): 43-62.
- Mazzoni, E., Rabassa, J.** (2013). Types and internal hydro-geomorphologic variability of mallines (wet-meadows) of Patagonia: Emphasis on volcanic plateaus. *Journal of South American Earth Sciences*. 46, 170-182.
- Piper, A. M.** (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 25(6), 914-928.
- Ravikumar, P., Somashekar, R. K., y Prakash, K. L.** (2015). Suitability assessment of deep groundwater for drinking and irrigation use in the parts of Hoskote and Malur Taluks, Karnataka (India). *Environmental Research, Engineering and Management*. 71(1): 15-26.
- Villalba, E., Misseri, L., Carretero, S. C., Lajoinie, M. F.** (2021). Cuantificación de caudales medios en los arroyos principales del Campo Geotermal Domuyo, norte de la Provincia de Neuquén. VIII Jornadas de Jóvenes Investigadores y Extensionistas, La Plata.
- Villalba, E.** (2023). *La interacción agua-roca en ambientes hidrológicos asociados a fluidos geotermales. Aplicaciones en calidad de aguas de abastecimiento* [Tesis de Doctorado].

Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154463>

Zanettini, J. C. M. (2001). Hoja Geológica 3772-II Las Ovejas, Provincia del Neuquén, escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales. (263), 61. Buenos Aires.