

## IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MEZCLA EN EL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DEL SALAR DE PIPANACO, PROVINCIAS DE CATAMARCA Y LA RIOJA, ARGENTINA

<sup>1,2</sup>Bea, Sergio A. ; <sup>2</sup>Mira Carrión, A. ; <sup>2</sup>Vives, L. ; <sup>3</sup>Tálamo, E.; <sup>3</sup>Rodríguez, M.N.

<sup>1</sup> CONICET, Av. Rivadavia 1917 - C1033AAJ Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina  
[sabea@faa.unicen.edu.ar](mailto:sabea@faa.unicen.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff". Av. República de Italia 780 – 7300 Azul, Buenos Aires - Argentina - +54 2281 432666

<sup>3</sup> CONHIDRO S.R.L., C/ Tomás Vergara, 1556, 4700, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca - Argentina. Tel. +03834 454148

### Resumen

El sistema hidrogeológico del Salar de Pipanaco conforma una cuenca endorreica cuyos recursos hídricos subterráneos son vitales para la factibilidad de cualquier emprendimiento económico en la región. La información hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas, superficiales y termales, se utilizaron para identificar y cuantificar los principales procesos de mezcla, además de sustentar el modelo conceptual en la que se basa el modelo hidrogeológico desarrollado paralelamente para la Administración Pública de la provincia de Catamarca. En la identificación de las potenciales "aguas extremo" que se mezclan, se ha utilizado el método de las componentes principales (EMMA, Christophersen y Hooper, 1992), mientras que para el cálculo de proporciones de mezcla se hizo uso de trazadores químicos conservativos. Los resultados obtenidos sugieren que la composición de las aguas subterráneas sería el resultado de la mezcla de al menos 4 tipos de "aguas extremo": (1) aguas de baja salinidad provenientes de la recarga desde los frentes serranos; (2) aguas de baja salinidad enriquecidas en F de origen termal; (3) aguas salinas residentes en las unidades Terciarias; y (4) aguas del río Salado o Colorado. Algunas de las muestras de aguas subterráneas cercanas al depocentro del salar resultan, además, estar afectadas por evaporación. Las muestras de aguas subterráneas cercanas a las principales estructuras geológicas vinculadas a las Sierras de Ambato y Velasco presentarían mayor proporción de aguas de origen termal, respaldando la hipótesis de mezcla en profundidad.

**Palabras claves:** Pipanaco, EMMA, modelo hidrogeológico, mezclas, análisis de componentes principales.

### Abstract

The Salar de Pipanaco basin forms an endorheic hydrogeological system being its groundwater resources are vital for the viability of any economic activity in the region. The hydrochemical and isotopic data from groundwater, surface water and thermal springs were used to identify and quantify the main mixing processes which also support the numerical model developed in parallel to the Catamarca province Public Administration. Principal component analysis (EMMA, Christophersen and Hooper, 1992) was used to identify the potential groundwater "end-members" that are mixing, whereas conservative tracers were used for mixing proportion calculations. The results show that the groundwater chemical composition in the Salar del Pipanaco would be the result of mixing of at least 4 types of "end-members": (1) low salinity waters from the mountain ranges; (2) F-enriched thermal low salinity waters; (3) saline waters resident in the Tertiary units; and (4) waters from the Salado (or Colorado) river. Some of the groundwater samples collected near the basin depocentre show to be a mixture of these "end-members", but also affected by evaporation. Groundwater samples collected near the main geological structures associated to the Ambato and Velasco mountain ranges show the major proportions of the F-enriched thermal waters, supporting the hypothesis of mixing at depth.

**Keywords:** Pipanaco, EMMA, hydrogeologic modeling, mixing, principal component analysis.

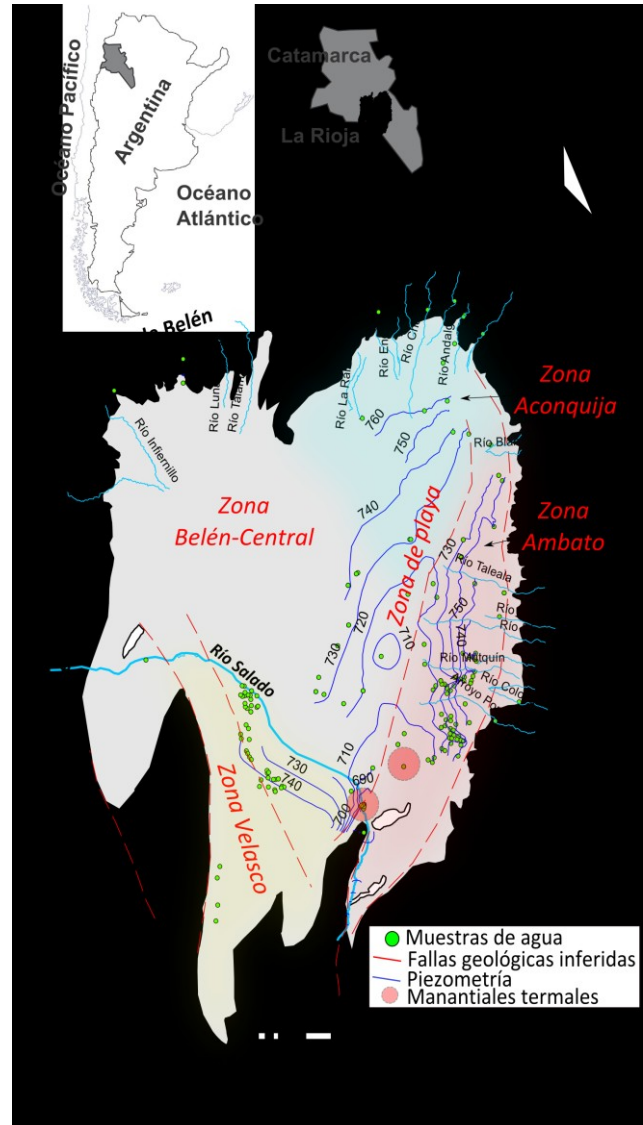
## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El sistema hidrogeológico del Salar de Pipanaco conforma una cuenca endorreica que actualmente soporta importantes proyectos económicos como olivícolas y mineros (al norte), cuya factibilidad económica dependen exclusivamente de los recursos hídricos subterráneos. Un mejor conocimiento sobre el balance hídrico y funcionamiento hidrogeológico del sistema es imprescindible para su correcta gestión hídrica.

La información hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas, superficiales y de manifestaciones termales, se han utilizado con el objetivo de cuantificar los principales procesos de mezcla que caracterizan la hidrodinámica de las aguas subterráneas, y que además sustente el modelo conceptual sobre el modelo funcionamiento hidrogeológico del sistema. Para la identificación de las potenciales "aguas extremo" que se mezclan, se ha utilizado el método de las componentes principales (EMMA, End Member Mixing Analysis), mientras que en los cálculos de las proporciones de mezcla se usaron trazadores químicos conservativos.

Habitualmente los modelos conceptuales sobre el funcionamiento de sistemas de aguas subterráneas se basan en información puramente hidrogeológica como los niveles piezométricos, etc. El hecho de incorporar la información hidroquímica en el desarrollo del modelo conceptual permite identificar las potenciales "aguas fuentes" (o "aguas extremo"), cuya mezcla en diferentes proporciones permitiría explicar la composición química de cada una de las muestras colectadas. Existen metodologías numéricas que pueden ayudar en este sentido, y entre ellas podemos citar al EMMA (End Member Mixing Analysis), que se basa en el método de las componentes principales (ACP). Identificadas las "aguas extremo", ellas pueden ser cuantificadas en términos de proporciones de mezcla (Christophersen y Hooper, 1992; Carrera et al., 2004). Ambas metodologías han sido aplicadas con éxito en el ámbito de la hidrogeología, destacándose los trabajos de Hooper y Peters (1989), Christophersen y Hooper (1992), Carrera et al. (2004), Jurado et al. (2012), Tubau et al. (2014).

La calidad de los cálculos de las proporciones de mezcla incrementa con el carácter conservativo de las componentes químicas utilizadas. Sin embargo las mismas pueden ser modificadas por las propias reacciones químicas al interactuar las aguas subterráneas con los materiales del acuífero. Una atractiva alternativa es definir una combinación lineal de componentes químicas de manera que permita "eliminar" los términos reactivos de las ecuaciones de balance de masa (Saaltink et al., 1998).



Los objetivos del presente trabajo son: (1) identificar las potenciales "aguas extremo" actuantes en el sistema hidrogeológico del Salar del Pipanaco utilizando EMMA; (2) identificar los principales procesos geoquímicos mediante análisis multivariado y modelación hidrogeoquímica; (3) identificar y definir componentes químicas conservativas siguiendo una metodología similar a la descrita por Saaltink et al (1998); (4) calcular las proporciones de mezcla utilizando dichas componentes conservativas.

## METODOLOGÍA

La metodología EMMA fue aplicada sobre muestras de agua superficiales, subterráneas y termales de la cuenca del Salar del Pipanaco siguiendo un procedimiento similar al utilizado por Christophersen y Hooper (1992), y otros trabajos relacionados (Tubau et al., 2014). El análisis de las componentes principales tiene como objetivo buscar la mínima dimensión del espacio euclidiano que conforman las concentraciones de la mayoría de las muestras de agua.

En este "nuevo espacio dimensional", el principal autovector debe ser capaz de explicar un gran porcentaje de la varianza de los datos que ocurre en la dirección principal del mismo. Así, las componentes químicas asociadas con el próximo autovalor deben explicar la siguiente mayor varianza de datos, y así sucesivamente. A menudo, unos pocos autovectores deben ser capaces de explicar del 80 al 90% de la varianza de datos (Christophersen y Hooper, 1992; Tubau et al., 2014). Siguiendo el procedimiento, la composición de las aguas extremo potenciales identificadas en el sistema son ortogonalmente proyectadas en este nuevo espacio vectorial, de menor dimensión, y se comparan con las proyecciones de las restantes muestras de agua. Cabe destacar que esta variante en la metodología del EMMA difiere de la inicialmente propuesta en la literatura científica, donde las aguas extremo identificadas eran utilizadas para definir el nuevo espacio vectorial. Sin embargo, ya que la composición de las aguas extremo son incógnitas en nuestro caso, es más razonable proyectar las mismas en el espacio vectorial definido por las composiciones de las muestras de agua que fueron medidas (Christophersen y Hooper, 1992). No obstante, las diferencias entre la proyección de las muestras de agua, y las aguas extremo puede ser atribuida a incertidumbres bien conocidas (Gómez et al., 2008; Tubau et al., 2014): (1) a la variabilidad espacial y temporal en la composición química de las aguas extremo (la composición de las aguas extremo se esperan que no sean espacialmente homogéneas o constantes temporalmente); (2) potenciales reacciones químicas que hayan tenido lugar y contribuido a la composición química del agua subterránea *a posteriori* del evento de mezcla; y (3) incertidumbres analíticas.

El cálculo de las proporciones de mezcla se aborda aplicando un método de máxima verosimilitud con el objeto de estimarlas conocida una determinada incertidumbre en la composición de las "aguas extremo". Este método fue programado en MIX (Carrera et al., 2004), y ha sido previamente utilizado en varios estudios publicados en la literatura científica (Cánovas et al., 2012; Jurado et al., 2012; Tubau et al., 2014).

En el presente trabajo, para llevar a cabo los diferentes análisis EMMA, se integró la información hidroquímica pre-existente, de diversas fuentes (entre ellos se encuentran los realizados por el Instituto Nacional del Agua, los de la Universidad Argentina de Amigos de Ben Gurión (A.A.A.U. Ben Gurión, 2006), los de la Universidad Nacional de Catamarca, el Plan de Evaluación de Aguas Subterráneas), y que han sido recopilados en CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH (2013, 2015). Además se incorporaron los datos hidroquímicos del sector de Machigasta-Bañados de los Pantanos en La Rioja descritos en Sánchez et al. (1995), y los nuevos colectados por la Empresa CONHIDRO S.R.L. durante dos campañas llevadas a cabo entre 2013 y 2015 (CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH, 2013, 2015). Los dos análisis EMMA incluyen: (1) Análisis I: CE (conductividad eléctrica), Cl, F, SO<sub>4</sub>, alcalinidad, Na, K, Ca, y Mg; y (2) Análisis II: CE, Cl, F, SO<sub>4</sub>, K y la componente química definida como  $u = 2(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{Na} - 2\text{HCO}_3$  (su definición está basada en las reacciones químicas identificadas en el sistema).

## RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### Resultados EMMA

La proyección de las concentraciones de las muestras de aguas superficiales, subterráneas y termales en el nuevo espacio vectorial EMMA, para los Análisis I y II se muestran en la Figura 2 y 3, respectivamente.

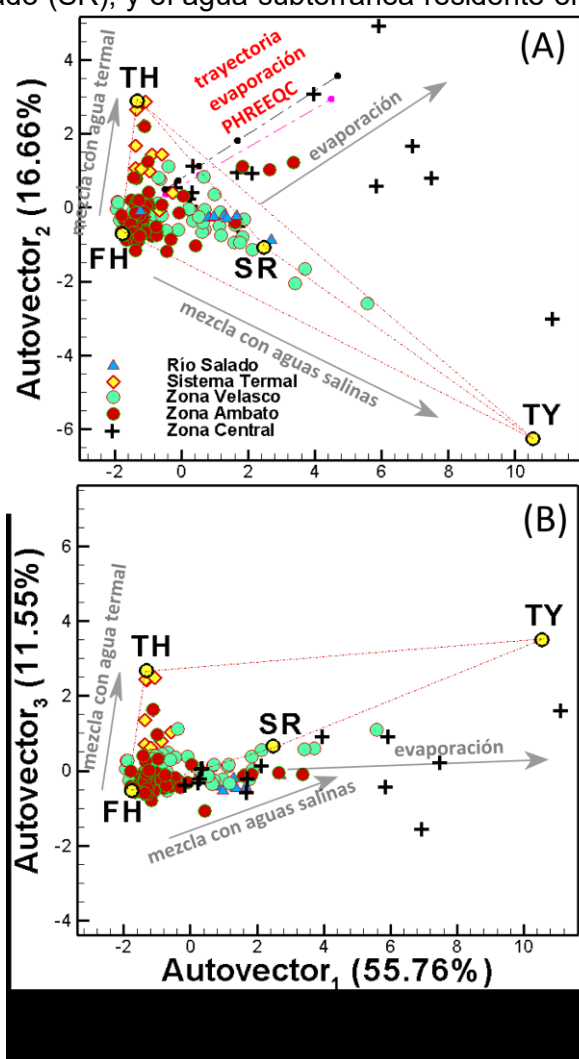
En el Análisis I (Figura 2), al menos 5 autovectores son necesarios para poder explicar el 91% de la varianza total de los datos. El primer autovector explica el 56% de ellos, siendo la CE (factor de contribución 0.44), Cl (0.42), SO<sub>4</sub> (0.41), Na (0.4), K (0.29), Ca (0.34), y Mg (0.31) los que muestran la mayor contribución, mientras que la alcalinidad (0.1), y el F (0.02) lo hacen en menor grado.

Este autovector cubre un amplio rango en la proyección EMMA, entre -2 y 11 (Figura 2), y puede ser asociado con 3 de las "aguas extremo": el término más diluido que provendría de la recarga desde los diferentes frentes serranos que rodean el salar (FH), y los dos términos más salinos (es decir, río Salado (SR), y el agua subterránea residente en las unidades Terciarias (TY).

El segundo autovector explica casi un 17% de la varianza de datos, y cubre un rango entre -6 y 4 de la proyección EMMA, siendo F (factor de contribución 0.66), Mg (-0.45), Ca (-0.39), K (0.28), y Na (0.26) las componentes químicas que tienen su mayor contribución, mientras que las de la CE, Cl, y la alcalinidad pueden ser despreciadas (Figura 2A). Cabe destacar que en este autovector, el Ca y el Mg contribuyen con signo negativo, pudiendo ser esto indicativo de procesos de reactivos como el intercambio catiónico (intercambio Na/Ca/Mg). Este autovector podría ser principalmente asociado con la mezcla de aguas de baja salinidad proveniente de los frentes serranos (FH), con las termales enriquecidas en F (TH) (Figura 2A).

Cabe destacar que la proyección EMMA para el caso del primer y segundo autovector muestra que las aguas subterráneas provenientes de los frentes serranos del Ambato y del Velasco (FH), progresivamente incrementan sus valores en el autovector a medida que su posición es cercana a la playa salina, y cómo se mezclan con las aguas del río Salado (SR), o con el agua residente en las unidades Terciarias (TY).

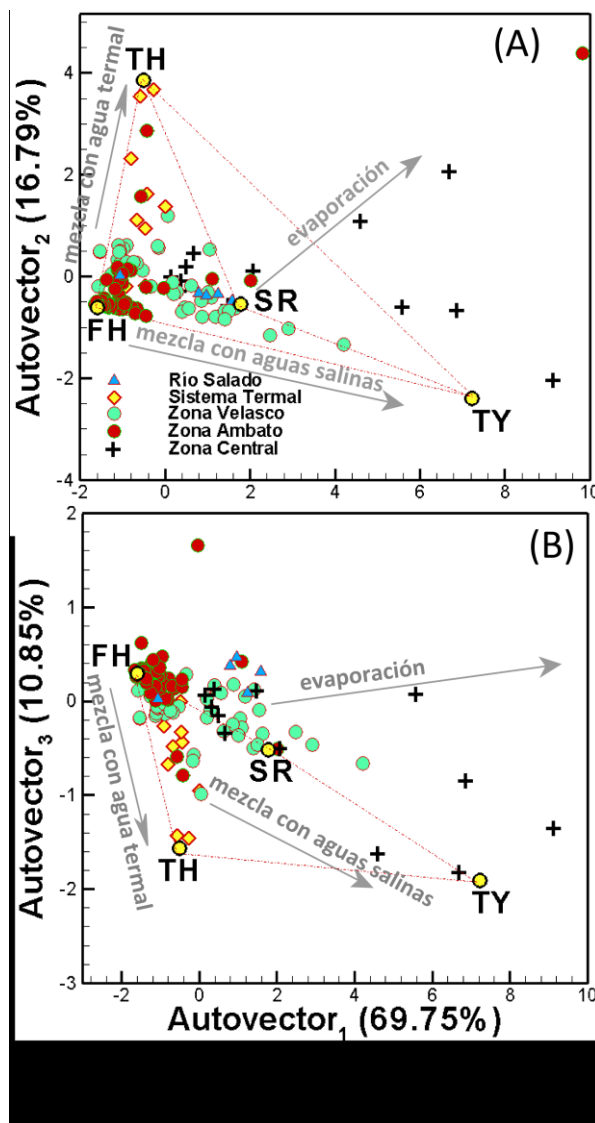
El Análisis II (que incluye CE, Cl, F, SO<sub>4</sub> y K, y la nueva componente conservativa  $u=2(Ca+Mg)+Na-2HCO_3$ ), a diferencia del Análisis I, solo son necesarios 3 autovectores para explicar el 97% de la varianza total de datos. El primero de ellos explicaría casi el 70%, y cubre un rango de la proyección entre -2 y 8, que es un rango menor en comparación con el Análisis I, lo que implica también una menor dispersión de datos (Figura 3A). El segundo autovector explicaría el 17% de la varianza de datos, y abarca un rango menor en la proyección, entre -2 y 4. Con respecto a las contribuciones relativas por parte de las



diferentes componentes químicas, para el primer autovector, la CE (factor de contribución 0.48), Cl (0.45), SO<sub>4</sub> (0.47), y la componente u (0.48), son las que más contribuyen, mientras que F (0.112) lo hace en menor proporción (Figura 3A). En el mismo sentido que en el Análisis I, el primero autovector podría ser asociado con los términos más salinos del sistema (es decir, el agua residente en las unidades terciarias, Ty, o las aguas del río Salado, SR). Con respecto a las contribuciones relativas para el segundo autovector, F (factor de contribución 0.93) es la única componente química que ejerce la mayor contribución, y estaría también asociada a la dispersión inducida por la mezcla de aguas termales enriquecidas en F (TH) (Figura 3).

Las proyecciones EMMA, tanto para el caso del Análisis I (Figura 2), como para el Análisis II (Figura 3), muestran un comportamiento diferente de acuerdo a la zona. En la Zona Ambato (Figura 3A), algunas de las muestras de aguas subterráneas se corresponden con una línea de mezcla entre las aguas diluidas provenientes de las Sierra de Ambato (FH), con las aguas termales de baja salinidad enriquecidas en F (TH), a medida que las mismas se localizan hacia el depocentro de la cuenca, más precisamente hacia donde se localizan las surgencias termales (Manantial de Suriyaco, Termas de Santa Teresita, Figura 1). Sin embargo no se descarta que esta mezcla "sea inducida" antrópicamente en algunas de las perforaciones que captan sistemas diferentes (p.ej., en aquellas perforaciones cuyos filtros se disponen en depósitos Cuaternarios modernos y en los Plío-Pleistocenos). Por otro lado, en la misma Zona Ambato, algunas de las muestras de aguas subterráneas se encontrarían dentro de una línea de mezcla entre las aguas diluidas provenientes de la Sierras de Ambato (FH), con aguas subterráneas de mayor salinidad potencialmente residente en las unidades Terciarias (las mismas muestran bajos tenores en F, TY). Cabe destacar además, que en este sector dentro de la Zona Ambato es donde se llevan a cabo importantes actividades económicas que someten al acuífero a intensos bombeos pudiendo inducir la mezcla con aguas de mayor salinidad residentes en profundidad (Figura 1).

Un mínimo número de "aguas extremo" para explicar las composiciones químicas de las muestras de aguas subterráneas ha sido identificado en base a la aplicación de la metodología EMMA. En este sentido, se aplica la "regla de uno" ("rule of one" en Inglés) (Christophersen y Hooper, 1992; Tubau et al., 2014), que implica "retener un número de autovectores" que expliquen el 90% de la varianza total de los datos adicionando uno más que estaría representando el término de menor salinidad que en este caso se correspondería con la recarga proveniente de los frentes serranos (FH). Las "aguas extremo" identificadas son las siguientes: (1) agua de baja salinidad (FH) que recarga desde los diferentes frentes serranos; (2) agua termal de baja salinidad enriquecida en F asociada



a las principales estructuras geológicas en la cuenca sedimentaria (TH); y (3) agua del río Salado (SR), y (4) agua subterránea residente en las unidades Terciarias (TY). Por otro lado, ambos análisis muestran una dispersión de datos asociada a las muestras de aguas subterráneas afectadas por evaporación, confirmado este hecho por los análisis de isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{O}$  (Figura 5).

### Identificación de los procesos geoquímicos

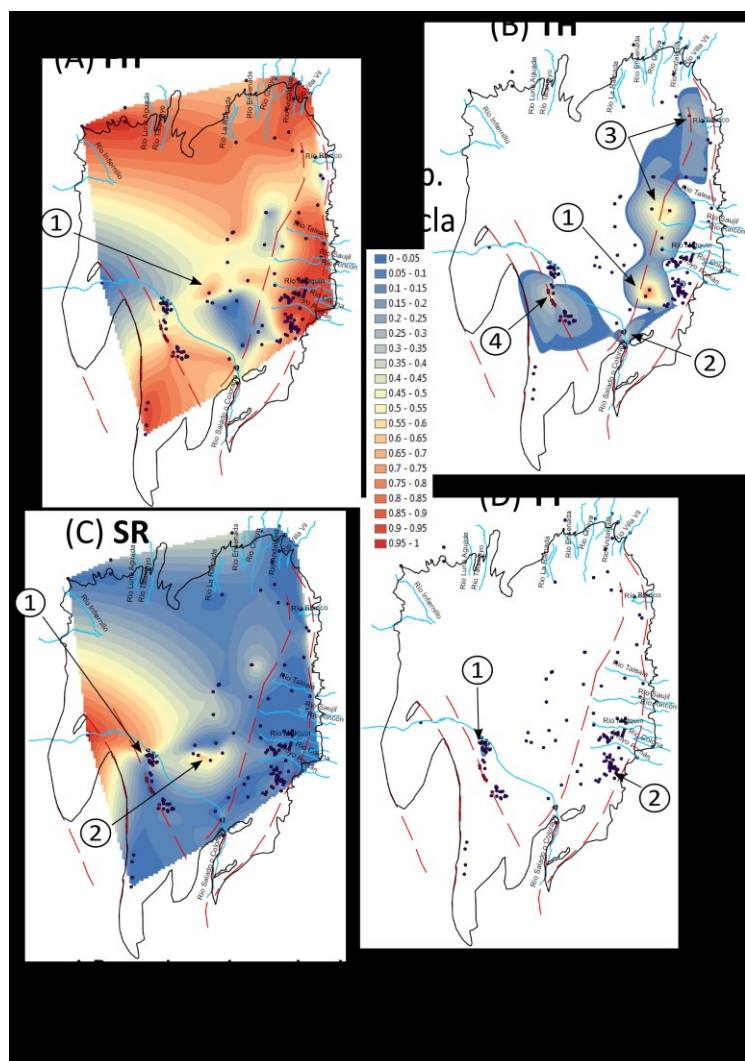
La mayoría de las componentes químicas en el sistema hidrogeológico del Salar del Pipanaco son afectadas por las reacciones químicas, lo que hace que pierdan su carácter conservativo. Mediante análisis bivariado, y modelación hidrogeoquímica con PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999), se han podido identificar los potenciales procesos hidrogeoquímicos actuantes en las aguas subterráneas, y los mismos fueron los siguientes: (1) disolución/precipitación de carbonatos; (2) intercambio catiónico de Na por Ca y Mg en solución.

Por otro lado, las concentraciones F, Ca de las muestras de aguas subterráneas en el Salar del Pipanaco sugieren estar controladas por el equilibrio con fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). Sin embargo, se considera que este equilibrio estaría restringido espacialmente en comparación a otros minerales como la calcita, por lo que ha sido excluida del sistema geoquímico.

Definido el sistema químico, y siguiendo la metodología propuesta por Saaltink et al (1998), es posible definir una combinación lineal de componentes químicas "no conservativas" de acuerdo a  $u=2(\text{Ca}+\text{Mg})+\text{Na}-2\text{HCO}_3$ , cuyo valor sería conservativo. Dicha componente será utilizada en el presente trabajo para los cálculos de proporciones de mezcla.

### Cálculo de proporciones de mezcla

Las proporciones de mezcla fueron calculadas con MIX, incluyendo las "aguas extremo" identificadas mediante EMMA, y sus distribuciones espaciales se muestran en las Figura 4. Las mayores proporciones para el agua diluida proveniente de los frentes serranos (FH), se encuentran en aquellas muestras de aguas subterráneas localizadas en una posición cercana a los frentes y decrecen a medida que nos aproximamos al sector de la playa (Figura 4A). Esto es consistente con la piezometría que indica un flujo de las aguas subterráneas hacia el depocentro de la playa (Figura 1). En sector norte del río Salado (ver Zona Central en la Figura 1), a pesar de la escasez y heterogénea distribución de las perforaciones y pozos excavados en este sector, es posible confirmar que el agua procedente del frente serrano de Belén se



mezclaría con las aguas del río Salado (ver punto 1 en la Figura 4A). Esto confirmaría el control importante de la recarga que ocurriría desde las Sierras de Belén en el Salar del Pipanaco. Por otro lado, localmente y alineados a las principales estructuras geológicas, algunas muestras de aguas subterráneas incrementan sus proporciones de mezcla con aguas termales enriquecidas en F (TH), y que además es coincidente con los sistemas termales de Santa Teresita y Suriyaco (ver puntos 1 y 2 en la Figura 4B). Las proporciones de mezcla con esta agua termal se extendería hacia el norte como ya ha sido sugerido por Fernández-Turiel et al. (2007) (ver punto 3 en Figura 4B). En el mismo sentido, las muestras de aguas subterráneas localizadas en el faldeo de las Sierras de Velasco (ver punto 4 en Figura 4B) también mostrarían una proporción de mezcla con estas aguas termales de baja salinidad (TH), coincidente con el trazado de la Falla de Los Bordos-Las Puntas. En estas muestras de aguas subterráneas se han medido temperaturas del orden de 27-35°C (Sánchez et al., 1995).

Las aguas del río Salado claramente se mezclan en las aguas subterráneas del bolsón del Pipanaco mostrando un carácter influente con el sistema de las aguas subterráneas. Esto queda particularmente reflejado en la proporción de mezcla de las aguas de este río en las muestras de aguas subterráneas que se encuentran en el faldeo de las Sierras de Velasco más precisamente en los sectores de Machigasta/Bañados de los Pantanos (ver punto 1 en la Figura 4C). Por último, las muestras de aguas subterráneas colectadas en la Zona Central, al norte del curso del río Salado, presentarían una importante proporción de mezcla con aguas de este río y en algunos casos afectadas por evaporación (ver punto 2 en la Figura 4C).

Con respecto a los términos más salinos del sistema hidrogeológico del Salar del Pipanaco, las aguas residentes en las unidades Terciarias (TY), en particular las mezclas con estas aguas se podrían ver en el sector de Machigasta/Bañado de los Pantanos (ver punto 1 en la Figura 4D). Sin embargo, y como ya se ha mencionado anteriormente, algunos sectores que son sometidos a intensos bombeos como los localizados en el faldeo de las Sierras de Ambato (ver punto 2 en la Figura 4D), podrían estar induciendo mezcla con estas aguas de mayor salinidad.

## CONCLUSIONES

El método de las componentes principales (EMMA, End Member Mixing Analysis) y cálculos de mezcla, fueron aplicados sobre datos hidroquímicos e isotópicos de aguas subterráneas, superficiales y de manifestaciones termales con el objeto de incrementar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar del Pipanaco, en las provincias de Catamarca y La Rioja.

Los resultados obtenidos definen que, la composición de las aguas subterráneas en el Salar del Pipanaco serían el resultado de la mezcla en diferentes proporciones de al

menos 4 tipos de "aguas extremo": (1) aguas de baja salinidad provenientes de la recarga desde los frentes serranos (FH); (2) aguas de baja salinidad enriquecidas en F de origen termal (TH); (3) aguas salinas residente en las unidades Terciarias (TY); y (4) aguas del río Salado o Colorado (SR). Por otro lado, algunas de las muestras de aguas subterráneas colectadas cerca del depocentro del salar resultan ser mezcla de estas aguas extremo, pero además afectadas por evaporación (sustentado también por isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ,

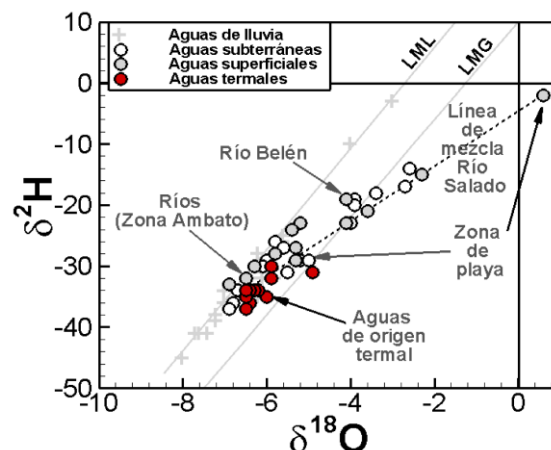


Figura 5. Relaciones de isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^2\text{H}$  correspondiente a muestras de lluvia, subterráneas, superficiales y termales del Salar del Pipanaco. LML= Línea Meteorica Local, LMG= Línea Meteorica Global

Figura 5). Las muestras de aguas subterráneas cercanas a las principales estructuras geológicas vinculadas a las Sierras de Ambato y Velasco presentarían mayor proporción de aguas de origen termal (TH), sustentando la hipótesis de mezcla en profundidad.

## REFERENCIAS

- A.A.A.U. Ben Gurion**, 2006. Estudio de Relevamiento y Evaluación de los Recursos Hídricos en Zonas Áridas de la Provincia de Catamarca. Asociación Argentina de Amigos de la Universidad de Ben Gurion. Programa de Servicios Agrícolas Provinciales. Programación del Desarrollo Agropecuario (EPDA) AM-N-A-10.
- Cánovas, C.R., Olias, M., Vazquez-Suñé, E., Ayora, C., Nieto, J.M.**, 2012. Influence of releases from a fresh water reservoir on the hydrochemistry of the Tinto River (SW Spain). *Science of the Total Environment*, 416, 418-428.
- Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., Castillo, O., Sánchez Vila, X.**, 2004. A methodology to compute mixing ratios with uncertain end-members. *Water Resources Research*, 40, W12101.
- Christophersen, N., Hooper, R. P.**, 1992. Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*, 28, 99-10.
- CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH**, 2013. Modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco (Catamarca, Argentina). Informe técnico. Gobierno Catamarca, 176 pp.
- CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH**, 2015. Modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco (Catamarca, Argentina). Informe técnico, Etapa 2. Gobierno Catamarca, 108 pp.
- Fernández-Turiel, J. L., Córdoba, G., Vilches, F. E., Gimeno, D., García-Vallés, M., Fuentes, S. E.**, 2007. Hydrogeochemical processes in groundwater from the Salar of Pipanaco (Catamarca, NW Argentina). *IAGS 2007-Exploring our Environment*, 123.
- Gómez, J., Auqué, L., Gimeno, M.**, 2008. Sensitivity and uncertainty analysis of mixing and mass balance calculations with standard and PCA-based geochemical codes. *Applied Geochemistry*, 23, 1941-1956.
- Hooper, R. P., Peters, N.E.**, 1989. Use of multivariate analysis for determining **sources** of solutes found in wet atmospheric deposition in the United States. *Environmental Science & Technology*, 23, 1263-1268.
- Jurado, A., Mastroianni, N., Vazquez-Suñe, E., Carrera, J., Tubau, I., Pujades, E., Postigo, C., de Alda, M. L., Barceló, D.**, 2012. Drugs of abuse in urban groundwater. A case study: Barcelona. *Science of The Total Environment*, 424, 280-288.
- Parkhurst, D., Appelo, C.**, 1999. User's Guide to PHREEQC (version 2), a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259.
- Saaltink, M. W., Ayora, C., Carrera, J.**, 1998. A mathematical formulation for reactive transport that eliminates mineral concentrations. *Water Resources Research*, 34, 1649-1656.
- Sánchez, V., Glanni, R., Di Chiacchio, J., Victoria, J., J., P., Mercado, N., Guimaraes, R.**, 1995. Evaluación hidrogeológica general del área Colonias Machigasta-Bañado de los Pantanos. Provincia de La Rioja. Ministerio de Economía y de Obras y Servicios Públicos de la Nación. Secretaría de Minería. Subsecretaría de Minería. Gobiernos de las Provincias de La Rioja, Mendoza y San Juan. Centro Regional de Agua Subterránea (CRAS).
- Tubau, I., Vazquez-Suñe, E., Jurado, A., Carrera, J.**, 2014. Using EMMA and MIX analysis to assess mixing ratios and to identify hydrochemical reactions in groundwater. *Science of the Total Environment*, 470-471, 1120-1131.