



XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009



Geología  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

---

S6\_017

## **Modelo de evolución hidroquímica e isotópica en el sistema de recarga del Salar de Atacama a través de su margen E**

Salas, J.<sup>1</sup>, Aravena, R.<sup>2</sup>, Guzmán, E.<sup>3</sup>, Cornellà, O.<sup>1</sup>, Guimerà, J.<sup>1</sup>, Tore, C.<sup>3</sup>,  
Von Igel, W.<sup>1</sup>, Fock, A.<sup>3</sup>, Henríquez, A.<sup>3</sup>

(1) Amphos21, S.L. Passeig de Rubí 29-31, E-08197 Valldoreix, España.

(2) Department of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo 200  
University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1

(3) SQM, Salar, S.A. Los Militares 4290, Santiago, Chile.

*[Joaquin.Salas@amphos21.com](mailto:Joaquin.Salas@amphos21.com)*

### Introducción

La salmuera del núcleo salino del Salar de Atacama (N de Chile), está siendo explotada por la empresa SQM (Sociedad Química y Minera de Chile) para el aprovechamiento de las altas concentraciones de Li y K. La explotación de este recurso se está realizando con el control de ciertas variables ambientales del margen E, ya que en esta zona se localiza un ecosistema lacustre que forma parte de la “Reserva Nacional Los Flamencos”. En este contexto, se ha establecido un Plan de Seguimiento Ambiental, que forma parte de las obligaciones ambientales de SQM derivadas de la Resolución de Calificación Ambiental 226/2006. Se ha constatado la necesidad de identificar los principales procesos que controlan la recarga hidrogeológica del Salar a través de su margen E. Para ello se ha desarrollado un modelo hidroquímico, resultado de la interpretación de los datos hidroquímicos e isotópicos, compatible con el sistema de flujo regional y que integra las observaciones de terreno.

El ámbito hidrogeológico del sector Este del Salar está dominado por la existencia de dos tipos de aguas subterráneas [1] (1) un dominio de origen hidrotermal, poco salino, y recargado a través de un sistema volcánico y detrítico en el margen E, y (2) las salmueras del núcleo salino. Por contraste de densidades entre ambos medios, se desarrolla una interfase prácticamente inmisible, que es conocida como “cuña salina” (similar a las tradicionalmente caracterizadas en los acuíferos litorales). En las inmediaciones de la interfase, las aguas subterráneas procedentes del E, circulan de manera ascendente y paralela al plano de la cuña, descargando superficialmente, e inundando amplios sectores del margen. La conexión hidrogeológica entre este sistema y el acuífero del núcleo salino del Salar serán los objetivos principales del presente estudio.



Geología  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009

---

### Metodología

Se ha realizado un estudio hidrogeoquímico e isotópico de las aguas subterráneas y superficiales en los ámbitos geográficos de Soncor y Aguas de Quelana (Figura 1). El estudio se ha basado en la interpretación de los resultados analíticos obtenidos a partir de seis campañas de muestreo efectuadas por SQM. durante un periodo comprendido entre noviembre de 2007 y enero de 2009. Las hipótesis planteadas han sido contrastadas con observaciones de terreno.

### Modelo de evolución hidroquímica e isotópica

El modelo de evolución hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas, desde el sistema volcánico e hidrotermal del borde E, hasta las salmueras del núcleo salino, está sintetizado en la Figura 2. A lo largo del margen E del Salar de Atacama, aparece un cordón de lagunas y superficies inundadas generadas por la descarga de agua subterránea procedente del sistema detrítico y volcánico del E. La geoquímica de estas aguas muestra indicios de contribución hidrotermal, con concentraciones relativamente elevadas de As, Li y B. En su recorrido a través de las litologías acuíferas (volcánicas y detríticas), estas soluciones aumentan de salinidad con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  prácticamente constantes, como consecuencia de la disolución de los componentes evaporíticos. En las zonas de piedemonte entre el sistema montañoso y las zonas de costra evaporítica, se desarrollan potentes depósitos de conos aluviales. La zona distal de estos depósitos coincide con el cambio de pendiente estructural y con la posición de la cuña salina. En este contexto, descargan las soluciones hidrotermales, evaporándose y precipitando carbonato cálcico. Como consecuencia, ha ido generándose una zona de costra carbonatada de manera periférica a las demás facies evaporíticas [2] (carbonatada-sulfatada-clorurada). Esta precipitación está controlada por los diferentes órdenes de solubilidad a partir de una solución acuosa que va siendo progresivamente concentrada. Parte de estos depósitos carbonatados se encuentran en el subsuelo del sistema acuífero al E de la actual cuña, por lo que las soluciones hidrotermales, antes de aflorar en la zona de la cuña, disuelven carbonatos, aumentando el pH por encima de 8.0.

Durante la época invernal, el caudal de descarga en la zona de la cuña aumenta. Este incremento de la tasa de flujo lleva asociado la inundación de grandes extensiones al W de la posición de la cuña. Estas aguas se equilibran con las condiciones ambientales de presión y temperatura, experimentando procesos evaporativos. Como consecuencia de la evaporación, aumenta la salinidad, densidad y los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de las aguas, que alcanzan el estado de saturación respecto al carbonato cálcico, precipitando y retroalimentando la costra superficial. Como resultado, la composición del agua desbordada evoluciona hacia una solución salina, con valores de pH en el entorno de 7, y concentraciones relativamente bajas de Ca y  $\text{HCO}_3^-$ .

A partir de estas zonas de inundación estacionales, las aguas desbordadas y evaporadas siguen diferentes vías advectivas, según el dominio hidrológico particular de cada sector. Por una parte, se infiltran y se mezclan con las aguas subterráneas locales, recargando el



Geología  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009

sistema acuífero del núcleo salino, otra parte del recurso, sin embargo, circula superficial y subsuperficialmente hacia el W, al dominio de las lagunas permanentes del sistema Soncor (Chaxa y Barros Negros; Figura 1), y la vía de drenaje superficial que las recarga (canal Burro Muerto). Este sistema permanente de aguas superficiales, situado al W del cordón marginal de lagunas, está físicamente sustentado por la existencia de un medio limoso de baja permeabilidad en el subsuelo, rico en materia orgánica. La interacción entre las soluciones salinas, que circulan subsuperficialmente, y el substrato litológico de este sector tiene como consecuencia la degradación del componente orgánico del sedimento, y el incremento de la concentración de las especies carbonatadas en solución. En este contexto, las especies catiónicas son susceptibles de ser intercambiadas en las arcillas. A pesar de ello, no resulta obvio relacionar la distribución de las concentraciones acuosas observadas con este proceso geoquímico. La capacidad de intercambio catiónico en las arcillas es limitada, sobretodo en este medio extremadamente salino.

El sistema advectivo subsuperficial descarga, finalmente, en laguna de Barros Negros (Figura 1). En este ámbito, se mezclan con las aguas superficiales más diluidas recargadas a través del canal Burro Muerto. El porcentaje de la mezcla es variable a lo largo del año y, por tanto, la salinidad de las aguas de la laguna. A estos procesos hay que añadir la evaporación directa de las aguas de la laguna [3, 4]. El aumento de la tasa de evaporación durante los meses de verano, y el descenso del caudal circulante por el canal Burro Muerto, son los responsables de que la salinidad de las aguas de la laguna se incremente drásticamente durante esta estación.

Barros Negros presenta un régimen de desbordamientos estacional a lo largo de su margen W. Esta estacionalidad está referida tanto al volumen como a la composición química e isotópica de las aguas desbordadas.

#### Conclusión y agradecimientos

El modelo de evolución hidroquímica e isotópica propuesto para el sector de Soncor ha sido verificado en otros ámbitos del margen E del Salar de Atacama. La estructuración hidrológica y geológica de estos sectores (como la no existencia de lagunas permanentes recargadas por aguas de escorrentía superficial), es la responsable de la existencia de variantes conceptuales del modelo.

Este estudio fue financiado por la Gerencia de Hidrogeología Salar, SQM Salar S.A. Un especial agradecimiento al personal del Grupo de Hidrogeología.

#### Referencias

[1] Risarcher F., Alonso, H., Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 63, 249-293.

[2] Bevacqua P. (1992). Geomorfología del Salar de Atacama y Estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título. Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 284 pp.

[3] Muñoz J. F. y Ortiz C.A. (2004). Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XIX, núm. 3, pp. 69-81.



XII Congreso Geológico Chileno  
Santiago, 22-26 Noviembre, 2009



Geología  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

[4] Mardones L. (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. El litio, un nuevo recurso para Chile. Santiago, Chile: Editorial Universitaria, 1986, 181-216 pp.

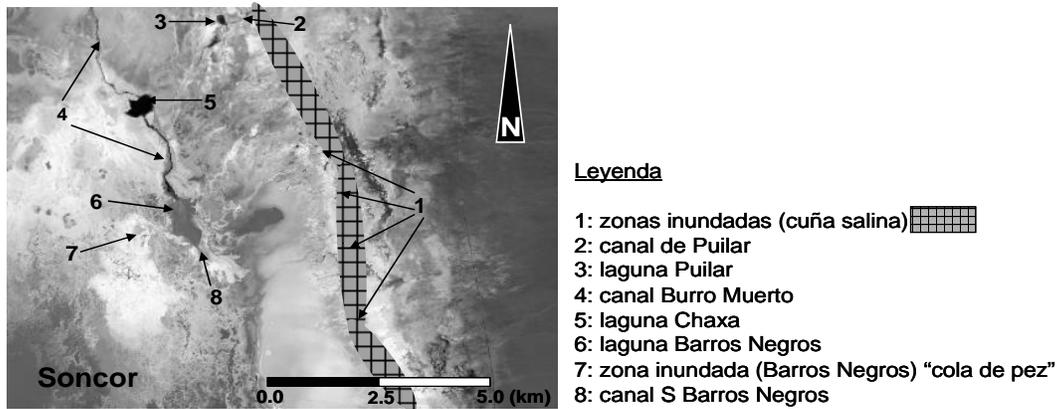
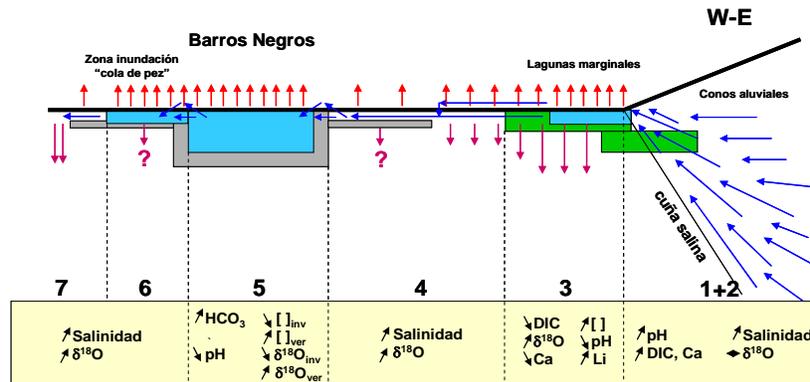


Figura 1: Localización de las lagunas, zonas inundables y canales del sector Soncor.



**Sectores / procesos**

- 1: circulación conos aluviales. Disolución componentes evaporíticos. Ascenso zona cuña
  - 2: interacción y disolución costra carbonatada
  - 3: desbordamiento y equilibrio condiciones meteóricas (CO<sub>2</sub> y evaporación). Precipitación carbonatos. Infiltración
  - 4: circulación superficial y subsuperficial. Infiltración
  - 5: interacción arcillas y materia orgánica. Mezcla aguas superficiales y evaporación. Gran variación estacional
  - 6: desbordamiento aguas de la laguna y evaporación (infiltración?)
  - 7: circulación subsuperficial e infiltración
- [ ]: concentraciones solutos

Figura 2. Síntesis del modelo de evolución geoquímica e isotópica de las aguas subterráneas y subsuperficiales en el margen E del salar de Atacama (flechas azules: circulación subterránea y superficial y subsuperficial, flechas rojas: evaporación, flechas lila: infiltración). En verde se han destacado los depósitos marginales de carbonatos, y en gris las litologías arcillosas ricas en materia orgánica.