

Relaciones hidroquímicas entre los distintos tipos de aguas superficiales del salar de Surire (Chile)

López Julián, P.L.¹, Garcés Millas, I.M.²

¹ Depto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza
Pedro Cerbuna, 12 – 50009 – Zaragoza (España)
E-mail: pllopez@unizar.es

² Depto. Ingeniería Química, Universidad de Antofagasta
Casilla 170 – Antofagasta – (Chile)
E-mail: igarces@uantof.cl

Abstract

The “salar de Surire” system is a saline body located in the Andean region of northern Chile. This region has marked volcanic features and it suffers extremely arid conditions. It is possible to distinguish three main types of solutions in this basin: water inputs coming from basin drainage (locally named “vertientes”), waters accumulated in a marshy rim (known here as “bofedales”) and waters associated with saline body (geothermal springs and brine ponds). Evaluation of hydrochemical features of waters collected along three field sampling stages has allowed us to verify two main facts: the close relationship existing between waters collected in vertientes (drainage inputs) and bofedales (external marshes), and, on the other hand, the almost identical ionic ratios of thermal springs and brines, without apparent connection between both groups of waters. The existing of bofedals associated with salars has a great importance for the development and maintenance of life in these extremely arid regions.

Keywords: Salar, vertiente, bofedal, brine

Resumen

El salar de Surire es un cuerpo salino ubicado en el altiplano andino chileno, en un entorno geológico de características volcánicas. La climatología actual extremadamente árida no permite una acumulación de agua superficial de gran extensión, y por lo tanto es posible diferenciar tres tipos principales de aguas: los aportes de drenaje de la cuenca (puntos de entrada de agua al salar o “vertientes”), las acumulaciones de agua en la aureola pantanosa externa o “bofedales”, y las aguas del interior del cuerpo salino (surgencias termales y salmueras). Los rasgos hidroquímicos de las aguas recogidas en tres campañas de recogida de muestras ha permitido comprobar la relación directa existente entre las aguas de drenaje y las que se acumulan en los bofedales por un lado, y entre las surgencias termales y las balsas de salmuera por otro, sin aparente conexión entre ambos grupos de soluciones. La existencia de bofedales con estas características químicas es de gran importancia para el desarrollo y mantenimiento de la fauna y flora en estas condiciones climáticas tan extremas.

Palabras clave: Salar, vertiente, bofedal, salmuera

Introducción

El salar de Surire se localiza en el altiplano andino del norte de Chile (latitud 18°53' sur, longitud 69°03' oeste), muy próximo ya al límite con Bolivia (figura 1). Es un cuerpo evaporítico que forma parte de un conjunto de sistemas salinos que se desarrollaron durante el Pleistoceno y Holoceno en una amplia región de Sudamérica, que actualmente se encuentra repartida entre Chile, Bolivia y Argentina. Los salares se formaron por la progresiva acumulación de sales precipitadas en lagos de elevada salinidad, pero las condiciones climáticas reinantes actualmente en la región condicionan que los salares aparezcan como extensiones cubiertas por material salino sólido, donde la presencia de agua se limita a los puntos de aporte (vertientes, surgencias termales) o a las zonas de acumulación de las aguas meteóricas.

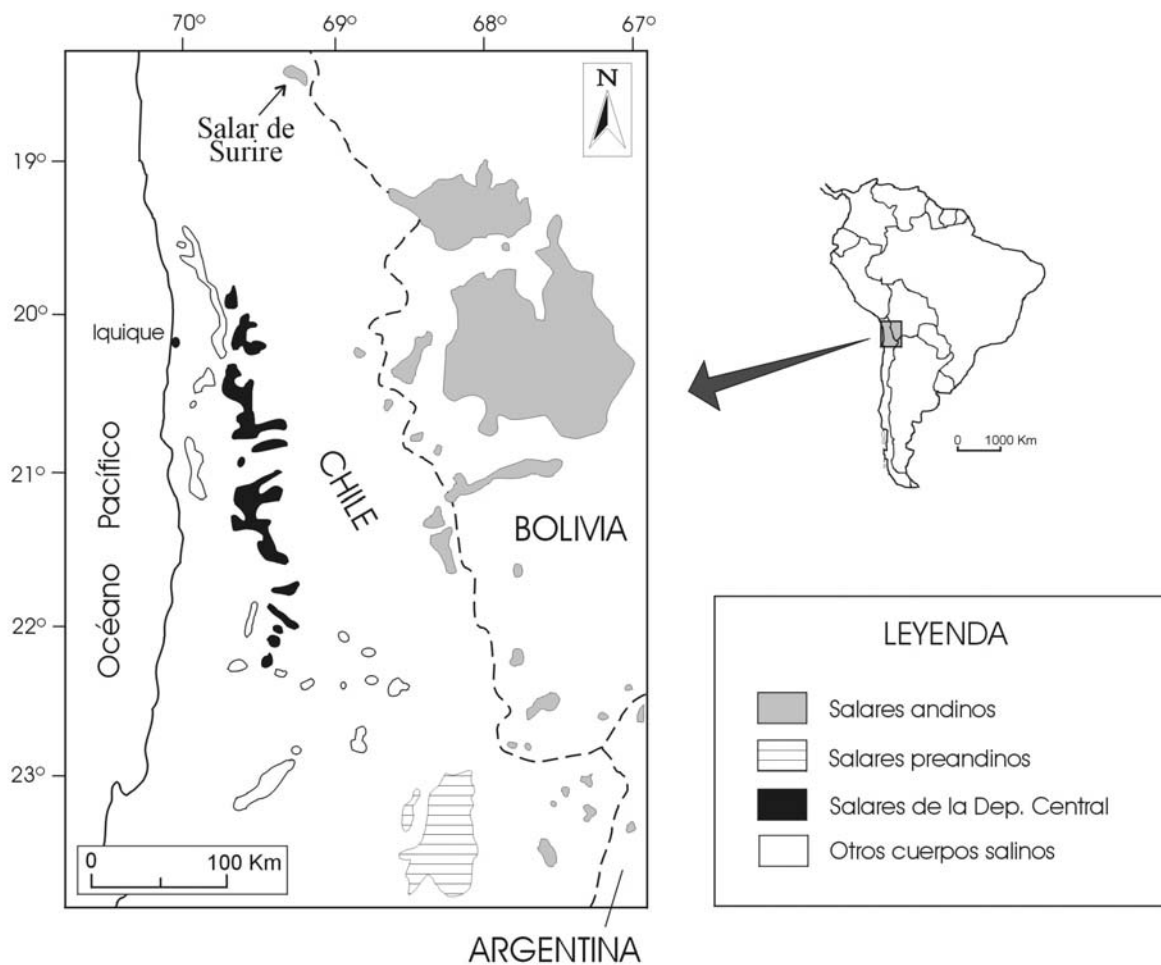


Figura 1.- Localización geográfica del salar de Surire.

El salar de Surire está emplazado en una cuenca hidrológica de unos 600 km², drenando materiales de origen volcánico y sedimentario. En la zona norte, este y sureste de la cuenca afloran materiales volcánicos cuaternarios, fundamentalmente lavas y rocas piroclásticas de composición traquiandesítica, siendo notable la presencia de azufreras. La zona más occidental de la cuenca presenta en superficie los materiales de la formación Oxaya, constituida principalmente por tobas ignimbríticas y sedimentos clásticos continentales de edad Plioceno-Pleistoceno. Finalmente y con una extensión más reducida, en los sectores noroeste y sur afloran materiales cuaternarios de la formación Huaylas, constituidos en gran medida por sedimentos clásticos (conglomerados, areniscas y lutitas) de origen fluvial que aparecen intercalados con tobas ignimbríticas.

El análisis sedimentológico y estructural de las unidades sedimentarias más antiguas demuestra la existencia de un paleolago que tuvo una extensión superior a la de la actual cuenca evaporítica. El desarrollo de este lago también se vio afectado por una intensa actividad volcánica. El relleno inicial de la cuenca correspondió a material clástico en el seno de un lago que, en el transcurso del tiempo geológico y a consecuencia de las variaciones climáticas, evolucionó a lago salino (Garcés, 2000). Los 60 m del relleno superior del salar lo componen materiales evaporíticos, sedimentos orgánicos y rocas sedimentarias de grano fino, pudiéndose diferenciar dos tramos principales, uno inferior en el que predominan sedimentos ricos en materia orgánica y con una fina diseminación de sales (sulfatos, cloruros y boratos), y otro superior constituido principalmente por sulfatos, cloruros, boratos y carbonatos subordinados, y en el que se incluye la cubierta actual del salar.

La morfología del cuerpo salino es alargada e irregular, con un eje mayor de disposición aproximadamente este-oeste y una longitud de unos 20 km (figura 2). El área cubierta por sedimentos salinos es de unos 150 km², y se encuentra rodeada por elevaciones que en su mayor parte corresponden a conos volcánicos cuaternarios que alcanzan cotas superiores a 5000 metros sobre el nivel del mar, como por ejemplo los cerros Puquintica (5780 m), Liscaya (5616 m), Arintica (5597 m), Chuquiananta (5559 m) y Chiguana (5317 m). En los perfiles presentados en la figura 2 se observa que la superficie del salar aparece ligeramente basculada hacia el noroeste, lo que condiciona tanto la dirección de los flujos de aguas superficiales que acceden al salar como la ubicación de las acumulaciones temporales de agua sobre su superficie.

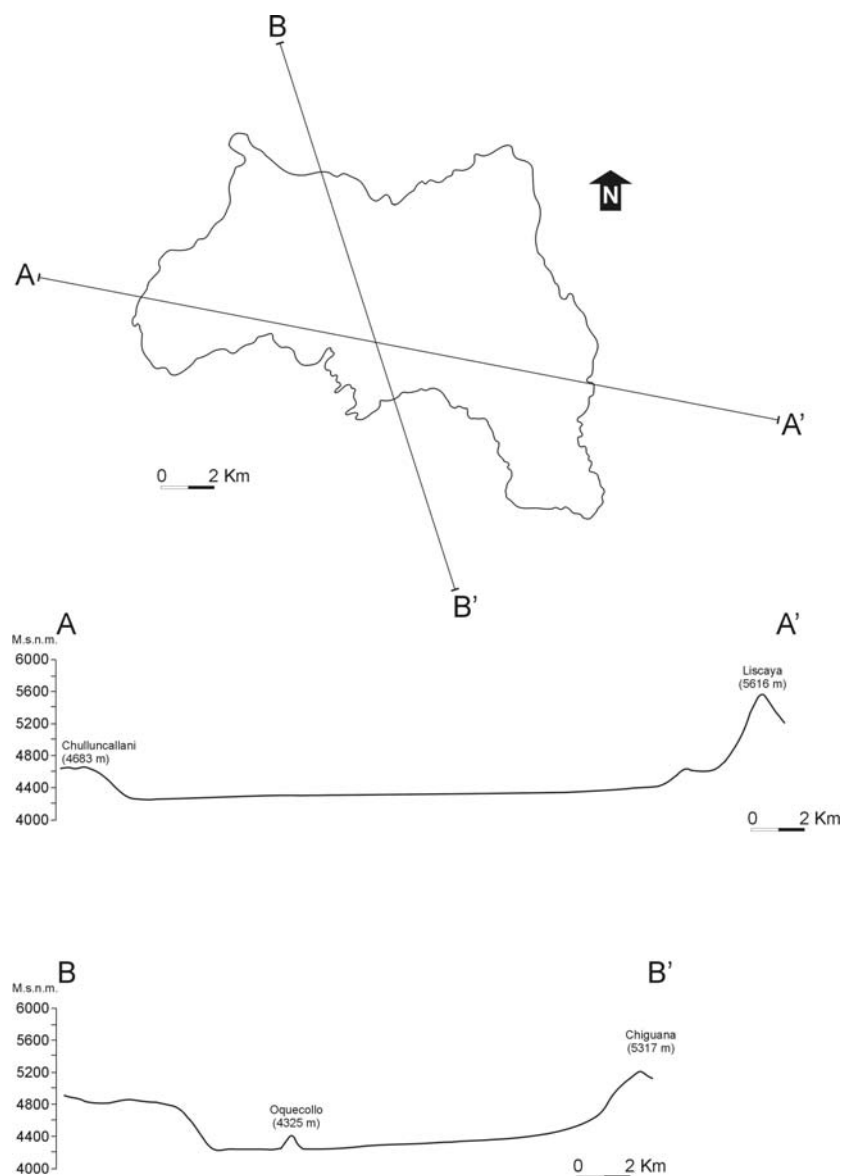


Figura 2.- Perfiles hipsométricos del salar de Surire, en los que se aprecia el ligero basculamiento de la superficie hacia el noroeste.

La influencia del vulcanismo en la formación y evolución de la cuenca está evidenciada por varias características, entre las que destacan la presencia del volcán Oquecollo en el centro del salar, y la existencia de surgencias termales en el sector suroriental del salar que demuestran una importante actividad incluso en la actualidad.

La climatología del área del salar de Surire presenta los rasgos típicos del altiplano chileno, definido por Fuenzalida (1967) como estepario de altura, con aire muy seco, humedad relativa del aire muy baja, vientos predominantes del noroeste fríos y secos, y con

precipitaciones más abundantes entre los meses de diciembre y marzo. Las temperaturas máximas llegan a alcanzar los 20 °C en los meses de verano (periodo diciembre-marzo), situándose en invierno en torno a 10 °C. Por su parte, las temperaturas mínimas llegan a alcanzar los 25 °C bajo cero en invierno, mientras que en las noches de verano es normal que lleguen a registrarse valores de 10 °C bajo cero (Garcés, 2000). Por otra parte, las precipitaciones totales no suelen superar los 500 mm anuales, mientras que la evaporación potencial supera los 2000 mm anuales. De la exposición de estos valores se puede concluir la dureza térmica del clima de esta región, que condiciona el paisaje y el desarrollo de la vida vegetal y animal.

La alimentación hídrica actual del salar de Surire proviene mayoritariamente de los aportes que canalizan las precipitaciones que caen sobre la cuenca de drenaje y de los aportes subterráneos que se manifiestan como surgencias termales. Una parte de las precipitaciones cae directamente sobre la superficie del cuerpo salino, y a causa del ligero basculamiento del mismo tienden a circular hacia el sector occidental, donde se acumulan dando lugar a lagunas salinas estacionales. El resto de las precipitaciones que caen sobre la cuenca de drenaje se infiltran en los niveles de materiales clásticos que rellenan las vertientes, y acceden al salar como afloramientos de agua con muy baja concentración en solutos. Es el caso por ejemplo del río Surire, que drena un área de unos 80 km² en el sector sur de la cuenca, pero cuyo acceso al salar tiene lugar de manera difusa y no como un curso superficial de agua bien canalizado.

El otro aporte principal de agua tiene lugar a través de surgencias termales, que se localizan en el sector sureste del salar. De ellas la más importante es la de Polloquere, que aflora entre los materiales salinos del salar con un caudal aproximado de 50 l/s y una temperatura de surgencia en torno a 80 °C (Garcés, 2000). El agua aportada por las surgencias termales da lugar a un curso de agua que fluye sobre la costra del salar hacia el oeste, incrementando progresivamente su contenido en solutos por disolución de los materiales salinos sobre los que discurre.

Un aspecto relevante de la hidrología del salar de Surire es la existencia de una aureola pantanosa rica en vegetación, que se dispone en el área marginal del cuerpo salino que constituye el salar. Se trata de un ecosistema especial conocido como bofedal, y que consiste en un humedal de altura donde se desarrollan abundantes especies vegetales. Resulta especialmente contrastada la existencia de este tipo de ecosistemas junto a costras salinas de gran extensión, ya que es bien conocido el carácter tóxico que las sales poseen para el

desarrollo de la vegetación. Sin embargo, en el salar de Surire, al igual que en otros salares altiplánicos de la región, el desarrollo de bofedales tiene una importancia capital para la flora y la fauna, y ha podido desempeñar un papel importante en el abastecimiento de comunidades indígenas al proveer abundante agua y pasto para el ganado.

En el bofedal de Surire existe abundante y variada vegetación (coirón, paja brava, llareta y queñua, principalmente), y las comunidades animales están representadas sobre todo por camélidos (vicuñas y alpacas) y flamencos. Se trata de un bofedal de tipo altoandino (ya que se encuentra por encima de los 4100 m.s.n.m), de origen natural y de tipo hidromórfico o údico, ya que se presenta empapado en agua prácticamente de manera permanente, como se pudo comprobar en las campañas de desmuestre desarrolladas en distintas estaciones del año. Los bofedales altoandinos son ecosistemas muy importantes debido a que albergan variadas especies animales y vegetales en áreas donde las condiciones climáticas son muy adversas, y deben estudiarse y protegerse porque se muestran especialmente sensibles a los cambios en las condiciones hidrológicas.

Metodología

La metodología empleada para este estudio consistió principalmente en la recogida de soluciones diluidas y concentradas presentes en las distintas zonas del salar, a lo largo de tres campañas de recogida de muestras. Las campañas tuvieron lugar en enero de 1995, julio/agosto de 1996 y en septiembre de 1997, tomándose de este modo muestras correspondientes a distintas estaciones del año y cubriendo un rango amplio de las condiciones naturales bajo las cuales evoluciona el sistema salino.

De forma simultánea a la recogida de muestras se determinaron in situ la temperatura de campo y el pH de las soluciones, procediéndose a almacenar las muestras al abrigo de la luz durante su traslado al laboratorio de análisis químico, donde se realizaron las determinaciones del contenido en Ca, Mg, Na, K, Li (todos ellos mediante espectrometría de absorción atómica), SO_4 (precipitación con BaCl_2), Cl (método de Mohr), HCO_3 y CO_3 (potenciometría) y, en algunas muestras, se analizó también su contenido en B (técnica ácido-base).

El principal criterio para la elección de zonas donde proceder a la toma de muestras fue la presencia de soluciones superficiales, tanto en las áreas donde los aportes acceden al

salar (vertientes y surgencias termales) como en las de acumulación en los sectores marginales (bofedales) y más internos (láminas de salmuera) del mismo. El principal objetivo perseguido de este modo ha sido el de caracterizar los principales tipos químicos de las soluciones del salar, y estudiar las relaciones químicas existentes entre ellos.

Resultados

La serie de datos de soluciones consta de un total de 57 muestras, de las cuales 14 se tomaron en la primera campaña (enero de 1995), 25 en la segunda (julio/agosto de 1996) y 18 en la tercera (septiembre de 1997). Los resultados de los análisis químicos de las soluciones y los parámetros recogidos in situ en el campo están recopilados en Garcés (2000), concretamente en las tablas 9.5 A, B y C, (páginas 187 a 190). En conjunto, son soluciones con pH aproximadamente neutro o ligeramente alcalino, oscilando los valores extremos entre 6 y 9,5, y se trata de soluciones de baja concentración de solutos a excepción de las muestras de salmueras acumuladas sobre la superficie del salar, lo que se comprueba observando los valores medidos de densidad (en torno a 1 gr/cm^3 para muestras de vertientes, bofedales y surgencias termales, y entre 1,05 y $1,20 \text{ gr/cm}^3$ para las salmueras más concentradas).

Para evaluar los tipos químicos de las soluciones se ha procedido a realizar la representación de los datos químicos sobre los diagramas triangulares de Eugster y Hardie (1978). De lo observado en dichos diagramas (ver figura 3) se puede concluir que existe una elevada variabilidad de tipos químicos entre las soluciones superficiales del salar de Surire.

Las muestras de vertientes y bofedales presentan un alto grado de variación tanto en la distribución de cationes como de aniones. La composición aniónica varía entre el tipo HCO_3^- - (SO_4) - (Cl) y el Cl - (SO_4) , existiendo prácticamente todos los tipos intermedios. Por su parte, la composición catiónica varía desde el tipo Mg-Na-(Ca) hasta el Na-Mg . Las surgencias termales que afloran en el interior del salar presentan, por el contrario, una variabilidad mucho menos marcada. La composición aniónica oscila entre los tipos $\text{Cl-(SO}_4)$, $\text{Cl-(HCO}_3)$ y Cl , mientras que la composición catiónica de estas muestras varía entre los tipos Na-(Ca) y Na . Finalmente, las salmueras acumuladas en la superficie interna del salar exhiben una variabilidad mucho menos acusada. La composición aniónica varía en este caso entre los tipos $\text{Cl-(SO}_4)$ y Cl , y la composición catiónica es muy homogénea, siendo las salmueras del tipo Na .

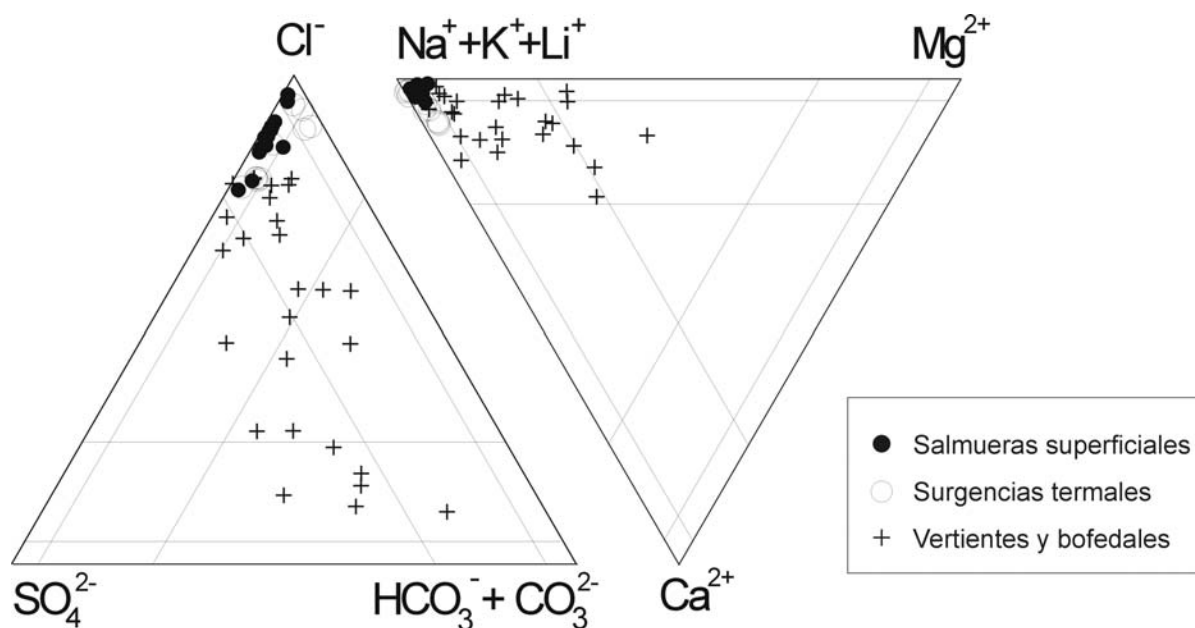


Figura 3.- Representación de los datos químicos de las soluciones sobre los diagramas triangulares de Eugster y Hardie (1978).

Discusión

El análisis de los datos obtenidos para las muestras recogidas en el salar permite establecer una serie de consideraciones acerca de las relaciones existentes entre los distintos grupos de soluciones, que van a complementar las observaciones realizadas en campo durante las campañas de recogida de muestras. Durante las mismas, se ha podido observar que la masa de agua acumulada en la superficie del salar de Surire es muy variable y dependiente del régimen de lluvias. Los aportes de soluciones termales en el sector sureste son prácticamente constantes a lo largo del año, y por tanto en la zona sur del salar existe un flujo superficial continuo de agua desde la zona de alumbramiento hacia el oeste, que finaliza en una laguna en las proximidades de su margen suroeste.

En las épocas de mayores precipitaciones (principalmente entre diciembre y marzo), la superficie del salar cubierta por lámina de agua superficial aumenta de manera significativa. Estas acumulaciones son de escasa profundidad, y su persistencia es muy limitada en el tiempo como consecuencia de la elevada tasa de evaporación.

En la zona marginal del depósito salino del salar Surire y asociados a los puntos de acceso de vertientes al salar se encuentran los bofedales, áreas pantanosas ricas en vegetación que permanecen embebidas en agua a lo largo de todo el año, aunque oscilando el nivel de las acumulaciones de agua en función del balance entre las precipitaciones y la evaporación. Esta circunstancia ha permitido recoger muestras de soluciones en los bofedales en todas las campañas realizadas. Finalmente, las vertientes aportan agua a las áreas marginales del salar en forma de cursos de agua canalizados y bien definidos, cuyo caudal oscila de manera muy acusada en función de la intensidad de las precipitaciones.

La representación de los datos composicionales de los distintos tipos de soluciones en la figura 3 ha evidenciado la similitud existente, en cuanto al tipo químico, entre las aguas aportadas por las vertientes y las soluciones acumuladas en los bofedales por un lado, y entre las surgencias termales y las salmueras superficiales del salar por otro.

Este hecho confirma las observaciones realizadas sobre la distribución de masas de agua superficial en el salar de Surire. Las características químicas de soluciones termales y salmueras son muy similares, debido a que las aguas termales surgen en el interior del salar y, al disolver sales en su ascenso, adquieren unas proporciones iónicas muy similares a las de las salmueras superficiales muestreadas en el interior del salar. Por otra parte, las aguas diluidas que aportan las vertientes muestran una mayor variabilidad iónica, ya que en la cuenca de drenaje del salar existen diferentes tipos de rocas volcánicas y sedimentarias, que confieren una distinta signatura química a las aguas que discurren sobre ellas. Esta misma variabilidad se observa en las muestras recogidas en los bofedales, ya que estas áreas encharcadas se alimentan casi exclusivamente de las aguas aportadas por las vertientes.

La representación de los datos composicionales permite establecer la relación directa que existe entre las surgencias termales y las salmueras por un lado, y entre las aguas de vertientes y de bofedales por otro, pero también indica la falta de relación directa entre ambos grupos de soluciones. Esta conclusión es muy importante, ya que los bofedales constituyen la base de un ecosistema muy rico en vida animal y vegetal que se alimenta exclusivamente por aguas meteóricas muy diluidas, y cuya existencia está además condicionada por la falta de relación directa con las aguas que circulan por la superficie del salar, caracterizadas por presentar una concentración iónica mucho mayor (y por tanto perjudicial para el desarrollo de vida, como se puede observar en el sector interno del salar) y unas relaciones iónicas marcadamente distintas.

Conclusiones

El salar de Surire es un cuerpo salino que se formó bajo unas condiciones climáticas y geodinámicas distintas a las actuales, en que el balance entre el agua que accede a la cuenca de drenaje (constituida por las precipitaciones y los aportes subterráneos termales) y la intensa pérdida por evaporación es incapaz de mantener un cuerpo superficial de agua con extensión equivalente a la del depósito salino. Esta situación es común a la mayoría de los salares andinos del altiplano chileno, boliviano y argentino, que aparecen como amplias extensiones salinas con pequeñas acumulaciones de agua superficial y que, además, experimentan constantes variaciones en sus dimensiones y distribución areal (otro ejemplo similar es el salar de Huasco, López *et al.*, 1999).

La comparación entre los distintos tipos de soluciones muestreadas en el salar a lo largo de tres campañas de recogida de muestras ha permitido comprobar que las aguas de aporte de vertientes acceden al salar y se acumulan en su zona marginal, caracterizada por el desarrollo de bofedales y con una abundante y variada vida vegetal y animal. Todas estas aguas son diluidas y con unas proporciones iónicas altamente variables, derivadas de la litología de la zona de la que proceden dentro de la cuenca de drenaje del salar, y sus características son marcadamente distintas de las que presentan las surgencias termales y la salmueras del interior del salar, lo que permite inferir la inexistencia de relación directa entre ambos grupos de soluciones.

Bibliografía

Eugster, H.P. & Hardie, L.A. (1978): "Saline Lakes". In: A. Lerman (Ed.), *Physics and chemistry of lakes*, 237-293. Springer Verlag.

Fuenzalida, H. (1965): "Clima". In: *Geografía económica de Chile*, Fomento de la Producción (CORFO), vol. 1: 188-325.

Garcés, I.M. (2000): Modelización geoquímica de soluciones concentradas: Aplicación al estudio de la evolución de algunos salares tipo chilenos. Tesis Doctoral inédita, Universidad de Zaragoza, 225 págs.

López, P.L.; Garcés, I.; Auqué, L.F.; Gómez, J.; Gimeno, M.J. y Lapuente, M.P. (1999): "Características geoquímicas y aspectos geológicos del salar de Huasco (Chile)". *Boletín Geológico y Minero*, 110, 297-316.