

GENESIS DE LOS LAGOS SALADOS

François Risacher

Todos han escuchado hablar de esos lugares más o menos míticos como el mar Muerto, el Gran Lago Saldo, el Valle de la Muerte, y de manera más prosaica, de esos desiertos de sal donde se batieron los records de valocidad en el suelo. Estos son sólo algunos de los cincuenta mil lagos salados y costras de sal repartidos en todos los continentes incluyendo la Antártica. Su importancia económica y científica no tiene ninguna proporción con el lugar tan modesto que ocupan en los manuales de geología. Se sabe, por ejemplo, que estos sistemas contienen las mayores reservas de litio en el mundo y que son explotados para extraer diferentes sales como los boratos, el potasio o los carbonatos y sulfatos de sodio.

Para los científicos, los lagos salados son también registradores de las fluctuaciones climáticas, verdaderos laboratorios químicos naturales, e incluso reservas de seres vivientes capaces de adaptarse a condiciones extremas

Los depósitos formados por evaporación (evaporitas) en medio continental son explotados por ciertas sales desde la Antigüedad: el cloruro de sodio para la alimentación y los carbonatos de sodio como detergentes. Los Egipcios utilizaban el natron, un carbonato de sodio hidratado, para conservar las momias.

Algunos lagos son reservorios potenciales de energía térmica. Son los lagos estratificados donde una capa de salmuera de densidad elevada es recubierta por una capa menos densa. La interfase entre los dos deja penetrar la radiación solar en la capa inferior, pero no la deja salir, lo que ocasiona un recalentamiento de la salmuera profunda. Un ejemplo espectacular es el lago salado Vanda en Antártica. Helado en su superficie, su temperatura alcanza los 25 °C en profundidad. Este tipo de lago podría ser utilizado en un futuro lejano como fuente de energía.

Se encuentran lagos salados y costras de sal en todas las zonas áridas del globo donde la evaporación potencial (la altura de agua anual que puede evaporar la atmósfera) es superior a la pluviosidad. Esta condición climática fundamental reina en cuatro cinturones aproximadamente paralelos al ecuador: a lo largo de los trópicos de Cáncer y de Capricornio así como en las zonas polares, ártica y antártica. Así, contrariamente a una idea bastante expandida, la formación de las evaporitas no está relacionada con los climas calientes.

Debido al aislamiento de las evaporitas continentales en los desiertos, su análisis científico es bastante reciente. Los primeros estudios se remontan a la segunda mitad del siglo XIX. Se refieren a las cuencas americanas descubiertas durante la conquista del oeste, y sobre el mar Muerto. La atención de los primeros observadores se centró sobre todo en la presencia, alrededor de las cuencas y muy por debajo del nivel actual

de los lagos, de terrazas y de sedimentos lacustres que prueban la existencia de antiguos lagos mucho más extendidos que los lagos actuales. Por ejemplo, el Gran Lago Salado, en Utah, hoy en día una superficie de 2600 km² y una profundidad de 8 m. Pero durante el Cuaternario, hace algunas decenas de miles de años, su cuenca estaba ocupada por un lago de 50 000 km² de superficie y de 300 m de profundidad. Asimismo, un lago tres veces más extendido que el mar Muerto recubría en otros tiempos todo el valle de Jordania. Más tarde, parece que una gran parte de los lagos salados y costras de sal en el mundo eran las reliquias de vastos paleolagos del Cuaternario.

El récord de superficie pertenece tal vez al predecesor del actual lago Eyre en Australia, que se extendía sobre 100 000 km². El salar de Uyuni, en el Altiplano boliviano, proviene del desecamiento de un lago de 45 000 km² de superficie. Allí donde hoy en día sólo se ve desierto, se encontraban, no hace mucho tiempo extensiones de agua de superficie aproximada a las de los más grandes lagos actuales del mundo, el Baikal o los Grandes Lagos americanos.

Muy pronto, se comprendió que el nivel de los lagos salados era un buen registrador de las fluctuaciones climáticas. Un lago salado permanente se caracteriza por su superficie de equilibrio y no por su volumen. Resulta que cualquier variación, por más mínima, de los parámetros climáticos, acarrea rápidamente una variación de la superficie del lago y por lo tanto de su nivel. El estudio de los antiguos lagos (paleolimnología) y la paleoclimatología fueron los primeros polos de interés en el estudio de las cuencas evaporíticas continentales. Los cambios climáticos actuales, como el posible recalentamiento de la Tierra y la desertificación de Sahel, han reactivado el interés de los lagos salados para estudiar los climas del Cuaternario.

Hacia fines de los años 1960, un nuevo dominio de investigaciones se abrió a los geoquímicos. Estos observaron primero que las evaporitas continentales eran mucho más variadas que las evaporitas marinas. Por una parte, todas las sales marinas se encuentran también en las cuencas continentales. Por otra parte, existe una familia de sales ausentes de sedimentos marinos: son los carbonatos de sodio, como el natrón, que precipitan, a partir de salmueras muy básicas, pH superior a 10. Asimismo, los sulfatos de sodio, los boratos y los silicatos de sodio son casi exclusivamente sales de evaporitas continentales. El catión mayor de las salmueras continentales es casi siempre el sodio (Na⁺). Hay pocas salmueras de magnesio (Mg⁺⁺) o calcio (Ca⁺⁺) dominante y no se conocen salmueras naturales donde el potasio (K⁺) sea el catión principal. Los aniones mayores son el cloruro (Cl⁻), el sulfato (SO₄²⁻) o el carbonato (CO₃²⁻). Así, hay numerosas combinaciones posibles en constituyentes mayores.

Por qué tal diversidad de composición química de las salmueras y de las sales que se derivan? Es sorprendente encontrar lagos carbonatados sódicos en cuencas casi enteramente constituidas de rocas cristalinas (granitos o basaltos) y desprovisto de rocas carbonatadas. Robert Garrells y Fred Mackenzie, de la Northwestern University,

establecieron en 1967 el balance geoquímico de un lago carbonatado sódico de Nevada -punto de partida del estudio geoquímico de los lagos salados- mostrando así que el origen de esta especie de lago era la trampa del gas carbónico del aire. En efecto, el agua de lluvia contiene ácido carbónico proveniente de la disolución del gas carbónico de la atmósfera. Esta ataca los silicatos de las rocas cristalinas de la cuenca de drenaje transformándolas en arcillas y liberando los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y del ácido silícico no disociado H_4SiO_4 en las aguas de las fuentes y de los ríos. El anión dominante que neutraliza las cargas eléctricas de los cationes no puede ser sino el bicarbonato HCO_3^- que proviene de la asociación del ácido carbónico del agua de lluvia. Cuando el agua diluida inicial se concentra por evaporación, sólo se precipitan minerales carbonatados: desde la calcita (CaCO_3 , el menos soluble) hasta el natrón ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, el más soluble). La salmuera se vuelve alcalina y su pH se eleva durante la evaporación.

Pero aún no se encontraba explicación clara respecto a la gran diversidad química de las evaporitas continentales. El mérito fue para Laurence Hardie y Hans Eugster de la Johns Hopkins University en Baltimore, quienes presentaron, en 1970, un modelo de evolución de las aguas por evaporación que da cuenta de las principales variedades de salmueras y de sales encontradas en los lagos salados. Según este modelo, la composición de la salmuera final y la naturaleza de las sales (sales neutras o sales alcalinas) que resultan, dependen fundamentalmente de la composición inicial del agua dulce de partida, la cual depende en gran parte de la naturaleza de las rocas de la cuenca de drenaje (rocas eúptivas, sedimentarias, etc.). Una modificación muy baja de esta composición puede conducir a una salmuera final totalmente diferente. La evaporación puede así ampliar muy bajas variaciones de la composición de las soluciones durante interacciones con los sedimentos, lo que a cambio permite detectar tales reacciones.

El problema es calcular exactamente la evolución teórica de la composición química de un agua que se evapora, así como la secuencia y las masas de los minerales que se precipitan. Esto sólo puede hacerse por medio de programas informáticos bastante complejos. Harold Helgeson y sus colegas de la universidad Northwestern y luego de Berkeley, fueron los primeros en poner a punto tales programas al final de los años 1960. El desarrollo de la micro-informática al principio de los años 1980 permitió la gran difusión de los programas informáticos de hidroquímica.

Gracias a estos programas, se compara la evolución real de las soluciones que se concentran en la cuenca y las sales que se precipitan a partir de estas soluciones, con su evolución calculada por medio de la computadora. Las divergencias entre las dos evoluciones traducen reacciones no previstas por el modelo y muy a menudo difíciles de evidenciar a través de la observación directa. Es así como hemos podido detectar recientemente una contaminación por el azufre atmosférico en la mayoría de las pequeñas cuencas evaporíticas del sur de Bolivia .

El estudio de las evaporitas continentales nos ha llevado, entre otros, a estudiar en detalle la mayor costra de sal del mundo (10 000 km²): el salar de Uyuni en el Altiplano de Bolivia. Su superficie de 10 000 km². Su estudio económico y científico fue realizado en el marco de un convenio entre el ORSTOM, la universidad de La Paz y el Ministerio de Minas de Bolivia. Aún protegido por el hombre -no ha sido explotado ni polucionado-, este salar representa un modelo de estudio ideal para comprender los mecanismos de formación de los depósitos evaporíticos continentales. Por otro lado, los resultados de orden económico están disponibles para la investigación científica, pero no sucede lo mismo con los estudios efectuados por las compañías mineras.

El salar de Uyuni ocupa, a 3 653m de altura, la depresión central del Altiplano entre las cordilleras occidental y oriental de los Andes. Es una zona desértica fría donde las temperaturas descienden hasta - 20 °C en invierno. El salar es una costra de halita (la sal de cocina, NaCl) muy plana y muy blanca impregnada, a partir de una quincena de centímetros de profundidad, de una salmuera intersticial muy rica en litio (en forma de catión Li⁺), potasio, magnesio y boro. Estos son elementos de gran interés económico que han motivado el estudio del salar de Uyuni. Se realizaron cuarenta sondeos, uno a 121 metros de profundidad, gracias a una pequeña sondeadora-saca muestras proporcionada por el ORSTOM. El espesor máximo de la costra de sal es de once metros. Se encuentra sobre sedimentos lacustres.

Las concentraciones de boro y de litio en las salmueras son las más elevadas del mundo -la concentración media en litio de la salmuera intersticial es de 550 mg/l con un máximo de 4700 mg/l (el agua de mar sólo contiene 0,1 mg/l y el litio explotado en el lago salado de Searles Lake en los Estados Unidos tiene tenores del orden de 80 mg/l). El boro del salar de Uyuni tiene una concentración media de 460 mg/l con un máximo de 4300 mg/l (el agua de mar contiene 4,7 mg/l). El mayor yacimiento de ulexita (borato de sodio y de calcio) de Bolivia se encuentra en el borde sur del salar. El potasio tiene tenores comprendidos entre 5 y 30 g/l. Las salmueras más concentradas del salar de Uyuni son, según nuestro conocimiento, las únicas cuyos dos cationes mayores son el magnesio y el litio.

El litio y el boro provienen de la alteración de rocas volcánicas del Altiplano. Estas tienen tenores relativamente elevados en estos dos elementos, pero no excepcionales: 40 ppm (parte por millón) en litio y 60 ppm en boro, en promedio. Su concentración se explica por la fuerte aridez y las bajas temperaturas que limitaron el desarrollo de arcillas y suelos cuyo complejo absorbente, muy rápidamente absorbido, no pudo fijar suficientemente el boro y el litio. De esta manera, estos elementos se concentraron libremente en las aguas superficiales, luego en las cuencas sedimentarias. Por otro lado, no se conocen minerales de litio que puedan atrapar este elemento, y en cuanto al boro, los boratos que se cristalizan en estas cuencas sólo consumen una pequeña cantidad. Por los demás, la concentración de estos elementos prosigue aún hoy en día pues el salar de Uyuni es en parte fósil.

El estudio de las antiguas formaciones lacustres alrededor de la cuenca ha mostrado que el salar de Uyuni provenía del desecamiento, hace dos mil años, de un inmenso lago salado de 45 000 km² de superficie y de 80 m de profundidad, bautizado como el lago Tauca. ¿Entonces de dónde viene la sal que se encontraba disuelta en este paleolago? Se conoce la masa de todos los componentes de las sales y salmueras del salar de Uyuni. Por otro lado, se conoce el volumen del paleolago Tauca (1200 km³).

Por lo tanto se pudo reconstruir la composición química de este antiguo lago. Era un lago clorurado-sódico de 80 g/l de salinidad total, es decir un poco más de dos veces la del agua de mar. Ahora bien, esta composición es inhabitual. Las salmueras de todos los lagos salados del Altiplano contienen aproximadamente un 75% de cloruro de sodio y 25% de otras soluciones. El lago Tauca tenía 95% de sal ordinaria (halita) y solamente 5% de otras soluciones. Era muy pobre en constituyentes secundarios, o enormemente rico en cloruro de sodio.

El problema tiene una importancia económica. En efecto, en el caso en que esta anomalía se debiera a una pérdida de constituyentes secundarios, como el litio, habría que buscarlos en profundidad. Un sondeo de 121 m fue realizado en la zona central del salar. Se han descubierto otras once costras de sal separadas por sedimentos lacustres: una especie de enorme milhojas.

La conclusión es que una decena de lagos salados, por lo menos, han ocupado sucesivamente el Altiplano central durante el Cuaternario, reflejando tantas oscilaciones climáticas y episodios sedimentarios que han fosilizado los niveles de sal. Al desecarse, cada uno de estos lagos depositaba una nueva costra de sal. Cada vez que un nuevo lago se establecía en la cuenca, redisolvió una parte de la costra depositada por el lago anterior.

Eso significa que cada lago era enriquecido con cloruro de sodio y que esta anomalía se transmitía de lago en lago por medio de costras de sal. Imaginemos que un nuevo lago viniera a ocupar actualmente el Altiplano. Este redisolvería una parte del salar de Uyuni y su composición química presentaría un fuerte exceso de sal ordinaria en relación con las soluciones secundarias.

Por otro lado, las salmueras que impregnaban todo el perfil no muestran ningún aumento de sus tenores de litio, potasio, magnesio y boro, con la profundidad, lo que confirma que estos elementos no se infiltraron bajo la costra del salar de Uyuni.

La sal del salar de Uyuni proviene de disoluciones sucesivas de antiguas costras de sal. Pero esto sólo aplaza el problema en el tiempo. ¿De dónde proviene la sal de las costras más antiguas en la base del perfil? Se constata que numerosas subidas de yeso (diapiros) de edad terciaria afloran en todo el Altiplano. Son los restos de antiguos salares. La existencia de fuentes de salmueras cloruradas-sódicas en uno de estos diapirs sugiere que la sal de las costras profundas proviene del deslave de la sal de estas antiguas formaciones evaporíticas al comienzo de la historia lacustre del Altiplano, hace algunas centenas de miles de años. Hoy en día sólo queda yeso, mineral poco soluble.

Pero aquí también se ha diferido el problema en el tiempo. ¿De dónde viene la sal de los salares del Terciario? Para responder esta pregunta tan importante nuestros conocimientos sobre las evaporitas del Altiplano boliviano no bastan. Existen miles de kilómetros cúbicos de sal continental terciaria, en Chile y en Argentina. Algunos autores se inclinan por un origen volcánico del cloro y del sodio. O bien hubo en una época anterior al Terciario depósitos de evaporitas marinas que habrían sido recobradas más tarde en medio ambientes continentales? Se conocen efectivamente en Bolivia formaciones evaporíticas en el Cretáceo, en el Pérmico e incluso en el Cámbrico. Son éstas el origen primero de la sal?

Futuros estudios conjuntos de la geodinámica de las cuencas y de la geoquímica de las antiguas evaporitas proporcionarán tal vez una respuesta a esta pregunta.

ORSTOM BOLIVIA

INFORME N° 47

Noviembre 1995

CONVENIO ORSTOM - UMSA



ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL MARCO DEL
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

compilación por
Michel Fornari
Co-Director

ORSTOM

L'INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION