

LA METAMORFOSIS DEL SALAR DE UYUNI

THE METAMORPHOSIS OF THE SALAR DE UYUNI

Luís Carlo Lázaro*

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>La superficie no uniforme y casi plana del salar de Uyuni, por efecto de las lluvias estacionales prácticamente se inunda y convierte en un lago salino. Pasada esta época, la intensa radiación solar en los meses siguientes (época seca) hace que el agua evapore, y la superficie de nuevo regrese a su habitual forma de salar, mostrando sucesiones lineales en relieve que marcan su extensión con figuras poligonales a manera de una inmensa red extendida.</p> <p>Proceso de disolución-cristalización, que en el presente artículo, es explicado considerando la asociación molecular en dipolo por efecto de Enlaces puente de Hidrógeno EH, característica eléctrica y de estructura molecular del agua, que junto a factores climatológicos energéticos, y fisicoquímicos entre otros, fijan un proceso estacional cambiante típico de los salares sudamericanos del triángulo del litio (Argentina, Chile y Bolivia), que se magnifica en el salar de Uyuni por su gran extensión.</p> <p>PALABRAS CLAVE: Enlaces puente de Hidrógeno EH, dipolo, soluciones saturadas, sobresaturadas y cristalización.</p>	<p>The uneven and almost flat surface of the Salar de Uyuni, as a result of seasonal rains, is practically flooded and becomes a saline lake. After this time, the intense solar radiation in the following months (dry season) causes the water to evaporate, and the surface again to return to its usual way of salar, showing linear successions in relief that mark its extension with polygonal figures in the manner of an immense extended network.</p> <p>Process of dissolution-crystallization, that in the present article, is explained considering the molecular association in dipole by effect of Hydrogen bridge bonds EH, electrical characteristic and of molecular structure of water, which together with energetic, climatological and physicochemical factors among others, show a typical seasonal process of the South American salares of the lithium triangle (Argentina, Chile and Bolivia), which is magnified in the salar de Uyuni because of its great extension.</p> <p>KEYWORDS: Hydrogen bridge bonds, dipole, saturated solutions, supersaturated and crystallization.</p>	<p>A superfície irregular e quase plana do Salar de Uyuni, como resultado de chuvas sazonais, é praticamente inundada e se torna um lago salino. Após esse período, a intensa radiação solar nos meses seguintes (estação seca) faz com que a água evapore e a superfície retorne novamente ao modo usual de salar, mostrando sucessões lineares em relevo que marcam sua extensão com figuras poligonais na forma de uma imensa rede estendida.</p> <p>O processo de dissolução-cristalização, que no presente artigo, é explicado considerando a associação molecular em dipolo por efeito das pontes de hidrogênio EH, características elétricas e de estrutura molecular da água, que juntamente com fatores energéticos, climatológicos e físico-químicos entre outros, um típico processo sazonal dos salões sul-americanos do triângulo de lítio (Argentina, Chile e Bolívia), que é ampliado no salar de Uyuni devido a sua grande extensão.</p> <p>PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio ponte ligações, dipolo, soluções saturadas, supersaturadas e cristalização.</p>
<p>History of the article: Received 10/05/2018. Style review 25/05/2018. Accepted 15/06/2018.</p>		

INTRODUCCIÓN

Los cambios en la naturaleza son finitos y cíclicos. Este concepto de mutación cíclica, es aplicable a los cambios producidos en el paisaje natural externo del salar de Uyuni¹: que durante la época de lluvias se inunda y convierte en un lago y el resto del año, muestra su extensa y peculiar costra salina².

DESARROLLO

El salar convertido en lago

El clima en el salar de Uyuni es árido, debido a esto la corta época de lluvias se inicia a mediados del mes de diciembre y prosigue hasta el mes de marzo. Ver tabla 1. La acumulación de agua, es favorecida por la superficie casi plana del salar y escasa permeabilidad de la costra salina que hace las veces de una bandeja natural, llenándose gradualmente con agua proveniente de las lluvias y alcanzando una altura promedio de 5 a 12 cm, e inundando la extensa costra salina de 10000 km² para formar un lago de alrededor 12000 km². Haciendo casi inaccesible el ingreso al salar y salida en esta época³.

¹ Sobre los orígenes del salar de Uyuni. Una teoría muy difundida se refiere a la evaporación sucesiva de lagos formados en la región altiplánica. Los geólogos franceses Servant y Fontes, convenio UMSA-ORSTOM, presentan en su informe del año 1978; la existencia de los dos últimos lagos en la época geológica del cuaternario: El lago Minchin 25000 años y el lago Tauca hace 10000 años que dio origen en su proceso de evaporación a tres sub-lagos: Poopó (12000 km²), Coipasa (11000 km²) y lago de Uyuni (20000 km²). Estos tres lagos conectados inicialmente por pequeños estrechos, fueron separándose con el transcurrir del tiempo, dando origen a la formación del salar de Uyuni, por evaporación de hace 10000 años, tiempo en el cual logra alcanzar su actual estabilidad geológica.

² La costra salina sólida y aparentemente seca, en su interior tiene una salmuera de la época geológica del cuaternario, totalmente distinta en su contenido iónico, respecto de la salmuera exterior formada en época de lluvia.

³ Es más conveniente usar vías alternas por tierra firme, que rodean el salar, para llegar o salir de cualquier población vecina. Suspendiéndose también la explotación de sal común.

Tabla 1
Época de lluvias, promedio de precipitaciones pluviales Salar de Uyuni

MES	PRECIPITACIONES PLUVIALES (mm)
Octubre	2
Noviembre	1
Diciembre	18
Enero	47
Febrero	39
Marzo	17
Abril a Septiembre	0
Total época de lluvias	124

Fuente: Elaboración propia, [1]



Crédito: L. Carlo. L, 2017

La acumulación de agua sobre la superficie, aprovecha la impermeabilidad de ésta, imposibilitando la absorción y adsorción hídrica, que disuelve parte de la costra salina produciendo una solución saturada de cloruro de sodio NaCl, en perfecto equilibrio químico y dinámico, con la fase sólida, representada por la siguiente ecuación:



Efectuando el análisis químico cualitativo, se ha verificado que los iones predominantes en esta salmuera lacustre son el sodio Na^{1+} y cloruro Cl^{1-} . Es posible, que en algunos sectores se tenga la presencia de los iones magnesio Mg^{2+} sulfato SO_4^{2-} y Ca^{2+} ; debido a que éstos se acumulan superficialmente en elevada concentración. La densidad promedio de la salmuera saturada alcanza $1,2 \text{ g.mL}^{-1}$, en consecuencia, llenando una piscina con esta salmuera saturada se puede flotar sin hacer ningún esfuerzo. El pH de la salmuera se mantiene prácticamente neutro con una ligera alcalinidad en las orillas donde se tiene mayor acumulación de agua. Este fenómeno de neutralidad se justifica porque los iones sodio Na^+ y los iones Cl^- , no se hidrolizan⁴. Además por ser una salmuera saturada, fácilmente cristaliza el NaCl , en la superficie de las cosas u objetos que humedece.

La salmuera interna



Crédito: L. Carlo. L., 2017

Se encuentra absorbida y adsorbida en la parte interna de la costra salina, La formación de esta salmuera interna se remonta al origen del salar en la era geológica del cuaternario.

La Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos ha realizado perforaciones de pozos de investigación distribuidas en una malla de $10 \times 10 \text{ km}$ en todo el salar de Uyuni. Este trabajo realizado permite sostener que la profundidad máxima del salar es de 460 m . En este intervalo de altura, obviamente que no todo es costra salina compacta. Se tiene mantos freáticos de salmuera limpia y otros acompañados de lodos arcillosos. Salmuera profunda que es importante por ser portadora de elementos iónicos considerados estratégicos, Ya en 1976, se detectó la presencia de ocho elementos iónicos básicos (Litio, Potasio, Magnesio, Sodio, Calcio, Sulfatos, Cloruros y Boro); en muestras de salmueras procedentes de pozos de investigación y de explotación, así como de ríos que convergen en el salar.

Las salmueras originarias del sector de río Grande al sud oeste del salar, contienen la mayor concentración de litio iónico de todo el salar. Además, por asociación natural entre el boro y el litio. En el delta del río Grande de Lipez, se tiene un yacimiento importante de ulexita (mineral de boro); por lo que estaría justificado asumir que en este sector se debe tener las concentraciones más altas en litio.

Aparición del salar, la costra salina

El lago externo que se forma durante la época de lluvias intensas, incluye los meses de enero y febrero. En el mes de marzo, se inicia la evaporación del agua y nuevamente comienza a asomar progresivamente la costra salina. Llegando al mes de mayo, desaparece por completo el lago, dejando en su lugar la extensa meseta blanquecina

⁴ Producir hidrólisis, disociación de un compuesto en sus elementos y reacción con el agua.

de sal común. De esta forma se completa, el ciclo metamórfico del salar de Uyuni. La superficie del salar, desde lejos, aparenta ser lisa, llana y uniforme. Sin embargo, de cerca, presenta sucesiones lineales y en relieve que forman figuras poligonales de aproximadamente 1 m^2 de área, y 5 cm de altura en las sucesiones lineales que forman cada polígono.

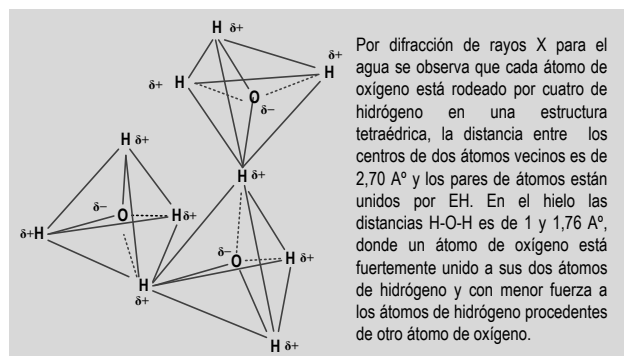


Crédito: L. Carlo. L., 2017

Estas figuras poligonales caracterizan el salar en época seca y se parecen a una gigantesca red de pescar extendida y lista para ser levantada.

Proceso de disolución-cristalización

Asociación molecular: se origina a través de la unión de moléculas simples para formar estructuras moleculares complejas, caracterizadas por la presencia de un Enlace denominado puente de Hidrógeno EH, que se hace más fuerte al crecer la electronegatividad del elemento. En el agua existe una asociación entre dos moléculas de agua, donde cada átomo de oxígeno está rodeado por cuatro de hidrógeno.



La electronegatividad del oxígeno hace que éste se polarice (adquiera una carga temporal) que afecta también a los átomos de hidrógeno, fenómeno eléctrico que en el agua produce un momento dipolar muy fuerte, formando un dipolo que puede orientarse en el campo eléctrico que existe alrededor de un ión.

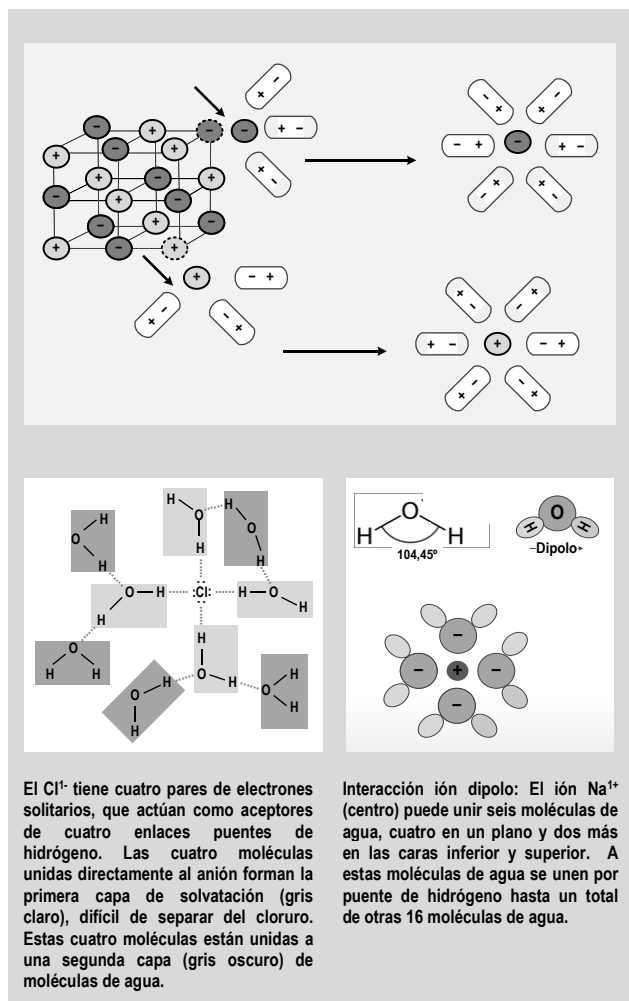
Una molécula o ión, cuando interacciona en extenso o parcialmente con moléculas de agua ya sea por enlaces puente de hidrógeno o atracciones eléctricas del tipo ión-dipolo, es soluble en agua.

Solubilidad de la costra salina en agua

En el salar de Uyuni, la costra salina está compuesta mayoritariamente por NaCl cristalizado, sustancia que en contacto con el agua de las lluvias, es afectada por las características estructurales y eléctricas del agua (enlace puente de hidrógeno y formación de dipolos). Con aniones oxigenados (CO_3^{2-} , SO_4^{2-}), el agua también puede formar puentes de hidrógeno debido a que el átomo de oxígeno actúa como aceptor de éstos. Además, hay que tomar en

cuenta la atracción del anión sobre el dipolo del agua. Similar efecto se presenta con Cl^{1-} que tienen pares de electrones solitarios y pueden actuar como aceptores de puentes de hidrógeno. Mientras que cationes como Na^{1+} , K^{1+} , Ca^{2+} o el Mg^{2+} se rodean de moléculas de agua a las que unen mediante interacciones del tipo ión dipolo y los átomos de oxígeno se orientan hacia el catión.

En la figura 1, se esquematiza la forma como el dipolo del agua actúa sobre la red cristalina de un compuesto iónico como el cloruro de sodio NaCl , produciendo en seguida la solvatación (aumento de moléculas de agua que rodean a un ión en solución), evitando la atracción entre iones de diferente carga, para volver a conformar la red cristalina característica del estado sólido.



Fuente: Elaboración propia, sobre información de [2], [3]

Figura 1: Esquematización acción del dipolo del agua sobre un compuesto iónico seguido de solvatación por enlaces puente de hidrógeno

Cristalización de la salmuera superficial, y polígonos

En época seca, cuando la salmuera superficial comienza a evaporarse rápidamente por efecto de la alta radiación solar y el clima árido (aproximadamente de 4 a 6 mm por día), esta pérdida gradual de agua ocasiona su posterior sobresaturación⁶, condición necesaria para que los iones sodio y cloro vuelvan a reagruparse para formar cristales de NaCl .

⁶ Se produce cuando una disolución contiene una cantidad de soluto superior al punto de saturación o es más de lo que se puede disolver.

La sobresaturación lenta soportada por la superficie no uniforme del salar, hace que coexistan dos fases, la sólida de cristales nacientes y la solución sobresaturada residual en charcos casi circulares y de espesor variable, que al ser afectados gradualmente por la evaporación intensa que genera la alta radiación solar del lugar, cristalizan en sus perímetros mayores cantidades de NaCl , alcanzando determinada altura. De esta manera al final de la época seca, la superficie del salar muestra estos conglomerados cristalinos de sal en sucesiones lineales no uniformes que siguiendo distintas direcciones parece que se intercalaran para dar forma en su relieve a estas figuras poligonales. Conglomerados cristalinos de sal, esperando nuevamente ser disueltos en la próxima época de lluvias, que inunde el salar de Uyuni.

CONCLUSIONES

Este proceso estacional de disolución–cristalización que afecta a la costra superficial del salar de Uyuni, de alguna manera es un referente recordatorio que demuestra los orígenes hídricos del salar y su posterior desecación por efecto del clima árido, de las condiciones topográficas y muy especialmente por la reducción de aportes de agua permanentes (afluentes).

Por otra parte, si bien la explicación desde el punto de vista químico, para este proceso estacional de disolución–cristalización, se fundamenta en las propiedades moleculares estructurales y eléctricas del agua: formación de enlaces puente de hidrógeno EH y la acción ión dipolo sobre la red cristalina de los compuestos iónicos tales como el ClNa . La contribución de factores energéticos, climatológicos y fisicoquímicos, a niveles micro y macroscópico, fijan un proceso estacional típico de las superficies de los salares sudamericanos triángulo del litio (Argentina, Chile y Bolivia), que se magnifica en el salar de Uyuni por su gran extensión.

BIBLIOGRAFÍA

- Ballivián, O., Risacher, F., 1981, Los salares del altiplano boliviano UMSA – ORSTOM, La Paz – Bolivia,
- Rivas, S., Ahlfeld, F., 1998, Los Minerales de Bolivia y sus Parajes, Tomos I y II, Santa Cruz de la Sierra – Bolivia,
- Moore, J. M., Stanitski, C.L., Wood, C.L., Kotz, J.C., 2000, El mundo de la química, conceptos y aplicaciones, Segunda ed., Prentice Hall, México.

Referencias bibliográficas:

- [1] Clima Uyuni: Temperatura y Tabla climática, disponible en: <https://es.climate-data.org/location/51284/>,
- [2] Los puentes de hidrógeno en el agua (artículo) | Khan Academy, disponible en: <https://es.khanacademy.org/...in.../hydrogen-bonding-in-water>,
- [3] Johnson, D.A., 1971, Aspectos termodinámicos de la Química inorgánica, Capítulo 5, Solubilidad de las sales iónicas, Ed. Alhambra S.A., Madrid – España.

(*) Licenciado en Ciencias Químicas, Docente Emérito Departamento de Materias Básicas, Facultad de Tecnología – UMSA.