

ANEXO 4
INFORME UNIVERSIDAD DE ALASKA ANCHORAGE



Rockwood
Lithium

ENERO 2014



UNIVERSITY *of* ALASKA ANCHORAGE

Informe de Avance para Rockwood Litio Ltda.: Proyecto Salar de Atacama

Uso de composiciones isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ y δD , mezcla geoquímica de dos componentes, y Clorofluorocarbonos para restringir la entrada de agua y la mezcla de salmuera en el Salar de Atacama, Chile

LeeAnn Munk, Ph.D., Scott Hynek, Ph.D., David Boutt, Ph.D.

8/31/2013

El contenido de este informe es de uso interno y exclusivo de Rockwood Lithium Ltd. y no para ser publicado

A DIVISION OF THE UNIVERSITY OF ALASKA STATEWIDE SYSTEM OF HIGHER EDUCATION

Resumen Ejecutivo

Los principales resultados y conclusiones de la investigación de la UAA¹ hasta ahora son:

- 1) Los flujos de agua que entran por el Sur y por el Este al Salar de Atacama tienen una firma distintiva no-evaporada en comparación con las aguas de la zona de transición y las salmueras del núcleo, lo que indica que existen al menos tres tipos de aguas que fluyen hacia la cuenca. Estos tres tipos de agua son los flujos de agua provenientes del Valle Tilomonte (Sur), el agua proveniente de los abanicos aluviales del Este, y las precipitaciones que se acumulan a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar.
- 2) El agua de la Laguna Brava y de la Laguna Punta tienen firmas isotópicas de $\delta^{18}O$ y δD variables, lo que indica que estos sistemas son dinámicos y se ven afectados por la evaporación y probablemente por la mezcla.
- 3) La salmuera muestreada del pozo TPB4 en el borde del núcleo del salar y la zona de transición es el agua más evaporada muestreada en el sistema. Su composición de $\delta^{18}O$ y δD es muy similar a la del agua de las pozas a lo largo del borde del núcleo del salar. Debido a que los otros pozos TPB, pozos de la línea S, y los pozos del núcleo presentan una firma mucho menos evaporada, el agua en esas localizaciones no se mezcla de manera activa y/o no está conectada a los flujos entrantes de agua dulce provenientes de la superficie, como las muestras de salmuera del pozo TPB4. ***Esto es importante, puesto que indica que el grado de infiltración de agua dulce en el área de la zona de transición es bastante bajo.***
- 4) La composición química del agua en términos de Na y Li en el área de pozas a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar no se puede explicar por la simple mezcla de ingreso de aguas poco profundas y salmuera proveniente del pozo TPB4. En cambio, es probable que el agua de las pozas provenga de precipitaciones que se acumulan en depresiones superficiales a lo largo del borde del núcleo del salar. Las imágenes satelitales también respaldan esta conclusión.
- 5) El agua de las lagunas parece no moverse al área de las pozas o hacia el núcleo del salar, sino que ***las lagunas son características hidrológicas persistentes que se ven afectadas principalmente por las aguas de entrada y por la evaporación.*** Además, la presencia de depósitos de rocas de antiguas lagunas en la zona sur de las lagunas modernas indica que la formación y migración de lagunas es un proceso natural que ocurre durante largos periodos de tiempo geológico.
- 6) La datación de las aguas de entrada con CFCs indica que las aguas provenientes de la parte Este del Salar de Atacama es más joven que la proveniente del acuífero del Valle Tilomonte. Esto es importante porque estas aguas son las dos fuentes principales de recarga de agua dulce al Salar de Atacama.

¹ Nota del Traductor: UAA= University of Alaska Anchorage.

- 7) Tal vez lo más concluyente es que los CFCs están presentes en las aguas de flujo de ingreso y en las aguas superficiales (pozas), pero son mínimas a ausentes en las muestras del campo de pozos de salmuera de la línea S, lo que indica que la infiltración de agua dulce no ocurre propiamente en el núcleo del salar y que ***la infiltración de aguas superficiales de entrada está confinada a la zona de transición/borde del núcleo del salar.*** En cambio, el agua que se observa a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar en el Sur del Salar de Atacama entra a esta área como precipitación, la cual subsecuentemente disuelve la halita y se evapora.

I. Introducción

Este informe resume información geoquímica del estudio colaborativo en curso entre la Universidad de Alaska y Rockwood Lithium Ltd. Se presenta un resumen de los resultados hasta la fecha de la caracterización de las dinámicas físicas y geoquímicas del agua en el sur del Salar de Atacama (SDA). La esencia de este trabajo es llegar a conocer los tipos de agua y el alcance de la infiltración del agua que entra a la zona de transición, cerca del borde del núcleo del salar. Específicamente para este informe se puso especial atención en el transecto del sudeste de la cuenca en el Valle Tilomonte, a través del sistema de acuífero superficial del área TPZ, Laguna Brava, el área de la salmuera TPB y las salmueras de la línea S (las ubicaciones se muestran en las Figuras 1 y 7). Las aguas del Valle Tilomonte son más frescas (presentan un total de sólidos disueltos (TDS) menor) que las aguas del TPZ, lagunas, TPB, y que las áreas de la línea S, y son consideradas aguas de flujo de entrada de este sistema hidrológico. El alcance de infiltración del agua de entrada en el área de las lagunas y en la zona de transición es importante debido a la sensibilidad ambiental de esta parte del SDA.

Los objetivos del presente trabajo son 1) caracterizar los tipos de agua de la parte sur de la cuenca y 2) definir los procesos geoquímicos que afectan la composición de las aguas, incluyendo el potencial para la mezcla de agua de entrada y salmuera. Como parte del estudio más amplio se pretende incorporar los datos geoquímicos presentados aquí en un modelo hidrodinámico físico. Hasta la fecha, este estudio es el estudio geoquímico más completo de las aguas del SDA y proporciona una visión importante de las condiciones ambientales del agua del área. Esta información puede ser usada por Rockwood Lithium Ltd. con el fin de tomar decisiones más informadas con respecto a su operación de salmuera en el Salar de Atacama.

II. Resultados y Discusión

Los resultados de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , un modelo de mezcla de dos componentes y las mediciones de clorofluorocarbonos (CFCs) de todos los tipos de agua a lo largo del transecto y de otras aguas cercanas se presentan a continuación. También se incluyen algunos datos de aguas del lado Este del SDA y de algunas aguas andinas en altura con el fin de demostrar el alcance de la infiltración del agua que entra al SDA y de extrapolar el estudio local del sur del SDA a un contexto regional.

II.a. Composición de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las aguas

Después de examinar la composición de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las diferentes aguas de este sistema se puede 1) distinguir los diferentes tipos de agua y 2) comprender procesos tales como evaporación y mezcla que afectan la composición del agua. Debido a que el agua se ve afectada por estos procesos, las firmas de $\delta^{18}\text{O}$ y δD no son capaces de identificar la() fuente() de los diferentes tipos de agua. Sin embargo, éstas proporcionan una visión de la evaporación del agua y por lo tanto, permiten comprender las diferencias en los cuerpos de agua en el SDA.



Figura 1.. Mapa de ubicación de los sitios de las muestras de agua. Los tipos de agua se indican en la leyenda, el cuadrado rojo demarca la ubicación de los depósitos de la antigua laguna. El área del acuífero de Tilomonte, los pozos TPZ, los pozos TPB, la línea S y los pozos TM6, BZTP-2 y S4 están marcados. La línea negra representa la ubicación aproximada de la sección transversal conceptual en la Figura 5 que se extiende desde los pozos de agua de entrada del acuífero Tilomonte hasta los pozos de la salmuera de la línea S. La línea roja segmentada representa la ubicación aproximada de la zona de transición/límite del borde el núcleo del salar.

La Figura 2 presenta los valores de $\delta^{18}O$ y δD de las aguas provenientes del sudeste del SDA. La Línea Meteorica Mundial (GMWL, por su sigla en inglés) y los valores para la nieve y otras aguas provenientes de los Andes solo son una referencia. La GMWL se define como la relación entre la composición isotópica de oxígeno ($\delta^{18}O$) y la composición isotópica de hidrógeno (δD) del agua meteorica (precipitación) en todo el planeta. Todas las aguas tienen como referencia la norma Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) la cual posee $\delta^{18}O$ y $\delta D = 0.0$ ‰ (per mil), por lo general las aguas meteoricas disminuyen su $\delta^{18}O$ y δD a medida que aumenta la latitud y la elevación (Craig, 1961) lo que debe tenerse en cuenta al interpretar estos datos de isótopos estables. Las aguas andinas de las cuales se tomaron muestras, presentadas a modo de comparación, indican este efecto, así como también algunos efectos de evaporación de los lagos en altura. Cualquier valor sobre 0 (positivo) indica que el agua se enriquece en el isótopo

pesado (D or 18O) con relación a VSMOW, y cualquier valor menor a 0 (o negativo) indica que el agua disminuye en el isótopo pesado relativo a VSMOW. El agua meteórica que no ha sido afectada por la interacción agua-roca o por la evaporación caerá en o muy cerca de la GMWL (Gat, 1996). El agua que cae fuera de la GMWL se debe a la concentración evaporada, la interacción agua-roca, o a mezcla.

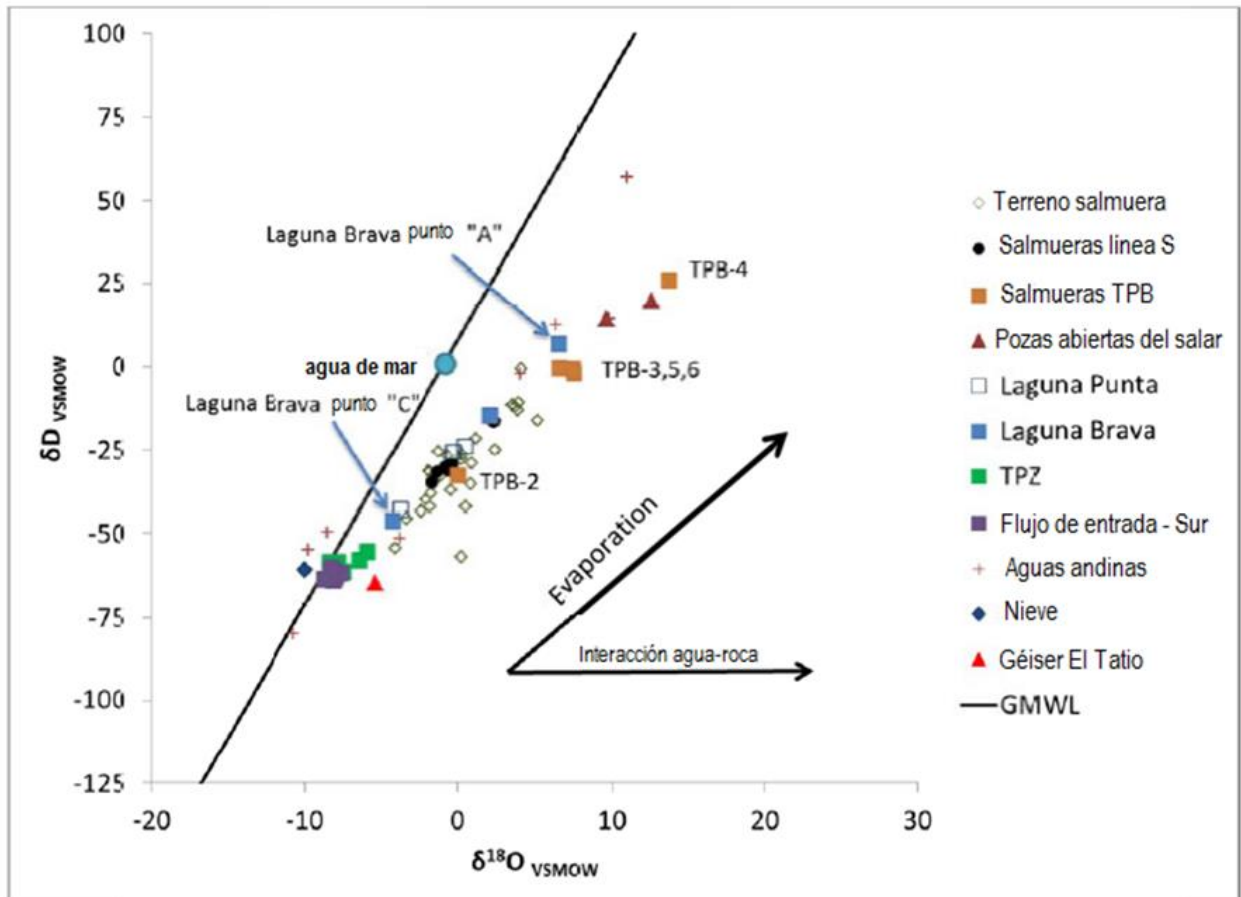


Figura 2. $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las aguas de este estudio. Los procesos de evaporación y de interacción agua-roca resultan en valores que varían de la GMWL como se señala con las flechas negras. La evaporación aumenta los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD del agua a lo largo de una pendiente menor que la de la GMWL. La interacción agua-roca provoca un aumento de $\delta^{18}\text{O}$ debido a la interacción con las rocas de silicato.

Los datos de la Figura 2 indican que el proceso dominante que afecta la composición isotópica de hidrógeno y oxígeno del agua en el sureste del SDA es la evaporación. El agua con mayor índice de evaporación proviene del pozo TPB4 y de la poza al sur del TPB4, así como también de la poza a lo largo del camino entre Peine y la Planta de Rockwood Lithium. Esto era de esperar ya que el agua expuesta a la atmósfera debiera tener la firma con mayor evaporación en comparación con el agua más profunda, en particular en un ambiente hiper-árido, como el del

SDA. Esta firma con alto índice de evaporación indica que el agua en las pozas del salar se mantiene en la superficie por un tiempo suficientemente largo como para registrar un efecto evaporado.

Las aguas que menos se evaporan (y las más isotópicamente disminuidas) incluyen la nieve y las aguas de entrada del Valle Tilomonte (flujo proveniente del Sur), así como también las aguas de entrada del lado Este. La muestra de nieve fue recolectada en una elevación de aproximadamente 4.200 m cerca del paso a los lagos Miñiques y Miscanti. Todas las muestras de precipitación caen en o cerca de la GMWL porque éstas representan el agua que no ha sufrido una evaporación significativa. Las muestras de la zona TPZ fueron tomadas de piezómetros poco profundos (<2m), en el área entre el flujo de entrada Sur (Valle Tilomonte) y las lagunas Brava y Punta. Las aguas del TPZ poseen valores levemente más enriquecidos que aquellos de los flujos de entrada, pero son menores en comparación con el agua de las lagunas. Esto nos indica que el agua en el TPZ es probablemente suficientemente superficial para ser afectada por la evaporación, pero no en el grado que se afecta el agua de las lagunas.

Los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de la Laguna Brava muestran una tendencia notable de evaporación sobre la relativa corta distancia entre el punto “Escondida C” en el lado sur de la laguna y el punto “Escondida A” al lado norte de la laguna. Una vez que el flujo de agua de entrada (punto C) es expuesto a la superficie está sujeto a la evaporación, lo que resulta en un aumento tanto de $\delta^{18}\text{O}$ como de δD . También puede haber algo de mezcla en las aguas de flujo de entrada en el punto “C” con el agua almacenada en las partes más profundas de la laguna, lo que contribuye con esta tendencia de aumento de $\delta^{18}\text{O}$ y δD . Esta misma tendencia de evaporación se puede comprobar en la Laguna Punta aunque, en general, el agua de la Laguna Punta tiene valores menores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , lo que, dada la fuente de agua similar, indica que el agua en esta laguna se evapora menos, comparada con la de la Laguna Brava. Estas observaciones, y datos adicionales, demuestran que los sistemas de las lagunas son químicamente dinámicos y complejos. Esto es evidente porque existe un depósito de carbonato de una antigua laguna en el lado sur de la cuenca del SDA (vea la Figura 1, cuadrado rojo), lo que indica que los aspectos físicos de los sistemas de lagunas son dinámicos y complejos. Este antiguo depósito de laguna demuestra que existieron otras lagunas que se formaron en esta área del orden de 10.000-10.000.000 de años atrás, las cuales fueron posteriormente afectadas por fuerzas tectónicas que las han levantado y expuesto sobre la superficie del SDA. Este rango de edad es amplio, y podría ser reducido en un futuro con otros estudios. Independientemente de la edad exacta de este(os) depósito(s), no hay duda de que la formación, migración y preservación de las lagunas son procesos naturales que ocurren en este entorno hoy y en el tiempo geológico.

La mayoría de las muestras del campo de salmuera y de las salmueras de la línea S poseen un rango notable de valores de $\delta^{18}\text{O}$ and δD que indican cantidades variables de evaporación y mezcla durante la evolución de la salmuera. En particular, la salmuera del TPB4 que es uno de los pozos más cercanos al borde de la zona de transición/núcleo del salar. El TPB4 tiene características de disolución distintas de halita en sus alrededores, tanto en el Sur como en el

Este, y posee valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD más enriquecidos que cualquier otra muestra de salmuera. Esto nos indica que la salmuera del TPB4 está probablemente hidrológicamente conectada al agua de las pozas a lo largo del borde de la zona de transición. Esto es respaldado por el hecho de que el agua de las pozas posee una composición isotópica similar a la salmuera del TPB4. Las otras salmueras del terreno de salmueras no tienen esta misma firma de evaporación y, por lo tanto, pareciera que no estuviesen conectadas a las mismas fuentes de agua superficial como el TPB4. Sugerimos que agua superficial proveniente de las precipitaciones en las tierras altas circundantes fluye a lo largo del margen del núcleo del salar donde se disuelve la halita, se evapora, y quizás migra hacia el núcleo a distancias muy cortas. Seguiremos investigando esta hipótesis con otros datos geoquímicos y geofísicos.

Algunas de las salmueras también grafican trayectorias que pueden representar interacción agua-roca de fuentes geotérmicas (Figura 2). Una de las hipótesis puestas a prueba es si hay o no fuentes geotérmicas de agua que traen Litio hacia el núcleo del salar. Para hacer la comparación se agregó agua geotérmica de El Tatio a la Figura 2, ya que es la única agua geotérmica de fácil acceso en el área del SDA. Algunas salmueras tienen valores más enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$ que la de El Tatio. Si el agua de salmuera que se originó en una fuente similar a la de El Tatio en la GMWL y tiene valores de δD similares, se puede inferir que ésta se aleja de la línea mundial de agua meteórica (GMWL) en una pendiente muy baja (en la Figura 2). Esto es característico del agua geotérmica porque intercambia isótopos de oxígeno con rocas que contienen ~50% de oxígeno por masa, y un mínimo de hidrógeno. La muestra del terreno de salmuera que tiene el valor de δD más bajo (cerca de -60%) y un valor de $\delta^{18}\text{O}$ cercano a cero es el candidato más fuerte para la salmuera con un importante componente geotérmico.

Tres conclusiones importantes obtenidas de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD . La primera es que las aguas de entrada al SDA tienen una firma distinta no evaporada en comparación con las aguas de la zona de transición y las salmueras del núcleo, lo que indica que existen al menos tres tipos de aguas que fluyen hacia la cuenca. Estos tres tipos son el flujo de ingreso del Sur, el flujo de ingreso del Este, y la precipitación que se acumula a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar. La segunda es que las aguas de la Laguna Brava y de la Laguna Punta tienen firmas isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ y δD variables, lo que indica que estos sistemas son dinámicos y se ven afectados por la evaporación y probablemente por la mezcla. La tercera es que las muestras de agua sacadas del pozo TPB4 ubicado en el borde del núcleo del salar y en la zona de transición demuestran que ésta es el agua que más se evapora en el sistema y que su composición de $\delta^{18}\text{O}$ y δD es muy similar a la del agua de las pozas a lo largo del borde del núcleo del salar. Debido a que el otro TPB, la línea S, y los pozos del terreno de la salmuera, los cuales están ubicados a una gran distancia del borde del núcleo del salar, presentan una firma mucho menos evaporada, se cree que el agua en esos lugares no se mezcla de manera activa o no está conectada a los flujos de agua dulce provenientes de la superficie, así como las muestras de salmuera del pozo TPB4. ***Esto es importante, puesto que indica que el grado de infiltración de agua dulce en el área de la zona de transición es bastante bajo.***

II.b. Modelo de mezcla de dos componentes

Para poner aún más a prueba la posibilidad de la mezcla de agua entre el área de las lagunas de la zona de transición, las pozas a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar y las salmueras TPB, se desarrolló un modelo simple de mezcla de dos componentes para esta área, basado en las concentraciones de Na y Li del agua. Si hay mezcla de agua de laguna con salmuera se espera que esta mezcla se produzca en el área de las lagunas, en las pozas del borde del núcleo del salar, y en las salmueras TPB debido a su estrecha proximidad.

En un modelo de mezcla de dos componentes, dos componentes puros de importancia física son seleccionados y las aguas que se asume por hipótesis que son mezclas de dos componentes puros se ponen a prueba en cuanto a si la composición del agua podría ser el resultado de la mezcla de dos componentes puros en proporciones variables (0-100%). Los elementos conservadores tales como Na y Li deben ser utilizados, ya que solo se ven afectados por la mezcla, la evaporación, y la dilución (Faure, 1998). En este caso la pregunta es “¿el agua del área de la laguna fluye hasta el núcleo del salar en el área de TPB4?” Los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD indican que el agua de las pozas a lo largo de la zona de transición es similar al agua de TPB4, lo que nos lleva a plantearnos si existe alguna conexión entre el agua de la laguna y el agua de las pozas. En otras palabras “¿cuál es el alcance de la zona de mezcla en el área de la zona de transición?”

La Figura 3 muestra los resultados del modelo de mezcla. Se escogió el agua de entrada en TM6, (la ubicación se muestra en la Figura 1) la cual es una cuesta arriba bien posicionada del Valle Tilomonte, como el componente de agua de entrada. El componente puro de la salmuera es la salmuera proveniente del pozo TPB4 (la ubicación se muestra en la Figura 1). Al utilizar estos componentes puros, los porcentajes de agua de TM6 y TPB4 teóricamente necesarios para producir aguas mixtas ubicadas entre TM6 y TPB4 a lo largo del trayecto de flujo superficial fueron calculados por medio de las concentraciones de Na y Li. Los resultados se muestran en la Figura 3 e indican que es posible modelar la totalidad del agua a lo largo del transecto como mezclas de los dos componentes puros *a excepción* del agua de las pozas a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar. El agua de las pozas cae fuera de la línea de mezcla y, por lo tanto, no se puede explicar por la simple mezcla de agua de entrada proveniente del Valle Tilomonte y de la salmuera del núcleo del salar. Esto indica que el modelo de mezcla de dos componentes es válido solo para aguas poco profundas y superficiales en el área que abarca TM6 hasta las lagunas y no se extiende hasta la salmuera del núcleo del salar. En otras palabras, las aguas superficiales de entrada pueden llegar hasta el área de lagunas, pero el agua de las lagunas no fluye hacia el área de las pozas ni del núcleo del salar. Debe haber otra fuente de agua que va hacia las pozas a través de la zona de transición/borde del núcleo del salar, la cual entra a esta área como agua dulce que disuelve la halita.

A partir de este modelo geoquímico se puede inferir que hay una restricción física en el agua que se mueve desde las lagunas hasta el núcleo del salar y que las lagunas están

“encaramadas”, lo que significa que existe una barrera hidrogeológica que retiene el agua en las lagunas. No se conoce de qué está compuesta esta barrera o si está ubicada por debajo o alrededor de las lagunas. Sin embargo, se sabe que las lagunas son características persistentes del agua de superficie, mientras que el nivel del agua de las pozas a través del borde del núcleo del salar parece ser afectado principalmente por la precipitación donde se ve un incremento en los niveles del agua después de que llueve y un deceso en el nivel del agua entre cada evento de lluvia. Además, la concentración más alta de Na del agua de la pozas (los puntos que caen hacia la derecha de la línea de mezcla en la Figura 3) también indica que existe alguna fuente de aguas más dulce (por ejemplo, precipitación) que entra a esta área y que disuelve la halita a lo largo del borde del núcleo del salar.

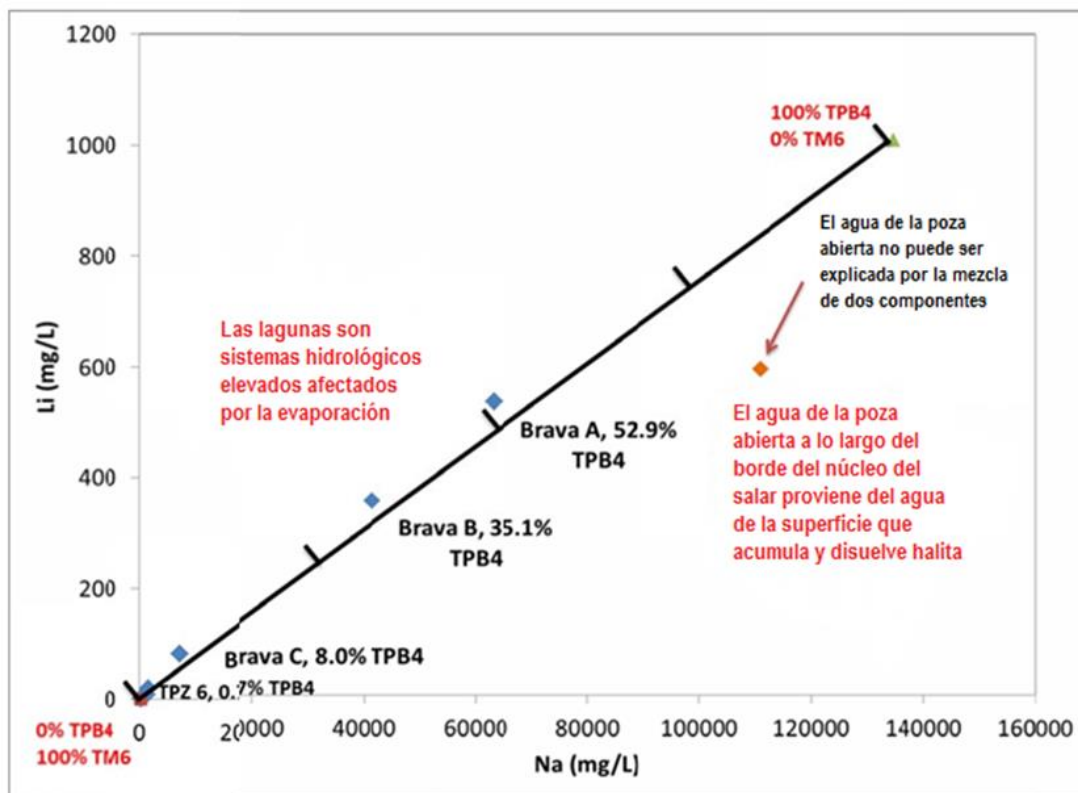


Figura 3. Modelo de mezcla de dos componentes para el Sur del Salar de Atacama. Los dos componentes puros son el agua subterránea superficial que proviene del pozo TM6 del Valle Tilomonte y la salmuera del pozo TPB4 (ubicaciones en la Figura 1). La línea negra representa una línea de mezcla teórica con marcas en 0%, 25%, 50%, 75% y 100%, los componentes puros del TPB4 y el porcentaje calculado de agua de TPB4 para cada agua mixta posible es indicado.

Dos conclusiones principales del modelo de mezcla. La primera es que la composición química del agua en el área de las pozas a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar no se puede explicar por la mezcla de aguas de entrada superficiales y la salmuera del TPB4. En cambio, el agua en las pozas proviene probablemente de la precipitación que se

acumula en las depresiones poco profundas en el borde del núcleo del salar. La segunda conclusión es que el agua de las lagunas no parece entrar al área de la pozas o al núcleo del salar, sino que *las lagunas son características hidrológicas persistentes que se ven afectadas principalmente por las aguas de flujo de entrada y por la evaporación.*

Con el fin de limitar más el modelo geoquímico se revisaron imágenes satelitales. Datos obtenidos por teledetección, en particular imágenes, son importantes porque permiten observar los cambios en la superficie del terreno a través del tiempo. Estas imágenes proporcionan una visión valiosa de cómo el área superficial de las lagunas y las pozas son afectadas por los eventos de precipitación. Si se conoce las relaciones área superficial a profundidad, se puede calcular el volumen de agua de las lagunas y de las pozas. Se comenzó este análisis como parte de esfuerzos de modelación hidrogeológica por medio del uso de imágenes Landsat. Este trabajo está en curso, pero los resultados presentados aquí indican de qué manera se podrá utilizar este tipo de imágenes e imágenes de alta resolución para extrapolar estas interpretaciones geoquímicas a un contexto físico, y para reconstruir las condiciones hidrogeológicas superficiales de la zona de transición para las últimas décadas.

La Figura 4 muestra dos imágenes Landsat, una antes de un gran evento de precipitación en el SDA en febrero de 2013 (imagen superior) y la otra después de este evento de precipitación (imagen inferior). A pesar de que la resolución de estas imágenes es ~30m, de la Figura 4 se puede deducir que el evento de precipitación causa cambios notables en las áreas de lagunas (en la Brava y la Punta y también en las lagunas del Este), pero en particular el cambio en la zona de transición/borde el núcleo del salar es bastante evidente. Otro cambio notable es en el margen suroeste de la zona de transición, donde el límite entre los conos de deyección que se emanan desde el Cordón de Lila (ver Figura 1 para su ubicación) y el Valle Tilomonte se vuelve más oscuro. Se cree que el cambio también es ocasionado por el aumento de descarga de los conos de deyección en el salar y es un indicio de que el TPZ y las áreas de lagunas también reciben el aumento de agua subterránea superficial. La imagen inferior de la Figura 4 respalda nuestra hipótesis desarrollada a partir del modelo de mezcla que el área de pozas del borde del núcleo del salar tiene mayor cantidad de agua después del evento de precipitación (color azul oscuro). Los cambios en las lagunas muestran características de azul oscuro similares, lo que indica un aumento del nivel de agua en esos lugares, lo que parece ser más evidente en las lagunas del lado Este que en las lagunas Brava y Punta, según las imágenes. Un análisis más detallado será necesario para poder cuantificar estos cambios.

Además, se obtuvo información de Tritio (^3H) de las muestras de agua tomadas en las áreas de flujo de entrada, zona de transición, lagunas, pozas, y precipitación. El Tritio permite trazar la(s) fuente(s) de agua similar a la de CFCs (presentada a continuación). Cuando se obtenga esta información, podremos interpretarla en el contexto de imágenes Landsat para luego poner a prueba nuestra hipótesis que las pozas contienen agua derivada de las precipitaciones, mientras que el agua de las lagunas proviene de agua subterránea poco profunda.

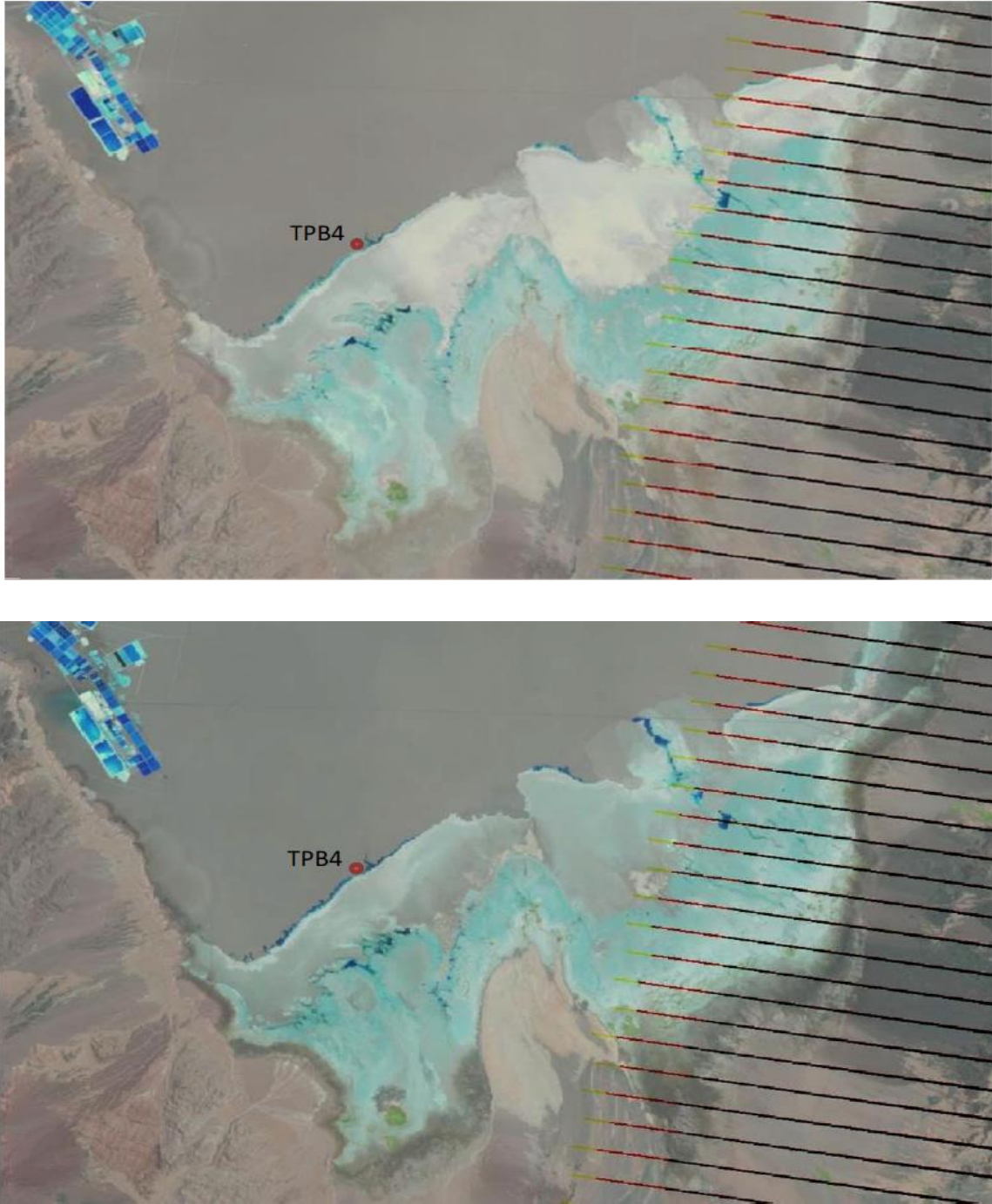


Figura 4. Imágenes Landsat del margen sur del SDA. La imagen superior fue tomada antes de un evento importante de precipitación en febrero de 2013 y la imagen inferior fue tomada después de este evento. La ubicación del TPB4 se muestra como referencia. Las líneas del lado derecho de las imágenes se producen por la cobertura incompleta del satélite. Servicio Geológico de los U.S. (2013).

II.c. Clorofluorocarbonos (CFCs)

Se investigó más el alcance de la infiltración de agua de entrada a la zona de transición/área del núcleo del salar y la edad de las aguas del SDA con clorofluorocarbonos (CFCs). Los CFCs son gases antropogénicos que están bien mezclados en la atmósfera. La historia global de la producción de CFC y su concentración atmosférica es famosa por tres moléculas (CFC-11, CFC-12, CFC-13) desde la década de 1940 (Plummer and Busenberg, 1999). La concentración atmosférica de CFCs en el hemisferio sur es muy similar a la del hemisferio norte. Por este motivo, la concentración de CFC en el agua subterránea es un método efectivo para restringir la edad de la recarga de agua subterránea en el hemisferio sur (Plummer et al., 2003). También se puede utilizar la presencia o ausencia de CFCs en el agua del SDA para comprender el alcance de la infiltración de agua dulce y/o de agua superficial.

A modo de ejemplo (Figura 5) se estima la edad del agua de entrada más fresca del Valle de Tilomonte de la zona de transición en el margen sureste del SDA. Mediante la medición de la concentración de moléculas de CFC en un pozo de agua subterránea de tres eventos de muestreo diferentes es posible calcular las concentraciones atmosféricas de estas moléculas en el momento cuando el agua *entró en el sistema de aguas subterráneas*. Se eligió el pozo BZTP2 (la ubicación se muestra en la Figura 1) del acuífero Tilomonte para esta parte del estudio, ya que contiene el agua de entrada de la parte sur de la SDA. El ancho de los cuadrados color rojo en las curvas de la atmósfera muestran en la Figura 4, teniendo en cuenta el rango potencial de recarga de salinidad, temperatura y elevación que se debe considerar al hacer las estimaciones de edad. Los datos de CFC-12 indican que el agua de entrada más joven en BZTP2 se recargó en la década de 1970. En general, las concentraciones de CFC-11 siempre indican una edad más avanzada, pero son coherentes con la recarga después de ~1958 (Figura 5). La biodegradación de CFC-11 y CFC-13 también se produce en algunos sistemas de aguas subterráneas, en particular en la reducción de los entornos y también en algunos casos durante el almacenamiento de la muestra (IAEA, 2006). Por lo tanto, las edades de CFC-12 son generalmente consideradas como las más fiables debido a que tienen las concentraciones más altas y que estas moléculas no son conocidas por biodegradarse. La edad CFC-12 de esta agua se extiende por varios años en la década de 1970, con base en las concentraciones atmosféricas de CFC estimadas en el momento de la recarga, y se considera que se trata de la mejor estimación de la edad a partir de los datos de CFC.

Independientemente de la asignación de una edad específica a las aguas subterráneas, los CFCs se pueden utilizar para identificar agua joven y también como un trazador de agua joven que fluye en un sistema dominado por agua mucho mayor (Plummer y Friedman, 1999). La figura 6 muestra el contenido de CFC de las aguas y salmueras del SDA muestreada en 2012. Se tomó nota de varias observaciones: 1) las muestras del margen oriental del salar tienen las concentraciones más altas de CFC de todas las aguas de entrada y son considerablemente más joven que el agua de BZTP2 (menor Tilomonte Valley), y 2) las muestras de salmuera tomadas al final de los pozos de la línea S (S4, la ubicación en la Figura 1) tienen concentraciones de CFC insignificantes.

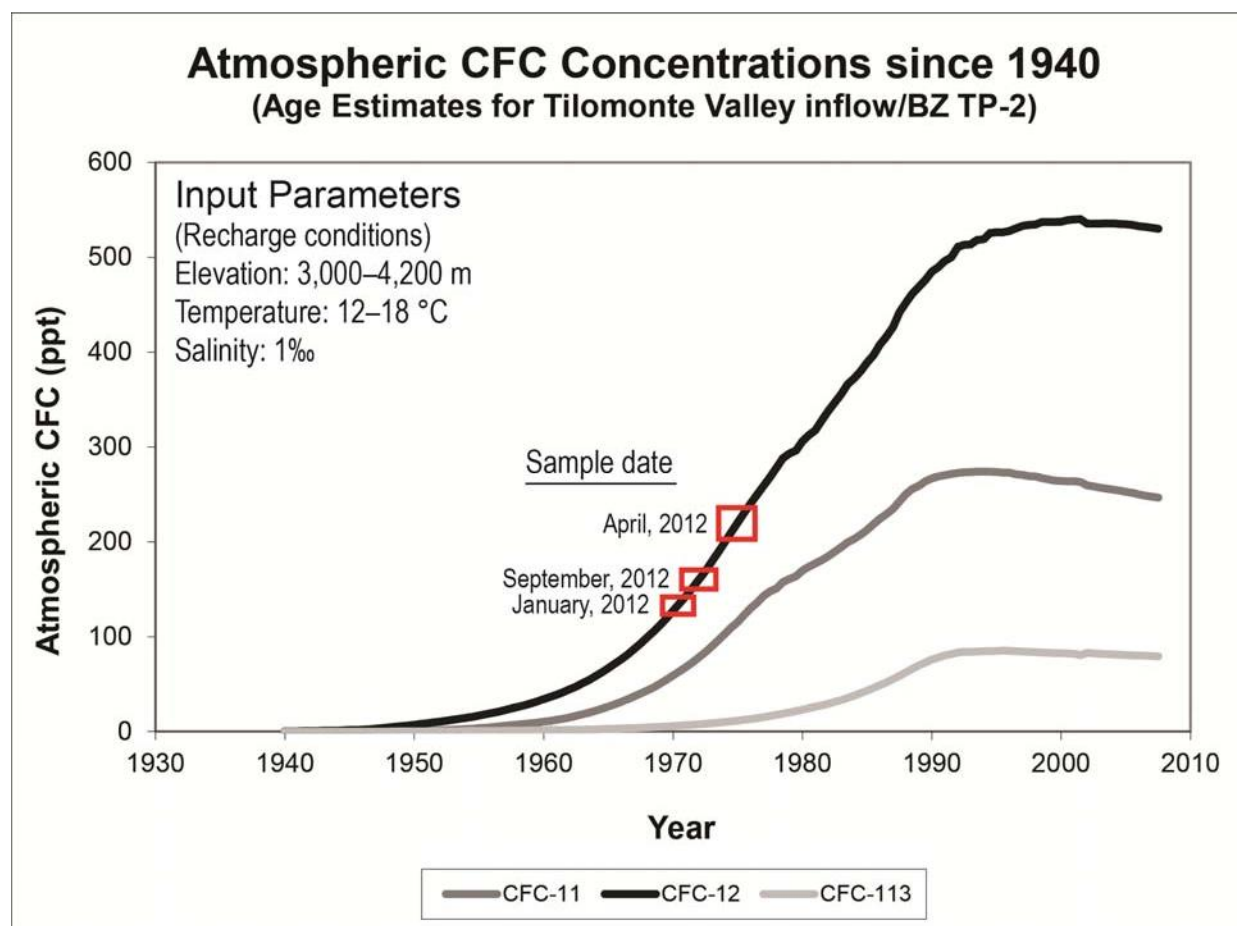


Figura 5. Curvas de concentración de CFC atmosférico, y edad de recarga estimada de agua de tres muestras diferentes de agua subterránea (BZTP2) representadas como el área de cuadrados rojos. Las concentraciones se presentan en partes per trillón (10^9), y son calculadas al tomar en cuenta la salinidad de recarga estimada, temperatura, y elevación, estos parámetros se muestran en la esquina superior izquierda del gráfico.

Si el agua joven, ya sea del Valle Tilomonte o del margen Este del SDA, se mezclara en el núcleo del salar en el pozo S4, se esperaría la presencia de CFC en la salmuera S4, la cual no se observa. El agua en las áreas de las pozas posee una conductividad específica muy alta ($>200,000 \mu\text{S}/\text{cm}$), la cual es de la misma magnitud de las salmueras medidas en los pozos TPB y en otros pozos de salmuera. Sin embargo, esta agua no se origina como salmuera o agua de laguna, es agua que se acumula en las depresiones en el margen del núcleo del salar por la precipitación (vea las imágenes Landsat en la Figura 4). Esta precipitación se mantiene en las depresiones, disuelve la halita hasta que alcanza la saturación de halita y/o se evapora con el tiempo.

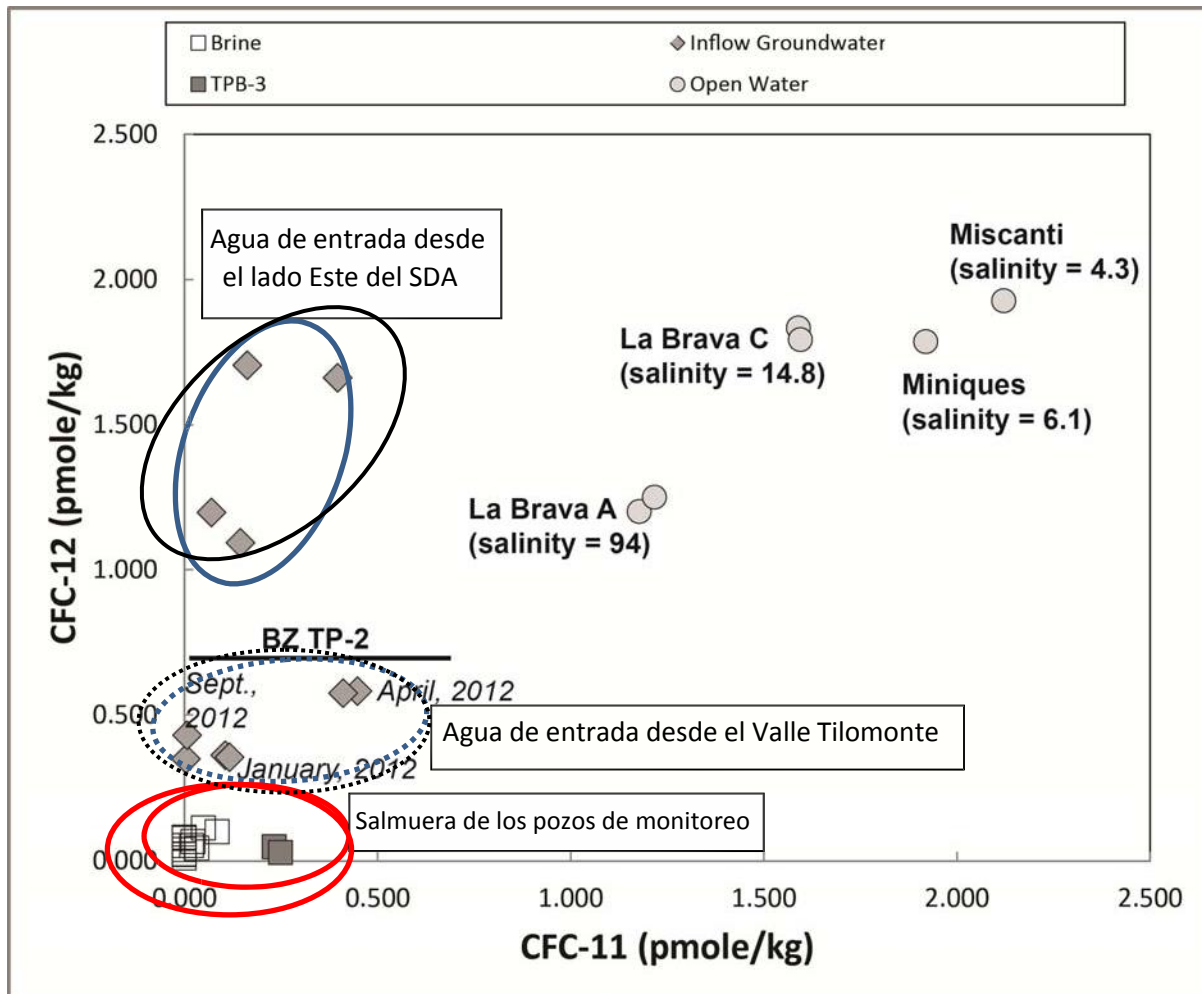


Figura 6. Valores de CFC para la salmuera, superficie (agua) y muestras de agua subterránea de flujos superficiales recolectadas en 2012.

Dos conclusiones principales de los datos de CFC. La primera es que el agua de flujo de entrada que proviene de las parte Este del SDA es más joven que el agua que proviene del acuífero del Valle Tilomonte. Esto es relevante porque existen dos fuentes principales de recarga de agua dulce para el SDA. La segunda, y el hallazgo más significativo, es la presencia de CFCs en las aguas dulces de entrada y en las aguas superficiales, y la ausencia de CFCs en las muestras de salmuera de la línea S, lo que indica que la infiltración de agua dulce no se produce en este lugar en el núcleo del salar, y que *la infiltración está confinada a la zona de transición/borde del núcleo del salar.*

III. Resumen de conclusiones

Aunque cada uno de estos tres conjuntos de datos geoquímicos que aquí se presentan entrega una visión de diferentes aspectos de flujo, transición y salmueras, si se consideran un solo conjunto, todos convergen en una misma conclusión. Ésta es que el alcance de la infiltración del agua de entrada al SDA se produce en el área norte de la Laguna Brava y al sur del pozo TPB (Figura 6).

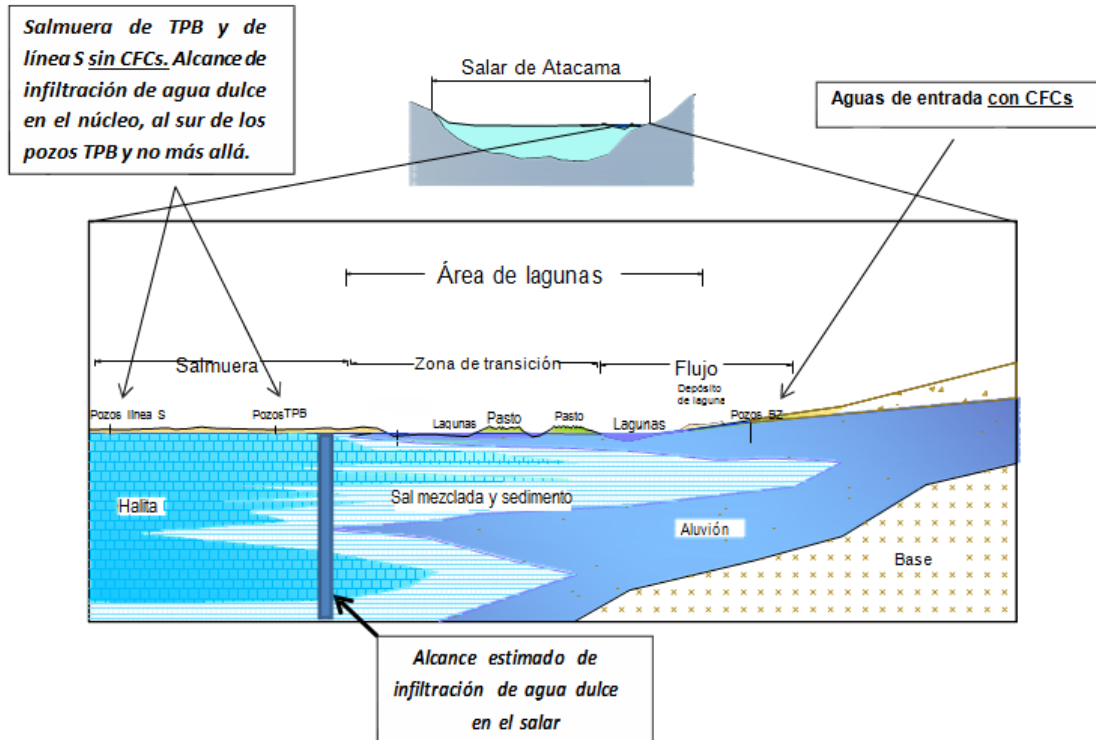


Figura 7. Sección transversal conceptual e interpretación de los datos CFC para el área sureste del Salar de Atacama.

Las principales conclusiones del estudio de la UAA hasta ahora son:

- 1) Los flujos de agua que entran por el Sur y por el Este al Salar de Atacama tienen una firma distintiva no-evaporada en comparación con las aguas de la zona de transición y las salmueras del núcleo, lo que indica que existen al menos tres tipos de aguas que fluyen hacia la cuenca. Estos tres tipos de agua son los flujos de agua provenientes del Valle Tilomonte (Sur), el agua proveniente de los abanicos aluviales del Este, y las precipitaciones que se acumulan a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar.
- 2) El agua de la Laguna Brava y de la Laguna Punta tienen firmas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y δD variables, lo que indica que estos sistemas son dinámicos y se ven afectados por la evaporación y probablemente por la mezcla.
- 3) La salmuera muestreada del pozo TPB4 en el borde del núcleo del salar y la zona de transición es el agua más evaporada muestreada en el sistema. Su composición de $\delta^{18}\text{O}$ y δD es muy similar a la del agua de las pozas a lo largo del borde del núcleo del salar. Debido a que los otros pozos TPB, pozos de la línea S, y los pozos del núcleo presentan una firma mucho menos evaporada, el agua en esas localizaciones no se mezcla de manera activa y/o no está conectada a los flujos entrantes de agua dulce provenientes de la superficie, como las muestras de salmuera del pozo TPB4. ***Esto es importante, puesto que indica que el grado de infiltración de agua dulce en el área de la zona de transición es bastante bajo.***
- 4) La composición química del agua en términos de Na y Li en el área de pozas a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar no se puede explicar por la simple mezcla de ingreso de aguas poco profundas y salmuera proveniente del pozo TPB4. En cambio, es probable que el agua de las pozas provenga de precipitaciones que se acumulan en depresiones superficiales a lo largo del borde del núcleo del salar. Las imágenes satelitales también respaldan esta conclusión.
- 5) El agua de las lagunas parece no moverse al área de las pozas o hacia el núcleo del salar, sino que ***las lagunas son características hidrológicas persistentes que se ven afectadas principalmente por las aguas de entrada y por la evaporación.*** Además, la presencia de depósitos de rocas de antiguas lagunas en la zona sur de las lagunas modernas indica que la formación y migración de lagunas es un proceso natural que ocurre durante largos periodos de tiempo geológico.
- 6) La datación de las aguas de entrada con CFCs indica que las aguas provenientes de la parte Este del Salar de Atacama es más joven que la proveniente del acuífero del Valle Tilomonte. Esto es importante porque estas aguas son las dos fuentes principales de recarga de agua dulce al Salar de Atacama.

- 7) Tal vez lo más concluyente es que los CFCs están presentes en las aguas de flujo de ingreso y en las aguas superficiales (pozas), pero son mínimas a ausentes en las muestras del campo de pozos de salmuera de la línea S, lo que indica que la infiltración de agua dulce no ocurre propiamente en el núcleo del salar y que ***la infiltración de aguas superficiales de entrada está confinada a la zona de transición/borde del núcleo del salar***. En cambio, el agua que se observa a lo largo de la zona de transición/borde del núcleo del salar en el Sur del Salar de Atacama entra a esta área como precipitación, la cual subsecuentemente disuelve la halita y se evapora.

IV. Referencias

Bowen, G.J., and Wilkinson, B., 2002. Distribución especial de $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación meteórica. *Geología*, v.30, no. 4, p. 315–318.

Craig, H., 1961. Variaciones isotópicas en agua meteórica. *Ciencia, Nueva serie*, vol. 133 no. 3465, p.1702-1703.

Faure, G., 1998. Principios y and Aplicaciones de Geoquímica, 2nd ed. Prentice Hall, 625p.

Gat, J.R., 1996. Oxígeno e hidrogeno isotopos en el ciclo hidrológico. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* vol. 24, p. 225–62.

Plummer, L.N., and Busenberg, E., 1999. Clorofluorocarbonos en Trazadores Ambientales en el Subsuelo, Hidrología editores Peter G. Cook and Andrew L. Herczeg. Kluwer, Boston, 529p.

Plummer, L.,N. Friedman, C.F., 1999. Seguimiento y datación de aguas subterráneas jóvenes. USGS Fact Sheet-134-99.

Plummer, L.N., Böhlke, J.K., and Busenberg, Eurybiades, 2003, Enfoques para la datación de agua subterránea, *en* Lindsey, B.D., Phillips, S.W., Donnelly, C.A., Speiran, G.K., Plummer, L.N., Böhlke, J.K., Focazio, M.J.,Burton, W.C., and Busenberg, Eurybiades, Los tiempos de residencia y transporte de nitrato en el agua subterránea que descargan en los arroyos de la Cuenca de la Bahía de Chesapeake: EE.UU. Estudio Geológico de los recursos hídricos Informe de Investigación 03-4035, p. 12-24.

U.S. Geological Survey, 2013. Landsat 7 imágenes descargadas de <http://landsat.usgs.gov/index.php>