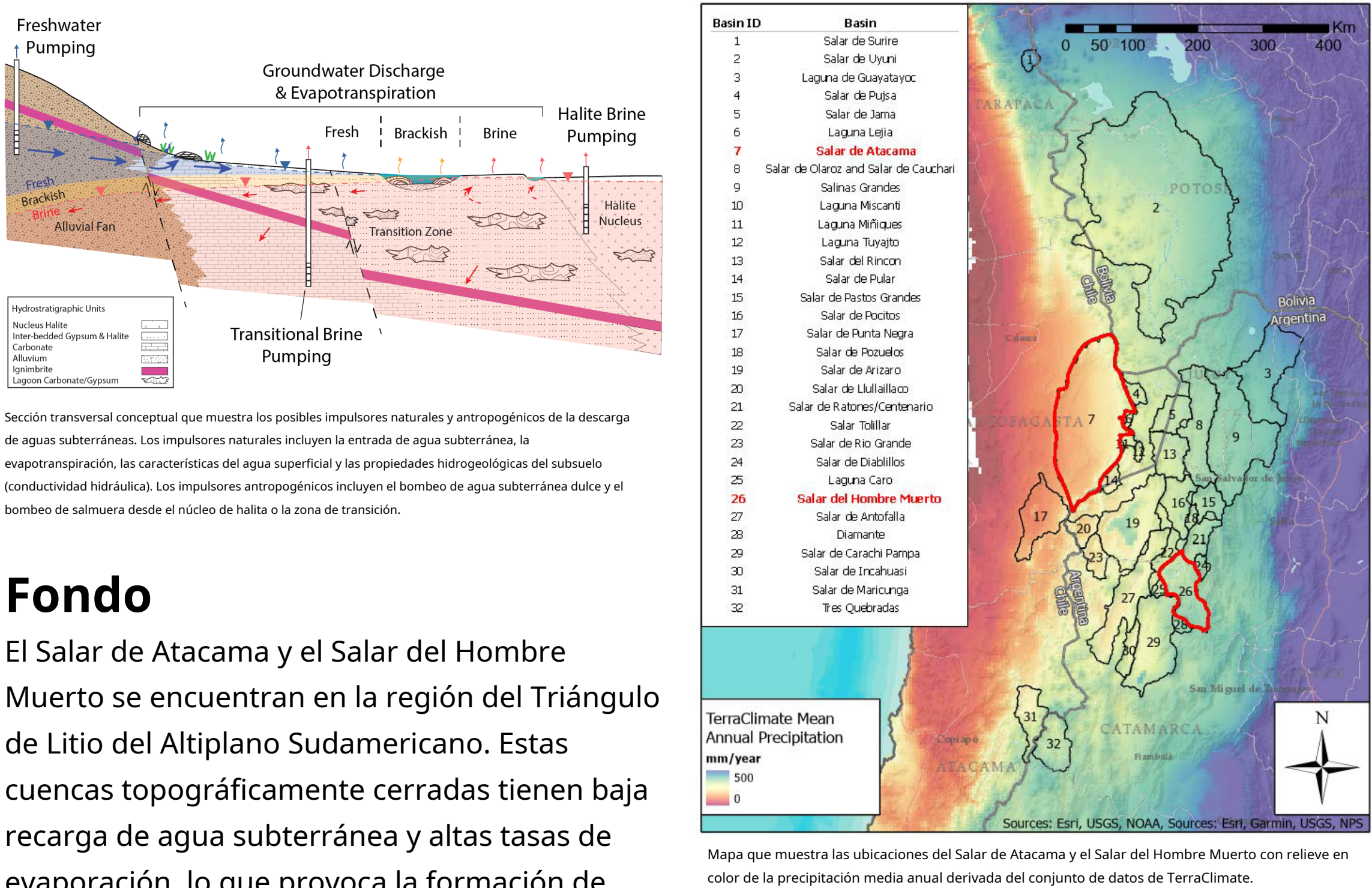


## Introducción

Los sistemas salares del Altiplano Sudamericano son ambientes hidrogeológicos complejos que ocurren en cuencas endorreicas áridas y semiáridas. En estos sistemas, la descarga de agua subterránea es la fuente de agua más importante para los humedales y lagunas ecológicamente sensibles que rodean el salar. La salmuera se forma debajo de estos salares y sus zonas de transición, y estos acuíferos de salmuera albergan importantes recursos minerales, sobre todo litio. La extracción de estos cuerpos de salmuera implica la extracción de grandes volúmenes de agua salada y dulce subterránea. Sin embargo, los impactos potenciales de estas extracciones en los humedales y los ecosistemas acuáticos no están bien limitados. Además, los recientes aumentos en el interés minero en dos de estas cuencas, el Salar de Atacama y el Salar del Hombre Muerto, han generado preocupaciones sobre la sostenibilidad de la extracción de litio en estos entornos.

Este estudio evalúa los impactos potenciales de las extracciones de salmuera y agua dulce en el Salar de Atacama, Chile y el Salar del Hombre Muerto, Argentina mediante la utilización de modelos numéricos de flujo de agua subterránea dependientes de la densidad. El contraste entre estas dos cuencas con características hidrogeológicas y regímenes climáticos distintos proporciona puntos finales separados para comparar y aislar los efectos de las extracciones de agua salada y subterránea. El Salar de Atacama es un sistema salar maduro con un núcleo de halita grande y bien definido, mientras que la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto es un sistema salar menos maduro con un núcleo de halita pobremente definido sobre sedimentos clásticos.



## Fondo

El Salar de Atacama y el Salar del Hombre Muerto se encuentran en la región del Triángulo de Lito del Altiplano Sudamericano. Estas cuencas topográficamente cerradas tienen baja recarga de agua subterránea y altas tasas de evaporación, lo que provoca la formación de evaporitos y alta salinidad. agua subterránea (salmuera). Estas salmueras a menudo están enriquecidas en litio y son el objetivo de la expansión de las actividades mineras de litio en la región. El agua subterránea dulce fluye hacia el suelo de la cuenca desde los márgenes de la cuenca, donde se encuentra con el cuerpo de salmuera que se expande desde el núcleo en la zona de transición. Donde estos dos fluidos se encuentran, se forma una interfaz de agua salada y dulce que ocurre como una zona relativamente estrecha de mezcla entre los dos fluidos con diferentes densidades. El agua subterránea dulce y salobre llega a la superficie del suelo (descargas) dentro de la zona de transición, formando manantiales y la mayor parte de la recarga de humedales, ríos y lagunas. Las características del agua superficial en estos ambientes son hábitats ecológicamente sensibles para especies vulnerables, incluido el flamenco andino, y muchos también son culturalmente significativos para los pueblos indígenas. colectivamente llamados atacameños. Comprender los impactos potenciales de las extracciones de agua dulce subterránea y salmuera en la descarga de manantiales en estas cuencas es fundamental para proteger estos hábitats de importancia ecológica y cultural.

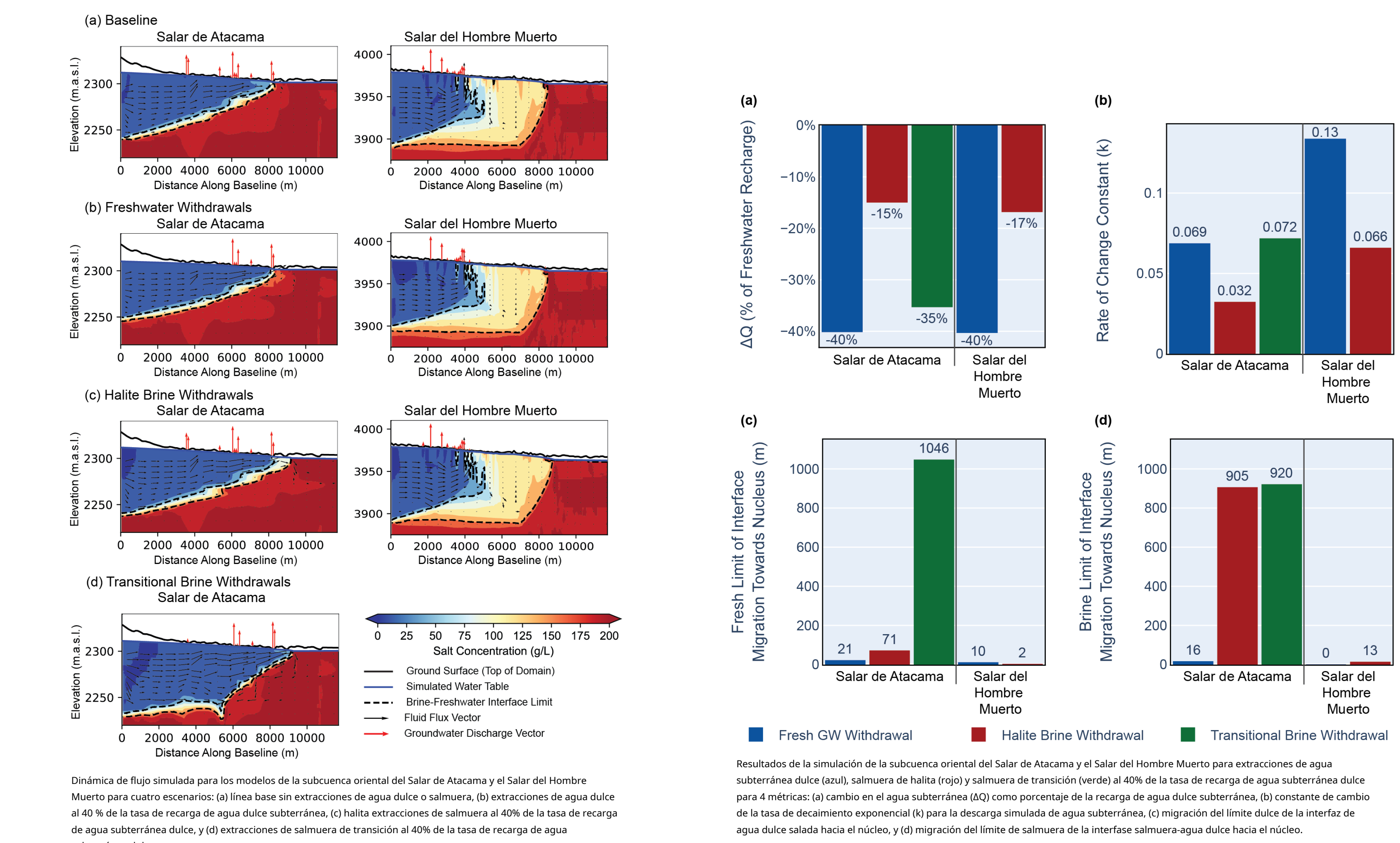


Salar del Hombre Muerto con afloramientos de gismenta en primer plano y núcleo salar con mina de litio en segundo plano

# Modelado de los impactos de la minería de salmuera de litio en los recursos hídricos en los salares de América del Sur

daniel corkran<sup>1</sup>, David F. Boutt<sup>1</sup>, Lee Ann Munk<sup>2</sup>, Brendan J. Moran<sup>1</sup>, Sarah V McKnight<sup>1</sup>, Alejandro Kirshen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geociencias, Universidad de Massachusetts Amherst  
<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Alaska Anchorage



## Resultados

Evaluamos los resultados de la simulación utilizando cuatro métricas: cambio en la descarga total de aguas subterráneas ( $\Delta Q$ ), tasa de cambio en la descarga total de aguas subterráneas y migración de la expresión del nivel freático de los límites de agua dulce y salmuera de la interfase salmuera-agua dulce. El cambio en la descarga total de agua subterránea caracteriza el cambio relativo en la cantidad de descarga de agua subterránea a los humedales y hábitats acuáticos. A medida que ocurren las extracciones, la descarga de agua subterránea disminuye de acuerdo con una función de decaimiento exponencial definida por:

$$\Delta = - + 0$$

donde  $t$  es el tiempo,  $A$  es el valor inicial de descarga de agua subterránea,  $coes$  un término de compensación, y  $k$  es la tasa de cambio constante. Donde  $k$  es más alto, la descarga de agua subterránea disminuye a un ritmo más rápido que cuando  $k$  es más bajo. La interfase salmuera-agua dulce es una zona de mezcla, con un límite de agua dulce y un límite de salmuera. La posición de la interfaz en el nivel freático determina si la calidad de la descarga de agua subterránea a los humedales y los hábitats acuáticos es dulce, salobre o salobre. A medida que los límites de la interfaz se mueven hacia el núcleo, la descarga de agua subterránea se vuelve más fresca.

Encontramos que las extracciones de agua subterránea dulce causan la mayor disminución en la descarga de agua subterránea, con una relación 1:1 entre las extracciones de agua subterránea dulce y  $\Delta Q$ . Para cualquier cantidad de agua dulce subterránea extraída, la descarga total de agua subterránea disminuirá en la misma cantidad. Las extracciones de salmuera de halita reducen considerablemente menos la descarga total de agua subterránea, pero las extracciones de salmuera de transición reducen la descarga total de agua subterránea más que las extracciones de salmuera de halita. Además, la descarga de agua subterránea responde más rápidamente a las extracciones de agua subterránea fresca y salmuera de transición que a las extracciones de salmuera de halita. Encontramos una migración considerable de la interfase salmuera-agua dulce en el modelo del Salar de Atacama inducida por extracciones de salmuera, pero ninguna migración significativa en el modelo de la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto. La interfaz de agua dulce y salmuera preexistente en el modelo de la subcuenca oriental del Salar del Hombre Muerto es muy amplia, lo que amortigua la migración de la interfaz. Por lo tanto, las extracciones de salmuera pueden inducir la migración de la interfase salmuera-agua dulce hacia el núcleo, dependiendo de las condiciones hidrogeológicas.

## Discusión

Las operaciones de minería de salmuera de litio tienen la opción de una variedad de estanques de evaporación tradicionales y tecnologías de minería de extracción directa de litio (DLE). Todas estas tecnologías implican una compensación entre la extracción neta de salmuera y el consumo de agua dulce. Algunos extraen más salmuera pero usan menos agua dulce, mientras que otros extraen menos salmuera pero usan más agua dulce. Estos resultados indican que las tecnologías que minimizan el uso de agua dulce pueden tener menos impactos en los humedales y los hábitats acuáticos. A medida que aumenta la demanda de litio, algunas minas pueden expandir la producción de salmuera de halita a salmueras de transición. Estos resultados indican que la minería de salmuera de transición puede tener más impactos en los humedales y los hábitats acuáticos que la minería de salmuera de halita.

## Agradecimientos

Nos gustaría agradecer a BMW Group y BASF SE por apoyar esta investigación.



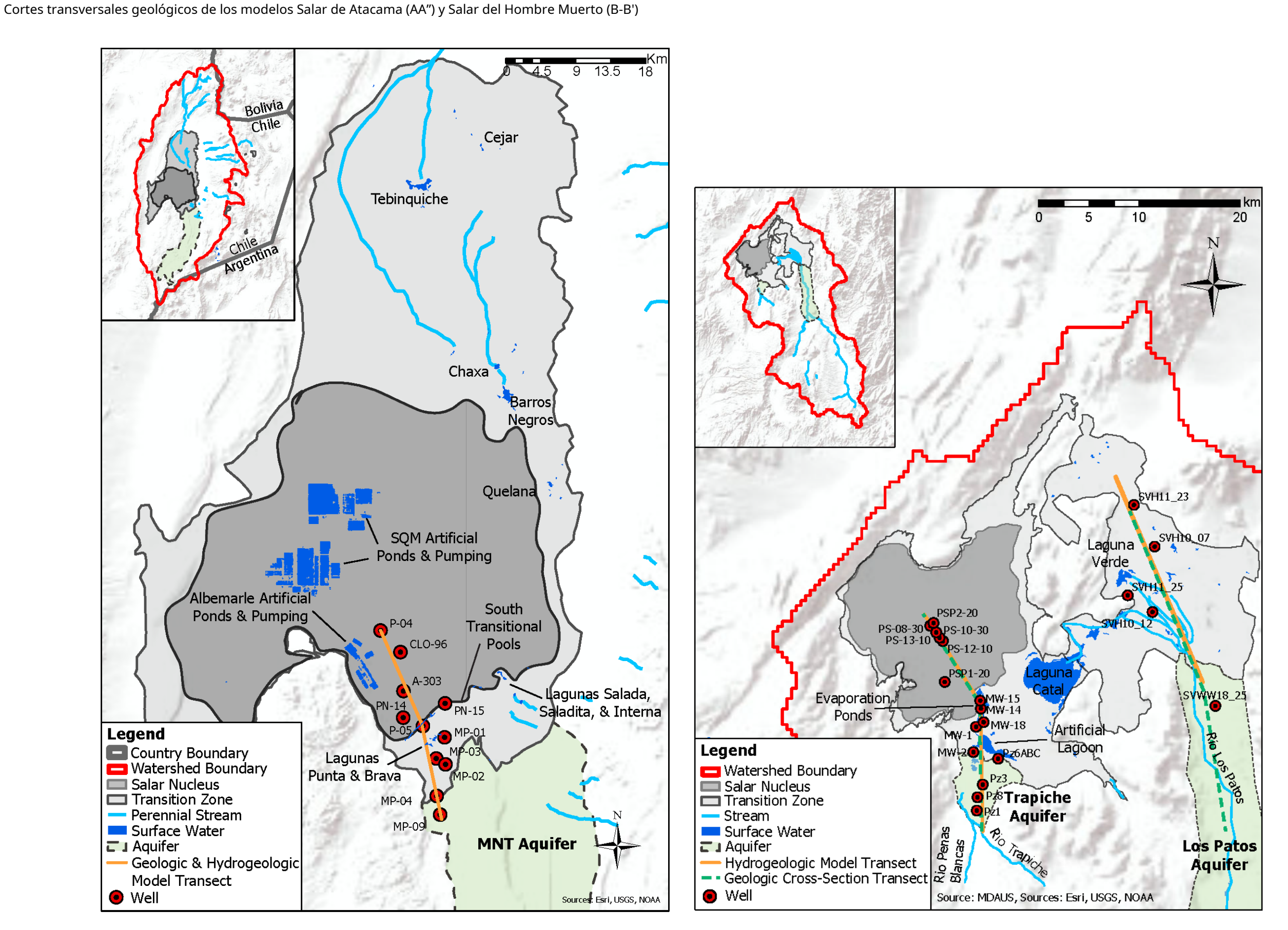
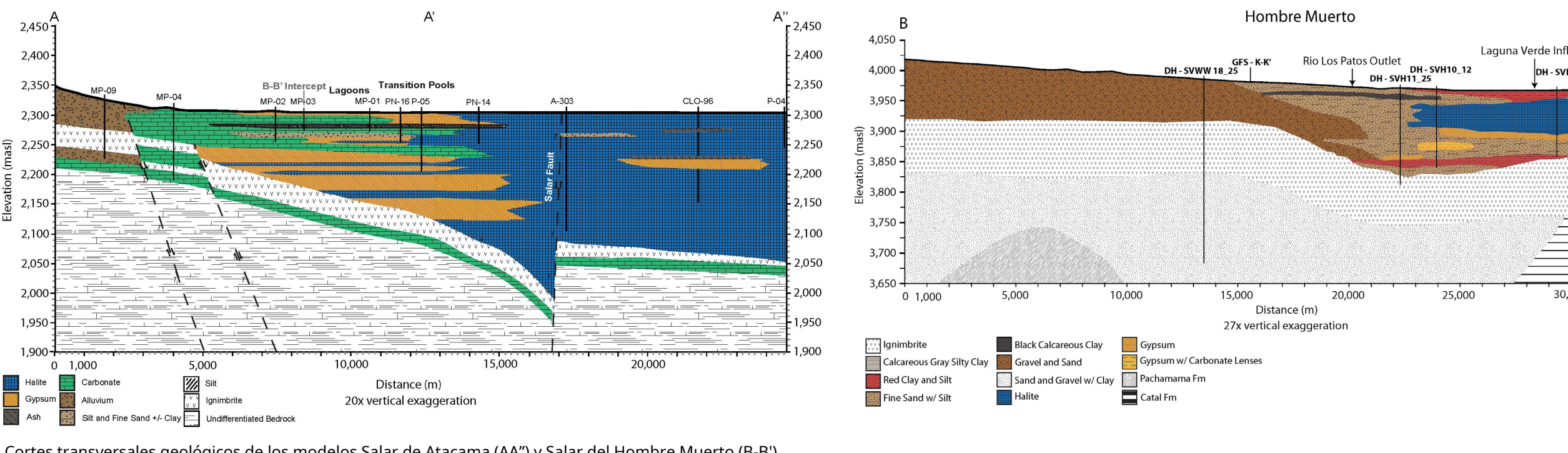
Laguna (humedal) en el Salar de Atacama

## Marco modelo

Desarrollamos modelos conceptuales hidrogeológicos para el Salar de Atacama y la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto. Los modelos conceptuales incluyen unidades hidroestratigráficas con valores únicos de conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento. Usamos estos modelos conceptuales para crear modelos de flujo de agua subterránea bidimensionales, numéricos y dependientes de la densidad utilizando el programa SEAWAT del USGS. Cada transecto modelo comienza aguas arriba de la zona de transición del salar, pasa a través de elementos de agua superficial en la zona de transición y termina en el núcleo del salar. Usamos cada modelo para probar cuatro escenarios:

1. Línea de base: no se produce extracción de agua subterránea dulce o salmuera.
2. Extracción de agua dulce: extracción de agua dulce subterránea del flujo de agua dulce subterránea aguas arriba de la zona de transición.
3. Extracción de salmuera de halita: extracción de salmuera de pozos ubicados en el núcleo de halita.
4. Retiros de salmuera de transición: extracción de salmuera de pozos ubicados en la zona de transición debajo de algunas características del agua superficial. Evaluamos este escenario solo para el modelo Salar de Atacama.

Para cada escenario de extracción, realizamos 4 simulaciones con tasas de extracción que oscilan entre el 10 % y el 40 % de la tasa de recarga de agua dulce subterránea del modelo.



Mapas que muestran las ubicaciones de los dominios del modelo de flujo de agua subterránea para el Salar de Atacama (izquierda) y el Salar del Hombre Muerto (derecha) junto con características geológicas importantes.