

UNA APROXIMACIÓN NUMÉRICA HIDRO-TERMO-HALINA DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA EXPLICAR EL EXTREMO ENRIQUECIMIENTO EN LI EN EL SALAR DE ATACAMA (NE DE CHILE)

Marazuela, MA; Ayora, C.; Vázquez-Suñé, E.; Olivella, S.; García-Gil, A.

5 de Mayo del 2020



ESTOY BUSCANDO

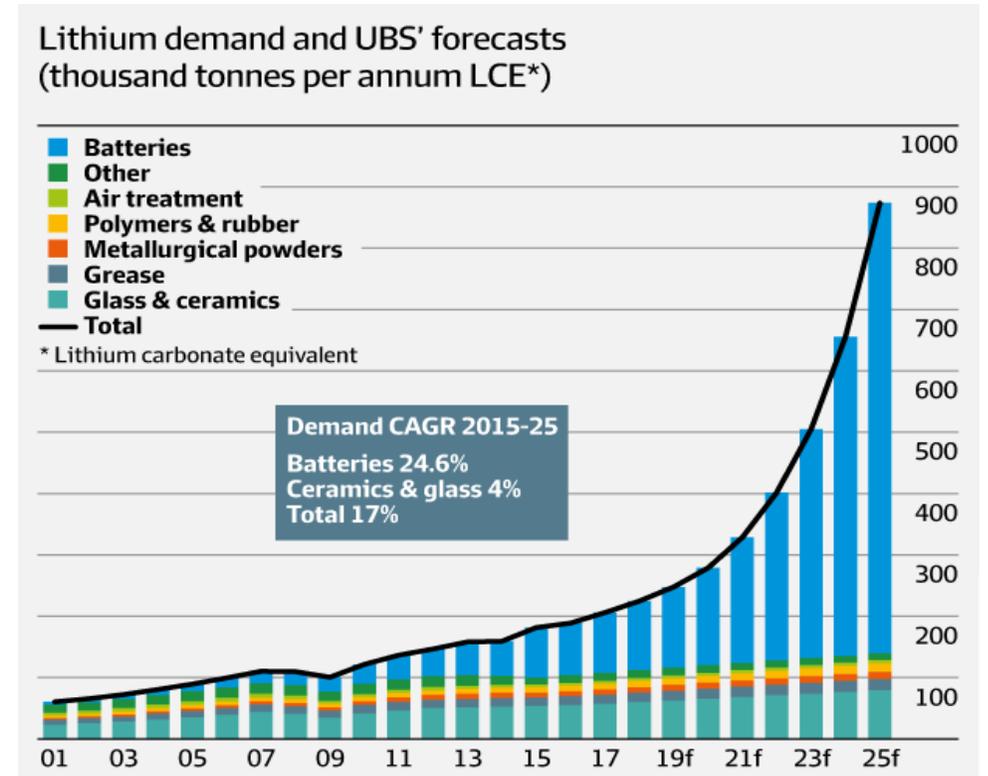
PUESTO POSTDOCTORAL

mamarazuela@outlook.com



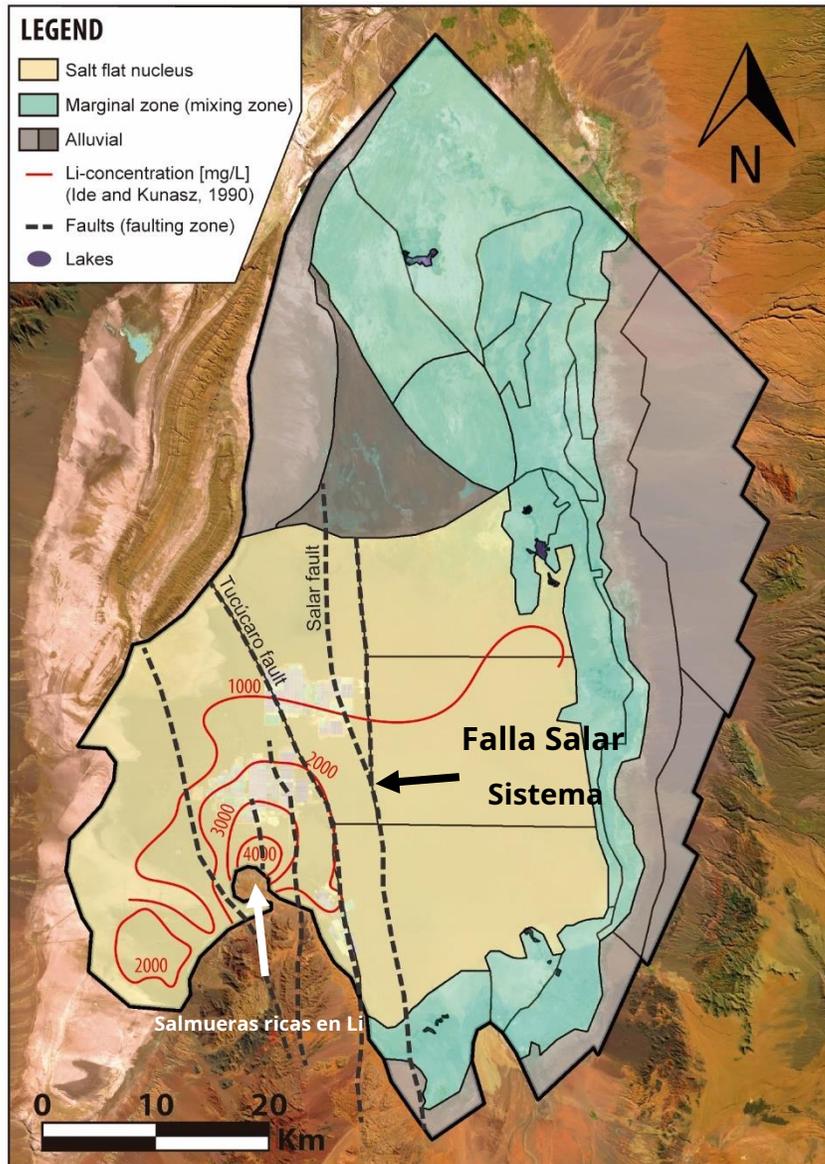
Motivación

Desarrollo tecnológico y farmacéutico -la demanda de **Li, B, I, K, Mg, NaCl** y otras **materias primas** aumentará en los próximos años



Estas materias primas se extraen de las salmueras de **Salinas (sueldos)**

Motivación



Marazuela et al. (2020b)

El Salar de Atacama es el Li más grande del mundo.

reserva...

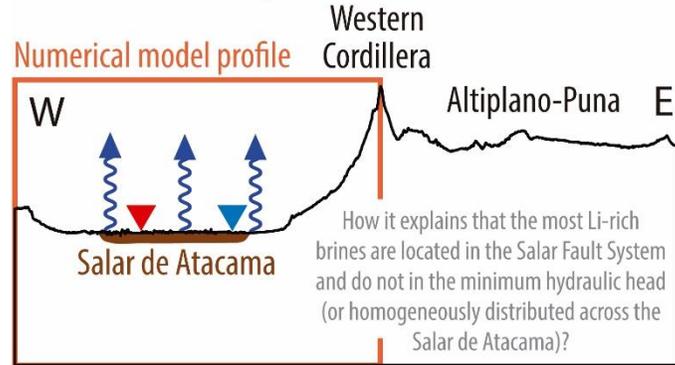
...pero el génesis de su enriquecimiento extremo de Li es aún desconocido

Concentración de litio:

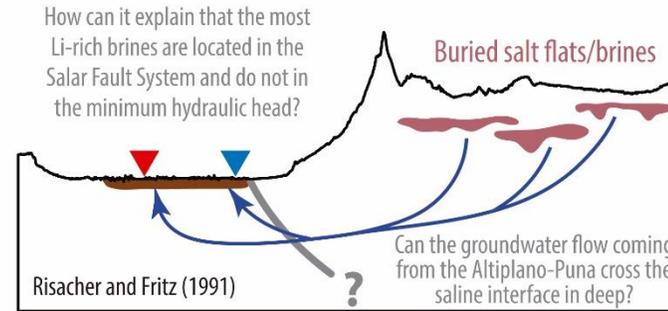
-Salar de Atacama $>7000\text{mg/l}$

-Manantiales geotérmicos alrededor del Salar de Atacama apenas llegan a 50mg/l

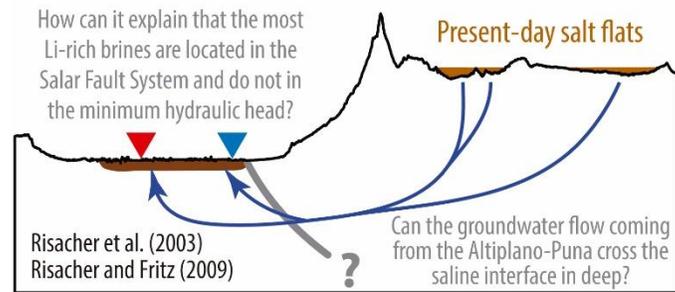
A) Advanced evaporation



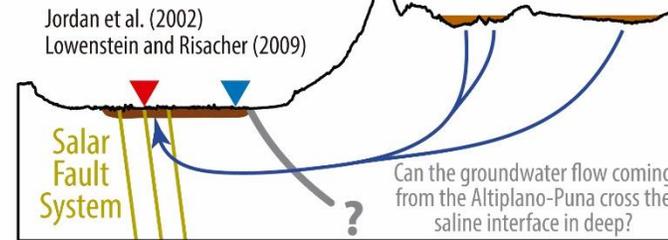
B) Leaching of buried salt flats/brines



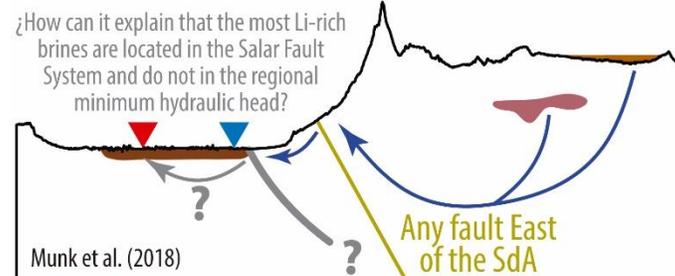
C) Leaking of present-day salt flats



D) Groundwater rise along the Salar Fault System



E) Groundwater rise along any fault East of the Salar de Atacama



How can the hypotheses B, C, D and E explain that the groundwater inflowing the Salar de Atacama has no isotopic signal of previous evaporation (Marazuela et al., 2019a)?

LEGEND

- Hypothetical groundwater flow
- Location of the most Li-rich brines
- Regional minimum hydraulic head

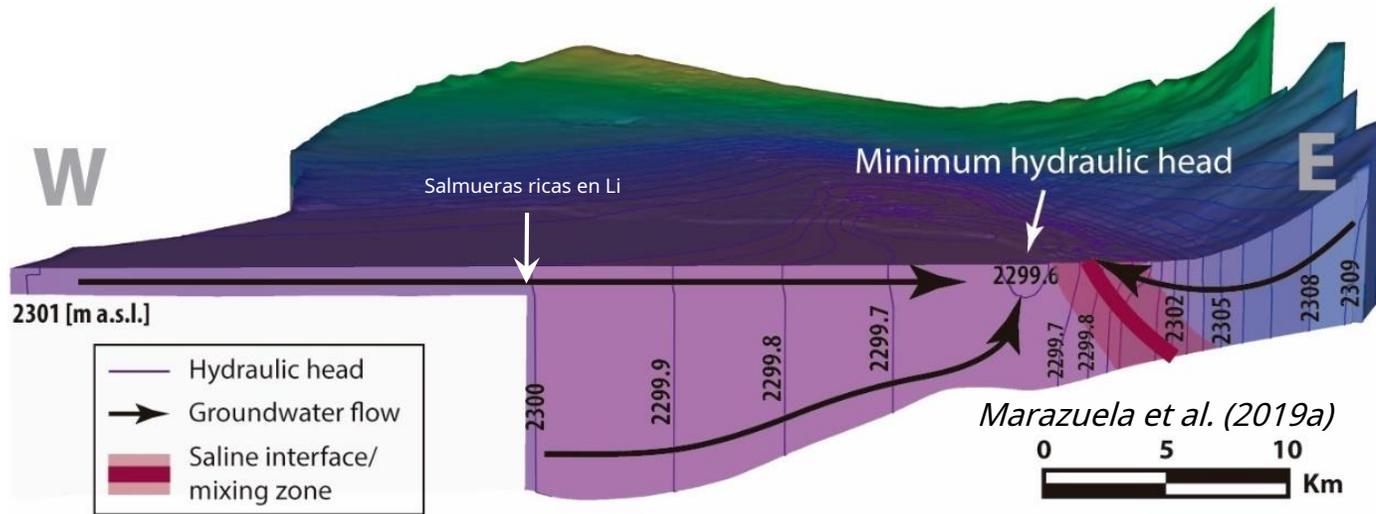
El efecto barrera de la interfase salina para los hipotéticos trayectos de flujo provenientes del Altiplano-Puna no ha sido tomado en cuenta por la mayoría de las hipótesis anteriores.

Además, las trayectorias de flujo que vienen de W a E del Salar de Atacama y la ubicación de la carga hidráulica mínima del nivel freático regional también han sido frecuentemente ignoradas.

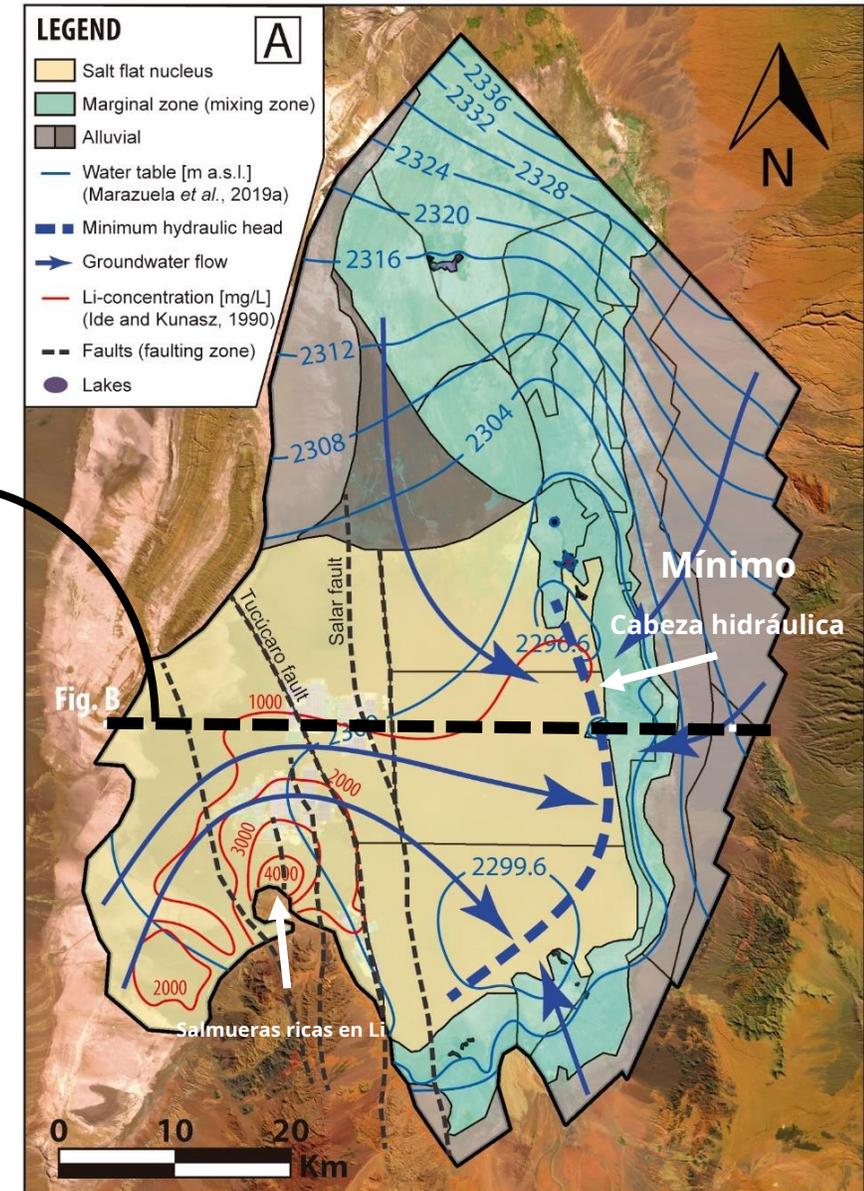
Motivación

Nuevos datos cuestionan las hipótesis anteriores

-lo **efecto barrera** de la interfase salina y la altura hidráulica mínima ha sido explicada recientemente para los acuíferos más someros del Salar de Atacama (Marazuela et 2018, 2019a, 2019b, 2020a):



-lo **desajuste espacial** entre la **cabeza hidráulica mínima** y las **salmueras ricas en Li** parece incompatible con las hipótesis anteriores.



Objetivo

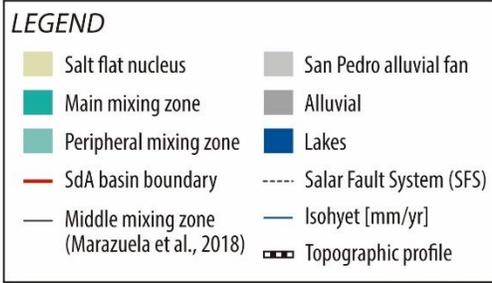
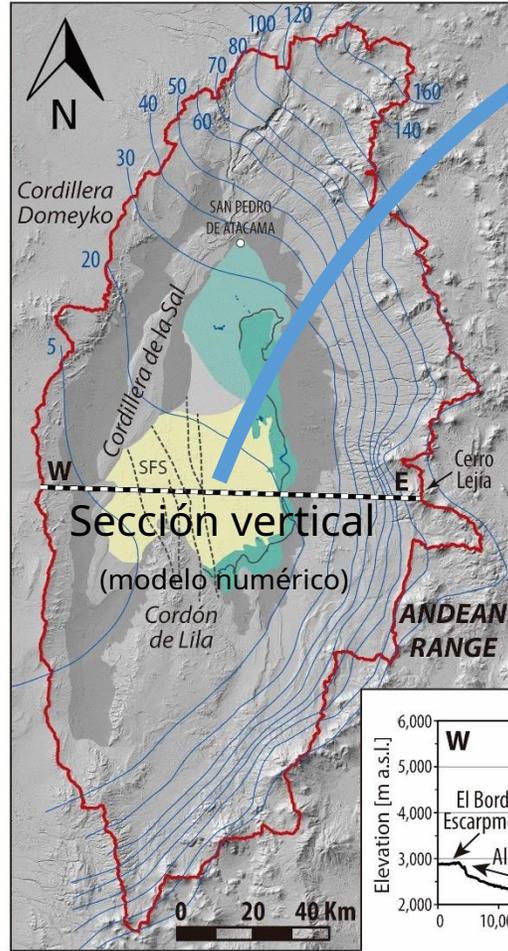
para explicar el **flujo de agua subterránea termohalina** del Salar de Atacama a cuenta
Para el **génesis de la reserva de litio más grande del mundo** discutir la viabilidad de
las hipótesis anteriores

Se han llevado a cabo tres simulaciones numéricas del flujo de agua subterránea para comprender la **localización de las salmueras más evaporadas en sistemas salinos** y caracterizar la **circulación termohalina del actual Salar de Atacama**:

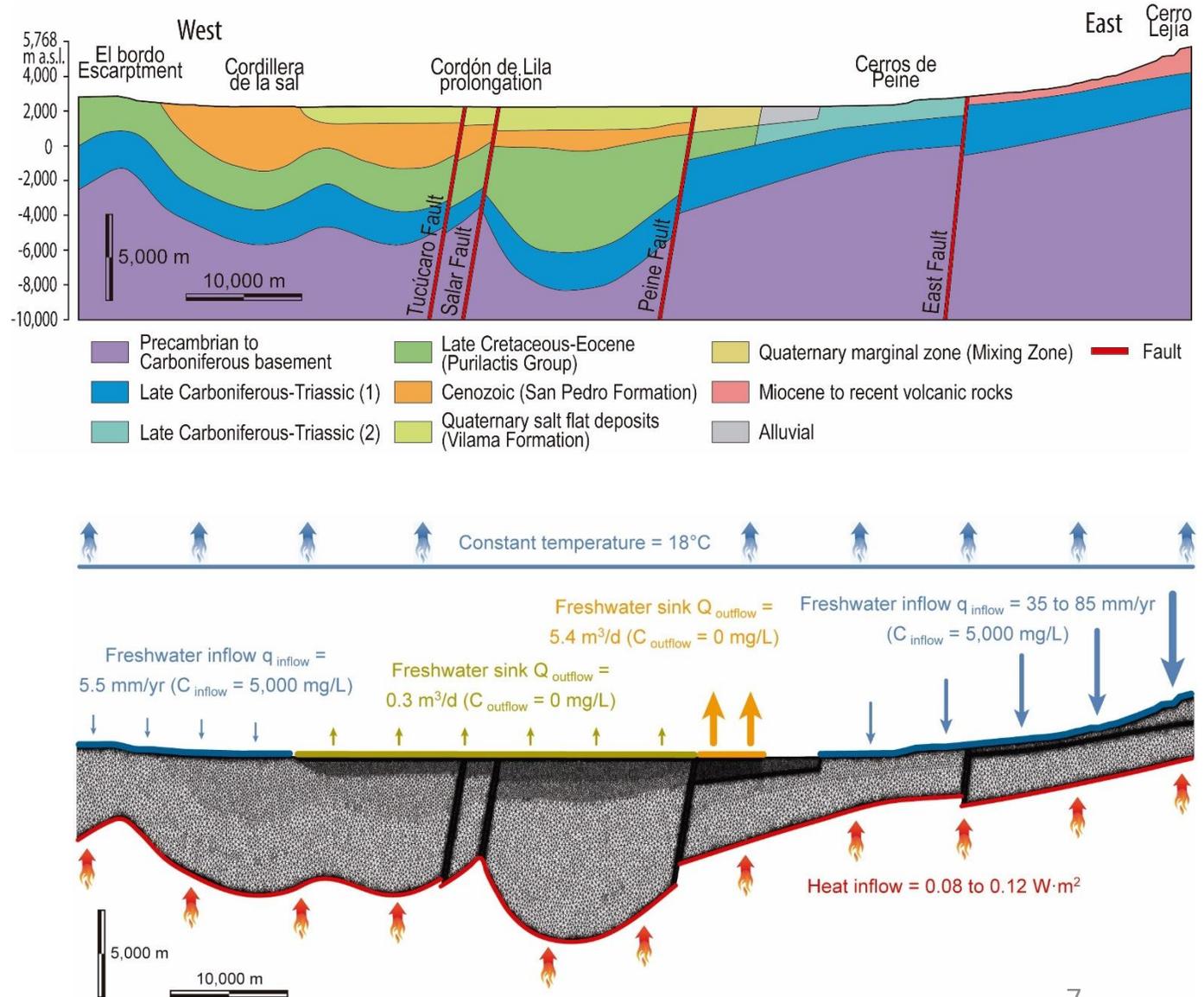
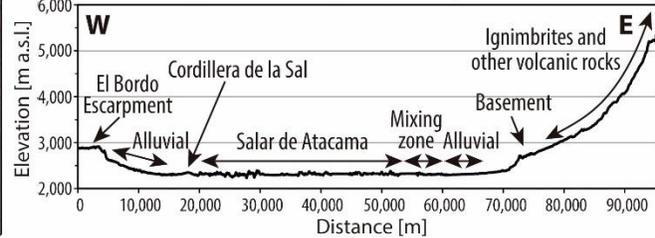
Simulación	Tiempo	Objetivo	Consideraciones específicas
Simétrico evaporación	100.000 años (suficiente para ver la ubicación definitiva del mínimo)	Ubicación de las salmueras más evaporadas en un hipotético antiguo lago salado o salar con evaporación simétrica	$m_{\text{núcleo}} = m_{\text{imz}}$
Asimétrico evaporación	cabeza hidráulica en cada caso)	Ubicación de las salmueras más evaporadas en un salar considerando la evaporación asimétrica actual desde su origen	$m_{\text{núcleo}} \lll m_{\text{imz}}$
Maduro escenario	cuasi-estable-estado	El flujo de agua subterránea en la actualidad Cuenca del Salar de Atacama	(1) $m_{\text{núcleo}} \lll m_{\text{imz}}$ (2) Agua de Poro de San Pedro Fm. está saturado en halita

modelo numérico

La cuenca del Salar de Atacama



TOPOGRAPHIC PROFILE (Numerical model)



Marazuela et al. (2020b)

Flujo de agua subterránea

$$\frac{h}{\Delta t} + \dots = 0 \quad = -h + \left[\frac{-}{0} \right] = \frac{0}{, ()}$$

Transporte masivo

$$- + - \cdot () = 0$$

transporte de calor

$$- \left((+ 1 - (+ \cdot \rightarrow T +) \right) = 0 \quad (\quad)$$

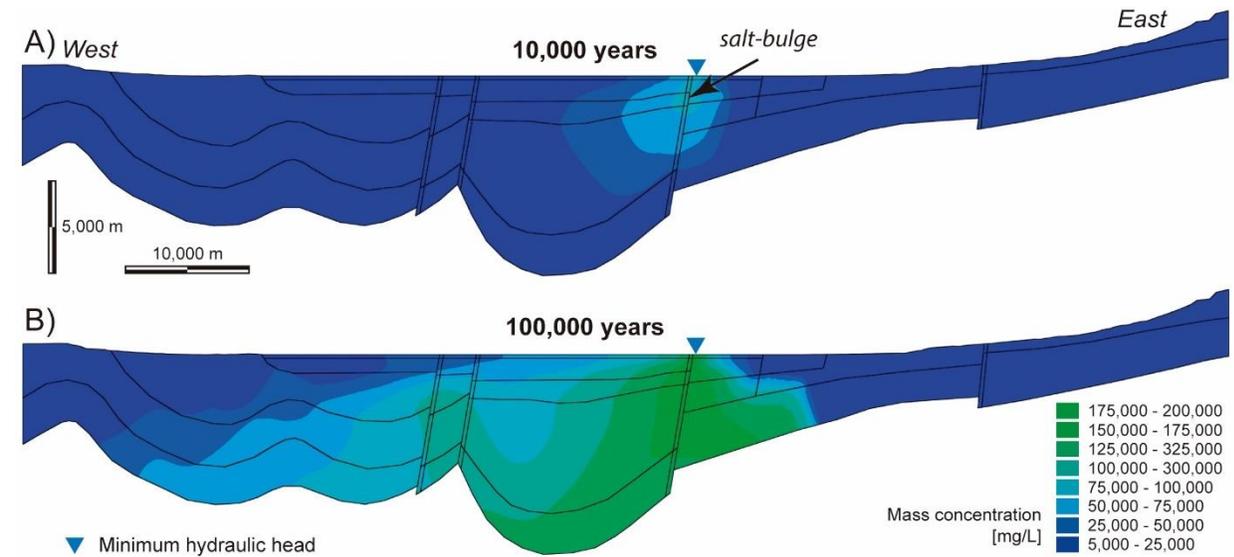
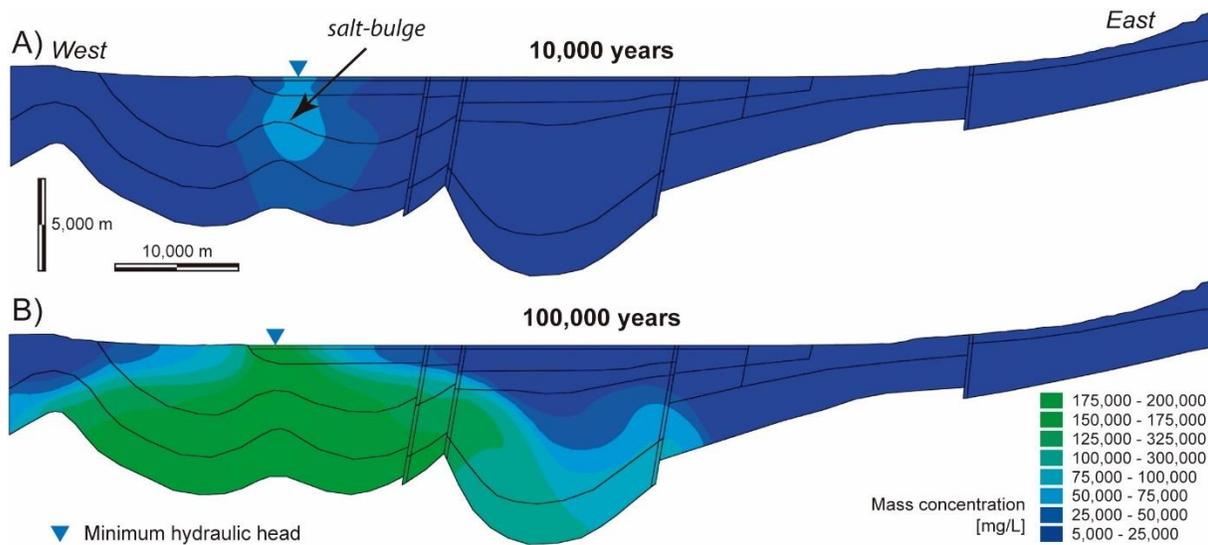
$$= 01 \left(- , () (- 0) + , () (- 0) + \frac{(,)}{- 0} (- 0) \right) \quad \text{magri (2009)}$$

$$, (= 0) \quad \frac{1 + 1,85 - 4,1 \cdot 2 + 44.5 \cdot 3}{1 + 1.85 - (4.1)^2 \quad (= + 44.5 \quad (= 0)) \quad 3 \quad (= 0)} \quad \frac{1 + 0.7063 \cdot (- 0) - 0.04832 \cdot 3 \cdot (= 0)}{1 + 0.7063 - 0.04832 \cdot 3}$$

Considerando la recarga actual en la cuenca, la **evaporación** distribución **determina el**
ubicación de la cabeza hidráulica mínima (MHH)

Si $EV_{nucleo} = EV_{zona_marginal}$
 (lago salado o antiguo salar)

Si $EV_{nucleo} \ll EV_{zona_marginal}$
 (como el salar actual)



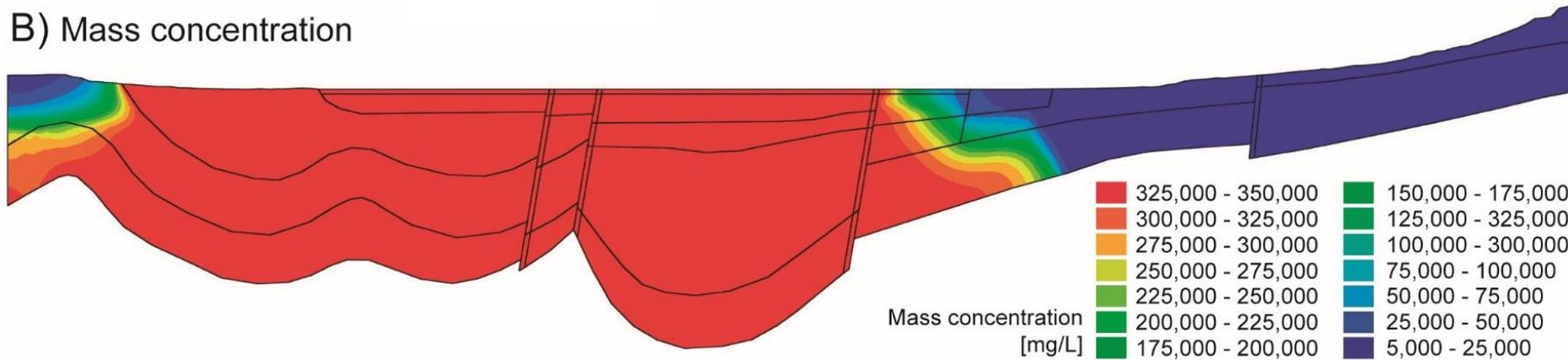
Las salmueras más evaporadas se esperan hacia el MHH

Interfaz salina

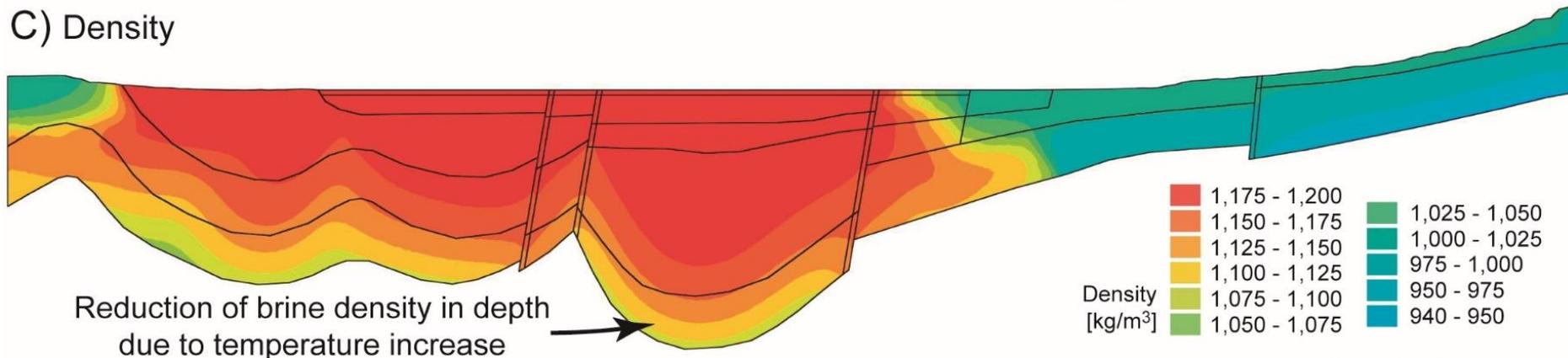
-losla zona de mezcla persiste en lo profundoa pesar del aumento de temperatura

-La densidad disminuye en profundidadfavoreciendo las filtraciones de las salinas

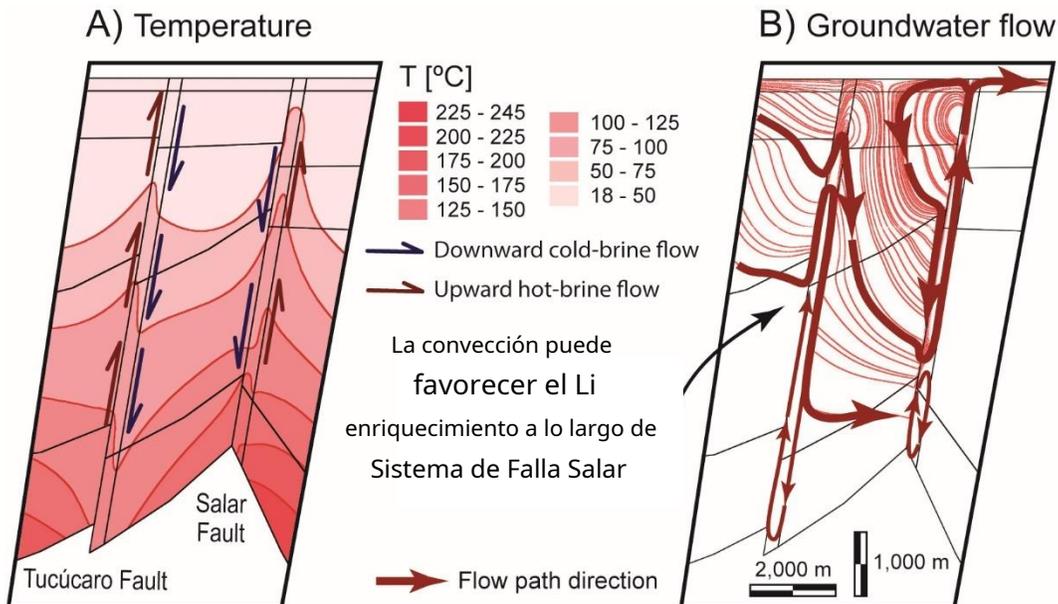
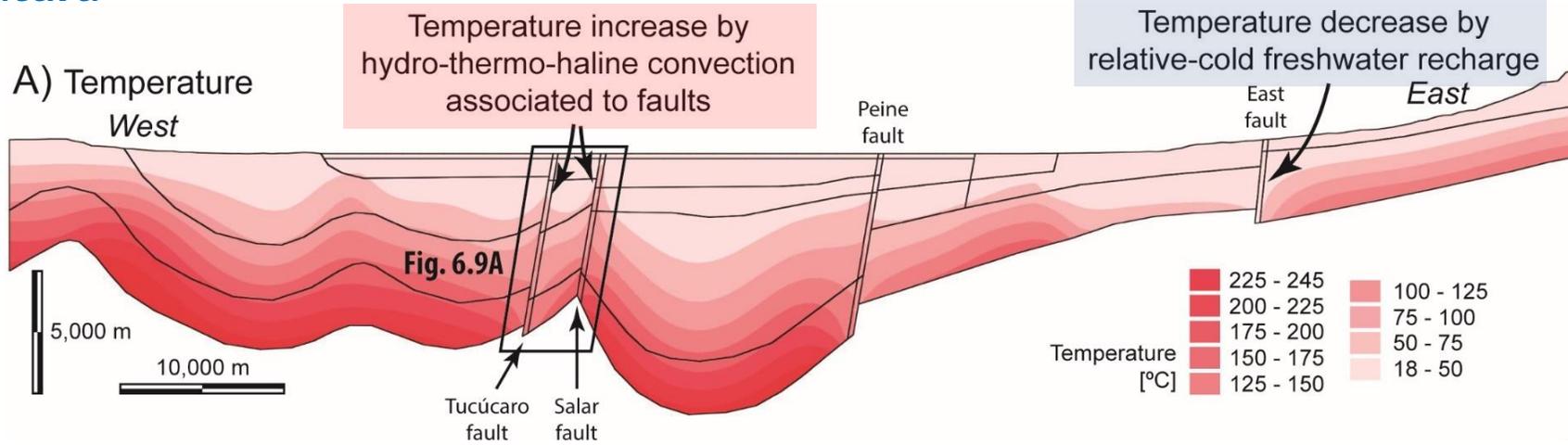
B) Mass concentration



C) Density

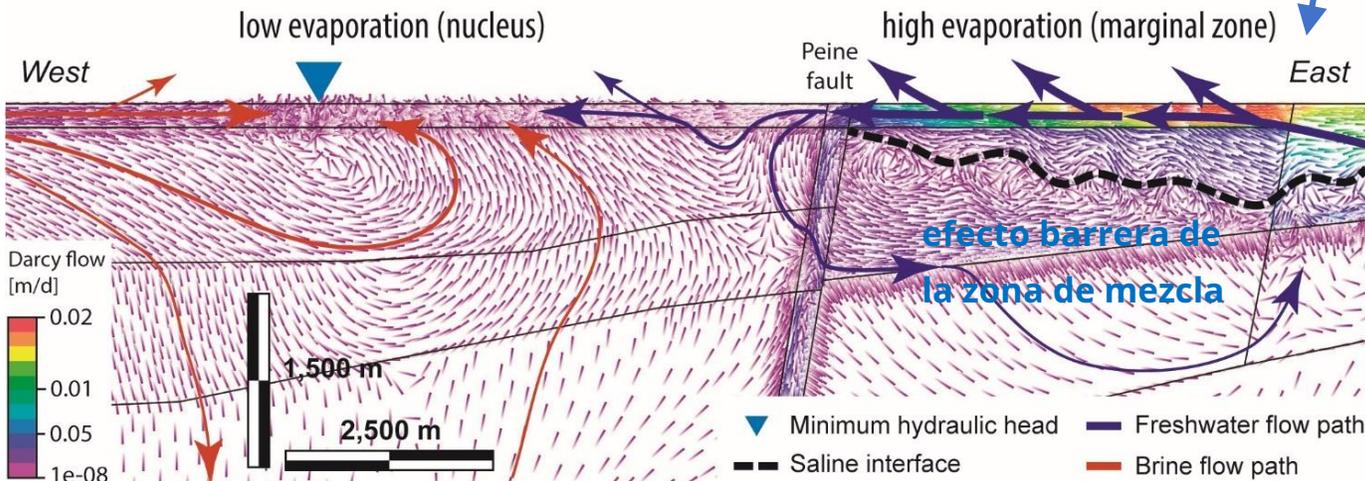
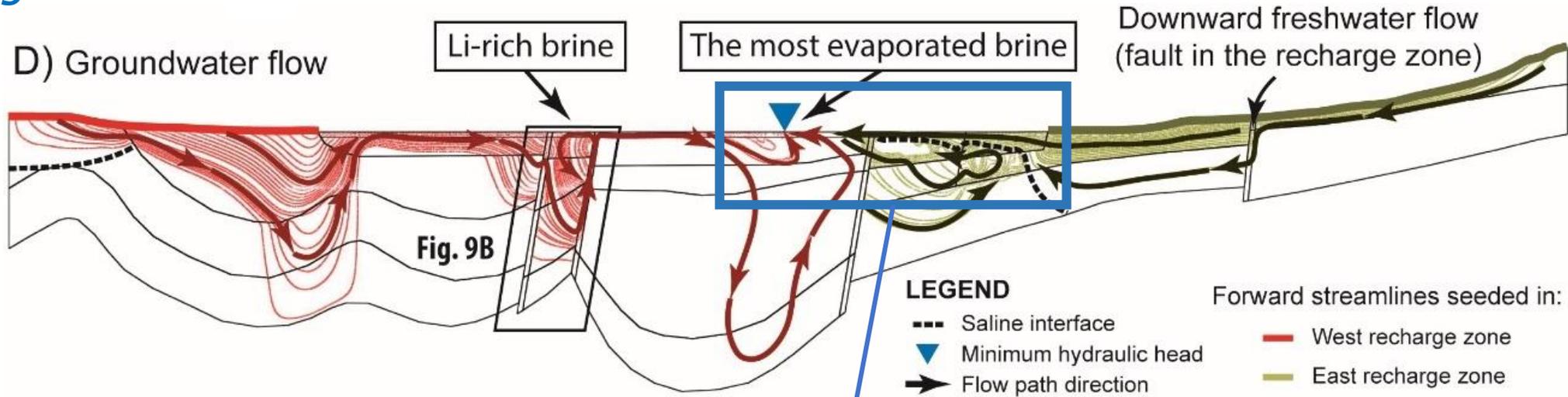


Campo de temperatura



- **Corteza relativamente más fría debajo del núcleo** (25°C/km) que debajo del Altiplano-Puna (35°C/km)
- **Esto no impide la convección termohalina.** en el Salar Fault System, ubicado debajo de las salmueras más ricas en Li
- El campo de temperatura está distorsionado por las celdas de convección en las fallas.

Flujo de agua subterránea termohalina



-los MHH divide la cuenca en todos sistemas aislados y antisimétricos

-Todas las rutas de flujo convergen hacia MHH

-El agua subterránea proveniente del W puede ser Li enriched a través del sistema de falla Salar

- Ningún trayecto de flujo proveniente del Altiplano-Puna puede llegar al Sistema de Fallas del Salar como consecuencia del efecto barrera de la zona de mezcla.

El modelado termohalino de la cuenca del Salar de Atacama ha demostrado:

- El efecto crítico de la **cabeza hidráulica mínima (MHH)** en el flujo de agua subterránea de las salinas.
- los **MHH** divide la cuenca en **dos sistemas aislados y antisimétricos**.
- Todas las **trayectorias de flujo convergen hacia el MHH** donde se **esperan la mayoría de las salmueras evaporadas**.
- La ubicación del MHH impide considerar la evaporación avanzada como el mecanismo actual de enriquecimiento de Li.
- la **persistencia de una interfase salina en profundidad** también descarta el ingreso lateral desde el Altiplano-Puna como mecanismo de enriquecimiento de Li.
- **NUEVA HIPÓTESIS** : Removilización de capas antiguas de sales y/o arcillas enriquecidas con Li por aguas de recarga diluidas provenientes del W-SW. Este proceso es favorecido por las celdas de convección en el Sistema de Fallas Salar.

Referencias

- Ide, F., 1978. Cubicación del yacimiento Salar de Atacama. Universidad de Chile.
- Jordan, TE, Mpodozis, C., Muñoz, N., Blanco, N., Pananont, P., Gardeweg, M., 2007. Estratigrafía y estructura del subsuelo cenozoico de la cuenca del Salar de Atacama, norte de Chile. *J. Sur Am. Ciencias de la Tierra* 23, 122–146.
- Lowenstein, TK, Risacher, F., 2009. Evolución de la salmuera en cuenca cerrada y la influencia de las aguas de entrada de Ca-Cl: Valle de la Muerte y lago seco de Bristol California, Cuenca Qaidam, China y Salar de Atacama, Chile. *agua Geoquímica* 15, 71–94.
- Magri, F., 2009. Derivación de los coeficientes de expansión térmica y compresibilidad para uso en FEFLOW, en: FEFLOW White Papers Vol III. págs. 13–23.
- **Marazuela, MA**, Vázquez-Suñé, E., Custodio, E., Palma, T., García-Gil, A., Ayora, C., 2018. Mapeo 3D, hidrodinámica y modelado de la zona de mezcla agua dulce-salmuera en salinas similar a Salar de Atacama (Chile). *J. Hydrol.* 561, 223–235.
- **Marazuela, MA**, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., Palma, T., 2019a. Hidrodinámica de cuencas saladas: El ejemplo del Salar de Atacama. *ciencia Entorno Total* 651, 668–683.
- **Marazuela, MA**, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., Palma, T., 2019b. El efecto del bombeo de salmuera en la hidrodinámica natural del Salar de Atacama: La capacidad amortiguadora de los salares. *ciencia Entorno total* 654, 1118–1131.
- **Marazuela, MA**, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., 2020a. Hacia una extracción de salmuera más sostenible en salares: Aprendiendo del Salar de Atacama. *ciencia Entorno total* 703, artículo 135605.
- **Marazuela, MA**, Ayora, C., Vázquez-Suñé, E., Olivella-Pastalle, S., García-Gil, A., 2020b. Del origen a la etapa de madurez de un salar: condicionantes hidrogeológicos para la génesis del enriquecimiento extremo de Li en el Salar de Atacama. *ciencia Entorno total*. (bajo revisión).
- Munk, LA, Boutt, DF, Hynek, SA, Moran, BJ, 2018. Flujos y procesos hidrogeoquímicos que contribuyen a la formación de salmueras enriquecidas con litio en una cuenca continental hiperárida. *química geol.* 493, 37–57.
- Risacher, F., Fritz, B., 1991. Geoquímica de los salares bolivianos, Lípez, Altiplano sur: Origen de los solutos y evolución de las salmueras. *Geochim. Cosmoquim. acta* 55, 687–705.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C., 2003. El origen de las salmueras y sales en los salares chilenos: Una revisión hidroquímica. *Rev. de Ciencias de la Tierra*. 63, 249–293.
- Risacher, F., Fritz, B., 2009. Origen de las sales y evolución de las salmueras de los salares bolivianos y chilenos. *agua Geoquímica* 15, 123–157.

ESTOY BUSCANDO

PUESTO POSTDOCTORAL

mamarazuela@outlook.com