



MOHAMMAD AYAZ ALAM
Universidad de Santiago de Chile

GEOTERMIA, una propuesta de valor para minería sustentable y sostenible del LITIO



Problema

Laguna Santa Rosa



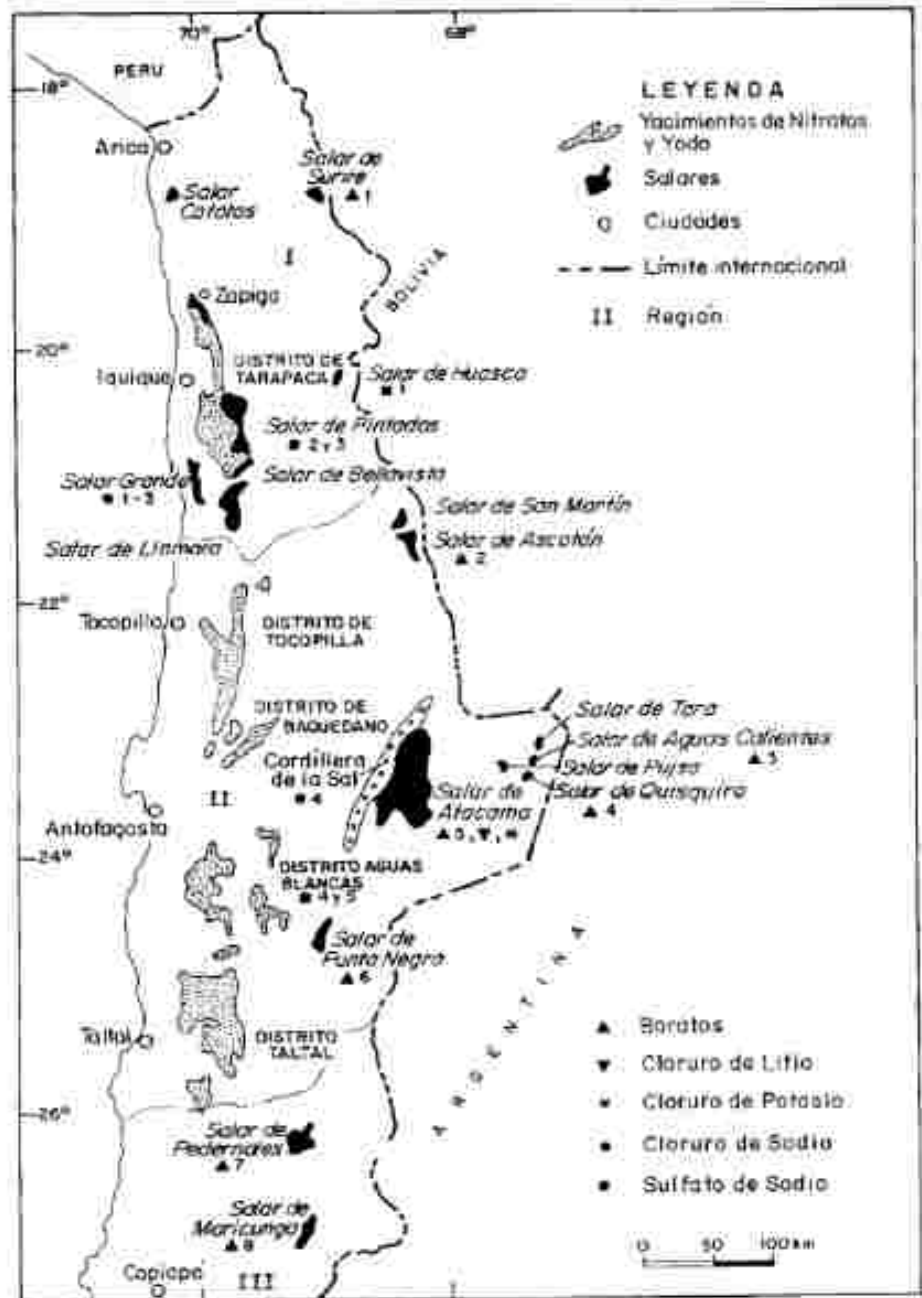
Solución

Laguna Verde

FORO DEL

Litio

DISTRIBUCIÓN DE LOS SALARES CHILENOS



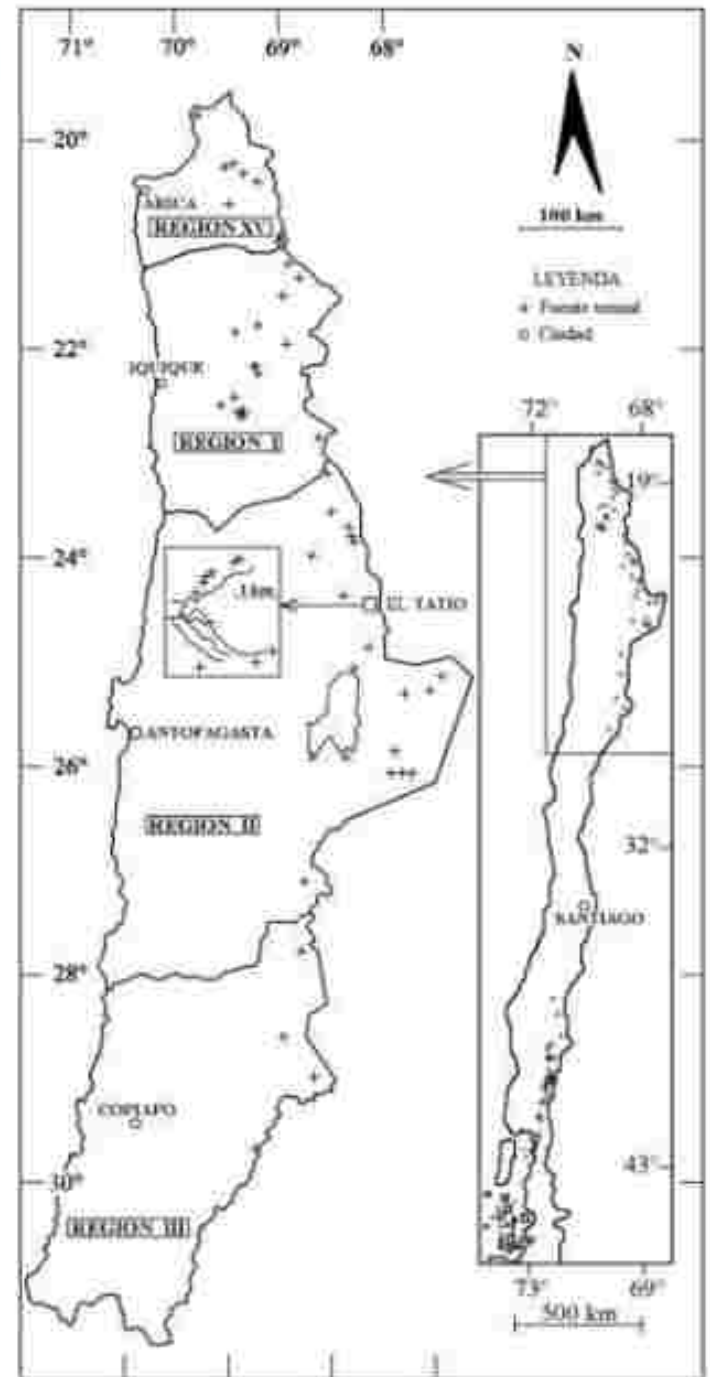
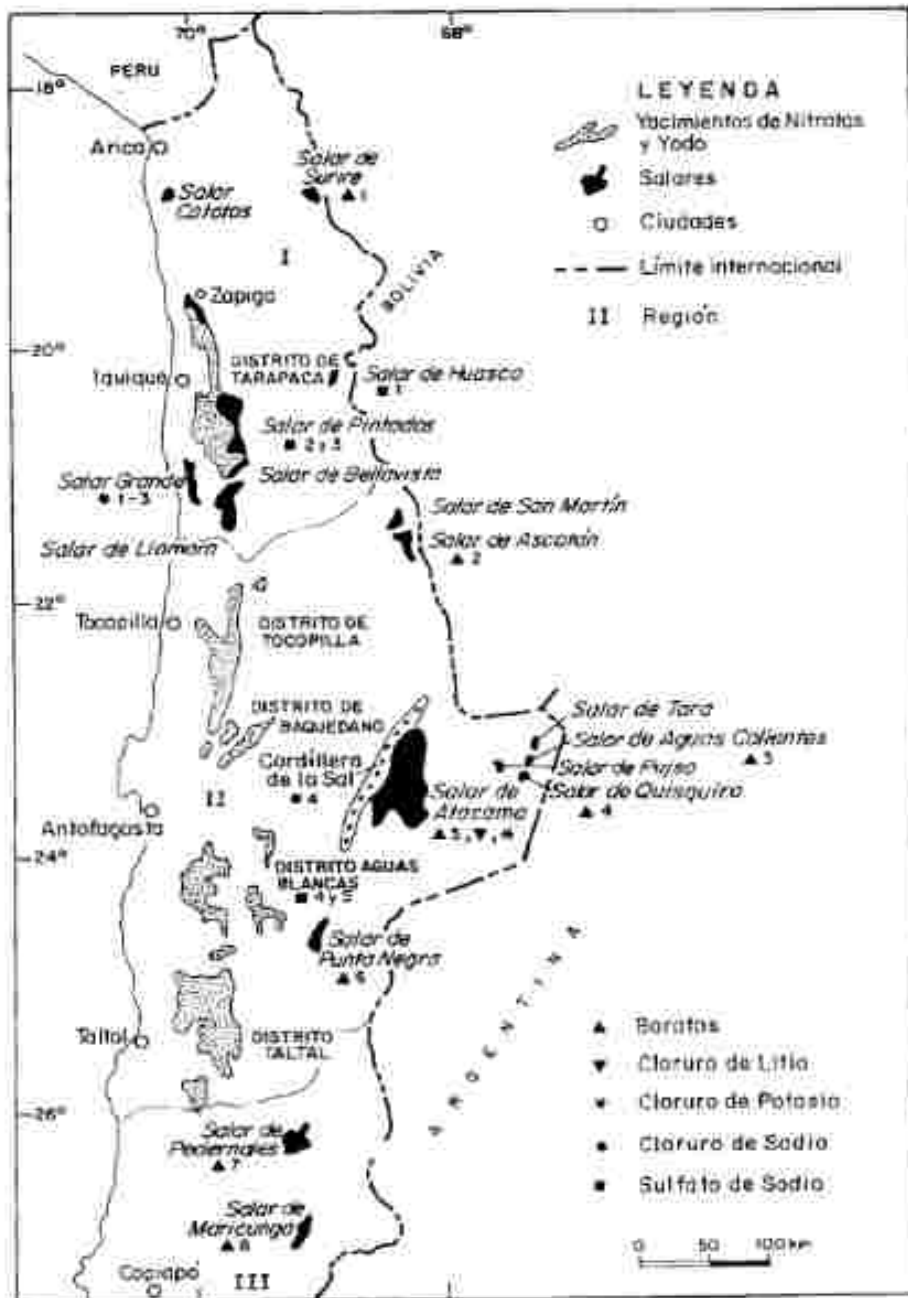
Fuente: SERNAGEOMIN

DISTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES TERMALES EN EL NORTE DE CHILE

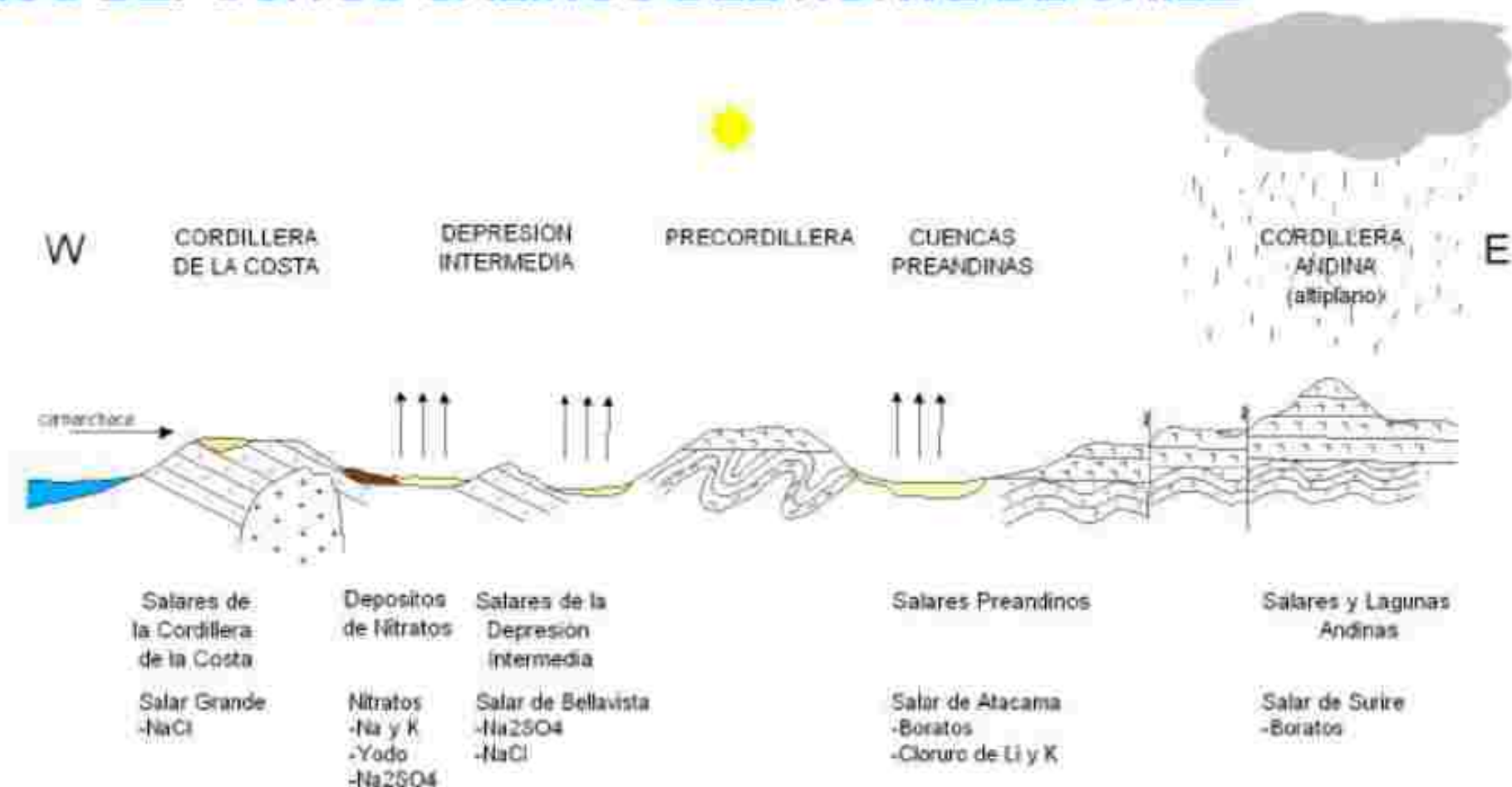


Modificado de Risacher et al. (2011)

SALARES Y FUENTES TERMALES



PERFIL ESQUEMATICO GEOMORFOLOGICO DE LOS DEPOSITOS SALINOS DEL NORTE DE CHILE



PULSO AMBIENTAL

No todo lo que brilla es LITIO

LITIO PARA HOY
HAMBRE PARA MAÑANA

EN PELIGRO POR EXTRACCIÓN DE LITIO
FLAMENCOS

La Devastación del Litio

El acercamiento: Campaña por la defensa territorial del salar de Maricunga



Nombre: [unreadable]



Nombre: [unreadable]



Nombre: [unreadable]

Lunes 10 de mayo
18:30 hrs



MARICUNGA AMENAZADO:

AMBICIÓN, EXTRACTIVISMO
Y RESISTENCIAS FRENTE A
LA DEVASTACIÓN DEL LITIO

COMUNIDAD 3 PUEBLOS
EL AGUA VALE MÁS
QUE EL LITIO

NO AL LITIO
Y NUESTRO LITIO ES
NUESTRO TERRITORIO

CASO SALAR DE MARICUNGA / LAGUNA SANTA ROSA

Energy Geoscience 3 (2022) 192–197



Contents lists available at ScienceDirect

Energy Geoscience

journal homepage: www.ksaipublishing.com/en/journals/energy-geoscience



Environmental degradation through mining for energy resources: The case of the shrinking Laguna Santa Rosa wetland in the Atacama Region of Chile



Mohammad Ayaz Alam^{*}, Rosa Sepúlveda

Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Avenida Copéjupú 485, Copéjupú, Región de Atacama, Chile

Alam, M.A., Sepúlveda, R., 2022. Environmental degradation through mining for energy resources: The case of the shrinking Laguna Santa Rosa wetland in the Atacama Region of Chile. Energy Geoscience, DOI: [10.1016/j.engeos.2021.11.006](https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.006).

CASO SALAR DE MARICUNGA / LAGUNA SANTA ROSA

An assessment of the shrinking of Laguna Santa Rosa, a groundwater-dependent wetland in the Atacama Desert of Chile.

Presentación oral: MEDGU 2021

https://drive.google.com/file/d/1yqxczskhIMd1I3EM8XrsY4p_qtyIDSMY/view?usp=sharing



 Springer | Publishing Partner

An assessment of the shrinking of Laguna Santa Rosa, a groundwater-dependent wetland in the Atacama Desert of Chile

Mohammad Ayaz Alam¹, Rosa Sepúlveda¹

¹Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Copayapu 485, Copiapó, Región de Atacama, Chile
ayaz.alam@uda.cl

EN RESUMEN ...

Seasonal factors

Winter rainfall – “Bolivian winter”
Thawing of winter snow in summer

Climatic factors

Extreme weather events – Heavy rainfall



Increase in the water level

Lowering of the water level

Abrupt change
in declining or
increasing trend

Potentially disruptive
events or processes

Normal Behavior



Evaporation



Groundwater
extraction

Natural process

Anthropic intervention

Mining
operations



Alam, M.A., Sepúlveda, R., 2022. Environmental degradation through mining for energy resources: The case of the shrinking Laguna Santa Rosa wetland in the Atacama Region of Chile. Energy Geoscience, DOI: [10.1016/j.engeos.2021.11.006](https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.006).

HACÍA UNA SOLUCIÓN ...



Laguna Verde, Región de Atacama, Chile

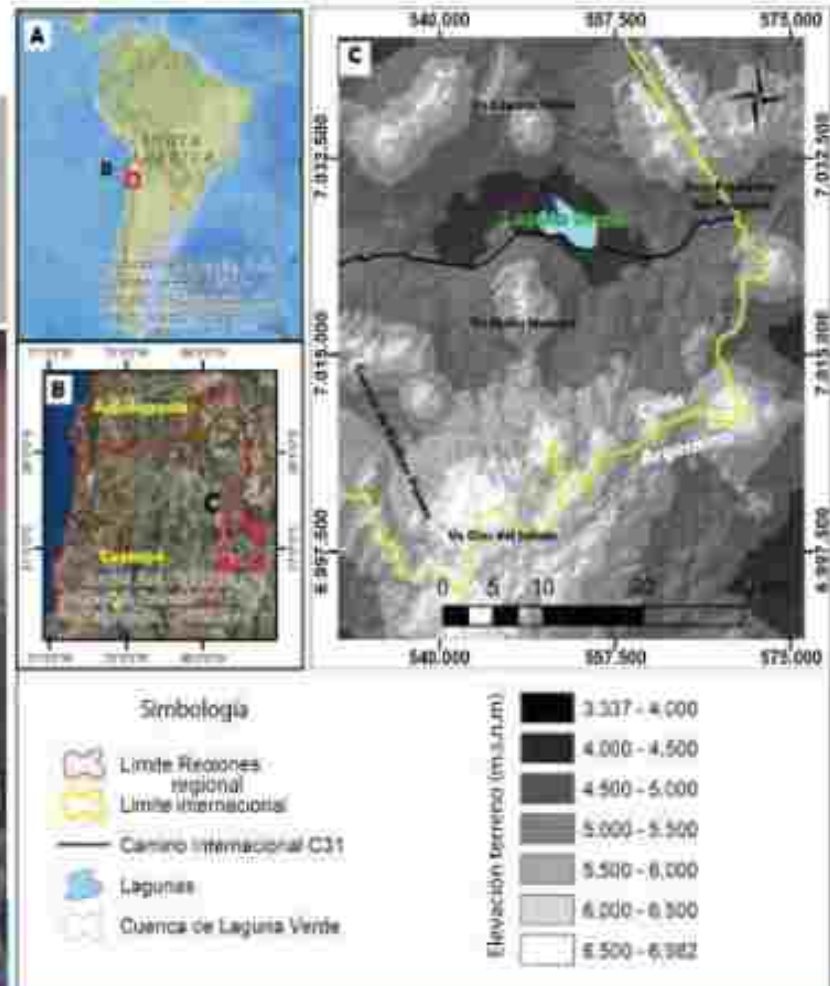
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

- El rol de los fluidos geotérmicos en la formación de salmueras enriquecidas en litio.
- Las evidencias sugieren que las salmueras rentables están asociadas con sistemas geotérmicos activos o fósiles (Hickson y Coolbaugh, 2017; Bradley, 2013), incluso ubicados a varios cientos de kilómetros de distancia (Yu et al., 2013)
- Otros (por ejemplo, Price et al., 2000) sugieren que los procesos de desvitrificación no térmica en cenizas volcánicas pueden incorporar litio en los flujos subterráneos.



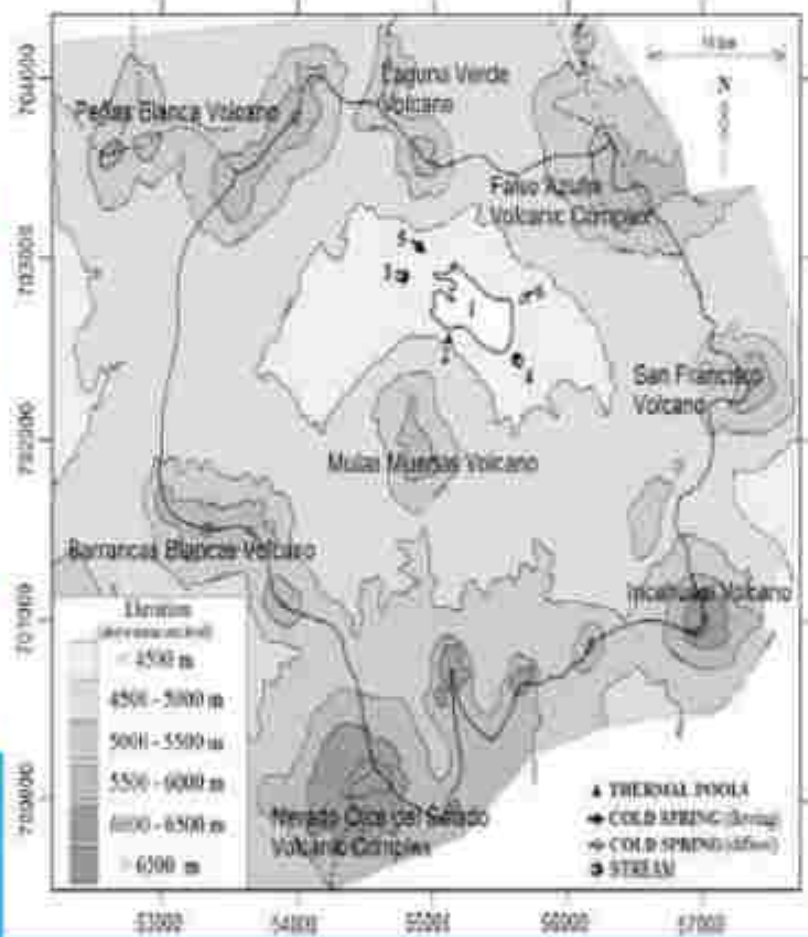
ÁREA DE ESTUDIO: LAGUNA VERDE, REGION DE ATACAMA, CHILE

La presencia de un sistema geotérmico activo y dos ríos que desemboca en el lago hipersalino permiten cuantificar la contribución de Li de diferentes fuentes en el salar de la cuenca de Laguna Verde (LV).



ÁREA DE ESTUDIO: LAGUNA VERDE, REGION DE ATACAMA, CHILE

La presencia de un sistema geotérmico activo y dos ríos que desemboca en el lago hipersalino permiten cuantificar la contribución de Li de diferentes fuentes en el salar de la cuenca de Laguna Verde (LV).



HIPÓTESIS

- ❖ La remoción y el transporte de litio de las rocas de origen se ve favorecida por los fluidos geotérmicos en comparación con los procesos de desvitrificación meteórica (no térmica).
- ❖ El aumento de la actividad volcánica desde el Plioceno Superior y las condiciones climáticas hiperáridas que prevalecen desde el Mioceno Superior han dado las condiciones y el tiempo necesarios para elevar las concentraciones de litio a un nivel económicamente rentable, como se observa hoy en día.

OBJETIVOS

Evaluar el rol de los fluidos geotérmicos en la remoción, transporte y concentración del litio en el salar de Laguna Verde, Región de Atacama, Chile.

- ❖ Delinear la geología del área de estudio para identificar unidades litológicas portadoras de litio y caracterizar las manifestaciones geotermiales.
- ❖ Determinar la composición química e isotópica del agua del lago hipersalino laguna verde, río y arroyos que desembocan en él, y aguas termales y no termales.
- ❖ Identificar los procesos geoquímicos responsables del transporte y deposición de litio en el salar.



OBSERVACIONES



Zona upflow

Volcán Ojos del Salado

Actividad fumarólica reportada en 1937 y 1956

Columna de vapor reportada en 1994

Los montanistas reportaron emisión de vapor (con fotografías) en 2012

Los montanistas reportaron fumarola (con fotografía) en 2013

El equipo de expedición de Extreme Events grabó video desde lejos de las fumarolas en 2019

2021 Dos fumarolas y un charco de condensado

OBSERVACIONES

Zona outflow



- ❖ Decenas de descargas geotérmicas en la margen sur de Laguna Verde.
- ❖ Alteración argillic y desarrollo de sinters de silice.
- ❖ Además, los organismos extremófilos habitan estas aguas..

MEDICIONES EN TERRENO

Zona outflow

Puntos de medición de las temperaturas	UTM Coordinadas (Datum WGS84 Zona 27)			T° (°C)	Fecha
	Este	Norte	Elev.		
P1 (M4-17a)	551.075	7.025.593	4.345	47,0	21-11-2017
				41,2	15-04-2018
				42,1	06-03-2019
P2 (M4-17b)	551.110	7.025.589	4.349	45,0	21-11-2017
P3	550.841	7.025.628	4.351	35,1	06-03-2019
P4	550.267	7.025.989	4.342	28,1	06-03-2019
P5	550.198	7.026.025	4.346	28,4	06-03-2019
P6	550.161	7.026.085	4.346	24,2	06-03-2019
P7	549.947	7.026.361	4.345	22,6	06-03-2019
P8	549.353	7.026.600	3.438	12,2	06-03-2019

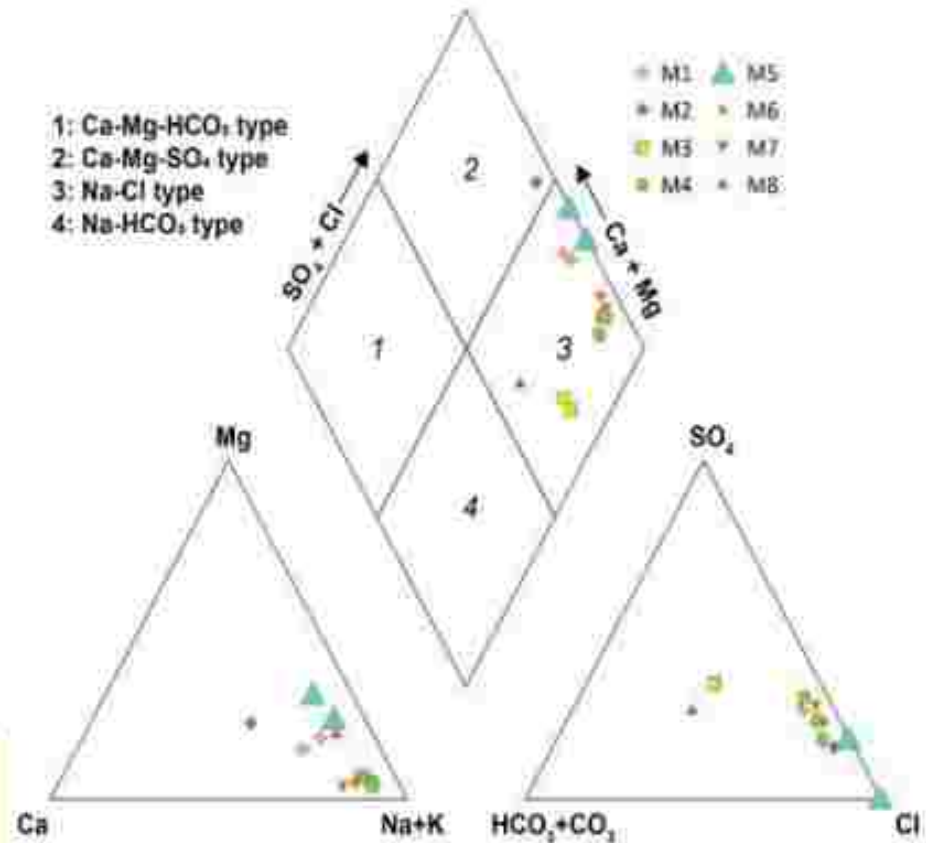


Temperaturas anómalas en río Lamas
 Temperatura del ambiente -20°C
 Temperatura media anual 1°C

HIDROQUÍMICA

- M1: Falso Azufre volcano vertiente
- M2: Laguna Colgada
- M3: Río Agua Dulce
- M4: Piscina termal
- M5: Laguna Verde
- M6: Río Peñas Blancas, flanco norte
- M7: Río Peñas Blancas, corriente principal
- M8: Río Lamas

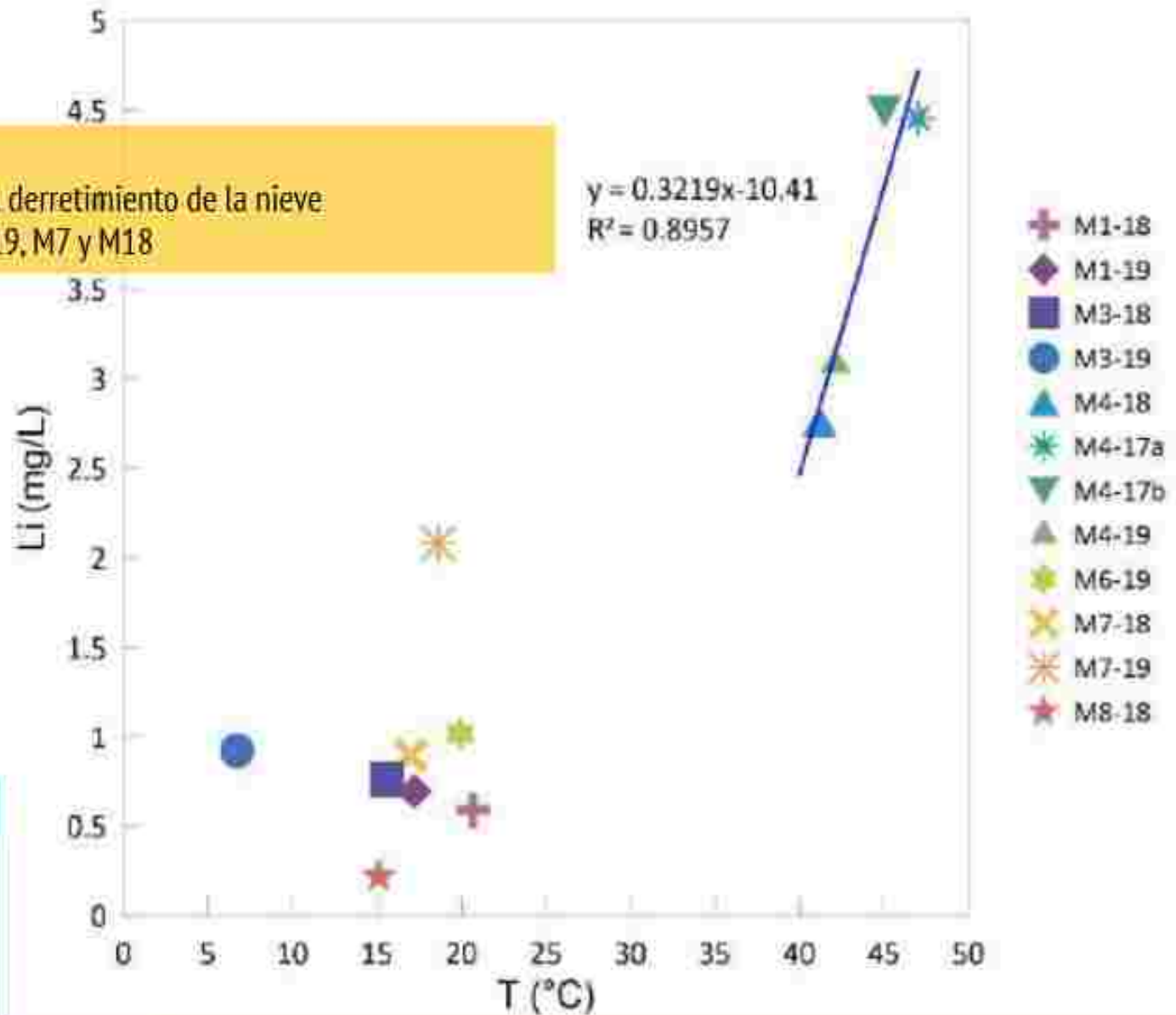
M1, M3 a M7 de tipo Na-Cl-SO₄
M2 de tipo Ca-Cl
M8 una mezcla entre tipo Na-Cl y Na-HCO₃



COMPORTAMIENTO DEL LITIO

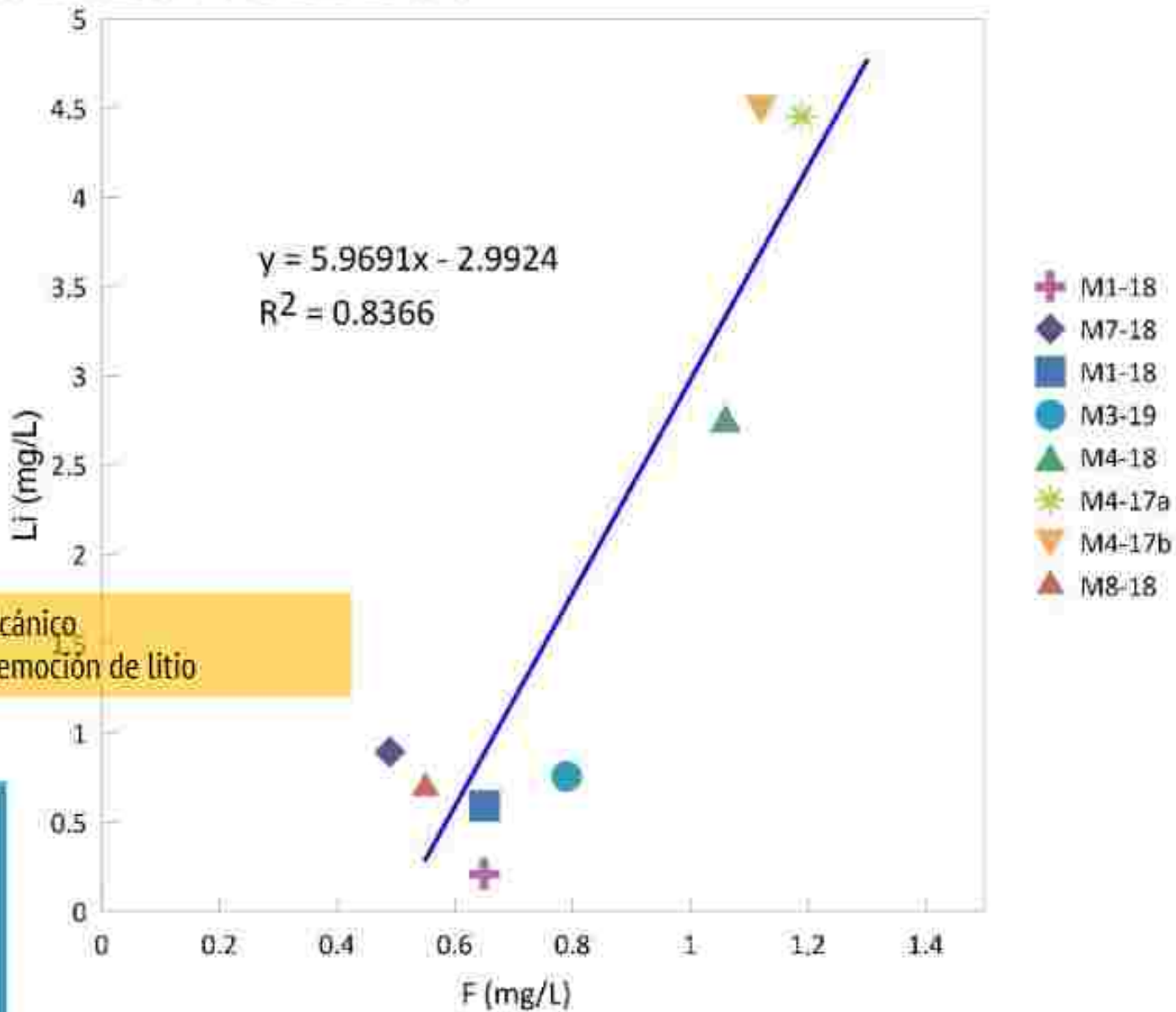
Li vs. Temperatura

Buena correlación T° vs Li
Disminución $\pm 50\%$ debido al derretimiento de la nieve
Mezcla entre M6 y M7, M7 y 19, M7 y M18



COMPORTAMIENTO DEL LITIO

Li vs. F



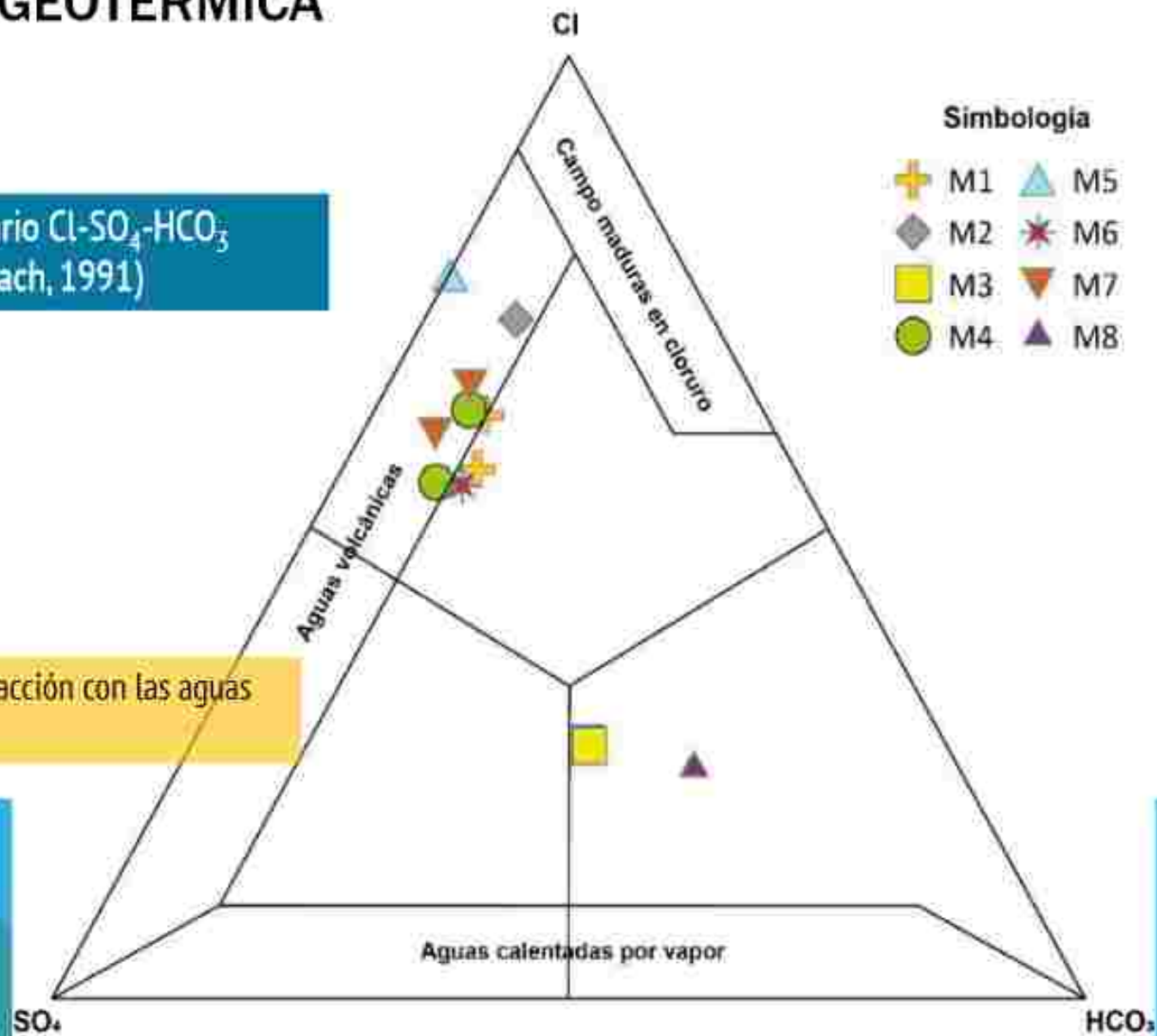
El flúor es de origen volcánico.
El vulcanismo ayuda a remoción de litio

GEOQUÍMICA GEOTÉRMICA

Diagrama ternario Cl-SO₄-HCO₃
(Giggenbach, 1991)

Simbología

- | | | | |
|---|----|---|----|
| + | M1 | △ | M5 |
| ◇ | M2 | ✱ | M6 |
| ■ | M3 | ▽ | M7 |
| ● | M4 | ▲ | M8 |



M3 y M8 muestran la menor interacción con las aguas cloruradas (Nicholson, 1993)

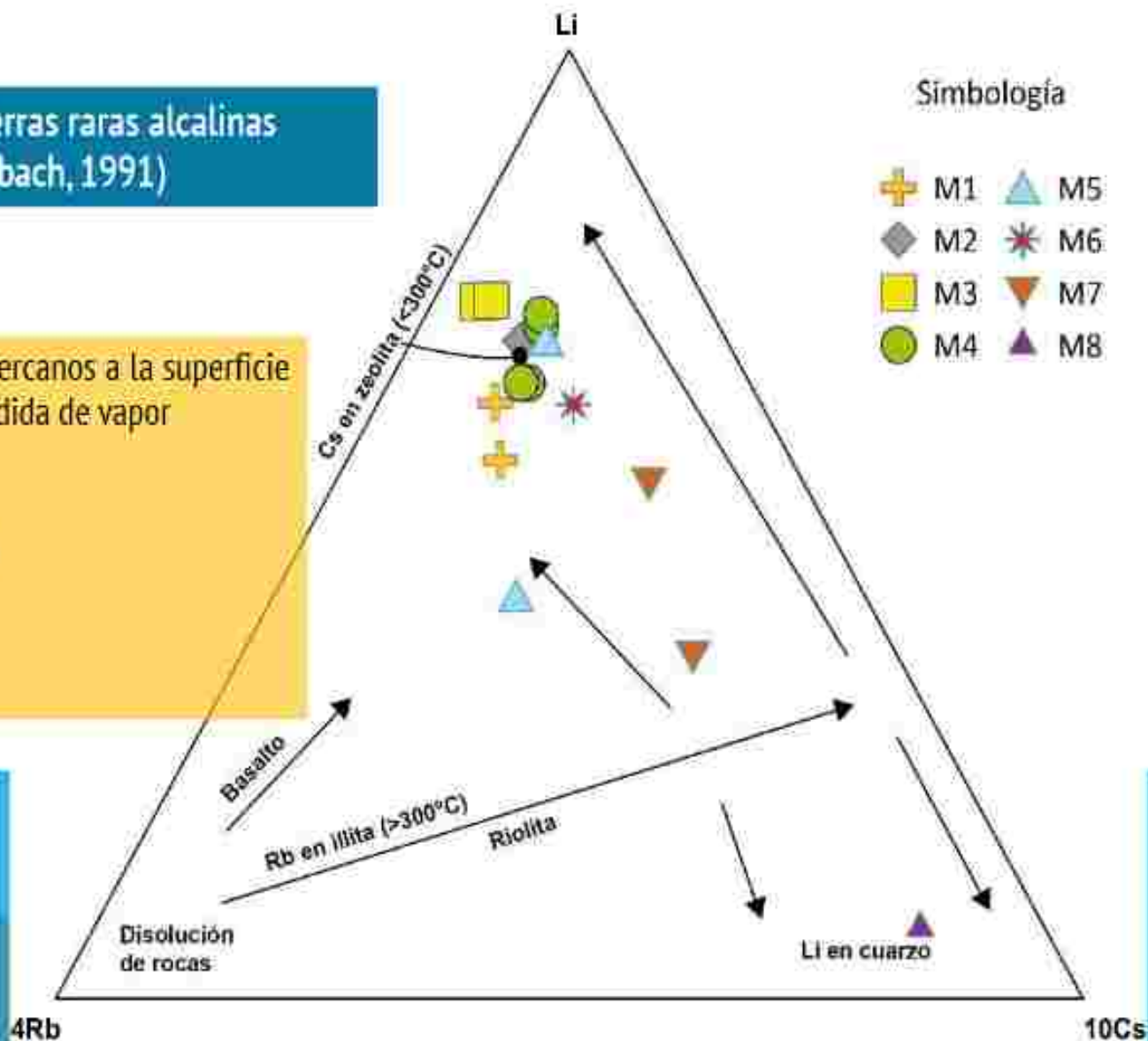
GEOQUÍMICA GEOTÉRMICA

Diagrama de tierras raras alcalinas
(Giggenbach, 1991)

Simbología



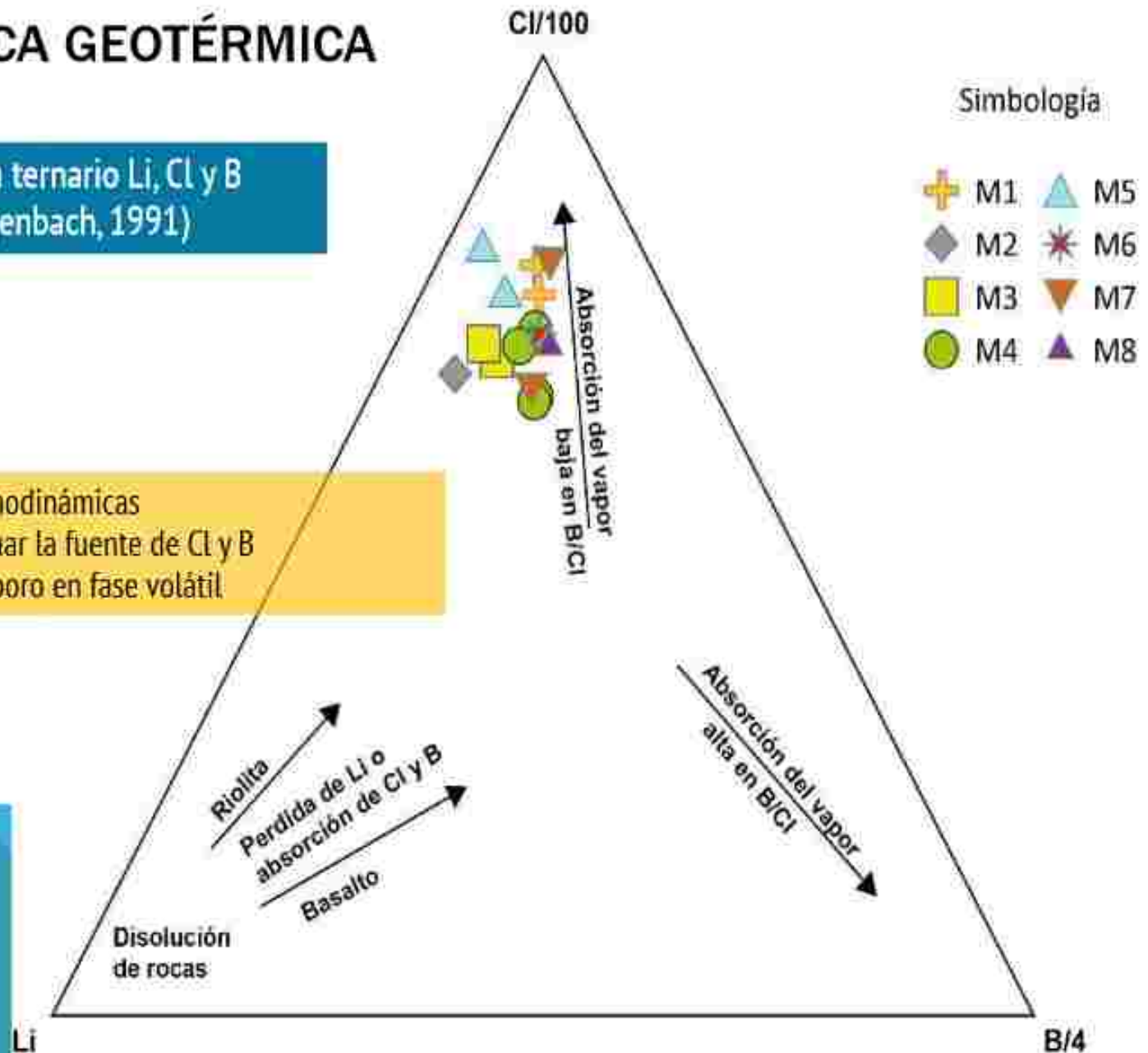
- ❖ No se ve afectado por procesos cercanos a la superficie e insensible a la dilución o la pérdida de vapor
- ❖ Rb en agua a $>300^{\circ}\text{C}$
- ❖ Cs precipitación a $<250^{\circ}\text{C}$
- ❖ Li precipita en Cuarzo and Clorita
- ❖ Alto Li/Cs \rightarrow *outflow*
- ❖ Bajo Li/Cs \rightarrow *upflow*



GEOQUÍMICA GEOTÉRMICA

Diagrama ternario Li, Cl y B
(Giggenbach, 1991)

- ❖ B/Cl → condiciones termodinámicas
- ❖ Li → Trazador para evaluar la fuente de Cl y B
- ❖ Low B/Cl → pérdida de boro en fase volátil



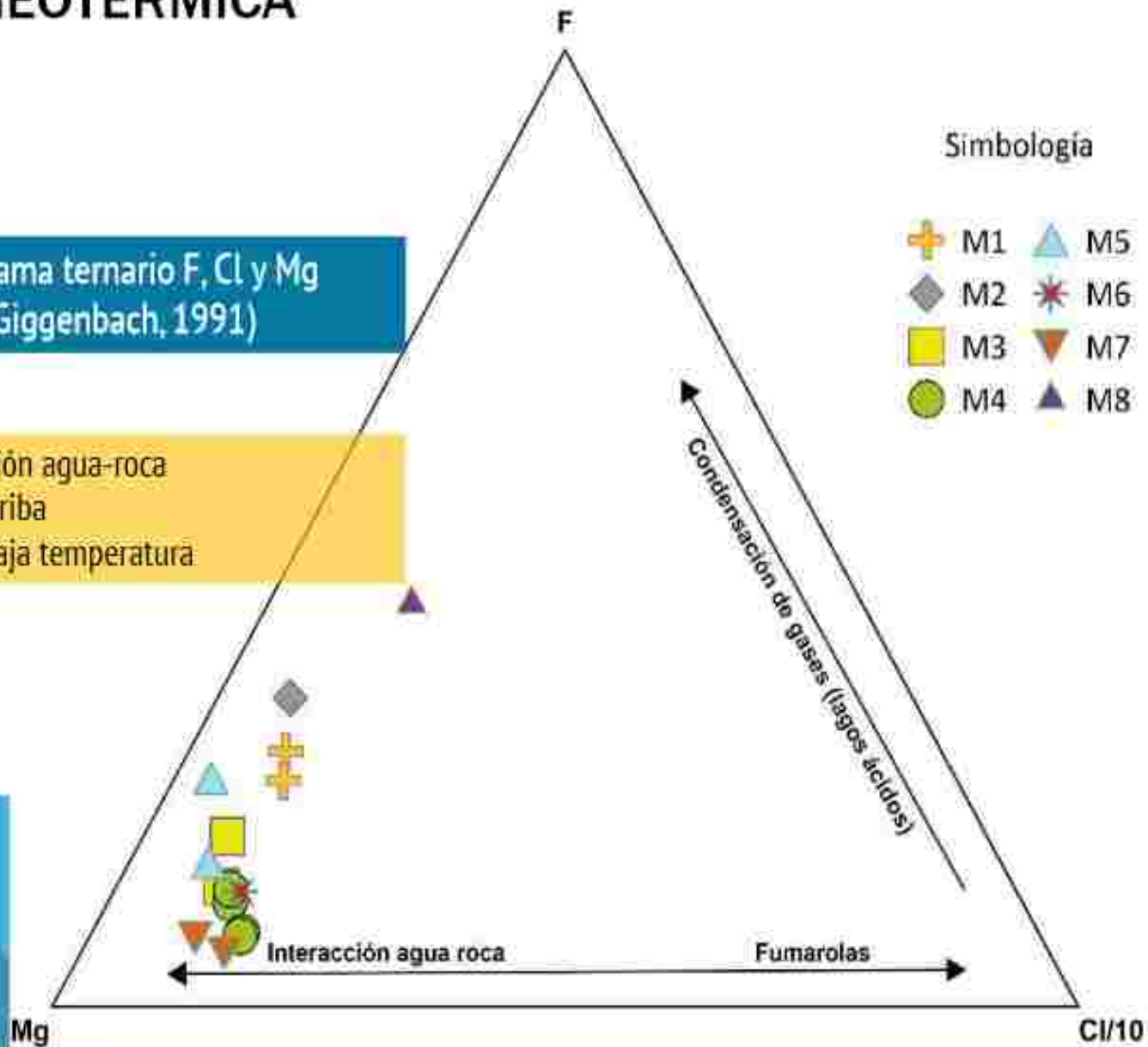
GEOQUÍMICA GEOTÉRMICA

Diagrama ternario F, Cl y Mg
(Giggenbach, 1991)

Simbología

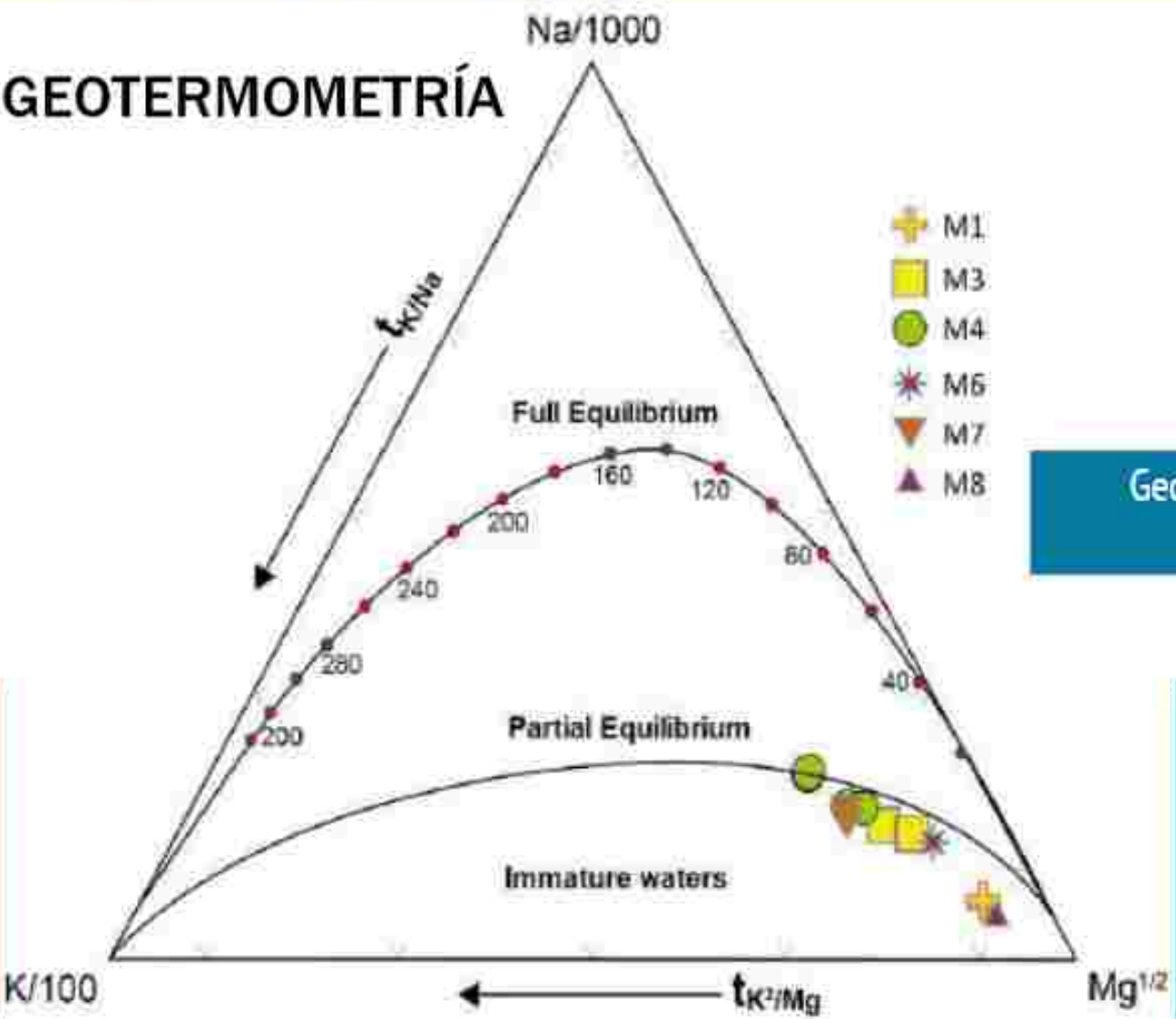


- ❖ Condensación de vapor o interacción agua-roca
- ❖ F más abundante en flujo hacia arriba
- ❖ Mg más abundante en aguas de baja temperatura



- ❖ Límite de equilibrio parcial cercano y aguas inmaduras
- ❖ Gran distancia entre las zonas de *upflow* y *outflow* → posibles cambios en el equilibrio químico que condujeron a la subestimación de la temperatura de equilibrio
- ❖ Temperatura de ebullición del agua 75.68 ° C a 6500 m s. n. m. → Posible limitación de la aplicación de geotermómetros

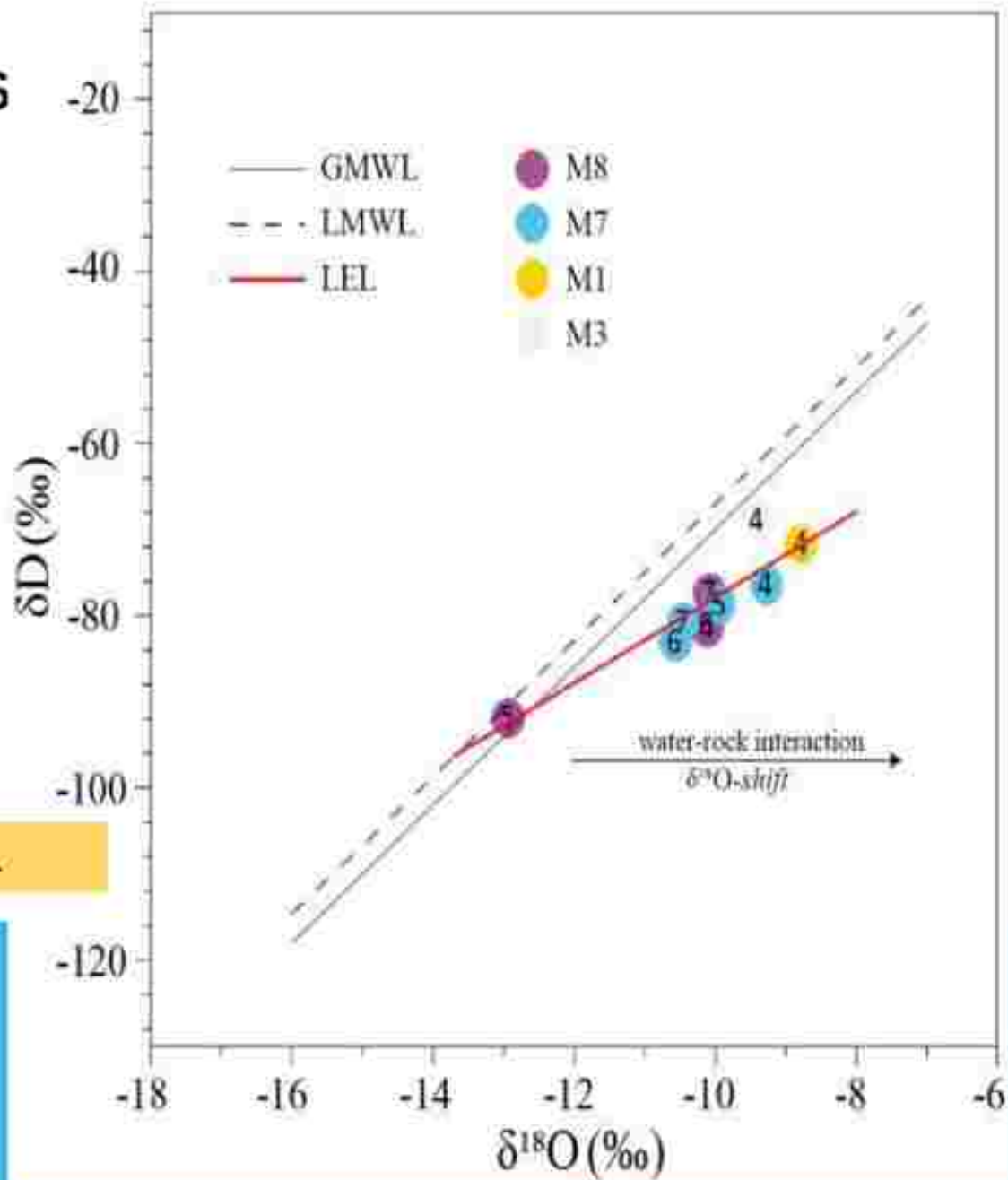
GEOTERMOMETRÍA



Geotermómetro de Na-K-Mg (Giggenbach, 1988)

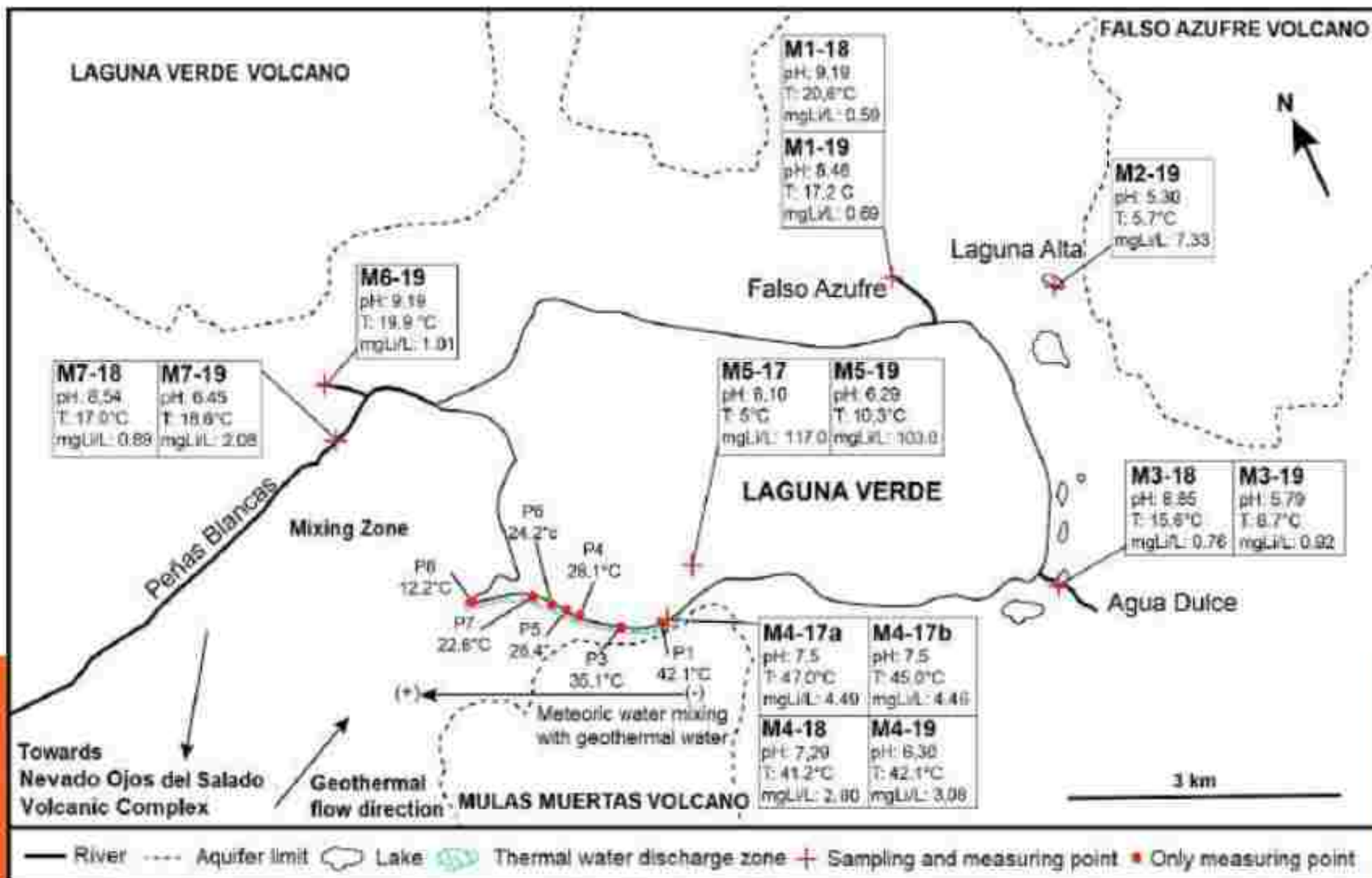


FIRMAS ISOTÓPICAS

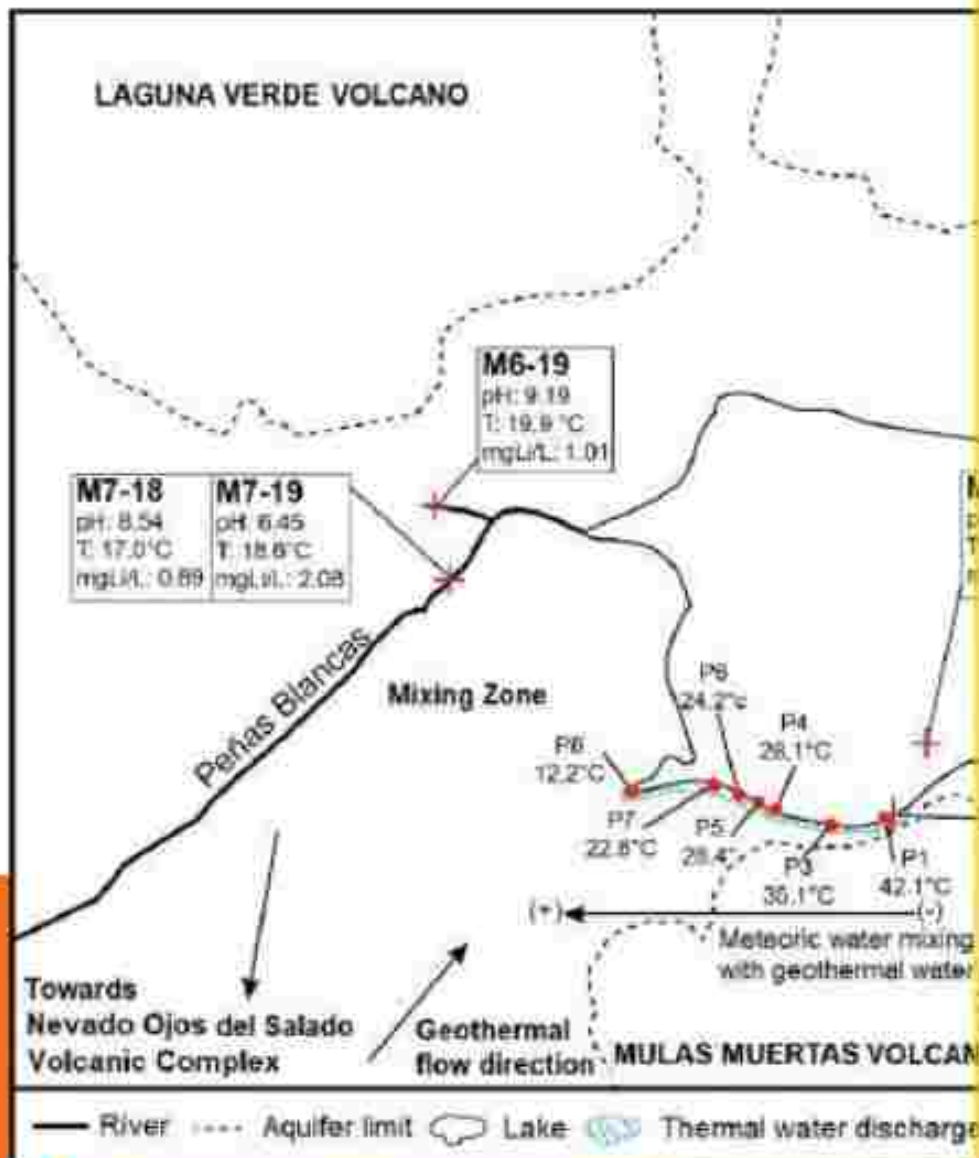


Recarga de origen glacial y periglacial

OBSERVACIONES E INTERPRETACIONES



OBSERVACIONES E INTERPRETACIONES



Descargas más cálidas que emergen de formaciones impermeables

Aguas termales

- ❖ 4.49 - 2.76 mgLi/L efecto de la fusión de nieve
- ❖ Mejor tiempo de muestreo a mediados de invierno - julio
- ❖ Mezcla en río Peñas Blancas con 2.08 y 1.01 mgLi/L en sus arroyos sur (principal) y norteño, respectivamente.
- ❖ El flujo proviene del volcán Ojos del Salado

Aguas no termales

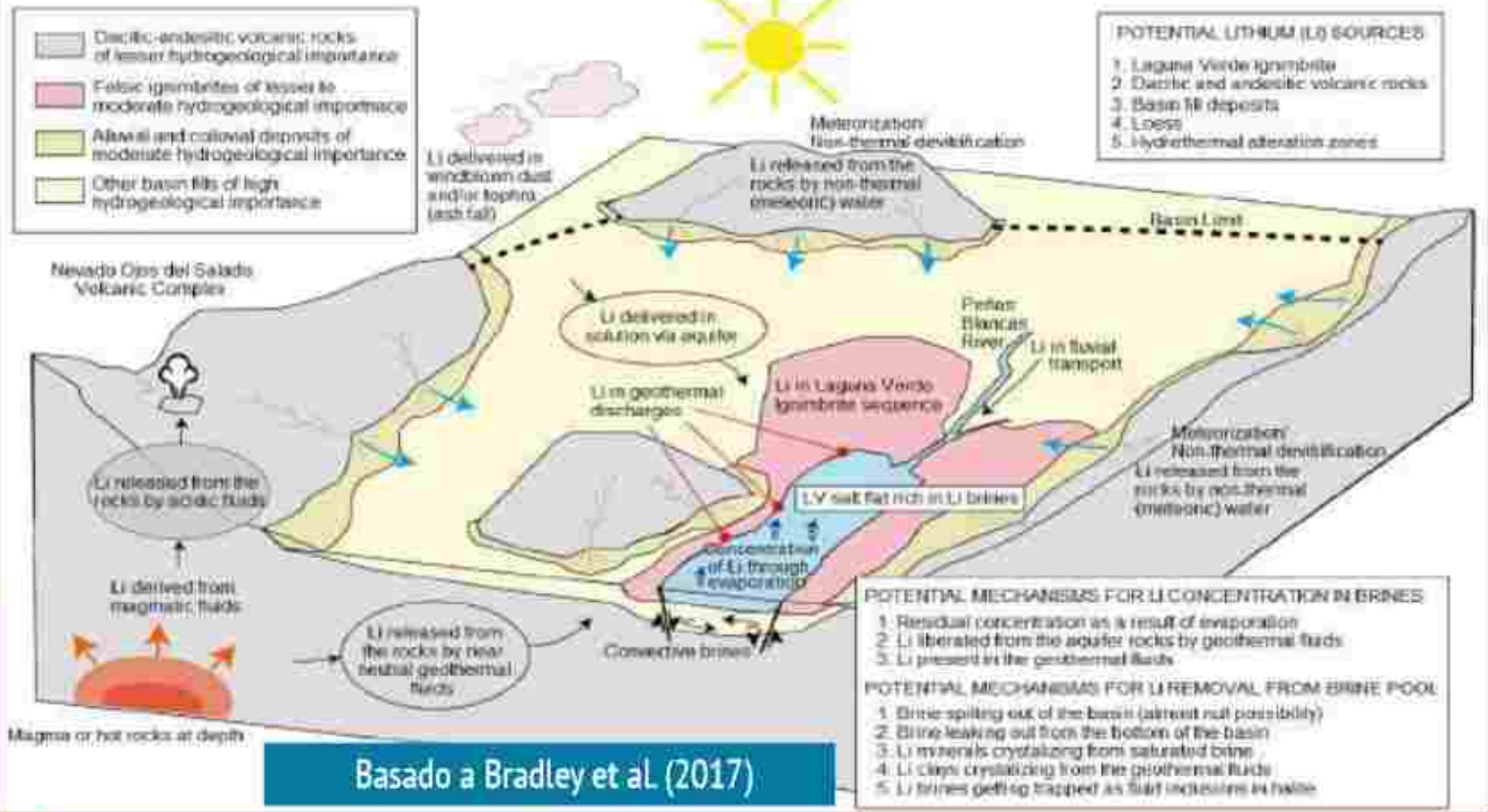
- ❖ 0.59 a 0.76 mgLi/L vs. 0.003 mgLi/L, promedio global de Li en aguas superficiales (Faure, 1998)
- ❖ Una parte significativa de Li proviene de la desvitrificación no térmica y / o la interacción con rocas alteradas y / o la interacción con sales de litio precipitadas y / o la abundancia de rocas de vidrio que liberan litio por desvitrificación no térmica.

Point	pH	T (°C)	mgLi/L
M4-18	7.28	43.2	3.30
M4-19	6.30	42.1	3.08

3 km

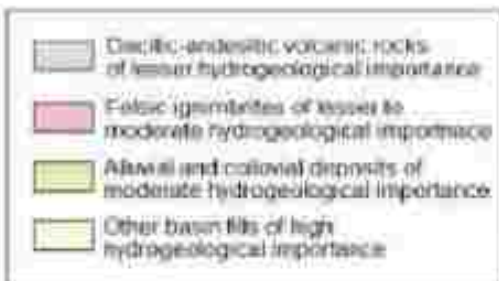
MODELO DE ENRIQUECIMIENTO DEL LITIO

SCHEMATIC MODEL FOR THE SOURCES, FLOW PATHS AND SINKS OF LITHIUM IN THE SLV

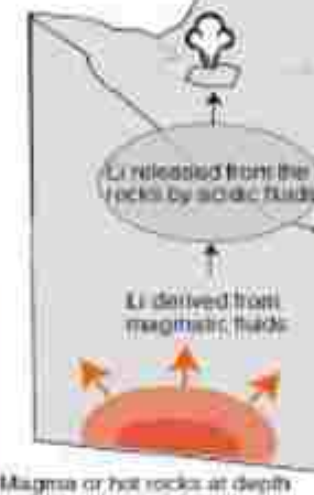


MODELO DE ENRIQUECIMIENTO DEL LITIO

SCHEMATIC MODEL FOR THE SOURCES, FLOW PATHS AND SINKS OF LITHIUM IN THE SLV

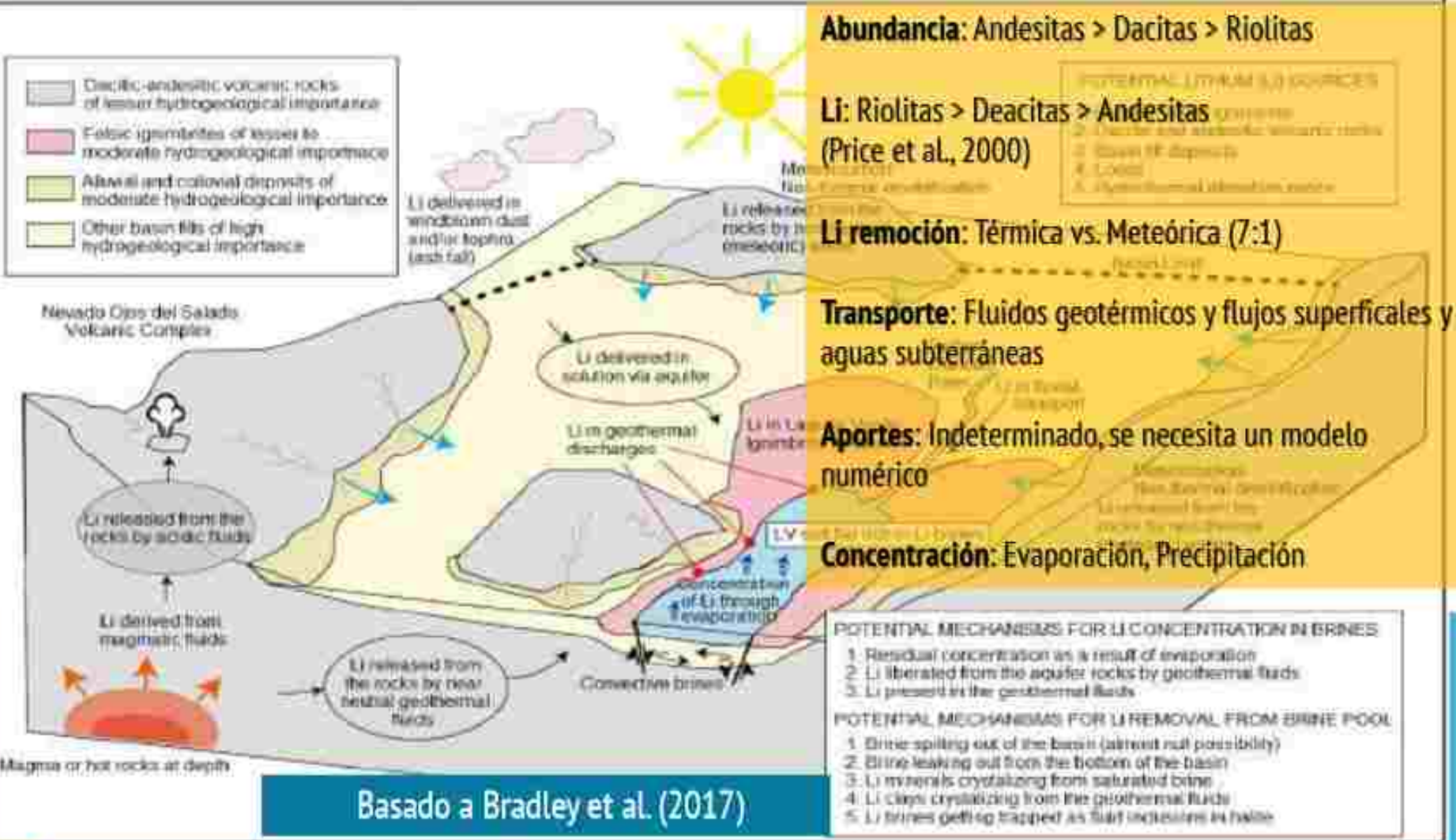


Nevado Ojos del Salado Volcanic Complex



Magma or hot rocks at depth

Basado a Bradley et al. (2017)



Abundancia: Andesitas > Dacitas > Riolitas

Li: Riolitas > Dacitas > Andesitas
(Price et al., 2000)

Li remoción: Térmica vs. Meteórica (7:1)

Transporte: Fluidos geotérmicos y flujos superficiales y aguas subterráneas

Aportes: Indeterminado, se necesita un modelo numérico

Concentración: Evaporación, Precipitación



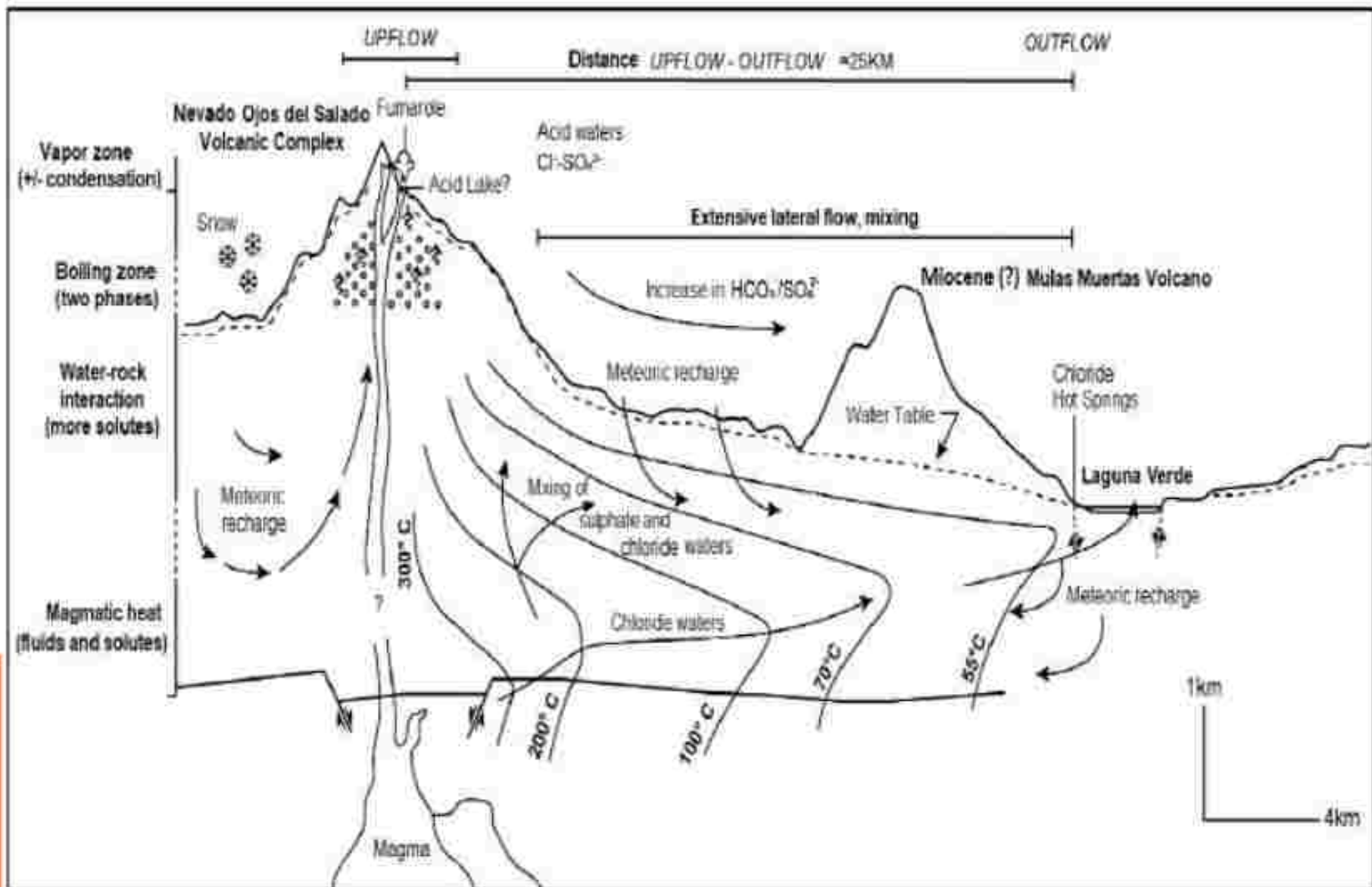
POTENTIAL MECHANISMS FOR Li CONCENTRATION IN BRINES

1. Residual concentration as a result of evaporation
2. Li liberated from the aquifer rocks by geothermal fluids
3. Li present in the geothermal fluids

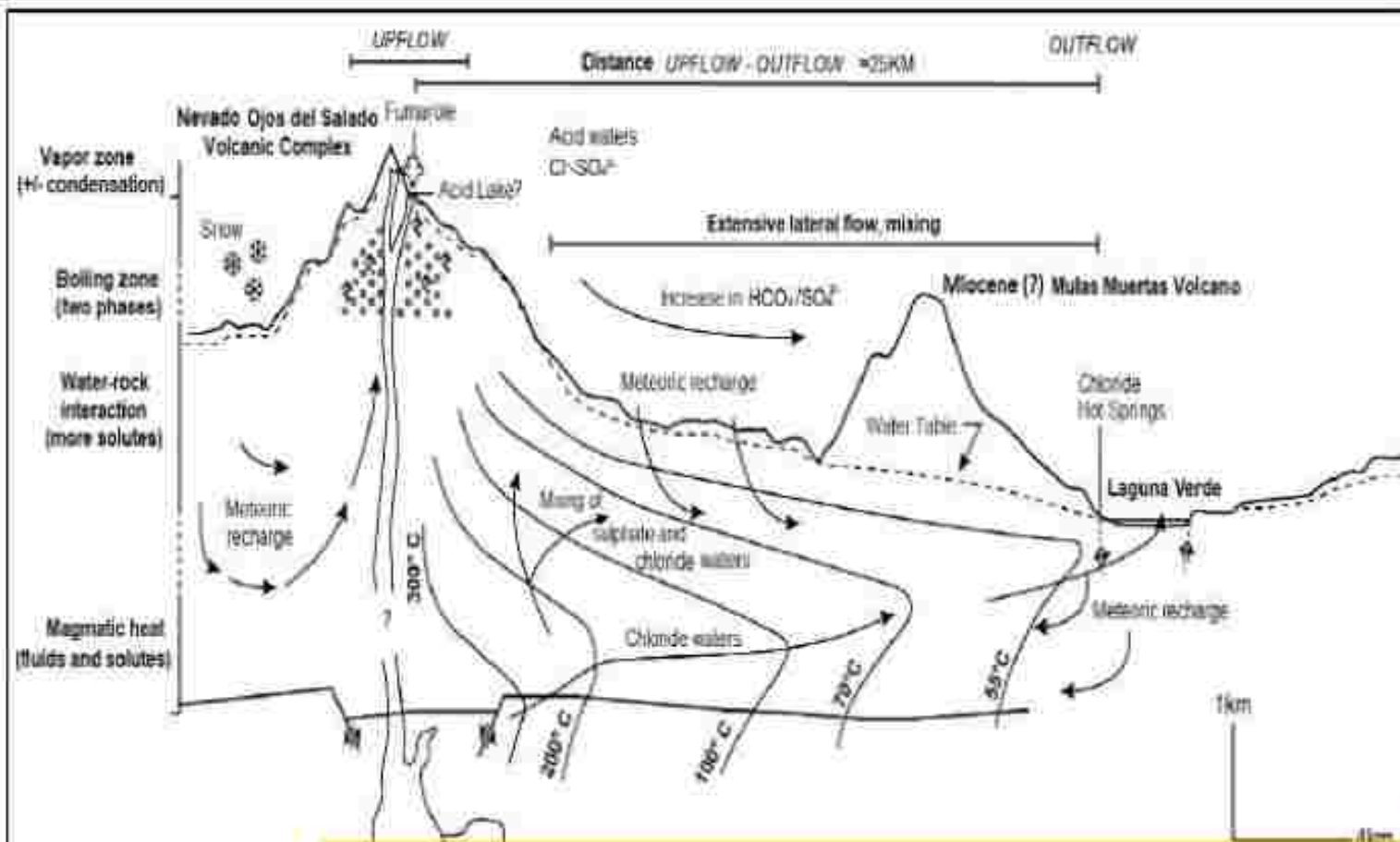
POTENTIAL MECHANISMS FOR Li REMOVAL FROM BRINE POOL

1. Brine spilling out of the basin (almost not possibility)
2. Brine leaking out from the bottom of the basin
3. Li minerals crystallizing from saturated brine
4. Li clays crystallizing from the geothermal fluids
5. Li brines getting trapped as fluid inclusion in halite

MODELO CONCEPTUAL



MODELO CONCEPTUAL



- ❖ La gran distancia (>25 Km) entre el flujo de salida y el flujo de salida probablemente produce varios cambios en el equilibrio químico, y explica la baja temperatura estimada (subestimación del potencial geotérmico).
- ❖ Posiblemente más manifestaciones geotermales cerca del volcán Ojos del Salado hacia el oeste de la cumbre principal.
- ❖ Las estructuras de infiltración profunda deben estar cubiertas por sedimentos.

¿CUÁL ES LA IMPLICACIÓN?

El calentamiento conductivo por fluidos geotérmicos subyacentes podría inducir la circulación (análoga al vuelco convectivo) en una porción de las salmueras de la cuenca que se encuentran dentro de regiones hidrológicamente conectadas.

Los procesos mencionados anteriormente pueden conducir al desarrollo de una distribución subsuperficial heterogénea de litio en cuencas cerradas.

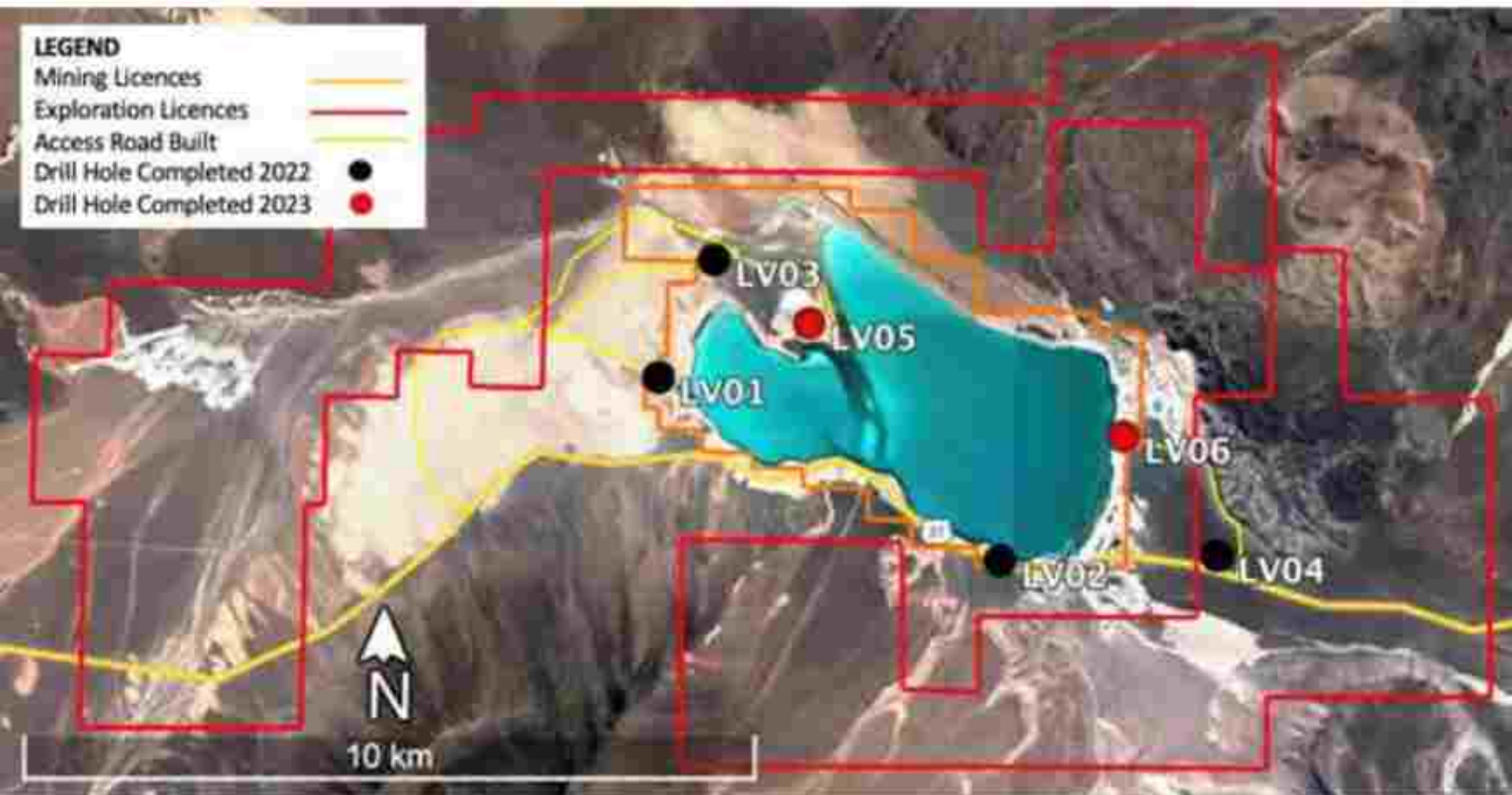


**The role of a geothermal system in the formation of lithium-rich brines:
A missing link in developing sustainable mining methods**

COMPROBACIÓN DEL MODELO

LEGEND

- Mining Licences 
- Exploration Licences 
- Access Road Built 
- Drill Hole Completed 2022 
- Drill Hole Completed 2023 



COMPROBACIÓN DEL MODELO

El programa de perforación de seis pozos de la empresa CleanTech Lithium encontró grados promedio de litio de 200 mg/L y registró hasta 409 mg/L en profundidad, lo que sugiere el potencial de leyes más altas en profundidad.

El pozo LV01 se completó a una profundidad de 474 m, LV02 alcanzó 339,4 m, LV03 alcanzó 547,5 m y LV04 311 m. Dos pozos de relleno, LV05 y LV06, se completaron en el primer semestre de 2023 alcanzando profundidades de 434,6 y 405 m respectivamente.

La perforación también indicó una fuerte influencia geotérmica en las salmueras de Laguna Verde, con temperaturas promedio registradas de 20-30°C, que coinciden con el rango de temperatura ideal para el proceso DEL/EDL.

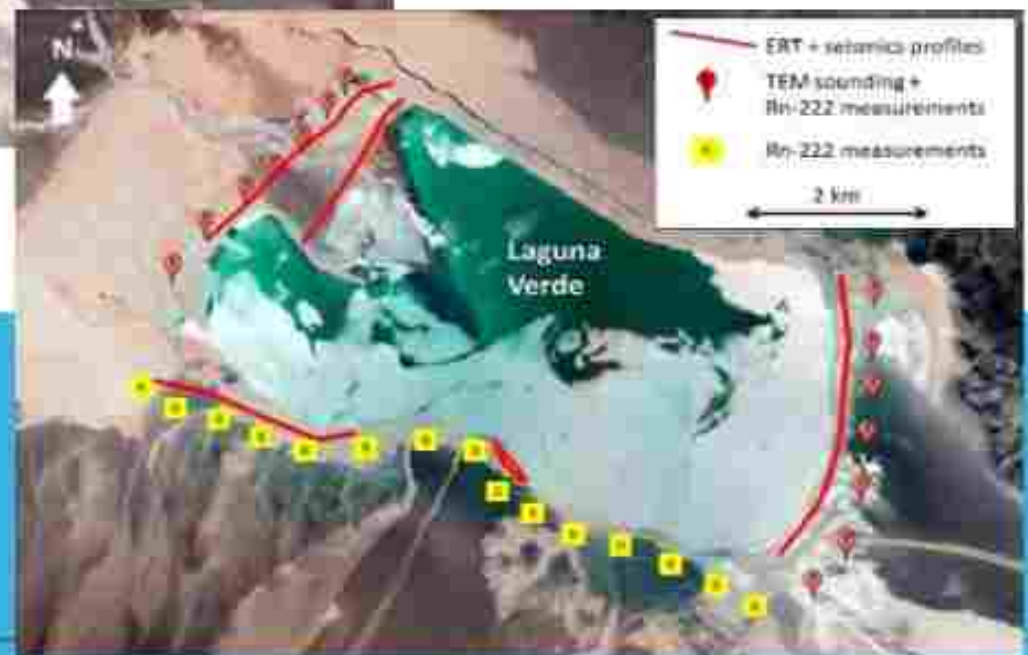


**The role of a geothermal system in the formation of lithium-rich brines:
A missing link in developing sustainable mining methods**

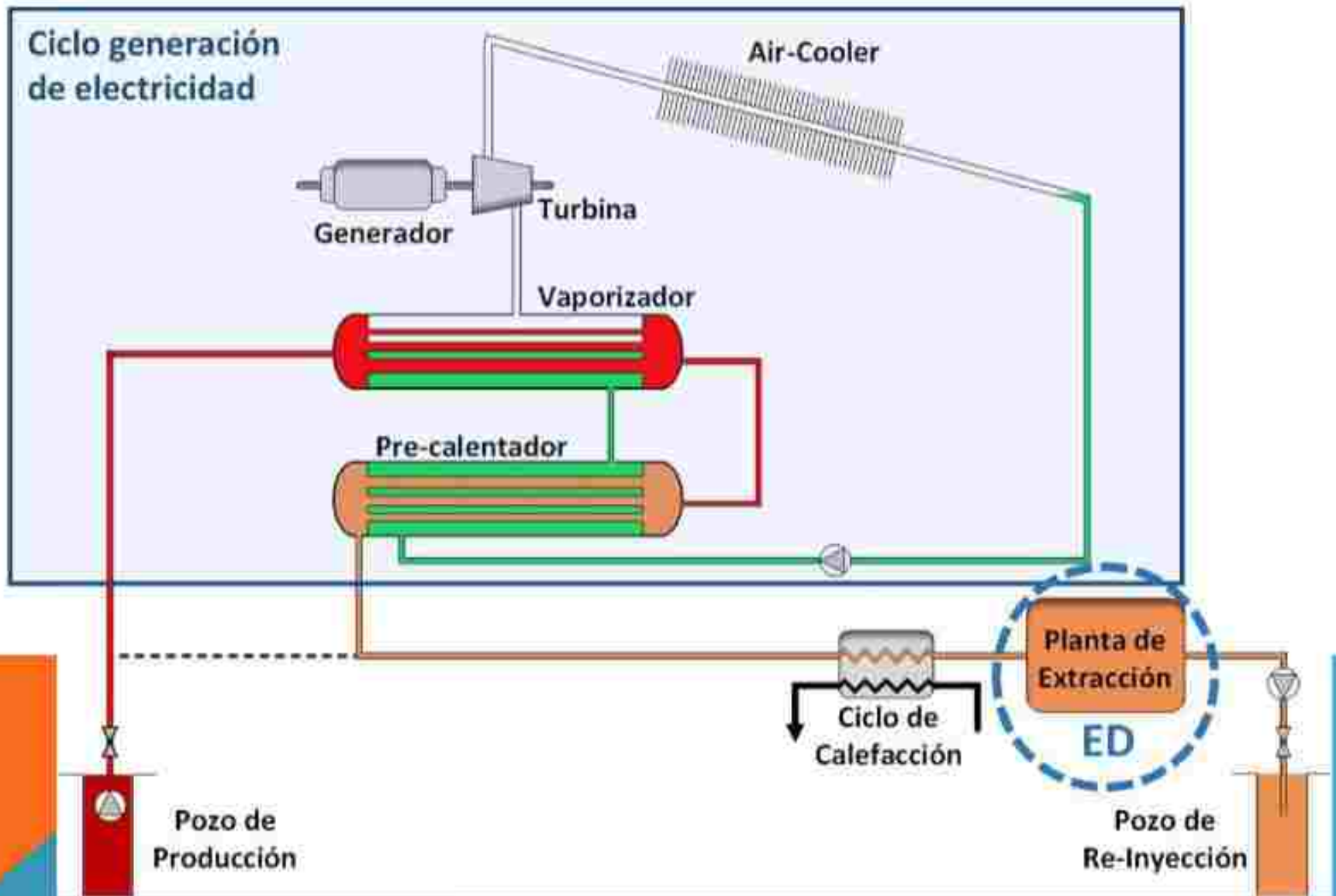
PRÓXIMO PASO



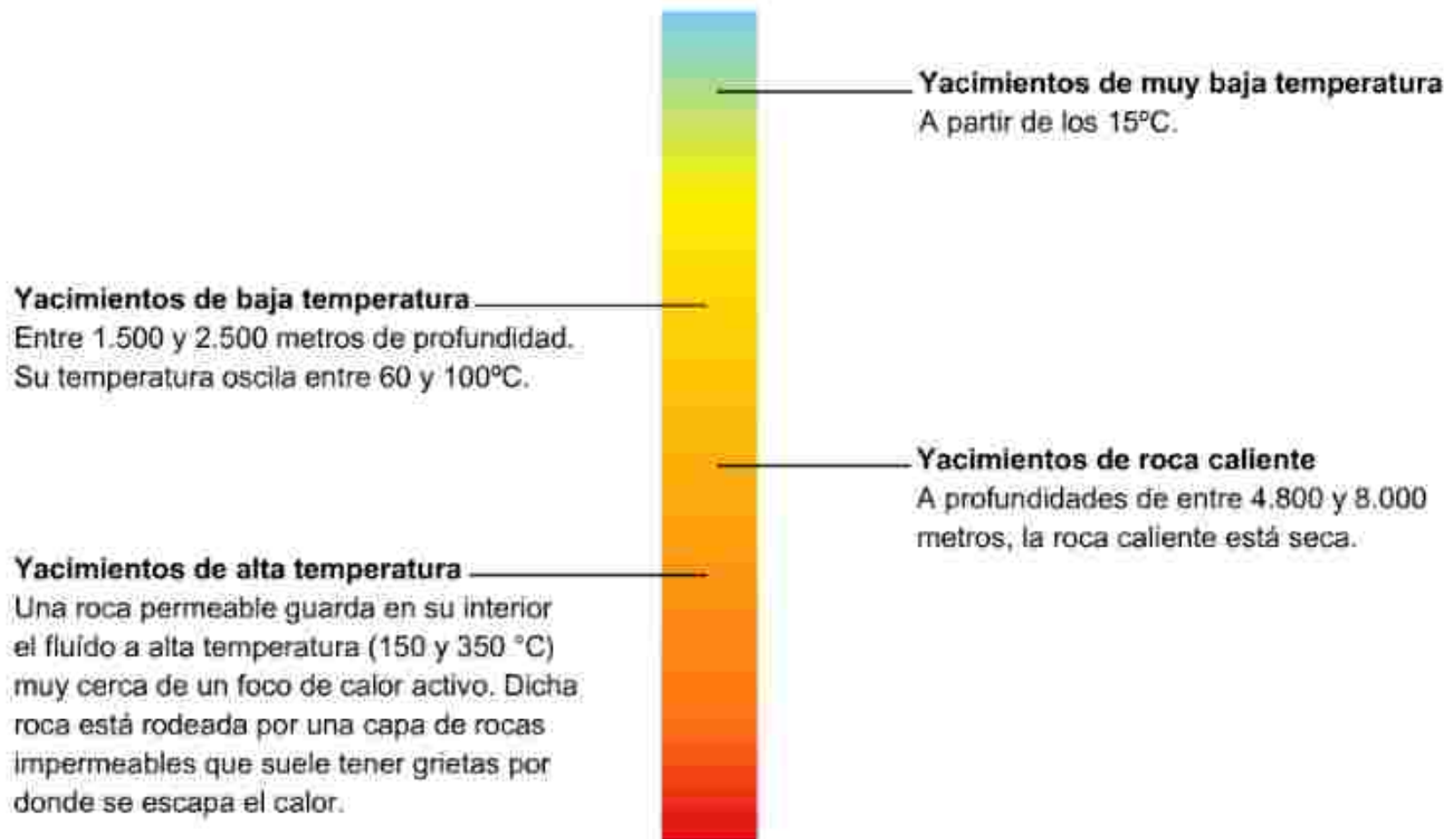
Proposed MT (L) and TEM sounding (R) sites, along with ERT, seismic profiles and Rn-222 measurements



EXTRACCIÓN DIRECTA (DEL O EDL)



CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS



¿CÓMO FUNCIONA?

1

El agua se acumula formando depósitos o acuíferos ubicados en distintos niveles en la profundidad de la Tierra.



4

En la parte superior de la corteza, rocas impermeables impiden la fuga de calor.

3

Rocas fracturadas permiten la transferencia de calor de la fuente a la superficie.

2

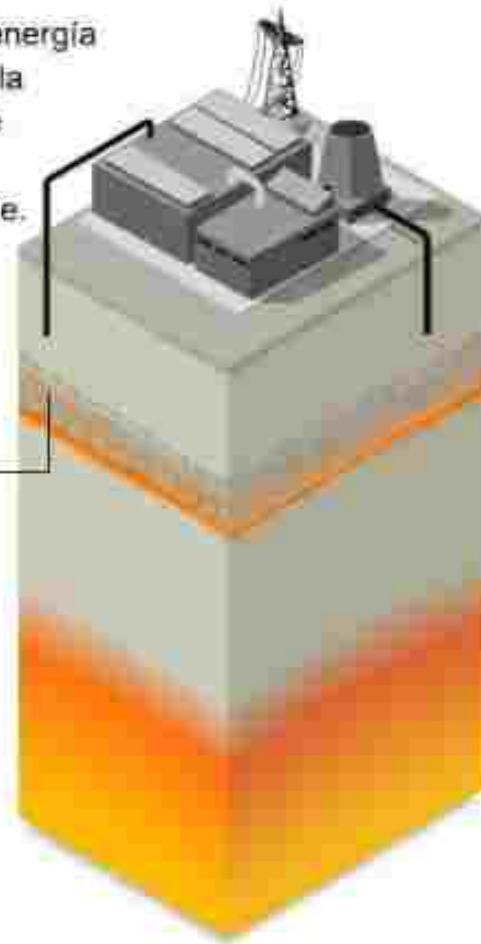
Un foco de calor magmático calienta el agua.

¿CÓMO FUNCIONA UN CENTRAL GEOTÉRMICA?

En la actualidad, la utilización de la energía geotermal se encuentra limitada por la tecnología que permite un transporte del agua en estado líquido o vapor desde zonas profundas a la superficie.

1

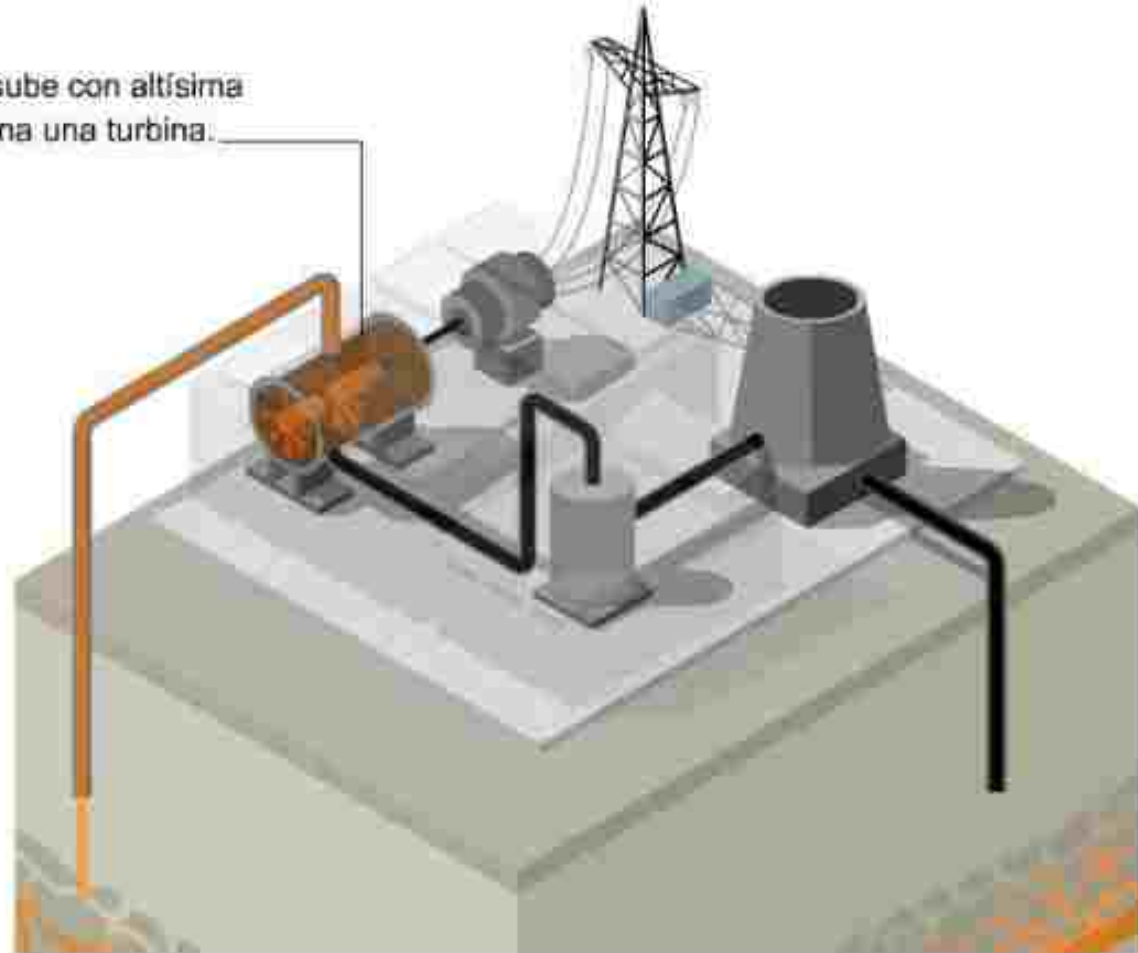
Mediante un tubo, el vapor es transportado hasta la superficie.



¿CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL GEOTÉRMICA?

2

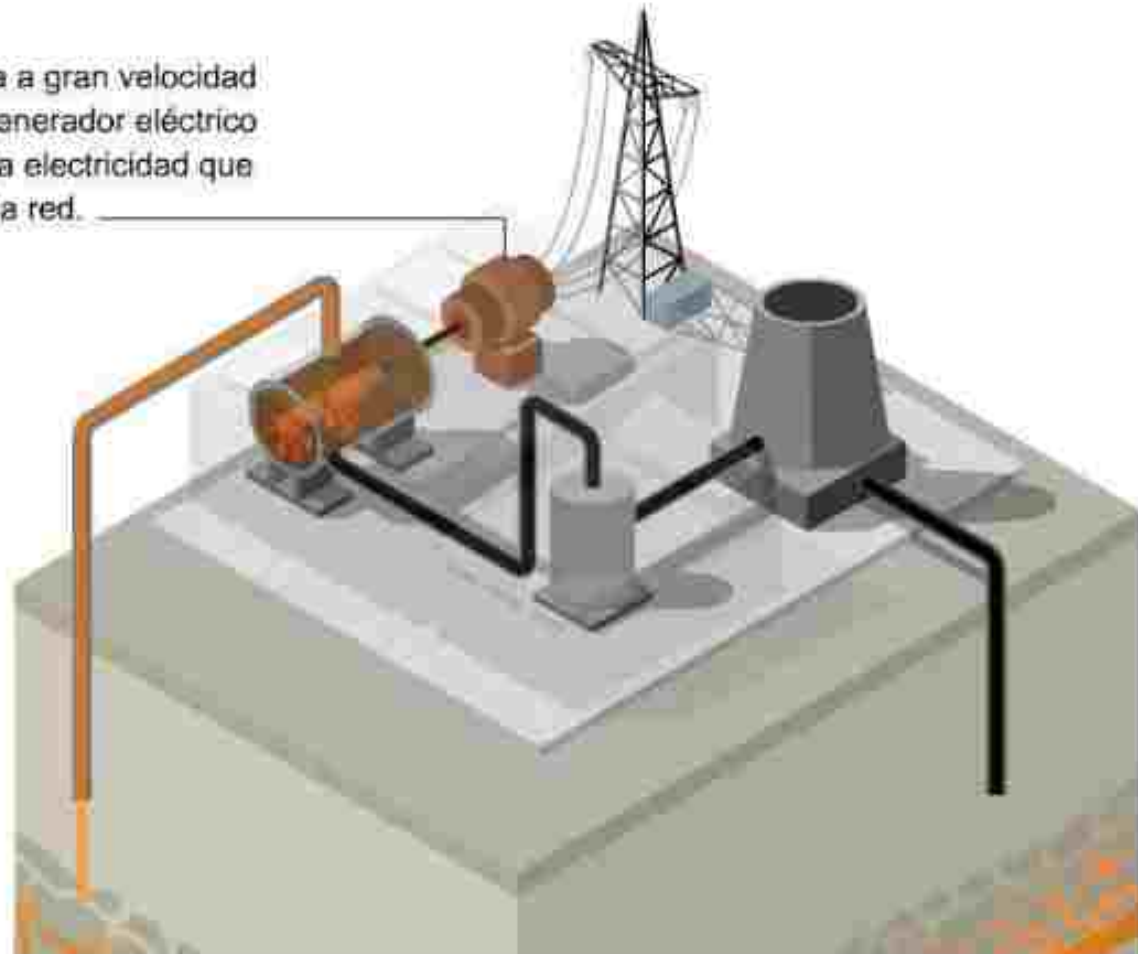
El vapor que sube con altísima presión, acciona una turbina.



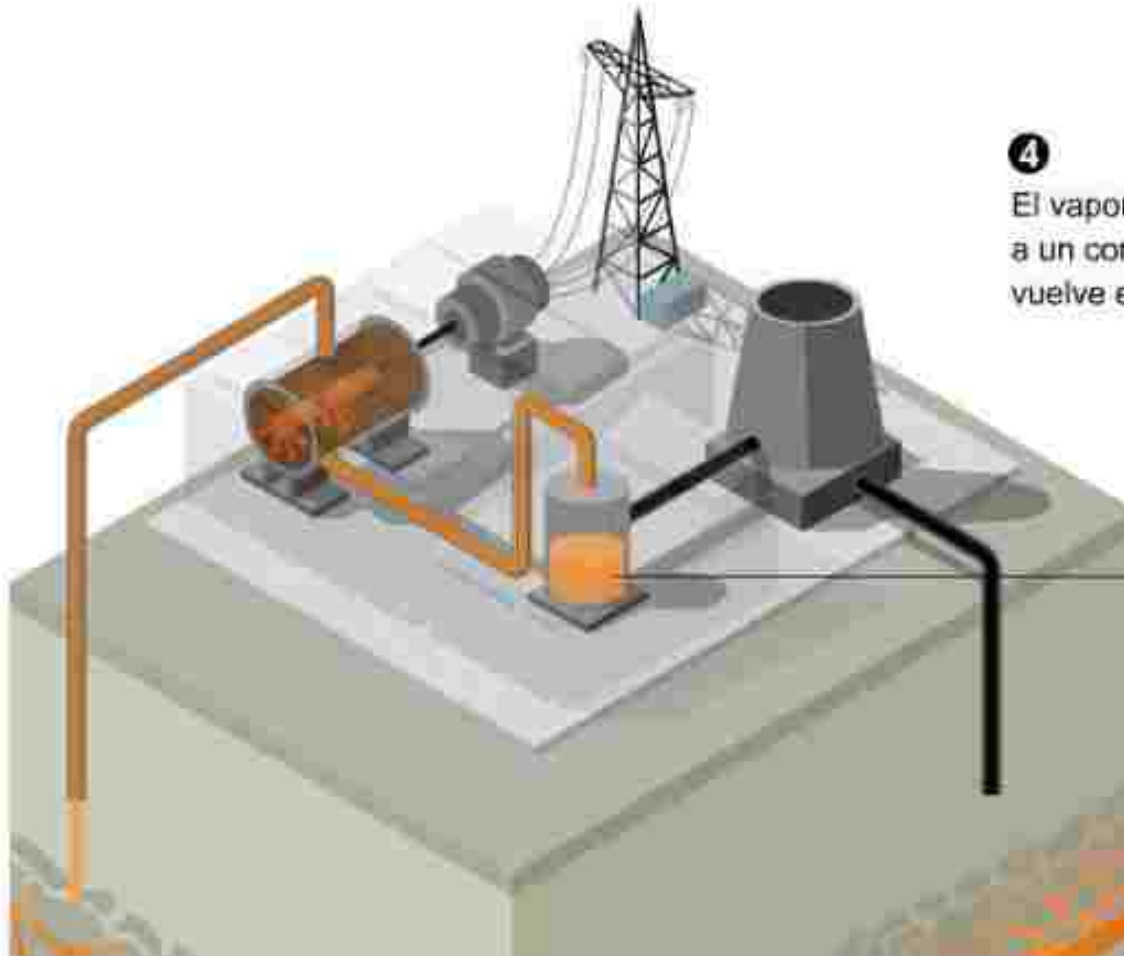
¿CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL GEOTÉRMICA?

3

La turbina gira a gran velocidad y mueve un generador eléctrico que produce la electricidad que es enviada a la red.



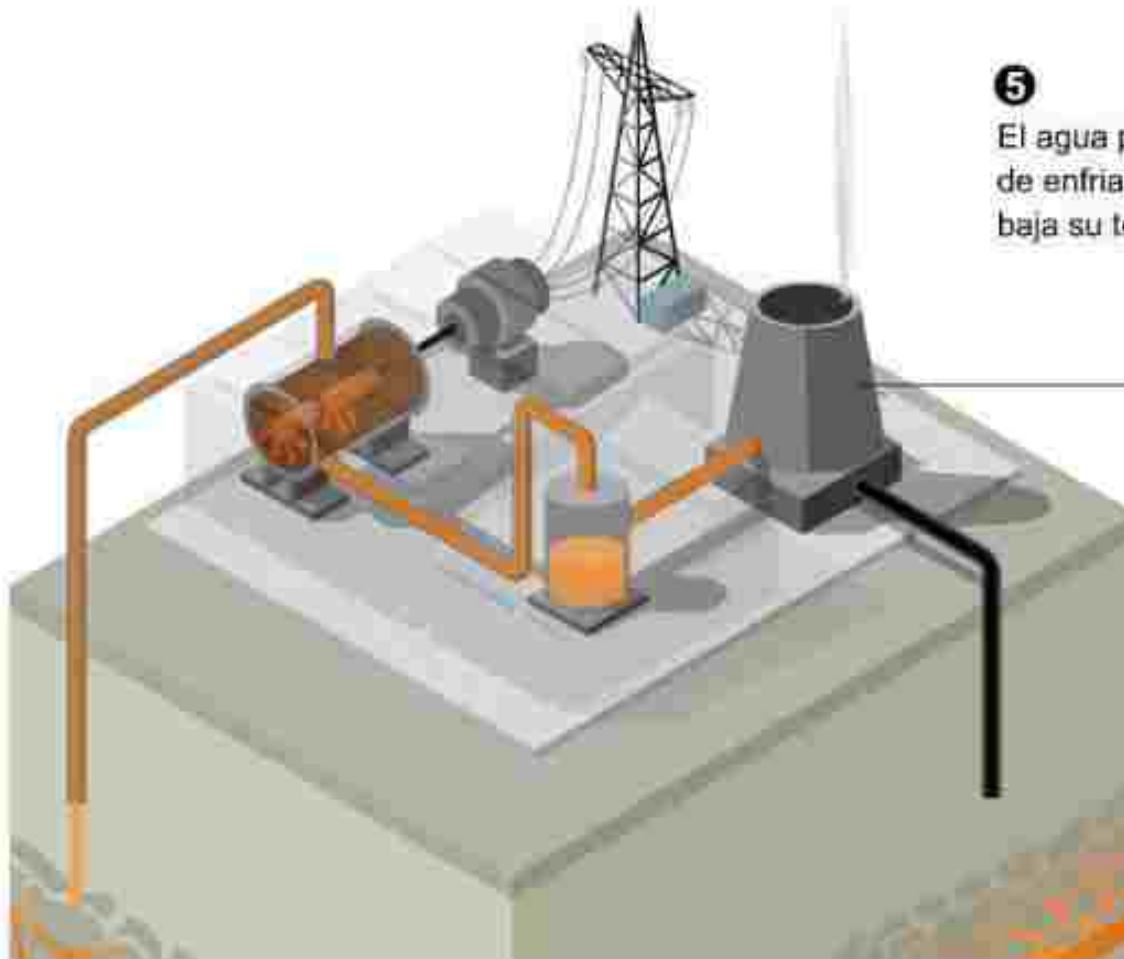
¿CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL GEOTÉRMICA?



4

El vapor es enviado a un condensador donde vuelve el estado líquido.

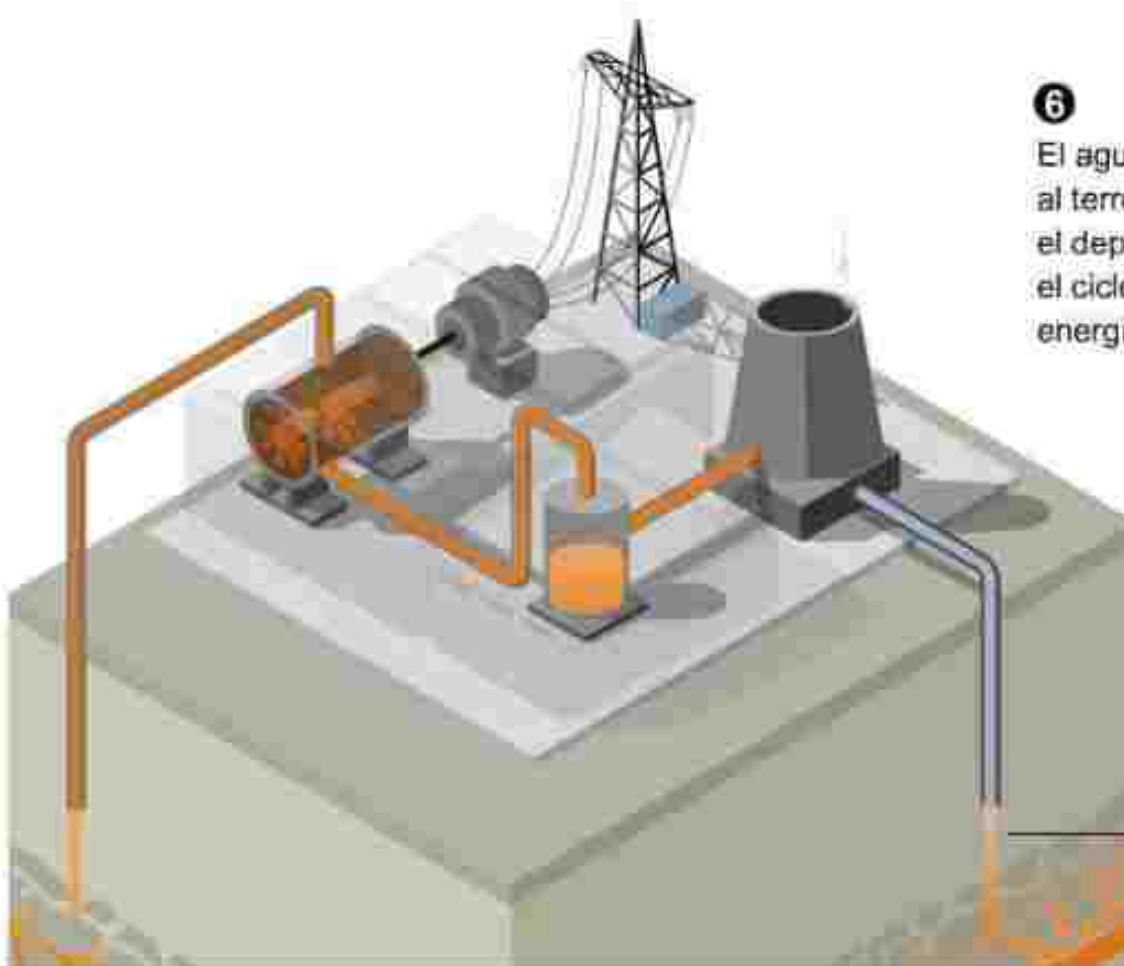
¿CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL GEOTÉRMICA?



5

El agua pasa a una torre de enfriamiento donde se baja su temperatura.

¿CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL GEOTÉRMICA?



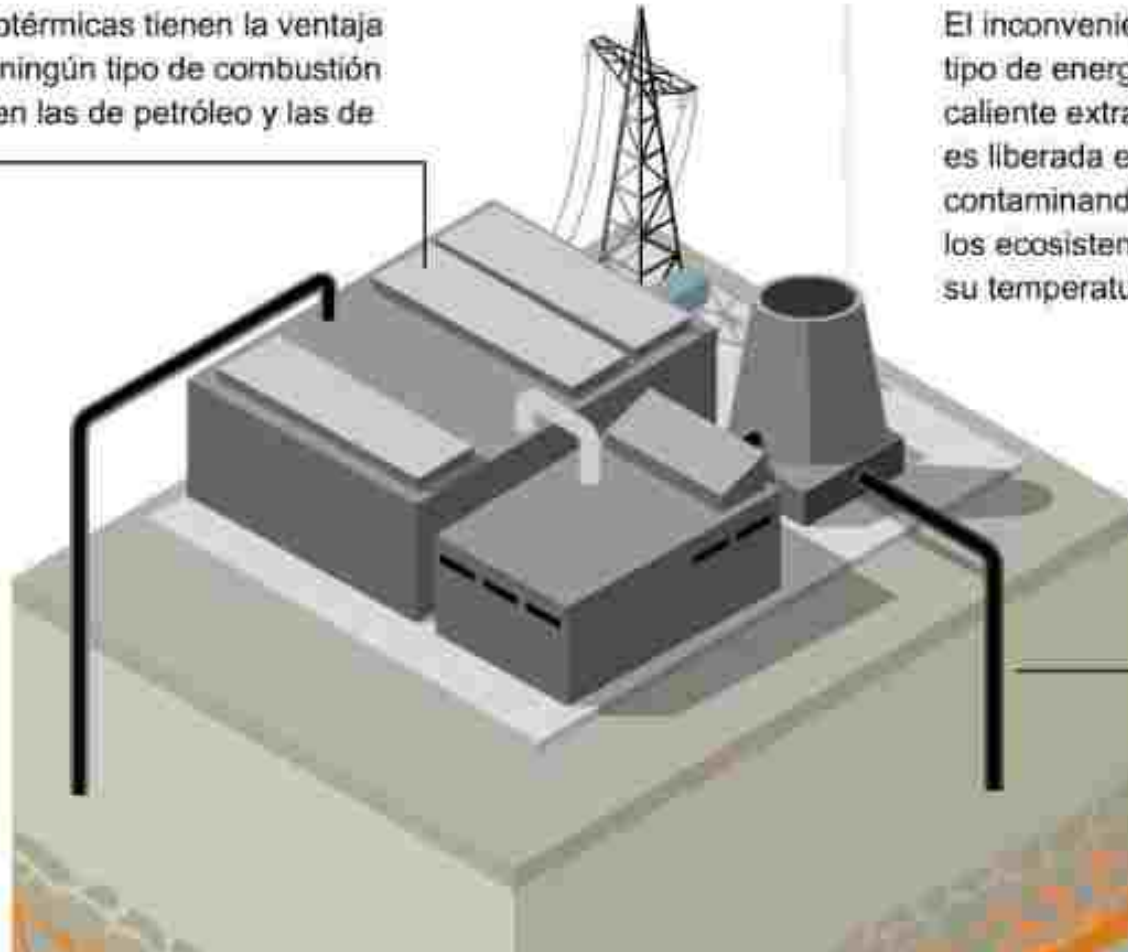
6

El agua se devuelve al terreno para recargar el depósito y completar el ciclo renovable de la energía.

¿CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL GEOTÉRMICA?

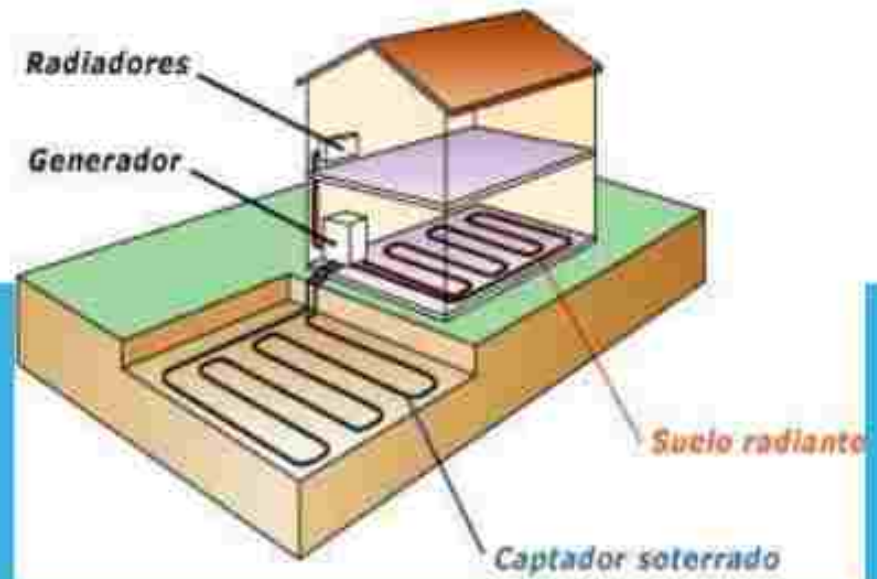
Las plantas geotérmicas tienen la ventaja de no producir ningún tipo de combustión como sí lo hacen las de petróleo y las de carbón.

El inconveniente que tiene este tipo de energía es que el agua caliente extraída del subsuelo es liberada en la superficie contaminando térmicamente los ecosistemas, al aumentar su temperatura natural.



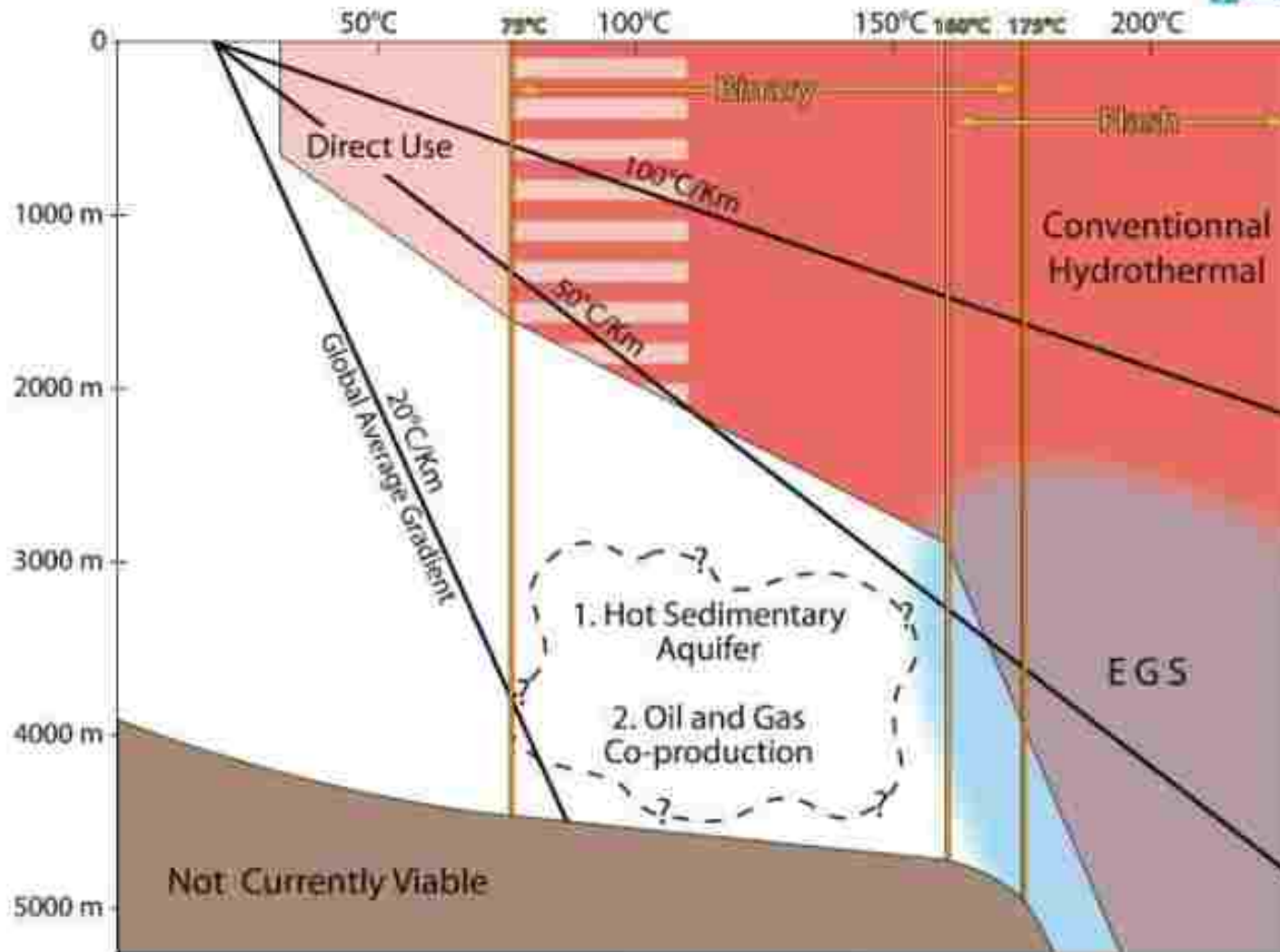
USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

- ❖ La energía geotérmica es capaz de extraer el calor natural de la tierra para emplearlo en el hogar a modo de calefacción, agua caliente sanitaria, o calentamiento de piscinas.
- ❖ Permite un máximo ahorro en el consumo de calefacción al utilizar calor natural, gratuito y al no tener que emplear la combustión de materias primas para el calentamiento de su hogar



ALCANCE DE LA GEOTERMIA

Schematic Depth-Temperature Plot for Geothermal Resources



¡MUCHAS GRACIAS!

Correo: ayaz.alam@usach.cl / ayaz.alam@gmail.com

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/ayazalam/>

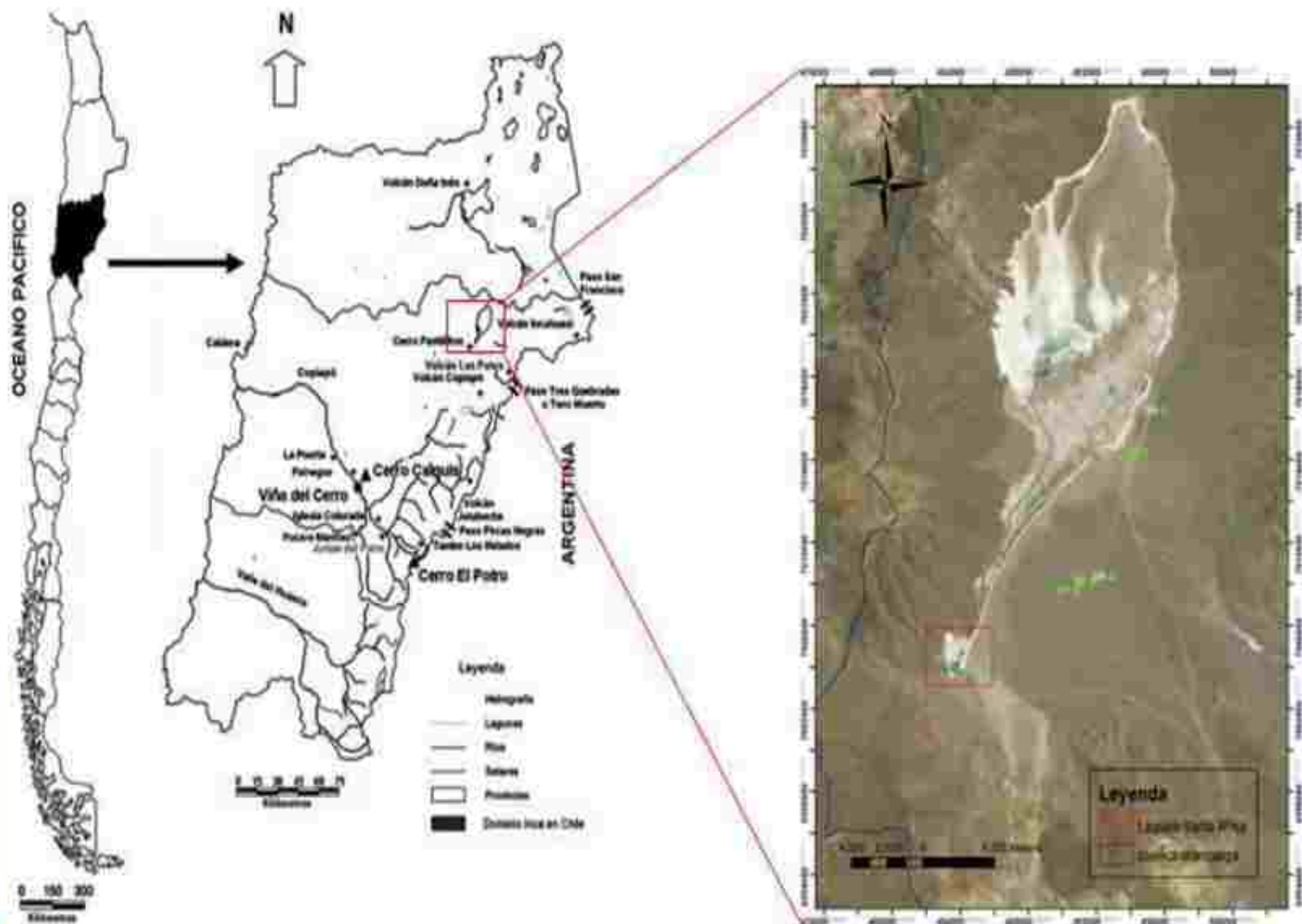
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Ayaz-Alam>

LAGUNA SANTA ROSA Y EL "TRIANGULO DE LITIO"

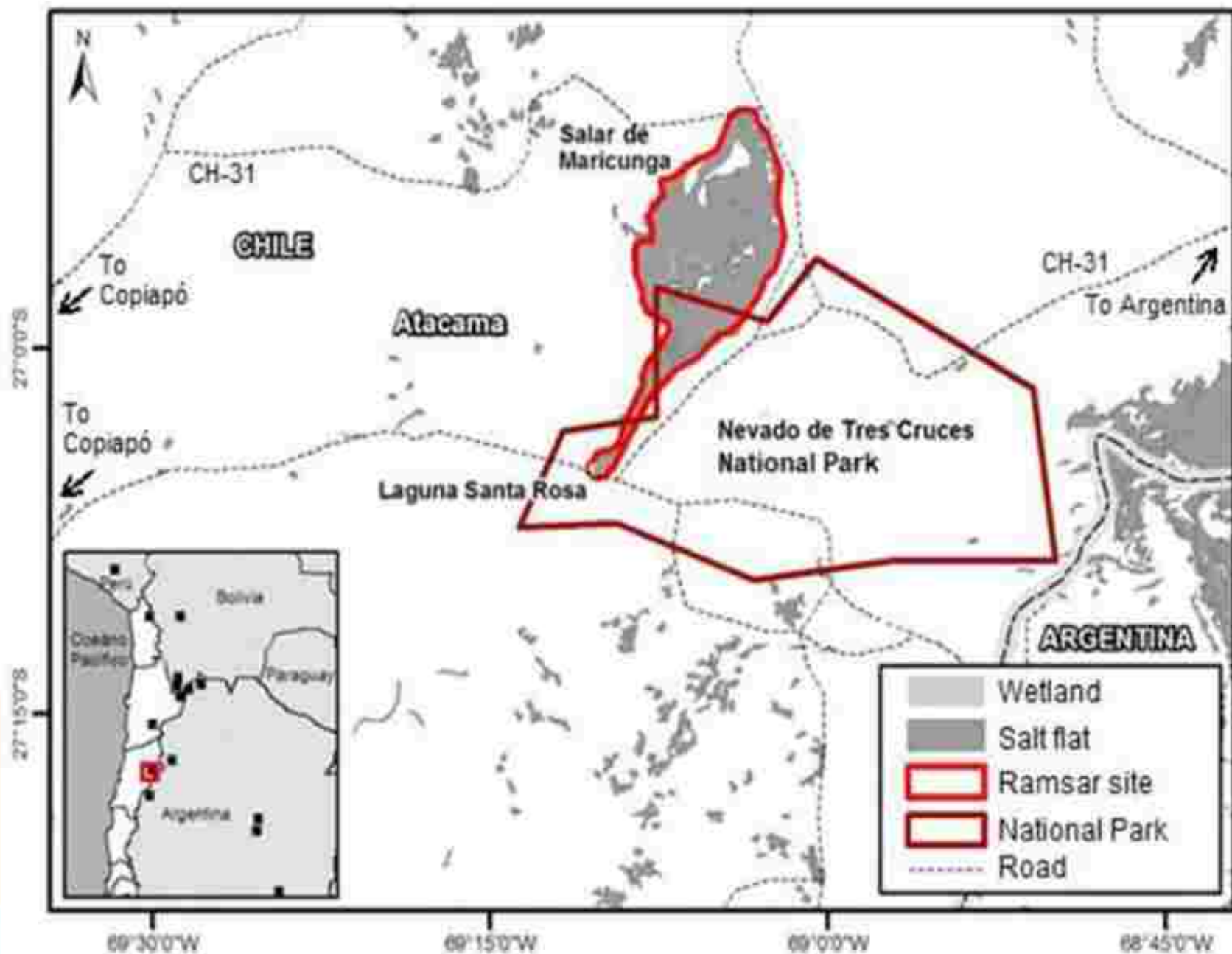


Modificado de Lithium Power (2017)

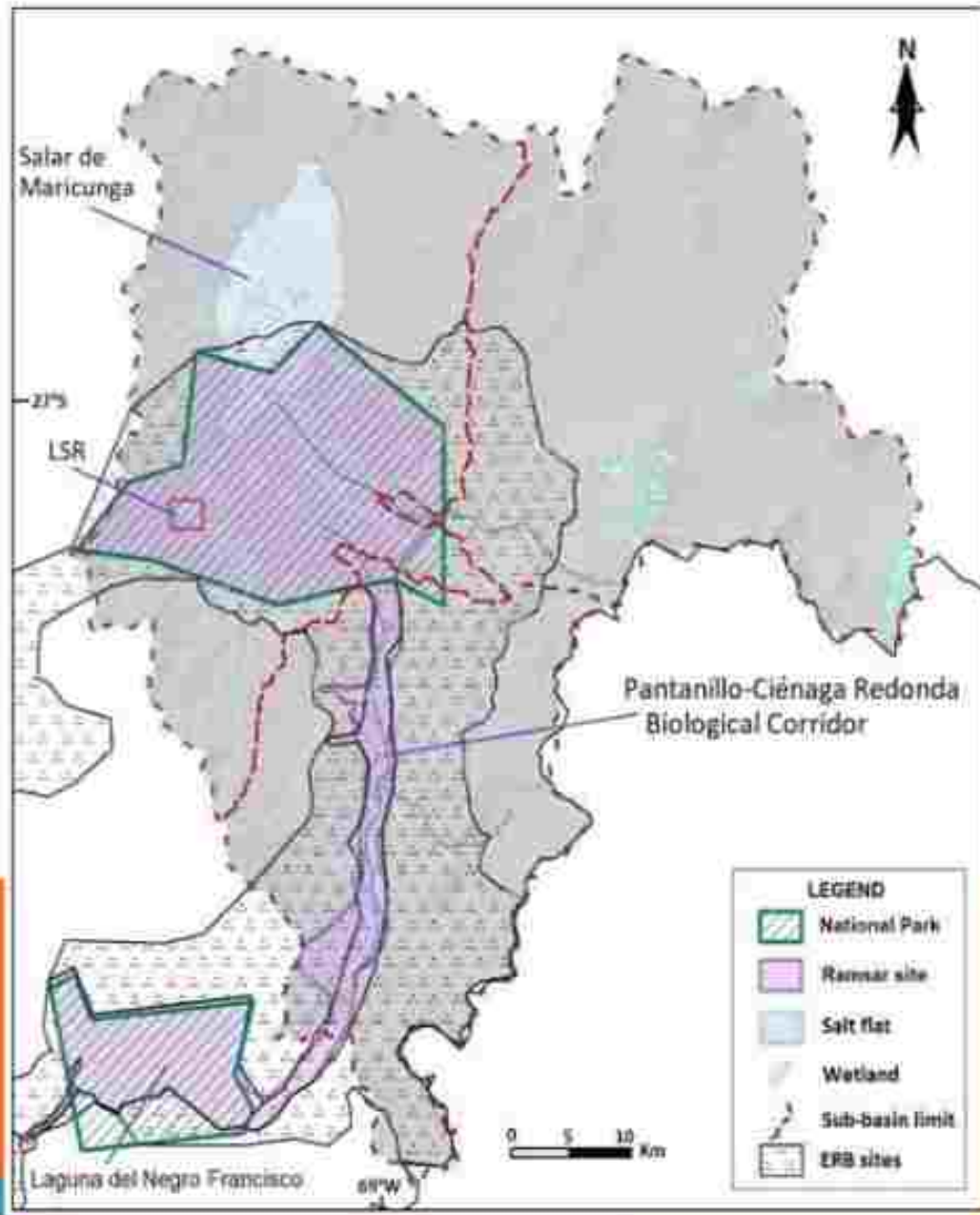
UBICACIÓN DEL SALAR DE MARICUNGA Y LAGUNA SANTA ROSA



UBICACIÓN DEL SALAR DE MARICUNGA Y LAGUNA SANTA ROSA

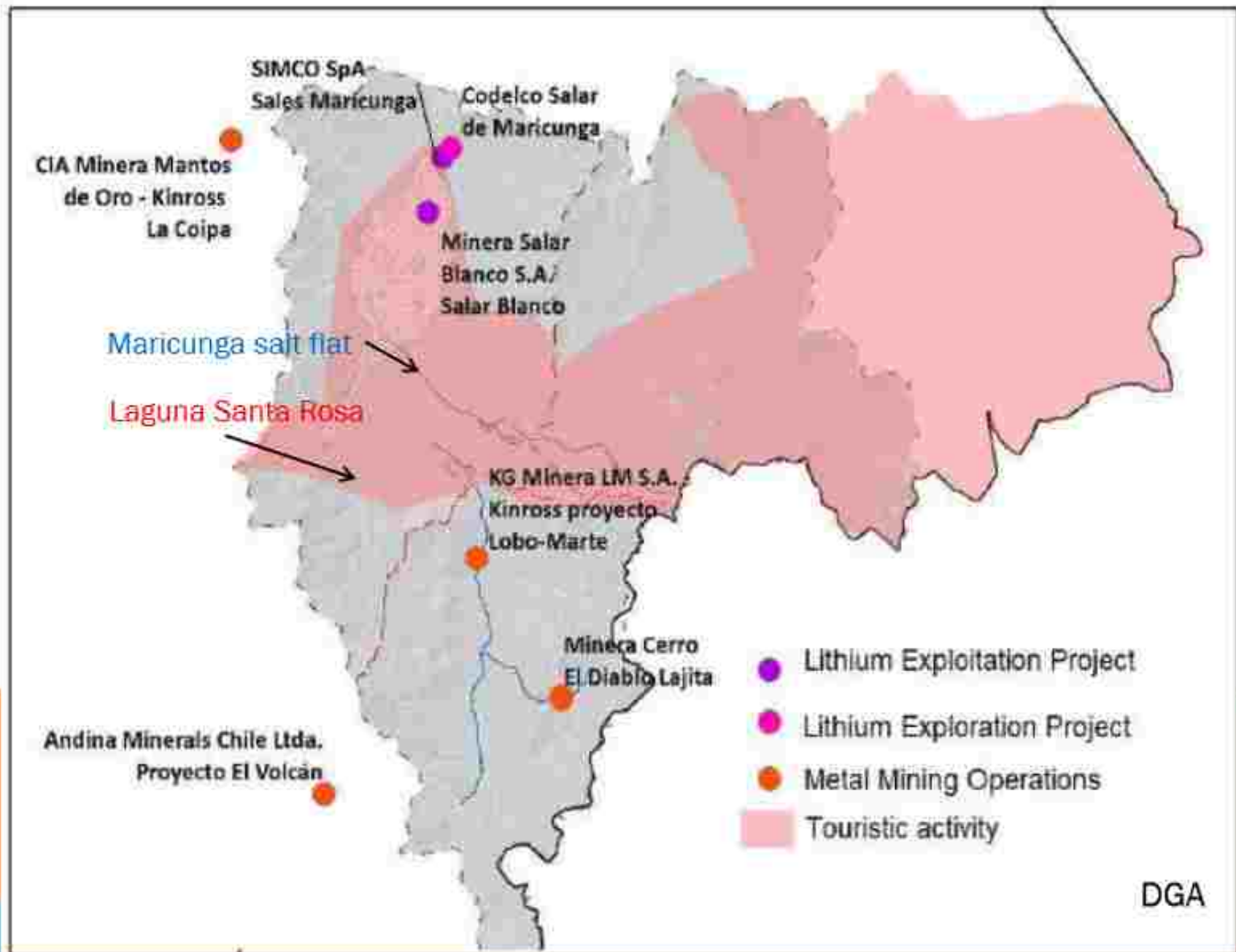


IMPORTANCIA DE LA LAGUNA SANTA ROSA

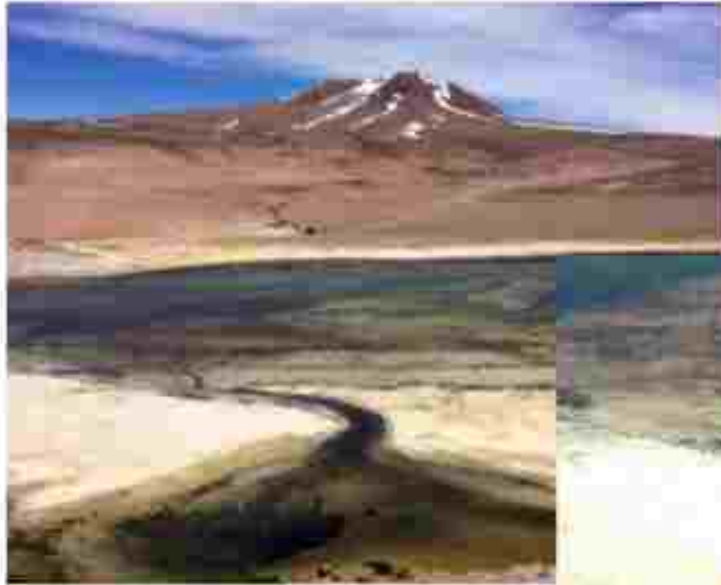


Laguna Santa Rosa (LSR), Salar de Maricunga, Parque Nacional Nevado de Tres Cruces y Corredor Biológico Pantaniillo-Ciénaga Redonda que conecta LSR con Laguna del Negro Francisco, que en conjunto forman un sitio Ramsar. Sitios ERB: Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad según el plan de Estrategia Regional de Biodiversidad (MMA, 2016)

ACTIVIDADES MINERAS Y PROYECTOS DE LITIO



LAGUNA SANTA ROSA



SITUACIÓN ACTUAL

Balance hídrico

Resumen de las entradas y salidas y recalcu para la laguna Santa Rosa

(Fuente de datos: AquaTerra, 2013)

Cuenca	Tipo	Área Km ²	Elevación m.s.n.m	Recarga total l/s	Caudal l/s	Entrada lateral l/s	Evaporación l/s	Salida lateral l/s	Eentradas l/s	Salidas l/s	Balance l/s
Salar de Maricunga	Endorreica	2208,8	4265	609,5	1066,3	700,0	1882,9	0,0	2376	1883	493
Laguna del Negro Francisco		906,0	4547	292,0	702,0	0,0	991,5	0,0	994	992	2
Laguna Santa Rosa		0,77	3762	609,5	1066,3	700,0	991,5	0,0	2376	992	1383,8

ESCENARIO EN EL FUTURO

Balance hídrico

Resumen del balance de la oferta y la demanda de la cuenca del salar de Maricunga
(Fuente de datos: AMPHOS 21, 2016)

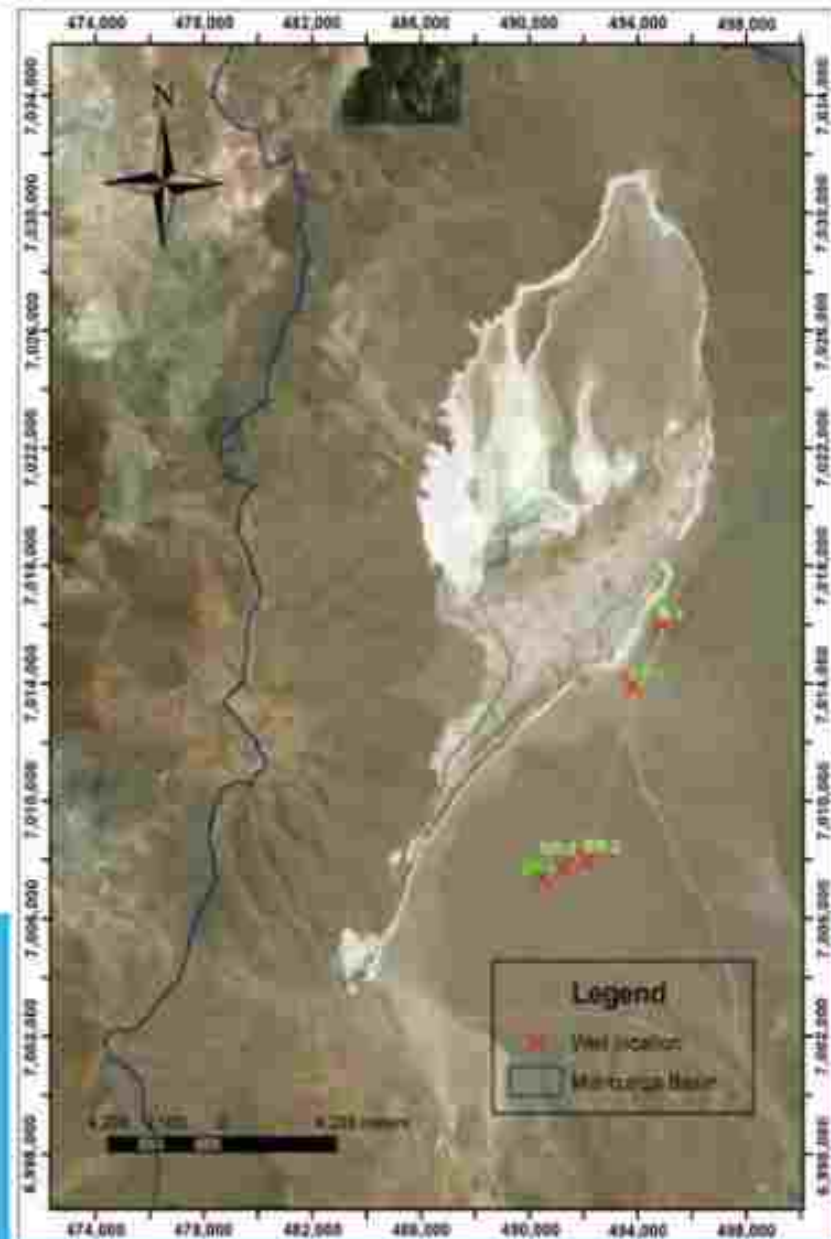
Basin name	Area Km ²	Usage l/s	Water rights (awarded) l/s *	Water rights (in application) l/s	Total Demand l/s	Balance l/s
Salar de Maricunga	2208.8	2376	2703	330	2720	-344

POZOS OPERATIVOS EN EL SECTOR

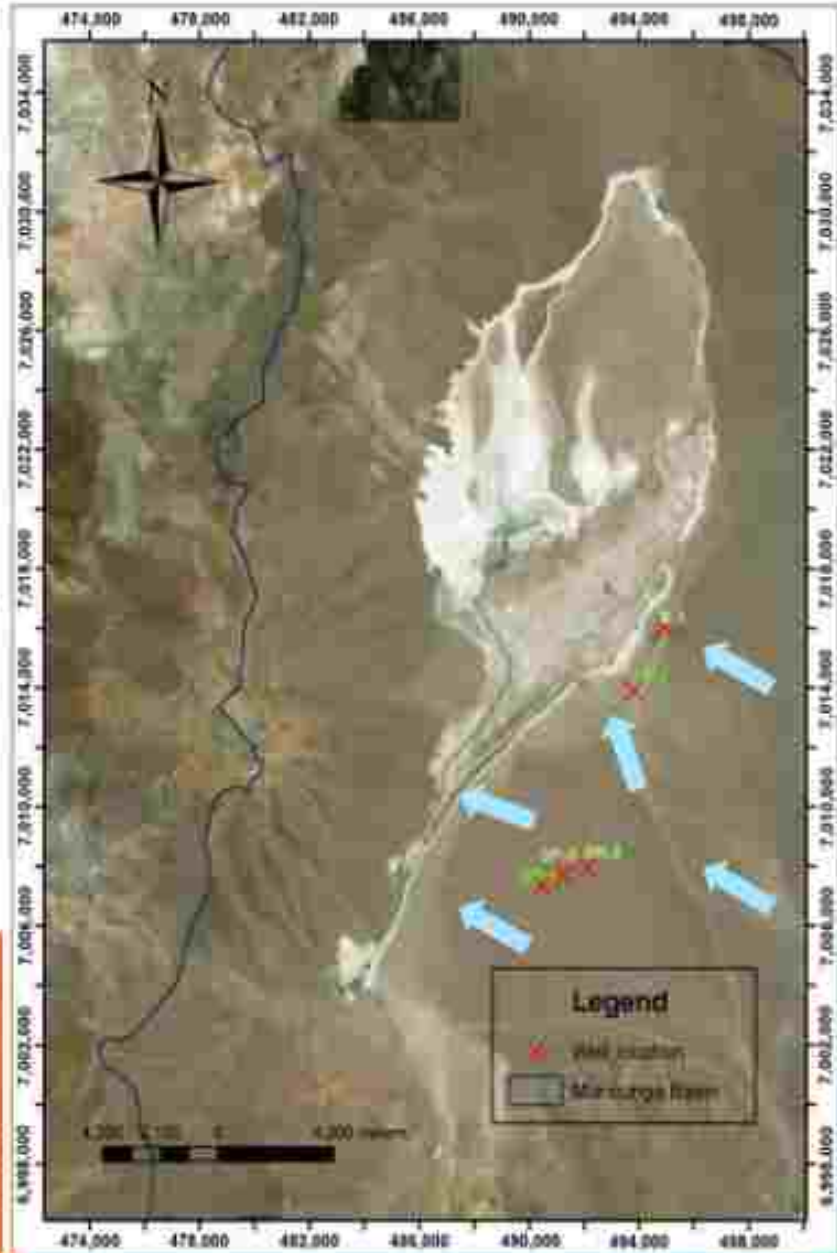
Well	UTM N (m)	UTM E (m)
SP 1	7,014,252	494,000
SP 3	7,008,050	491,451
SP 4	7,007,701	490,652
SR 1	7,016,398	495,151
SR 2	7,008,332	492,332

UTM Datum WGS84, Zona 19S

Fuente de datos: AMPHOS 21 (2016)



FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

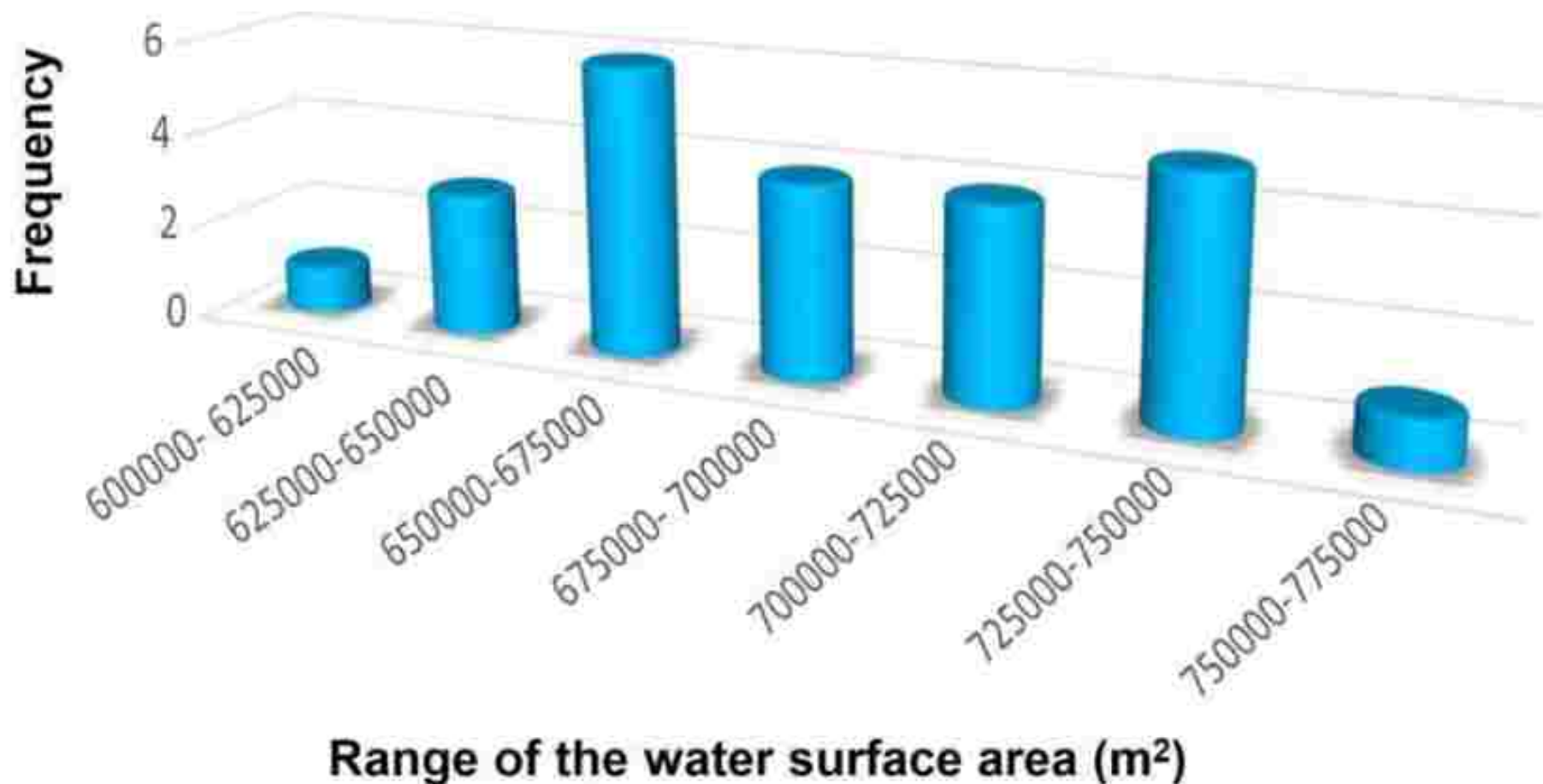


Dirección de las líneas de flujo de agua subterránea (fuente : Iriarte et al., 1999)

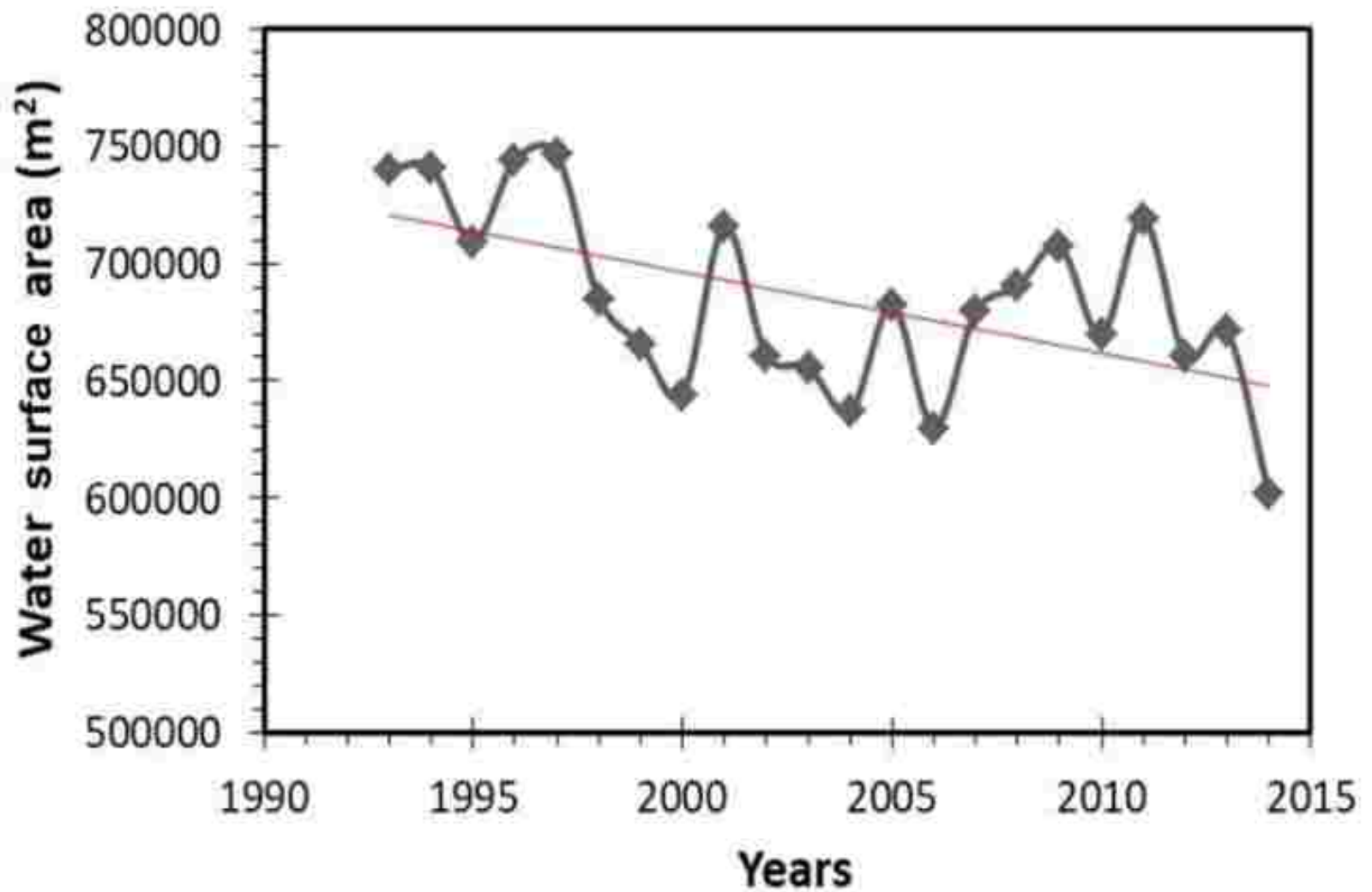
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DEL HUMEDAL



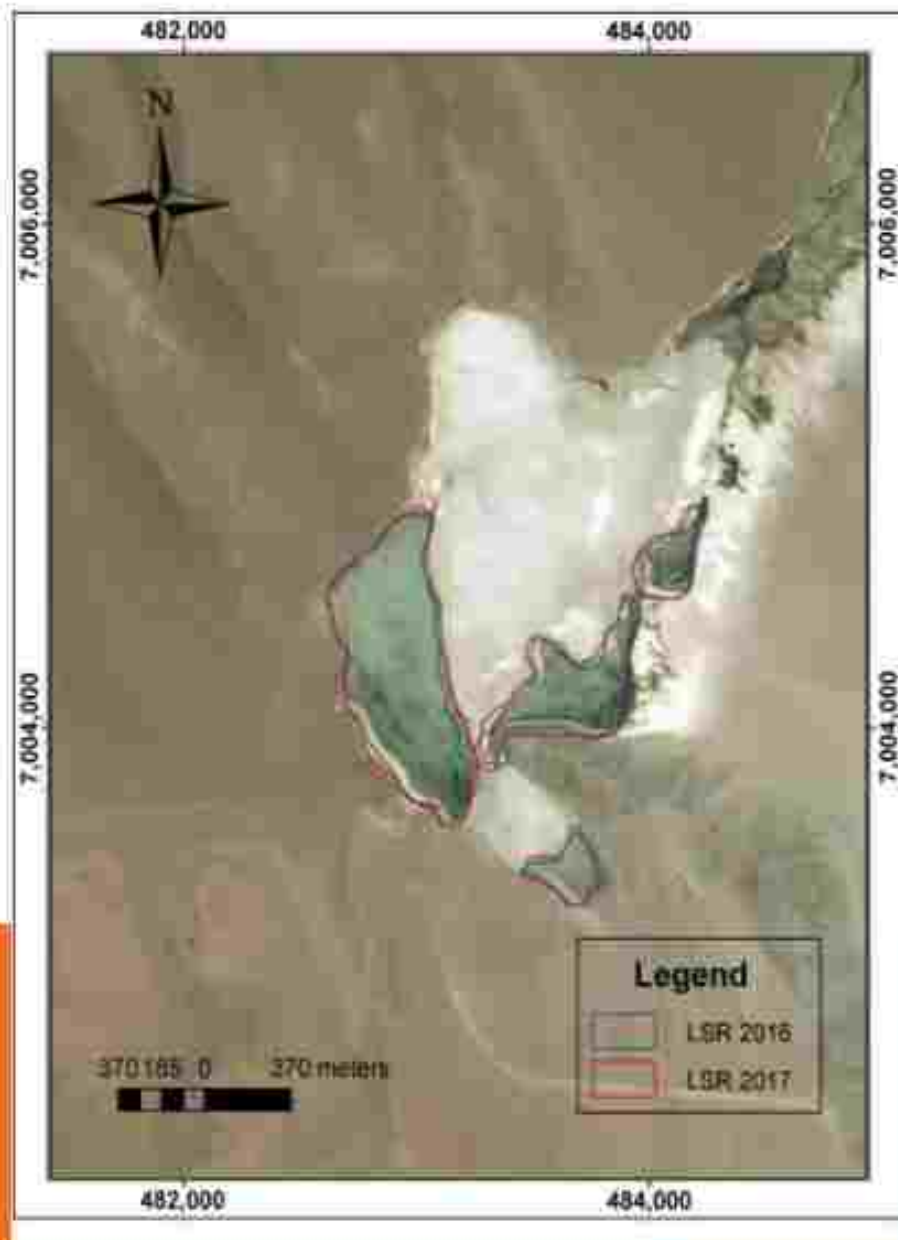
ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES (1993-2014)



ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES (1993-2014)




ANÁLISIS AÑO HIDROGEOLÓGICO 2016-2017



Year	Water surface area (m ²)
Mar 2016	702907,7
Dic 2017	774593,9

A CONSIDERAR ...

- Eventos disruptivos; por ejemplo, las lluvias extremas, la parálisis de las actividades mineras, etc. afectan la tendencia.
 - Número de empresas mineras y derechos de agua.
 - Disminución de áreas y niveles de agua durante el invierno.
 - Aumento de las áreas y los niveles de agua durante el verano.
 - Insumos de origen natural – cambio climático.
 - Resultados de origen natural y antrópico.
 - Proyecto de extracción de litio en el salar de Maricunga.
- 

EN RESUMEN ...

Seasonal factors

Winter rainfall – “Bolivian winter”
Thawing of winter snow in summer

Climatic factors

Extreme weather events – Heavy rainfall



Increase in the water level

Lowering of the water level

Abrupt change
in declining or
increasing trend

Potentially disruptive
events or processes

Normal Behavior



Evaporation



Groundwater
extraction

Natural process

Anthropic intervention

Mining
operations



Alam, M.A., Sepúlveda, R., 2022. Environmental degradation through mining for energy resources: The case of the shrinking Laguna Santa Rosa wetland in the Atacama Region of Chile. Energy Geoscience, DOI: [10.1016/j.engeos.2021.11.006](https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.006).

¡MUCHAS GRACIAS!

Correo: ayaz.alam@usach.cl / ayaz.alam@gmail.com

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/ayazalam/>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Ayaz-Alam>