

**Apoyo a Confección de Respuestas Observaciones de Consejo de
Pueblos Atacameños N°198**

Apoyo al Programa de Cumplimiento ROL-F-041-2016

Preparado para: SQM Salar

Cliente final: SQM Salar

Código de documento: HIDRO.SQMSL636.INF040.REV0

octubre, 2021

hidroestudios



Rev.	Id	Ejecutor	Revisor	Aprueba	Descripción
A	Nombre	I. Casanova	C. Ortiz	C. Ortiz	Revisión interna
	Fecha	05.10.2021	05.10.2021	05.10.2021	
B	Nombre	I. Casanova	C. Ortiz	C. Ortiz	Revisión cliente
	Fecha	08.10.2021	08.10.2021	08.10.2021	
0	Nombre	I. Casanova	C. Ortiz	C. Ortiz	Aprobado cliente
	Fecha	12.10.2021	12.10.2021	12.10.2021	

Índice de Contenido

1. Introducción	3
2. Cargo 1: Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, según se expone en el Considerando N° 27, durante el período entre agosto de 2013 y agosto de 2015.....	4
3. Cargo 1: Informe: "Modelo Conceptual Hidrogeológico y Biótico, Salar de Atacama, apoyo a los cargos de la Superintendencia de Medio ambiente. Elaborado por Hidroestudios, Geobiota y AquaExpert. Apéndice 1.1" ..	8
4. Cargo 1: informe: "funcionamiento de la cuenca del salar de atacama" como apoyo a la respuesta a los cargos de la superintendencia del medio ambiente (sma)por las actuaciones de sqm en el salar. elaborado por emilio custodio, 2017. apéndice 1.2	18
5. Cargo 1: Informe: "Análisis del efecto generado en los niveles acuíferos con motivo de Cargo N°1 y Cargo N°4 del procedimiento sancionatorio ROL-F-041-2016 –Hidroestudios, Apéndice 1.3.....	26
6. Cargo 1: Informe "Investigación Activación Fase II Indicadores de estado L1-5 y L1-G4, Elaborado por Hidroestudios, 2020. Apéndice 1.5."	29
7. Cargo 1: Informe "Dinámica de la biota terrestre y acuática en el Borde Este del Salar de Atacama Región de Antofagasta. Elaborado por Geobiota. Apéndice 1.6"	39
8. Bibliografía	42

Listado Tablas

Tabla 1-1. Superficie lacustre laguna Barros Negros (cuerpo principal).	5
Tabla 3-1. Estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación potencial.	13
Tabla 3-2. Tasa de evaporación en bandeja, promedio mensual y promedio anual sin corregir y corregido por factor de bandeja.	13
Tabla 3-3. Características de los modelos utilizados en la evaluación	16
Tabla 3-4. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas.	16
Tabla 4-1. Características de los modelos utilizados en la evaluación	18
Tabla 4-2. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas.	19
Tabla 4-3. Características de los modelos utilizados en la evaluación	21
Tabla 4-4. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas.	22
Tabla 4-5. Tabla con resultados de modelación perfil 2D, sector Peine	25
Tabla 5-1. Características de los modelos utilizados en la evaluación	26
Tabla 5-2. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas.	26
Tabla 6-1. Superficie lacustre laguna Barros Negros (cuerpo principal)	38

Listado de Figuras

Figura 1-1: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar Soncor.	5
Figura 1-2. Evolución de la superficie histórica de la laguna Barros Negros (cuerpo principal).	6
Figura 3-1: Sistema lagunar Soncor.	10
Figura 3-2: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar Soncor.	11
Figura 3-3. Localización de las estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación potencial.	14
Figura 3-4. Relación entre el coeficiente de corrección por densidad y la densidad del agua y salmuera de la Cuenca del Salar de Atacama.	15
Figura 3-5. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación	17
Figura 4-1. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación	20
Figura 4-2. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación	23
Figura 4-3. Zonas hidrogeológicas en el salar de Atacama	24
Figura 4-4. Ubicación de perfiles 2D modelados	25
Figura 5-1. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación	28
Figura 6-1. Relación laguna acuífero	30
Figura 6-2: Niveles en indicador de estado L1-5 con los umbrales de fase I y fase II, y escenarios 1 y 2.	31
Figura 6-3. Evolución de los caudales medidos en el punto de aforo Barros Negros	32
Figura 6-4. Ubicación de los perfiles P1 y P2 para el sistema Soncor	34
Figura 6-5: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar Soncor.	37
Figura 6-6. Evolución de la superficie histórica de la laguna Barros Negros (cuerpo principal).	38
Figura 7-1. Curva de succión obtenida en el Borde Este del Salar de Atacama	40

1. INTRODUCCIÓN

Este documento compila las respuestas dadas a las observaciones por parte de la Asociación Indígena Consejo de Pueblos Atacameños al Programa de Cumplimiento Ambiental del Titular SQM Salar S.A.

En particular acá se presentan las observaciones relacionadas a la componente recursos hídricos, desarrolladas por Hidroestudios y otras consultoras hidrogeológicas.

2. CARGO 1: EXTRACCIÓN DE SALMUERA POR SOBRE LO AUTORIZADO, SEGÚN SE EXPONE EN EL CONSIDERANDO N° 27, DURANTE EL PERÍODO ENTRE AGOSTO DE 2013 Y AGOSTO DE 2015

- “El Titular expresa en sus informes que el desborde en la Laguna de Barros Negros ha generado disminución en la recarga superficial en el sector de Cola de Pez, responsabilizando este evento a los descensos en el pozo L1-5. Entonces, bajo este razonamiento, si desde 2012 se ha venido desarrollando este desborde, siendo, por lo demás, notorio en el terreno y en los monitoreos que la misma empresa desarrollaba, corresponderá a SQM Salar S.A informar o notificar inmediatamente a la autoridad competente, ya que esto generó una contingencia ambiental, así es como se exige en el punto 7 y la modificación a efectuar en los monitoreos, como lo expresa el punto 6 de la RCA 226/2006, dando cuenta que el titular omitió exigencias contenidas en su propia RCA.”

R: Tal como se indica en la observación, y como se ha presentado en diversos informes, incluyendo el “Informe de Investigación L1-5 y L1-G4” (Hidroestudios, 2021), en la laguna Barros Negros hasta el año 2012 se reconocía únicamente el desborde por el sector denominado Cola de Pez, en el margen oeste de la misma laguna. Posterior a 2012, se activó una zona de desborde en el margen sur, denominado Desborde Sur, el cual ha ganado importancia desde entonces en términos de caudales y extensión, contrario a lo que se observa en el sector Cola de Pez. Este cambio en los desbordes corresponde a un proceso natural relacionado con grandes eventos de precipitación y escorrentía que provocan cambios en la dinámica de sedimentación (Le Roux, J.P., 2017 y 2018) denominado proceso de sustitución de lóbulos, y que, en este caso, permitió que exista un cambio de un distributario deltaico (Cola de Pez) a otro (Desborde Sur) (Figura 2-1). Por lo anteriormente expuesto, no es correcto afirmar que este fenómeno natural del cambio de zonas de desbordes sea responsabilidad del Pozo L1-5, como se señala en la observación.

Como se ha mencionado, esta sustitución de lóbulos provocó una tendencia a la disminución en el caudal de desborde en el sector de Cola de Pez, lo que conllevó a una menor tasa de infiltración disminuyendo este flujo desde la superficie del terreno hacia el acuífero de salmuera donde se ubican los pozos L1-5 y L1-G4. Como resultado de lo anterior, los pozos ubicados aguas abajo del sector Cola de Pez muestran indicios de recibir menor infiltración desde la superficie, lo que se refleja en la falta de estacionalidad en su señal de niveles piezométricos a partir de 2012 aproximadamente.

Adicionalmente, es importante mencionar que este cambio en la dinámica de los desbordes, no va de la mano con un cambio en la superficie de la laguna Barros Negros, sino que por el contrario, a partir del análisis de imágenes satelitales (Hidroestudios, 2021), el cuerpo principal de la laguna Barros Negros se ha mantenido estable entre los años 2007 y 2020 con una superficie promedio de 1.075.896 m², por lo cual el descenso observado en los indicadores del PC no se condice con una disminución en el cuerpo lacustre de Barros Negros (Tabla 2-1 y Figura 2-2).

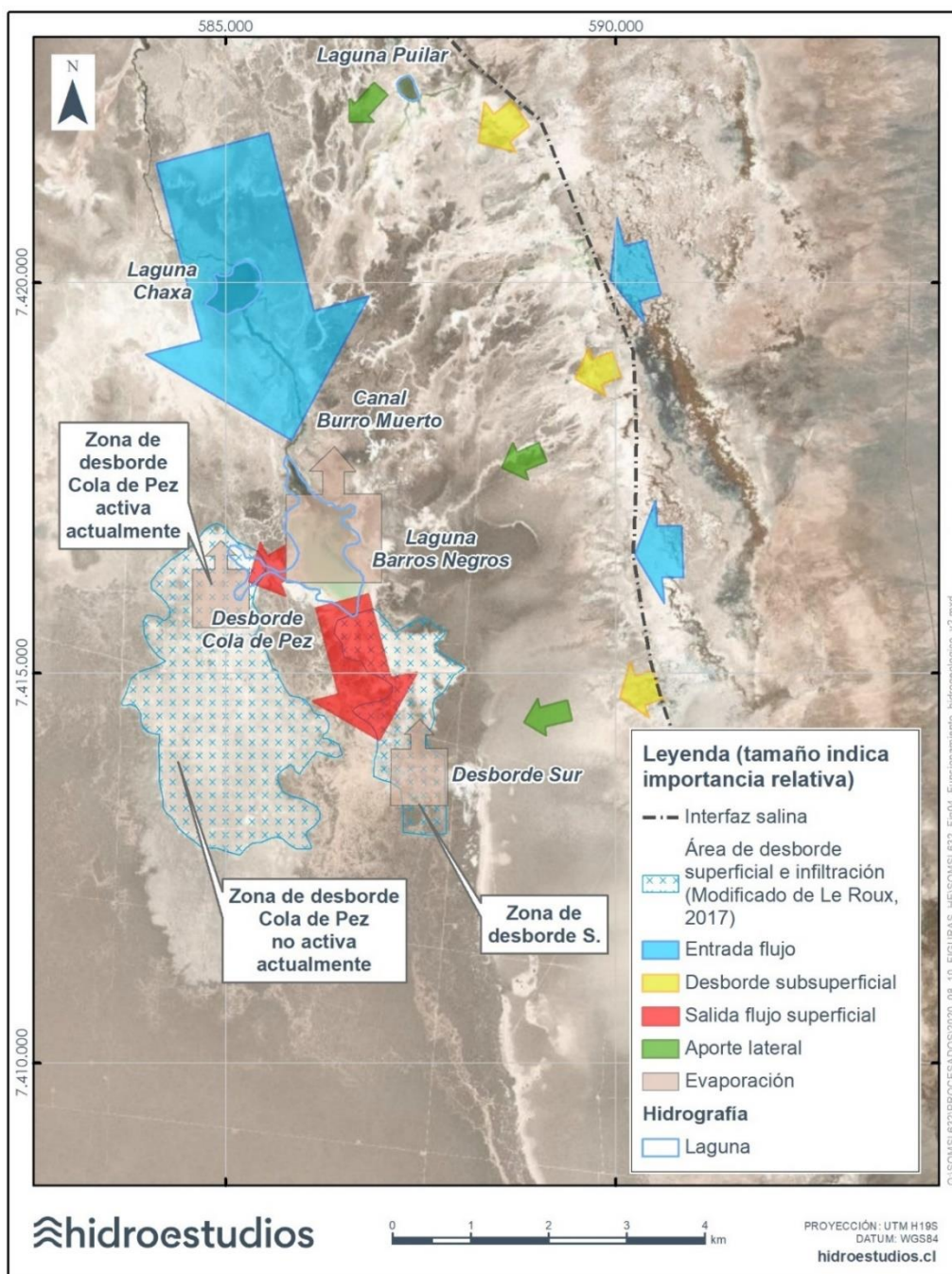
Para un mayor detalle de la evolución de los desbordes y geomorfología lagunar revisar el “Informe de Investigación L1-5 y L1-G4” (Hidroestudios, 2021).

En cuanto al cumplimiento del punto 7 de la RCA 226/2006, es importante recalcar, que el cambio de la dinámica de los desbordes no corresponde a una contingencia ambiental, sino a un funcionamiento natural del sistema lacustres, que se observa en el largo plazo en este tipo de sistemas naturales (Hidroestudios, 2021). Lo que se ve ratificado en la mantención de la superficie lacustre de la laguna Barros Negros.

Finalmente, en cuanto al punto 6 de la RCA 226/2006, se indica que no se ha efectuado ninguna modificación a la actividad aprobada por la Comisión Regional del Medio Ambiente. Si bien es cierto, que se ha mencionado

que en el caso del pozo L1-5, debido el origen del agua que influye en su nivel, no es representativo de la extracción de salmuera generada por SQM Salar, el monitoreo de este pozo no se ha detenido, y sólo será modificado posterior a la aprobación de un nuevo estudio de impacto ambiental, que se encuentra en desarrollo y cuyo objetivo es subsanar los problemas de representatividad de los indicadores de estado.

Figura 2-1: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

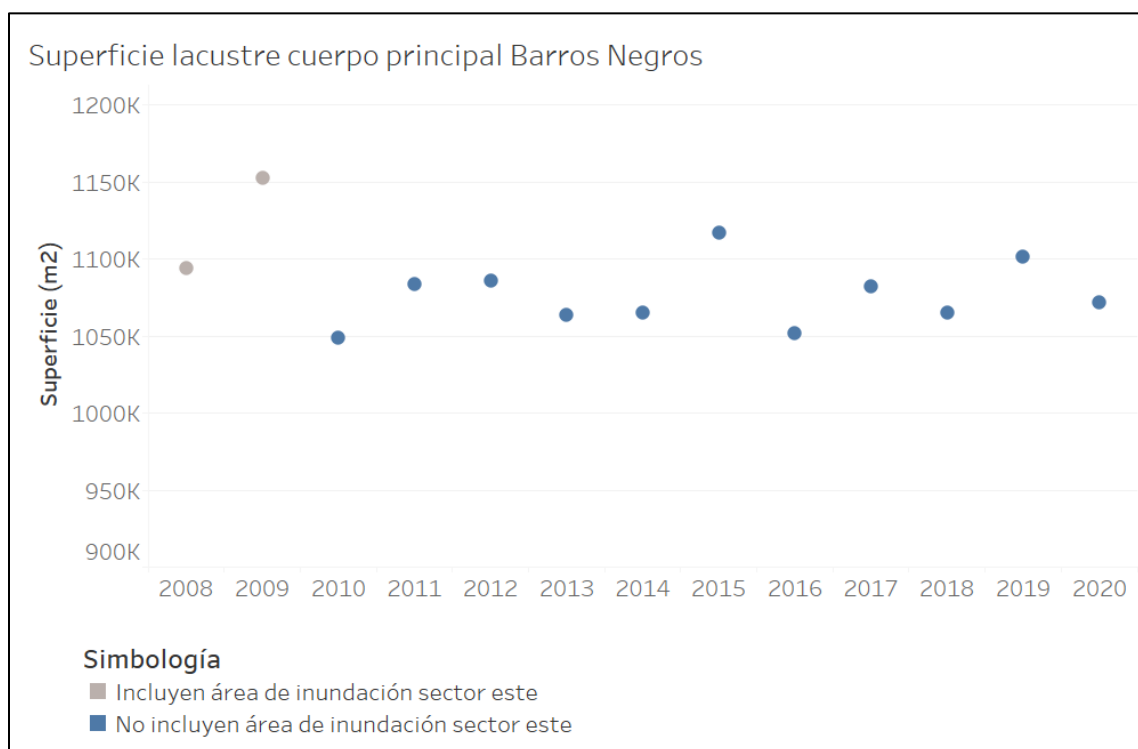
Tabla 2-1. Superficie lacustre laguna Barros Negros (cuerpo principal).

Año	Superficie (m2)
2008	1.093.625*
2009	1.152.803*
2010	1.048.924
2011	1.083.311
2012	1.085.391
2013	1.063.325
2014	1.064.767
2015	1.116.891
2016	1.051.449
2017	1.082.109
2018	1.065.345
2019	1.101.511
2020	1.071.838

(*) en estos años se incorporó dentro de la superficie de la laguna lo que ahora se define como área de inundación sector este, fuera del cuerpo principal de la laguna (23), por lo que no es directamente comparable con los años siguientes.

Fuente: Informe PSAH N°25 y PSAH N°27

Figura 2-2. Evolución de la superficie histórica de la laguna Barros Negros (cuerpo principal)



Fuente: Hidroestudios, 2021

- **“El titular debe disponer de acciones que permitan prevenir los cambios que puedan ocurrir con el tiempo a los ecosistemas, de esta forma se satisface planamente el principio precautorio, para que el titular no solo espere la ocurrencia de eventos ambientales o cambios en las morfologías de los sistemas lagunares, atendiendo al cargo por las incidencias de las variables climáticas y cómo esto influye los ecosistemas. Por esto, es necesario que el fiscalizador contemple dichas variables comprometidas y se reevalúen cada 3 años.”**

R:

El proyecto contempla un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) sumamente completo que permite conocer el estado de los sistemas ambientales y de todas las variables que lo sustentan. Desde el punto de vista hídrico el PSA considera lo siguiente:

225 puntos de monitoreo, que se desglosan de la siguiente manera:

- 196 pozos para el seguimiento de las aguas subterráneas;
- 5 pozos de bombeo de agua industrial;
- 18 reglillas para el seguimiento de agua superficial;
- 4 estaciones de aforo de agua superficiales;
- 2 estaciones meteorológicas.

Adicionalmente el PSA considera la medición de la superficie lagunar con frecuencia anual a través de imágenes satelitales. Esta variable demuestra que la laguna Barros Negros se ha comportado dentro de la oscilación natural, sin tendencias.

Como ha sido explicado anteriormente el cambio en la dinámica de los desbordes es un hecho absolutamente natural, por lo tanto, el proyecto no puede tener ningún tipo de medidas asociadas a cambios naturales de los sistemas. Respecto a potenciales efectos del proyecto el proyecto cuenta con el Plan de Contingencias (PC) que le permite tomar acciones cuando existe un riesgo, producto de una acción del proyecto, sobre los sistemas ambientales.

3. CARGO 1: INFORME: “MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO Y BIÓTICO, SALAR DE ATACAMA, APOYO A LOS CARGOS DE LA SUPERINTENDENCIA DE MEDIO AMBIENTE. ELABORADO POR HIDROESTUDIOS, GEOBIOTA Y AQUAEXPERT. APÉNDICE 1.1”

- “En el informe, el Titular SQM insiste en considerar en uno solo sistema a diferentes lagunas, como es el caso del Sistema Soncor para los elementos bióticos, entendiendo que estos sistemas son considerados complejos, por lo que se requiere de un análisis acabado por cada cuerpo de agua. Algunos resultados expresan que los procesos basales que subyacen las funciones del ecosistema del salar son probablemente complejas, muy variables en tiempo y espacio.”

R: En relación con la observación N°10, se destaca que, desde el punto de vista hídrico, las lagunas Chaxa y Barros Negros efectivamente forman parte de un mismo sistema, por lo que deben ser analizadas de esa forma.

Con el fin de fundamentar la idea antes expuesta, a continuación, se presenta el funcionamiento hidrogeológico del Sistema Soncor:

El sistema Soncor está localizado en el margen noreste del núcleo del Salar de Atacama. Este sistema lagunar está compuesto por las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros, estando estas dos últimas conectadas mediante el canal Burro Muerto. Además, forman parte de este sistema, algunos cuerpos de agua de carácter esporádico originados por desbordes de la laguna Barros Negros, como son el Desborde Sur y el Desborde Cola de Pez (Figura 3-1).

Este sistema se origina por dos recargas principales (Figura 3-2):

- Afloramientos de agua subterránea del margen norte del Salar, ubicados unos 20 km al norte del Puente San Luis en el Llano El Tambillo, que dan origen a canales que aguas abajo confluyen formando el canal Burro Muerto, que constituye la alimentación principal del sistema Soncor. Este curso de agua superficial va incrementando su caudal por aportes subsuperficiales desde el borde Este, hasta la laguna Chaxa, desde donde descarga hacia el Sur hasta la laguna Barros Negros. Por su parte, la laguna Barros Negros constituye el cuerpo lagunar terminal del sistema.
- Flujos de aguas subterráneas que provienen del acuífero aluvial del margen este que afloran en superficie por el efecto de la cuña salina y el cambio en la topografía. Esta recarga da origen a un pequeño canal que alimenta a la laguna Puilar.

Otro tipo de recarga está asociada a las precipitaciones del sector, las que corresponden principalmente a grandes eventos esporádicos asociados al Invierno Altiplánico y cuya magnitud es menor, en comparación a las recargas principales. Por otro lado, la descarga desde el sistema Soncor se produce por evaporación, desbordes e infiltración.

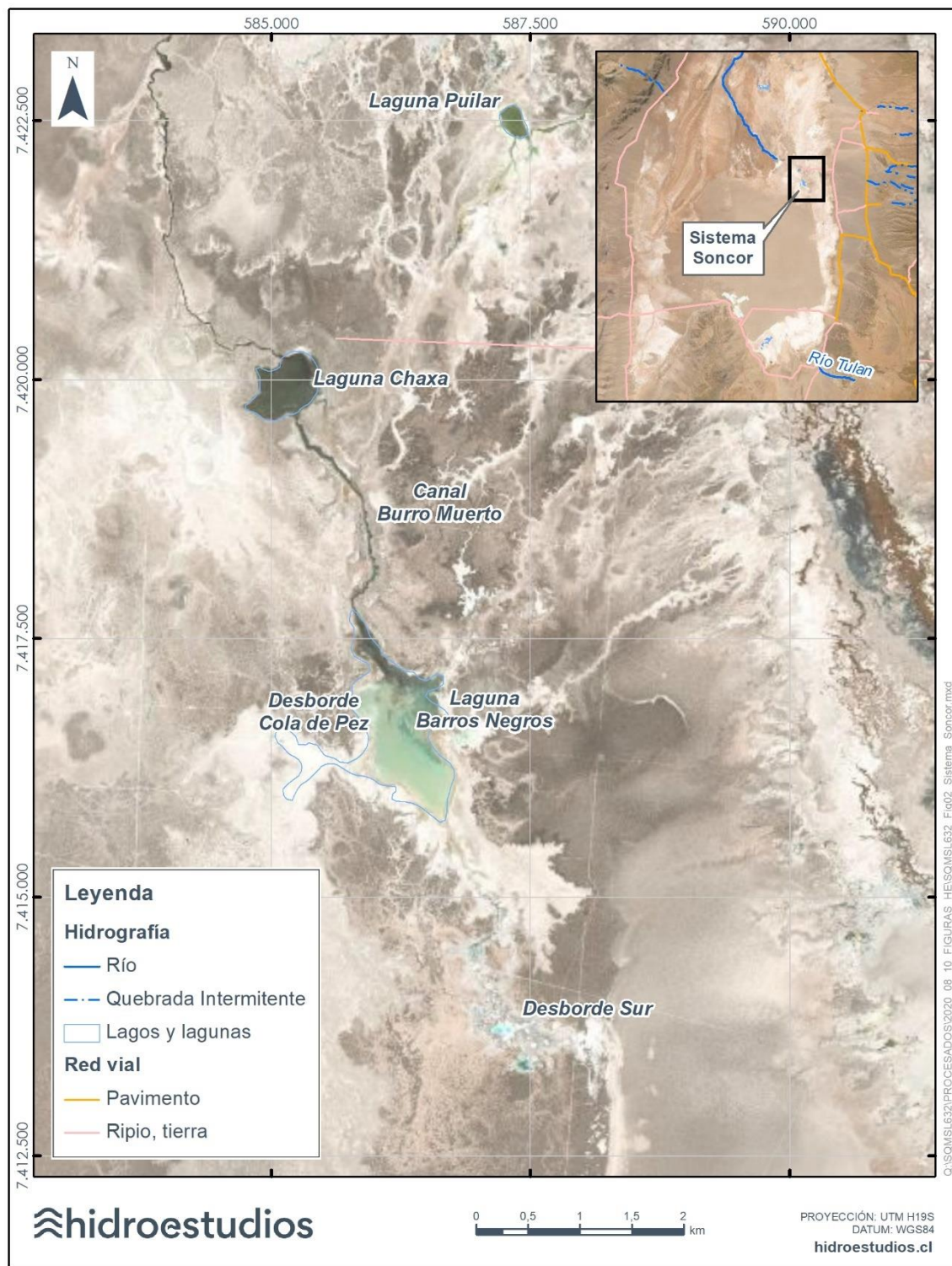
La parte terminal de la laguna Barros Negros está influenciada durante la temporada invernal austral por la disminución de la evaporación, lo que favorece que los niveles asciendan y, por ende, aumenten los caudales superficiales aportantes provenientes de las vertientes que lo alimentan (Ortiz, C. et al. 2014). Se debe tener en cuenta que los flujos superficiales de desborde en los sectores de los desbordes Cola de Pez y Sur, finalmente sufren procesos de evaporación e infiltración.

Por su parte, la evaporación es máxima en verano y mínima en invierno, constituyendo la principal salida de flujo en la época estival. En el caso de la infiltración, esta se produce desde el lecho de las lagunas Chaxa y

Barros Negros hacia el acuífero de salmuera. Este caudal de infiltración está asociado al gradiente hidráulico entre ambos sistemas, y su ocurrencia está condicionada a la conductancia del lecho de la laguna, al espesor y a la conductividad hidráulica vertical y horizontal de la unidad hidrogeológica inmediatamente bajo la laguna y a que el nivel del agua superficial de las lagunas sea superior al nivel freático de la salmuera, además. Esta salida es considerablemente de menor magnitud en comparación al resto de salidas (SQM Salar, 2020).

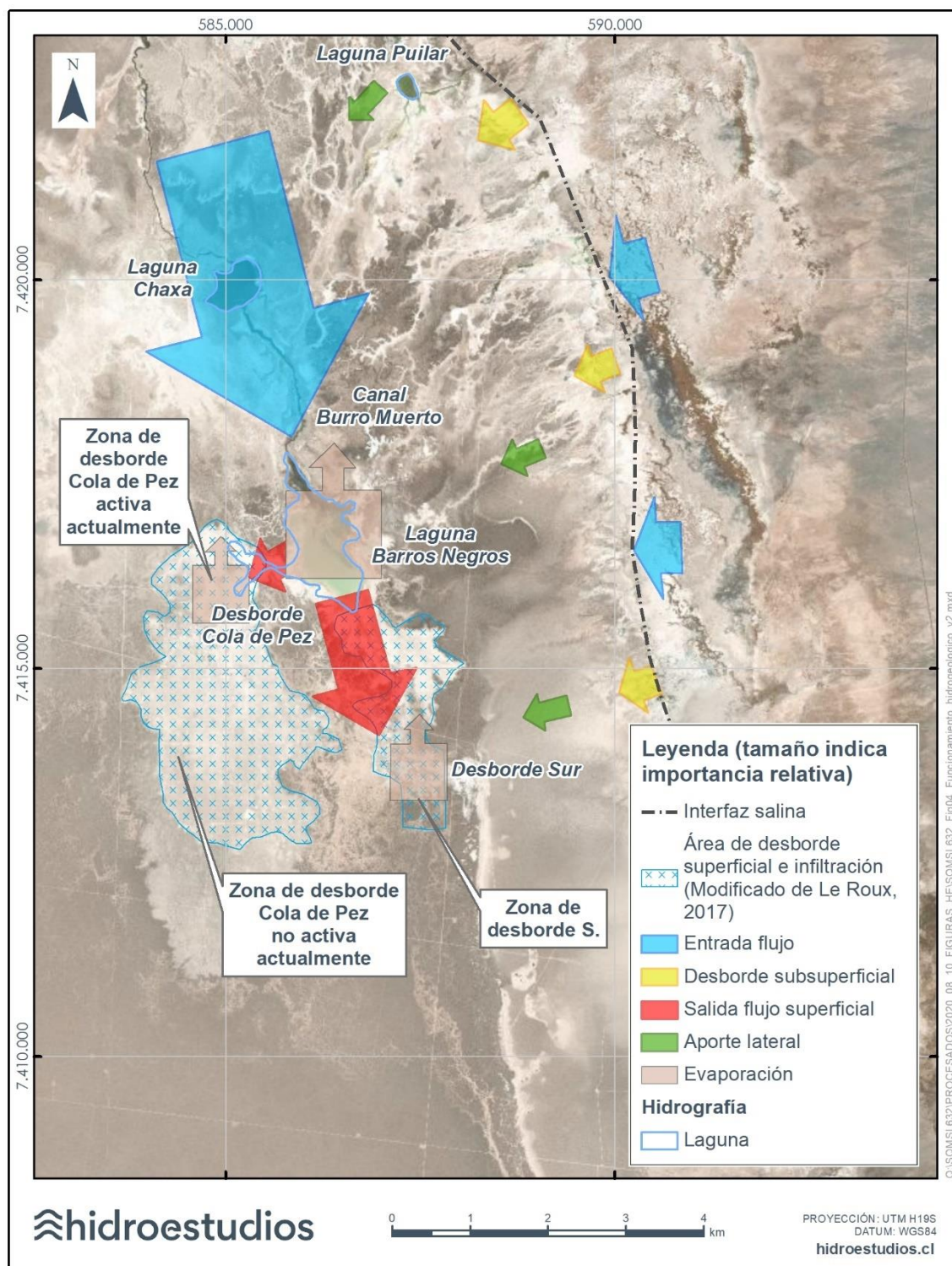
El contexto hidrogeológico del Sistema Soncor antes presentado, además de la dinámica de los desbordes y geomorfología de los sistemas lagunares, se presenta en el “Informe de investigación activación Fase II indicadores de estado L1-5 y L1-G4” (Hidroestudios, 2021).

Figura 3-1: Sistema lagunar Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 3-2: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

- **“Esto da cuenta que los salares son ecosistemas mucho más complejos de lo que se pensaba anteriormente y que, además, se requiere de estudios, más detalle para comprender su biología (Dorador et al, 2018); querer individualizar los diferentes cuerpos de agua para componente biótico de un sector, en un solo sistema hidrológico, es obviar una mirada profunda que logre en definitiva reducir las incertezas científicas de la salud de estos sistemas, para una comprensión de realidad que requiere, sin duda, de mayores estudios.”**

R: Esta observación se incluye en la respuesta inmediatamente anterior.

- **“Es válido mencionar esto de acuerdo con lo que viene, sin embargo, no se informa el registro histórico para las evaporaciones en los diferentes cuerpos de agua, solo hay registros de estaciones la que indican una tendencia al alza en las temperaturas para diferentes épocas del año, por tanto, es fundamental para plantear un modelo que considere todos los escenarios naturales y antrópicos.”**

R: En relación con la observación N°12, esta hace referencia a un párrafo citado en el acápite 2.1 del informe, el cual tiene como finalidad presentar una síntesis del modelo hidrogeológico conceptual integrado, donde se busca dar una explicación simplificada del comportamiento estacional general de la evaporación y su relación con las otras variables del balance hídrico de los acuíferos y sistemas lagunares, es decir, afloramientos de agua subterránea, y nivel del acuífero.

Adicionalmente, es importante señalar, que el objetivo del documento revisado por la comunidad no es hacer proyecciones hacia el futuro, si no explicar el funcionamiento de los distintos sistemas y su interrelación, por este motivo no se han considerado escenarios con modificación de las tasas de evaporación u otras atinentes al cambio climático.

Con el fin de entregar más antecedentes respecto de la duda planteada al acápite 2.1, es que a continuación, se presenta el cálculo de la evaporación desarrollado por SRK (2020).

Para estimar la evaporación potencial en la cuenca del Salar de Atacama, se considera la evaporación de bandeja medida en las estaciones meteorológicas y un factor de corrección, según se describe a continuación:

$$E_0 = E_{pan} * K_{pan}$$

Donde E_0 es la evaporación potencial (mm/d); E_{pan} es la evaporación medida en la bandeja de evaporación estándar (mm/d) y K_{pan} es el coeficiente de bandeja (FAO, 2006). Para este estudio se adoptó un K_{pan} igual a 0,75, al igual que los estudios de la DGA y Rockwood (DGA, 2015).

Los datos de evaporación de bandeja considerados en el presente trabajo corresponden a las mediciones diarias observadas en las estaciones meteorológicas tanto de SQM como de la DGA en el Salar de Atacama, las que se identifican en la Tabla 3-1. y Figura 3-3. Del conjunto señalado, las estaciones Chaxa y KCL presentan el registro más extenso de datos de evaporación con mediciones iniciadas en 1999 hasta la fecha, mientras que los registros del SOP presentan registros desde el 2011.

Tabla 3-1. Estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación potencial.

ESTACION	COORDENADAS WGS84			FUENTE	PERIODO DE REGISTRO
	ESTE	NORTE	ALTURA		
	(m)	(m)	(m s.n.m.)		
Monturaqui	557.103	7.307.450	3.430	DGA	1974-1979
Peine	595.137	7.380.682	2.390	DGA	1974-2019
San Pedro de Atacama	581.987	7.466.178	2.445	DGA	1959-2017
Socaire	613.092	7.390.963	3.248	DGA	1974-1998
Toconao Experimental	602.388	7.434.809	2.500	DGA	1975-2009
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307	SQM	1999-2020
KCL	561.376	7.396.240	2.300	SQM	1999-2020
SOP	562.717	7.403.324	2.300	SQM	2011-2020

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-2 se muestra la serie histórica de los promedios mensuales de evaporación de bandeja de las estaciones analizadas, donde se observa una clara oscilación estacional, con tasas máximas en los meses de diciembre y enero (meses cálidos), y las tasas mínimas en los meses de junio y julio. Considerando los registros de las estaciones disponibles, el valor máximo promedio de evaporación de bandeja de las estaciones es de 11,66 mm/d, el mínimo promedio de 4,66 mm/d y un promedio anual de 8,34 mm/d.

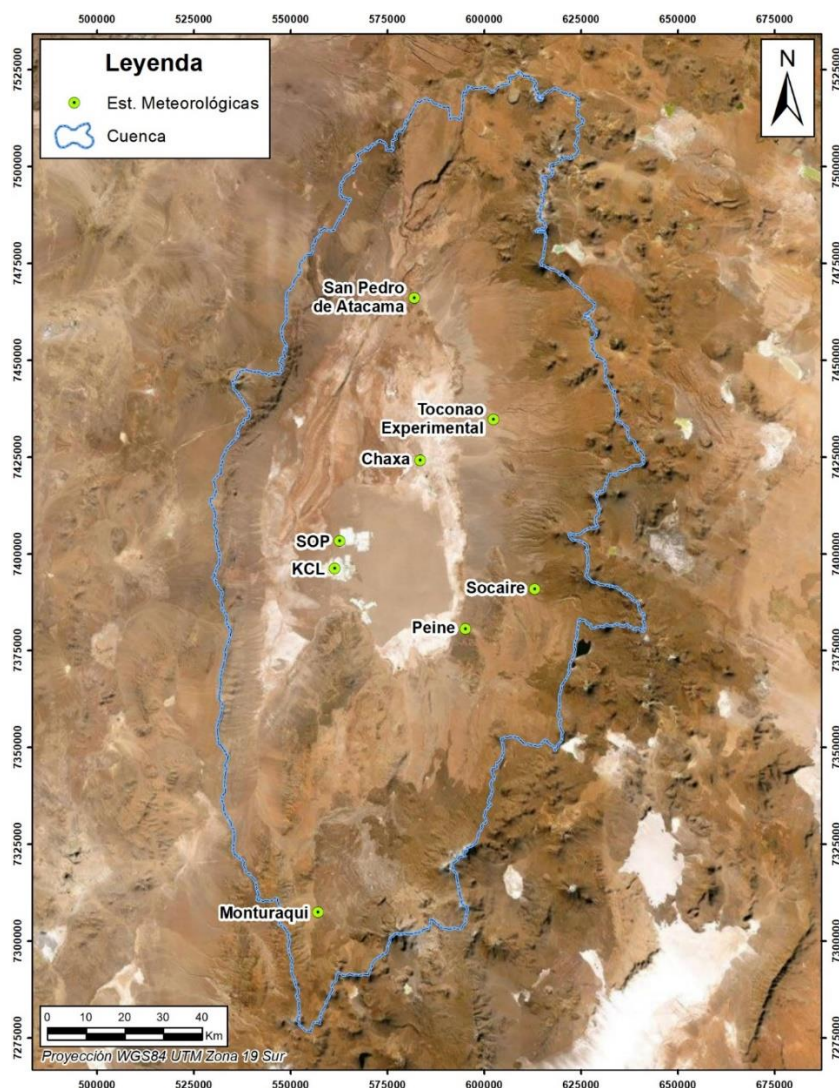
Tabla 3-2. Tasa de evaporación en bandeja, promedio mensual y promedio anual sin corregir y corregido por factor de bandeja.

Estación/Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
	Mm/d											
Toconao Exp.	10,9	12,2	13,2	12,2	11,9	10,5	9,1	7,2	5,7	5,7	7,4	9,1
Socaire	9,2	10,6	11,3	10,6	10,2	9,5	8,6	7,3	6,1	5,7	6,0	7,6
Peine	10,3	11,5	12,1	11,8	11,3	10,5	8,8	6,7	5,5	5,6	6,6	8,4
San Pedro de Atacama	9,8	10,9	11,4	10,5	9,6	8,8	6,9	5,2	4,4	4,6	6,0	8,1
Monturaqui	9,0	10,4	10,8	9,1	9,2	9,2	7,1	5,3	4,7	4,5	5,6	7,5
SOP	10,1	11,5	11,7	11,7	10,5	9,4	7,0	4,7	3,8	4,1	5,4	8,1
KCL	9,5	11,5	12,4	12,7	10,7	10,2	7,0	5,0	3,6	3,7	5,3	7,6
Chaxa	9,0	10,4	10,4	10,6	9,1	7,7	6,7	4,6	3,6	3,8	5,2	7,0
Promedio Epan mensual	9,7	11,1	11,7	11,1	10,3	9,5	7,7	5,7	4,7	4,7	5,9	7,9
Promedio Epan anual	8,34											
Promedio Epan anual * Kpan	6,25											
Eo corregida agua	5,821											
Eo corregida salmuera	3,527											

Fuente: Elaboración propia, con base en SRK Consulting (2020).

Las estaciones KCL y SOP representan la situación en la zona central del núcleo del Salar de Atacama, mientras que la estación Chaxa representa la situación en la zona marginal norte del Salar; donde los valores de evaporación máximos son menores que en las anteriores. Por otro lado, las estaciones Peine, Socaire y Toconao Experimental permiten caracterizar la zona ubicada al este del núcleo y San Pedro de Atacama y Monturaqui representan a la parte norte y sur, respectivamente.

Figura 3-3. Localización de las estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación potencial.



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para el cálculo de la evaporación se debe considerar la salinidad y características de la cuenca y corregir la evaporación potencial considerando el tipo de agua evaporante. Para ello, se utiliza la siguiente relación:

$$E = E_0 * K_s$$

Donde:

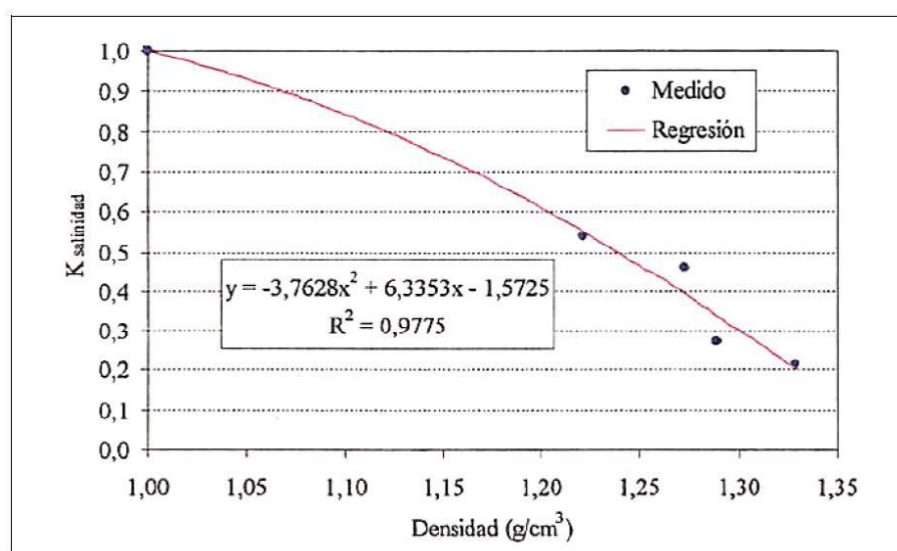
E : Evaporación Corregida (mm/d)

E_0 : Evaporación Potencial (mm/d)

K_s : Coeficiente de corrección por densidad que refleja el efecto en la evaporación de la concentración de sales en el agua.

De acuerdo con los antecedentes analizados, se establece un valor de K_s de 0,95 para el Salar de Atacama considerando una densidad promedio del agua de aproximadamente $1,05 \text{ g/cm}^3$ (Figura 3-4) (Ide, F., 1978). En el Salar de Atacama, aguas con esta densidad son observadas fundamentalmente en la zona marginal y aluvial, distintas de la salmuera localizada en el núcleo, cuya densidad es mayor a $1,20 \text{ g/cm}^3$, lo que entregaría un menor a $K_s = 0,61$.

Figura 3-4. Relación entre el coeficiente de corrección por densidad y la densidad del agua y salmuera de la Cuenca del Salar de Atacama.



Fuente: Ide, 1978

El cálculo de la Evaporación Corregida, por tanto, se aplica tanto para las aguas pertenecientes a las dos zonas indicadas inicialmente (aluvial y marginal) como para la salmuera. Considerando una evaporación de bandeja promedio de $8,34 \text{ mm/d}$, un coeficiente de bandeja de $0,75$ y un coeficiente por corrección de salinidad de $0,95$ (Ide, F., 1978); para agua con densidad igual a $1,05 \text{ g/cm}^3$, el valor de la evaporación potencial promedio para la zona marginal y aluvial del Salar de Atacama, a cota del Salar ($\sim 2300 \text{ m s.n.m.}$), es de $5,82 \text{ mm/d}$.

Por su parte, para el caso de la salmuera se considera una evaporación de bandeja promedio de $8,34 \text{ mm/d}$, un coeficiente de bandeja de $0,75$ y un coeficiente por corrección de salinidad de $0,56$ (Ide, F., 1978); para salmuera con densidad igual a $1,217 \text{ g/cm}^3$, el valor de la evaporación potencial promedio para la zona del núcleo del Salar de Atacama, a cota del Salar ($\sim 2300 \text{ m s.n.m.}$), es de $3,53 \text{ mm/d}$.

- “El modelo empleado tiene entre sus limitaciones la estimación recarga directa producto de la precipitación, y la cuantificación de la recarga lateral, con simplificaciones de la realidad que de todas maneras se utilizan para obtener resultados y conclusiones, ya que los factores de estrés sobre el sistema quedan notablemente por debajo los valores de las magnitudes naturales.”

R: Como una forma de subsanar comentarios asociados a los modelos numéricos hidrogeológicos, se realizó una actualización de la evaluación del Cargo N°1 con 5 distintas herramientas disponibles (Tabla 3-3). Las herramientas de modelación fueron desarrolladas por distintas consultoras y consideran distintas técnicas de modelación, como modelos numéricos, analíticos y estocásticos, esta información se presenta en detalle en (hidroestudios, 2021).

Tabla 3-3. Características de los modelos utilizados en la evaluación

Nombre	Tipo	Por	Para	Fuente
Modelo numérico núcleo salar de Atacama VI actualización	Numérico hidrogeológico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. VI Actualización modelación de flujo Salar de Atacama
Modelo numérico CORFO	Numérico hidrogeológico	Amphos 21	Corfo	Amphos 21, 2021. Actualización modelo hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama.
Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama	Estocástico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama
Modelo numérico núcleo salar de Atacama IV actualización	Numérico hidrogeológico	CSIC	SQM Salar	IDEA-CSIC, 2017. IV actualización del modelo regional de flujo del salar de Atacama
Ecuación de Theis para acuíferos libres	Analítico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Informe evaluación de efectos Cargo N°1 y Cargo N°4

La Tabla 3-4 presenta un resumen de los resultados obtenidos con las cinco herramientas en 5 pozos característicos del Salar de Atacama, cuya ubicación es presentada en la Figura 3-5. Se observa que en promedio los efectos del cargo consideran todas las herramientas de modelación varían en torno a 1 cm.

Se destaca dentro de las herramientas utilizadas está el modelo numérico desarrollado por la Corfo, que es la herramienta que entrega el menor efecto de todos los modelos utilizados.

Tabla 3-4. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas

Pozo	IV Actualización	Analítico	VI Actualización		Corfo		Estocástico		Promedio
			Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	
1028p (cm)	0,2	0,6	1,51	Entre jul-2017 y nov-2017	0	N/A	5,02	nov-16	1,47
L10-14 (cm)	0,2	0,6	1,54	sept-17	0	N/A	6,10	dic-16	1,69
L2-17 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y feb-2019	0	N/A	1,99	mar-16	0,86
L4-16 (cm)	0,2	0,6	1,46	Entre oct-2018 y ene-2019	0	N/A	4,97	nov-16	1,45
SOPM-14 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y mar-2019	0	N/A	4,9	dic-16	1,44

Figura 3-5. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación



fuelle: Hidroestudios 2021

La utilización de cinco herramientas de modelación diferentes llega prácticamente a los mismos resultados, mostrando que el descenso adicional del nivel del acuífero de salmuera del núcleo del salar de Atacama,

producto de la sobreextracción, frente a los sistemas lacustres, es de magnitud centimétrica aproximadamente 1,5 cm, dependiendo del pozo (rango 0 a 6,1 cm). El hecho que se hayan utilizado diferentes herramientas, desarrolladas por distintos autores y con distintos mecanismos de modelación, entrega una gran certidumbre a la evaluación desarrollada. Los descensos adicionales producto de la sobreextracción estimados son absolutamente marginales para el acuífero de salmuera del núcleo y además este efecto es temporal, ya que, producto de la devolución de salmuera realizada por SQM a partir del año 2018, los efectos se reversan.

4. CARGO 1: INFORME: "FUNCIONAMIENTO DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA" COMO APOYO A LA RESPUESTA A LOS CARGOS DE LA SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE (SMA) POR LAS ACTUACIONES DE SQM EN EL SALAR. ELABORADO POR EMILIO CUSTODIO, 2017. APÉNDICE 1.2

- En ese sentido tales incertidumbres, junto a la escala y condición de borde que mantienen los sistemas lagunares (sitios de protección) en la modelación, requieren de una refinación en que los objetos de modelación sean los sistemas lagunares desde una mirada integrada. Adicionalmente se menciona que el principal factor de cambios en los sistemas lagunares, estaría asociado a las variaciones climáticas de largo periodo, para lo anterior no se señala ningún argumento efectivo, considerando algún escenario de cambio climático y la sinergia que pueda existir entre cambios climáticos en el corto, mediano y largo plazo, así como también operaciones dentro y fuera del salar.

R:

Como una forma de subsanar comentarios asociados a los modelos numéricos hidrogeológicos, se realizó una actualización de la evaluación del Cargo N°1 con 5 distintas herramientas disponibles (Tabla 4-1). Las herramientas de modelación fueron desarrolladas por distintas consultoras y consideran distintas técnicas de modelación, como modelos numéricos, analíticos y estocásticos, esta información se presenta en detalle en (hidroestudios, 2021)

Tabla 4-1. Características de los modelos utilizados en la evaluación

Nombre	Tipo	Por	Para	Fuente
Modelo numérico núcleo salar de Atacama VI actualización	Numérico hidrogeológico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. VI Actualización modelación de flujo Salar de Atacama
Modelo numérico CORFO	Numérico hidrogeológico	Amphos 21	Corfo	Amphos 21, 2021. Actualización modelo hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama.
Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama	Estocástico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama
Modelo numérico núcleo salar de Atacama IV actualización	Numérico hidrogeológico	CSIC	SQM Salar	IDEA-CSIC, 2017. IV actualización del modelo regional de flujo del salar de Atacama
Ecuación de Theis para acuíferos libres	Analítico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Informe evaluación de efectos Cargo N°1 y Cargo N°4

La Tabla 4-2 presenta un resumen de los resultados obtenidos con las cinco herramientas en 5 pozos característicos del Salar de Atacama, cuya ubicación es presentada en la Figura 4-1. Se observa que en promedio los efectos del cargo consideran todas las herramientas de modelación varían en torno a 1 cm.

Se destaca dentro de las herramientas utilizadas está el modelo numérico desarrollado por la Corfo, que es la herramienta que entrega el menor efecto de todos los modelos utilizados.

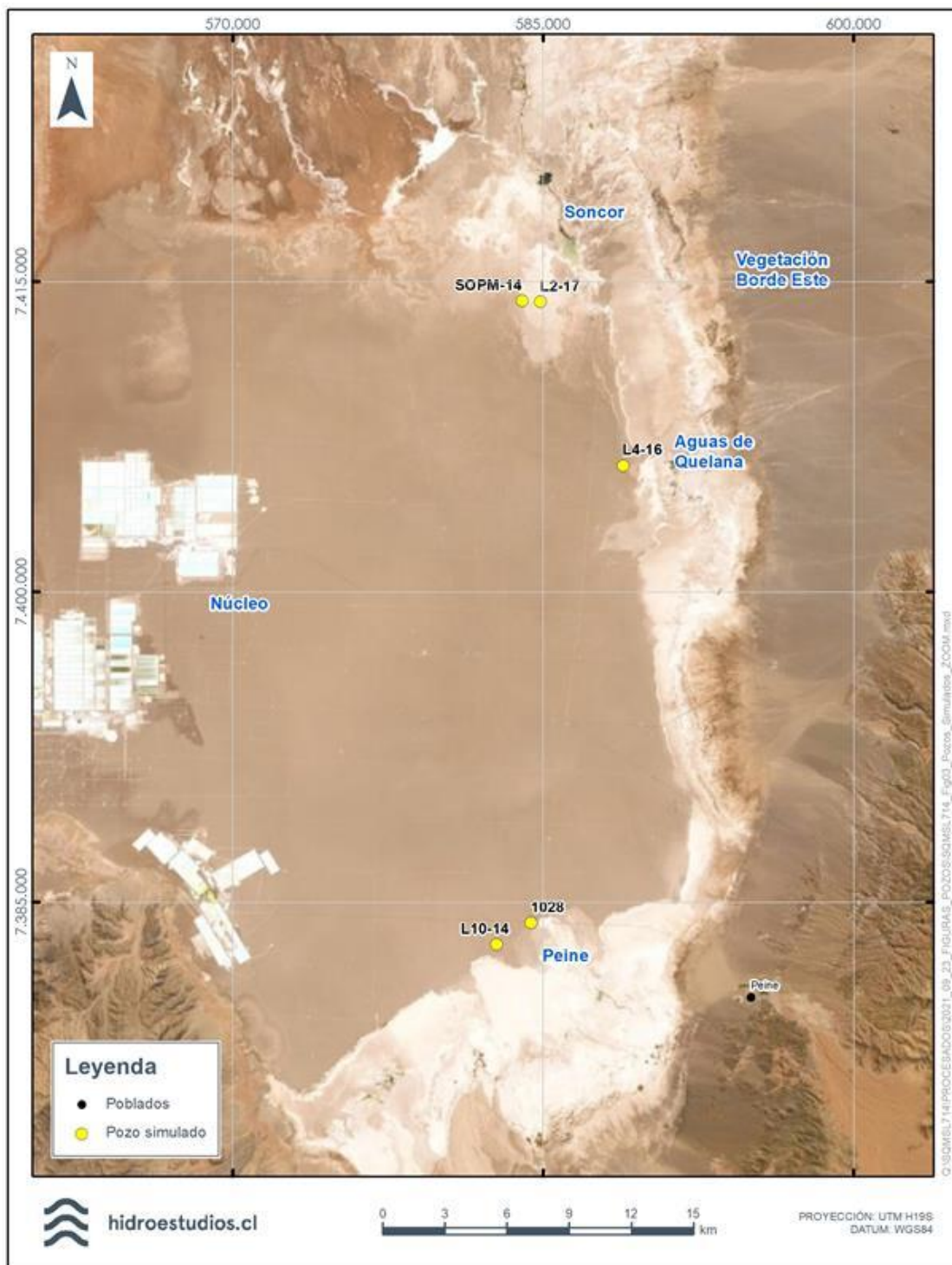
Tabla 4-2. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas

Pozo	IV Actualización	Analítico	VI Actualización		Corfo		Estocástico		Promedio
			Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	
1028p (cm)	0,2	0,6	1,51	Entre jul-2017 y nov-2017	0	N/A	5,02	nov-16	1,47
L10-14 (cm)	0,2	0,6	1,54	sept-17	0	N/A	6,10	dic-16	1,69
L2-17 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y feb-2019	0	N/A	1,99	mar-16	0,86
L4-16 (cm)	0,2	0,6	1,46	Entre oct-2018 y ene-2019	0	N/A	4,97	nov-16	1,45
SOPM-14 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y mar-2019	0	N/A	4,9	dic-16	1,44

La utilización de cinco herramientas de modelación diferentes llega prácticamente a los mismos resultados, mostrando que el descenso adicional del nivel del acuífero de salmuera del núcleo del salar de Atacama, producto de la sobreextracción, frente a los sistemas lacustres, es de magnitud centimétrica aproximadamente 1,5 cm, dependiendo del pozo (rango 0 a 6,1 cm). El hecho que se hayan utilizado diferentes herramientas, desarrolladas por distintos autores y con distintos mecanismos de modelación, entrega una gran certidumbre a la evaluación desarrollada. Los descensos adicionales producto de la sobreextracción estimados son absolutamente marginales para el acuífero de salmuera del núcleo y además este efecto es temporal, ya que, producto de la devolución de salmuera realizada por SQM a partir del año 2018, los efectos se reversan.

Respecto al factor climático se indica, que, para efectos de realizar una evaluación hacia el pasado, como es la evaluación de efectos asociado al Cargo N°1, el clima importante es el que se produjo antes y durante el periodo de evaluación. Este periodo climático es considerado en los modelos numéricos hidrogeológicos, a través de la inclusión de las recargas, precipitaciones y la evaporación histórica. La condición climática de largo plazo se utiliza cuando se realizan simulaciones o predicciones de largo plazo hacia el futuro, que no es el caso.

Figura 4-1. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación



fuelle: Hidroestudios 2021

- Se presentan los resultados de la modelación en el pozo L1-5, indicador de estado del Sistema Soncor (Figura 1a), que muestran una marcada estacionalidad intraanual y una tendencia generalizada de descenso desde 1986 hasta el fin del periodo de operación (agosto 2031), características no consistentes con lo observado (Figura 1 adjunta), en el que tal estacionalidad se pierde, no logrando reproducir el comportamiento observado, destaca el hecho que durante el periodo de infracción las tendencias son diametralmente distintas (flecha roja, Figura 1), y más aún que al año 2017, las modelaciones (4ta actualización 2017) y sus actualizaciones no fueron capaces de representar el cambio en la dinámica de los desbordes, principal fenómeno apuntado como responsable de los descensos y activación en los puntos L1-5 y L1-G4 reglilla del Plan de Alerta Temprana, considerando los 5 años transcurridos y que se plantea como un cambio sustancial prácticamente instantáneo en los niveles freáticos de los sectores de desborde.

R:

Como una forma de subsanar comentarios asociados a los modelos numéricos hidrogeológicos, se realizó una actualización de la evaluación del Cargo N°1 con 5 distintas herramientas disponibles (Tabla 4-3). Las herramientas de modelación fueron desarrolladas por distintas consultoras y consideran distintas técnicas de modelación, como modelos numéricos, analíticos y estocásticos, esta información se presenta en detalle en (hidroestudios, 2021). Además de la IV actualización (utilizada por Custodio, 2017) está la VI actualización, el modelo de la Corfo, un modelo estocástico especialmente desarrollado para estos efectos, y un modelo analítico utilizado por Hidroestudios (2020).

Tabla 4-3. Características de los modelos utilizados en la evaluación

Nombre	Tipo	Por	Para	Fuente
Modelo numérico núcleo salar de Atacama VI actualización	Numérico hidrogeológico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. VI Actualización modelación de flujo Salar de Atacama
Modelo numérico CORFO	Numérico hidrogeológico	Amphos 21	Corfo	Amphos 21, 2021. Actualización modelo hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama.
Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama	Estocástico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama
Modelo numérico núcleo salar de Atacama IV actualización	Numérico hidrogeológico	CSIC	SQM Salar	IDEA-CSIC, 2017. IV actualización del modelo regional de flujo del salar de Atacama
Ecuación de Theis para acuíferos libres	Analítico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Informe evaluación de efectos Cargo N°1 y Cargo N°4

La Tabla 4-4 Tabla 3-4 presenta un resumen de los resultados obtenidos con las cinco herramientas en 5 pozos característicos del Salar de Atacama, cuya ubicación es presentada en la Figura 4-2. Se observa que en promedio los efectos del cargo consideran todas las herramientas de modelación varían en torno a 1 cm.

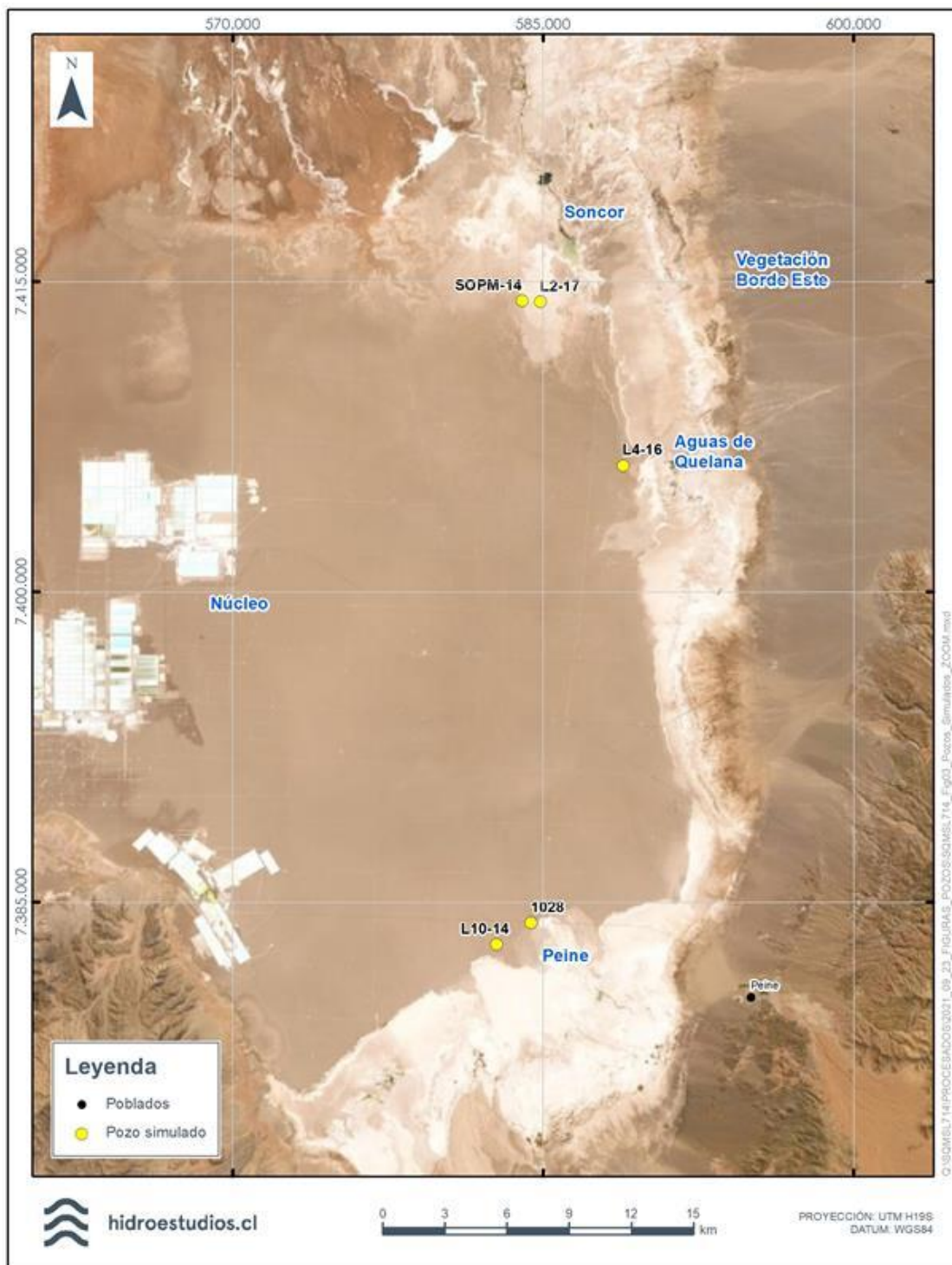
Se destaca dentro de las herramientas utilizadas está el modelo numérico desarrollado por la Corfo, que es la herramienta que entrega el menor efecto de todos los modelos utilizados.

Tabla 4-4. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas

Pozo	IV Actualización	Analítico	VI Actualización		Corfo		Estocástico		Promedio
			Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	
1028p (cm)	0,2	0,6	1,51	Entre jul-2017 y nov-2017	0	N/A	5,02	nov-16	1,47
L10-14 (cm)	0,2	0,6	1,54	sept-17	0	N/A	6,10	dic-16	1,69
L2-17 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y feb-2019	0	N/A	1,99	mar-16	0,86
L4-16 (cm)	0,2	0,6	1,46	Entre oct-2018 y ene-2019	0	N/A	4,97	nov-16	1,45
SOPM-14 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y mar-2019	0	N/A	4,9	dic-16	1,44

La utilización de cinco herramientas de modelación diferentes llega prácticamente a los mismos resultados, mostrando que el descenso adicional del nivel del acuífero de salmuera del núcleo del salar de Atacama, producto de la sobreextracción, frente a los sistemas lacustres, es de magnitud centimétrica aproximadamente 1,5 cm, dependiendo del pozo (rango 0 a 6,1 cm). El hecho que se hayan utilizado diferentes herramientas, desarrolladas por distintos autores y con distintos mecanismos de modelación, entrega una gran certidumbre a la evaluación desarrollada. Los descensos adicionales producto de la sobreextracción estimados son absolutamente marginales para el acuífero de salmuera del núcleo y además este efecto es temporal, ya que, producto de la devolución de salmuera realizada por SQM a partir del año 2018, los efectos se reversan.

Figura 4-2. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación



fuelle: Hidroestudios 2021

- Al respecto se advierte un análisis carente de sustento estadístico, y estudio de la significancia de las tendencias de las principales variables hídricas; niveles freáticos y calidad química (...) Esta afirmación no tiene mayor sustento en el documento, aunque bien, toma relevancia como potenciales efectos en la salinidad de los ecosistemas lagunares, requiriendo de mayores estudios especialmente de la estabilidad de la interfaz salina que hasta al momento se ha supuesto como una condición estática en la mayoría de los modelos conceptuales y numéricos.

R:

Esta observación tiene relación con el comportamiento esperado de la cuña salina, producto del bombeo de salmuera y agua. Al respecto se puede mencionar que tal como ha sido reportado en el informe de hidroestudios (2021): “Análisis de Cargo N°1 con diferentes herramientas de modelación”, que a su vez cita resultados de modelación realizada por Amphos 21, quienes desarrollaron modelos para la Corfo, muestran que el bombeo de salmuera produce muy pocos efectos sobre la cuña salina y los sistemas lacustres, producto de zonas de baja conductividad hidráulica presentes en la zona marginal del Salar (Figura 4-3).

La Figura 4-4 presenta la ubicación de los perfiles 2D de densidad variable que fueron construidos como parte del trabajo desarrollados por Amphos 21, mientras que la Tabla 4-5 muestra los resultados de uno de los perfiles donde se puede apreciar que distintos descensos en el sector del núcleo no generan efectos sobre pozos ubicados en el borde este, más allá de la cuña salina, denotando la inexistencia de efectos sobre la cuña misma.

Figura 4-3. Zonas hidrogeológicas en el salar de Atacama

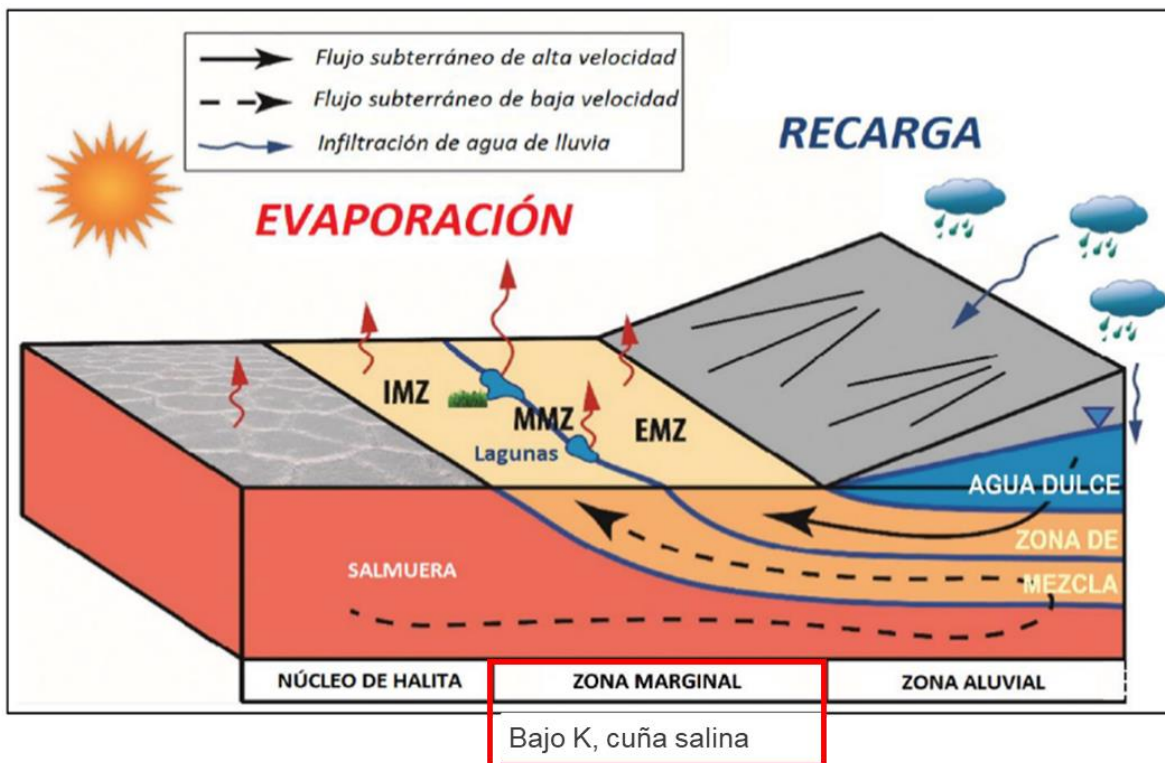
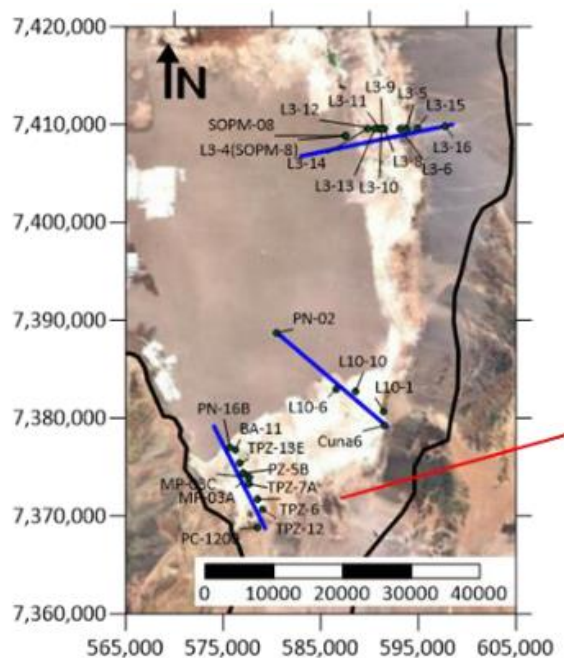


Figura 4-4. Ubicación de perfiles 2D modelados



Fuente: Amphos 21, 2021

Tabla 4-5. Tabla con resultados de modelación perfil 2D, sector Peine

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)			
	Escenario 1	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 7
PN-02	0,47	0,73	0,39	0,49
L10-6	0,10	0,16	0,08	0,12
L10-10	0,05	0,08	0,04	0,06
L10-1	0,04	0,04	0,04	0,04
Cuña 6	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabla 5-14: Descensos máximos en puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7.

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Amphos 21, 2021

5. CARGO 1: INFORME: "ANÁLISIS DEL EFECTO GENERADO EN LOS NIVELES ACUÍFEROS CON MOTIVO DE CARGO N°1 Y CARGO N°4 DEL PROCEDIMIENTO SANCIONATORIO ROL-F-041-2016 –HIDROESTUDIOS, APÉNDICE 1.3.

- De estos puntos mencionados anteriormente, se desprende una falta de integración de variables ambientales de relevancia que cuentan con un registro importante, y la falta utilización de supuestos no estacionarios para las variables climáticas como lo es la temperatura y evaporación, que apunten a reducir la incerteza científica en la comprensión ecosistémica del Salar de Atacama.

R: Como una forma de subsanar comentarios asociados a los modelos numéricos hidrogeológicos, se realizó una actualización de la evaluación del Cargo N°1 con 5 distintas herramientas disponibles (Tabla 5-1). Las herramientas de modelación fueron desarrolladas por distintas consultoras y consideran distintas técnicas de modelación, como modelos numéricos, analíticos y estocásticos, esta información se presenta en detalle en (hidroestudios, 2021).

Tabla 5-1. Características de los modelos utilizados en la evaluación

Nombre	Tipo	Por	Para	Fuente
Modelo numérico núcleo salar de Atacama VI actualización	Numérico hidrogeológico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. VI Actualización modelación de flujo Salar de Atacama
Modelo numérico CORFO	Numérico hidrogeológico	Amphos 21	Corfo	Amphos 21, 2021. Actualización modelo hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama.
Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama	Estocástico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Modelo estocástico de niveles en el Núcleo del Salar de Atacama
Modelo numérico núcleo salar de Atacama IV actualización	Numérico hidrogeológico	CSIC	SQM Salar	IDEA-CSIC, 2017. IV actualización del modelo regional de flujo del salar de Atacama
Ecuación de Theis para acuíferos libres	Analítico	hidroestudios	SQM Salar	Hidroestudios, 2021. Informe evaluación de efectos Cargo N°1 y Cargo N°4

La Tabla 5-2 presenta un resumen de los resultados obtenidos con las cinco herramientas en 5 pozos característicos del Salar de Atacama, cuya ubicación es presentada en la Figura 5-1. Se observa que en promedio los efectos del cargo consideran todas las herramientas de modelación varían en torno a 1 cm.

Se destaca dentro de las herramientas utilizadas está el modelo numérico desarrollado por la Corfo, que es la herramienta que entrega el menor efecto de todos los modelos utilizados.

Tabla 5-2. Resumen del máximo efecto del Cargo N°1 sobre el nivel del acuífero con todas las herramientas de modelación utilizadas

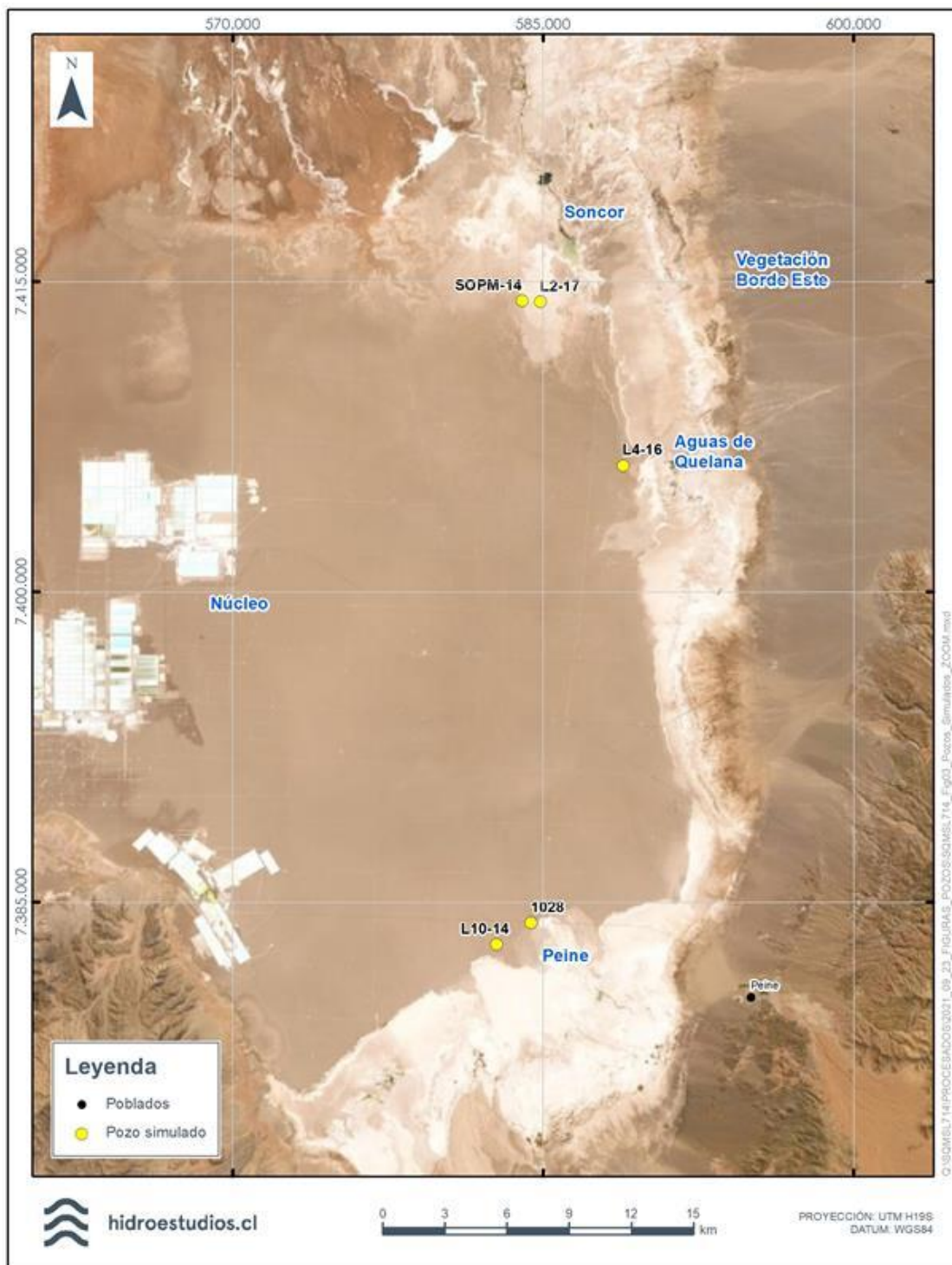
Pozo	IV Actualización	Analítico	VI Actualización		Corfo		Estocástico		Promedio
			Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	Diferencia	Fecha	
1028p (cm)	0,2	0,6	1,51	Entre jul-2017 y nov-2017	0	N/A	5,02	nov-16	1,47
L10-14 (cm)	0,2	0,6	1,54	sept-17	0	N/A	6,10	dic-16	1,69
L2-17 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y feb-2019	0	N/A	1,99	mar-16	0,86

L4-16 (cm)	0,2	0,6	1,46	Entre oct-2018 y ene- 2019	0	N/A	4,97	nov-16	1,45
SOPM-14 (cm)	0,2	0,6	1,49	Entre ago-2018 y mar- 2019	0	N/A	4,9	dic-16	1,44

La utilización de cinco herramientas de modelación diferentes llega prácticamente a los mismos resultados, mostrando que el descenso adicional del nivel del acuífero de salmuera del núcleo del salar de Atacama, producto de la sobreextracción, frente a los sistemas lacustres, es de magnitud centimétrica aproximadamente 1,5 cm, dependiendo del pozo (rango 0 a 6,1 cm). El hecho que se hayan utilizado diferentes herramientas, desarrolladas por distintos autores y con distintos mecanismos de modelación, entrega una gran certidumbre a la evaluación desarrollada. Los descensos adicionales producto de la sobreextracción estimados son absolutamente marginales para el acuífero de salmuera del núcleo y además este efecto es temporal, ya que, producto de la devolución de salmuera realizada por SQM a partir del año 2018, los efectos se reversan.

Respecto a la utilización de la evaporación y temperatura, los modelos numéricos utilizados consideran la variación estacional de la evaporación como condición de borde, la temperatura juega un rol muy menor en la evaporación.

Figura 5-1. Ubicación de pozos utilizados para la evaluación



fuelle: Hidroestudios 2021

6. CARGO 1: INFORME "INVESTIGACIÓN ACTIVACIÓN FASE II INDICADORES DE ESTADO L1-5 Y L1-G4, ELABORADO POR HIDROESTUDIOS, 2020. APÉNDICE 1.5."

- “Analizar el efecto del cambio de gradiente entre el lecho de las lagunas Chaxa y Barros Negros y el acuífero de salmuera sobre las tasas de infiltración, y cuantificar magnitud de esta salida, en virtud de la activación del pozo L1-5.”

R:

Este análisis no fue presentado en el informe de investigación dado que su objetivo, de acuerdo a la RCA, es determinar las causas de la activación y determinar si la activación es producto de: a) terceros, b) terceros con influencia de SQM, o c) efecto de SQM, ya que, esta determinación define las acciones que vienen a continuación.

Sin perjuicio de lo anterior, y con el objetivo de responder la observación y demostrar que los efectos del acuífero de salmuera (descensos) sobre el funcionamiento y balance hídrico del sistema lacustre Soncor son despreciables, tal como como también fue demostrado en el informe: Análisis de Cargo N°1 con diferentes herramientas de modelación (hidroestudios, 2021), donde se analizó el efecto del descenso adicional de producto del Cargo N°1.

El análisis que se presenta a continuación utiliza el rango completo de los niveles, considerando el aumento máximo de nivel producto de las precipitaciones y el valor mínimo registrado, de mostrando que el efecto sobre el sistema para todo el rango de variación sigue siendo despreciable en comparación con la recarga del sistema.

Para responder la observación planteada se cuantificará la descarga por infiltración en diversos escenarios, utilizando como referencia la laguna Barros Negros. Lo anterior, debido a que se ubica más cerca de las actividades mineras que se desarrollan en el núcleo, por lo que los efectos potenciales de las extracciones se identificarían antes y en mayor magnitud, y, por lo tanto, más vulnerable que la laguna Chaxa.

El caudal de infiltración desde las lagunas puede ser cuantificado mediante la ecuación de Darcy:

$$Q_{INFILTRACIÓN} = A \cdot K_V \cdot i_{BN-AQ}$$

Dónde:

$Q_{INFILTRACIÓN}$ = Caudal de infiltración (L/s).

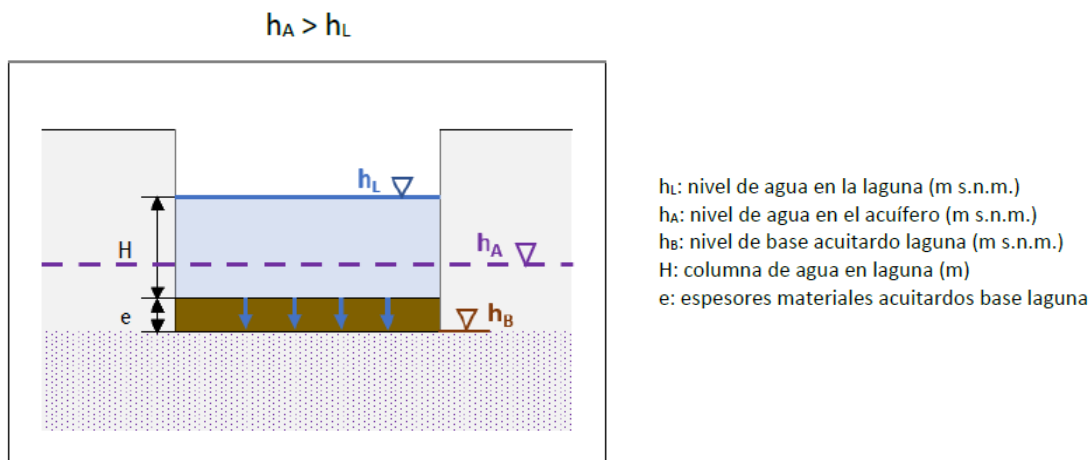
A Superficie del cuerpo lagunar (m²).

K_V = Permeabilidad vertical del lecho de la laguna por donde se produce la infiltración (m/d).

i_{BN-AQ} = Gradiente hidráulico existente entre el nivel de agua en la laguna y en el reservorio de salmuera (adimensional).

De acuerdo con la formulación anterior, considerando la permeabilidad vertical como una variable constante, la relación entre la laguna y el reservorio de salmuera en un momento determinado depende únicamente del gradiente vertical, que depende de la diferencia de niveles piezométricos entre la laguna (h_L) y el acuífero (h_A) (Figura 6-1).

Figura 6-1. Relación laguna acuífero



Fuente: Elaboración propia

De esta forma, se considera la siguiente ecuación de Darcy, para el cálculo del caudal de infiltración:

$$Q_{INF\ BN} = A_{BN} \cdot K_{V\ LAG} \cdot \frac{h_L - h_A}{e}$$

$Q_{INF\ BN}$: Caudal de infiltración

A_{BN} : área del cuerpo lagunar

$K_{V\ LAG}$: permeabilidad vertical del lecho de la laguna, por donde se produce la infiltración

h_L : nivel de agua en la laguna (msnm)

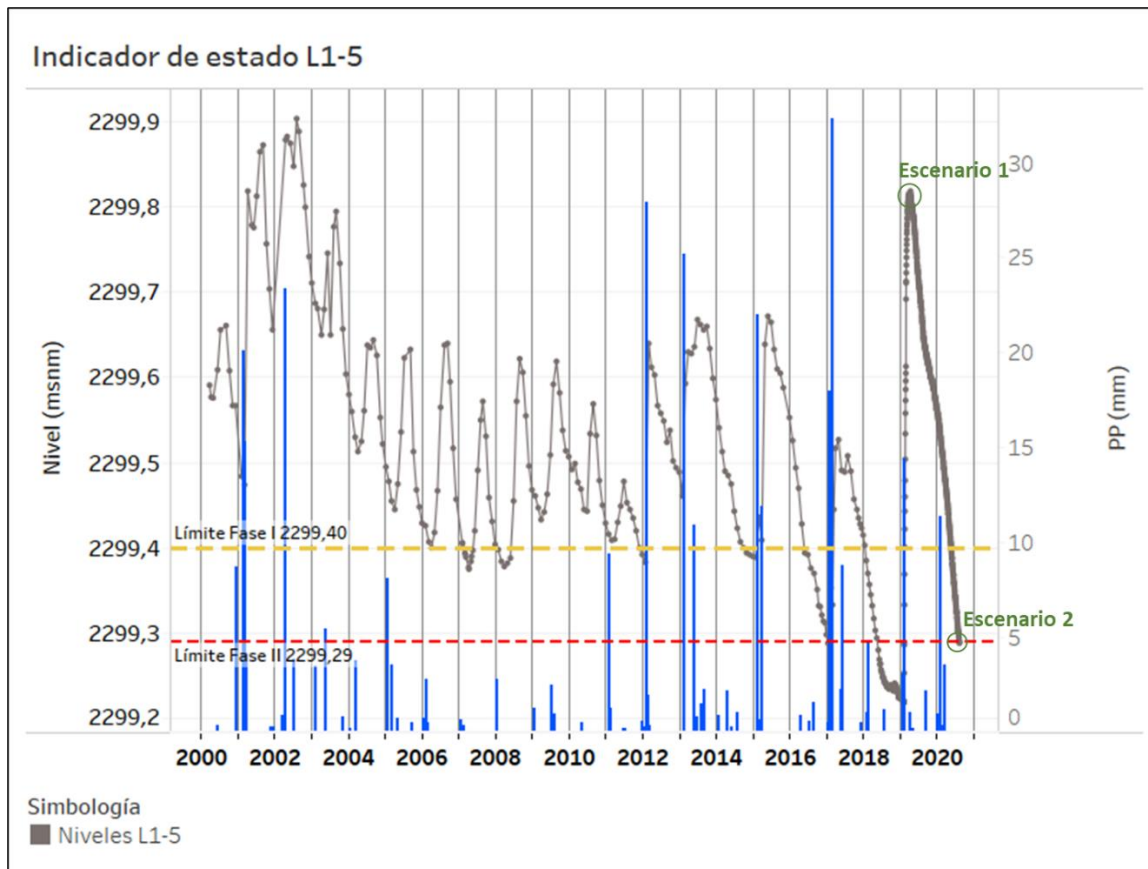
h_A : nivel de agua en el acuífero (msnm)

e : espesor del nivel acuitado en la base de la laguna (m)

En función de la relación antes expuesta y de la activación del pozo L1-5, se definen dos escenarios extremos, que dan cuenta de la máxima diferencia en caudales de infiltración:

- 1) Escenario 1: Situación en donde el pozo L1-5 se encontraba con el nivel máximo registrado antes de comenzar su descenso (h_A : 2.299,819 msnm (04 de abril 2019)) (Figura 6-2).
- 2) Escenario 2: Situación en donde el pozo L1-5 activó la Fase II (h_A : 2.299,289 msnm (01 de agosto 2020)) (Figura 6-2).

Figura 6-2: Niveles en indicador de estado L1-5 con los umbrales de fase I y fase II, y escenarios 1 y 2.



Fuente: Hidroestudios, 2020.

Para el cálculo de “e” se debe considerar que bajo la laguna Barros Negros hay materiales de baja conductividad conformado por materiales finos (limos y arcillas) ricos en materia orgánica que pueden alcanzar potencias mayores a 15 m. Sin embargo, aproximadamente entre los 5 y 10 m de la base de la laguna, estos materiales de baja permeabilidad sufren un acuñamiento lateral por parte de depósitos de sulfatos y evaporitas por el oeste y este respectivamente, provocando un estrechamiento de este nivel. Considerando los antecedentes estratigráficos de pozos cercanos, se estima una potencia mínima de 5 m de material de baja permeabilidad subyaciendo la Laguna Barros Negros, los que al presentarse saturados actúan como un acuitardo.

Con respecto a la permeabilidad vertical, a partir de una compilación de valores de esta variable para materiales del Salar de Atacama, similares a los descritos en el lecho de la laguna Barros Negros, se ha estimado un valor de $1,62 \text{ E-}03 \text{ m/d}$.

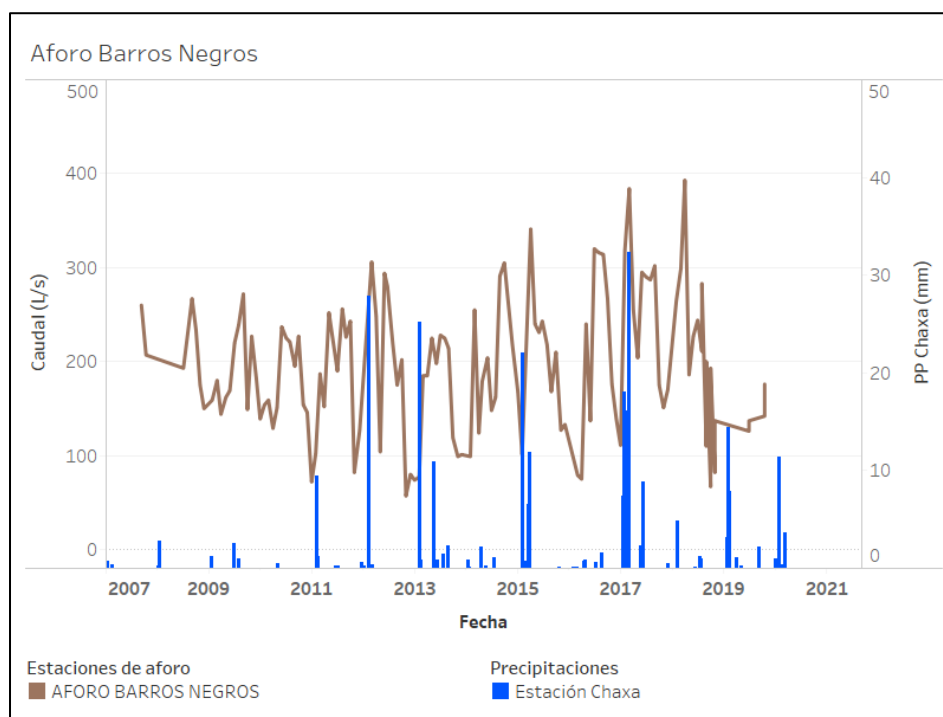
Para el nivel de agua en laguna Barros Negros, se considera el promedio de los últimos dos valores registrados en la reglilla Barros Negros SQM (año 2019), siendo $h_L: 2.300,025 \text{ msnm}$.

Finalmente, como valor del área se toma del promedio de las áreas oficiales medidas desde el PSAH, correspondiente a un valor de 107,5 Ha (SQM Salar, 2021). Cabe destacar que, para el cálculo de esta componente se considera únicamente el área del cuerpo principal, ya que las áreas de inundación consideradas presentan alta variabilidad.

Con lo anterior se obtiene un caudal de infiltración para el escenario 1 de 0,83 l/s y para el escenario 2 de 2,97 l/s.

Por otro lado, en el punto de aforo Barros Negros, se tiene un caudal promedio de 195 l/s (Figura 6-3). Al comparar los caudales de infiltración con el caudal de aforo, se observa que incluso en el caso de mayor infiltración (escenario 2) este valor corresponde sólo al 1,5% del caudal aforado entrante a la laguna.

Figura 6-3. Evolución de los caudales medidos en el punto de aforo Barros Negros



Fuente: Hidroestudios 2020

- **Los cambios en la dinámica de desbordes en el sector Cola de Pez mostrarían indicios de una disminución de la recarga, reflejado en la falta de estacionalidad en su señal de niveles piezométricos a partir de 2012 aproximadamente, sin embargo, tal falta de estacionalidad se debe a una disminución de los niveles, que no necesariamente implica solo una disminución en la recarga sino que también podría significar un efecto por las extracciones de salmuera, por ello se requiere de una estimación de tal disminución de la recarga.**

R:

Parece existir una confusión respecto al concepto de recarga expresado en el informe de investigación, donde se reporta el cambio en la dinámica de desbordes y su efecto sobre el comportamiento de nivel del acuífero en pozos aledaños.

En los sectores de desbordes, ya se Cola de Pez o Desborde Sur, se produce el fenómeno de infiltración, que implica el movimiento del agua desde la superficie del salar hacia el acuífero producto de la fuerza de gravedad. Cuando el desborde de agua se encuentra situado en la Cola de Pez, se produce infiltración en este sector específico del acuífero, dicha infiltración corresponde a un flujo de agua desde la superficie hacia el acuífero donde se genera este desborde. Para los pozos ubicados cercanos a Cola de Pez (L1-8, P1-7, P1-6, P1-5, P1-4, P1-3, L1-5, L1-G4, de a Figura 6-4) esta infiltración corresponde a una recarga local.

Cuando el desborde se mueve hacia el sur, los pozos anteriormente mencionados, dejan de contar con esta recarga (infiltración), pero los pozos ubicados en el Desborde Sur la comienzan a recibir, como son los pozos L2-13, P2-5, etc (Figura 6-4)

Respecto del efecto de la extracción de salmuera, tal como se indicó en el informe de investigación, si existe un efecto, sin embargo, no es capaz de producir la activación por sí sola. La activación se produce principalmente por el cambio del desborde y secundariamente por la extracción de salmuera.

Apoyo al Programa de Cumplimiento ROL-F-041-2016
HIDRO.SQMSL636.INF040.REV0

- **El resultado del efecto combinado a inicios de 2012 con un período húmedo y la disminución de la recarga a través del desborde se asocia a que los niveles en este sector, a partir de esta fecha, reproduzcan la misma evolución que los pozos del núcleo, es decir adquieran su dinámica. Al respecto se requiere se evalúe que tales cambios observados tanto en la dinámica de desbordes y niveles freáticos de salmuera se vuelvan a producir considerando que los fenómenos intensos de precipitación son recurrentes, pudiendo permitir que la dinámica del núcleo (descensos) lleguen a manifestarse en el sistema lagunar de Soncor, y/o que los indicadores de estado vuelvan a perder la representatividad de dicho sistema.**

R:

Como se abordará en la respuesta asociada a los Planes de Contingencia, los indicadores de estado que existen hoy no son representativos de la condición del sistema Soncor, es decir, su representatividad no cambia en el tiempo. Dado lo anterior, es que SQM basado en el gran conocimiento que actualmente se tiene de los acuíferos y de los sistemas ambientales que dependen de ellos, es que se está trabajando en un nuevo EIA, que tiene por objetivo, entre otras cosas, cambiar los indicadores de estado que no son representativos incluso más allá que sólo el sistema Soncor.

- **Los resultados del modelo numérico y los escenarios de modelación utilizados para la evaluación de los efectos que generaron la activación de la Fase II en los indicadores de estado L1-5 y L1-G4 en 2018 (6 años posterior al cambio de la dinámica de desbordes), sólo logran reproducir las tendencias del nivel de la salmuera subterránea de largo plazo en los indicadores de estado, no siendo capaz de representar la dinámica asociada al funcionamiento del sistema lagunar superficial, cuestión sumamente relevante al ser indicada como la principal causa en la activación, por ello es que se debe ajustar los modelos empleados para representar la relación con el sistema superficial.**

R:

El modelo del núcleo del núcleo del Salar de Atacama tiene por objetivo representar el comportamiento del acuífero de salmuera del núcleo y evaluar el efecto que tienen en él las extracciones y reinyecciones de salmuera. El modelo no considera ninguna condición de borde especial para representar las lagunas, ya que, existen otras herramientas (modelos locales o modelos conceptuales) que son utilizadas para determinar el efecto de un cierto descenso del acuífero de salmuera sobre los sistemas lacustres.

El modelo del núcleo cumple plenamente con su objetivo en términos de predecir el efecto del bombeo de salmuera sobre los niveles, ya que, representa adecuadamente las tendencias de largo plazo que están influenciadas por el bombeo y cambios en la recarga lateral subterránea. El modelo representa con menor calidad los eventos de corto plazo como son las precipitaciones, situación que hace que el modelo sea conservador desde el punto de vista ambiental, ya que, se ha optado por no incorporar recarga por precipitaciones de alta magnitud para representar los mayores pick de nivel que se produce luego de precipitaciones intensas.

Finalmente, en el informe de investigación se buscó determinar cuál era el efecto del bombeo de salmuera de SQM en el nivel de los indicadores de estado L1-5 y L1-G4, cumpliéndose cabalmente con lo requerido por la RCA al respecto.

- **“Por lo anterior, es esperable que el PC continúe activándose cada año que las precipitaciones estén ausentes o presenten magnitudes que no sean capaces de levantar el nivel por sobre los umbrales definidos. Lo anterior da cuenta que la recuperación de los niveles se debe a la precipitación (mayor sensibilidad), no siendo suficientes las medidas de acción derivadas de la activación, y da cuenta que se requiere actualizar los estudios respecto de la dinámica, para confirmar tal afirmación de que no han cambiado las condiciones hidrogeológicas del sistema lacustre.”**

R: Efectivamente, como se menciona en la observación, y como se presentó en el Informe "Investigación Activación Fase II Indicadores de estado L1-5 y L1-G4" (hidroestudios, 2020), los indicadores L1-5 y LG-4 muestran una evolución que depende principalmente de la dinámica de los desbordes desde la laguna Barros Negros y, adicionalmente, del bombeo de salmuera desde el núcleo.

Como se menciona también en dicho informe, estos pozos no son representativos de la dinámica de la laguna y por tanto no son buenos indicadores. Los umbrales de estos indicadores fueron definidos sobre la base de un comportamiento del nivel que respondía a la salmuera y a los desbordes, y actualmente solo responden a la dinámica de la salmuera, ya que se perdió el efecto de la infiltración desde los desbordes. Es importante también señalar que las desactivaciones de las fases II en el Sistema Soncor, activadas tanto el año 2018 como el año 2020, se producen principalmente por el aumento de nivel del acuífero que produjo la precipitación de principios del año 2019 y de agosto del año 2020. Por lo anterior, es esperable que el PC continúe activándose cada año que las precipitaciones estén ausentes o presenten magnitudes que no sean capaces de levantar el nivel por sobre los umbrales definidos, considerando el cambio natural en la dinámica de los desbordes.

Considerando este cambio en la dinámica, y el conocimiento del comportamiento hidrogeológico obtenido a partir de éste, es que actualmente se encuentra en proceso de confección un estudio de impacto ambiental que modificará los puntos de control no representativos, incorporará nuevos pozos y generará un plan de alerta temprana actualizado.

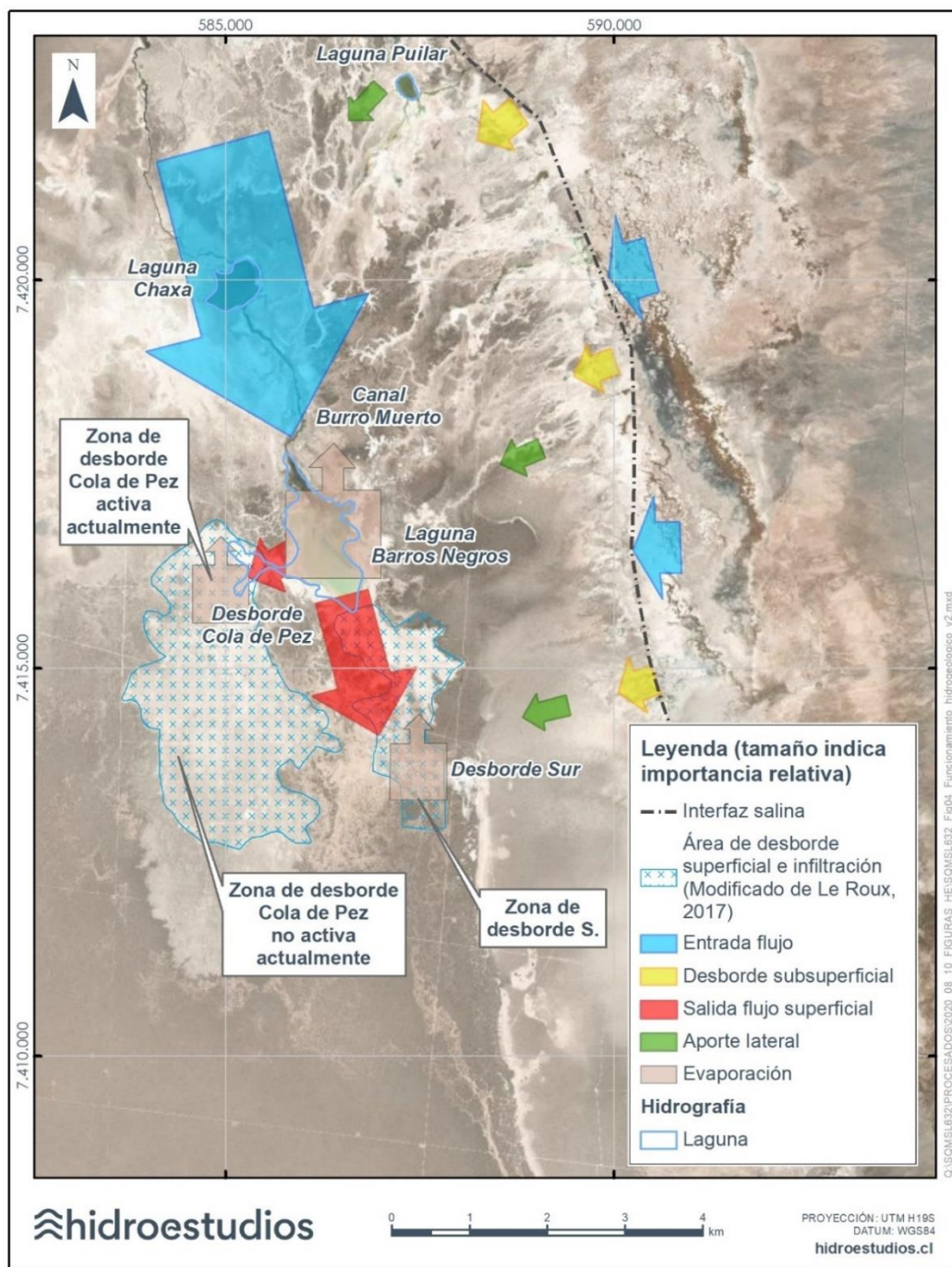
Sobre la observación a los estudios existentes de la dinámica de las lagunas, estos son suficientes para afirmar que las condiciones de los sistemas lacustres no han cambiado. Para darle sustento a lo anterior, a continuación, se muestra que el sistema se encuentra en condiciones naturales. Se presenta un resumen de la dinámica y evolución de las lagunas (hidroestudios, 2021).

En la laguna Barros Negros hasta el año 2012 se reconocía únicamente el desborde por el sector denominado Cola de Pez, en el margen oeste de la misma laguna. Posterior a 2012, se activó una zona de desborde en el margen sur, denominado Desborde Sur, el cual ha ganado importancia desde entonces en términos de caudales y extensión, contrario a lo que se observa en el sector Cola de Pez. Este cambio en los desbordes corresponde a un proceso natural relacionado con grandes eventos de precipitación y escorrentía que provocan cambios en la dinámica de sedimentación (Le Roux, J.P., 2017 y 2018) denominado proceso de sustitución de lóbulos, y que, en este caso, permitió que exista un cambio de un distributario deltaico (Cola de Pez) a otro (Desborde Sur) (Figura 6-5).

Este cambio en la dinámica de los desbordes, no va de la mano con un cambio en la superficie de la laguna Barros Negros, sino que por el contrario, a partir del análisis de imágenes satelitales (hidroestudios, 2021), el cuerpo principal de la laguna Barros Negros se ha mantenido estable entre los años 2007 y 2020 con una superficie promedio de 1.075.896 m², por lo cual el descenso observado en los indicadores del PC no se condice con una disminución en el cuerpo lacustre de Barros Negros (Tabla 6-1 y Figura 6-6).

Para un mayor detalle de la evolución de los desbordes y geomorfología lagunar revisar el "Informe de Investigación L1-5 y L1-G4" (Hidroestudios, 2021).

Figura 6-5: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

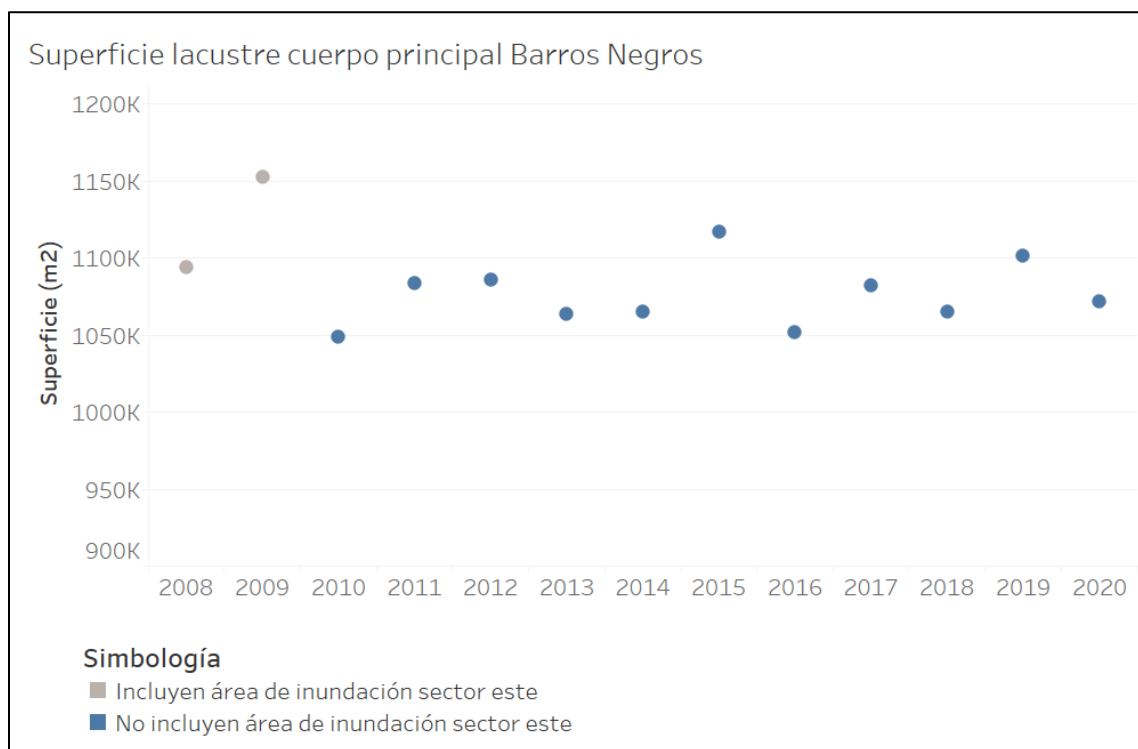
Tabla 6-1. Superficie lacustre laguna Barros Negros (cuerpo principal)

Año	Superficie (m2)
2008	1.093.625*
2009	1.152.803*
2010	1.048.924
2011	1.083.311
2012	1.085.391
2013	1.063.325
2014	1.064.767
2015	1.116.891
2016	1.051.449
2017	1.082.109
2018	1.065.345
2019	1.101.511
2020	1.071.838

(*) en estos años se incorporó dentro de la superficie de la laguna lo que ahora se define como área de inundación sector este, fuera del cuerpo principal de la laguna (23), por lo que no es directamente comparable con los años siguientes.

Fuente: Informe PSAH N°25 y PSAH N°27

Figura 6-6. Evolución de la superficie histórica de la laguna Barros Negros (cuerpo principal)



Fuente: Hidroestudios, 2021

- “El comportamiento de los indicadores de estado L1-5 y L1-G4 al momento de su definición, reflejaba un comportamiento mixto con respuesta a los efectos del desborde de Barros Negros por el sector Cola de Pez y de la salmuera, dando cuenta de la fragilidad y sensibilidad del sistema lacustre frente a las condiciones de recarga y descarga en un breve periodo de tiempo, que podrían eventualmente volver a experimentar cambios durante el periodo de operación y sumarse a los efectos de la misma.”

R: Esta observación se incluye en la respuesta asociada a los desbordes en Barros Negros y sector Cola de Pez (Sección 2).

7. CARGO 1: INFORME "DINÁMICA DE LA BIOTA TERRESTRE Y ACUÁTICA EN EL BORDE ESTE DEL SALAR DE ATACAMA REGIÓN DE ANTOFAGASTA. ELABORADO POR GEOBIOTA. APÉNDICE 1.6"

- Pero, aquí se presenta dos errores en el modelo porque, en una matriz de un suelo el agua se puede retener ya sea por infiltración, por fuerzas de capilaridad matricial, por fuerzas químicas y también puede hacerlo por procesos osmótico (importantes en suelos salinos) variables que no están incluidas en el modelo. Segundo, cuando el suelo contiene una cantidad máxima de agua, estamos en lo que se conoce como Capacidad de Campo (CC) y las raíces de las plantas tiene disponibilidad de absorción sin mayor dificultad. Pero, estas tasas de absorción radicular dependen de varios factores: principalmente por el potencial hídrico de las raíces y el tipo de suelo (texturas).

R:

En la observación se presentan algunas imprecisiones conceptuales que se explican a continuación.

En la zona no saturada del suelo, el agua está retenida con cierta fuerza que es denominada potencial o succión, dicho potencial es la suma entre el potencial mátrico (Ψ_m) y el potencial osmótico (Ψ_o).

$$\Psi = \Psi_M + \Psi_O$$

El potencial osmótico depende principalmente de la distribución del tamaño de poros, así suelos que tienen poros de mayor diámetro (arenas) el suelo está retenido con menor fuerza, por el contrario, a aquellos suelos que poseen un menor diámetro de poro (arcillas), el agua está retenida con mayor fuerza. La infiltración nada tiene que ver con la capacidad de retención de humedad y con las fuerzas matriciales del suelo, más bien corresponde a un proceso físico por el cual el agua que se encuentra en la superficie ingresa al suelo, por efecto principalmente de la fuerza de gravedad. Las fuerzas químicas si bien existen tienen muy poca relevancia respecto de la fuerza matricial y/o osmótica. La retención del agua en el suelo se produce principalmente por las fuerzas de tensión superficial del agua y su relación con el tamaño de poros.

El potencial osmótico depende de la salinidad del agua y no existe una forma de determinar de manera general su relevancia. Se requiere para ellos realizar pruebas de laboratorio caso a caso.

El potencial o succión del suelo o zona no saturada del suelo se caracteriza por la relación que existe entre la succión o potencial y el contenido de humedad, en una propiedad del suelo que se denomina de varias formas: curva de succión, curva de retención de humedad, curva característica. Esta propiedad del suelo se determina en laboratorio a través de distintas técnicas, que en términos generales aplican escalones de aumentos

sucesivos de una presión neumática al suelo, generando la salida de agua hasta que se que equilibra el contenido de humedad del suelo para cada escalón de presión.

Se considera que la presión de agua es mayor que 0 en la zona saturada e igual a 0 en el nivel freático, en el caso de la zona no saturada la presión es menor que cero, esto refleja el hecho de que el agua es mantenida en los poros debido a tensiones o fuerzas superficiales en el suelo. Existen una gran variedad de ecuaciones que describen la forma de la curva de retención o curva característica del suelo siendo la más ampliamente utilizada el modelo de Van Genuchten-Mualem (1990). La Figura 7-1 presenta una curva de succión del Borde Este correspondiente a una textura franco-limosa a modo de ejemplo.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad \text{para } h < 0$$

$$\text{Con } m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1$$

Donde

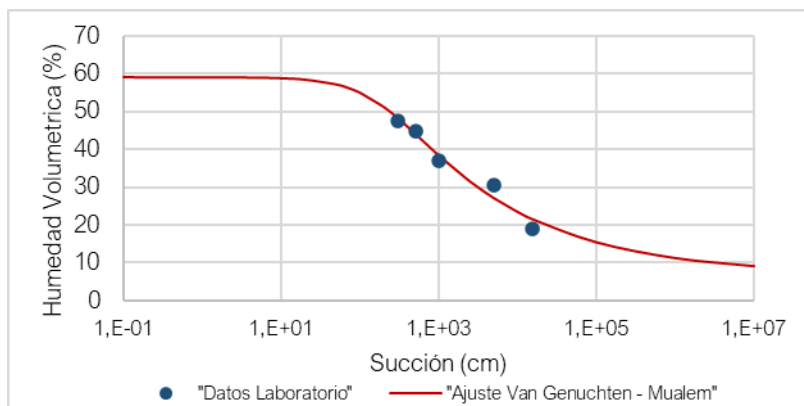
θ_s : Contenido de humedad volumétrica saturada

θ_r : Contenido de humedad volumétrica residual

K_s : Conductividad hidráulica saturada

α y n : coeficientes empíricos

Figura 7-1. Curva de succión obtenida en el Borde Este del Salar de Atacama



Respecto de la cantidad de agua que está disponible para las plantas, desde el punto de vista agrícola se denomina humedad disponible a la cantidad de agua que se encuentra entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). La CC representa la cantidad de agua que queda retenida una vez que el agua gravitacional abandonó el sector de las raíces y por este motivo se dice que es la máxima capacidad de retención de humedad en un suelo. El PMP corresponde al punto en el cual el agua está retenida con tal succión que ya no es posible ser absorbida por las plantas. La tasa de absorción de las plantas nada tiene que ver con el tipo de suelo, si no sólo se relaciona con la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración que es el que genera una gradiente de humedad que hace sacar el agua desde el suelo a través de las plantas, en el proceso conocido como transpiración. Como fue mencionado anteriormente, la textura del suelo (proporción entre arenas, limos y arcillas) tiene que ver con la forma de la curva de succión o retención, es decir, con la fuerza que el agua es retenida para contenido de humedad específico.

La humedad disponible se define en 0,33 atmósfera para la capacidad de campo y 15 atmósfera para el PMP, definición realizada para las plantas cultivables. Naturalmente las plantas que habitan el salar de Atacama tienen un rango mucho mayor a las 15 atm., ya que se encuentran adaptadas a vivir en condiciones de extrema aridez y salinidad, tal como el mismo informe del CPA lo menciona con valores sobre las 60 atmósferas.

Finalmente mencionar que el modelo utilizado para estimar el comportamiento de la zona no saturada del suelo considera todos los conceptos mencionados anteriormente, y a pesar de que las plantas presentes en el salar de Atacama son capaces de soportar succiones mucho mayores a 60 atmósferas, se ha considerado como rango 15 atmósferas, por lo que el modelo es conservador.

8. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA). Resolución Exenta N° 226/2006. Antofagasta : s.n., 2006.

DGA. Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama.S.I.T. 210, pp 277). Ministerio de Obras Públicas. realizado por GCF 2010, SGA 2015).

FAO. Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. 2006.

Hidroestudios. Informe de investigación activación Fase II indicadores de estado L1-5 y L1-G4. 2021.

Hidroestudios. Análisis de Cargo N°1 con diferentes herramientas de modelación. 2021.

Ide, F. "Cubicación del yacimiento salar de Atacam. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p. Santiago." 1978.

Le Roux, J.P. La substitución de lóbulos en el sector Barros Negros del delta de San Pedro y su efecto en los niveles de agua subterránea. 2018.

Le Roux, J.P. Pleistocene-Holocene paleoclimatic and sedimentological changes in the Salar de Atacama. 2017.

Ortiz, C. et al. Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, Northern Chile. Hydrological Sciences Journal, Vol. 59. 2014

SQM Salar S.A. Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. 2020.

SQM Salar S.A. Informe n°25 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. 2019.

SQM Salar S.A. Informe n°27 del Plan de Seguimiento Ambiental del Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. 2020.

SQM Salar. Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama". 2021.

SRK Consulting. Estudio Hidrológico Salar de Atacama. 2020.

Topoland. Topografía Especializada, Aerofotogrametría Sistema Lacustre de Soncor. 2018.



hidroestudios.cl

