

Anexo A.1

Análisis y estimación de efectos ambientales Cargos N°1 y N°7 Resolución Exenta N°1/Rol D-027-2016

SQM S.A.

ÍNDICE

1	Resumen.....	1
2	Introducción	2
3	Concurrencia de efectos como consecuencia del hecho infraccional	3
4	Marco teórico y enfoque metodológico.....	8
5	Determinación y cuantificación de los efectos ambientales.....	9
5.1	Medio físico	10
5.1.1	Nivel de agua superficial	10
5.1.2	Calidad del agua	12
5.2	Medio biótico.....	26
5.2.1	Vegetación higromorfa	26
5.2.2	Fauna terrestre.....	28
5.2.3	Biota acuática.....	28
5.3	Medio socioeconómico y cultural: paisaje	45
6	Conclusión	46
7	Referencias	47

FIGURAS

Figura 1.	Esquema conceptual del funcionamiento de la barrera hidráulica en el sector de los puquios.....	5
Figura 2.	Ubicación de regletas, pozos de inyección definidos en la RCA, pozos de inyección construidos (a agosto 2018), y pozos de observación en el sector de los puquios.	10

Figura 3. Nivel de agua superficial registrado en los puquios (periodo 2007 – 2017).
 11

Figura 4. Línea de tiempo con los hitos más importantes referidos a la medida de mitigación. 12

Figura 5. Modelo conceptual del sistema de los puquios N1-N2, N3 y N4 con inyección de agua (recarga artificial). 16

Figura 6. Conductividad eléctrica, concentración de sodio, potasio y magnesio en los puquios (periodo 2010 - 2018). 18

Figura 7. Ejemplo de las series comparadas con las pruebas de hipótesis. 19

Figura 8. Estructuras de depositación de yeso y comunidades de microorganismos endolíticos que habitan en ellas (puquio N2, septiembre de 2017). 21

Figura 9. Estado de saturación del yeso en los distintos puquios (periodo 2010-2018).
 21

Figura 10. Concentración de clorofila-a y nutrientes en el punto T2-23..... 23

Figura 11. Evolución temporal de la concentración de clorofila-a en el puquio N2 (punto T2-23)..... 24

Figura 12. Variación temporal en la concentración de clorofila-a en los cuatro puquios durante la MUT. 25

Figura 13. Riqueza y abundancia total de fitobentos (periodo 2006-2017)..... 30

Figura 14. Riqueza y abundancia total de fitoplancton (periodo 2006-2017)..... 31

Figura 15. Riqueza y abundancia total de macrozoobentos (periodo 2006-2017). 32

Figura 16. Riqueza y abundancia total de zooplancton (periodo 2006 – 2017). 33

Figura 17. Variabilidad espacial de la abundancia de la biota acuática (noviembre de 2017)..... 34

Figura 18. Esquema de los estratos de las depositaciones de yeso y testigo extraído en terreno..... 36

Figura 19. Abundancia de microorganismos por clase. 37

Figura 20. Análisis de similitud entre las muestras basado en su taxonomía (puquios N1, N3 y N4)..... 38

Figura 21. Análisis de similitud entre las muestras basado en la asignación funcional (puquios N1, N3 y N4). 39

Figura 22. Comparación de categorías funcionales para la capa E1 de los puquios.
 39

Figura 23. Rangos de salinidad calculados a partir de mediciones *in situ* de CE en los puquios (enero de 2018). 41

Figura 24. Tipos de sustratos presentes en el fondo y borde de los puquios (enero de 2018)..... 43

Figura 25. Fotografías de puquios N1 y N2 en los años 2009, 2016, 2017 y 2018..... 46

TABLAS

Tabla 1. Puntos, parámetros y frecuencia de monitoreo establecidos para verificar efectos del Proyecto. 13

Tabla 2. Estadígrafos de las series que presentan diferencias estadísticamente significativas..... 20

Tabla 3. Estado de la vegetación higromorfa (periodo 2011 – 2016)..... 27

Tabla 4. Abundancia absoluta de aves acuáticas en el Salar de Llamara. 28

1 RESUMEN

En razón de lo indicado en los cargos N°1 y N°7 de la Res. Ex. N°1/ ROL D-027-2016 se analizó los potenciales efectos ambientales generados sobre el Sistema de los Puquios del Salar de Llamara, como consecuencia de los hechos infraccionales levantados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

Para lo anterior, se desarrollaron estudios por parte de especialistas independientes. Adicionalmente, se analizaron otras fuentes de información. Los resultados y conclusiones de los estudios y análisis mencionados fueron consolidados de forma de generar una visión global del comportamiento histórico del Sistema de los Puquios del Salar de Llamara. Lo anterior, con el propósito fundamental de concluir si los hechos infraccionales pudieron o no haber generado efectos ambientales sobre el funcionamiento del mismo.

Para un cabal entendimiento de este Anexo es importante tener en consideración el contexto del análisis. En primer lugar, en lo que respecta a la acreditación de la inexistencia de efectos, a lo largo del procedimiento sancionatorio en curso ya han sido entregados una serie de antecedentes que indican que éstos no se presentan.

Adicionalmente, en el marco del análisis de los estudios e información adicional, es de la mayor relevancia considerar lo señalado por el Segundo Tribunal Ambiental, en sentencia Rol R N°160-2017, con fecha 21 de agosto de 2018, recaída sobre la Res. Ex. N°9/D-027-2016, el que refiriéndose en forma particular respecto del hecho infraccional N°1, estimó:

“que la reclamante se hizo cargo de los presuntos efectos derivados del cambio de posición de la inyección y acreditó la inexistencia de otros efectos”, para luego concluir que “SQM S.A. se hace cargo debidamente de todos los efectos de los cargos N° 1, 2 y 7, cumpliendo consecuentemente el PdC con el criterio de integridad.”

A mayor abundamiento, es importante también tener en consideración para el análisis ponderado de la inexistencia de efectos ambientales, lo señalado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), en el OF. ORD. D.E.: N° 181717/2018, cuando concluye que *“las obras asociadas a la modificación de las medidas de mitigación y Plan de Alerta Temprana del proyecto “Pampa Hermosa”, implementadas por SQM S.A., no introduce cambios de consideración, a la luz de*

lo dispuesto por el literal g), del artículo 2° del RSEIA, por lo tanto no era necesario someterlas al SEIA en forma previa a su ejecución”.

Es ese el escenario donde se desarrolla el presente análisis de efectos, el cual busca consolidar la evidencia para determinar si los hechos infraccionales asociados a los cargos N°1 y N°7 pudieron o no haber generado efectos ambientales sobre el Sistema de los Puquios del Salar de Llamara, utilizando como metodología la revisión y síntesis de hallazgos y conclusiones, desde diferentes fuentes de información disponibles a la fecha.

Finalmente, en base a la revisión realizada, es posible concluir que no existen antecedentes que indiquen la existencia de efectos ambientales adversos sobre los objetos de protección, derivados de los hechos infraccionales asociados a los cargos N°1 y N°7. Lo anterior, sin perjuicio de la existencia de un margen de incertidumbre, en los términos que lo sostiene la Superintendencia del Medio Ambiente, que se encuentra acotado a la no afectación de la biota acuática y, en específico, de los microorganismos que habitan en el sistema de los puquios, en un contexto ecosistémico de amplia variabilidad.

2 INTRODUCCIÓN

En razón a lo indicado en los cargos N°1 y N°7 de la Res. Ex. N°1/ROL D-027-2016, además de lo indicado en el literal c) del Resuelvo I, numeral 1) observaciones generales de la Res. Ex. N°4/ROL-D-027-2016, el presente anexo técnico analiza los potenciales efectos ambientales derivados de la falta de cumplimiento de lo dispuesto en las exigencias contenidas en:

- Considerandos 7.1.1 y 7.1.2 de la RCA N°890/2010;
- Numeral 3 del Anexo II de la Adenda N°3;
- Respuesta 6.4 de la Adenda N°3;
- Sección 4 del Anexo IV de la Adenda N°3;
- Sección 5 del Anexo IV de la Adenda N°3;
- Artículo 8 de la Ley N° 19.300; y
- Artículo 2, letra g), del D.S. N° 40/2012 del Ministerio de Medio Ambiente.

3 CONCURRENCIA DE EFECTOS COMO CONSECUENCIA DEL HECHO INFRACCIONAL

En este anexo se analizan los posibles efectos ambientales originados producto de las infracciones asociadas a los cargos N°1 y N°7 de la formulación de cargos contenida en la Res. Ex. N°1/ ROL D-027-2016, las cuales fueron calificadas como grave y gravísima respectivamente y están expresadas de la siguiente manera:

Cargo N°1

"Falta de implementación de barrera hidráulica, en función de:

a) No inyección de agua en el Puquio N4, no obstante, el nivel de agua se encontraba bajo el umbral establecido durante 78 días, en el período de 25 de septiembre y 10 de diciembre de 2013 y el día 14 de diciembre de 2013.

b) Regla Operacional:

b.1) Falta de activación de la barrera hidráulica: En Pucquios N1 y N2 entre los días 14 y 15 de mayo; entre el 17 y 27 de mayo; y, entre el 4 y 23 de junio, todos de 2015, no obstante, se constató una disminución por sobre 6,5 cm en el pozo M3N2.

b.2) No aumentar caudal de inyección de agua en el Puquio N2 para el periodo entre el 19 de diciembre de 2013 y 26 de enero de 2014, no obstante, el nivel del espejo de agua se encontraba bajo el valor umbral y en descenso.

c) Salinidad: Inyección de agua nula o insuficiente, no obstante, la salinidad se encontraba fuera de los rangos umbrales establecidos en la RCA en los siguientes periodos:

c.1) Puquio N1: Entre el 29 de octubre de 2013 y el 27 de mayo de 2014, así como, entre el 07 de abril y 02 de junio de 2015.

c.2) Puquio N2: Entre el 25 de octubre de 2013 y 21 de mayo de 2014; Entre el 28 de octubre de 2014 y el 02 de diciembre de 2014; Entre el 22 de abril de 2015 y 27 de mayo de 2015."

Cargo N°7

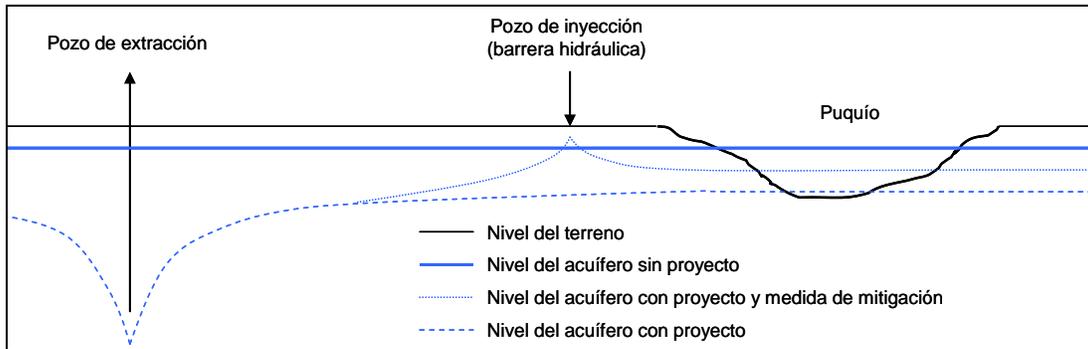
““Modificación de medida de mitigación, consistente en la implementación de una barrera hidráulica y Plan de Alerta Temprana, sin contar con autorización ambiental”, según se indica a continuación:

- a) Cambio de ubicación de los pozos de inyección del puquio N2;*
- b) Falta de construcción de 2 pozos de inyección asociados al Puquio N3;*
- c) Construcción de 4 pozos de inyección no autorizados asociados al Puquio N4);*
- d) Construcción de Pozo N3W (pozo de monitoreo) en zona distinta a la autorizada (Plan de Alerta Temprana-Puquios Salar de Llamara).*
- e) Reemplazo de pozo de monitoreo P0-2 por pozo P0-2A (PAT Tamarugo Salar de Llamara)*
- f) Reemplazo de pozo de monitoreo XT-2B por XT-2A. (PAT Tamarugo Salar de Llamara).*

De acuerdo con lo indicado en el considerando 7.1.1 de la RCA N°890/2010, SQM debe implementar una barrera hidráulica en un sector de pequeños cuerpos de agua superficial, denominados puquios, para minimizar eventuales impactos producidos por la extracción de agua subterránea desde el acuífero del Salar de Llamara (realizada 11 km al norte de este sistema).

Esta barrera consiste en la inyección de agua en pozos ubicados entre el sector de bombeo y los puquios, lo que aumenta el nivel del acuífero y genera un aislamiento del comportamiento hidráulico de ambos sectores (Figura 1). Esta medida de mitigación (MM) se activa al sobrepasar umbrales establecidos tanto para el nivel de agua superficial como para la calidad química (salinidad) del agua en los puquios. De esta manera, su implementación tiene como objetivo resguardar los sistemas bióticos que el sistema sustenta.

Figura 1. Esquema conceptual del funcionamiento de la barrera hidráulica en el sector de los puquios.



Fuente: EIA del "Proyecto Pampa Hermosa" de SQM (Figura 7.3-1).

De acuerdo a lo recogido en el cargo N°1, entre los años 2013 y 2015 existieron algunos periodos en los cuales SQM no habría implementado la barrera hidráulica o lo habría hecho de manera insuficiente.

Por otra parte, de acuerdo a lo indicado en el cargo N°7, la MM fue modificada respecto al diseño definido en la evaluación ambiental. En particular, la modificación consistió en: cambiar la ubicación de pozos de inyección asociados al puquio N2, dejar de construir pozos de inyección asociados al puquio N3, y construir otros pozos no autorizados de inyección cerca del puquio N4 y de observación del PAT.

Así, tanto para el cargo N°1 como para el cargo N°7, se estiman infringidas las exigencias contenidas en el numeral 7.1. *Medidas de Mitigación, Reparación* de la RCA N°890/2010, específicamente en el considerando 7.1.1, que establece lo siguiente:

"7.1.1 Para la disminución del nivel superficial de agua en Puquios del Salar de Llamara durante la etapa de operación del Proyecto, la medida específica consistirá en la implementación de una barrera hidráulica. La medida estará orientada a minimizar los impactos secundarios que tendrá la extracción de agua sobre sistemas bióticos presentes en el área de influencia del Proyecto,

la que permitirá mantener los niveles de agua superficiales de los Puquios de tal forma de no afectar la biota acuática y terrestre aledaña a ellos.¹

La barrera hidráulica consistirá en la inyección de agua entre el sector de bombeo y los Puquios, con la finalidad de inducir un aumento del nivel del acuífero de manera de generar una divisoria de aguas que aisle el comportamiento hidráulico de ambos sectores (ver Figura 7.3-1 del EIA donde se presenta un esquema conceptual de su funcionamiento) e impedir que el cono de depresión se propague y afecte el nivel de agua de los Puquios (mayores detalles ver Anexo II del Adenda N°3)."

Adicionalmente, en el cargo N°7 se estiman infringidas las siguientes exigencias:

"7.1. Medidas de Mitigación, Reparación (RCA N°890/2010):

7.1.1 (...)

Adicionalmente, se ha diseñado un Plan de Alerta Temprana "PAT" (mayores antecedentes en el punto 5, del Anexo IV del Adenda N° 3), que debe entenderse como una herramienta de gestión ambiental complementaria a la implementación de la barrera hidráulica, es decir, el PAT se activaría si la barrera hidráulica corre el riesgo de no ser lo suficientemente eficiente para cumplir con los objetivos ambientales definidos para los Puquios y vegetación hidromorfa."

Cabe notar que el objetivo de la barrera hidráulica queda establecido en la Sección 3 del Anexo II de la Adenda N°3 del EIA del Proyecto de la siguiente manera: "La medida de mitigación tiene por objetivo *mantener los niveles de agua y la calidad química de los puquios dentro de una variación que permita el funcionamiento del sistema*"². Por su parte, el objeto de protección del PAT del sistema de los puquios queda explícitamente establecido en la Sección 5 del Anexo

¹ Énfasis agregado.

² Íbid.

IV de la Adenda N°3 del EIA como sigue: “Objeto de protección: Hábitat para la biota asociada a los puquios de Llamara puquios N1, N2, N3 y N4 (estromatolitos y vegetación hidromorfa) y conservación de paisaje en sectores cercanos a acceso (puquios N1 y N2).”

El análisis conjunto de las infracciones levantadas en la formulación de cargos, la identificación de impactos ambientales realizada durante la evaluación ambiental del proyecto, y una evaluación global del sistema efectuada a partir de la revisión de antecedentes técnicos, científicos y administrativos, permite concluir que el objeto de protección asociado a los cargos N°1 y N°7, corresponde a los puquios y en específico a sus componentes:

- Medio físico: nivel superficial y calidad química del agua
- Medio biótico: vegetación higromorfa, fauna terrestre y biota acuática
- Medio socioeconómico y cultural: paisaje.

Por lo anterior, los potenciales efectos generados por la infracción corresponderían, en caso de verificarse, al descenso del nivel de agua superficial y a la modificación de la calidad del agua en los puquios y a la influencia de estos cambios sobre el estado de los componentes ambientales incluidos la vegetación, fauna, biota acuática y paisaje.

De acuerdo con lo anterior, para determinar la concurrencia o no de efectos ambientales, como consecuencia de los hechos infraccionales, se analizó el comportamiento histórico de los siguientes componentes:

- (1) nivel de agua superficial;
- (2) calidad del agua superficial;
- (3) vegetación higromorfa;
- (4) fauna terrestre;
- (5) biota acuática; y
- (6) paisaje en los puquios.

Los análisis antes referidos tienen como objetivo concluir, fundadamente, si se han generado desviaciones respecto a las condiciones naturales de funcionamiento

de los puquios que pudieren estar relacionados con la modificación del pozo de observación N3W del sistema de Puquios; con la inadecuada implementación de la barrera hidráulica; y/o con la modificación en la implementación de la misma.

4 MARCO TEÓRICO Y ENFOQUE METODOLÓGICO

De acuerdo con lo establecido en el considerando 8.2 de la RCA N°890/2010 así como en el Anexo V de la Adenda N°3 del EIA del Proyecto, para evaluar el potencial efecto de la extracción de agua subterránea del acuífero del Salar de Llamara, así como para verificar la efectividad de la barrera hidráulica sobre el sistema de los puquios, se estableció un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA).

En el PSA se evalúan periódicamente los componentes hidrogeológicos y bióticos de este sistema, con la finalidad de verificar su estado. De esta manera, las variables que caracterizan a estos componentes se encuentran definidas en el PSA y se han monitoreado durante todo el periodo de ejecución del Proyecto.

Para evaluar el comportamiento histórico de los componentes ambientales durante los periodos preoperacional y de operación del Proyecto, la información generada en el marco del PSA (y del EIA) fue analizada por distintos especialistas independientes. En algunos casos, para complementar esta información, se realizaron nuevos monitoreos en los puquios. Los estudios realizados y analizados corresponden a los siguientes:

1. Evaluación de los parámetros de diseño de la medida de mitigación. Arcadis. Octubre, 2017.
2. Informe final: Estudio del efecto del bombeo y de la inyección de agua en la calidad del agua en las lagunas de los puquios. J. Wiertz, I. Godoy & Arumi J.L. SMI ICE Chile. Septiembre, 2018.
3. Evaluación cambios significativos en la calidad del agua de los puquios. Arcadis. Mayo, 2018.
4. Geologic Setting, Geochemistry and Formation of Gypsum Deposits, Puquios, Salar de Llamara, Northern Chile. Pamela Reid, Amanda M. Oehlert & Erica P. Suosaari. Bahamas Marine EcoCentre.University of Miami/RSMAS.Bush Heritage Australia/Smithsonian Institute. Marzo,2018.

5. Genesis of the Gypsum Depositional System in Llamara Puquios. Pamela Reid, Amanda M. Oehlert & Erica P. Suosaari. Bahamas Marine EcoCentre.University of Miami/RSMAS.Bush Heritage Australia/Smithsonian Institute. Julio, 2018.
6. Estado actual de la vegetación higromorfa, paisaje y fauna en los Puquios de Llamara. Geobiota, 2016.
7. Monitoreo mensual de clorofila-a, riqueza y abundancia de cada taxa de fitobentos y fitoplancton en la columna de agua de los puquios N1, N2 (Punto T2-23), N3 Y N4. Salar de Llamara, Campaña Agosto, 2018. Fisioaqua. Septiembre de 2018.
8. Asesoría científica para determinar efectos ambientales en Puquios del Salar de Llamara: Informe Etapa 2. CAPES-UC. Octubre, 2018.
9. Estudio metagenómico de sistemas de depositación de yeso del Salar de Llamara, Informe Final. C. Demergasso, Escudero, L. y Echeverría Alex. Centro de Biotecnología. Universidad Católica del Norte. Julio de 2018.

Los resultados y conclusiones de los estudios mencionados fueron consolidados de tal forma de generar una visión global del comportamiento histórico del sistema de los puquios. Lo anterior, con el propósito fundamental de concluir si los hechos infraccionales pudieron haber generado o no efectos ambientales sobre el funcionamiento del mismo.

5 DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS AMBIENTALES

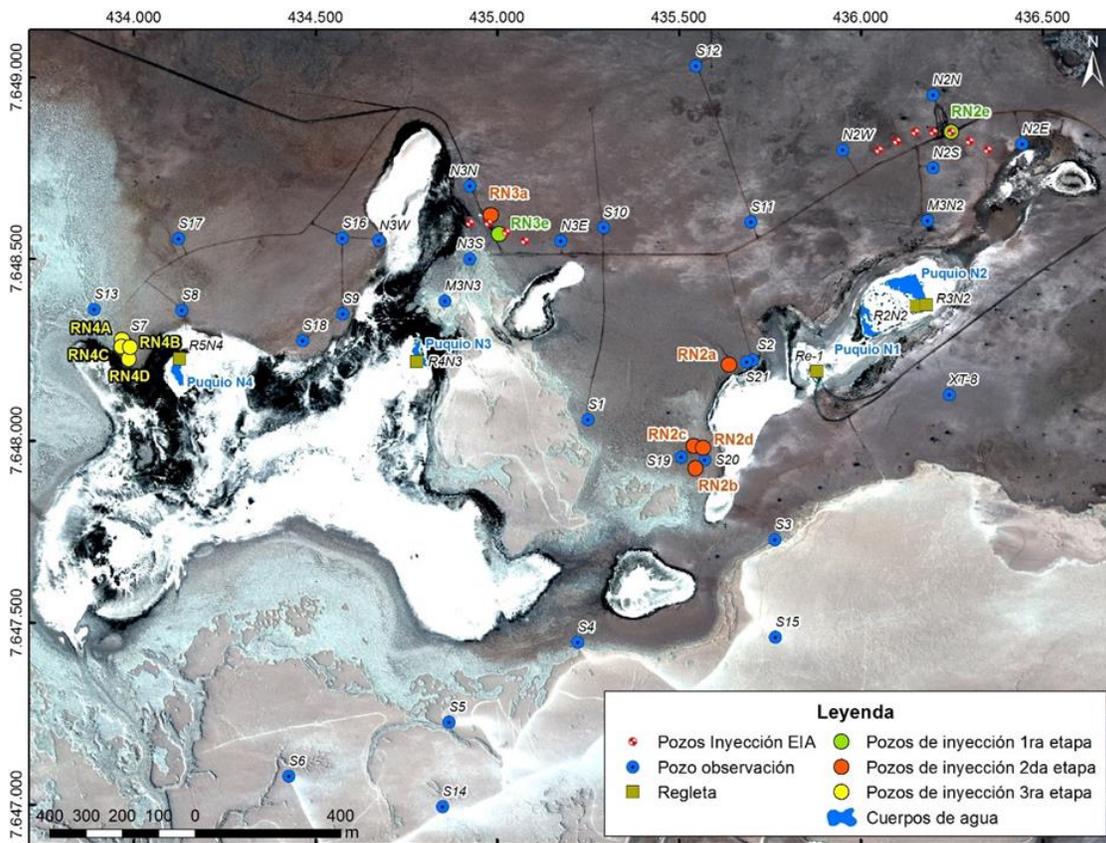
En esta sección se exponen y analizan los antecedentes disponibles de tal forma de evaluar la existencia o no de alteraciones en el comportamiento histórico de los puquios (medio físico, biótico y paisaje) a consecuencia de los hechos infraccionales relacionados con los cargos N°1 y N°7.

5.1 Medio físico

5.1.1 Nivel de agua superficial

Como se indicó en la sección 3, uno de los objetivos principales de la MM corresponde a la mantención del nivel de agua superficial en los puquios. Para verificar su estado, este parámetro es monitoreado periódicamente en cinco regletas: Re-1, R2N2 y R3N2 (ambos en puquio N2), R4N3 (puquio N3) y R5N4 (puquio N4). La ubicación de estas regletas se muestra en la Figura 2 y el comportamiento histórico del nivel del espejo de agua en ellas se presenta en la Figura 3.

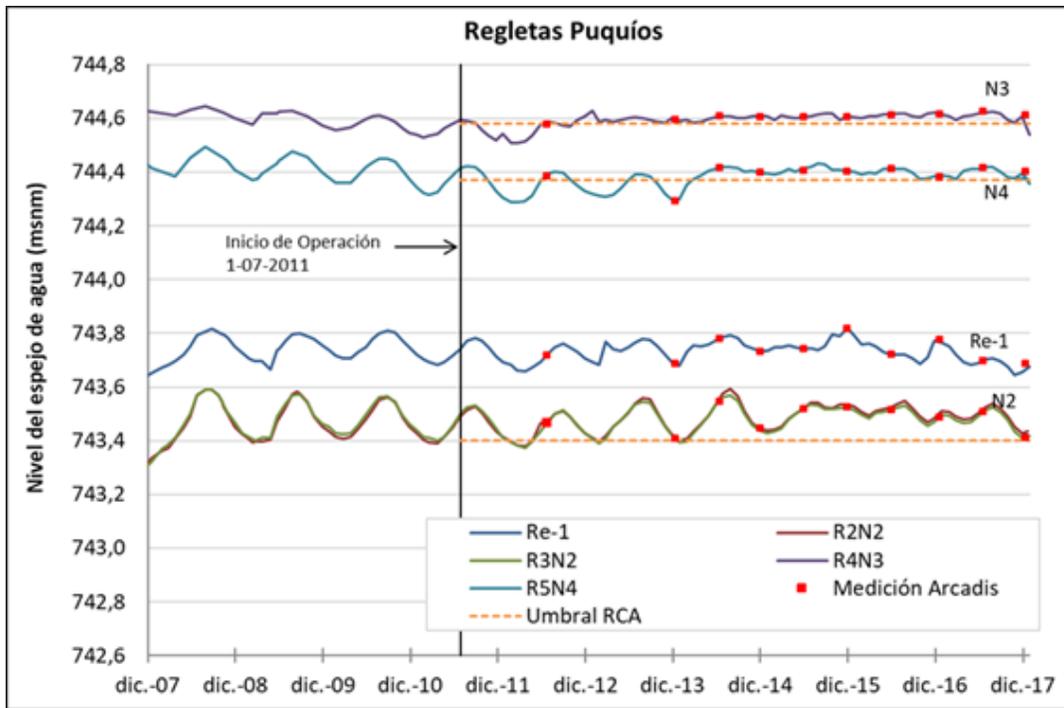
Figura 2. Ubicación de regletas, pozos de inyección definidos en la RCA, pozos de inyección construidos (a agosto 2018), y pozos de observación en el sector de los puquios.



Fuente: Arcadis, 2017.

Como puede observarse en la Figura 3 las tres regletas asociadas a la MM (R3N2, R4N3 y R5N4) se mantuvieron sobre los umbrales definidos en la RCA desde febrero de 2014 (hasta la entrada en vigencia de las medidas urgentes y transitorias)³. Esta fecha corresponde a dos meses después de que se completó la implementación de la MM (Figura 4). A partir de esta misma fecha, y hasta diciembre de 2017, la totalidad de las regletas que forman parte del seguimiento ambiental del Proyecto (Re-1, R2N2, R3N2, R4N3 y R5N4) siempre presentaron niveles dentro del rango de variación observado durante el periodo preoperacional.

Figura 3. Nivel de agua superficial registrado en los puquíos (periodo 2007 – 2017).

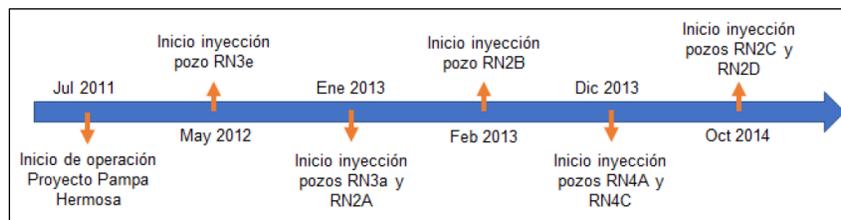


Fuente: Informe N°14 del Plan de Seguimiento Hidrogeológico del Proyecto.

³ El día 13 de diciembre se detuvo la inyección de agua en la barrera de acuerdo a lo indicado en las medidas urgentes y transitorias (MUT) dictadas por la SMA mediante Res. Ex. 1485/2017.

De acuerdo con lo anterior, **es posible señalar que la barrera hidráulica ha sido efectiva en mantener los niveles de agua superficial de los puquios dentro de los rangos de variación histórica y sobre los umbrales establecidos en la RCA**, como lo concluye el centro SMI-ICE Chile (2018) y Arcadis (2017). De todas formas, se observa que producto de la MM existe una atenuación de las variaciones estacionales con respecto a aquellas observadas en el periodo previo a la inyección (SMI-ICE, 2018), como es de esperar de acuerdo a la regla operacional establecida en la RCA, en cuanto la misma tiene por efecto “mantener los niveles de agua superficiales de los Puquios de tal forma de no afectar la biota acuática y terrestre aledaños a ellos” (considerando 7.1.1 de la RCA).

Figura 4. Línea de tiempo con los hitos más importantes referidos a la medida de mitigación. ⁴



Fuente: Arcadis, 2017.

5.1.2 Calidad del agua

La calidad del agua superficial en los puquios es monitoreada periódicamente en cuatro puntos según lo establecido en el Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH). Existen cuatro puntos de monitoreo: N1 (puquio N1), R3N2 (puquio N2), R4N3 (puquio N3) y R5N4 (puquio N4). Adicionalmente, se monitorea la calidad de agua superficial en el punto T2-23 como complemento al Seguimiento Ambiental de Biota Acuática. Los parámetros comprometidos para verificar efectos del Proyecto se presentan en la Tabla 1.

⁴ La MM comenzó a operar en mayo de 2012 con la inyección de agua en el puquio N3 (pozo RN3e) y ha permanecido en funcionamiento de manera constante desde ese entonces. Para mayores antecedentes respecto de la puesta en marcha y funcionamiento, ver Arcadis (2017).

Tabla 1. Puntos, parámetros y frecuencia de monitoreo establecidos para verificar efectos del Proyecto.

Punto de monitoreo	Parámetro		Frecuencia
R3N2 R4N3 R5N4 N1	Arsénico disuelto Bicarbonato Boro disuelto Calcio disuelto Cloruro disuelto Dureza total Magnesio disuelto Nitrato disuelto	Potasio disuelto Sólidos disueltos totales Sodio disuelto Sulfato disuelto pH de terreno CE terreno Temperatura	Mensual
R3N2 R4N3 R5N4 N1	CE SDT		Diaria (de acuerdo a lo establecido en la MM) ⁵
T2-23	Conductividad específica Salinidad Temperatura	pH Oxígeno disuelto Clorofila a	Semestral ⁶

Fuente: Elaboración propia.

Los datos generados en la línea de base y en el PSA del Proyecto, así como resultados de campañas complementarias en algunos casos, fueron analizados por tres grupos de expertos independientes. Los principales resultados y conclusiones desprendidas de estos estudios se presentan en la sección que sigue.

⁵ El Anexo II de la Adenda N°3 del EIA del Proyecto (diseño de la MM) establece: "El monitoreo de nivel y conductividad eléctrica se realizará diariamente, en tanto que el monitoreo de sólidos disueltos totales se realizará mensualmente."

⁶ En el punto T2-23 se monitorean anualmente parámetros adicionales para verificar efectos de terceros y un grupo de variables complementarias. Ellos están definidos en las tablas V.5-2 y V.5-3 del Anexo V de la Adenda N°3 del EIA del Proyecto.

Adicionalmente, en la sección subsiguiente (5.1.2.2) se presentan específicamente los resultados históricos del monitoreo de clorofila-a y nitrógeno orgánico total, discutiéndose su evolución temporal.

5.1.2.1 Análisis experto

La evolución histórica de la calidad del agua en los puquios fue analizada por tres grupos de expertos independientes: Centro Internacional de Excelencia SMI-ICE Chile (2018), Arcadis (2018a) y Reid y colaboradores (2018). A continuación, se exponen las conclusiones que son relevantes para el análisis de los hechos infraccionales.

- a) Efecto del bombeo y la MM sobre la calidad del agua superficial de los puquios (Centro Internacional de Excelencia SMI-ICE Chile, 2018)

El potencial efecto de los hechos infraccionales sobre la calidad histórica del agua fue evaluado por el Centro Internacional de Excelencia SMI ICE Chile (en adelante SMI). Específicamente, uno de los objetivos principales del estudio correspondió a: *“establecer si existe una afectación significativa a la calidad del agua de un conjunto de lagunas denominadas “Puquios” ubicadas en el Salar de Llamara, agua abajo del sector donde el proyecto de SQM tiene autorizado extraer agua”*. Para evaluar esto, se realizó un análisis de toda la información disponible del Proyecto, se revisó el modelo hidrogeológico actualizado desarrollado por Arcadis (2018b) y se desarrolló un modelo hidrogeoquímico.

El análisis de toda la información disponible de calidad del agua (periodo 2010-2018), así como su modelación geoquímica (utilizando software PhreeqC®) y un análisis mineralógico de los sedimentos de los puquios permitió concluir lo que se indica a continuación.

Respecto a la calidad del agua en los puquios:

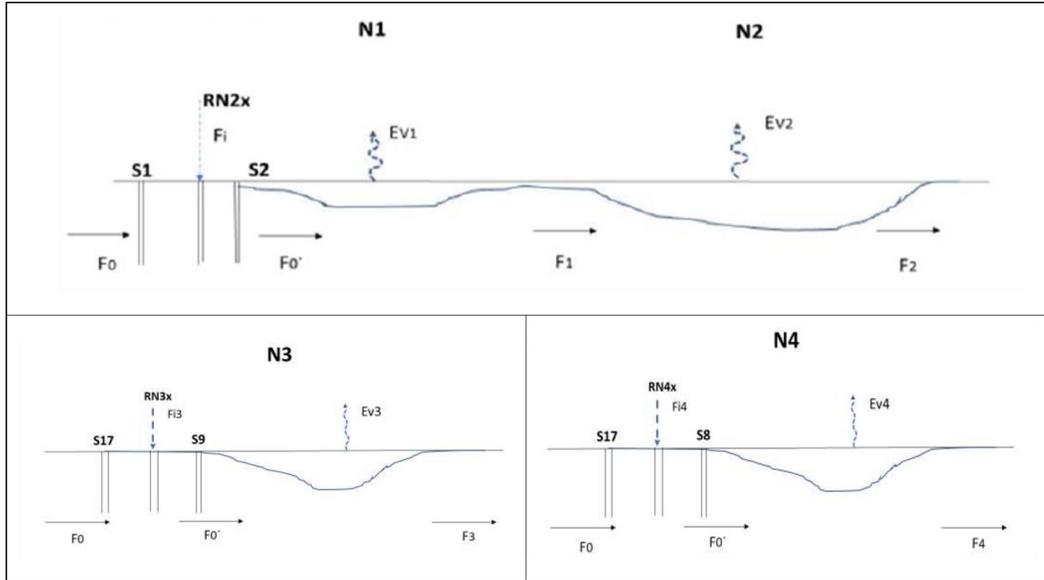
- El agua en los puquios es altamente salina y se encuentra generalmente saturada respecto a yeso, calcita y dolomita. Esto es relevante, toda vez que el yeso es un mineral de alta importancia para el ecosistema, como se explicará en el literal c) de esta sección.

- La concentración de iones disueltos presenta una alta variabilidad espacial. Las concentraciones son menores en los puquios N1 y N3 y significativamente mayores en los puquios N2 y N4 (Figura 6).
- La concentración de iones disueltos presenta una alta variabilidad estacional. En verano se puede alcanzar valores que superan en más de 30% al promedio (Figura 6). Esto confirma que la hidroquímica del sistema está controlada por la evaporación.
- La inyección de agua como MM en el sector de los puquios disminuye la conductividad eléctrica (CE) en los pozos de observación cercanos a los de inyección. Sin embargo, "no se ha traducido en cambios muy significativos en la conductividad de los diferentes Puquios, que sigue variando en forma estacional, en rangos similares a aquellos observados en el periodo previo a la inyección" (Figura 6). Los puquios N3 y N4 han evidenciado el mayor efecto que corresponde a una atenuación de las variaciones estacionales de la CE.

Respecto a las aguas de inyección utilizadas en la MM:

- Existen diferencias en la concentración de sales entre el agua inyectada y el agua del acuífero somero que alimenta a los puquios. De todas formas, su naturaleza y origen son el mismo, encontrándose la diferencia exclusivamente en el grado de concentración de los iones más solubles. Esto se debe a que las aguas de inyección no se han sometido al proceso de concentración intenso producto de la evaporación en el acuífero somero. De esta manera, el ingreso del agua de inyección no difiere fundamentalmente del ingreso de agua desde el acuífero regional al somero.
- No hay posibilidad de que el agua de inyección pueda disolver las estructuras de yeso presentes en los puquios puesto que ella se encuentra saturada o próxima al punto de saturación de este mineral.

Figura 5. Modelo conceptual del sistema de los puquios N1-N2, N3 y N4 con inyección de agua (recarga artificial).⁷



Fuente: SMI-ICE-Chile, 2018 (figuras 39, 46 y 47).

Para evaluar si el agua inyectada podría alterar la calidad del agua en los puquios, se estimó su aporte relativo mediante una modelación hidrogeoquímica basada en un balance de masa simplificado (Figura 5). Esta arrojó lo siguiente:

- *Puquios N1 y N2*

La fracción del agua inyectada que efectivamente se incorpora al puquio N1 varía entre el 5 y 7% del total. Respecto al flujo que ingresa a este puquio, el agua inyectada representa entre un 20 y 25% del agua afluyente. No obstante, no altera significativamente su calidad, ya que se estima que disminuye un 20% la CE del agua que ingresa al puquio N1. Este efecto se atenúa fuertemente en

⁷ Los puquios N1 y N2 se modelaron de manera conjunta ya que forman un sistema interconectado hidráulicamente, siendo el puquio N2 alimentado por el puquio N1. Por su parte, los puquios N3 y N4 se modelaron de forma separada.

el caso del puquio N2 donde ingresa el agua del puquio N1, previamente concentrada por un intenso proceso de evaporación.

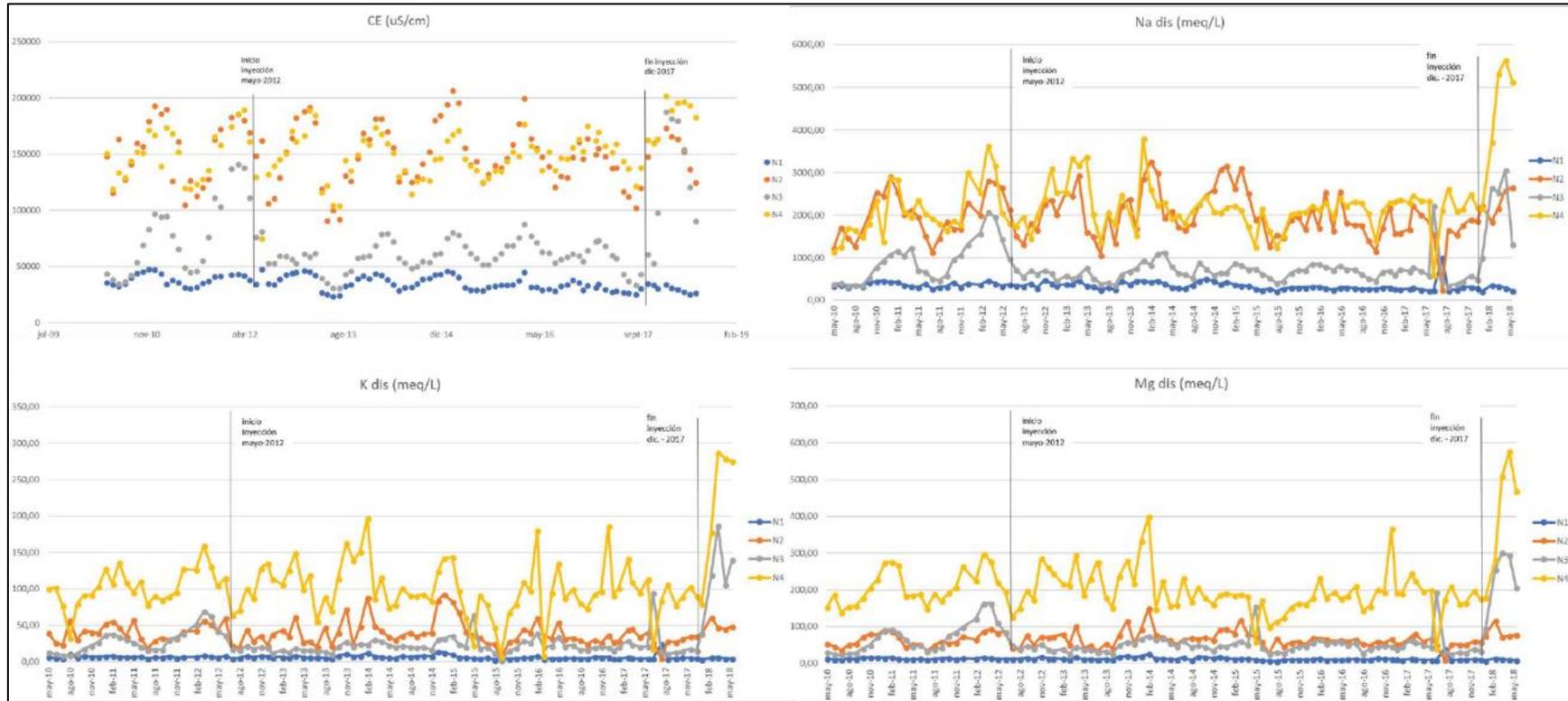
- *Puquios N3 y N4*

No fue posible cuantificar el aporte relativo de la inyección sobre la calidad del agua de los puquios dada la falta de datos consistentes de calidad del agua. De todas formas, en ambos puquios la CE en los pozos de observación ubicados antes y después de la inyección son similares, lo que indicaría que el efecto de la inyección sobre la CE es menor.

A modo de conclusión general, el estudio señala: *"De los datos analizados, se puede concluir **que no existe un efecto significativo de la inyección en la calidad química de los Puquios. Las variaciones observadas en conductividad y concentraciones se mantienen dentro de los rangos de variaciones estacionales observados en el periodo previo a la inyección**".* Ratificando esta afirmación y respecto a la eventual necesidad de controlar la calidad química del agua inyectada, el estudio concluye que *"en función de los análisis realizados respecto a los efectos de la inyección de agua en la química de los puquios y los posibles efectos futuros, no se evidencia la necesidad de contar con un sistema de control (manejo) de la calidad química del agua de inyección."*

Finalmente, indica: *"la calidad de las aguas inyectadas no tiene que ser similar a la calidad del agua de los Puquios, la cual resulta de un proceso local de concentración por evaporación, cuya intensidad difiere de un Puquio a otro, sino que debería ajustarse a la calidad de las aguas del acuífero somero que alimenta a los Puquios. Todas las aguas de la zona son aguas principalmente cloruradas sódicas, que de todas formas se van concentrando en sales disueltas por efecto del intenso proceso de evaporación. Esta calidad, si bien se ha visto alterada localmente por efecto de la inyección, no se ha modificado globalmente y **la calidad química de los Puquios se ha mantenido dentro de los rangos de variación naturales observados en el periodo previo a la inyección.**"*

Figura 6. Conductividad eléctrica, concentración de sodio, potasio y magnesio en los puquios (periodo 2010 - 2018).



Fuente: SMI-ICE-Chile, 2018 (figuras 16, 36, 37 y 38).

b) Determinación de la existencia de cambios estadísticamente significativos en la calidad del agua (Arcadis, 2018a)

El estudio realizado por Arcadis (2018a) tuvo como objetivo determinar la existencia o no de cambios estadísticamente significativos en la calidad química del agua superficial de los puquios producto de la operación de la MM.

La metodología utilizada consistió en la recopilación de toda la información de calidad del agua superficial en los puquios generada por SQM hasta el momento (EIA y Adendas, PSAH y Plan de Seguimiento Ambiental Biótico). Esta información fue dividida en dos periodos: previo a la primera prueba de inyección (hasta el 11/07/2011) y posterior a esta primera prueba (desde el 12/07/2011). Luego, los dos periodos fueron comparados mediante dos pruebas estadísticas (Mann-Whitney y Kruskal-Wallis), utilizando dos niveles de significancia ($\alpha=5\%$ y $\alpha=1\%$). El análisis se realizó a ocho parámetros considerados de relevancia para el funcionamiento del sistema: pH, CE ⁸, cloruro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y bicarbonato. En la Figura 7 se presenta un ejemplo de las series de datos analizadas.

Figura 7. Ejemplo de las series comparadas con las pruebas de hipótesis.



Fuente: Arcadis, 2018a (Figura 2-1).

A partir del análisis realizado, se encontró que **no existen diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de los parámetros de calidad del**

⁸ La CE del puquio N1 no cumple el criterio de independencia de los valores, por lo que no fue posible aplicar la metodología.

agua evaluados en los cuatro puquios. De las 31 comparaciones efectuadas, utilizando un nivel de significancia del 5%, sólo la CE en el puquio N3 y la concentración de sulfato (SO₄) y sodio (Na) en el puquio N4 presentaron diferencias. Para un nivel de significancia del 1%, sólo se evidencia un cambio estadísticamente significativo (SO₄ en el puquio N4). Los estadígrafos de los tres parámetros que presentaron diferencias significativas se presentan en la Tabla 2. Puede observarse que estos parámetros presentan una mayor concentración durante el periodo de operación de la MM.

Tabla 2. Estadígrafos de las series que presentan diferencias estadísticamente significativas.

Parámetro	Puquio	Previo a MM			Post MM		
		Media	Dev. Est.	Mediana	Media	Dev. Est.	Mediana
SO ₄ (mg/L)	N4	28.186	12.416	27.167	41.027	10.413	40.533
CE (uS/cm)	N3	49.235	22.027	40.540	65.275	19.935	55.341
Na (mg/L)	N4	40.170	11.411	37.226	49.707	8.670	48.834

Fuente: Arcadis, 2018a (Tabla 4-1).

- c) Estudios geoquímicos de las estructuras de depositación de yeso (Reid *et al.*, 2018a y 2018b)

Un componente relevante de la biota acuática presente en los puquios corresponde a los microorganismos que se encuentran asociados a las depositaciones de yeso que ahí se forman (Figura 8). De esta manera, entender los procesos geoquímicos (y biogeoquímicos) que gobiernan su formación es fundamental para evaluar los eventuales efectos que la MM podría tener sobre ellos.

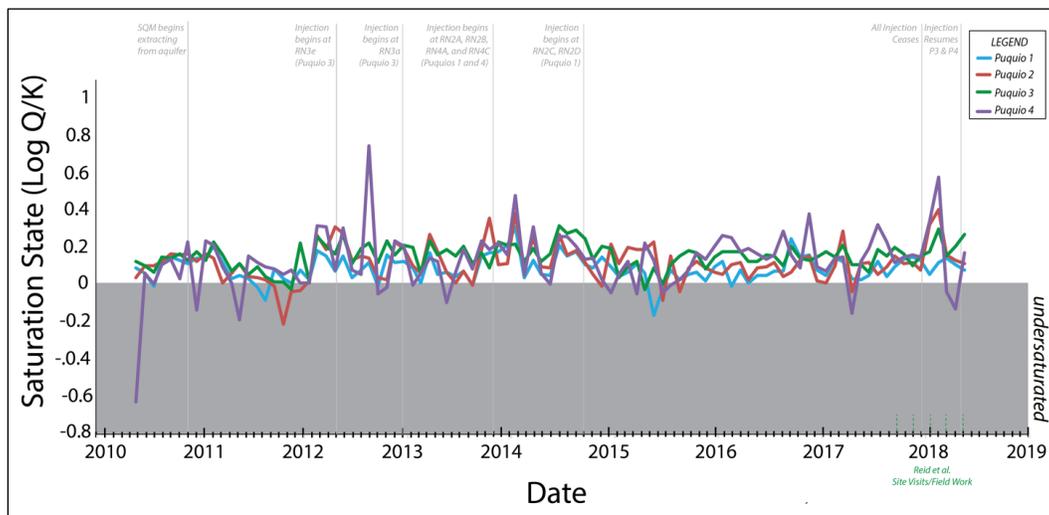
Para comprender y caracterizar los procesos que gobiernan la formación de las estructuras de yeso en los puquios, entre otros objetivos, los años 2017 y 2018 Reid y colaboradores realizaron una exhaustiva caracterización geoquímica de ellos. Dentro de su análisis, modelaron el estado de saturación de yeso en los cuatro puquios utilizando la información disponible de calidad del agua para el periodo 2010-2018 (programa Geochemist's Workbench).

Figura 8. Estructuras de deposición de yeso y comunidades de microorganismos endolíticos que habitan en ellas (puquío N2, septiembre de 2017).



Fuente: Reid *et al.*, 2018a (Figura 3). (A) Fotografía general del puquío N2, (B) Estructura dómica de deposición de yeso, (C) Comunidad endolítica asociada a la estructura de deposición de yeso.

Figura 9. Estado de saturación del yeso en los distintos puquios (periodo 2010-2018).⁹



Fuente: Reid *et al.*, 2018b (Figura 1.8).

De acuerdo a la modelación realizada, durante la mayoría del periodo bajo análisis el yeso se encontró en estado de saturación en el agua de los puquios (índice de

⁹ La zona blanca indica los valores que se encuentran sobre la saturación respecto al yeso.

saturación > 0; Figura 9). Si bien han existido algunos periodos donde el yeso se ha encontrado bajo su punto de saturación, ellos parecen ser temporalmente independientes al inicio de la inyección (Reid *et al.*, 2018b).

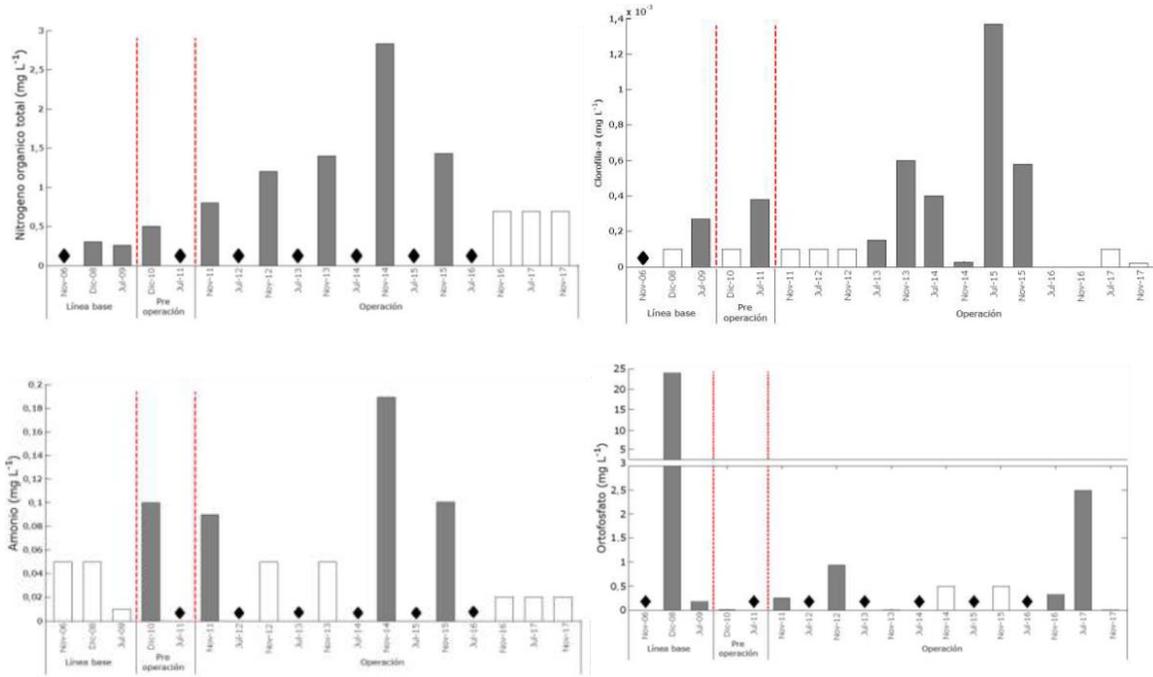
Otra conclusión relevante del estudio de Reid y colaboradores (2018b) corresponde a que el principal factor que gobernaría la precipitación de yeso en los puquios sería la concentración de calcio. Cabe notar que esta no está correlacionada con la CE (como puede observarse en la Figura 11.1 de Reid *et al.* (2018b) y tal como indica también el estudio del SMI-ICE, 2018) y que el agua de inyección se encuentra saturada respecto a este catión. De hecho, de acuerdo al SMI-ICE (2018): “La concentración de calcio se mantiene prácticamente constante desde la zona de bombeo hasta los Puquios y no hay posibilidad de que las aguas de inyección puedan disolver estructuras de yeso puesto que el agua se encuentra saturada o próxima a la saturación de sulfato de calcio (yeso).”

5.1.2.2 Otros parámetros de calidad del agua

Otros parámetros de importancia de calidad del agua corresponden a la clorofila-a y nutrientes (nitrógeno y fósforo), que son indicadores y afectan, respectivamente, la biota presente en los sistemas acuáticos. Estos parámetros se han monitoreado, de acuerdo a lo establecido en la RCA, en un solo punto ubicado en el puquio N2: T2-23. Los resultados obtenidos en el marco del PSA se presentan en la Figura 10.

La concentración de clorofila-a, nitrógeno orgánico total (NOT), fosfato y amonio presenta una alta variabilidad entre los distintos monitoreos, sin evidenciar tendencias temporales (Figura 10). Se puede notar que la concentración de clorofila-a se ha encontrado históricamente dentro del rango oligotrófico (<3,5 µg/L, Smith *et al.*, 1999) y no se correlaciona con la concentración de nutrientes. De esta manera, no hay antecedentes que indiquen que exista un comportamiento distinto entre el periodo preoperacional y de operación de la MM, por lo que no se verificarían efectos en este sentido.

Figura 10. Concentración de clorofila-a y nutrientes en el punto T2-23¹⁰.



Fuente: Informe N°8 del Plan de Seguimiento Ambiental, 2017 (monitoreo biótico y calidad de agua).

Si bien en el periodo 2008-2015 se observa un aumento en la concentración de NOT, esta luego vuelve a los valores observados en el periodo preoperacional. En este sentido, el Segundo Tribunal Ambiental en la Sentencia Rol R N°160-2017 con fecha 21 de agosto de 2018, específicamente en los párrafo centésimo undécimo y centésimo decimotercero, sostiene que el aumento de la concentración de clorofila-a y de NOT observado en el periodo 2008 - 2015 no correspondería a un efecto directo ni indirecto de los hechos constitutivos de infracción, pudiendo ellos deberse a otras causas. En relación al mismo punto, la sentencia cuestiona la comparación de muestras sin representatividad estadística y la utilización de muestras puntuales para formular conclusiones generales.

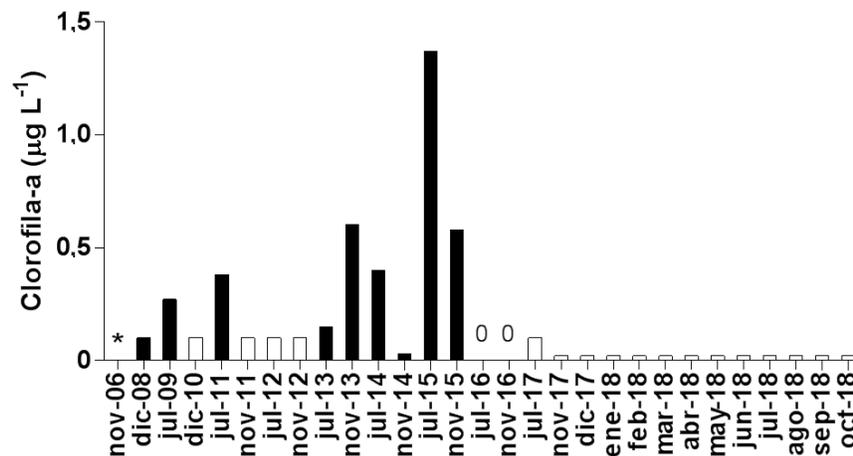
¹⁰ Los rombos indican que la variable no fue determinada. Las barras blancas corresponden a valores bajo el límite de detección

Se debe notar que dado que el sistema presenta una alta variabilidad temporal y espacial, el análisis anterior presenta algunas limitaciones, ya que el seguimiento del sistema puquios sólo se ha realizado en un punto de monitoreo y con baja frecuencia temporal (CAPES-UC, 2018). Sin perjuicio de lo anterior, esta situación quedó así definida en la RCA del Proyecto.

En el marco de la medida urgente y transitoria (MUT) dictada por la SMA, se solicitó a SQM ampliar el número de puntos de monitoreo y la frecuencia del mismo. De esta manera, desde diciembre de 2017 se realiza un monitoreo mensual de la concentración de clorofila-a y otros parámetros de calidad del agua en los cuatro puquios. Los resultados de este monitoreo, desarrollado por Fisiaoqua (2018) se presentan en la Figura 12 y Figura 11.

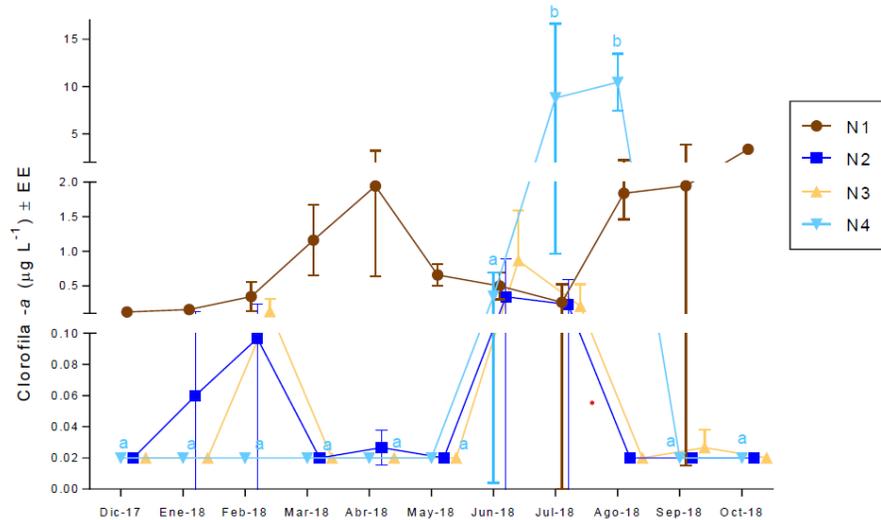
Como puede observarse, en el periodo diciembre 2017 – octubre 2018, la mayoría de los puquios ha presentado una concentración de clorofila-a dentro del rango oligotrófico. La única excepción corresponde al puquio N4 en los meses de julio y agosto de 2018. Si bien la concentración de clorofila-a se mantiene dentro de un rango acotado, igualmente se observa la existencia de una variación temporal y espacial. El punto de medición T2-23 por su parte, presenta concentraciones bajo el límite de detección durante todo este último periodo.

Figura 11. Evolución temporal de la concentración de clorofila-a en el puquio N2 (punto T2-23).



Fuente: Fisiaoqua, 2018 (Figura 5.2).

Figura 12. Variación temporal en la concentración de clorofila-a en los cuatro puquios durante la MUT¹¹.



Fuente: Fisisoagua, 2018 (Figura 5.9).

A partir de todos los análisis presentados en esta sección, es posible indicar que la MM ha actuado de acuerdo a lo previsto en la RCA y no se verifican efectos significativos sobre el comportamiento histórico de calidad del agua toda vez que:

- Las variaciones observadas en CE y concentraciones de iones mayoritarios se mantienen dentro de los rangos de variaciones estacionales naturales observados en el periodo previo a la inyección (SMI-ICE, 2018).
- No existen diferencias estadísticamente significativas entre el periodo previo a la inyección y el periodo operacional de la MM en la mayoría de los parámetros de calidad del agua analizados en los cuatro puquios (Arcadis, 2018a).

¹¹ Valores corresponden a promedios de cinco puntos por cada puquio. Ausencia de letras o misma letra de igual color denota inexistencia de diferencias significativas entre fechas de muestreo.

- El agua en los puquios es altamente salina y se ha encontrado históricamente saturada respecto a yeso (SMI-ICE, 2018 y Reid *et al.*, 2018b), con pocas excepciones, por lo que las estructuras de yeso no se verían alteradas.
- No hay posibilidad de que el agua de inyección pueda disolver las estructuras de yeso puesto que ella se encuentra saturada o próxima al punto de saturación de este mineral. Además, el agua de inyección es de la misma naturaleza que el agua de los puquios (SMI-ICE, 2018).
- Los parámetros clorofila-a y concentración de NOT en el punto de monitoreo T2-23 presentan una alta variabilidad entre los distintos monitoreos, sin evidenciar tendencias temporales. Además, la concentración de clorofila-a se ha encontrado históricamente en el rango oligotrófico (T2-23). Respecto a las mediciones de clorofila-a realizadas en los cuatro puquios (periodo 2017-2018), la mayoría presentan concentraciones dentro del rango oligotrófico. La única excepción corresponde al puquio N4 en los meses de julio y agosto de 2018.

5.2 Medio biótico

5.2.1 Vegetación higromorfa

El estudio realizado por Geobiota el año 2016 analizó el comportamiento de la cobertura de la vegetación higromorfa en los puquios para el periodo comprendido entre julio de 2011 (campaña preoperacional) y julio de 2016. Para llevar a cabo este análisis, utilizaron los registros históricos de los monitoreos del PSA, los cuales se efectúan en nueve transectos (LL-1, LL-2, LL-3, LL-4, LL-5, LL-6, LL7, LL8 Y LL-9).

Los resultados dan cuenta que los registros más bajos de porcentaje de cobertura vegetal no coinciden con los periodos indicados en la formulación de cargos, y que la cobertura de vegetación ha mostrado un aumento en los últimos años. Por lo tanto, Geobiota concluye que no se generaron efectos negativos sobre la vegetación higromorfa.

La Tabla 3 muestra el porcentaje de cobertura de vegetación para cada grupo de transectos durante el periodo 2011-2016.

Tabla 3. Estado de la vegetación higromorfa (periodo 2011 – 2016).

Transecto	% Cobertura de Vegetación					
	Julio 2011	Julio 2012	Julio 2013	Julio 2014	Julio 2015	Julio 2016
LL-1, LL-2, LL-3	31,4	25,6	16,3	19,2	25,9	40,5
LL-4, LL-5	6,9	14,2	6,7	12,3	18,3	29,5
LL-6, LL-7, LL-8, LL-9	12,0	8,1	5,9	6,3	9,2	14,2

Fuente: Elaboración propia en base a Geobiota, 2016.

Los resultados del análisis antes efectuado se encuentran refrendados por la propia SMA mediante la Res. Ex. N°9/ROL N°D-027-2016, específicamente en el numeral 74. En dicho numeral se indica que, para los impactos:

"Alteración del hábitat para especies de flora en los puquios del Salar de Llamara" (Impacto 23), "Alteración de hábitat para la fauna en los puquios del Salar de Llamara" (Impacto 28) y "Alteración de la calidad visual del paisaje de la unidad N°2 Salar de Llamara" (Impacto 41), la empresa acompañó el Informe "Estado actual de la vegetación higromorfa, paisaje y fauna en los Puquios de Llamara" (Anexo 2.A). Este informe concluye que, tanto para la vegetación higromorfa que crece alrededor de los puquios e indirectamente sobre la fauna, no se han producido efectos negativos producto de no implementar la medida de mitigación de implementación de la barrera hidráulica ni activar el PAT.(...) En consecuencia, se concluye que, al no haber un daño en estas componentes, se descarta, a su vez, cualquier impacto a la fauna terrestre que se ubica en los alrededores de los puquios, dado que, se han observado ejemplares que se registraban en la línea base y no se ha modificado la vegetación que, a su vez, pueda generar una modificación en el hábitat. Al respecto, esta Superintendencia hace presente que no tiene reparos en relación a lo planteado en el referido Anexo 2.A sobre que no se constata un efecto sobre los componentes evaluados en dicho documento."¹²

¹² Énfasis agregado.

5.2.2 Fauna terrestre

El estudio realizado por Geobiota (2016) analizó el comportamiento histórico de la fauna terrestre. Como parte del análisis, se compararon los resultados de la campaña realizada el año 2013 con la realizada el año 2015 (Tabla 4). Encontraron que, si bien la abundancia disminuyó en 7 ejemplares, la frecuencia disminuyó solamente en una especie (*Pluviales dominica*), la cual corresponde a una especie migratoria, lo que explica su ausencia. Junto con esto, se destaca que existen otras temporadas, incluyendo la preoperacional, en donde no se registraron especies y se encuentran fuera del período de incumplimiento de las medidas impuestas por la RCA. De esta manera, se concluyó que la fauna no ha sido afectada por el hecho infraccional.

Los resultados del análisis antes efectuado también se encuentran refrendados por la SMA, mediante la Res. Ex. N°9/ROL N°D-027-2016, específicamente en el numeral 74, el cual fue presentado *in extenso* en la sección 5.2.1.

Tabla 4. Abundancia absoluta de aves acuáticas en el Salar de Llamara.

Estación de monitoreo	Hábitat	Nombre científico	Abundancia (n° individuos)					
			2010	2011	2012	2013	2014	2015
10	Lagunas	<i>Calidris bairdii</i>	0	0	0	4	2	2
		<i>Charadrius alticola</i>	0	0	0	4	1	0
		<i>Pluvialis dominica</i>	0	0	0	2	1	0
		<i>Tringa melanoleuca</i>	0	0	0	0	1	0
11	Lagunas	<i>Calidris bairdii</i>	2	0	1	1	3	1
		<i>Pluviales dominica</i>	0	0	0	0	1	0
		<i>Charadrius alticola</i>	0	0	0	0	0	1

Fuente: Geobiota, 2016.

5.2.3 Biota acuática

La biota acuática de los puquios, de acuerdo a la línea de base del Proyecto (capítulo 5.6 del EIA), se caracteriza por la presencia de fitobentos, fitoplancton,

macrozoobentos, zooplancton y tapetes microbianos (microorganismos asociados a las estructuras de yeso, ver Figura 8).

De acuerdo a lo anterior, el PSA (Sección V.8 del Anexo V de la Adenda N°3 del EIA) estableció que la verificación del estado de la biota acuática en el sistema de los puquios se debe realizar a través del monitoreo semestral de los componentes: fitobentos, fitoplancton, macrozoobentos y zooplancton, en el punto de medición T2-23 (puquio N2).

Respecto a los tapetes microbianos, la RCA estableció que se debía realizar un estudio por una sola vez para identificar los grupos funcionales de bacterias presentes en los tapetes microbianos de los puquios “y su distribución en el norte de Chile”, a ser entregado dos años luego de obtenida la RCA. Este estudio fue realizado el año 2012 (Farías y Contreras, 2013).

El análisis del comportamiento histórico de los componentes de la biota acuática de los puquios que se presenta a continuación, se divide en dos secciones. La primera da cuenta de la evolución temporal de los componentes que son parte del seguimiento ambiental y la segunda presenta estudios realizados a la fecha que caracterizan el estado actual y funcionamiento de los microorganismos asociados a las estructuras de yeso.

Comportamiento histórico de las variables monitoreadas en el PSA

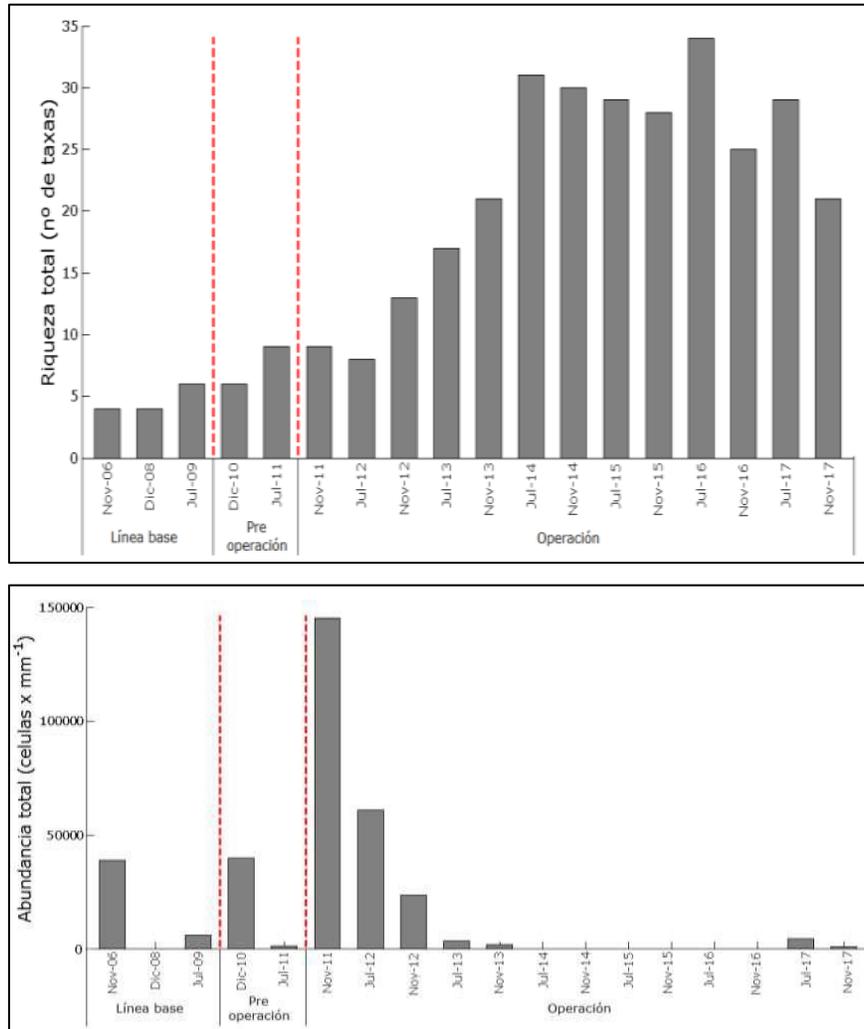
a) Fitobentos

En la Figura 13 se presenta la evolución histórica de la riqueza y abundancia de fitobentos en el punto de medición T2-23.

Entre el periodo 2006-2017 se observa un aumento en la riqueza total. Este aumento podría explicarse por un cambio en la metodología relacionado con el cambio de laboratorios que efectuaron los análisis [CEA (hasta 2013) y Fisiaqua (desde 2014)] y también por la variabilidad natural propia del sistema.

Respecto de la abundancia total, no se observa una tendencia en el mismo periodo. Los valores observados durante el periodo de operación de la MM se encuentran dentro del rango histórico.

Figura 13. Riqueza y abundancia total de fitobentos (periodo 2006-2017).



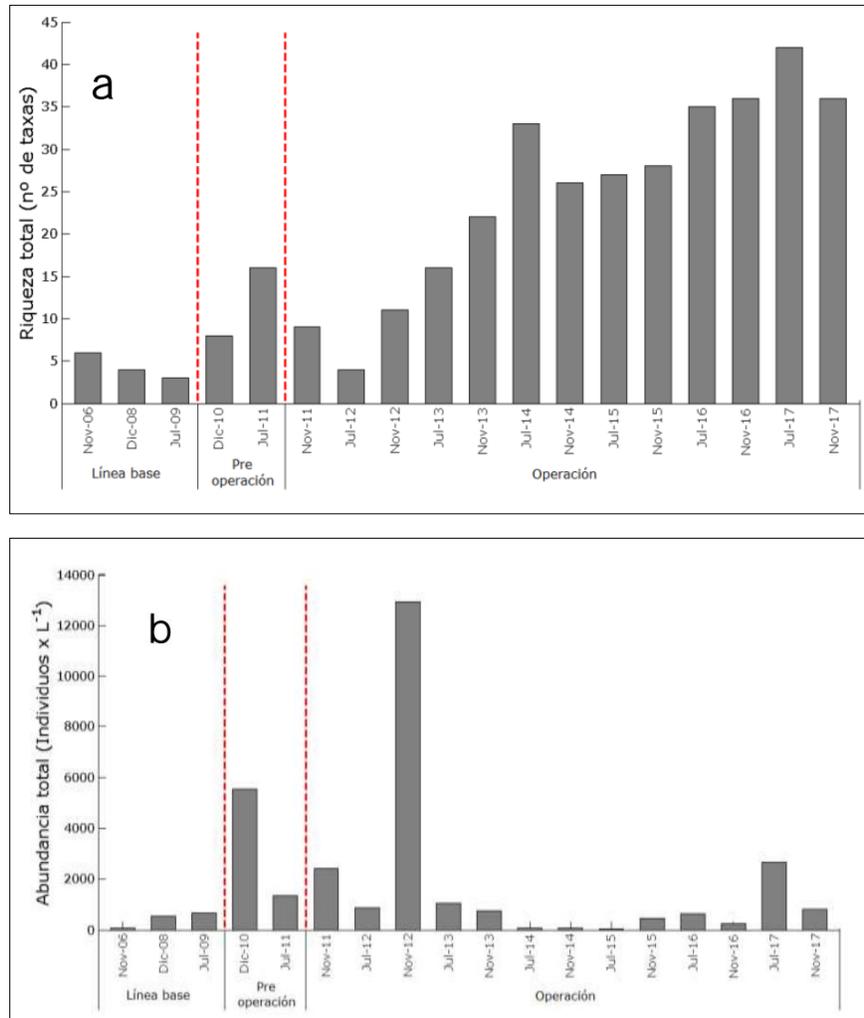
Fuente: Informe N°8 del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico (Geobiota, 2017).

b) Fitoplancton

En la Figura 14 se presenta la evolución histórica de la riqueza y abundancia de fitoplancton en el punto de medición T2-23.

Al igual que lo observado en los fitobentos, entre el periodo 2006-2017 se observa un aumento en la riqueza total. Este aumento podría explicarse por un cambio en la metodología y también por la variabilidad natural propia del sistema. Respecto de la abundancia total, se observan valores variables sin tendencia alguna.

Figura 14. Riqueza y abundancia total de fitoplancton (periodo 2006-2017).



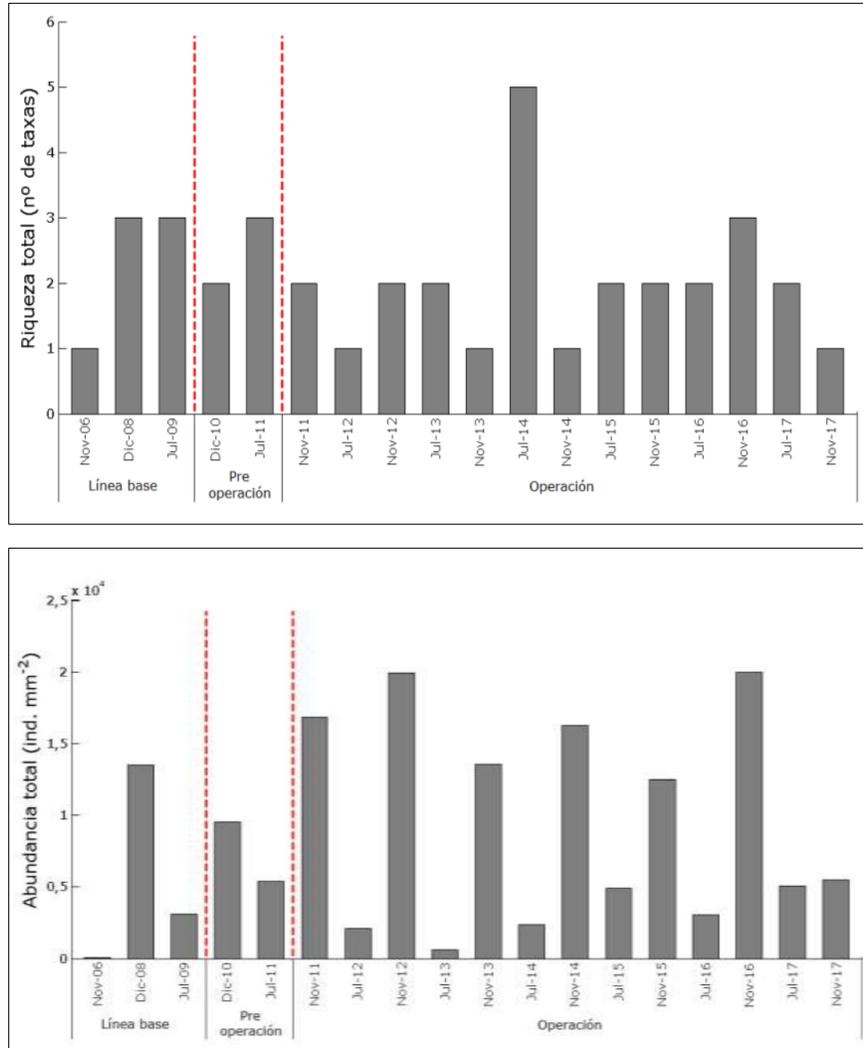
Fuente: Informe N°8 del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico (Geobiota, 2017).

c) Macrozoobentos

En la Figura 15 se presenta la evolución histórica de la riqueza y abundancia de macrozoobentos en el punto de medición T2-23.

Con la excepción de un valor *peak* en noviembre de 2014, la riqueza durante el periodo de operación de la MM se ha mantenido dentro del rango observado históricamente. Por su parte, la abundancia presenta valores que oscilan sin evidenciar tendencias.

Figura 15. Riqueza y abundancia total de macrozoobentos (periodo 2006-2017).

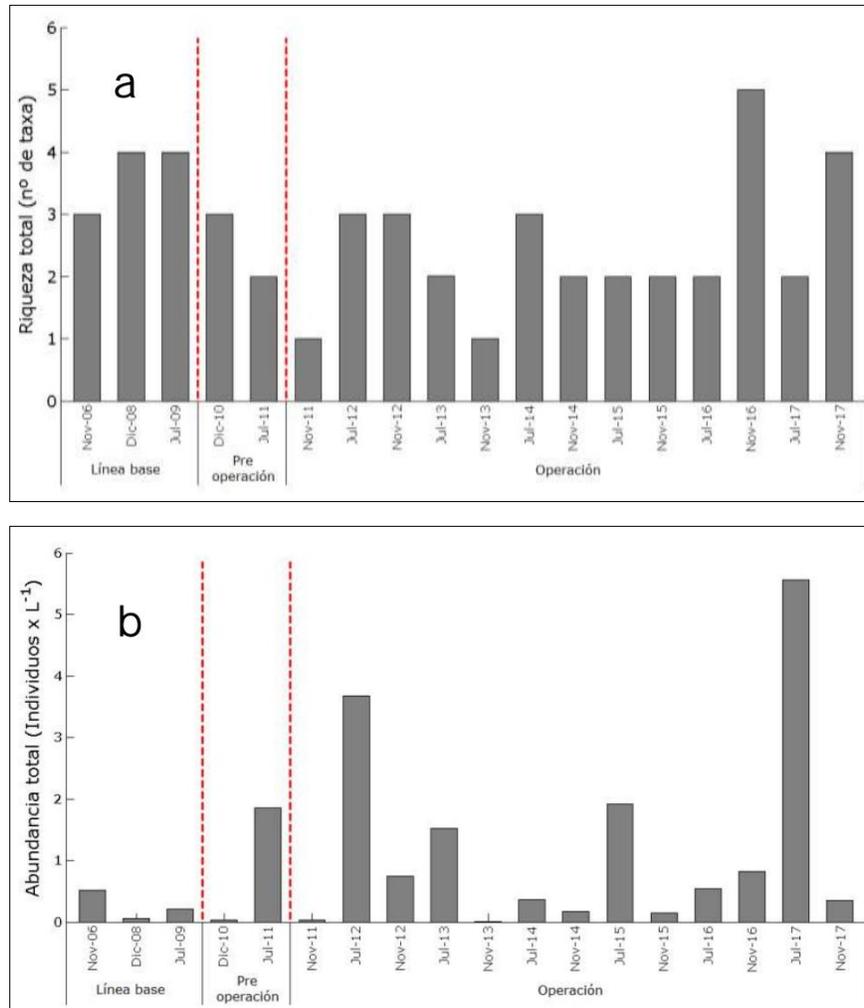


Fuente: Informe N°8 del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico (Geobiota, 2017).

d) Zooplancton

En la Figura 16 se presenta la evolución histórica de la riqueza y abundancia de zooplancton en el punto de medición T2-23.

Figura 16. Riqueza y abundancia total de zooplancton (periodo 2006 – 2017).



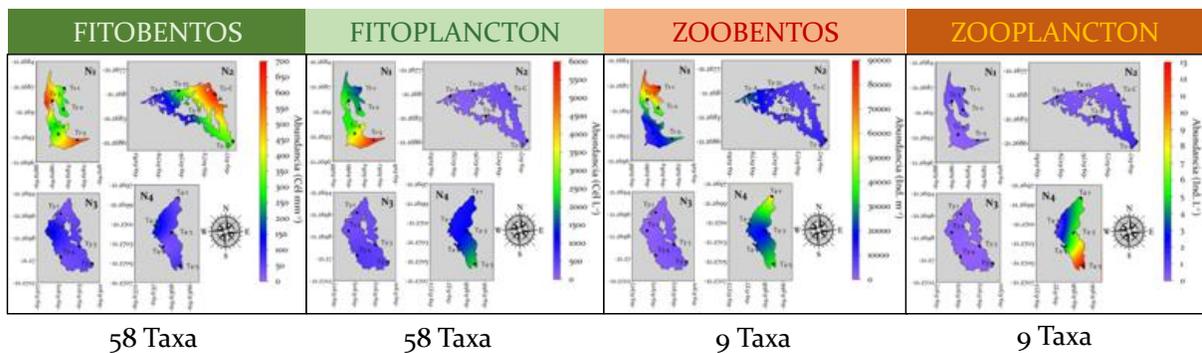
Fuente: Informe N°8 del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico (Geobiota, 2017).

La riqueza ha presentado pequeñas oscilaciones, no evidenciando cambios entre el periodo preoperacional y de operación de la MM. Por su parte, con la excepción de un valor *peak* registrado en julio de 2017, la abundancia durante el periodo de operación de la MM también se ha mantenido dentro del rango observado históricamente.

Respecto a los hallazgos encontrados en el PSA antes referido, en términos generales, los componentes analizados se han mantenido dentro de los valores históricamente observados. La única excepción corresponde a la riqueza de

fitoplancton y fitobentos, que presentan un aumento después del comienzo de la operación de la MM. Este aumento podría explicarse por un cambio en la metodología y también por la variabilidad natural propia del sistema.

Figura 17. Variabilidad espacial de la abundancia de la biota acuática¹³ (noviembre de 2017).



Fuente: Elaboración propia en base a estudios en desarrollo (SQM).

El análisis del comportamiento histórico de la biota acuática debe interpretarse considerando que las observaciones corresponden a muestras obtenidas en un solo punto de muestreo (T2-23), visitado dos veces por año¹⁴. Por lo tanto, si bien se pueden apreciar ciertas variaciones, no es posible indicar la existencia de diferencias entre los monitoreos, que sean significativas desde el punto de vista estadístico.

Lo anterior cobra especial relevancia dada la alta variabilidad tanto espacial como temporal observada en los puquios. La alta variabilidad espacial del sistema queda reflejada, por ejemplo, en los resultados de la campaña realizada en noviembre de 2017 por Fisiaqua. En ella, se recolectaron muestras en cinco puntos de cada uno de los cuatro puquios (n=20) y se analizó la abundancia de fitobentos,

¹³ Interpolación espacial a partir de cinco puntos de muestreo en cada uno de los cuatro puquios

¹⁴ PSA biota acuática con campañas en julio y noviembre de cada año.

fitoplancton, zoobentos y zooplancton. Como se observa en la Figura 17, existe una alta variabilidad tanto intra como inter puquios.

La limitación de la metodología antes referida es recogida en el informe del CAPES-UC (2018). No obstante, y tal como fue señalado anteriormente, fue la propia RCA la que estableció que el monitoreo semestral en este punto es suficiente para verificar el estado de la biota acuática.

Estructuras deposicionales de yeso

- a) Análisis metagenómico de los microorganismos asociados a las formaciones de yeso (CBAR, 2018)

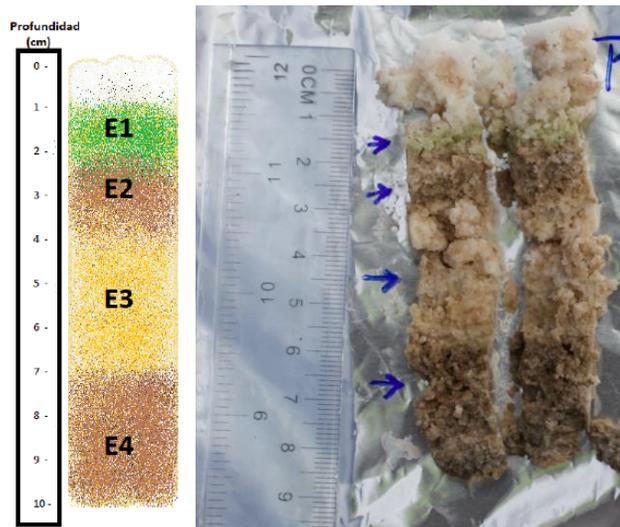
El Centro de Biotecnología de la Universidad Católica del Norte (CBAR) realizó un estudio metagenómico de los microorganismos asociados a las estructuras de depositación de yeso en los puquios. Para ello, se realizaron mediciones *in situ* (temperatura, pH, oxígeno disuelto, CE, salinidad, radiación PAR y UV) y se recolectaron muestras desde los puquios N1, N3 y N4 en enero de 2018. Estas muestras corresponden a testigos (10 cm) extraídos desde las estructuras de depositación de yeso utilizando un taladro equipado con un tubo perforante recolector (Figura 18).

Las estructuras depositacionales de yeso presentan una clara estratificación. Por ello, las muestras recolectadas fueron divididas en cuatro partes: E1: estrato de color verde ubicado aproximadamente a 1 cm bajo la capa blanca superficial, E2: estrato marrón, E3: estrato marrón claro y E4: estrato marrón oscuro (más profundo). En la Figura 18 se presenta una muestra donde se evidencian los cuatro estratos.

A cada uno de los cuatro estratos se le extrajo ADN, el que fue secuenciado y las secuencias obtenidas fueron posteriormente analizadas bioinformáticamente. Se realizaron dos tipos de análisis bioinformáticos: taxonómico y funcional. Los resultados más relevantes se presentan a continuación.

En cuanto a la diversidad de microorganismos presentes, el número total de especies¹⁵, se observa dentro del mismo orden de magnitud en todos los puquios (entre 136 y 256). Todas las muestras presentan una alta diversidad (índice de Simpson > 0,75) y no se observan relaciones evidentes entre la diversidad y la ubicación de la muestra. Además, el índice de equitatividad de Pielou indica una distribución homogénea en cuanto a la abundancia de las especies. La única muestra que presenta un comportamiento levemente distinto corresponde al estrato 2 en el puquio N1 (P1E2), el que presenta una menor diversidad de especies y un mayor número de microorganismos dominantes.

Figura 18. Esquema de los estratos de las depositaciones de yeso y testigo extraído en terreno.



Fuente: Elaboración propia a partir de CBAR, 2018 (Figura 5 y Figura 2 del anexo de registro fotográfico).

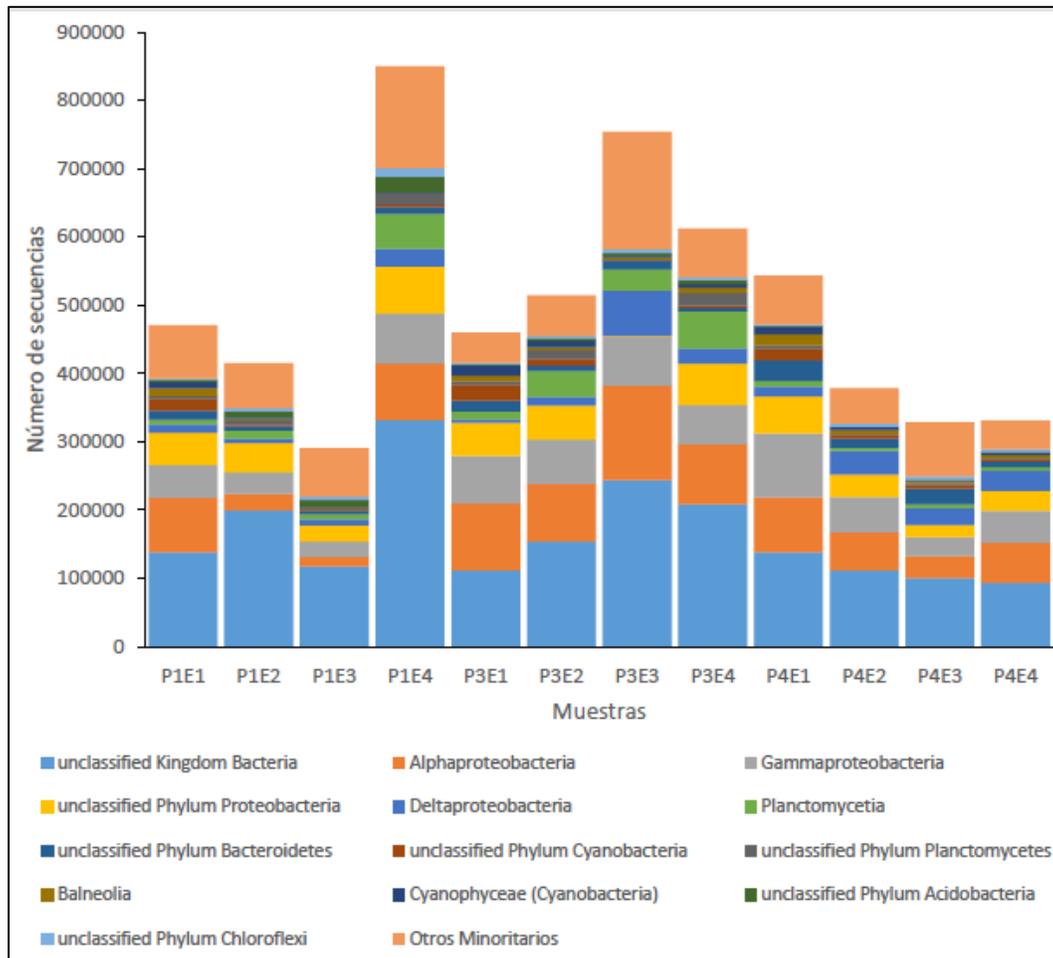
Respecto a la composición de las comunidades microbianas, la mayor parte de las secuencias encontradas corresponde al grupo Proteobacteria, mientras que los microorganismos del tipo Cyanobacteria se observan mayoritariamente en el

¹⁵ ORFs por ser clasificados dentro de un mismo taxón.

primer estrato (E1). En la Figura 19 se presenta la abundancia de microorganismos por clase para cada una de las muestras.

Al agrupar las muestras por grado de similitud (Figura 20), se observa una clara agrupación por puquio (excepto para la muestra P3E3). Las muestras provenientes del primer estrato agrupan entre sí, sugiriendo que la composición de las comunidades presentes en esta capa es altamente similar para todas las muestras provenientes de los tres puquios.

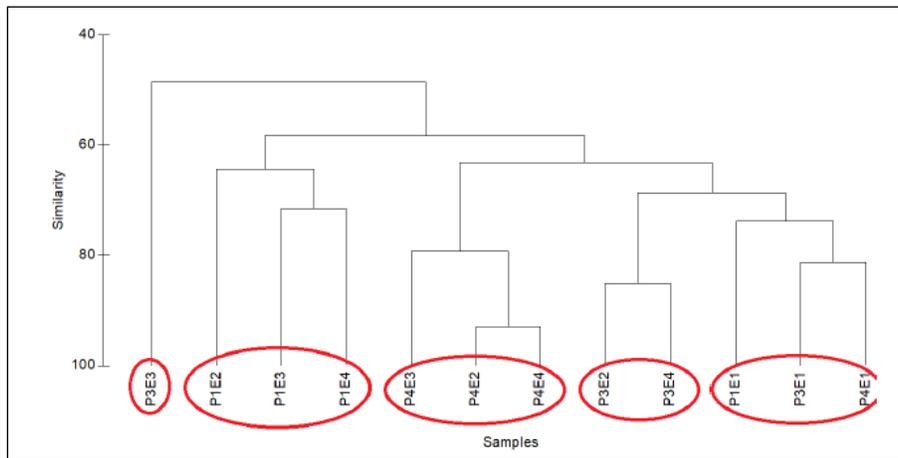
Figura 19. Abundancia de microorganismos por clase.



Fuente: CBAR, 2018 (Figura 21).

Dentro de la comunidad bacteriana de los puquios, la presencia de microorganismos fototróficos oscila entre el 2 y 25 % y son más abundantes en la primera capa. Están compuestos por microorganismos de los filos: Proteobacteria, Cyanobacteria (especialmente abundante en E1) y Chloroflexi, siendo el filotipo Alphaproteobacteria el mayoritario. La presencia de diatomeas sólo se observó en la capa verde del puquio N1, que es el que presenta menor salinidad. El resto de los microorganismos eucariotas evidenciados corresponden a hongos.

Figura 20. Análisis de similitud entre las muestras basado en su taxonomía (puquios N1, N3 y N4).

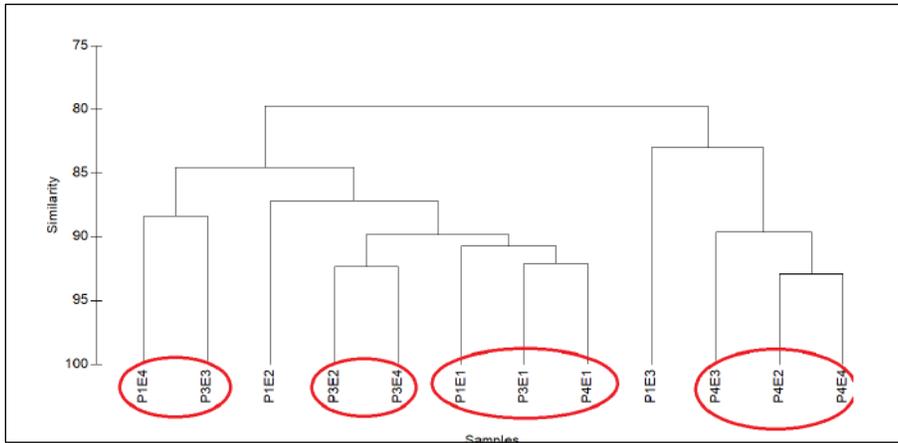


Fuente: CBAR, 2018 (Figura 22). En rojo pueden observarse las agrupaciones.

Por su parte, el análisis funcional indica que las categorías funcionales mayoritariamente representadas corresponden a “Aminoácidos y derivados”, “Cofactores, vitaminas, grupos prostéticos, pigmentos”, “Carbohidratos” y “Metabolismo de proteínas”. Se observa un enriquecimiento de los grupos relacionados con las funciones “Fotosíntesis” y “Sistema Plastidial de Transporte de Electrones” en el estrato verde (E1) de los tres puquios analizados.

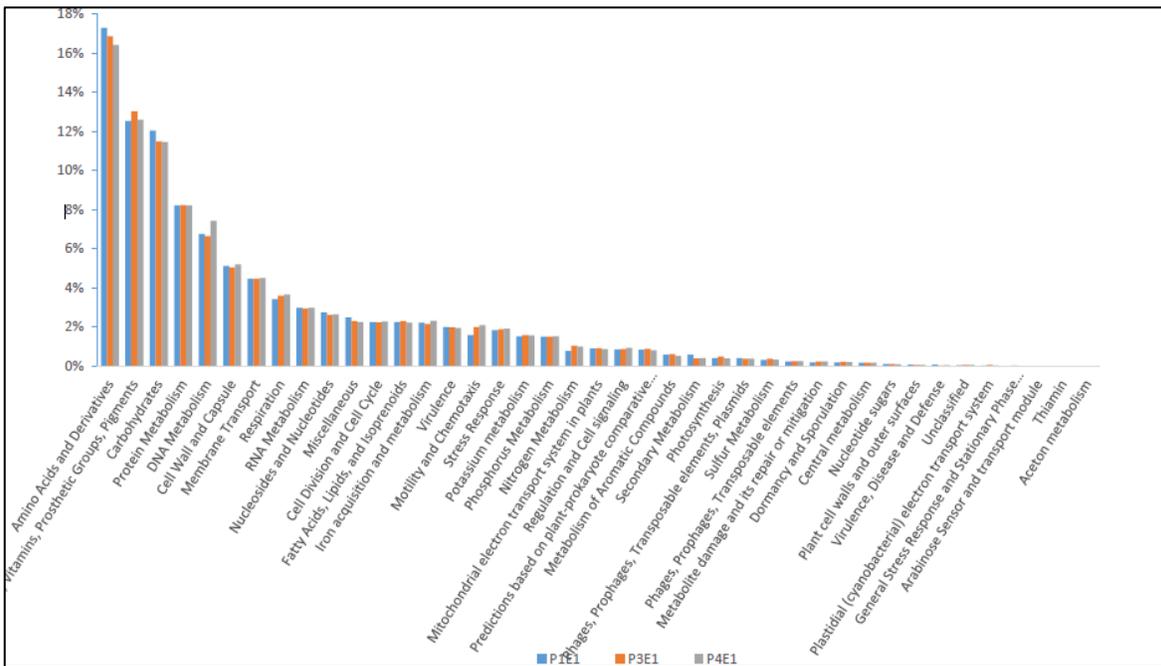
Un hallazgo relevante es que existe una alta similitud de categorías funcionales entre las muestras de todos los puquios, que supera generalmente el 80% (Figura 21). Al igual que para la composición taxonómica, las muestras con mayor similitud corresponden a las del estrato verde (E1). En la Figura 22 se presenta, a modo de ejemplo, una comparación de categorías funcionales para la capa E1.

Figura 21. Análisis de similitud entre las muestras basado en la asignación funcional (puquios N1, N3 y N4).



Fuente: CBAR 2018 (Figura 39).

Figura 22. Comparación de categorías funcionales para la capa E1 de los puquios.



Fuente: CBAR, 2018 (Figura 41).

A partir de los resultados obtenidos, los autores concluyen lo siguiente:

- *“En los resultados que reportamos se observa una similitud entre las muestras analizadas que supera el 50%, y respecto de la asignación funcional, la similitud supera el 80% revelando una redundancia funcional que es una propiedad de los sistemas microbianos abiertos como el sistema del Salar de Llamara que resultan de interacciones bióticas y con el ambiente.”*
- *“El análisis metagenómico de los sistemas de depositación de yeso en el Salar de Llamara revela la presencia de más de un 30% de microorganismos no representados en la base de datos. En ese contexto los microorganismos más abundantes pertenecen a los filos Proteobacterias (Alpha y Gamma), Plantomycetes y Cyanobacterias (Oscillatoriales y Nostocales), lo que se asemeja a lo encontrado en estudios previos.”*
- *“Los resultados de la investigación permiten establecer que las comunidades microbianas son determinadas en gran medida por el puquio al que pertenecen y que existe, además, una clara similitud, tanto de acuerdo a la asignación funcional como a la taxonómica, entre las comunidades presentes en la capa verde de todos los puquios. La persistencia de la diversidad taxonómica y funcional de la capa verde respecto de las otras capas indica que ésta podría ser utilizada como referente del sistema.”*

Del análisis metagenómico efectuado se desprende que existe una alta similitud de grupos funcionales entre puquios. Adicionalmente, que existe una alta similitud también en la composición taxonómica entre los estratos de una misma estructura de yeso. Finalmente, que la capa verde de todos los puquios presenta un alto grado de similitud tanto en cuanto a su composición taxonómica como a los grupos funcionales presentes.

b) Análisis biogeoquímico de los puquios (Reid *et al.*, 2018a y 2018b)

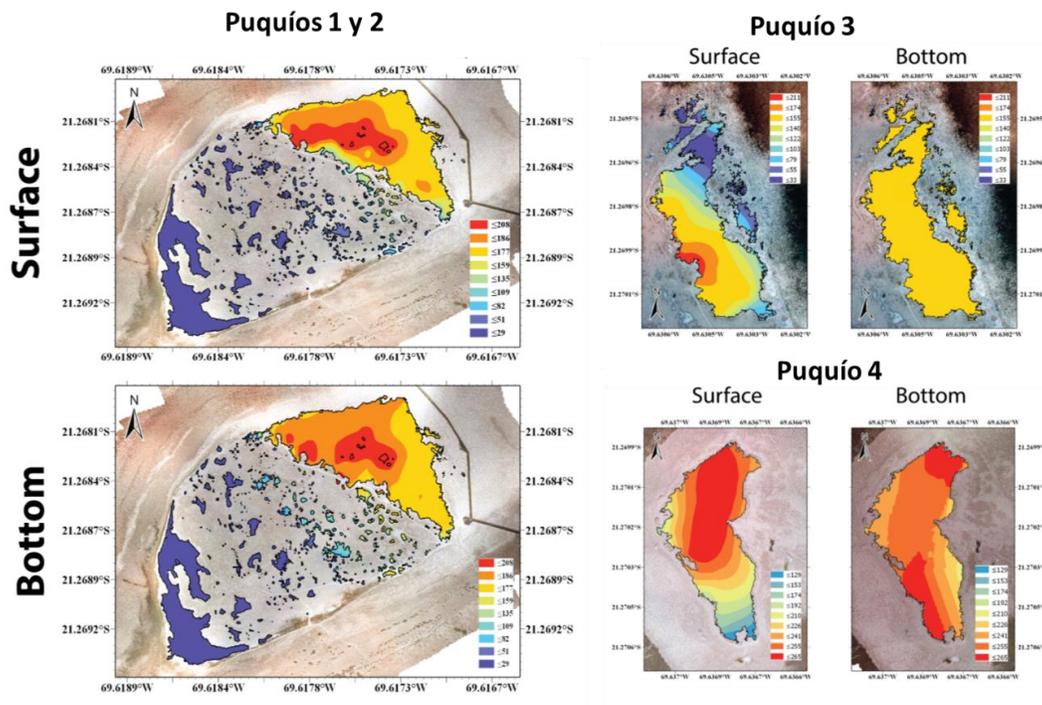
Como se indicó en la sección 5.1.2 (efectos sobre la calidad del agua), el año 2017 y 2018 Reid y colaboradores realizaron una caracterización biogeoquímica de los puquios. Entre otros aspectos, caracterizaron la distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del agua de los puquios mediante un mapeo de alta resolución acoplado con mediciones *in situ* de parámetros fisicoquímicos a distintas

profundidades (pH, CE, oxígeno disuelto; Reid *et al.*, 2018a y Reid *et al.*, 2018b). Además, utilizaron mapeo multiescala del fondo, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) para estudiar el origen de los distintos tipos de sustrato (Reid *et al.*, 2018b). Los resultados más relevantes son los que se presentan a continuación.

Respecto a las características fisicoquímicas del agua (Figura 23):

- Existe una alta heterogeneidad lateral tanto en la superficie como en el fondo, que caracteriza a los puquios.
- Existe estratificación que depende del puquio y el parámetro.
- Las mediciones realizadas un punto y a una profundidad no son representativas del rango en el que puede variar diariamente una laguna.
- Uno de los hallazgos más importante es que la CE puede variar en un mismo punto más de 100 mS/cm a lo largo de un solo día (medición realizada en el puquio N4).

Figura 23. Rangos de salinidad calculados a partir de mediciones *in situ* de CE en los puquios (enero de 2018).



Fuente: Reid *et al.*, 2018 b (Figura 2.43, Figura 2.44 y Figura 2.45).

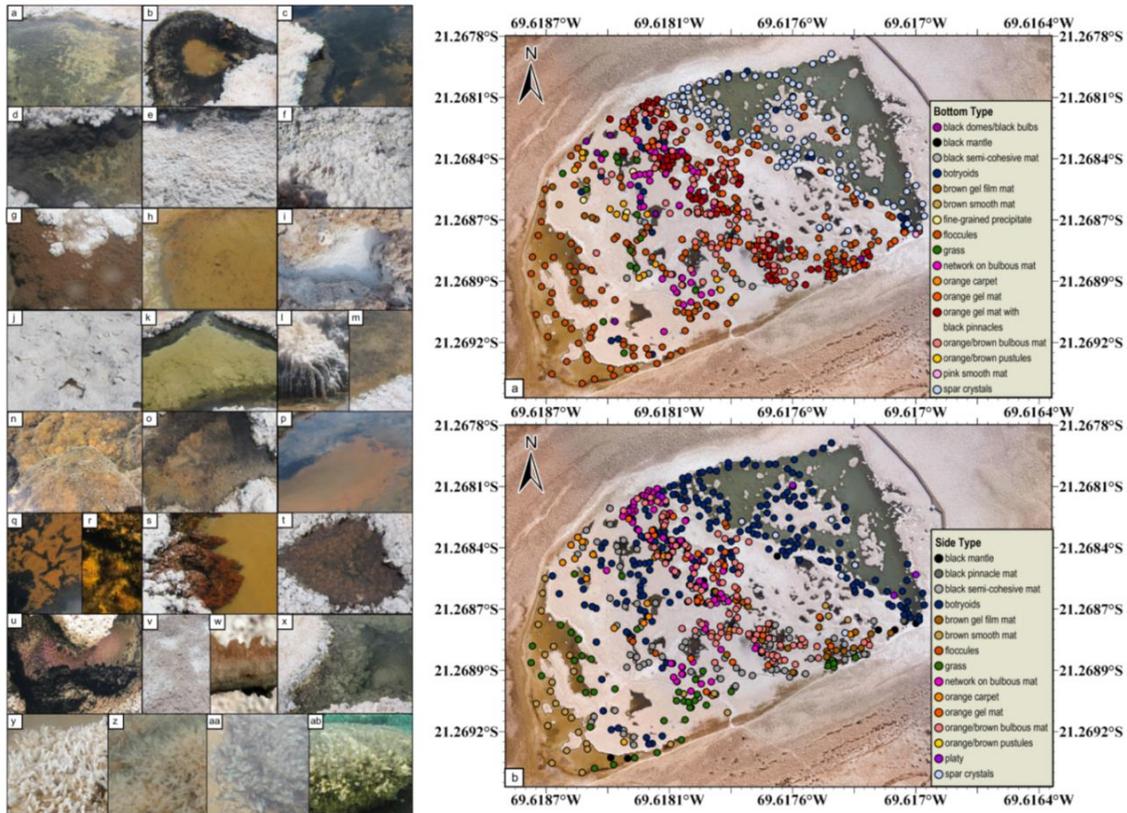
Respecto al sustrato (Figura 24):

- Cada puquio y las zonas de transición presentan sustratos distintos.
- El puquio N1 y sus lagunas circundantes presentan en general flóculos y mats. El yeso forma precipitados granulares y en láminas, y está asociado con comunidades microbianas que jugarían un rol en su precipitación.
- El puquio N2 presenta precipitados de yeso con cristales de selenita, que tendrían un origen fisicoquímico. Las bacterias asociadas podrían jugar un rol en la precipitación de los óxidos de manganeso que recubren los cristales.
- El puquio N3 está dominado por cristales de yeso variables comúnmente embebidos en exopolisacáridos o cubiertos por cianobacterias.
- El puquio N4 presenta cristales gruesos con poca presencia de bacterias.

De los estudios realizados por Reid y colaboradores, y tal como concluyen los propios autores, es posible indicar que los puquios están caracterizados por una alta heterogeneidad espacial respecto a la calidad del agua tanto entre los puquios como al interior de los mismos (variabilidad lateral y estratificación, ver Figura 23). Adicionalmente, existe una alta variabilidad temporal en la CE (también reportada por el SMI, 2018), encontrándose fluctuaciones diarias de 100 mS/cm en un mismo punto.

Por su parte, y de manera similar a lo encontrado para la calidad del agua, el sustrato presenta una alta heterogeneidad espacial, observándose más de 20 tipos de sustrato en este sistema (Figura 24). Estos presentan un amplio rango de morfologías de precipitados de yeso, desde granulares hasta cristales de selenita (Reid *et al.*, 2018 a). En cada puquio, los microorganismos jugarían un rol distinto en la precipitación de yeso (Reid *et al.*, 2018b).

Figura 24. Tipos de sustratos presentes en el fondo y borde de los puquios (enero de 2018)¹⁶.



Fuente: Reid *et al.*, 2018 b (Figura 3.1 y Figura 3.2).

A partir de los estudios de metagenómica y biogeoquímica en el sistema de los puquios, es posible concluir que existe una gran heterogeneidad lateral y vertical de las propiedades fisicoquímicas del agua, así como una alta variabilidad temporal, lo que indica que la biota es tolerante a condiciones variables de salinidad.

¹⁶ Panel de la izquierda presenta ejemplos de distintos tipos de sustrato que se identifican en el fondo (superior derecho) y en los bordes (inferior derecho).

Por otra parte, el estudio metagenómico indica que existe una alta diversidad y redundancia funcional en los microorganismos y que las especies son esperables para este tipo de sistemas. De esta manera, no hay antecedentes que indiquen que los microorganismos hayan sido afectados durante el periodo operacional de la MM.

Un punto que grafica lo expuesto a lo largo de esta sección, corresponde a una de las principales conclusiones del estudio realizado por CAPES-UC (2018), que señala respecto a la biota acuática:

“Al considerar las extremas variaciones que se muestran en la abundancia, composición y riqueza de especies, e incluso en actividades metagenómicas y ecosistémicas (como la productividad), es probable que el componente biótico sea oportunista, resistente a variaciones extremas de desecación (los puquios se han secado en varias oportunidades en el pasado¹⁷), inundación, cambios de temperatura (como los propios del Salar), e incluso salinidad. Todo lo cual sostiene su permanencia no en una característica mal utilizada de “extremófilo” sino que en la capacidad de mantener una fuente de propágulos en latencia bajo condiciones ambientales adversas.”

Finalmente, en el mismo sentido el párrafo centésimo vigésimo primero de la Sentencia R-160-2007 del II Tribunal Ambiental, concluye respecto a la potencial afectación de la biota acuática: *“... existe una amplia y heterogénea distribución de salinidad en el ecosistema en cuestión, lo cual fue determinado a propósito de la evaluación ambiental y que demuestra que la biota subsiste en condiciones de amplia variabilidad de la misma.”*

¹⁷ Un ejemplo de este hecho se señaló en el EIA del Proyecto (Anexo IV de la Adenda N°3). Respecto a los puquios señala: *“se debe considerar que este sistema ya ha estado expuesto a una desecación total, producto del bombeo directo realizado de terceros a comienzos de 2007. Una vez que cesó el bombeo no autorizado, el sistema comenzó lentamente a restablecer sus niveles naturales y rápidamente los tapetes microbianos recuperaron su actividad. Lo anterior implica que el sistema ambiental del puquio posee una alta capacidad de regeneración lo que disminuye los riesgos de afectar de manera permanente el sistema.”*

En conclusión, de acuerdo a la información expuesta, lo expresado por el CAPES-UC (2018) y por el Segundo Tribunal Ambiental, es posible señalar que no hay antecedentes que indiquen la existencia de efectos adversos sobre el objeto de protección (biota acuática) asociados a los hechos infraccionales contenidos en los cargos N°1 y N°7.

No obstante, en este análisis existe un margen de incertidumbre, el cual es acotado (dado todo lo anteriormente presentado), al no existir línea de base con metodología equivalente que permita realizar una comparación directa con las condiciones preoperacionales.

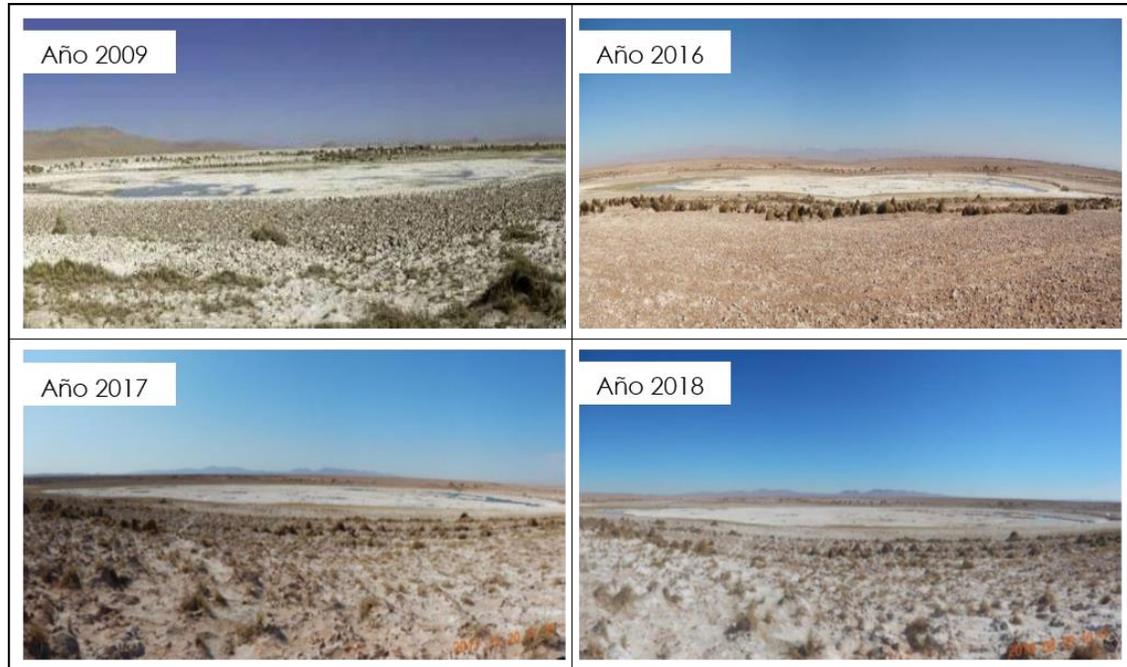
5.3 Medio socioeconómico y cultural: paisaje

Geobiota (2016) analizó el paisaje en la unidad N°2 Salar de Llamara. En este estudio se señala que la única modificación del paisaje comparado con el estado inicial corresponde a la intervención humana producto de la construcción de la pasarela (de acuerdo al compromiso establecido en el considerando 7.2.3.2 de la RCA N°890/2010). Sin embargo, dicha modificación no está asociada al incumplimiento de las acciones indicadas en la RCA. Considerando esta modificación, la evaluación de la calidad del paisaje se ha mantenido constante respecto de aquella presentada en la etapa de evaluación del Proyecto, por lo tanto se descarta que se haya producido una alteración a la calidad visual del paisaje.

Los resultados del análisis efectuado por Geobiota se encuentran refrendados por la Superintendencia de Medio Ambiente mediante la Res. Ex. N°9/ROL N°D-027-2016, específicamente en el numeral 74 (ver sección 5.2.1).

Por otro lado y a mayor abundamiento, el informe de monitoreo trimestral de la unidad de paisaje en Puquios de Llamara correspondiente al reporte de septiembre de 2018, asociado a las MUT, concluye que el paisaje en general no ha presentado cambios sustantivos entre los años 2016, 2017 y 2018, dado que la vegetación se mantiene con la misma especie y cobertura, y se observan los mismos cuerpos de agua (Figura 25).

Figura 25. Fotografías de puquios N1 y N2 en los años 2009, 2016, 2017 y 2018



Fuente: Elaboración propia en base a Informe N°3 "Informe de monitoreo trimestral de la unidad de paisaje en Puquios de Llamara", 2018.

6 CONCLUSIÓN

En consideración a todo lo expuesto en la sección 5 se concluye que, los antecedentes de seguimiento y de diversos estudios desarrollados a la fecha, y la consideración de instrumentos legales, no indican que existan efectos sobre el objeto de protección asociado a los hechos infraccionales contenidos en los cargos N°1 y N°7.

Se debe señalar que existe un margen de incertidumbre respecto a la no afectación de la biota acuática y en específico de los microorganismos que habitan en el sistema de los puquios. Ella se genera debido a que este componente no fue caracterizado en la línea de base del Proyecto, y el estudio realizado el año 2012 (Farías y Contreras, 2013) presenta diferencias metodológicas con los estudios realizados recientemente que no permiten comparar directamente el periodo preoperacional con el periodo operacional de la medida de mitigación.

No obstante, a la luz de los resultados y conclusiones de los estudios realizados por expertos nacionales e internacionales y de lo indicado por el Segundo Tribunal Ambiental (todo expuesto en la sección 5.2.3), la incertidumbre estaría acotada a este último aspecto y los antecedentes expuestos no indican que los microorganismos han sido afectados. Los estudios han verificado una alta diversidad y redundancia funcional en los microorganismos y que las especies son esperables para este tipo de sistemas.

7 REFERENCIAS

Estudios Técnicos e Informes Ambientales

Arcadis (2017). Evaluación de los parámetros de diseño de la medida de mitigación. Octubre, 2017.

Arcadis (2018a). Evaluación cambios significativos en la calidad del agua de los puquios. Mayo, 2018.

Arcadis (2018b). Modelo Hidrogeológico Conceptual Salar de Llamara - 4848-3000-GH-INF-002.

CAPES-UC (2018). Asesoría científica para determinar efectos ambientales en puquios del Salar de Llamara: Informe Etapa 2. CAPES-UC. Octubre, 2018.

Demergasso, C.; Escudero, L; y Echeverría A. (2018) Estudio metagenómico de sistemas de depositación de yeso del Salar de Llamara, Informe Final. Centro de Biotecnología. Universidad Católica del Norte. Julio de 2018.

Farías, M. y M. Contreras, Ecosistemas microbianos del Salar de Llamara, Informe Campaña de Verano. Centro de Ecología Aplicada, 2013.

Fisioaqua (2018). Monitoreo mensual de clorofila-a, riqueza y abundancia de cada taxa de fitobentos y fitoplancton en la columna de agua de los puquios N1, N2 (Punto T2-23), N3 Y N4. Salar de Llamara, Campaña Agosto, 2018. Septiembre de 2018.

Geobiota (2016). Estado actual de la vegetación higromorfa, paisaje y fauna en los Puquios de Llamara.

Geobiota (2017). Informe N°8 del Plan de Seguimiento Ambiental Biótico.

Geohidrología Consultores (2013). Modelo Hidrogeológico Conceptual del sector Puquios del Salar de Llamara.

Reid, P.; Oehlert, A. & Suosaari, E. (2018a). Geologic Setting, Geochemistry and Formation of Gypsum Deposits, Puquios, Salar de Llamara, Northern Chile. Bahamas Marine EcoCentre.University of Miami/RSMAS.Bush Heritage Australia/Smithsonian Institute. Marzo,2018.

Reid, P.; Oehlert, A. & Suosaari, E. (2018b). Genesis of the Gypsum Depositional System in Llamara Puquios.Bahamas Marine EcoCentre.University of Miami/RSMAS.Bush Heritage Australia/Smithsonian Institute. Julio,2018.

SMI-ICE Chile (2018) Informe final: Estudio del efecto del bombeo y de la inyección de agua en la calidad del agua en las lagunas de los puquios. J. Wiertz, I. Godoy & Arumi J.L. Chile. Septiembre, 2018.

Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. Environmental pollution, 100(1-3), 179-196.

Instrumentos Administrativos

Segundo Tribunal Ambiental (2018). Sentencia Rol R N°160-2017, 21 de agosto de 2018.