



Asesoría científica  
para determinar  
efectos ambientales  
en puquios del Salar  
de Llamara



**Centro UC**

CAPES - Center of Applied  
Ecology & Sustainability

---

*Octubre 2018.*

INDICE GENERAL:

**Contexto de la asesoría.**

1. Introducción. _____	3
2. Objetivos de la asesoría científica. _____	4
3. Documentación y estudios disponibles para asesoría científica. _____	4
4. Entregables. _____	7
5. Métodos. _____	8

<b>Entregable V.</b> Compilación de la información adicional disponible sobre el Salar de Llamara (PARTE II) _____	11
--	----

<b>Entregable VI.</b> Informe sobre la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los puquios presentes en el Salar de Llamara como consecuencia de la extracción e inyección de agua derivados de la operación de SQM. _____	50
--	----

## **1. INTRODUCCIÓN.**

El Centro UC de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES) es un centro de excelencia que tiene como misión llevar a cabo investigación básica y aplicada sobre temas ambientales de gran importancia para el desarrollo sostenible de Chile, en el contexto internacional de las normas de la OCDE y los acuerdos internacionales de libre comercio. Su estrategia es identificar las necesidades tanto de las empresas privadas como de las agencias estatales para co-crear proyectos a fin de elevar y mejorar los estándares ambientales existentes. El Centro CAPES está diseñado para superar la falla de traducir la comprensión científica en práctica y política, sobre la base de colaboraciones existentes y el desarrollo de nuevas alianzas desde etapas tempranas.

En relación con dichos objetivos y en respuesta al requerimiento de SQM, en términos de analizar la información ambiental disponible sobre el área de influencia de sus operaciones en el Salar de Llamara (Proyecto Pampa Hermosa), con enfoque en los distintos componentes del sistema en cuestión, en el presente documento se entregan los resultados de asesoría científica llevada a cabo.

## **2. OBJETIVOS DE LA ASESORÍA CIENTÍFICA.**

Los objetivos del estudio fueron:

- 1) Elaborar una monografía que compile y analice la información ambiental que posee SQM en el Salar de Llamara. Tal información se refiere a los antecedentes presentados en la Línea de Base del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Pampa Hermosa (2007), los Informes del Plan de Seguimiento Ambiental y los estudios para la biota acuática, microorganismos y calidad de agua desarrollados entre 2016 y 2018.
- 2) Desarrollar un modelo conceptual del ecosistema puquios de Llamara, identificando las variables que mejor lo representan y eventuales brechas de información.
- 3) Elaborar un informe experto sobre la validez metodológica de efectuar comparaciones en el tiempo de ensamblajes bacterianos utilizando el genoma como variable de comparación.
- 4) En la eventualidad de que se identifiquen brechas de información, sugerir una propuesta de estudios que se deberían desarrollar para acreditar la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los puquios, con énfasis en su biota acuática.
- 5) Acreditar la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los puquios presentes en el Salar de Llamara como una consecuencia de la extracción e inyección de agua derivados de la operación de SQM.

## **3. DOCUMENTACIÓN Y ESTUDIOS DISPONIBLES PARA LA ASESORÍA CIENTÍFICA.**

Los estudios disponibles en SQM para la elaboración de la asesoría fueron los siguientes.

- **Estudio de Impacto Ambiental Pampa Hermosa, Agosto 2008.** Pramar
- **Adenda I Estudio de Impacto Ambiental Pampa Hermosa, Mayo 2009.** Pramar
- **Adenda II Estudio de Impacto Ambiental Pampa Hermosa, Noviembre 2009.** Pramar.
- **Adenda III Estudio de Impacto Ambiental Pampa Hermosa, Julio 2010.**

- **Resolución Exenta 890/2010 que Califica Ambientalmente el proyecto Pampa Hermosa.** Dirección Ejecutiva, Comisión Nacional del Medio Ambiente
- **Informe Ecosistemas microbianos del Salar de Llamara. Proyecto “Pampa Hermosa”, Campaña de Verano 2012.** CEA.
- **Informe Ecosistemas microbianos del Salar de Llamara, Campaña de Invierno 2012.** CEA
- **Informe Estado actual de biota acuática en puquíos del Salar de Llamara, Octubre 2016.** FISIOAQUA
- **Análisis de comunidades microbianas de bioevaporitas presentes en Puquíos del Salar de Llamara (Región de Tarapacá), Octubre 2016.** FISIOAQUA
- **Estudio de Línea de Base de Biota Acuática y Calidad de Agua. Puquios (N1 a N4) del Salar de Llamara (I Región), campaña Noviembre 2016.** FISIOAQUA/GEOBIOTA.
- **Informe Estudio de Tolerancia a Variaciones de Conductividad Eléctrica en Biota Acuática Representativa de los Puquios de Llamara. Campaña Enero 2017.** FISIOAQUA/GEOBIOTA.
- **Estudio de estructuras de depositación de yeso: caracterización y actividad fotosintética. Puquios del Salar de Llamara, I región. Campaña Marzo 2017.** FISIOAQUA/GEOBIOTA.
- **Estudio de estructuras de depositación de yeso Puquios de Llamara. Análisis molecular. Campaña Marzo 2017.** FISIOAQUA/GEOBIOTA
- **Estudio de Línea de Base de Biota Acuática y Calidad de Agua. Puquios (N1 a N4) del Salar de Llamara (I Región), Campaña Julio 2017.** FISIOAQUA/GEOBIOTA.
- **Plan de Seguimiento Ambiental Monitoreo Biótico y Calidad de Agua superficial PSA. Informe N°7- Salar de Llamara. Datos a Noviembre 2016.** FISIOAQUA/GEOBIOTA.

En forma adicional a los estudios anteriormente señalados, SQM se encuentra desarrollando otros análisis. Los resultados de tales estudios han sido puestos a disposición de este asesor (CAPES) en la medida que su estado de desarrollo los haya hecho disponibles (desde febrero a septiembre del 2018):

- **Estudio de Tolerancia a Variaciones de Salinidad Expresada como Conductividad Eléctrica de Biota Acuática Representativa de los Puquios de Llamara.** Febrero 2018. Fisioaqua.
- **Génesis de los sistemas de depósito de Yeso en puquios de Llamara. Implicancias en las medidas de manejo basado en la historia de crecimiento.** *Geologic Setting, Geochemistry and Formation of Gypsum Deposits, Puquios, Salar de Llamara, Northern Chile.* Pamela Reid, Amanda M. Oehlert & Erica P. Suosaari. Marzo, 2018
- **Revisión Científica del estado del conocimiento de las formaciones de depósito de yeso.** *Geologic Setting, Geochemistry and Formation of Gypsum Deposits, Puquios, Salar de Llamara, Northern Chile.* Pamela Reid, Amanda M. Oehlert & Erica P. Suosaari. Marzo, 2018
- **Mapas a través de Dron de las lagunas que conforman puquios 1 y 2 con información recolectada en terreno.** *Geologic Setting, Geochemistry and Formation of Gypsum Deposits, Puquios, Salar de Llamara, Northern Chile.* Pamela Reid, Amanda M. Oehlert & Erica P. Suosaari. Marzo, 2018.
- **Plan de Seguimiento Ambiental Monitoreo Biótico y Calidad de Agua superficial Informe N°8 – Salar de Llamara. Campañas Etapa Operacional (Enero – Diciembre 2017).** GEOBIOTA. Junio, 2018.
- **Informe final: “Estudio metagenómico de sistemas de depositación de yeso del Salar de Llamara”.** *C. Demergasso, Escudero, L. y Echeverría Alex. Centro de Biotecnología.* Universidad Católica del Norte. Julio, 2018

- **ANEXO H: 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 2018.
- **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.
- **ANEXO L: Informe N°3: Monitoreo y análisis de agua de los puquios (Dic. 2017-Julio 2018).** ARCADIS. Agosto 2018.
- **Informe final: Estudio del efecto del bombeo y de la inyección de agua en la calidad del agua en las lagunas de los puquíos.** J. Wiertz, I. Godoy & Arumi J.L. SMI ICE Chile. Septiembre, 2018.

#### **4. ENTREGABLES.**

Los productos del estudio en los cuales se consolidaron los resultados de toda la primera etapa (**ETAPA 1**) fueron:

- I.** Informe que compiló y analizó la información ambiental que posee SQM en el Salar de Llamara. Parte I.
- II.** Informe que describe el Modelo Conceptual del Ecosistema Puquios de Llamara, identificando las variables que mejor lo representan, así como la detección de brechas de información.
- III.** Al verificarse vacíos de información, se sugirieron una serie de estudios que posibilitarían acreditar la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los puquios, con énfasis en su biota acuática.
- IV.** Informe sobre la validez metodológica de efectuar comparaciones en el tiempo de ensamblajes bacterianos utilizando el genoma como variable de comparación.

Los productos de la asesoría que se entregan en el presente documento (**ETAPA 2**) son:

- V. Informe que compila y analiza la información ambiental que posee SQM en el Salar de Llamara. Parte II.
- VI. Acreditar la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los Puquios presentes en el Salar de Llamara como una consecuencia de la extracción e inyección de agua derivados de la operación de SQM.

## 5. MÉTODOS.

Para el logro de los objetivos arriba planteados definimos 4 grupos de estudio, los cuales se abocaron a cumplir los 5 objetivos especificados en el numeral 2 de la presente propuesta. La definición de los 3 primeros grupos de trabajo respondió a los distintos componentes ambientales del Salar de Llamara, a la experiencia y ámbito de trabajo de los asesores de CAPES, siendo el cuarto grupo el que realizó la integración del trabajo de los 3 primeros grupos, consolidando la información, para de esta forma documentar la calidad y pertinencia de los estudios realizados, el estado ambiental del salar reflejado en los estudios, la integración de los estudios desarrollados en paralelo a esta asesoría, la necesidad de definir nuevos estudios y el análisis, en base a la información ambiental disponible, sobre la existencia o inexistencia de efectos asociados a los procesos ejecutados por SQM sobre los componentes del Salar o el Salar de Llamara en su conjunto.

Los grupos de estudio correspondieron a:

- 1- *Microbiología y Genética*
- 2- *Hidrobiología y Calidad del agua*
- 3- *Ecosistemas y Comunidades biológicas*
- 4- *Consolidación e Integración*

El primer grupo estuvo enfocado en el análisis de la información relacionada con los componentes bacterianos y todo lo relacionado con estudios genéticos desarrollados en el ecosistema en estudio. El segundo grupo estuvo enfocado en la revisión y análisis de la información referente a la hidrobiología y calidad del agua del Salar de Llamara. El tercer grupo estuvo enfocado en el análisis de los estudios de Línea Base, sus Adendas, las resoluciones ambientales y todo lo que tenga relación con la biota acuática y el modelo conceptual ecosistémico del sistema. El cuarto consolidó la información proveniente de los 3 grupos específicos y en este documento entrega un juicio científico experto sobre el estado del sistema natural en cuestión, discute además la necesidad o no de nuevos estudios y se pronuncia sobre la factibilidad de acreditar un efecto o no de las operaciones de SQM sobre el Salar de Llamara.

Para la conformación de cada equipo de trabajo consideramos necesario contar con un Investigador Principal, un Co-investigador y un asistente con Postgrado. Los equipos de expertos de cada grupo estuvieron conformados por los siguientes investigadores:

**Grupo 1.** Investigador Principal: Dr. Rodrigo de la Iglesia; Coinvestigador: Dra. Nicole Trefault; Asistente: Isidora Echeñique. *Departamento de Genética Molecular y Microbiología, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

**Grupo 2.** Investigador Principal: Dr. Ignacio Vargas; Coinvestigador: Dr. Gonzalo Pizarro; Asistentes: MSc. Vasty Zamorano, Ing. Pedro Terrazas. *Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

**Grupo 3.** Investigador Principal: Dr. Marcelo Miranda; Coinvestigador: Dr. Sergio Scott; asistente Dra. Cynnamon Dobbs. *Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía y Ciencias Forestales, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

**Grupo 4.** Investigador Principal: Dr. Fabián Jaksic; Coinvestigador: Dr. José Miguel Fariña; Asistente: Dr(c) Paula F. Zucolillo. *Departamento de Ecología, Pontificia Universidad Católica de Chile.*



## ENTREGABLE V.

### COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE EL SALAR DE LLAMARA (PARTE II)

*En esta sección de la asesoría científica realizada, se presenta la información ambiental adicional entregada por SQM con posterioridad a Febrero del 2018. PARTE II: Incluye una compilación a modo de síntesis de los informes otorgados por la empresa SQM a CAPES-UC entre los meses Julio - Septiembre 2018 del corriente año, que comprenden estudios e investigaciones sobre los componentes bióticos y abióticos del Sistema de puquios del Salar de Llamara, y fueron finalizadas dentro de este período por diferentes profesionales de diversos Centros de estudios científicos nacionales e internacionales. Estos documentos aportan información complementaria a los análisis realizados en la ETAPA 1 por los Grupos G1,G2, G3 y G4 (correspondientes a los Entregables I-IV), y al igual que las secciones anteriores, fue considerada para las conclusiones CAPES- UC de este documento.*

## **INDICE DE CONTENIDOS:**

**Informes y estudios recibidos entre Julio y Septiembre 2018 considerados en esta sección:**

1. Informe final: “Estudio metagenómico de sistemas de depositación de yeso del Salar de Llamara”. *C. Demergasso, Escudero, L. y Echeverria Alex. Centro de Biotecnología. Universidad Católica del Norte. Julio, 2018*..... 13
2. ANEXO H: 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 2018.....17
3. 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..... 25
4. ANEXO L: Informe N°3: Monitoreo y análisis de agua de los puquios (Dic. 2017-Julio 2018). ARCADIS. Agosto 2018..... 33
5. Informe final: Estudio del efecto del bombeo y de la inyección de agua en la calidad del agua en las lagunas de los puquíos. J. Wiertz, I. Godoy & Arumi J.L. SMI ICE Chile. Septiembre, 2018.....35
6. Conclusiones CAPES-UC..... 44

**1. INFORME FINAL: “ESTUDIO METAGENÓMICO DE SISTEMAS DE DEPOSITACIÓN DE YESO DEL SALAR DE LLAMARA”. C. Demergasso, Escudero, L. y Echeverría Alex. Centro de Biotecnología. Universidad Católica del Norte. Julio, 2018**

A través de este documento emitido en Julio del año 2018, se presentan los resultados finales del estudio metagenómico de las muestras del Salar, incluyendo los Puquios N1, N2, N3 y N4.

**1) Metodología.**

La recolección de muestras se realizó en enero 2018, considerándose 3 puntos de muestreo biótico en cada puquio, indicados por SMA. Estos se encuentran dentro del área de influencia del Proyecto Pampa Hermosa (RCA N°890/2010), procurando mayor cobertura espacial y representatividad posible de cada puquio.

Se realizó un *muestreo de estructuras de depositación de yeso*, utilizando un taladro. Se obtuvieron testigos, los cuales fueron abiertos longitudinalmente para realizar mediciones de fluorimetría *in situ*, y luego almacenados para ser trasladados al laboratorio.

Se realizaron *mediciones in situ* de T°C, pH, oxígeno disuelto y conductividad. Paralelamente se obtuvieron datos físico-químicos de los puquios, para análisis de correlación con los microorganismos y metabolismos presentes.

Se realizó *extracción de ADN multi-genómico* a partir de los estratos seleccionados de los testigos obtenidos del muestreo de los puquios. Capas seleccionadas para el análisis se eligieron por su ubicuidad y coloración:

**E1: Estrato verde. Ubicado debajo de capa Blanca.**

**E2: Estrato Marrón. Debajo de capa Verde.**

**E3: Estrato Marrón Claro. Debajo del Marrón.**

**E4: Estrato Marrón Oscuro. Más profundo.**

Para determinar la similitud entre muestras, considerando la composición microbiana existente y genes encontrados, se realizó un Análisis de Escalamiento Multidimensional. Con esta información se construyeron matrices de similitud mediante un algoritmo, y las similitudes entre las abundancias de cada muestra determinaron su distribución en el *Mapa Conceptual*. De esta forma fue posible reconocer similitudes entre muestras, microorganismos y genes claves de cada lugar. Se hicieron además correlaciones con factores ambientales (parámetros químicos medidos al momento de obtener las muestras).

## 2) Resultados.

- . **Muestreo de estructuras de depositación de yeso:** se detallan con registro fotográfico.
- . **Análisis Físico-Químico de las Salmueras:** Se analizaron los parámetros físico-químicos de cuerpos de agua superficiales y ambientales (aire), medidos en cada uno de los puquios. Para contrastar los análisis químicos con los análisis de biodiversidad y genómica (MSD), se utilizaron valores promedio de los puntos de muestreo de agua de cada puquio.
- . **Análisis de ADN:** fue cuantificado y evaluado el ADN obtenido en cada estrato, para luego ser enviado a secuenciación genómica.
- . **Diversidad:** La diversidad calculada por el índice de Margalef, no muestra patrones evidentes. Mientras que el índice de diversidad de Shannon-Wiener (o Shannon-Weaver), muestra valores de diversidad ligeramente mayores en los puquios N3 y N4. El índice de Simpson, indica una alta diversidad para todas las muestras. El índice de Equitatividad de Pielou evidencia resultados homogéneos.
- . **Composición de las comunidades:** Se determinó la composición genética y los organismos que conforman las comunidades microbianas de los distintos estratos de cada uno de los 3 puquios estudiados. Se analizó la diversidad taxonómica de las muestras. Se observa que la mayor parte de las secuencias corresponden a microorganismos de tipo

Proteobacteria. se observan microorganismos de tipo Cyanobacteria en el primer estrato de todas las muestras E1. Se observan cinco grupos con una similitud próxima al 50% y una clara tendencia a la asociación por puquio. Las muestras provenientes del estrato verde (E1) tienden a agruparse entre ellas, sugiriendo que la composición de especies en esta capa es altamente similar para todas las muestras provenientes de los 4 puquios. El análisis MDS y correlación con la composición del agua, muestra que lo que mayormente diferencia las muestras de Puquio N1 es:

Oxígeno disuelto, Calcio, Niveles de  $\text{HCO}_3^-$ , conductividad y dureza de la salmuera.

- . **Abundancia y distribución de microorganismos fototróficos:** Presencia de organismos fototrofos oscila entre el 2 y 25% en sitios y estratos estudiados. Grupo compuesto por los filos Proteobacteria, Cyanobacteria y Chloroflexi. Las Cyanobacterias disminuyen su abundancia hacia los estratos inferiores. Diatomeas solo se observaron en la capa verde de N1, puquio que presenta la menor salinidad en relación a los demás puquios.
- . **Distribución de los Metabolitos:** Se analizó la diversidad funcional de las comunidades microbianas de los sitios. La similitud de las muestras supera el 80%, y al igual que por taxonomía, se observa una tendencia a la agrupación de las comunidades del estrato verde (E1).

El análisis MSD muestra, además, que los genes relacionados a funciones metabólicas propias de microorganismos fotosintéticos, se asocian mayormente con el estrato verde y con todos los estratos del puquio N4. Se originó un listado de genes inferidos de las secuencias analizadas. Las categorías funcionales mayoritariamente representadas son:

- Aminoácidos y derivados
- Cofactores, vitaminas, pigmentos, grupos prostéticos
- Carbohidratos
- Metabolismo proteico.

Se observa un enriquecimiento en cuanto a la expresión de genes asociados a la función de “Fotosíntesis” y “Sistema de transporte de electrones plastidial” en el estrato verde de los puquios analizados. Las rutas metabólicas para fijación de carbono más abundantes (Ciclo de Calvin Benson y Ciclo del Ácido Cítrico Reductivo) representadas por las enzimas RUBISCO y POR, muestran un enriquecimiento de la ruta: RUBISCO en estrato verde de todos los puquios, y una disminución hacia estratos inferiores. Incluso desaparece en puquio N2. El metabolismo del azufre está mayoritariamente representado por genes involucrados en la oxidación y asimilación del azufre.

### **3) Discusión.**

Estos estudios revelaron una mayor diversidad de organismos albergada en estas estructuras, comparado a lo estudiado en estudios realizados previamente. Se reporta una similitud entre muestras analizadas que supera el 50% y una asignación funcional de similitud entre muestras superando el 80%. Esto revela una redundancia funcional, propiedad de sistemas microbianos abiertos, que resulta de interacciones bióticas y con el ambiente.

La composición de las comunidades microbianas en el Sistema de Depositación de Yeso del Salar de Llamara, al igual que otros sistemas similares, están dominadas por Proteobacteria y Cyanobacteria, coincidiendo estos resultados con los reportados en el año 2017 por estudio realizado por SQM. Las comunidades procariotas en la capa superior (E1) están compuestas por microorganismos fotótrofos principalmente, disminuyendo hacia los estratos inferiores (E3 y E4) en todos los puquios. En estos últimos estratos, hay bacterias fermentadoras y reductoras de sulfato.

Las Cyanobacterias como productores primarios de materia orgánica, detectados en E1, son importantes para la formación y subsistencia del tapete en todos los puquios, similar a lo observado en Highborne Cay, Bahamas. La presencia de diatomeas solo se evidenció en los ambientes de menor salinidad (capa verde de puquio N1).

Con respecto a la diversidad de Archaeas, fue baja en todos los puquios del Salar de Llamara, observándose principalmente en los estratos más profundos (E3 y E4).

Se registró desaparición del horizonte negro, producto de la actividad de las bacterias reductoras del sulfato (SRB), debajo de las laminaciones coloreadas y atribuida a la disminución del nivel de agua debido a la mayor evaporación, impidiendo el desarrollo de ambientes microaerofílicos y estructuración de comunidad fotosintética.

Al comparar los resultados obtenidos con el análisis realizado por Farías et al. 2013, se visualiza de forma preliminar la variabilidad temporal de la composición de comunidades y su función.

Con respecto a los metabolismos microbianos, los genes asociados a la respiración, son más abundantes que los de fotosíntesis y metabolismo del azufre en todos los puquios, similar a los reportado por el estudio en Salar de Llamara 2012 (Farías et al. 2013). El uso de metabolismos eficientes para la fijación de carbono, como RCTA y oxidación del azufre, parecen ser las estrategias dominantes en el sistema de puquios del Salar de Llamara.

#### **4) Conclusión.**

Los resultados permiten establecer que las comunidades microbianas están determinadas en gran medida por el puquio al que pertenecen. Existiendo, además, una gran similitud de acuerdo a la asignación funcional y taxonómica entre las comunidades de la capa verde de todos los puquios. Esta conclusión es muy similar a aquella presentada en el estudio de metagenómica de 2012.

**2. ANEXO H: 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 (T2-23), N3 Y N4 (Salar de Llamara). Campaña Agosto, 2018. FISIOAQUA. Septiembre 2018**

El diseño y ejecución de los muestreos, así como el análisis de los datos y elaboración del informe, fueron realizados por la empresa FisioAqua. El laboratorio certificado ANAM, fue responsable de la determinación de clorofila -a. Según lo requerido por la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), entre el 1 y 3 de agosto se realizó el noveno monitoreo mensual, cuya finalidad es evaluar el estado del fitoplancton, fitobentos y clorofila- a en los puquios de Llamara, caracterizando los componentes de la biota acuática de los 4 puquios (N1, N2, N3, N4), y analizando la variabilidad temporal de los componentes bióticos durante el período en que ha estado en efecto la MUT (Medida Urgente Transitoria). El diseño de monitoreo del presente informe incorpora nuevos puntos de muestreo y los resultados reportados corresponden al periodo que incluye diciembre 2017 y enero 2018 a agosto 2018. Además, se midieron una serie de variables físico-químicas in situ.

**1) Metodología.**

**a) Clorofila -a.**

**Para la determinación de Clorofila-a:** Se colectó a nivel superficial una muestra de 1 L en cada uno de los 3 puntos de los 4 puquios. (Límite de detección  $0.02\mu\text{L}^{-1}$ ).

**Parámetros in situ:** De manera adicional a lo solicitado en la MUT, se realizaron mediciones in situ de ciertos parámetros físico-químicos, en cada uno de los 3 puntos de los 4 puquios: temperatura, pH, Oxígeno disuelto y conductividad eléctrica con una sonda HANNA Instruments HI 9828

**b) Biota acuática.**

**Muestras Fitobentos:** para el análisis cualitativo y cuantitativo en cada punto se obtuvieron 3 muestras (replicas) aleatorias. Identificación y cuantificación realizada por personal especializado, llegando al nivel taxonómico más detallado posible.

**Muestras Fitoplancton:** Debido a la disminución del nivel de agua en los puquios y con el fin de no perturbar el fondo, a partir de los muestreos en enero 2018 fue necesario utilizar una bomba de inmersión para obtención de las muestras. Identificación y cuantificación realizada por personal especializado, llegando al nivel taxonómico más detallado posible.

**Análisis comparativo de los parámetros bióticos medidos:** la comparación estadística de los parámetros bióticos entre puquios se realizó a través de ANOVA de una vía.

**Relación entre parámetros bióticos y calidad del agua:** se realizaron análisis de series de tiempo para abundancia de fitoplancton y fitobentos, considerando los 9 meses desde que comenzaron los monitoreos asociados a la MUT. Además, se exploró la existencia de relación entre la abundancia de los organismos y la clorofila-a y algunas variables asociadas con la calidad del agua.

## 2) Resultados.

**a) Clorofila-a:** La concentración de clorofila registrada en agosto 2018, fue cuantificable (sobre límite de detección) en la mitad de los puntos analizados. Puquio N1, promedió un valor de 1,75  $\mu\text{g L}^{-1}$  y puquio N4 promediando un valor de 10,42  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

### **b) Biota acuática:**

- *Fitobentos.*

*Riqueza de taxa:* Puquio N1 registró un total de 49 especies, puquio N2 = 48 especies, N3= 38 y N4=59. La mayoría de las especies registradas en todos los puquios corresponden a diatomeas (Bacillariophyta).

*Abundancia total y taxa dominantes:* Variados valores de abundancias en los puquios. El puquio N1 presentó una abundancia promedio total de 2399,07 cél.  $\text{mm}^{-2}$ ; en que dominó *Denticula thermalis* principalmente. El N2 presentó una abundancia promedio total de 917,73 cél.  $\text{mm}^{-2}$ , dominaron *Ulnaria* spp., *Amphora* spp. y *Nitzschia inconspicua*. El N3 presentó una abundancia

promedio total de 200,54 cél. mm<sup>-2</sup>, predominó *Denticula thermalis* y *Gomphonema* sp. El puquio N4 presentó una abundancia promedio total de 154,16 cél. mm<sup>-2</sup>. En N4 predominaron *Amphora* spp. y *Ulnaria* spp.

*Índices de Diversidad: Shannon- Weaver (H')* y *Pielou (J')*: El índice H' determinado para la comunidad fitobentónica de los puquios fue variado: N1 presentó un valor de índice de 0,45, mientras que los N2, N3, N4 presentaron valores de índices de 0,93, 0,98 y 0,81 respectivamente. El índice J', exhibió un valor bajo en N1 (0.26) e intermedios en los puquios N2, N3 Y N4 (0.55, 0.62 y 0.46).

- *Fitoplancton:*

*Riqueza de taxa:* En el puquio N1 se registró un total de 54 especies. El puquio N2 registró un total de 40 especies. El puquio N3 registró un total de 44 especies. Mientras que, en el puquio N4 se registró un total de 45 especies. La mayoría de las especies registradas representan diatomeas.

*Abundancia total y taxa dominantes:* En la campaña de agosto de 2018 se registraron variadas abundancias en los 4 puquios muestreados. El puquio N1 presentó una abundancia promedio total de 6.112,04 cél. L-1. En N1 dominaron *Gomphosphaeria* sp. principalmente. El puquio N2 registró una abundancia promedio total de 273,90 cél. L-1, dominando *Ulnaria* spp. N3 registró una abundancia promedio total de 1.679,58 cél. L-1, y predominó *Brachysira aponina* y *Denticula subtilis*. El puquio N4 mostró una abundancia promedió un total de 514,10 cél. L-1, y predominó *Ulnaria* spp. principalmente.

*Índices de diversidad: Shannon-Weaver (H')* y *Pielou (J')*: El índice H' para los 4 puquios, indicó que la diversidad en la zona es variada. Los puquios N1 y N4 presentaron valores H' de 0,41 y 0,43, respectivamente, siendo los menores calculados. N2 presentó un valor de índice de 0,69, mientras que N3 presentó un valor de 1,15, siendo el más alto determinado. El índice J', determinado para la comunidad fitoplanctónica exhibió valores variados. Los puquios N1 y N4 presentaron valores de índices de 0,24 y 0,26 (baja uniformidad), respectivamente. El puquio N2 presentó un valor de índice intermedio de 0,43, mientras que, el puquio N3 presentó un valor de índice de 0,73 (alta uniformidad).

### **3) Discusión.**

#### **a) Clorofila-a**

La concentración de clorofila-*a* exhibió un comportamiento variado entre las campañas mensuales de diciembre de 2017 y agosto de 2018. El puquio N4 presentó en todas las estaciones analizadas, máximos de concentración de clorofila-*a* en los meses julio y agosto, siendo estos valores los más altos registrados desde el inicio del monitoreo en diciembre. A través de un ANOVA, fue posible reconocer la diferencia existente en la cantidad de clorofila-*a* sólo para el puquio N4 entre las distintas campañas analizadas.

#### **b) Biota acuática**

##### *Fitobentos:*

En cuanto a la riqueza de especies, esta campaña (Agosto 2018) registra la mayor hasta la fecha. Aumentos similares se observan en julio 2013 en el punto T2-23 del puquio N2.

Las MUT, comenzaron con un sistema de monitoreo de mayor resolución mensual, contemplando meses nunca monitoreados. El comportamiento de la riqueza a través del tiempo, aun es poco predecible ya que hay meses del año que no han sido considerados.

##### *Fitoplancton:*

El análisis histórico de la riqueza y abundancia fitoplanctónica (cél. L-1) de la estación T2-23 exhibió un comportamiento muy variado entre campañas. Esta variabilidad incluso muestra un comportamiento regular de la riqueza de especies (ca. 23 y 43 taxa) desde noviembre de 2013. En cuanto a su abundancia, se observa lo que parecieran ser tres ciclos de mayor abundancia centrados en los años 2010, 2012 y 2017 y posiblemente 2018.

Cabe destacar que la disparidad entre las magnitudes observadas para el fitoplancton (similar a lo observado con el fitobentos) entre 2010-12 respecto de resultados más recientes (2015 en adelante) podrían deberse a cambios en la entidad a cargo del monitoreo (hasta 2013 a cargo del Centro de Ecología Aplicada, CEA).

- **Variación de la Biota acuática (más clorofila-a).**

Desde que la MUT ha estado en ejecución, la biota acuática y la clorofila-a fueron examinadas mediante un análisis de medidas repetidas.

- **Variación de Clorofila- a**

Sólo en el puquio N4 es posible observar que su concentración en agosto del 2018 es mayor al resto de los meses. Esta diferencia se obtuvo luego de realizar un análisis de varianza de medidas repetidas (modelo mixto). En este caso, *la variación de la clorofila-a en el tiempo es significativa ( $p=0,001$ ), así como también lo es la interacción ( $p<0,0001$ ) y la diferencia entre puquios ( $p<0,0001$ ). Este patrón, principalmente para los puquios N3 y N4, podría estar relacionado con la re-inyección iniciada a fines de abril, sin embargo, es aún prematuro poder establecer una causalidad.*

- **Variación del Fitobentos**

El fitobentos ha exhibido diferencias significativas durante el período en que ha estado en ejecución la MUT para algunos meses solo en los puquios N1 y N2. En el puquio N1 la abundancia ha sido similar entre si y mayor al resto en enero, junio, julio y agosto. En el puquio N2 solo en agosto la abundancia del fitobentos ha sido mayor al resto. Estas diferencias se obtuvieron luego de realizar un análisis de varianza de medidas repetidas (modelo mixto). En este caso, la variación del fitobentos en el tiempo es significativa ( $P<0,001$ ) pero también lo es la interacción ( $P<0,0001$ ) así como la diferencia entre puquios ( $P<0,001$ ). Al igual que para la clorofila-a este patrón no se relaciona necesariamente con la reanudación en abril de la re-inyección en los puquios N3 y N4.

- **Variación de la biodiversidad fitobentónica**

El fitobentos ha experimentado variación en su diversidad y han sido distintas en los diferentes puquios. El índice  $H'$  para el puquio N1 muestra que la diversidad ha disminuido significativamente solo en los dos últimos meses, en el puquio N2 ésta aumentó a partir de abril. En el N3 se ha mantenido relativamente constante y alta detectándose solo una diferencia entre febrero y mayo y en el puquio N4 ésta ha experimentado un incremento creciente a partir de abril. La equitatividad  $J'$ , por otro lado, indica que en N1 ésta ha disminuido en los últimos dos meses, en N2 esta aumentó y se ha mantenido constante a partir de abril, en N3 ha sido alta y constante

durante todo el período de estudio y en N4 la equitatividad ha aumentado y se ha mantenido constante a partir de abril. Ciertos cambios que afectan la diversidad se han hecho más evidentes a partir de abril, aunque no se ha indagado aun acerca de los factores que pueden estar detrás de este patrón. Es también importante indicar que no todos los puquios han experimentado variaciones en la misma dirección.

#### ▪ **Variación del Fitoplancton**

El fitoplancton ha exhibido diferencias significativas para algunos meses solo en el puquio N1. La mayor abundancia se observó en junio, seguida por la similar abundancia registrada en mayo, julio y agosto, siendo la abundancia para los restantes meses similar y más baja. Estas diferencias se obtuvieron luego de realizar un análisis de varianza de medidas repetidas (modelo mixto). En este caso, la variación del fitoplancton en el tiempo es significativa ( $P=0,0135$ ) pero también lo es la interacción ( $P=0,0002$ ) así como la diferencia entre puquios ( $P<0,001$ ).

Al igual que para la clorofila-*a* y el fitobentos, este patrón no se relaciona claramente con la reanudación en abril de la re-inyección en los puquios N3 y N4.

#### ▪ **Variación de la biodiversidad fitoplanctónica**

El índice de Shannon  $H'$  para el puquio N1 ha mostrado un descenso a partir de abril, con respecto a una mayor diversidad observada especialmente durante los dos primeros meses de observaciones. En el puquio N2, aunque se detectan variaciones, estas no son significativas a lo largo del período analizado. En el puquio N3 se distingue un aumento en la diversidad a partir de junio, mientras un patrón similar se observa en el puquio N4, pero con el aumento a partir de julio. El índice  $J'$ , por otro lado, indica que en N1 ésta ha disminuido en los últimos tres meses respecto de la observada en diciembre, en N2 ésta se ha mantenido constante durante todo el período de estudio, en N3 ha sido alta excepto por la baja equitatividad registrada en febrero y en N4 la equitatividad ha experimentado importantes oscilaciones, pero con un aumento durante los últimos dos meses. La diversidad del fitoplancton ha mostrado variaciones temporales y entre puquios, sin embargo, en este caso los cambios han sido más erráticos y no necesariamente se puede reconocer alguna asociación clara con respecto a las modificaciones de la MUT (reinicio de inyección en abril en

N3 y N4, por ejemplo). No todos los puquios han experimentado variaciones en la misma dirección.

- **Relación entre biota acuática (más clorofila-*a*) y parámetros *in situ***

Las relaciones que se evalúan tienen la posibilidad de mostrar tendencias en la medida que estos componentes bióticos del sistema respondan frente a variaciones ambientales exhibidas a través de los parámetros: Conductividad Eléctrica (CE) y Oxígeno Disuelto (OD).

*Clorofila-a y parámetros físico-químicos:* En ninguno de los puquios se pudo observar una relación entre la CE y la concentración de clorofila-*a*, y tampoco se observó una tendencia temporal asociada con la implementación de la MUT.

*Fitobentos y parámetros físico-químicos:* Se observó una relación significativa entre la CE y la abundancia del fitobentos en el puquio N2, y explica el 28% de la varianza observada, relacionándose los menores valores de CE registrados en agosto con una mayor abundancia de fitobentos. Por otro lado, se observó una relación significativa entre el OD y la abundancia del fitobentos, en los puquios N1 y N3, explicándose el 22% y 16% de la varianza, respectivamente.

- **Fitoplancton y parámetros físico-químicos**

Solo en el puquio N3 se pudo observar una relación entre la CE y la abundancia del fitoplancton, siendo ésta una relación inversa, aunque solo se explica el 17% de la varianza. En el caso del OD, se detectó una relación significativa con la abundancia fitoplanctónica en los puquios N1 y N3, explicándose el 26% y 41% de la varianza, respectivamente.

#### **4) Conclusiones.**

En la campaña de agosto de 2018 se registraron en los puquios N1 y N4 valores de clorofila-*a* por sobre el límite de detección ( $<0,02 \mu\text{g L}^{-1}$ ), destacando todas las estaciones muestreadas del puquio N4, las que alcanzaron valores superiores a  $7 \mu\text{g L}^{-1}$ .

Con respecto a la abundancia del fitobentos fue notorio el aumento en todos los puntos de los puquios N2, N3 y N4 a partir de mayo, junio, julio y agosto de 2018. En cuanto a la composición

de la comunidad fitobentónica ha variado en los puquios N1, N2 y N3 (desde diciembre), lo que se expresa en dominancias más variadas (principalmente en N3), pero manteniendo niveles de diversidad y abundancia relativamente parejos a lo largo de estos 9 meses.

El fitoplancton también exhibe un patrón de alta variabilidad espacio-temporal. La riqueza en el puquio N2 se encuentra por sobre los rangos registrados durante la línea de base y pre-operación para el punto T2-23 según lo observado históricamente. También se observó un aumento de la abundancia registrada en N4 a partir del monitoreo de junio de 2018. En cuanto a la diversidad de esta comunidad, la dominancia se ve sesgada por la presencia mayoritaria de una especie en N1 (hasta agosto de 2018), similar a lo observado en N4 y distinto a lo exhibido en los puquios N2 y N3, donde las dominancias han experimentado mayores cambios, aspecto que se ve reflejado en el aumento de la diversidad y equidad a partir de abril.

La riqueza del fitobentos en el punto T2-23 ha estado en aumento a partir de abril de 2018. Aun así, no se puede observar para este punto de medición histórico del puquio N2 un efecto particular atribuible a los cambios experimentados por el sistema (ej.: disminución del nivel de agua) desde el cese de la inyección (medida de mitigación asociada a la MUT) que entró en efecto el 15 de diciembre de 2017. El fitoplancton, por otro lado, ha experimentado en el punto T2-23 cambios más notorios a través del tiempo, particularmente según lo exhibido por su abundancia lo que pareciera ser un comportamiento cíclico, con valores mayores en torno a los años 2010 y 2012, lo que estaría repitiéndose a partir de julio del 2017 y posiblemente también en 2018.

Se destaca que nunca antes el sistema había sido cuantificado/analizado, al menos para estos componentes ambientales, en meses que no fueran noviembre y julio (PSA) por lo que lo registrado entre diciembre de 2017 y agosto de 2018 bien puede corresponder a situaciones naturales para estas épocas del año, aunque teniendo en consideración también que se trata de un período en el que durante algunos meses no se está aplicando la inyección contemplada en la medida de mitigación (conforme a lo determinado en la Res 1485/2017).

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

Cuando la inyección de agua a los puquios fue temporalmente interrumpida en diciembre del 2017, el periodo de enero-mayo 2018 se convirtió en un momento crítico para monitorear la geoquímica y cambios asociados. Este informe presenta resultados y conocimiento adquirido del estudio y monitoreo de la geoquímica asociada a cambios en la conductividad, estado de saturación y precipitación de yeso durante ese período. La investigación presentada en este informe se centra en los siguientes tópicos:

- a. **Salinidad y estado de saturación del yeso.**
- b. **Monitoreo continuo de alta resolución de los puquios.**
- c. **Mapeo multiescala de fondo.**
- d. **Experimentos de precipitación.**

**a. Salinidad y estado de saturación del yeso.**

**1) Introducción.** Para comprender la relación entre los depósitos de yeso en los puquios y los rangos de salinidad que están asociados con las diversas morfologías de yeso, es necesario reconstruir los rangos de salinidad encontrados en las salmueras de los puquios. El modelo de Babel (2004) relaciona la salinidad con la morfología y estado de saturación del yeso. En el caso de observaciones en los puquios, que se originan de salmueras continentales, sin embargo, sugiere que esta relación podría no estar estandarizada a todos los ambientes deposicionales, como es el caso de los puquios, siendo necesario transformar los valores de CE en salinidad, aspecto abordado por Reid et al.

La conductividad eléctrica, es una de las mediciones indirectas de la salinidad. SQM ha estado registrando mediciones de **Conductividad Eléctrica (CE)** de cada laguna principal de los 4 puquios desde mayo de 2010, archivo muy valioso que detalla variaciones estacionales en la química de la salmuera en cada laguna. Esta base de datos, será utilizada para generar una curva

calibrada que coincida específicamente con la química de la salmuera, fuerza iónica y perfiles de temperatura registrados en los puquios.

## **2) Resultados.**

La relación entre CE (mS/cm) y mediciones de salinidad, se ajusta mejor con una relación exponencial. Como se observa de las mediciones de CE, el puquio N1 posee los valores más bajos, mientras que los puquios N2, N3 y N4 muestran un alto grado de variabilidad. Cuando se analizan por mes los datos de enero, la ecuación que mejor ajusta es una relación exponencial entre CE y Salinidad. Por otro lado, los datos de marzo demuestran una relación predominantemente lineal.

Los valores de salinidad del puquio N1 exhiben un pequeño grado de variabilidad y corresponde a los mismos valores de salinidad que las aguas salobres marinas (35 PSU). En el caso del puquio N3, muestra un promedio relativamente bajo con variabilidad cíclica a escala anual, por debajo de los 50 PSU para la mayoría de los registros. Puquios N2 y N4 muestran rangos similares de salinidad entre 100 y 350 PSU. También se observan ciclos anuales.

Comparando los valores de salinidad calculadas para cada puquio con los rangos de salinidad predichos por el modelo de Babel (2004), se revela un hecho interesante: Los rangos de salinidad para los puquios N1 y N2 no predicen la precipitación del yeso, a pesar que la evidencia observada demuestra lo contrario, sugiriendo que las salmueras continentales en los puquios podrían estar saturadas con respecto al yeso, a pesar de la salinidad calculada que cae por debajo de los valores predichos para formación de yeso en las configuraciones de evaporitas marinas de Babel (2004). Esta saturación podría ser por un enriquecimiento local de las aguas del acuífero con Ca y  $\text{SO}_4^{-2}$ . La observación más importante es el hecho que los puquios experimentan un alto grado de salinidad tanto temporal como espacialmente.

### **➤ Estado de saturación de minerales evaporíticos en los puquios.**

Se realizó un modelamiento numérico del estado de saturación del yeso para comprender las condiciones bajo las cual el yeso está saturado en las salmueras con ayuda de un software (Geochemist Workbench- GWB).

### Estado de saturación del yeso

Para cada una de las lagunas en los puquios, el yeso está saturado durante todo el período registrado. Las salmueras en N1, N3 y N4 experimentan cambios transitorios a la subsaturación con respecto al yeso, algo que parece no tener relación temporal con la iniciación de inyección en varios sitios alrededor del sistema de puquios.

### Registros de temperatura

Las temperaturas superficiales experimentan un amplio rango de variabilidad en comparación a las aguas de fondo en los puquios N1 y N2, con el rango de temperaturas de aguas superficiales y de fondo del puquio N4 siendo relativamente similar hasta abril 2018.

Los cambios transitorios a la subsaturación registradas en los puquios N1, N2 y N4 no ocurren en el mismo momento entre ellos. La explicación más probable, es la falta de conectividad entre las aguas de cada puquio. La observación de un quiebre en el gradiente de CE en la zona de transición, sugiere que las aguas de los puquios N1 y N2, están aisladas entre sí, y su geoquímica puede evolucionar independientemente a lo largo del tiempo. El estado de saturación de la salmuera está relacionado a cambios en la concentración de elementos traza y temperatura de la salmuera de los puquios, así como en la química y temperatura de las aguas de inyección que mantiene los niveles de agua en los puquios previo al período de monitoreo. Por esto, entender el impacto relacionado en el proceso deposicional del yeso es crítico.

### **Entendiendo el rol de la concentración de elementos en el estado de saturación del yeso.**

En el puquio N3, está claro que el sulfato, sodio, cloro y salinidad se comportan de manera similar a medida que la química de la salmuera cambia a lo largo del tiempo, mientras que el calcio parece exhibir variaciones que no están relacionadas con los cambios observados en otros iones, o bien con respecto al inicio de la inyección en varios sitios alrededor del Sistema de puquios.

### **Entendiendo el rol de la temperatura en el estado de saturación de yeso en los puquios.**

Llevar a cabo análisis del estado de saturación del yeso a diferentes temperaturas utilizando datos químicos, demuestra el impacto que la temperatura podría tener en el estado de saturación del yeso en los puquios. En algunas instancias, el aumento de temperatura de una salmuera según el modelo,

impide alcanzar un estado de saturación de ésta. Según los resultados, pareciera ser que la temperatura juega un rol secundario en dirigir el estado de saturación del yeso en los puquios. Más bien, cambios en la química de la salmuera, y no la temperatura, pareciera ser la influencia dominante en cambiar el estado de saturación del yeso en los puquios del Salar de Llamara.

### **Entendiendo el rol de la química de las aguas inyectadas, en la formación del yeso.**

La química de la salmuera inyectada debe ser evaluada, y como primer intento de comprender el impacto de esta inyección, se evalúa el estado de saturación de las salmueras en el “Estanque Booster”. A diferencia de la salmuera de los puquios, que poseen altos valores de conductividad eléctrica y altas concentraciones de elementos traza, la salmuera del Estanque Booster, posee bajos valores de CE y menores concentraciones de elementos traza. Estas características podrían llevar a que la temperatura juegue un rol más importante en determinar el estado de saturación del yeso, en comparación con los puquios.

### **Entender la dinámica del sistema deposicional de yeso es aún un trabajo en progreso.**

Nuevos conocimientos revelan que la temperatura no pareciera ser el control predominante en el estado de saturación del yeso en la salmuera de los puquios, aunque puede en promedio contribuir en un 25% en la variabilidad del estado de saturación. La química de la salmuera, en especial el contenido de calcio, podría tener un control dominante, pero más muestreos y modelaciones numéricas son necesarias para poder cuantificar este impacto.

#### **b. Monitoreo continuo de alta resolución.**

Durante el periodo de no inyección, los niveles de agua se esperaba que disminuyesen como lo predicho por los modelos hidrodinámicos realizados por Arcadis (2016). Se esperaba también que la química de la salmuera de los puquios cambie significativamente con esta disminución del nivel de agua. Se evaluó el área de lagunas y número en el Sistema deposicional de puquios en el Salar de Llamara, utilizando un muestreo repetitivo de mapeo con dron, creando una serie de tiempo de imágenes para poder analizar los cambios en las lagunas a través del tiempo.

Para esto se evaluó:

La heterogeneidad espacial y temporal de mediciones en terreno. (concentración elementos traza, estado de saturación de la salmuera con respecto a varios minerales evaporíticos).

- ✓ El grado de estratificación de las salmueras en los puquios, y definición de la variabilidad temporal de esta estratificación.

## 1) Metodología.

**Mapeo con imágenes Dron:** Para evaluar el impacto de los cambios en nivel de agua a lo largo del tiempo en cuanto al tamaño y distribución de las lagunas en el Sistema deposicional de los puquios, los contornos de las lagunas fueron digitalmente mapeadas en cada imagen mosaico en Global Mapper.

**Química del agua- Parámetros HANNA9829:** Se llevaron a cabo muestreos repetitivos de los puquios (Nov 2017, enero 2018, marzo 2018, mayo 2018) incluyendo mediciones tanto de aguas de superficie como de fondo de todas las lagunas.

**Química del agua – Parámetros ANAM:** Dos mediciones de cada uno de los 4 puquios fueron realizadas por ANAM en Nov 2017, proporcionando una línea de base para la química de las salmueras antes del periodo de monitoreo. Una vez comenzado el periodo de no inyección a finales de diciembre, muestras de aguas superficiales y de fondo de 6 estaciones alrededor de cada una de los 4 puquios, fueron analizados produciendo una serie de tiempo de la química de los elementos traza desde enero a abril 2018.

## 2) Resultados.

**Mapas de salinidad:** Se convirtieron valores de CE medidos utilizando el Multi-Parámetro Hanna 9829 en aguas de superficie y fondo de los puquios durante el mes de enero. Los resultados del análisis de alta resolución documentan que durante el periodo de monitoreo existe un alto grado de heterogeneidad espacial en el área, y la química de las salmueras superficiales y de fondo en cada puquio. Cada puquio posee características únicas.

Con respecto al área de las lagunas en cada puquio, se ve una reducción en función de los protocolos de no inyección adoptado, siendo el puquio N3 el más afectado.

La heterogeneidad, tanto espacial como temporal, parece ser una característica fundamental en el Sistema deposicional de los puquios en el Salar de Llamara. De manera importante, las variaciones

horarias de las mediciones in situ de CE en el puquio N4, incluye el rango anual de valores de CE establecidos en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA), 2010.

### **c. Mapeo multiescala de fondo.**

#### **1) Introducción.**

Capturar tendencias regionales y heterogeneidad de tipos de fondo entre los puquios, permitirá comprender mejor como las interacciones biológicas, físicas y geoquímicas controlan el sustrato a varias escalas. Esta aproximación es útil para crear y definir unidades de mapeo que distinguen entre estructuras abióticas y aquellos depósitos influenciados y/o inducidos por tapetes microbianos.

#### **2) Resultados.**

El Sistema de puquios está caracterizado por 4 lagunas principales, con una serie de pequeñas charcas entre el puquio N1 y puquio N2 a la que nos referimos como “Zona de Transición”. Los bordes y fondos del puquio N1 y la zona de transición, generalmente carece de estructuras litificadas. El puquio N2 contiene domos aislados, de más de 0,5 mts de alto. El fondo del puquio N3 se caracteriza por sus bordes ondulados y el puquio N4, se caracteriza por su fondo con domos ondulados.

Con respecto a las investigaciones iniciales sobre los tipos de fondo, se pudieron identificar diferentes tipos, según la escala de análisis:

- **Macroescala. Identificación de Facies.** Los mapas generados a partir de la diversidad de fondos descritos, muestran una yuxtaposición y diversidad de tipos de fondos en los puquios.
- **Mesoescala- Caracterización de Muestras.** Se observa una variedad de tapetes y tipos de fondo a lo largo de los puquios.
- **Microescala – Análisis microscópico de muestras.** Se observa la morfología de los cristales, alguno de los cuales ocurren conjuntamente con microorganismos.

#### **d. Experimentos de precipitación.**

##### **1) Introducción.**

Se realizaron experimentos *in situ* con el objetivo de cuantificar tasas de deposición mineral, mineralogía, morfología de cristales y rol de microorganismos en la precipitación mineral. La presencia de material mineral acumulado en láminas durante este experimento, proporcionará evidencia de una precipitación en curso.

##### **2) Resultados.**

Los resultados iniciales del experimento, indican que los minerales actualmente están precipitando dentro de los puquios. Cada laguna parece ser única, con variaciones en cantidad y tipo de minerales precipitados. Se observó que en el puquio N4 ocurre una precipitación drástica, con costras blancas cubriendo las láminas y canastas colocadas para el experimento. Además, en este puquio se registró un fenómeno geoquímico interesante: Largos cristales que alcanzaron 150 cm de longitud, se observaron durante las mañanas de marzo 2018, desapareciendo en las tardes. Por otro lado, en el puquio N2 puede observarse solo una delgada capa de deposición incluso después de varios meses. Los puquios N1 y N3, poseen pequeños films de materia orgánica acumulada con unos pocos minerales.

#### **PRINCIPALES CONCLUSIONES DEL INFORME:**

- Con respecto a la salinidad y el estado de saturación del yeso, los resultados del informe muestran que la precipitación del yeso está ocurriendo en todos los puquios y a salinidades mucho menores a las predichas por el modelo de Babel (2004), requiriendo así, el desarrollo de un modelo puquio-específico.

La heterogeneidad, tanto espacial como temporal, parece ser una característica fundamental en el ambiente deposicional de los puquios en el Salar de Llamara. A partir de los estudios de mapeos de fondo, se describieron e identificaron diversos tipos de fondo característicos de cada puquio, y logrando identificar relaciones

entre los distintos sustratos y los microorganismos. La precipitación de yeso en el puquio N1 pareciera estar fuertemente influenciada por comunidades de microorganismos que colonizan sus paredes y fondos.

- Al comparar parámetros fisicoquímicos en las aguas de los distintos puquios, la configuración deposicional –considera para el caso del puquio N1 tener por ejemplo una gran influencia microbiana en la sedimentación– además de estar caracterizada por regímenes de baja salinidad, alto contenido de oxígeno disuelto, un relativo bajo contenido de nutrientes y alta disponibilidad de calcio.
- Con respecto a los experimentos de precipitación en curso, estos indican que actualmente los minerales se encuentran precipitando dentro de los puquios, de manera diversa en cuanto a tipo de mineral y cantidad.

#### **4. INFORME N°3 MONITOREO Y ANÁLISIS DE AGUA EN LOS PUQUIOS.**

**ARCADIS. Julio, 2018.**

Este informe da cuenta del monitoreo mensual y análisis de agua de los puquios en relación a su composición iónica y nutrientes, de acuerdo a lo indicado en la letra l) del resuelvo Primero de la Res. Ex. N°473/2018 que ordena la renovación de medidas urgentes y transitorias para el proyecto Pampa Hermosa de SQM. Elaborado por ARCADIS basado en la información del análisis del agua proporcionada por SQM. Análisis Ambientales S.A. (ANAM), entidad técnica acreditada por la SMA, toma las muestras de agua y entrega los resultados de los análisis fisicoquímicos de éstas.

##### **1) Metodología.**

Las campañas de monitoreo consideran 4 puntos, en los cuales se mide la calidad del agua.

Parámetros utilizados para caracterizar las variables ambientales en los puntos ubicados en los puquios:

- . calcio disuelto
- . sulfato disuelto
- . fosforo total
- . magnesio disuelto
- . sodio disuelto
- . carbono orgánico total
- . potasio disuelto
- . nitrógeno orgánico total
- . ortofosfato.

##### **2) Resultados.**

Para cada puquio el informe presenta diversos gráficos sobre la Calidad química del agua de Iones Prioritarios: Calcio, Magnesio, Potasio, Sulfato, Sodio, Cloro, Nitrógeno Orgánico total, Carbono Orgánico total, Fosfatos.

### **3) Discusión.**

Cabe destacar que parte del período evaluado corresponde al período estival, donde se produce mayor evaporación, lo que agudiza el efecto de la suspensión de la medida de mitigación.

Las concentraciones medidas para los iones prioritarios presentan consistencia con la operación de la medida de inyección, aumentando en los meses posteriores a la suspensión de la medida de mitigación, especialmente en los puquios N3 y N4, donde este comportamiento es más pronunciado al igual que lo observado respecto a los niveles de estos 2 puquios. En particular para el mes de julio, se mantiene la disminución en el valor de los parámetros sodio y cloruro en los puquios N2, N3 y N4, mientras que en el puquio N1, el sodio aumentó. Por su parte, el calcio y magnesio disminuyó en los puquios N1, N2 y N3, diferente a la situación observada el mes anterior. En el puquio N4 el calcio se mantiene relativamente constante. El potasio y sulfato también presentan una disminución en los puquios N2 y N4, y en menos proporción en el puquio N3. En el caso del puquio N1, el sulfato disminuye, pero el potasio presenta un leve aumento.

Con respecto a los nutrientes, en el mes de julio se observa que las concentraciones de carbono orgánico total aumentan, excepto en el puquio N3, el fosfato presenta un leve aumento en todos los puquios, mientras que el fósforo total presenta un leve aumento en los puquios N2 y N3, manteniéndose constante en el puquio N4 y disminuyendo en el puquio N1. Por último, el Nitrógeno orgánico se mantiene bajo el límite de detección.

Se observa un comportamiento de la calidad química del agua de los puquios consistente entre la estacionalidad, el manejo de la medida de mitigación en los puquios y los valores obtenidos, presentando un aumento en las concentraciones de iones prioritarios, producto de la detención en la inyección de agua y la disminución del nivel de los puquios, asociado también al periodo estival. En general, para el mes de julio se observa una disminución de los iones. En cuanto a las concentraciones de nutrientes, los puquios presentan concentraciones bajas de fósforo y de nitrógeno orgánico (con valores inferiores al límite de detección).

**5. 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)**

Este informe corresponde al estudio solicitado que tiene como objetivos i) establecer si existe una afectación significativa a la calidad del agua de los puquíos ubicados en el Salar de Llamara, donde el proyecto de SQM tiene autorizado extraer agua, ii) establecer si se requiere contar con un sistema de control del agua de inyección y, iii) analizar las eventuales alternativas para posibilitar el control de la calidad química del agua de inyección. Se analiza la información disponible, una revisión del modelo hidrogeológico desarrollado por ARCADIS (ARCADIS, 2018) y un modelo hidrogeoquímico desarrollado sobre la base del modelo hidrogeológico anteriormente mencionado y la información geoquímica disponible.

**1) Revisión del Modelo Hidrogeológico Conceptual:** El sistema hidrogeológico está controlado por la historia geológica regional y por la alta tasa de evaporación, que genera las condiciones para la formación del Salar. Presenta características geológicas que corresponden a rellenos sedimentarios y volcánicos ubicados entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes.

La cuenca del Salar de Llamara recibe aportes de agua desde la Cordillera de los Andes a través de las quebradas de Guatacondo, Maní, Sipuca, Sama y Mal Paso (CIDERH, 2013) y se conecta a través de la Quebrada Amarga al río Loa. La recarga de agua corresponde a flujos proveniente desde la Cordillera de los Andes alimentados por las precipitaciones estivales altiplánicas conocidas como “Invierno Altiplánico”. La descarga de agua del sistema corresponde principalmente a la evaporación desde el Salar, la evapotranspiración desde los bosques de Tamarugos y las descargas al río Loa a través de la Quebrada Amarga y de pequeños afloramientos directos. De acuerdo a Arcadis (2018), el acuífero Salar de Llamara posee una descarga hacia la Quebrada Amarga del orden de 133 L/s.

**Funcionamiento de los puquios:** Se puede inferir que el flujo regional de aguas subterráneas tiene una dirección Noreste-Suroeste. Sin embargo, los puquios se alimentan por flujos de agua que

dependen de procesos hidrogeológicos asociados a una escala de centenares de metros y no a la escala regional.

Características de la conectividad hidrológica del sector de los puquios:

- ❖ El área de los puquios funciona como un sumidero local extrayendo agua subterránea desde el acuífero por evaporación.
- ❖ Puquios N1 y N2 reciben descargas de flujos locales de aguas subterráneas que escurren de oeste a este alimentando primero al Puquio N1, pasando a través del sistema de numerosas pozas existentes entre ambos puquios para descargar en el Puquio N2.
- ❖ Entorno del Puquio N3 el sistema de aguas subterráneas locales recibe aportes del sistema regional.
- ❖ Comportamiento del Puquio N4 es el menos entendido, pero se supone que se recarga por el sistema de aguas subterráneas local.

**Geoquímica de los puquios:** Desde un punto de vista geoquímico, este acuífero está caracterizado por altas concentraciones de iones disueltos, mayores que las concentraciones observadas en el acuífero regional. Esto se debe a que el acuífero local subsuperficial está sometido a una fuerte evaporación y que se encuentra en contacto directo con depósitos evaporíticos, produciéndose un enriquecimiento progresivo de las soluciones por efecto de la intensa evaporación y por la disolución parcial de los depósitos evaporíticos de la formación Soledad. Este enriquecimiento se acentúa del Puquio N1 al Puquio N2 y similarmente del Puquio N3 al Puquio N4, aunque en este último caso, la conexión hidráulica entre ambos Puquios no está confirmada o es menor.

Además, se aprecia que el nivel de agua en el puquio N1 se encuentra 0,4 m arriba del nivel de agua del puquio N2. Los puquios N3 y N4, que pertenecen a un área distinta y no directamente conectada hidráulicamente con los Puquios N1 y N2 a nivel local, como queda demostrado más adelante por las diferencias de composición química, se encuentran a mayor altura, siendo el nivel de agua del Puquio N3 0,2 m más alto que el del puquio N4.

Las variaciones estacionales confirman que la química de los Puquios está principalmente controlada por la tasa de evaporación, con un aumento significativo de la conductividad eléctrica del agua en el periodo estival, alcanzando sus valores máximos en enero, en el periodo de mayor

radiación solar, y una disminución en el periodo invernal de menor evaporación (comportamiento inverso a la variación del nivel de agua superficial). Como consecuencia de este intenso proceso de evaporación y concentración de las soluciones, se pueden producir precipitaciones de las sales menos solubles (carbonatos, sulfatos, boratos y cloruros de calcio, potasio, magnesio y, en menor grado, sodio).

Para cada Puquío, se seleccionaron muestras correspondientes al periodo estival y al periodo invernal. Para cada una de estas muestras, se determinó la especiación de la solución y, a partir de ello, se calcularon los índices de saturación (Saturation Index o SI) respecto a algunas especies minerales (sulfatos, carbonatos y cloruros).

Se puede apreciar que, en casi todas las muestras analizadas, el yeso es la especie dominante. En los Puquíos N1 y N2, aparece también la glauberita, un sulfato de calcio y sodio. La halita (cloruro de sodio) aparece en mayor proporción en los Puquíos N2 y N4, que son aquellos que presentan las mayores concentraciones de estos elementos. Las muestras de los Puquíos N2 y N4 son también aquellas que presentan la mayor diversidad mineralógica, con presencia de varias especies de sulfatos, cloruros y boratos.

Para entender la relación entre la hidroquímica de los puquíos y la hidroquímica del acuífero regional, se compararon las concentraciones relativas de distintos iones en diferentes pozos de bombeo y en los 4 puquíos. Se observa que, en los pozos de bombeo, existe una mayor dispersión en los valores de concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  (10 a 40 miliequivalentes/L) respecto a las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  (24 a 44 miliequivalentes/L). Por otro lado, en los puquíos se observa una menor dispersión de valores de concentraciones, tanto para el sulfato como para el cloruro, en el puquío N1 y una dispersión muy importante en las concentraciones observadas durante ese periodo en el Puquío N3 (casi un orden de magnitud). Además, se observa un mayor enriquecimiento relativo en sulfato en los puquíos N3 y N4 respecto a los puquíos N1 y N2.

Con respecto a las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ , antes del inicio de la inyección, durante y después de la suspensión de la inyección no se observan mayores diferencias, confirmándose las diferencias en la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  entre los puquíos N1 y N2 y los puquíos N3 y N4.

Con respecto a las concentraciones de calcio, cabe destacar que, al igual que los puquíos, el agua de los pozos de bombeo se encuentran saturados o muy cercanos de la saturación respecto a carbonato de calcio (calcita) y a sulfato de calcio (yeso o aragonita).

En cuanto a las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , se mantiene una relación similar en todas las muestras, tanto de los pozos de bombeo como de los puquíos con un fuerte enriquecimiento que se puede relacionar tanto por un proceso de concentración por intensa evaporación como también por redisolución de halita (cloruro de sodio) desde los sedimentos evaporíticos.

Se presentan perfiles de concentraciones de los iones principales y de arsénico y magnesio correspondientes a un corte transversal que se inicia en la zona de bombeo y atraviesa los puquios en proximidad a los puquios N3 y N4. En el caso de los iones principales, se puede observar que la concentración de calcio se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el perfil. Los otros iones principales tienen un comportamiento bastante similar. Desde la zona de bombeo a la zona de transición, se observa un aumento de concentración, proporcionalmente más importante en cloruro y sodio que en sulfato. Este aumento se debe a un proceso de concentración por evaporación. El menor aumento del sulfato se debe a que parte de este precipita como sulfato de calcio.

Con el fin de evaluar los efectos de la inyección de agua, se registran de manera periódica los niveles y conductividad de agua en pozos de observación ubicados en la cercanía de estos pozos de inyección.

#### Conclusiones del análisis de datos hidroquímicos:

- ✓ Los puquios presentan una alta salinidad con aguas cloradas sódicas, usualmente saturadas respecto al yeso, calcita y dolomita.
- ✓ Valores de CE y de concentraciones de iones disueltos observados en los diferentes puquios son muy distintos, siendo el puquio N1 que presenta sistemáticamente valores menores y el puquio N4 los valores mayores; existe un aumento significativo de conductividad y concentraciones de iones entre los puquios N1 y N2 y similarmente entre los puquios N3

y N4.

- ✓ Concentraciones de cloruro, sodio y potasio observadas en el puquio N2 son en promedio 6 veces mayores que en el puquio N1. Este mismo factor de enriquecimiento se observa en el caso del arsénico.
- ✓ La hidroquímica de los puquios está determinada por los procesos de intensa evaporación que se producen en toda la zona de depresión donde se ubican las lagunas y donde existe un acuífero local subsuperficial, ubicado en depósitos terciarios constituidos principalmente por depósitos sedimentarios evaporíticos.
- ✓ Puquios N1 y N2 constituyen un solo sistema conectado hidráulicamente, con un enriquecimiento progresivo y significativo en iones disueltos desde el puquio N1 al puquio N2. Puquios N3 y N4, que no están directamente conectados entre sí, presentan una hidroquímica distinta a la de los anteriores, con una relación sulfato/cloruro levemente mayor y similar entre sí.
- ✓ Variabilidad estacional de las concentraciones de iones disueltos en los puquios es importante, valores de mayores concentraciones y conductividad se alcanzan en los meses de verano, en particular a finales de enero, periodo que corresponde a la mayor radiación y a la mayor tasa de evaporación.
- ✓ La inyección de agua en la zona de los puquios se traduce en un descenso de la conductividad en los pozos de observación cercanos a los pozos de inyección; esto se manifiesta en forma retardada y depende de la distancia y ubicación de los pozos de observación respecto a los pozos de inyección; después de un periodo de transición, la conductividad tiende a estabilizarse a un valor entre 5000 y 6000  $\mu$  S/cm, que corresponde a la conductividad del agua de inyección.

- ✓ La inyección de agua en la zona de los puquios 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.
  
- ✓ El mayor efecto de la inyección en la conductividad se aprecia en el caso de los Puquios N3 y N4 donde las variaciones estacionales de la conductividad parecen reducirse en el periodo posterior a la inyección, reduciéndose los valores estivales más altos de conductividad respecto a aquellos observados previo a la inyección (2010 a 2012). Cabe señalar sin embargo que solo se dispone de 2 ciclos estivales previo a la inyección.

## **2) Modelo Hidrogeoquímico Conceptual**

Se desarrolló un modelo conceptual para los puquios, dividido en 3 subsistemas separados: un sistema conjunto que incluye los puquios N1 y N2, un sistema para el puquio N3 y otro para el puquio N4.

**Modelo Puquios N1 y N2.** El balance hídrico en los puquios se ha considerado en 2 etapas:

a) durante la inyección (período mayo-2012 a diciembre-2017).

b) sin inyección (período desde 13-diciembre-2017 a mayo 2018).

Se considera que el Puquio N1 es alimentado por el acuífero local a través de un flujo subsuperficial  $F_0$ . Durante la inyección, a este flujo  $F_0$  se suma una fracción  $b$  del flujo de inyección  $F_i$  de tal forma que al puquio N1 ingresa un flujo  $F_0'$ . Del puquio N1 sale un flujo  $F_1$ , el cual a su vez alimenta el puquio N2, del cual sale un flujo  $F_2$ . En ambos puquios, se produce una evaporación que se traduce por un flujo de agua,  $Ev_1$  para el Puquio N1 y  $Ev_2$  para el puquio N2.

Resultados obtenidos para la calibración del modelo en las etapas definidas en el modelo conceptual:

a) Durante la inyección (considerando variación estacional invierno-verano): la fracción del agua que se inyecta que llega al puquío N1 varía entre 5 y 7%, dependiendo de la estación. Si bien este flujo representa entre 20 y 25% del agua que ingresa al puquío N1, no altera significativamente la calidad de este, considerando que la evaporación es el factor que controla la concentración de los iones disueltos. Este efecto de la inyección se atenúa fuertemente en el caso del Puquío N2 donde ingresa el agua del puquío N1, previamente concentrada por evaporación.

b) Sin inyección (desde 13-12-2017). Disminución de nivel y de volumen de los puquíos indica que la pérdida de agua por evaporación es mayor que la diferencia entre los flujos de entrada y salida de agua a los puquíos. Los flujos tienden a disminuir por una disminución del nivel freático y todo este proceso tiene como consecuencia un aumento de la salinidad y de la conductividad de los puquíos.

**Modelo Puquíos N3 y N4.** Los balances hídricos para los Puquíos N3 y N4 se analizaron y se modelaron en forma separada. 2 etapas para modelo conceptual de N3 y N4.

a) Durante inyección (período mayo-2012 a diciembre-2017). En el caso de los puquíos N3 y N4, no fue posible estimar la fracción de la inyección que efectivamente ingresa al puquío a partir de las concentraciones o de las conductividades. En el caso del Puquío N3, no se observa una disminución de la conductividad entre S19 y S9 producto de la inyección. Del mismo modo, en el caso del Puquío N4 tampoco se observa una disminución de conductividad entre S17 y S8. Esto sugiere que la cantidad de agua inyectada que efectivamente ingresa a los puquíos es mínima.

b) Sin inyección (período desde 13- diciembre-2017 a mayo 2018). En ausencia de inyección, el flujo neto de agua que ingresa a los Puquíos N3 y N4 solo es capaz de compensar un 75% de la pérdida por evaporación, lo cual deriva en una disminución progresiva y significativa del volumen de los puquíos y en una concentración progresiva de las sales, incluyendo los cloruros, que llegan a nivel de saturación y empiezan a precipitar. La pérdida de volumen producto del descenso de nivel es mucho más importante en el caso de los Puquíos N3 y N4.

En el caso de los puquíos N1 y N2, la pérdida máxima de volumen representa 14% y 23% respectivamente, mientras que en el caso del puquío N3, llega a 73% y para el puquío N4 a 45%.

### **Efecto de la inyección de agua en la química de los puquios.**

La inyección en la cercanía de los puquíos de parte del agua bombeada en la zona de los pozos de bombeo genera una baja de la conductividad y de concentración de algunos iones disueltos en los pozos de observación ubicados alrededor de los pozos de inyección. Estos cambios se manifiestan con un retraso que depende de la ubicación y distancia de los pozos de observación. En el sistema de puquíos N1 y N2, el efecto de la inyección se manifiesta por una disminución de la conductividad del puquío N1 del orden de 20%, variación que se encuentra dentro del rango de variaciones estacionarias observadas en el periodo previo a la inyección. En el caso del puquío N2, donde ingresa el agua proveniente de la zona del puquío N1 que ya se encuentra concentrada por efecto de la evaporación, no se aprecia un cambio ni en la conductividad ni en las concentraciones de iones disueltos con respecto al periodo previo a la inyección. Entre el puquío N1 y N2, se observa para el sodio, el cloruro y el arsénico un factor de concentración del orden de 6.

Se calcula que el caso de los puquíos N1 y N2, el volumen inyectado representa 8,7 veces el volumen de almacenamiento estimado y en el caso del área de los Puquíos N3 y N4, el volumen inyectado es 33,7 veces mayor que el volumen de almacenamiento. La cantidad de agua inyectada supera ampliamente el volumen de almacenamiento de la zona de influencia directa de los puquíos sin que se observe un deterioro mayor de la calidad química del agua.

En el caso de los puquios N1 y N2, el comportamiento parece indicar que se ha llegado a un estado relativamente estacionario y no se esperan mayores cambios en la química de los puquios como resultado de la inyección: el Puquío N1 actúa como área de pre-concentración del agua antes de su ingreso al puquío N2 donde el efecto de la inyección se ve muy atenuado. En el caso de los puquios N3 y N4, se observa un enriquecimiento en sales de las aguas subterráneas en los pozos de observación en la cercanía de los puquios.

Hasta la fecha, no parece haber un efecto de la inyección en la química de los puquios que depende fundamentalmente del balance hídrico. Una disminución aún leve del nivel de agua en la cercanía de los puquios (depresión del nivel freático) se traduce en este caso por un aumento importante de la salinidad al no verse compensada la evaporación por un flujo de agua hacia el puquio. Mantener un alto nivel de agua en los puquios N3 y N4 significa por lo tanto reducir su concentración.

### **Alternativa de control de la calidad química del agua de inyección**

El objetivo no debe ser inyectar agua en una calidad química similar al agua de los puquios sino asegurarse que el agua inyectada no altera significativamente el agua del acuífero somero que alimenta a los puquios. 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 de la calidad química del agua de inyección. Sin perjuicio de lo anterior se han evaluado las alternativas posibles para el control del agua de inyección.

Las alternativas evaluadas son:

- . Selección del o los pozos de bombeo para la obtención del agua de inyección.
- . Proceso de Concentración del agua de inyección
- . Acondicionamiento del agua de inyección mediante adición de sales
- . Manejo de nivel del acuífero en el entorno de los puquios
- . Bombeo desde la zona sur de los puquios

### **3) Conclusiones.**

Es importante tener presente, para la operación del sistema de inyección de aguas destinado a proteger los puquios del Salar de Llamara, que la química de ellos está controlada por la hidrogeología local y no regional.

La implementación de la medida urgente y transitoria (MUT) generó descensos de nivel notorios en los puquios N3 y N4. En cambio, el impacto de recuperación de niveles freáticos producto de la paralización de la extracción tuvo un efecto lento y local, notándose en corto y mediano plazo solo en la zona de bombeo sin alcanzar la zona de transición ni la zona de los puquios. Este efecto fue tomado en consideración por las autoridades y por el Tribunal Ambiental que autorizó el

reinicio de las operaciones de inyección en los puquios N3 y N4. De los datos analizados, se puede concluir que no existe un efecto significativo de la inyección en la calidad química de los Puquíos. Las variaciones observadas en conductividad y concentraciones se mantienen dentro de los rangos de variaciones estacionales observados en el periodo previo a la inyección.

Se concluye en este informe, que la medida de mitigación adoptada por SQM no ha afectado la calidad de agua de los puquios más allá de los rangos de variaciones observados previo a la entrada en operación del proyecto. Se recomienda mantener un monitoreo de la calidad del agua inyectada a través de un registro permanente de la conductividad y de mediciones mensuales de la calidad química del agua inyectada.

## **6. CONCLUSIONES CAPES SOBRE LOS INFORMES COMPILADOS:**

Los estudios realizados desde diciembre del año 2017 a Septiembre del 2018 han entregado información adicional sobre el estado de los componentes ambientales de los puquios del Salar de Llamara durante la ejecución de la MUT. Además, han mejorado la calidad de los análisis al incorporar una mayor replicabilidad espacial y temporal de los muestreos, y han estandarizado los métodos de análisis utilizados. Este aspecto es muy valioso dado que permite conocer el estado de los componentes ambientales ante un escenario hidráulico nuevo, no previsto en la EIA o Línea Base (que fueron ejecutadas en un escenario de variación estacional de los niveles de agua en los puquios), ni en el periodo posterior de funcionamiento del proyecto bajo la medida de mitigación (en el cual se mantuvo por extracción y reinyección un nivel constante de agua en los puquios definido entre extremos establecidos por la SMA), en el cual se detuvo totalmente la extracción y reinyección de agua. En este sentido durante el tercer escenario hidráulico que estableció la MUT, durante la época de mayor evaporación del sistema (meses de verano) se observó que:

Según los resultados de los estudios metagenómicos recientes, las comunidades microbianas presentes en las distintas capas existentes en los domos están determinadas en gran medida por el puquio al que pertenecen. Existiendo, además, una gran similitud de acuerdo a la asignación funcional y taxonómica entre las comunidades de la capa verde de todos los puquios.

La abundancia del fitobentos presentó un notorio el aumento en los puquios N2, N3 y N4 a partir de mayo, junio, julio y agosto de 2018. La comunidad fitobentónica ha variado en los puquios N1, N2 y N3 (desde diciembre), lo que se expresa en dominancias más variadas (principalmente en N3), pero manteniendo niveles de diversidad y abundancia relativamente parejos a lo largo de estos 9 meses. El fitoplancton también exhibe un patrón de alta variabilidad espacio-temporal. La riqueza en el puquio N2 se encuentra por sobre los rangos registrados durante la línea de base y pre-operación para el punto T2-23 según lo observado históricamente. También se observó un aumento de la abundancia registrada en el puquio N4 a partir del monitoreo de junio de 2018. En cuanto a la diversidad de esta comunidad, la dominancia se ve sesgada por la presencia mayoritaria de una especie en el puquio N1 (hasta agosto de 2018), similar a lo observado en el puquio N4 y distinto a lo exhibido en los puquios N2 y N3, donde las dominancias han experimentado mayores cambios, aspecto que se ve reflejado en el aumento de la diversidad y equidad a partir de abril. La riqueza del fitobentos en el punto T2-23 ha estado en aumento a partir de abril de 2018. Aun así, no se puede observar para este punto de medición histórico del puquio N2 un efecto particular atribuible a los cambios experimentados por el sistema (ej.: disminución del nivel de agua) desde el cese de la inyección (medida de mitigación asociada a la MUT). El fitoplancton, por otro lado, ha experimentado en el punto T2-23 cambios más notorios a través del tiempo, particularmente según lo exhibido por su abundancia lo que pareciera ser un comportamiento cíclico, con valores mayores en torno a los años 2010 y 2012, lo que estaría repitiéndose a partir de julio del 2017 y posiblemente también en 2018.

Con respecto a la salinidad y el estado de saturación del yeso, la precipitación del yeso está ocurriendo a salinidades mucho menores a las predichas por el modelo de Babel (2004), requiriendo así, el desarrollo de un modelo puquio-específico. La heterogeneidad, tanto especial como temporal, parece ser una característica fundamental en el ambiente deposicional de los puquios en el Salar de Llamara. Los experimentos de precipitación en curso, indican que actualmente los minerales se encuentran precipitando dentro de los puquios, de manera diversa en cuanto a tipo de mineral y cantidad.

Por otra parte, durante el periodo diciembre 2017, septiembre 2018 se observa un aumento en las concentraciones de iones prioritarios, producto de la detención en la inyección de agua y la

disminución del nivel de los puquios, asociado también al periodo estival (alta tasa de evaporación). En general, para el mes de julio se observa una disminución de los iones. En cuanto a las concentraciones de nutrientes, los puquios presentan concentraciones bajas de fósforo y de nitrógeno orgánico (con valores inferiores al límite de detección).

En cuanto a los efectos de la extracción e inyección del agua se ha confirmado que los puquios presentan una alta salinidad con aguas cloradas sódicas, usualmente saturadas respecto al yeso, calcita y dolomita. Los valores de CE y de concentraciones de iones disueltos observados en los diferentes puquios son muy distintos, siendo el puquio N1 que presenta sistemáticamente valores menores y el puquio N4 los valores mayores; existe un aumento significativo de conductividad y concentraciones de iones entre los puquios N1 y N2 y similarmente entre los puquios N3 y N4.

Las concentraciones de cloruro, sodio y potasio observadas en el puquio N2 son en promedio 6 veces mayores que en el puquio N1. Este mismo factor de enriquecimiento se observa en el caso del arsénico. La hidroquímica de los puquios está determinada por los procesos de intensa evaporación que se producen en toda la zona de depresión donde se ubican las lagunas y donde existe un acuífero local subsuperficial, ubicado en depósitos terciarios constituidos principalmente por depósitos sedimentarios evaporíticos. Los puquios N1 y N2 constituyen un solo sistema conectado hidráulicamente, con un enriquecimiento progresivo y significativo en iones disueltos desde el puquio N1 al puquio N2. Puquios N3 y N4, que no están directamente conectados entre sí, presentan una hidroquímica distinta a la de los anteriores, con una relación sulfato/cloruro levemente mayor y similar entre sí. La variabilidad estacional de las concentraciones de iones disueltos en los puquios es importante, valores de mayores concentraciones y conductividad se alcanzan en los meses de verano, en particular a finales de enero, periodo que corresponde a la mayor radiación y a la mayor tasa de evaporación. La inyección de agua en la zona de los puquios se traduce en un descenso de la conductividad en los pozos de observación cercanos a los pozos de inyección; esto se manifiesta en forma retardada y depende de la distancia y ubicación de los pozos de observación respecto a los pozos de inyección; después de un periodo de transición, la conductividad tiende a estabilizarse a un valor entre 5000 y 6000 $\mu$ S/cm, que corresponde a la conductividad del agua de inyección.

La inyección de agua en la zona de los puquios no se ha traducido en cambios muy significativos en la conductividad de los diferentes puquíos, que sigue variando en forma estacional, en rangos similares a aquellos observados en el periodo previo a la inyección.

Asimismo, los estudios de hidrología desarrollados últimamente han establecido de que es importante tener presente, para la operación del sistema de inyección de aguas destinado a proteger los puquios del Salar de Llamara, que la química de ellos está controlada por la hidrogeología local y no regional. La implementación de la medida urgente y transitoria (MUT) generó descensos de nivel notorios en los puquios N3 y N4. En cambio, el impacto de recuperación de niveles freáticos producto de la paralización de la extracción tuvo un efecto lento y local, notándose en corto y mediano plazo solo en la zona de bombeo sin alcanzar la zona de transición ni la zona de los puquios. De los datos analizados, se puede concluir que no existe un efecto significativo de la inyección en la calidad química de los Puquíos. Las variaciones observadas en conductividad y concentraciones se mantienen dentro de los rangos de variaciones estacionales observados en el periodo previo a la inyección. Por lo tanto, la medida de mitigación adoptada por SQM no ha afectado la calidad de agua de los puquios más allá de los rangos de variaciones observados previo a la entrada en operación del proyecto y se recomienda mantener un monitoreo de la calidad del agua inyectada a través de un registro permanente de la conductividad y de mediciones mensuales de la calidad química del agua inyectada.

A pesar de lo anterior, los estudios realizados durante el periodo diciembre del 2017 y septiembre del 2018 no contribuyen a subsanar el problema principal relacionado con la necesidad de entender de que para establecer causalidades, y en definitiva evaluar si las actividades del proyecto han producido algún cambio ambiental en puquios, no existe una situación de Línea Base confiable o una situación temporal o espacial de Control (sin la influencia de las actividades del proyecto) contra la cual contrastar los resultados obtenidos. En ese tenor se podría pensar de que el escenario hidráulico de no extracción y no inyección definido por la MUT desde diciembre del 2017 podría servir como una nueva Línea Base para el proyecto, dado que se ha detenido toda la actividad relacionada con el proyecto, pero nuevamente el período analizado corresponde a un período menor a un año), está derivado de una situación de intervención de varios años de la dinámica hidráulica para la cual en la misma EIA del proyecto se proyectaba un período de recuperación de

varios años en los cuales debía mantenerse la reinyección de agua y además, el foco de estudio continua puesto en componentes ambientales bióticos (como el fitobentos, fitoplancton y bacterias), que presentan una altísima variabilidad espacial y temporal la cual no es superada incluso con el mejoramiento en la replicabilidad de los nuevos estudios (aún persiste la tendencia que entre más se muestrea, más especies y taxas son reconocidas sin llegar a una situación de saturación o estabilidad en el componente de diversidad o composición de especies).



## ENTREGABLE VI

### **INFORME SOBRE LA EXISTENCIA O INEXISTENCIA DE EFECTOS AMBIENTALES EN LOS PUQUIOS PRESENTES EN EL SALAR DE LLAMARA COMO CONSECUENCIA DE LA EXTRACCIÓN E INYECCIÓN DE AGUA DERIVADOS DE LA OPERACIÓN DE SQM**

*En esta sección de la asesoría científica, se entregan un análisis de la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los puquios presentes en el Salar de Llamara como consecuencia de la extracción de agua derivada de la operación de SQM. El mencionado análisis lo realiza el grupo G4 en base a la información ambiental disponible que previamente fue revisada por los grupos G1, G2 y G3.*

## **INDICE DE CONTENIDOS**

<b>1. Introducción.....</b>	<b>52</b>
<b>2. Generalidades sobre el Proyecto.....</b>	<b>52</b>
<b>3. EIA y Línea de base del Proyecto. ....</b>	<b>55</b>
<b>4. La definición del sistema en estudio del Proyecto. ....</b>	<b>60</b>
<b>5. Heterogeneidad del sistema en el Proyecto.....</b>	<b>61</b>
<b>6. Diseño de monitoreo del Proyecto.....</b>	<b>69</b>
<b>7. Conclusiones Globales de la Asesoría Científica CAPES UC.....</b>	<b>75</b>

## **1. INTRODUCCIÓN**

Para la presente asesoría científica se le solicitó al Centro UC de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES), evaluar la existencia o inexistencia de efectos ambientales en los Puquios presentes en el Salar de Llamara como una consecuencia de la extracción e inyección de agua derivada de la operación de SQM. En base a lo anterior, para el desarrollo de esta etapa de la asesoría se realizó un análisis del estado de los componentes ambientales y el medio ambiente en general de los puquios del Salar de Llamara, a partir de la información ambiental disponible.

La información ambiental disponible sobre los puquios en referencia ha sido generada a través del análisis de 3 componentes principales: (1) Comunidad Microbiana, (2) Calidad del Agua e Hidrología, y (3) Componentes Ecosistémicos. El análisis detallado de la información que se ha generado sobre estos tres componentes ambientales en casi 10 años de estudios en la zona fue consolidado en cuatro documentos anteriores (Entregables I, II, III y IV), a lo que se agrega el entregable V con estudios adicionales más recientes, en los cuales se entrega un resumen de dicha información, se detectan los problemas encontrados en la generación, interpretación y conclusiones de los estudios realizados y se entregan recomendaciones para mejorar los estudios enfocados en cada uno de los componentes en particular. En base a dicho trabajo, en las secciones siguientes entregamos un análisis de la naturaleza, resultados y problemática general para el Plan de manejo y estado ambiental de los puquios del Salar de Llamara.

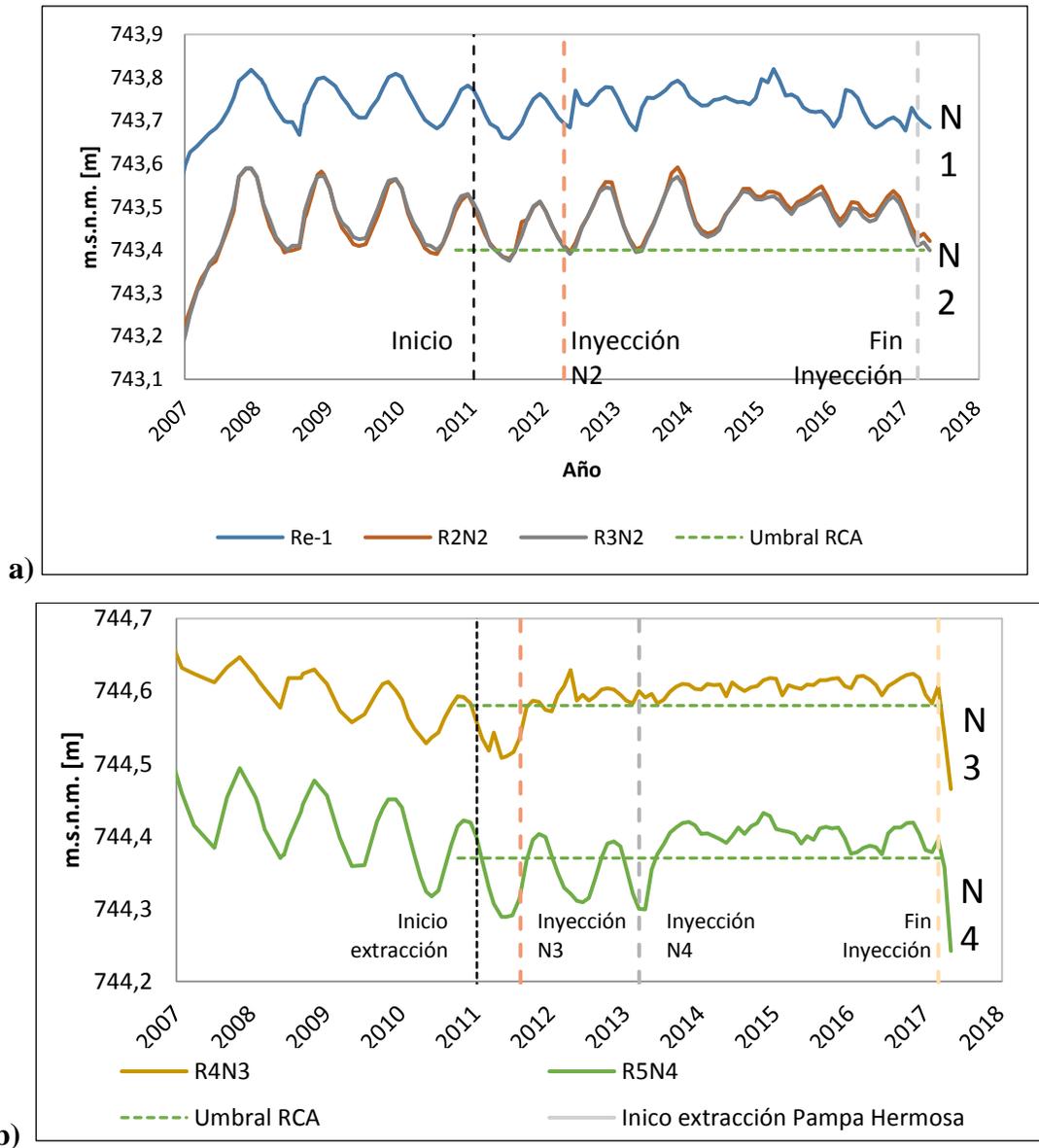
## **2. GENERALIDADES SOBRE EL PROYECTO**

La información ambiental disponible a casi 10 años de ejecución del Proyecto no se corresponde con un diseño espacial y temporal en el cual se pueda identificar claramente, por una parte, una situación de LINEA BASE propiamente tal contra la cual contrastar los estudios posteriores, y por otra parte, el estado de los componentes del Salar de Llamara en su estado natural en contraste con la situación ambiental bajo el efecto de extracción de agua o manejo hidrológico. Si bien existe un estudio denominado LINEA BASE, su extensión temporal estuvo restringida a dos fechas de

muestreo en primavera dentro del periodo de un año en el cual no se capturó (por la extensión temporal del estudio) la variación intra e interanual del sistema y, por otra parte, el diseño de muestreo de este estudio (que consideró el muestreo de un punto en cada uno de los 4 puquios) tampoco superó la amplia heterogeneidad espacial del sistema ni entre los puquios ni dentro de estos. Esta anomalía en la organización del manejo ambiental del proyecto Pampa Hermosa, se hace evidente en los resultados de la propia LINEA BASE, donde ya la variabilidad de casi todos los componentes ambientales analizados (composición de especies zoo y fitoplanctónicas, salinidad, temperatura, niveles de nutrientes, etc.) es tan alta que define prácticamente a los 4 puquios como entidades particulares y no equivalentes.

En ese mismo tenor, la principal medida de manejo ambiental en el Salar (activación y mantención de una barrera hidráulica), destinada originalmente a la mantención del nivel de agua de los puquios entre rangos predeterminados durante la evaluación ambiental y establecida por ende como una medida de mitigación a la actividad de extracción de agua, es una intervención mayor que a pesar de estar aprobada por la autoridad ambiental a partir de la EIA, genera un nuevo escenario hidrológico desde el momento de su implementación, invalidando aún más el peso y contundencia de la denominada situación de LINEA BASE (la cual como escenario se sustentaba en la variabilidad temporal del nivel de agua de los puquios). La medida de “mitigación” antes mencionada, de hecho, modificó considerablemente la variabilidad temporal del nivel de agua de los puquios, reconocida y registrada en los estudios desarrollados durante los años 2007 al 2018 (**Figura 1**). En base a esto, desde el estudio denominado LINEA BASE se han requerido e implementado una serie de estudios enfocados en los 3 componentes ambientales detallados en la sección anterior, los cuales, con excepción de la calidad del agua e hidrología, buscan más bien tratar de definir y caracterizar a los componentes bióticos que se encuentran en los puquios más que seguir una línea de monitoreo temporal y espacial propiamente tal en la cual claramente se pueda contrastar una situación Control (sin actividad del proyecto) y No Control (con actividad del proyecto) ya sean temporales o espaciales. Esta situación se genera desde la RCA del Proyecto, en la cual por una parte se acepta erróneamente la definición de Estromatolitos (registrada originalmente en la EIA) para las formaciones dómicas de los puquios y por otra parte se establece un seguimiento ambiental que no considera la heterogeneidad del sistema. Otro problema general de la información disponible hace referencia a cambios en las metodologías de muestreo, cambios

en los análisis y diseño de muestreo, e incluso el nivel de detalle con que se realizan los estudios en cada uno de los componentes tanto físicos como bióticos analizados desde la LINEA BASE a posteriori en el Salar. Dicho problema es abordado en detalle para cada uno de los documentos en los Entregables I, II, III y IV.



**Figura 1. Variación en el nivel de agua de los puquios N1, N2 (a) y N3, N4 (b) entre los años 2007 al 2018.**

En base a estos tres componentes (hidrología, microorganismos y fitoplancton/fitobentos), resulta imposible determinar algún nivel de efecto ambiental o detectar de manera confiable, a partir de un análisis espacial, temporal y estadísticamente confiable, un cambio ambiental en alguno de los componentes de los puquios del Salar de Llamara en base a la información disponible a la fecha. En las siguientes secciones se entrega el detalle de estas problemáticas para cada uno de los componentes ambientales analizados del Salar de Llamara.

### **3. EIA Y LINEA BASE DEL PROYECTO.**

Un problema fundamental detectado en el análisis de los documentos asociados a los estudios ambientales que se han desarrollado en los puquios del Salar de Llamara es la confusión en torno a los componentes dómicos que se encuentran en ellos. Estos componentes han sido identificados como Estromatolitos, Bioevaporitas, Evaporitas o Sistemas de Depositación de Yeso. Más allá de la nomenclatura, en la confusión está implícita la idea de que las estructuras dómicas presentes en los puquios se han formado por la interacción entre procesos geológicos (depositación física debida a precipitación) y biológicos (la acción de bacterias que intervienen en la formación de las estructuras dómicas). Este punto no es menor, dado que claramente desde la EIA define como ambientalmente muy importante a las estructuras dómicas para el posterior monitoreo y manejo ambiental del Proyecto y por otra parte se fundamenta gran parte del esfuerzo de manejo ambiental del proyecto en la conservación y mantención de los microorganismos y su supuesta influencia en la creación y mantenimiento de las estructuras dómicas. Es de esta forma que, en términos generales, el manejo ambiental originado en el proceso de evaluación ambiental del proyecto ha estado fuertemente enfocado en determinar cuáles son los componentes microbianos de las estructuras dómicas, llegando incluso a la implementación de análisis metagenómicos dejando absolutamente de lado la determinación, análisis y esclarecimiento de los mecanismos por los cuales supuestamente los microorganismos participarían en la estructuración y mantenimiento de las estructuras dómicas presentes en los puquios.

En cuanto a la confusión de términos, durante el EIA se hablaba de Estromatolitos; luego el estudio de Farías y Contreras (Informe Campaña de Verano) sugirió la denominación de Bioevaporitas, lo que luego no fue incluido ni siquiera sugerido en el artículo de Rasuk et al. (2014). Luego Reid et

al. 2018 (Informe Marzo, pág. 42) realiza una revisión de la terminología y concluye que, dado que el término Bioevaporita no es validado, se sugiere llamarlos simplemente “Sistemas de Depositación de Yeso”.

En cuanto a los mecanismos de formación y mantención de las estructuras dómicas, lo importante es que el agua está saturada de sulfato de calcio (yeso) y por lo tanto la formación de las estructuras tiene un origen geoquímico (i.e., Evaporita) y no se ha formulado ninguna prueba en los trabajos realizados de que las bacterias o microorganismos tengan algún rol en la estructuración de los domos; simplemente los usan como hábitat.

Analizando en detalle este punto, en la Introducción de la sección de Biota Acuática del Capítulo Caracterización del área de influencia del EIA del proyecto Pampa Hermosa (Capítulo 5.6, Punto 5.6.1, página 1) se indica que en “los puquios del Salar de Llamara se estudiarán los mismos componentes biológicos que en el río Loa y Quebrada Amarga y en forma complementaria, **los tapetes microbianos que dan origen a las estructuras denominadas estromatolitos**”. El estudio en los puquios se llevó a cabo durante octubre del año 2007. En cuanto a la metodología usada se indica en el punto 5.6.3.9 (Microorganismos) que la caracterización de los microorganismos se realizó mediante un análisis comparativo entre los diferentes puquios considerando aspectos como la calidad del agua, flora y fauna acuática y la estructura espacial de los tapetes microbianos.

En la sección de Caracterización del área de influencia de la Línea Base, referente a los puquios (sección 5.6.4.2) se detalla en el punto e) (Tapetes microbianos) que: “Los tapetes microbianos están constituidos por comunidades bentónicas de pocos milímetros de espesor, verticalmente estratificadas en capas. La disposición de las distintas poblaciones (de superficie a la capa más profunda), es de a) diatomeas, b) cianobacterias, c) bacterias rojas del azufre, d) bacterias verdes del azufre. Por debajo de la zona pigmentada se encuentra un sedimento negro debido a la actividad de las bacterias sulfato reductoras. Los estromatolitos (laminaciones órgano-sedimentarias de diversas formas) se forman por la acción de los tapetes microbianos. La formación de la estructura geológica laminada se produce por la deposición de sedimentos finos sobre la superficie del tapete, lo que hace que las bacterias deban migrar hacia arriba a través de este sedimento para poder seguir alcanzando la luz solar y realizar la fotosíntesis. La repetición

cíclica de ese proceso de "crecimiento" de la colonia va generando la estructura laminada". A pesar la mención anterior, en ninguna parte de la Línea Base ni en los estudios posteriores se entrega alguna demostración o desarrollo lógico que permita validar la afirmación de que la colonia bacteriana efectivamente forma la estructura dómica.

Continuando con el análisis de la información contenida en la Línea Base sobre las estructuras dómicas, en dicho documento se menciona que en el Salar de Llamara, los estromatolitos están presentes exclusivamente en los puquios identificados por las estaciones N1<sup>1</sup> y N3 (EIA Anexo XXII, Figura XXII.1-35), y que no se detectó la presencia de estas formaciones en los otros afloramientos. El tamaño promedio de los estromatolitos de la laguna N1 se presenta en la Figura 5.6-2, donde es posible observar unidades antiguas con una altura media de  $0.54 \pm 0.05$  m y unidades jóvenes con una altura media de  $0.16 \pm 0.05$  m. Al analizar el nivel de actividad biológica de diferentes unidades en el puquío N1, mediante la observación directa de la presencia de pigmentos fotosintéticos activos, se pudo constatar que las unidades de menor tamaño y base de las unidades antiguas presentaban tapetes microbianos activos (Figura 5.6-3). El área de actividad de las diferentes unidades estaba restringida por el nivel hidrométrico del puquío. Es importante señalar que los tapetes microbianos corresponden a organismos acuáticos, donde la presencia y nivel del agua es el recurso limitante que determina la sobrevivencia de éstos. En la parte superior de las unidades antiguas se detectó la presencia de tapetes microbianos sin indicios de actividad biológica (secos), y no fue posible establecer el periodo de tiempo desde el cual mantienen esa condición. El puquio donde se encuentran los estromatolitos (N1 y N3) presenta una cubeta de forma regular, donde el borde perimetral está dado por la presencia de unidades antiguas que durante su proceso de crecimiento comenzaron a cerrar los espacios libres (Anexo XXII, Figura XXII.1-36).

Nuevamente, a pesar de que se reconoce que las estructuras dómicas no se encuentran en todos los puquios, en este documento (Línea Base) se insiste en la idea de que el componente principal son los Estromatolitos, que estos se encuentran activos en presencia de agua, y que además crecen activamente cerrando el espacio de los puquios. Todas las observaciones mencionadas no tienen ningún asidero funcional biológico previo y se fundamentan en observaciones desarrolladas

prácticamente a ojo desnudo durante la Línea base.

En cuanto a la Calidad del Agua de los puquios, en la Línea Base se menciona que al analizar las características de la calidad del agua con la existente en otros ambientes de la cuenca del río Loa (Anexo XXII, Figura XXII.1-36), en términos de los valores de conductividad, el agua que alimenta el puquio N1 presenta valores intermedios a los registrados en otros afloramientos. Al comparar las estaciones de muestreo del acuífero del Salar de Llamara, se pudo comprobar que estas no presentaron diferencias de calidad química del agua (Anexo XXII, Figura XXII.1-38) entre sí. El valor de los parámetros de elementos traza, metales pesados, macroelementos, toxicológicos y de parámetros medidos in situ no se segregó a través del diagrama de ordenación espacial, lo cual indica una composición iónica uniforme en el Salar de Llamara. No obstante, al comparar los valores de conductividad entre los diferentes puquíos, es evidente el proceso de aumento de salinidad debido a la evaporación (Sección 5.4 de Línea Base).

Luego de la referencia a la situación de la calidad del agua en el Salar y los puquíos, en dicha sección de la Línea Base se intenta vincular a este componente ambiental con las estructuras dómicas mencionando que los “estromatolitos” se encontraron en aguas con valores de conductividad de 60 mS/cm (N1) y 28 mS/cm (N3); los otros puquíos presentaron valores superiores de conductividad (132-193 mS/cm). Al comparar la composición de microalgas bentónicas entre los puquíos del Salar de Llamara, hubo diferencias significativas de composición de microalgas bentónicas dentro del salar (Análisis discriminante,  $F = 23301$ , 3,1 g.l.,  $p = 0,0048$ , Anexo XXII, Figura XXII.1-39). Se detectaron cuatro agrupaciones estadísticas: La primera constituida por la estación N1, que presentó alta abundancia y riqueza de taxa; la segunda agrupación conformada por la estación N2 con ausencia de taxa; la tercera agrupación definida por la estación N3, que presentó valores intermedios de riqueza y baja abundancia de microalgas; y la cuarta agrupación constituida por las estaciones N4 y P1, que presentaron baja riqueza (2-3 taxa) y niveles intermedios a altos de abundancia de microalgas. El patrón anterior puede responder a las diferencias en la salinidad del agua.

En la vinculación de la calidad del agua con las estructuras dómicas hay 2 aspectos importantes que merecen ser destacados. En primer lugar, sin ningún asidero y simplemente basado en

observaciones y co-ocurrencias, se vincula la alta salinidad con la presencia de estructuras dómicas. En segundo lugar, se demuestra que los componentes bióticos analizados en los puquios (microalgas) son diferentes entre los 4 puquios, definiendo claramente que en términos de dichos componentes los puquios presentan desde el inicio una alta variabilidad entre ellos. Cabe mencionar que si bien funcionalmente las microalgas no están relacionadas con los denominados “Estromatolitos” en el párrafo donde se expone la vinculación entre la calidad del agua y las estructuras dómicas queda la sensación de que sí están relacionados.

En conjunto, las confusiones en la Línea Base mencionadas en los párrafos precedentes se consolidan en la sección “Conclusiones de la EIA” (página 36, sección f, Estromatolitos) donde se indica que:

“En los puquios del Salar de Llamara se detectó la presencia de estromatolitos en las estaciones N1 y N3. Los estromatolitos forman una estructura tipo mosaico con unidades de menor tamaño (“jóvenes”) y de mayor tamaño (“antiguas”). Las unidades de menor tamaño y la base de las de mayor tamaño presentaron tapetes microbianos activos en su interior, en cambio, la parte superior de las unidades de mayor tamaño presentaron tapetes secos. Lo anterior permite señalar que la actividad de los tapetes microbianos depende del nivel hidrométrico del puquí. La composición específica de los tapetes microbianos en términos de las microalgas, demuestra que presentan una distribución amplia, pudiendo encontrarse las especies en diferentes sectores de la cuenca del río Loa. Al comparar este ensamble entre los diferentes puquíes del Salar de Llamara, se encontraron diferencias significativas entre sitios, debido probablemente a las diferencias en la salinidad del agua. Los puquíes del Salar de Llamara (N1, N2, N3, N4 y P1), en términos de sus características abióticas (calidad del agua) y bióticas (composición organismos acuáticos), son similares a otros cuerpos de agua identificados en otros salares (Demergasso et al., 2003), sin embargo, son los únicos del Salar de Llamara. La biodiversidad acuática del salar presentaría una distribución amplia, con atributos cosmopolitas. Es probable que vectores biológicos como las aves favorezcan el intercambio de individuos entre sistemas. La presencia de estromatolitos en las lagunas N1 y N3 asignaría una condición de singularidad a los puquios del Salar de Llamara. El valor ambiental de los puquios, estaría dado por su escasez en este Salar y la presencia de los estromatolitos. Es importante señalar que este tipo de ecosistemas depende del nivel hidrométrico de los puquíes (ej.

tapetes microbianos), aun cuando los estromatolitos como estructuras geológicas no serían afectados por variación en el nivel del agua”.

El párrafo precedente proveniente de las conclusiones de la Línea de Base es un claro ejemplo de una serie de afirmaciones sin fundamento. En primer lugar, no existe ninguna prueba de que lo encontrado en los puquios efectivamente corresponda a un Estromatolito. En segundo lugar la vinculación del tamaño de las estructuras dómicas con su posible edad geológica tampoco tienen ningún asidero, toda vez que se está hablando de un sistema de cuatro puquios muestreados con un diseño carente de replicación intra sujeto de estudio, absolutamente heterogéneo (a nivel intra e inter puquio) tanto en su aspecto físico y biológico, para el cual ni siquiera se ha estudiado o entregado información; por último sobre tasas de precipitación del yeso equivalentes que permitan afirmar que entre más grandes las estructuras dómicas son más antiguas. Por otra parte, se indica que la diferencia en las comunidades bióticas de los 4 puquios se vincularían con la salinidad de estos, lo cual nuevamente no tiene ningún asidero, dado que no se entrega información sobre las posibles diferencias en los niveles de tolerancia a la salinidad de los organismos que fueron detectados en los puquios. Más aún, se hace referencia a que la biota de los puquios sería de naturaleza cosmopolita (¿los estromatolitos son cosmopolitas?) y que las aves contribuirían a la dispersión de los individuos entre puquios (¿qué individuos?, ¿las bacterias?).

#### **4. LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO DEL PROYECTO**

En relación con la definición de la naturaleza de los microorganismos que habitan en los puquios, como ya se mencionó y se detalla en los estudios sobre la biota acuática en particular, estos microorganismos han sido definidos en primera instancia como Estromatolitos, posteriormente como Bioevaporitas/Evaporitas, derivando finalmente en tapetes microbianos o estructuras de depositación de yeso. Este aspecto no es menor dado que conlleva en primera instancia al supuesto de una fuerte relación entre los microorganismos y las estructuras dómicas de los puquios. Esto es, en el caso de ser Estromatolitos son los microorganismos los responsables de la mantención y crecimiento de dichas estructuras, para posteriormente ir desdibujando la importancia de los agentes biológicos en el concepto de Bioevaporitas, entendidas como estructuras dómicas desconocidas hasta el momento (no existe tal término en la literatura científica) en las cuales los

microorganismos siguen siendo agentes activos en la estructuración y mantención de dichas estructuras. En los estudios posteriores que revisan el término Bioevaporita se llega a la conclusión de que no es adecuado usar ese término y se establece que las estructuras dómicas corresponden a Evaporitas, en las cuales la estructuración y mantención del domo se realiza por procesos de precipitación de sales (principalmente sales de Yeso) y finalmente se introduce el concepto de Tapetes Microbianos, dando nuevamente un giro en el rol de los microorganismos, dado que hasta el momento la situación de los domos correspondería a estructuras formadas por fenómenos físicos (principalmente precipitación de sales asociada a niveles de salinidad y fluctuaciones en los niveles de agua de los puquios) sobre las cuales se alojan y viven comunidades de microorganismos que forman los denominados Tapetes Microbianos los cuales pasivamente se activan en condiciones de inundación y se desactivan en condiciones de disminución del nivel de agua.

Es entendible que el poner el foco en microorganismos para el manejo ambiental de un ecosistema o comunidad lleve a algunos problemas en la caracterización de los sujetos de estudio, pero la serie de eventos desafortunados mencionados arriba, marcan un precedente muy preocupante para el caso en cuestión. En primer lugar, el giro desde la consideración de Estromatolitos a Tapetes Microbianos no es un tema menor desde el punto de vista del valor ambiental de dichos organismos en cualquier plan de manejo ambiental, y por otro lado la insistencia en la mantención del foco y sensores ambientales en un componente (como las bacterias) que por naturaleza presenta una variabilidad espacial y temporal absolutamente desacoplada con la dinámica física del ecosistema, la cual es el componente principalmente afectado por la actividad productiva de la compañía en cuestión, genera un escenario de información a partir del cual es imposible encontrar relaciones causa-efecto y peor aún, entender el sentido y magnitud de los cambios ambientales que podrían estar asociados a la extracción de agua en el Salar de Llamara.

## **5. HETEROGENEIDAD DEL SISTEMA EN EL PROYECTO**

Independientemente de los aspectos mencionados en las secciones anteriores, en las cuales se reconoce que en la Línea Base, la EIA y posteriormente en la RCA, por una parte no se propuso un diseño de muestreo ni monitoreos que permitieran efectivamente entender la relación entre la extracción de agua y sus efectos los componentes del ecosistemas y con ello efectivamente poder

reconocer cambios ambientales asociados a las actividades de la Compañía, y por otra parte no sólo se identificó erróneamente el sistema en estudio, sino que además se atribuyó una relación íntima y prácticamente obligada entre los microorganismos y la formación y mantención de las estructuras dómicas.

En el análisis realizado por CAPES de los documentos contenidos en los Entregables I, II, III, IV y V se hizo evidente que prácticamente todos los componentes ambientales que han sido estudiados en el Salar de Llamara presentan niveles de heterogeneidad espacial y temporal tan altos que no permiten dilucidar tanto espacial como temporalmente alguna dinámica de los componentes ambientales bióticos o abióticos. Para este fenómeno de heterogeneidad existen dos líneas argumentales explicativas: Por una parte es posible que efectivamente el sistema, en casi todos sus componentes ambientales (ya sean físicos o bióticos) presente una heterogeneidad tan alta que se corresponda con entidades absolutamente idiosincrásicas, únicas y particulares en el tiempo y espacio, lo cual podría corresponder a un sistema en constante cambio prácticamente aleatorio en el espacio y tiempo dentro del Salar. Por otra parte, es posible que el alto nivel de heterogeneidad se deba a un diseño muestral muy acotado espacial y temporalmente el cual sólo ha registrado, por falta gravísima de replicabilidad (y por ende de poder estadístico), el ruido espacial y temporal de los componentes del ecosistema. Tal como se mencionó anteriormente, el poner y mantener el foco en la comunidad de microorganismos del ecosistema invocando una relación causa efecto entre estos entes biológicos y las evaporitas es un error de doble vía. Por una parte, se basa en una relación causa-efecto no demostrada, y por otra parte obliga a trabajar con el componente ambiental (los microorganismos) que posee la más alta variabilidad espacio-temporal dentro del Salar. El detalle de la heterogeneidad de casi todos los componentes ambientales estudiados ya ha sido mostrado en los documentos anteriores entregados en esta asesoría. A continuación, se indican los vacíos argumentales que se generan al enfrentarse a dicho tipo de información generada hasta agosto del año 2018, la cual fue analizada en detalle en los entregables I, II, III y IV.

## **Heterogeneidad de los distintos componentes estudiados y sus explicaciones**

A continuación, se entregan algunos ejemplos de la heterogeneidad informada en los estudios de los distintos componentes ambientales analizados en los puquios y se entrega el detalle de la dificultad en generar explicaciones para estos patrones.

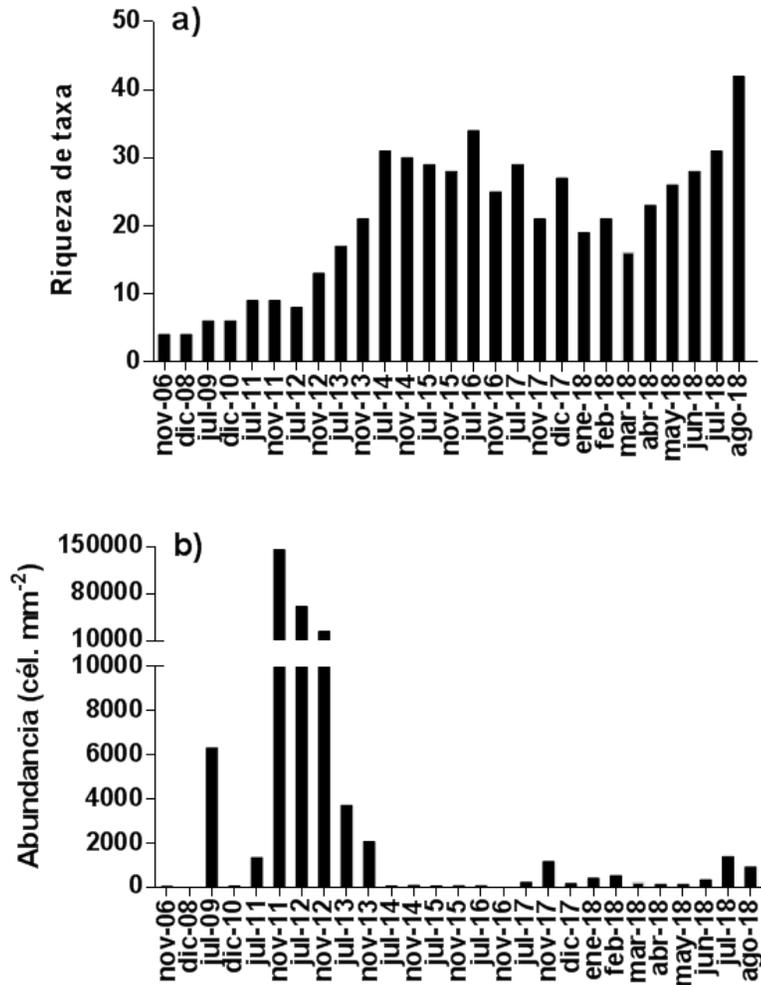
### **a) Fitobentos**

#### **✓ Riqueza de especies**

Para la riqueza de especies de fitobentos (**Figura 2a**), el estudio de Línea Base reportó un promedio de 5 especies. Los análisis de la fase pre-operacional reportaron 8 especies, mientras que durante el periodo operacional se ha registrado un aumento a 23 especies en promedio (tomando en cuenta hasta el muestreo de julio 2017), llegando a registrarse un valor máximo de 34 especies.

#### **✓ Abundancia**

En términos de abundancia total de células de fitobentos por  $\text{mm}^{-2}$ , se puede observar (**Figura 2b**) un cambio abrupto en este parámetro al inicio de la fase de operación (un aumento a 143.639 células  $\text{mm}^{-2}$ ) entre el periodo pre-operacional (i.e. julio 2011) e inmediatamente después de iniciado el funcionamiento (i.e. noviembre 2011). Posterior a esto, se observa una disminución consistente en la abundancia, la que luego de Julio de 2013 registra valores muy bajos.



**Figura 2.** Riqueza (a) y Abundancia total (b) fitobentónica evaluada durante las campañas de monitoreo en el periodo 2006-2018 en la estación T2-23 del sector puquios del Salar de Llamara.

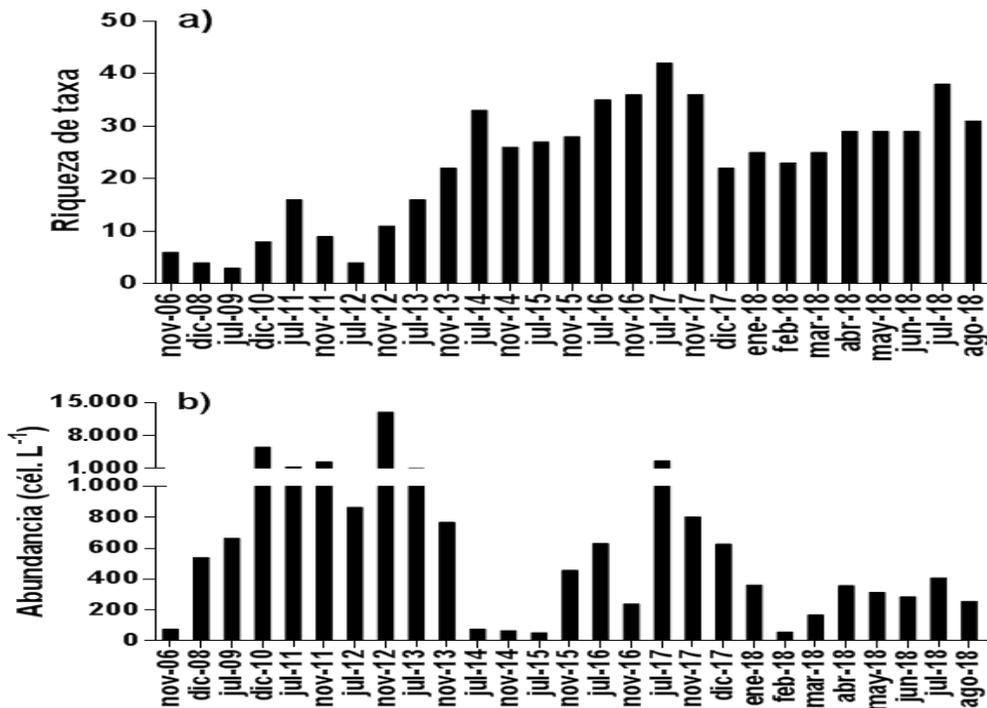
✓ **Composición de especies**

En cuanto a la composición de especies de la comunidad fitobentónica (**Figura 3**), se observó un cambio drástico en la dominancia de especies durante el periodo analizado. Según lo registrado en el estudio de Línea Base, las especies *Fragilaria fasciculata* y *Amphora* spp. dominaban la comunidad fitobentónica (noviembre 2006 y diciembre 2008-Julio 2009 respectivamente), mientras que los estudios posteriores efectuados durante el periodo de operaciones revelaron un aumento en la abundancia relativa de las especies *Staurosira brevistriata* y *Nitzschia* spp., según lo registrado en las últimas campañas realizadas. En julio 2017, individuos pertenecientes al género *Ulnaria* spp. fueron dominantes en la comunidad fitobentónica en la estación T2-23. Tal como se observa en la **Figura 2**, este cambio en la composición y abundancia relativa de la comunidad



### ✓ Abundancia

La abundancia total de células por litro (**Figura 4b**) fue de 427 en promedio, según lo descrito en el estudio de Línea Base. Este valor aumentó en la etapa pre-operacional a 3.454 cel L<sup>-1</sup> y el valor más alto se registró en noviembre de 2012, durante el periodo operacional (i.e. 12.954 cel L<sup>-1</sup>), para luego caer abruptamente a niveles similares a los de la etapa de Línea Base.

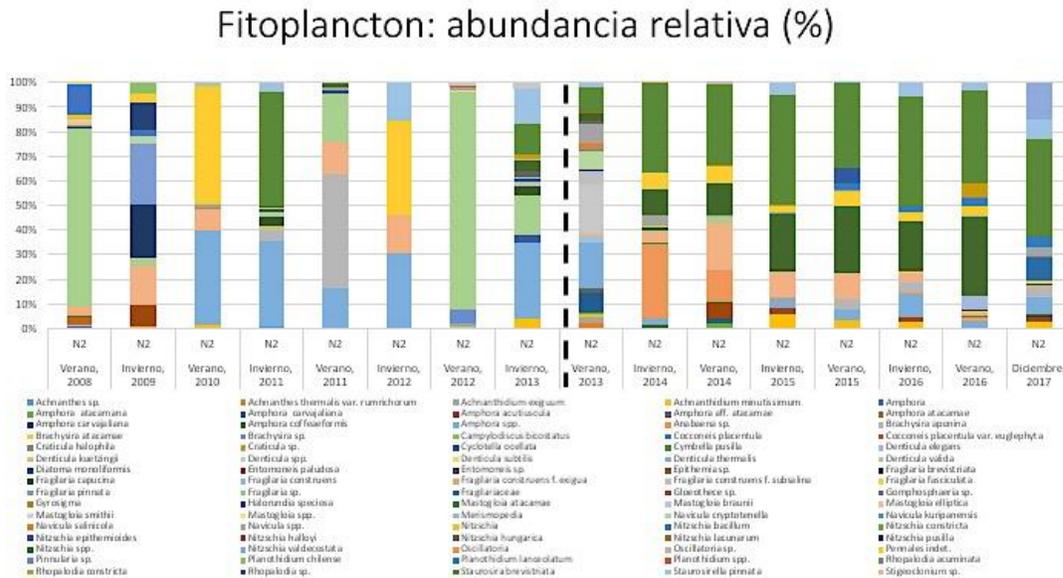


**Figura 4.** Riqueza (a) y Abundancia total (b) fitoplanctónica evaluada en quince campañas de monitoreo (periodo 2006-2018) en la estación T2-23 del sector Puquios del Salar de Llamara.

### ✓ Composición de especies

La comunidad fitoplanctónica también registró cambios en la dominancia de especies entre la Línea Base y el periodo de funcionamiento (**Figura 5**). Según lo registrado en la Línea Base, el género *Denticula* (*Denticula valida* y *Denticula kuetzingii*) y en menor grado la especie *Amphora acutiuscula* dominaron la comunidad. Un cambio en la composición y dominancia de esta comunidad fue notorio durante el periodo de operaciones, donde se registró la dominancia de la

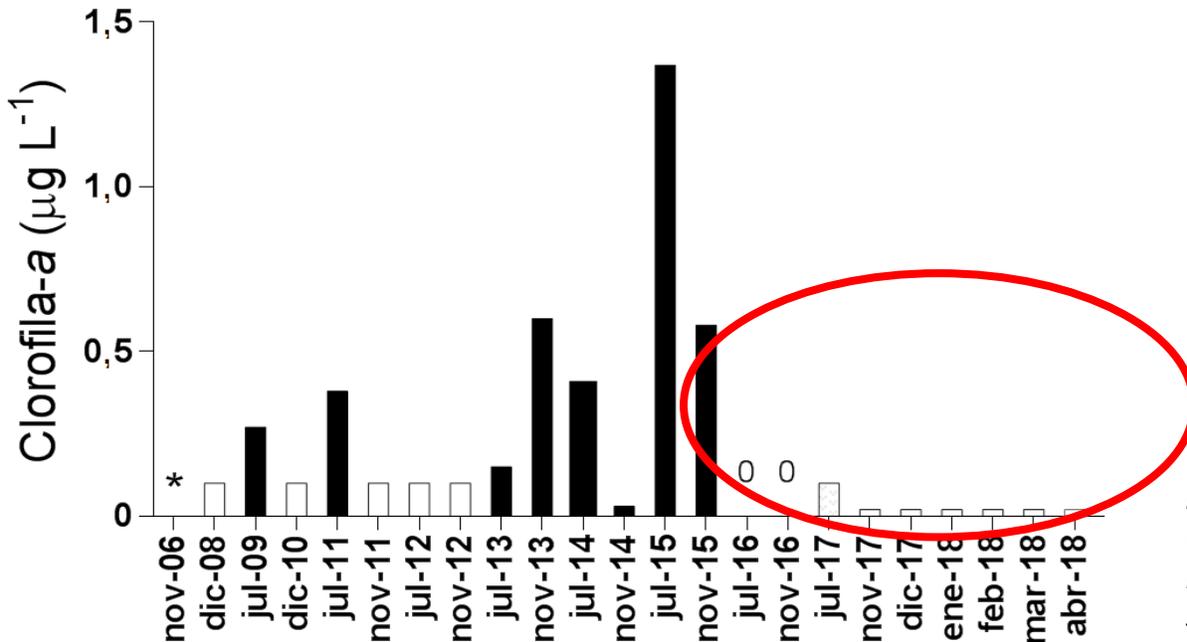
especie *Staurosira brevistriata*. Al igual que para la comunidad fitobentónica, el cambio en la composición y abundancia relativa de la comunidad fitoplanctónica fue gradual (**Figura 4**).



**Figura 5.** Abundancias relativas de las especies de fitoplancton colectadas en el puquio 2 durante los años 2008 al 2017.

### c) Productividad

Los valores de clorofila-a registrados en el estudio de Línea de Base oscilaron entre el límite de detección y  $2,7 \times 10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$  (**Figura 6**), muy similares a los valores detectados durante el periodo pre-operacional. Durante el periodo de operaciones el máximo registrado fue de  $1,4 \times 10^{-3} \text{ mg L}^{-1}$  en Julio de 2015 y los valores se mantuvieron bastante bajos llegando a ser indetectables.



**Figura 6.** *Concentración de Clorofila-a en quince campañas de monitoreo (periodo 2006-2018 en la estación T2- 23 del sector puquios del Salar de Llamara.*

**POSIBLES EXPLICACIONES.**

Los aumentos en la riqueza de especies en los sistemas naturales se deben a eventos de especiación in situ o migración desde alguna fuente. En el caso del fitobentos y fitoplancton de los puquios en el período de estudio se observaron aumentos de 4 y 3 veces, respectivamente, en el número de especies registradas para estas comunidades. Por otra parte, estos aumentos en la riqueza vinieron acompañados de aumentos drásticos de más de 100 o casi 500 veces en el número de células por litro (etapa pre-operacional) para luego caer a valores muy bajos cercanos a los de la Línea Base. Junto con estos cambios, la composición de especies de ambos componentes varió constantemente sin volver en ningún momento a una composición de especies equivalente para ambos componentes ambientales durante todo el período de estudio. Un cuarto factor que complica más

el escenario es que el estimador de Productividad ecosistémica en los puquios disminuyó prácticamente a cero durante los últimos muestreos registrados. Ante este escenario, funcionalmente nos encontramos con que el sistema cambió desde uno con pocas especies, bajas abundancias y alta productividad, a uno con muchas especies de poca abundancia y casi nula productividad. Estos cambios no se pueden deber a eventos de especiación in situ, dada la caída en productividad y abundancias, y tampoco a migraciones desde fuentes cercanas debido a la ausencia de fuentes cercanas y al extraño proceso migratorio de unas pocas células de muchas especies distintas. La única explicación posible para estos patrones sería la existencia de un pool de especies de microorganismos latentes dentro de los puquios que responden a alguna señal temporal determinada (como en este caso sería la estabilización del nivel del agua) para volverse activas. Cabe destacar que esta es solo una hipótesis sustentada por un muestreo de muy baja replicabilidad espacial. Otra alternativa es que, durante los distintos estudios, se haya cambiado al equipo que identificó los taxa y/o la resolución o sensibilidad de los instrumentos de estimación de la densidad de organismos.

Los problemas metodológicos ya fueron abordados en detalle para los estudios realizados al componente ambiental en los Entregables I, II, III y IV. Sin embargo, vale la pena mencionar a continuación algunos aspectos de esta problemática en relación con la dificultad para definir el escenario ambiental de los puquios y en general de los estudios desarrollados en el Salar de Llamara.

## **6. DISEÑO DE MONITOREO DEL PROYECTO**

Más allá del problema básico generado desde la EIA y RCA en relación con ausencia de estaciones espaciales o temporales que sirvan para contrastar una situación control con una de afectación por las actividades productivas, tanto para el caso de los muestreos de la comunidad microbiana como para el caso de la biota acuática y de la calidad del agua, los muestreos desarrollados entre los años 2006 al 2016 estuvieron centrados en un único sitio dentro de uno de los puquios (sitio T2-23, ubicado en el puquio N°2). Tomando en consideración que los resultados del estudio definido

como Línea Base ya mostraban que los 4 puquios del Salar de Llamara son diferentes entre ellos y presentan una alta variabilidad incluso dentro de ellos para casi todos los parámetros ambientales que se analizaron, no es posible entender cuál fue la razón para continuar con un tipo de muestreo sin réplicas espaciales y no, por el contrario, aumentar el número de réplicas para disminuir la heterogeneidad de los resultados obtenidos y tener algún grado de poder estadístico para analizar los resultados. Esta situación se vuelve aún más complicada si se considera a la Medida de Mitigación de la Barrera Hidráulica como una alteración del escenario natural hidrológico de los puquios, con lo cual se pierde incluso el punto de referencia con la Línea Base para los estudios desarrollados con posterioridad. Esto, sin considerar que la medida impuesta recientemente (diciembre de 2017) por la SMA, para la cual se detuvo la dinámica de extracción e inyección de agua por parte de SQM, genera un nuevo y distinto escenario ambiental para los puquios (sanción que es modificada en abril del 2018 reanudándose la inyección pero solo en los puquios N3 y N4 y posteriormente dejada sin efecto por el Primer Tribunal Ambiental, octubre 2018).

Otro aspecto en el cual es imposible realizar alguna comparación temporal o espacial de los resultados son los estudios de metagenómica y comunidades bacterianas, los cuales han sufrido cambios de metodologías, unidades de medición e incluso grupos hacia los cuales se han dirigido las identificaciones. En relación con los estudios Metagenómicos realizados a partir de la secuenciación del ARNr 16S, las campañas del 2012 presentan la caracterización de la comunidad bacteriana proveniente de la totalidad de capas del puquio combinadas y a la vez por capas, mientras que la campaña del 2017 consideró sólo la caracterización de la comunidad bacteriana de la capa verde, aunque en 2018 se realizó una campaña en enero que fue requerida en el marco de las medidas impuestas por la SMA en las que se han analizado el metagenoma de las 4 capas identificadas en estudios previos. Además, en las campañas efectuadas en el 2012 se secuenció y utilizó la región V4 del ARNr 16S, que tiene un tamaño de aproximadamente <100 pares de base (pb). Sin embargo, la extensión de esta región puede variar según los partidores (en el estudio efectuado no se especifican los partidores utilizados), mientras que para el estudio del 2017 se utilizó un fragmento de mayor tamaño, la región V1 a V4 de aproximadamente 490 pb (en este estudio sí se especificaron los partidores utilizados). En este mismo tenor, no existen estudios metagenómicos previos al inicio de operaciones de SQM y tampoco fueron contemplados en el Estudio de Línea Base, demostrando una vez más que el desarrollo de los estudios realizados hasta

la fecha no ha estado enfocado a generar información que permita determinar el estado o los posibles cambios espaciales y/o temporales de los componentes ambientales de los puquios, sino que más bien tratar de entender qué tipo de organismos viven en estos ambientes. Actualmente, se cuenta con cuatro estudios metagenómicos, dos realizados en el año 2012 que corresponden a dos campañas consecutivas de verano e invierno, un estudio realizado el año 2017 y el más actual en el año 2018. Particularmente, el primer estudio (campaña de verano 2012) fue realizado de acuerdo a lo establecido en la Plan de Seguimiento Ambiental de la Adenda III, donde por encargo de la dirección ejecutiva de CONAMA, se debía realizar un estudio de las comunidades bacterianas de los “estromalitos” por una sola vez durante los primeros dos años luego de obtenida la Resolución de Calificación Ambiental.

Respecto de la información disponible a partir de los datos de las campañas efectuadas en el 2012 y 2017, los estudios son difícilmente comparables debido a que no toman en cuenta: (i) el mismo método de extracción de ADN de las muestras, (ii) la misma tecnología de secuenciación, y tampoco (iii) los mismos niveles de profundidad de análisis. El protocolo de extracción de ADN en las campañas del 2012 utilizó diferentes técnicas entre muestras, mientras que para la campaña del 2017 se utilizó un kit de extracción diferente. Este punto es importante ya que se ha visto que diferentes métodos de extracción tienen un efecto en la cantidad, calidad y pureza del ADN extraído, lo que a su vez puede tener repercusiones en las etapas siguientes de amplificación y secuenciación de las muestras de ADN. A esto se agrega además el uso de dos metodologías distintas de secuenciación entre 2012 y 2017 (pirosecuenciación 454 versus Illumina MiSeq) que difieren en sus tecnologías de secuenciación, no presentan la misma profundidad de secuenciación y poseen distintas tasas de error durante la secuenciación. Sin embargo, se tiene en cuenta que este cambio se debe probablemente a que la tecnología 454 dejó de implementarse a mediados del 2016.

Otro punto importante es la forma en que se presentan los resultados en cada uno de los informes de los estudios microbianos. Por ejemplo, la abundancia a nivel de phylum en 2012 se presenta como abundancia relativa, mientras que en 2017 se presenta como abundancia absoluta. Difiere además el nivel taxonómico utilizado en cada estudio. Para las campañas del 2012 se presentan los resultados de acuerdo a tres niveles taxonómicos (i.e. phylum, clase y orden) mientras que, para

la campaña del 2017, no ocurre lo mismo, los resultados no son presentados de acuerdo a los estudios anteriores, sino que se presentan a nivel de phylum y luego inmediatamente desciende a nivel de género pero particularmente para las alpha y gamma-proteobacterias, cianobacterias y bacteroidetes. Finalmente, el único estudio realizado a la fecha a partir de la metodología shotgun, es el presentado en la campaña de verano 2012, que cuenta con el análisis de todas las capas combinadas provenientes de una sola muestra. Estos resultados se compararon con un estudio realizado en los estromatolitos de Highborne Cay, Bahamas. Sin embargo, estos análisis no aportan en nada para la determinación de efectos sobre el puquio.

En relación con la comunidad microbiológica en el análisis desarrollado por CAPES se reconocieron las siguientes brechas de información. La gran brecha de información identificada a lo largo del análisis de los estudios llevados a cabo, que merece ser considerada un punto crítico, es la falta de congruencia de las metodologías aplicadas: a través de los estudios microbiológicos clásicos se caracterizó particularmente la comunidad eucarionte (diatomeas); sin embargo, el estudio metagenómico se enfocó en caracterizar la comunidad bacteriana. Si ambas metodologías se hubiesen focalizado en caracterizar un dominio en particular, el estudio podría haberse potenciado en vez de constituir una importante brecha de información. Por otro lado, el diseño de muestreo que se ha utilizado para caracterizar las comunidades microbianas ha sido de muy baja cobertura, con pocos sitios analizados por puquio, y con solo un puquio analizado de forma consistente. Esta brecha de información se ha intentado subsanar al implementarse, por requerimiento de la Autoridad Ambiental, estudios metagenómicos a partir de enero del 2018 y luego en julio del 2018, pero independientemente de ello estos estudios siguen buscando entender que tipos de organismos son los que habitan en los puquios y cuál es su diversidad genómica funcional, han mostrado que la heterogeneidad entre y dentro de los puquios es muy alta y están lejos de servir como base para determinar el efecto o cambio ambiental en el sistema al compararse con una situación ambiental inicial o sin la influencia del proyecto.

**(i) Brechas de información relacionadas con el estudio microbiológico clásico**

A partir de los valores de riqueza, abundancia de especies, composición y concentración de clorofila-a, se observa un cambio en el tiempo desde el inicio de las operaciones. Sin embargo, esto sigue siendo el seguimiento de un solo sitio (T2-23). Aquí identificamos una primera brecha

de información. Si las operaciones de SQM contemplan evaluar el efecto sobre los 4 puquios del Salar de Llamara, se debió haber tomado en cuenta un monitoreo basado en al menos un punto de muestreo por puquio. De esta forma se podría haber evaluado con mayor información el efecto sobre las comunidades fitobentónicas y fitoplanctónicas, y la variación natural de ellas. La caracterización de los puquios habría sido aún más completa si se hubiesen considerado al menos tres puntos muestrales por puquio, todo esto con el fin de incluir la heterogeneidad de las comunidades presentes.

**(ii) Brechas de información relacionadas con el estudio metagenómico**

En el estudio metagenómico se identifican importantes brechas. La primera es la falta de información proveniente de estudios previos a la operación de SQM; no se cuenta con estudios de este tipo en la Línea Base y la información recopilada sólo toma en cuenta datos de las campañas del 2012 (verano-invierno), marzo del 2017 y el último estudio metagenómico de las comunidades bacterianas de los puquios realizado en el verano del 2018. Consecuentemente no existe un seguimiento temporal del análisis metagenómico de las comunidades microbianas del Salar de Llamara que permita determinar efectos ligados a la operación de SQM.

Respecto de la información disponible a partir de los datos de las campañas efectuadas en el 2012 y el 2017, los estudios son difícilmente comparables en términos de protocolo y metodologías de análisis. Además, con el fin de poder establecer comparaciones entre los estudios, se habría esperado mantener la misma línea de análisis y clasificaciones, presentando los resultados de manera uniforme; como, por ejemplo, presentar los resultados como abundancia relativa y luego presentarlos en abundancia absoluta o la utilización del mismo código de colores para lectura de grupos taxonómicos en gráficos habría facilitado la comprensión (particularmente Phylum, ya que es el único punto en común).

Todas las consideraciones referentes a los estudios metagenómicos y las comunidades microbianas presentes en los puquios mencionadas en los párrafos anteriores se vuelven aún más importantes al considerar el gran esfuerzo que se ha destinado en el desarrollo de estos estudios sin poner el foco en ningún momento en la pregunta básica que se mantiene desde la Línea Base y la EIA del proyecto: *¿Cuál es la relación entre las comunidades microbianas y las estructuras dómicas de*

*los puquios?* Tal como se mencionó anteriormente, en ningún estudio se ha abordado esta temática y hasta ahora la información disponible, que muestra una altísima variabilidad en los componentes bacterianos no asociada a una menor variabilidad en los componentes físico-químicos, dentro de los cuales incluso se amortiguó la variación del nivel de agua de los puquios, indicaría que el sistema bacteriano está desacoplado del hábitat físico de los domos en los puquios, y los utiliza de manera absolutamente oportunista probablemente dependiendo de las variaciones en la salinidad o nivel de agua de estos ambientes. Más aún, al considerar las extremas variaciones que se muestran en la abundancia, composición y riqueza de especies e incluso en las actividades metagenómicas y ecosistémicas (como la productividad) de este grupo, es probable que sea un componente biótico oportunista, resistente a variaciones extremas de desecación (los puquios se han secado en varias oportunidades en el pasado), inundación, cambios de temperatura (como los propios del Salar), e incluso salinidad, *el cual fundamenta su permanencia no en una característica mal utilizada de “extremófilo” sino que en la capacidad de mantener una fuente de propágulos inactiva ante condiciones ambientales adversas.* En este sentido, si bien esta es una hipótesis, de mantenerse vigente indicaría que es nuevamente un error fijar el manejo ambiental del Proyecto en un componente biótico oportunista y altamente resistente a variaciones en los parámetros ambientales que la operación del proyecto afecta. En este mismo sentido, a la fecha si bien la información ambiental que se ha generado es de bajísima robustez, los estudios desarrollados desde diciembre del año 2017 a la fecha han consolidado esta información y aportado nuevos aspectos que continúan mostrando a los puquios como un sistema altamente heterogéneo y resiliente en todos sus componentes ambientales. Sin embargo, un aspecto relevante derivado de estos estudios es la posibilidad de explorar relaciones interesantes entre las variables físicas y bióticas del ecosistema de los puquios. Por ejemplo, se sabe que a lo largo del tiempo se han registrado variaciones en la salinidad de los puquios y que estas variaciones estarían relacionadas con composiciones de especies particulares de fitobentos y fitoplancton. *Un ejercicio interesante sería dilucidar la correspondencia de los taxa de estos componentes bióticos con los niveles de salinidad de los puquios y a partir de eso proponer un modelo predictivo de qué especies, o grupos de especies serán encontrados a distintos niveles de salinidad en los puquios.* A partir de esto, por ejemplo, se podría considerar en una situación ideal ampliar el escenario de muestreo y cotejar si la coincidencia entre la composición de especies fitobentónica y fitoplanctónica y la salinidad se da

en otros puquios de la región y desde ahí definir un escenario de Control versus Afectación para iniciar un monitoreo ambiental del Proyecto.

## **7. CONCLUSIONES GLOBALES DE LA ASESORÍA CIENTÍFICA DE CAPES**

*No es posible determinar la ocurrencia de efectos ambientales del Proyecto Pampa Hermosa en los puquios presentes en el Salar de Llamara en relación con los elementos ambientales establecidos en el plan de seguimiento ambiental y los estudios adicionales realizados hasta el momento, debido fundamentalmente a:*

- 1- Cambios en la definición del sujeto de estudio (Estromatolitos, Bioevaporitas, Evaporitas, o Tapetes Microbianos) y por ende, en el entendimiento de la relación entre los componentes biológicos y físicos de los puquios. Dicho sujeto hasta el momento correspondería a un sistema fundamentalmente de dinámica geológica y química (evaporita) en el cual se mantienen tapetes microbianos oportunistas altamente resistentes a variaciones extremas de salinidad, temperatura y de nivel del agua.**
- 2- Diseño y puesta en marcha de una serie de estudios destinados a entender cuáles son los componentes bióticos de los puquios, más que definir un diseño y estrategia comparativa entre sitios y situaciones de control y afectación por parte de las actividades del Proyecto Pampa Hermosa.**
- 3- Nula o muy baja replicabilidad de las mediciones en cada uno de los componentes analizados, lo que por problemas de bajo poder estadístico, inhabilita cualquier análisis cuantitativo riguroso de las posibles tendencias temporales de los componentes ambientales.**

**El conjunto de estudios que se han desarrollado en los componentes hidrológicos, microbiológicos y ecosistémicos del Salar de Llamara, con foco puesto fundamentalmente en los puquios:**

- 1- Han permitido describir la naturaleza de dichos elementos y su dinámica espacial y temporal altamente heterogénea.**
- 2- Muestran que el agua de los puquios está saturada de sulfato de calcio (yeso) y por lo tanto la formación de los domos tiene un origen geoquímico (i.e., Evaporita) y no se ha formulado ninguna prueba de que las bacterias o microorganismos tengan algún rol en la estructuración de dichas estructuras; simplemente las usan como hábitat.**
- 3- Han mostrado que los componentes bióticos (microorganismos e incluso sus funciones ecosistémicas) son altamente resilientes a los cambios en el escenario hidrológico (generados a partir de la Medida de Mitigación inicial y luego de la MUT), en los cuales se eliminó la variación temporal del nivel del agua, y posteriormente se detuvo abruptamente la extracción e inyección durante la época de máxima evaporación natural (verano).**
- 4- 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 pasado), 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.***
- 5- Sugieren, al contrario de lo propuesto en la Línea Base y EIA (y de alguna forma intentado de demostrar en los casi 10 años de estudios desarrollados), que existe un desacople dinámico entre los componentes bióticos y abióticos de los puquios.**

En base a lo anterior no es recomendable, si es que lo que se busca es un monitoreo que permita detectar algún efecto ambiental de las actividades del Proyecto, el continuar con el foco puesto en los microorganismos presentes en las estructuras dómicas. Ello porque no existe un marco de referencia temporal ni espacial contra el cual contrastar las variaciones que se han registrado, y se seguirán registrando, en dichos componentes biológicos. A pesar de la persistencia en realizar estudios enfocados en este tipo de organismos, a la luz de los resultados obtenidos en los últimos trabajos desarrollados a partir de enero del 2018 (en que se ha consolidado la información precedente y aportado nuevos aspectos), que continúan mostrando que los puquios son un sistema altamente heterogéneo en todos sus componentes ambientales, un aspecto relevante de explorar son las relaciones no lineales ni directas entre las variables físicas y bióticas del ecosistema. Por ejemplo, se sabe que a lo largo del tiempo se han registrado variaciones en la salinidad de los puquios y que estas variaciones están relacionadas con composiciones de especies particulares de fitobentos y fitoplancton. *Un ejercicio interesante sería dilucidar la correspondencia de los taxa de estos componentes bióticos con los niveles de salinidad de los puquios y a partir de eso proponer un modelo predictivo de qué especies o grupos de especies, serán encontrados a distintos niveles de salinidad en los puquios. A partir de esto, para el seguimiento ambiental de biota acuática se podría considerar:*

- Incluir en el monitoreo los cuatro puquios (y no solo el puquio N2).
- Considerar varios puntos de monitoreo en cada puquio (y no un solo punto de monitoreo como es el caso del punto T2-23 en el puquio N2).
- Evaluar la posibilidad de ampliar el escenario de muestreo y cotejar si la coincidencia entre la composición de especies fitobentónica y fitoplanctónica y la salinidad se da en otros puquios de la región (como los de Coposa y Cejar) y desde ahí definir un escenario de Control versus Afectación para iniciar un monitoreo ambiental pertinente del Proyecto.