



Plan de Manejo Biótico

**Compromisos Ambientales Voluntarios (RCA N°21/2016):**



## **ESTUDIO DE ECOSISTEMAS EXTREMÓFILOS**

**Informe Técnico N°1. Revisión Bibliográfica.**

**Actividad 1. Estado de conocimiento de las comunidades extremófilas en la ecorregión altiplánica.**

Proyecto: "EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA N°21/2016)"



## INDICE

1	RESUMEN.....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	3
3	OBJETIVOS .....	7
3.1	Objetivo General.....	7
3.2	Objetivos específicos.....	7
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
4.1	Descripción del área de estudio.....	8
4.2	Metodología.....	12
4.2.1	Recopilación de información Ambiental del área de estudio .....	12
4.2.2	Recopilación de información Ecosistemas Microbianos Extremófilos.....	13
5	RESULTADOS .....	15
5.1	Descripción ambiental del Salar de Atacama.....	15
5.1.1	Clima y Meteorología.....	15
5.1.2	Geología y Geomorfología.....	18
5.1.3	Hidrología.....	21
5.1.4	Caracterización fisicoquímica .....	23
5.1.5	Características Bióticas .....	39
5.2	Estado de conocimiento de los Ecosistemas Microbianos Extremófilos.....	41
5.2.1	Información y antecedentes de proyectos en el SEIA .....	41
5.2.2	Investigaciones científicas .....	44
5.2.3	Investigaciones de organismos públicos.....	50
5.2.4	Plan de Manejo Biótico .....	52

5.2.5	Análisis por Sistema Hidrológico.....	63
6	DISCUSIÓN.....	65
7	CONCLUSIONES.....	69
8	REFERENCIAS.....	70
9	ANEXOS.....	80
9.1	Equipo de trabajo.....	80
9.2	Control de cambios del documento.....	81

### INDICE DE TABLAS

Tabla 5-1	Precipitaciones máximas (mm) registradas en 24 horas en la estación meteorológica Peine en el Período 2008-2017. ....	16
Tabla 5-2	Formaciones geológicas de la zona. ....	19
Tabla 5-3	Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema Soncor lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros. ....	26
Tabla 5-4	Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema Aguas de Quelana. ....	30
Tabla 5-5	Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema Peine: Lagunas Salada, Saladita e Interna. ....	33
Tabla 5-6	Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema la Punta La Brava: Laguna La Brava, La Punta y Tilopozo. ....	37
Tabla 5-7	Proyectos SEIA aprobados en la cuenca del Salar de Atacama en los últimos 10 años.....	42
Tabla 5-8	Número y porcentaje de artículos científicos por área de conocimiento en microbiología de extremófilos a nivel internacional. ....	45
Tabla 5-9	Artículos científicos en microbiología de extremófilos en Lagunas hipersalinas. ....	46
Tabla 5-10	Parámetros para describir el estado ecológico de los EME, considerando diferente nivel de detalle. ....	52

Tabla 5-11 Puntos de medición Tapetes Microbianos Plan Manejo Biótico.....	53
Tabla 5-12 Campañas realizadas en el monitoreo semestral del PMB. ....	54
Tabla 5-13 Tipos de Ecosistemas Microbianos Extremófilos reportados en el Plan de Manejo Biótico periodos campañas semestrales de 2016-2017 y 2017-2018. ....	58
Tabla 5-14 Descripción general y resumen de las muestras de Tapetes Microbianos colectadas en PMB periodo 2016-2017 y 2017-2018 en el Salar de Atacama. ....	59
Tabla 5-15 Parámetros fisicoquímicos de la columna de agua de los Puntos de Monitoreo durante invierno 2016, verano 2017, invierno 2017 y verano 2018 en el Salar de Atacama. ....	62
Tabla 9-1 Equipo de trabajo de Estudio de Ecosistemas Microbianos Extremófilos en el Salar de Atacama. ....	80

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Clasificación de microorganismos extremófilos en función de los factores ambientales que toleran. Extraído de: Vasquez, 2007. Buscando bacterias sicrófilas en la Antártida. ....	4
Figura 2-2 Estratos de colores con las principales características de los tapetes microbianos. Fuente: Elaboración propia. ....	6
Figura 4-1 Área de estudio en el Salar de Atacama, región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia. ....	8
Figura 4-2 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema Soncor. Fuente: Albemarle Ltda., 2015. ....	9
Figura 4-3 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema Aguas de Quelana. Fuente: Albemarle Ltda., 2015. ....	10
Figura 4-4 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema Peine. Fuente: Albemarle Ltda., 2015. ....	11
Figura 4-5 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema La Punta-La Brava. Fuente: Albemarle Ltda., 2015. ....	11
Figura 4-6 Metodología de desarrollo. Fuente: Elaboración propia. ....	12
Figura 5-1 Precipitaciones promedio mensual de la estación meteorológica Peine en el Período 2008-2017. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA. ....	15

Figura 5-2 Humedad relativa (%) promedio mensual de la estación meteorológica Socaire en el Período 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con datos de INIA. ....	16
Figura 5-3 Radiación Solar (Mj/m <sup>2</sup> ) promedio mensual de la estación meteorológica Socaire en el Período 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con datos de INIA. ....	17
Figura 5-4 Temperatura promedio mensual de la estación meteorológica Peine en el Período 2008-2017. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA. ....	18
Figura 5-5 Geología generalizada de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Kampf <i>et al.</i> , 2005. ....	21
Figura 5-6 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Estudio “EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”, Adenda V, Anexo 1, Figura 9-1. ....	22
Figura 5-7 Composición de aguas y salmueras del salar de Atacama. Fuente: Risacher y Salazar, 1999. ....	23
Figura 5-8 Valores promedios registrados para el sistema Soncor. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia. ....	24
Figura 5-9 Valores promedios registrados para el sistema Aguas de Quelana. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, PMB: Plan de Manejo Biótico, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia. ....	29
Figura 5-10 Valores promedios registrados para el sistema Peine. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia. ....	32
Figura 5-11 Valores promedios registrados para el sistema La Punta y La Brava. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia. ....	36
Figura 5-12 Proyectos aprobados en el SEIA y sectores productivos en la cuenca del Salar de Atacama en los últimos 10 años. Fuente: <i>Elaboración propia en base a datos del SEIA, 2018.</i> ....	41
Figura 5-13 Distribución espacial de los ecosistemas microbianos en las Lagunas La Brava y la Punta. Fuente: Adenda MEL, 2018 (corresponde a Figura 3.54). ....	44
Figura 5-14 Abundancia a nivel de filo basado en la secuencia de clasificación 16S rRNA de las Lagunas Tebenquiche y La Brava. Fuente: Farías <i>et al.</i> , 2014. ....	49

Figura 5-15 Lagunas La Punta y La Brava y sus comunidades microbianas. A) Tapetes Microbianos, B) Biofilms, C) Oncolitos. Fuente: MMA, 2017. .... 51

Figura 5-16 Laguna Tebenquiche y sus comunidades microbianas. A) Fitomicrobialitos, B) Biofilms, C) Evaporitas, D) Tapete Microbiano. Fuente: MMA, 2017..... 51

Figura 5-17 Laminaciones pigmentadas observadas, en planicies del margen externo de Laguna Salada. Se indican las macro-zonas presentes: sub-superficial (MS), intermedia (MM), profunda (MP) (marca de escala=10 mm). Fuente: Albemarle, 2018. .... 55

Figura 5-18 Tapetes Microbianos observados en a) Laguna Salada (S-6A); b) Laguna Saladita (SA-25); c) Laguna La Punta (LP-23); y d) Vega de Tilopozo (LB-2). Fuente: Informe N°1 PMB Albemarle Ltda., 2017. .... 56

Figura 5-19 Tapetes Microbianos observados en a) Laguna La Brava (LB-3); b) Laguna Salada (S-6A); c) Laguna La Punta (LP-23) y d) Laguna Interna (I-17). Fuente: Informe N°1 PMB Albemarle Ltda., 2018. .... 57

## 1 RESUMEN

El presente informe corresponde a la primera actividad referente a la revisión de los antecedentes bibliográficos del “Estudio de Ecosistemas Extremófilos” propuesto por el titular Albemarle Ltda., bajo el marco de los Compromisos Ambientales Voluntarios ofrecidos en la Adenda 5, Anexo 2 (Plan de Manejo Biótico) del Proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama” aprobado mediante la RCA N° 0021 con fecha 20 de enero del 2016.

La finalidad del estudio es entregar antecedentes en cuanto a la habitabilidad de los ecosistemas extremófilos del Salar de Atacama, y profundizar en el conocimiento científico de estos microorganismos para asegurar su conservación.

Esta primera actividad está orientada a identificar iniciativas de esta naturaleza, recopilando y sistematizando la información procedente de investigaciones científicas, antecedentes de proyectos aprobados en el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, Planes de Seguimiento de Variables Ambientales, y antecedentes generales de los Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME), en particular los registrados en las lagunas del Salar de Atacama. Esto permitirá determinar el estado de conocimiento de los EME y ser un aporte en el desarrollo de las futuras actividades del estudio que consideran los sistemas lagunares de Peine, La Punta-La Brava, Tilopozo, Soncor y Aguas de Quelana.

La cuenca del Salar de Atacama en donde se emplaza el estudio corresponde a una cuenca endorreica inserta en el sistema hidrográfico del Pacífico Seco, ubicada en la provincia del Loa en la Región de Antofagasta. Este salar se caracteriza por presentar los ambientes más extremos del planeta, y bajo estas condiciones es posible encontrar microorganismos extremófilos. Estas comunidades microbianas fueron reportadas por primera vez en la laguna Socompa, en Argentina durante el año 2009, y a partir de este hallazgo comenzaron las investigaciones de estos ecosistemas en Chile reportándose en el Salar de Atacama el año 2014 (Farías *et al.*, 2009; Farías *et al.*, 2014).

A pesar de que aún existe controversia científica, se han reportado 3 tipos principales de microorganismos extremófilos: a) Tapetes microbianos (biofilms) formados por interacciones microbianas, resultando en la producción de organominerales, b) Microbialitos resultantes de la interacción de microbios bentónicos que atrapan los sedimentos y los precipitan formando una gran variedad de estructuras internas, y c) evaporitas que se forman por cristalización de sales formando rocas. La serie de actividades que realizan estos organismos permite considerarlos como ecosistemas microbianos, siendo vitales en el funcionamiento de las lagunas salinas e hipersalinas.

De acuerdo con la revisión de estudios realizados en el marco del desarrollo de proyectos aprobados (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental) en los últimos 10 años en el Salar de Atacama, estos estudios no presentaron una caracterización de las comunidades extremófilas, sin embargo, titulares como Albemarle Ltda. y otras empresas del salar han considerado recientemente este componente dentro de sus monitoreos y compromisos

ambientales voluntarios con el fin de aportar al conocimiento y colaborar en la conservación de estos ecosistemas. El actual Plan de Manejo Biótico desarrollado por Albemarle Ltda., a la fecha ha reportado organismos del tipo Tapetes Microbianos en las Lagunas La Brava, Salada y Saladita, mientras que en Interna se han descrito los 3 tipos al igual que en la Laguna La Punta (Informe Anual N°1, Albemarle 2017; Informe Anual N° 2, Albemarle 2018).

Por su parte, el Ministerio del Medio Ambiente ha realizado dos investigaciones relacionadas con los EME. En primera instancia publicaron una “Guía de Conservación y Seguimiento de Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME)” que entrega conceptos básicos sobre la estructura y funcionamiento, además de criterios para su estudio y monitoreo, mientras que el segundo documento corresponde a un levantamiento de Línea de Base para las Lagunas La Brava y Tebenquiche donde se describieron los 3 tipos de EME, señalando a La Brava como uno de los sistemas más diversos en cuanto a su composición microbiana, mientras que en Tebenquiche se reportaron evaporitas dominando el sistema.

En cuanto a las investigaciones a nivel mundial, estas se han desarrollado sobre los microorganismos extremófilos enfocados principalmente a nivel de especie y reconociendo el desarrollo de la actividad metabólica de estos en condiciones físico químicas extremas. Sin embargo, estudios a nivel comunitario implementando el reconocimiento de la diversidad microbiológica y estudiando aspectos de la ecología de estos organismos en cuanto a comunidades y/o ecosistemas, han sido temas aún poco estudiados y en los que se busca avanzar a lo largo de este estudio.

De acuerdo con lo anterior, estudios a nivel ecosistémico son recientes y se han llevado a cabo principalmente en la laguna La Brava donde se ha documentado a los oncolitos (microbialitos) como las comunidades predominantes y en menor proporción a los tapetes microbianos, presentando ambos una gran diversidad microbiana. Por su parte la laguna de Peine solo ha sido estudiada en el Plan de Manejo Biótico realizado por Albemarle Ltda., estudio que considera una descripción general del sistema, por lo que se desconoce la composición microbiológica de los EME reportados. Los sistemas lagunares que presentan menor información corresponden a Soncor en el que solo se ha descrito una diversidad microbiológica que podría corresponder a algún tipo de EME, mientras que en el sistema Aguas de Quelana no se registraron estudios relacionados a los microorganismos extremófilos.

## 2 INTRODUCCIÓN

El presente informe, corresponde a la primera actividad del “Estudio de Ecosistemas Extremófilos” referente a la revisión bibliográfica, y se relaciona con la medida de Compromisos Ambientales Voluntarios propuesta por Albemarle Ltda (ex Rockwood Lithium) en la evaluación ambiental del proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”, aprobado mediante la Resolución de Calificación Ambiental RCA N° 21 de fecha 20 de enero del 2016.

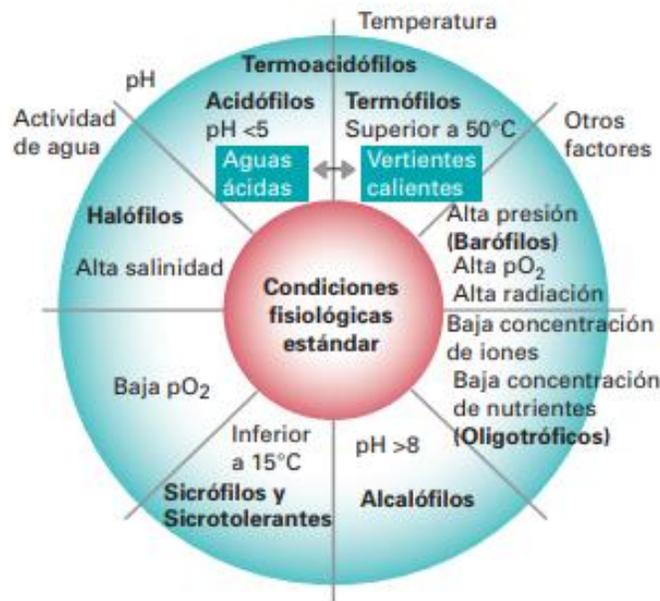
Los Compromisos Ambientales Voluntarios propuestos por el titular Albemarle Ltda. apuntan a la ampliación y profundización del conocimiento científico que se tiene de los ecosistemas y las especies biológicas presentes en el Salar de Atacama mediante la realización de investigación que se oriente a conocer sus requerimientos ecológicos, teniendo como producto final el mayor conocimiento posible sobre la distribución y las preferencias de hábitat de las especies en Salar. Por su parte, el estudio de los microorganismos extremófilos surge a raíz de que en nuestro país no existen antecedentes de una iniciativa de esta naturaleza, por lo que principalmente este compromiso incluye las actividades de Revisión bibliográfica, Descripción de las comunidades microbianas, Banco Metagenomas, Curvas de Habitabilidad y Cepario, la identificación del equipo de trabajo responsables de las actividades se detalla en el Anexo 1.

Tal como se señaló en el párrafo inicial, este documento corresponde a la primera actividad del estudio y presenta los resultados de la revisión y sistematización de antecedentes bibliográficos que se hayan publicados durante los últimos 10 años. Los sectores considerados para el estudio corresponden a: i) Peine (compuesta por la laguna Salada, Saladita e Interna), ii) La Punta y La Brava, Tilopozo, iii) Soncor (compuesta por las lagunas Piular, Chaxa, Barros Negros) y iv) Aguas de Quelana. Mayor detalle del Compromiso Ambiental Voluntario se presenta en el Capítulo 5 del Anexo 2 de la Adenda 5 (Albemarle Ltda., 2015) y en la Propuesta Técnica RWL-CEA que se presentó a la autoridad ambiental en su Versión 2 el día 17 de abril 2017.

Los microorganismos extremófilos son conocidos por contar con la capacidad de sobrevivir y reproducirse bajo condiciones físico químicas extremas (altas o muy bajas temperaturas, valores de pH extremadamente ácidos o básicos, ausencia de oxígeno, salinidad, presión, radiación, entre otras) (Farías y Contreras, 2013). Estos organismos se encuentran en los tres dominios filogenéticos: bacterias, arqueas (procariontes) y eucariontes (multicelulares) y están presentes en distintas zonas geotérmicas, aguas termales, hielos glaciares, desiertos, lagos y/o lagunas de agua salada, lagos ácidos e incluso en la profundidad del mar.

Las investigaciones a nivel mundial sobre estos organismos se han llevado a cabo hace aproximadamente dos décadas, y se han enfocado en el desarrollo de la actividad metabólica de los organismos en condiciones extremas y su aplicabilidad biotecnológica (Haki, 2003; Fredrickson *et al.*, 2008) principalmente en el área agrícola y alimentaria (Piñero, 2013).

Se reconocen distintos microorganismos de acuerdo con el ambiente en que habitan y su adaptación al mismo. Termófilos o psicrófilos (adaptación a altas y bajas temperaturas, respectivamente), halófilos (alta concentración salina), alcalófilos o acidófilos (ambientes con pH alto o bajo), barófilos (alta presión), entre otros (**Figura 2-1**); incluso poliextremófilos que se caracterizan por habitar sitios con dos o más condiciones extremas (Niehaus *et al.*, 1999; Lioliou y Pantazaki, 2004; Sigeo, 2005).



**Figura 2-1 Clasificación de microorganismos extremófilos en función de los factores ambientales que toleran. Extraído de: Vasquez, 2007. Buscando bacterias sicrofilas en la Antártida.**

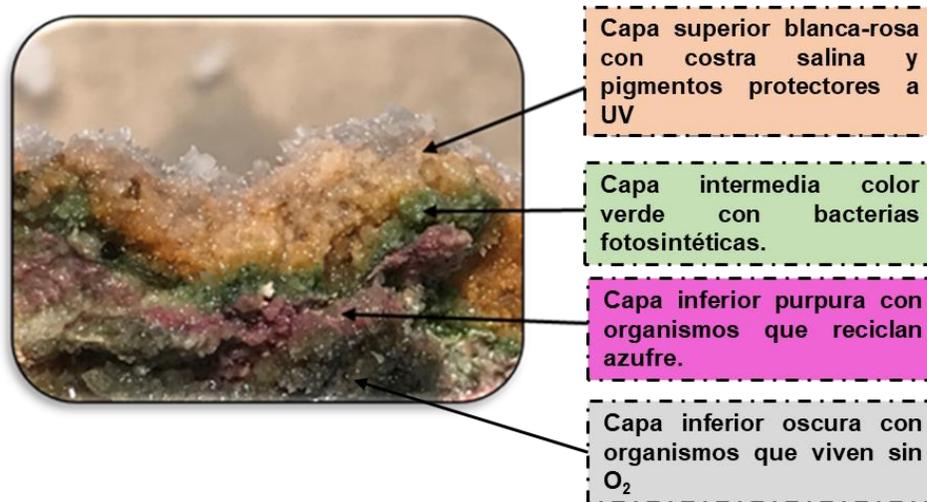
Una de las primeras especies de organismos extremófilos en ser reconocidos fue la bacteria termofílica *Thermus aquaticus*, (de la cual se aísla la enzima DNA *Taq* polimerasa, utilizada en la técnica del PCR), la que se obtuvo de las fuentes termales del Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos (Brock & Freeze, 1969; Chien *et al.*, 1976). La importancia de esta especie radica en que sus enzimas termofílicas se encuentran involucradas en la degradación de polímeros y por ende son útiles en cuanto a procesos industriales (Bruins *et al.*, 2001), destacando sus proteínas de shock térmico (Hsp) que contribuyen al correcto plegamiento de las proteínas, bajo distintas condiciones de estrés y coordinan complejos macromoleculares.

En Chile, específicamente el desierto de Atacama presenta una superficie que ha sido modulada por la erosión natural a lo largo de millones de años, con cuencas endorreicas que contienen salares en su interior, formando presencia de lagos someros salinos e hipersalinos donde predomina la precipitación de minerales ricos en sulfatos, cloruros y boratos (Risacher *et al.*, 1999), además de presentar fluctuaciones térmicas diarias, alta salinidad y alcalinidad, alta radiación ultravioleta, escasez de nutrientes, baja presión de oxígeno, elevadas concentraciones de metales pesados y abundancia de arsénico. Todas

condiciones similares al inicio de la vida en la Tierra (Johnson, 1998; Javaux, 2006). En estos ambientes extremos fueron reportados una gran diversidad de Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME) específicamente en las lagunas La Brava y Tebenquiche, que incluyeron tapetes microbianos de halita, aragonita o yeso, microbialitos de carbonato de calcio y domos de evaporitas de yeso formando endoevaporitas. La importancia de estos hallazgos se basa en que son los ecosistemas tipo microbialitos reportados a mayor altura, desarrollándose en el ambiente más parecido a la tierra primitiva que hay en el planeta: la Puna (Farías *et al.*, 2014; MMA, 2017).

Los Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME) son asociaciones de diatomeas, bacterias, cianobacterias y arqueas que influyen o inducen la precipitación de minerales, o se desarrollan asociados a los mismos en lagunas salinas, fuentes hidrotermales, fumarolas de volcanes y salares de la Puna. Se han reportado distintos tipos de EME asociados a minerales (tapetes microbianos, microbialitos y evaporitas) en lagunas hipersalinas de la Puna. A pesar de que aún existe controversia científica, podemos identificar 3 tipos principales de microorganismos extremófilos: a) Tapetes microbianos (biofilms) formados por interacciones microbianas, resultando en la producción de organominerales, b) Microbialitos resultantes de la interacción de microbios bentónicos que atrapan los sedimentos y los precipitan formando una gran variedad de estructuras internas, y c) evaporitas que se forman por cristalización de sales formando rocas. Las comunidades de extremófilos desarrollan una serie de actividades metabólicas que involucran la fijación de energía, así como el uso de esa energía por distintos grupos de organismos, dadas estas características se pueden considerar como ecosistemas (Des Marais, 2003).

Por su parte, los tapetes microbianos se caracterizan por presentar una organización vertical que se puede evidenciar por la estratificación de colores causados por los propios microorganismos, al realizar un corte transversal se observan generalmente tres a cuatro capas de colores: a) arriba una capa clara que puede ser rosada amarilla o blanca donde dominan los microorganismos más resistentes a la radiación solar, b) abajo y de color verde encontramos a los microorganismos que hacen fotosíntesis con O<sub>2</sub> (Cianobacterias), presentan clorofila por eso tiene color verde, c) abajo en color púrpura se observan los microorganismos que hacen fotosíntesis sin O<sub>2</sub> principalmente usando azufre, están acompañadas de otros microbios que reciclan el azufre. Tienen unos pigmentos muy característicos (bacterioclorofilas) que le dan ese color púrpura y, d) abajo podemos encontrar un estrato negro que corresponde a microorganismos que viven sin O<sub>2</sub> y precipitan minerales de hierro y azufre (Farías *et al.*, 2017). En la **Figura 2-2** se presentan las 4 capas (a, b, c y d) de un Tapete Microbiano.



**Figura 2-2 Estratos de colores con las principales características de los tapetes microbianos. Fuente: Elaboración propia.**

Los EME asociados a minerales son sistemas prácticamente cerrados que tienen representados en pocos milímetros los ciclos geoquímicos más importantes del planeta, por lo tanto, lo único que necesitan es agua, luz y condiciones extremas para que reduzca la competencia con organismos eucariotas. Estudios metagenómicos de estos ecosistemas demostraron que estos ciclos serían muy ancestrales, donde la fijación de carbono sería una alternativa para realizar fotosíntesis y que junto con la respiración de arsénico serían sistemas ampliamente distribuidos (Rasuk *et al.*, 2014; Farías *et al.*, 2014). Por otro lado, la importancia ecológica de estos ecosistemas no solo radica en la precipitación de minerales y fijación de carbono, sino que también son la base de la producción primaria en los humedales, producción que sostiene una importante biodiversidad de invertebrados y aves (Farías y Contreras, 2018).

En relación con lo señalado anteriormente, el estudio y conservación de estos EME es de vital importancia, no solo desde el punto de vista científico, sino también para conservar la salud vital de los humedales. A pesar de que desde su descubrimiento se ha aumentado el esfuerzo por su estudio, aún existe desconocimiento, como que factores fisicoquímicos y ambientales son los determinantes para que una laguna se desarrollen EME y en otras no. Por lo que, con la finalidad de determinar el estado de conocimiento que se tiene de estos ecosistemas en el Salar de Atacama se presenta la siguiente revisión bibliográfica.

### 3 OBJETIVOS

A continuación, se presenta el objetivo general del proyecto “Estudio de Ecosistemas Extremófilos” el cual tiene una duración de 3 años. Por su parte, los objetivos específicos se enumeran como actividades a seguir para lograr el objetivo general. Dichas actividades se van realizando a lo largo de todo el estudio, por lo que el presente informe corresponde fundamentalmente a la primera actividad que se relaciona con la revisión de antecedentes bibliográficos.

#### 3.1 Objetivo General

- Caracterización de los microorganismos extremófilos presentes en las lagunas de los sistemas Aguas de Quelana, Soncor, La Punta-La Brava y Peine del Salar de Atacama.

#### 3.2 Objetivos específicos

1. ***Determinar a través de revisión bibliográfica el estado de conocimiento de las comunidades extremófilas de los sistemas: Aguas de Quelana, Soncor, La Punta-La Brava y Peine.***
2. Describir las comunidades microbianas de los sistemas: Aguas de Quelana, Soncor, La Punta-La Brava y Peine.
3. Describir las condiciones de hábitat de las lagunas ubicadas en los sistemas Aguas de Quelana, Soncor, La Punta-La Brava y Peine.
4. Analizar el metagenoma de las lagunas ubicadas en los sistemas Aguas de Quelana, Soncor, La Punta-La Brava y Peine.
5. Caracterizar las curvas de habitabilidad de las comunidades extremófilas.
6. Implementación Cepario.

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende la cuenca del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, a 55 Km al sur de San Pedro de Atacama. Involucra los complejos hidrológicos: Soncor (Lagunas Chaxa, Barros Negros y Puilar), Aguas de Quelana; Peine (Lagunas Salada, Saladita e Interna) y La Brava-La Punta (Lagunas La Brava-La Punta y Tilopozo), sistemas representados en la **Figura 4-1**.

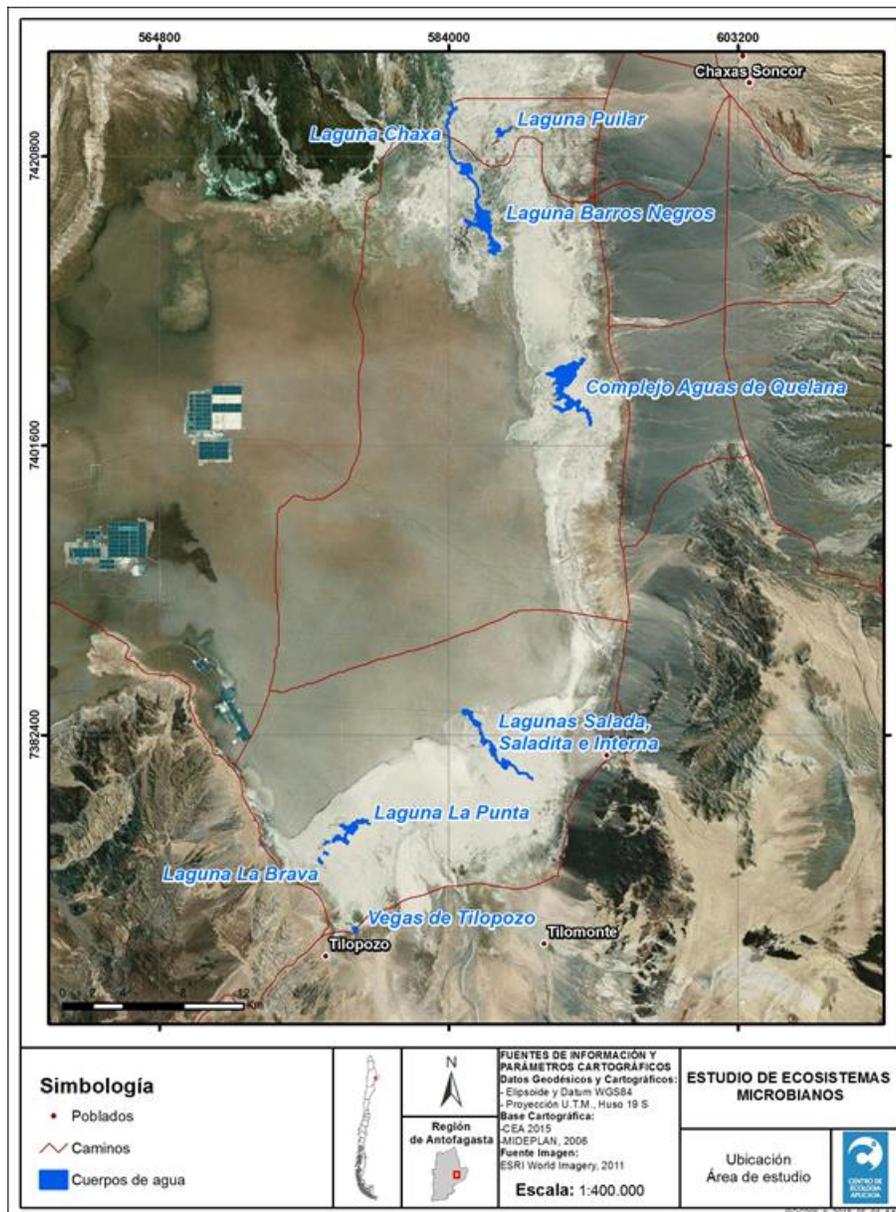
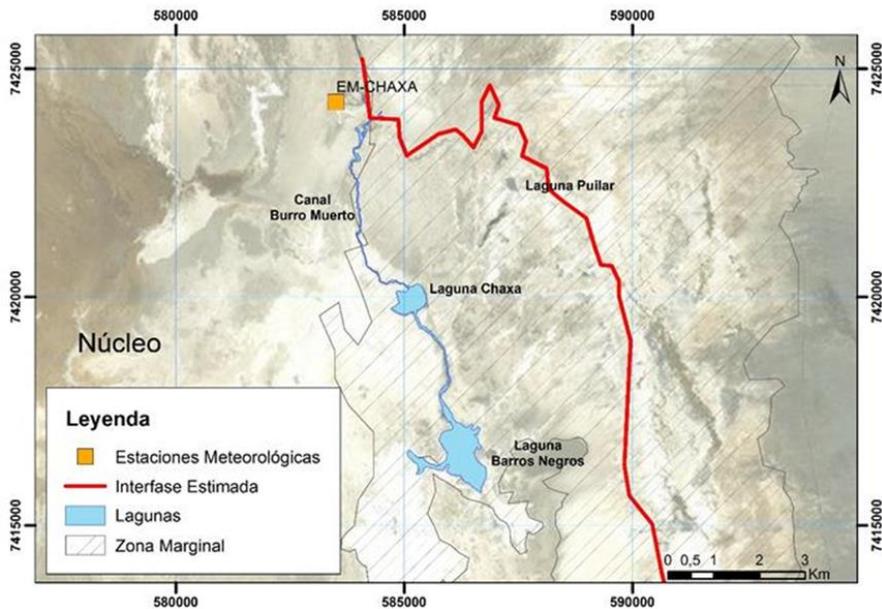


Figura 4-1 Área de estudio en el Salar de Atacama, región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

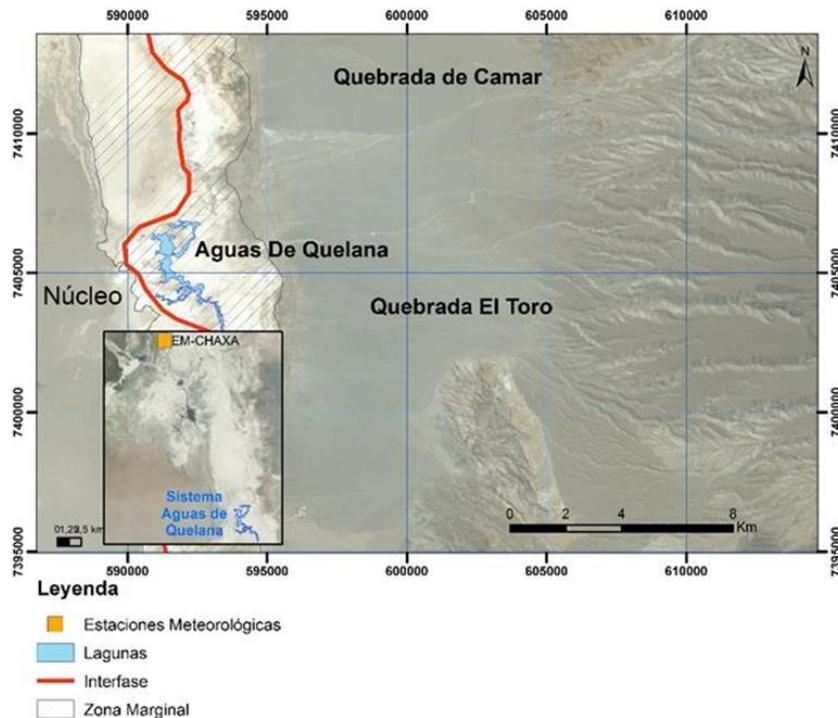
**El sistema Soncor** está formado por las lagunas Chaxa, Barros Negros y Puilar. Los flujos de agua subterránea procedentes del Norte y del Este, afloran en superficie tras encontrarse con la salmuera. Este afloramiento del agua subterránea se produce por una combinación de la topografía y de la posición de la interfase salina que forma una curva que “envuelve” al sistema lagunar. Estos afloramientos provocan escurrimientos subsuperficiales que alimentan el canal de Burro Muerto desde el Norte, y que corresponde al principal canal de recarga de la laguna Chaxa, así como la laguna Puilar y otros canales que discurren desde el Noreste entre las lagunas de Chaxa y Barros Negros. Estas dos lagunas se encuentran interconectadas a su vez por canales y otros escurrimientos que fluyen en dirección Sur. La laguna Barros Negros, desborda en el sector denominado “cola de pez” aumentando temporalmente el área inundada, siendo este desbordamiento mayor tras episodios de mayores precipitaciones. En este sistema lagunar tanto las variaciones estacionales de niveles periódicas en las lagunas, canales y aguas subterráneas que alimentan este sistema, responden a las variaciones de la tasa de evaporación y por lo tanto muestran una marcada oscilación estacional. También existen fluctuaciones puntuales de niveles que corresponden a eventos de precipitación mayores (**Figura 4-2**).



**Figura 4-2** Ubicación de las lagunas que componen el Sistema Soncor. Fuente: Albemarle Ltda., 2015.

**El sistema Aguas de Quelana** está formado por un conjunto de cuerpos de agua interconectados entre sí, de poca profundidad. Estos cuerpos de agua se disponen paralelos a la posición de la interfase y su formación se explica porque el flujo de agua subterránea procedente de los acuíferos aluviales del Este es muy cercano a la superficie del terreno y además es empujado hacia arriba por la presencia de la interfase salina, aflorando directamente en las lagunas o en sus proximidades. Durante eventos de

precipitación excepcionales se producen flujos subsuperficiales que desbordan por encima de la interfase e ingresan al Núcleo (**Figura 4-3**).



**Figura 4-3 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema Aguas de Quelana. Fuente: Albemarle Ltda., 2015.**

**El sistema Peine** está constituido por las lagunas Salada, Saladita e Interna, presentando las tres un área de inundación permanente. Además, la Laguna Interna, que se encuentra sobre el Núcleo de salmuera, se caracteriza por presentar un área adicional de inundación temporal que responde a los eventos de precipitación en el área, denominado Avance de Interna. Las tres lagunas se disponen en dirección perpendicular a la interfase salina, y están comunicadas por canales con flujo de agua superficial hacia el Núcleo del Salar. El agua subterránea de los acuíferos de agua dulce-salobre que alimenta las lagunas aflora en el canal situado al Sur de la Laguna Salada, en la Zona Marginal, debido a que la superficie freática intercepta la topografía (**Figura 4-4**).

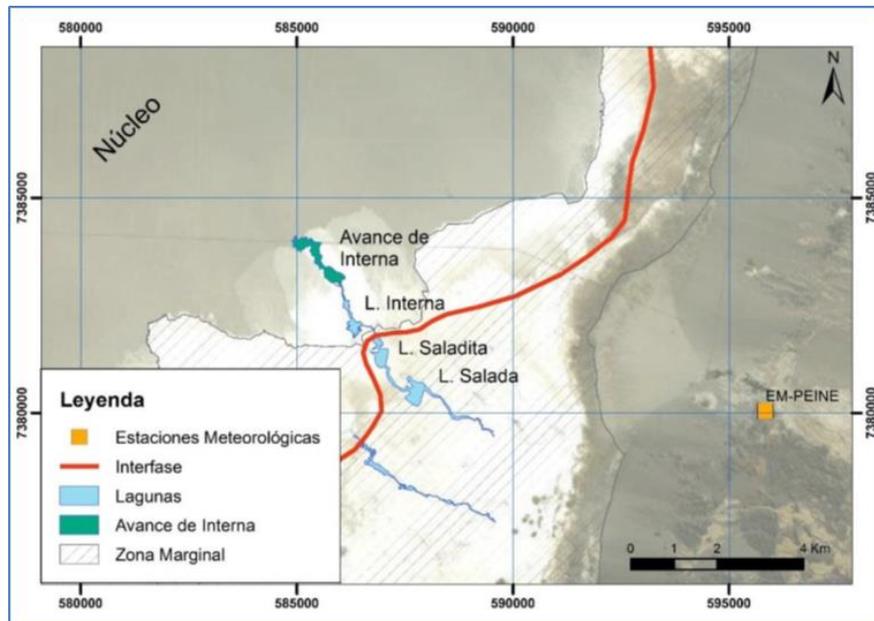


Figura 4-4 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema Peine. Fuente: Albemarle Ltda., 2015.

*El sistema La Punta-La Brava* está formado por dos cuerpos de agua principales (lagunas La Punta y La Brava) interconectados entre sí. Las lagunas de este sistema se disponen paralelas a la posición de la interfase, y se forman porque el flujo de agua subterránea procedente de los acuíferos aluviales de Monturaqui y Negrillar, que accede a este sector por las Vegas de Tilopozo, es empujado hacia arriba por la presencia de la interfase salina, y aflora directamente en las proximidades de las lagunas, preferentemente en su borde SE (Figura 4-5).

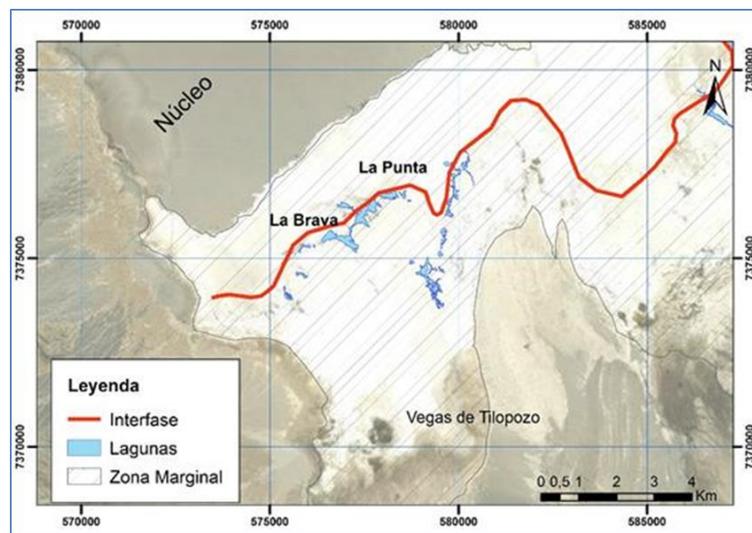
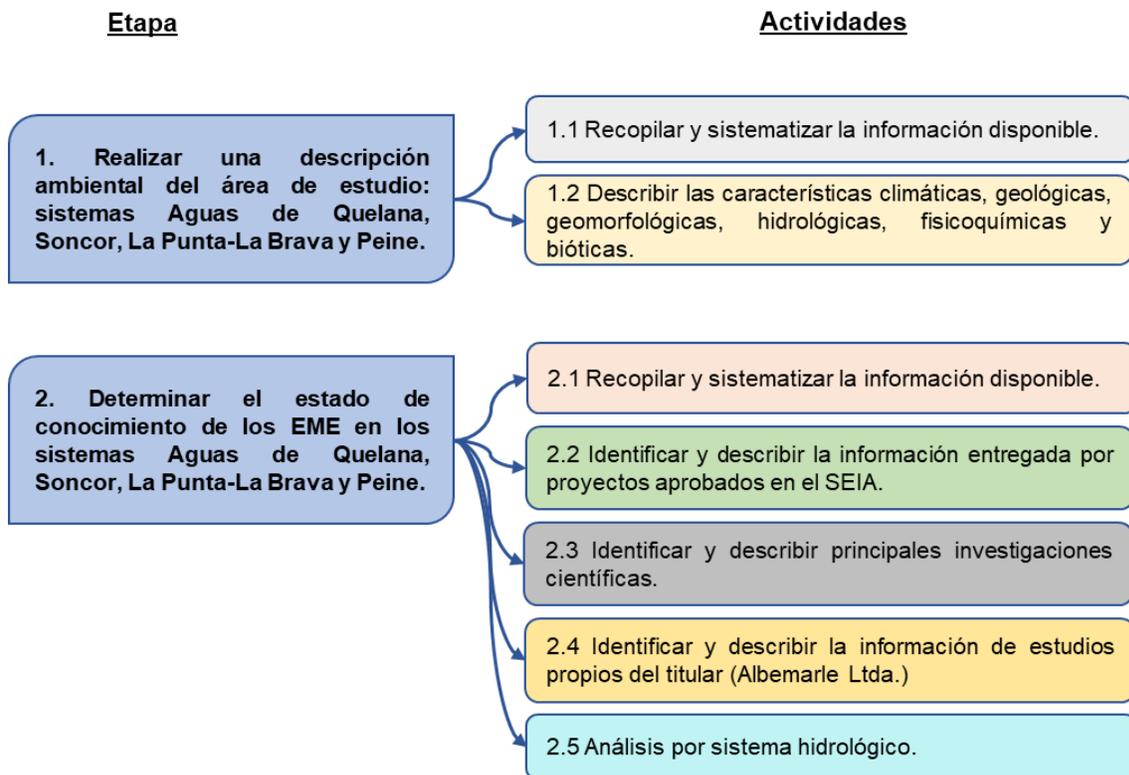


Figura 4-5 Ubicación de las lagunas que componen el Sistema La Punta-La Brava. Fuente: Albemarle Ltda., 2015.

## 4.2 Metodología

El desarrollo del presente informe de revisión bibliográfica se basó en una metodología de 2 etapas, donde a partir de una recopilación y sistematización de la información bibliográfica disponible durante los últimos 10 años, se realizó una caracterización física, química y biológica del área de estudio: sistema Soncor, Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava. Asimismo, se recopiló información sobre los Ecosistemas Microbianos Extremófilos presentes en dichos sistemas, la cual servirá como base para las actividades siguientes del “Estudio de Ecosistemas Extremófilos” que es llevado a cabo por el Centro de Ecología Aplicada Ltda. (CEA). El equipo de trabajo se presenta en el **Anexo 1**.

Para el entendimiento de esta metodología, la **Figura 4-6** da cuenta de las actividades de cada etapa.



**Figura 4-6 Metodología de desarrollo. Fuente: Elaboración propia**

A continuación, se describe el proceso metodológico de cada una de las etapas desarrolladas en este informe.

### 4.2.1 Recopilación de información Ambiental del área de estudio

Con el objetivo de recopilar información relacionada a las características climáticas, geomorfológicas, geológicas, hidrológicas y bióticas del Salar de Atacama, se realizó un

proceso de búsqueda y recopilación de esta información de los últimos 10 años a través de las siguientes fuentes de información:

- i. Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) existentes en la zona del estudio.
- ii. Programas de Vigilancia Ambiental (PVAs) de las empresas o Planes de Seguimiento Ambiental.
- iii. Publicaciones científicas y estudios técnicos desarrollados por Organismos Públicos, Universidades y Privados.
- iv. Estudios e investigaciones realizados en el Salar de Atacama.

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de dos estaciones emplazadas en el Salar de Atacama considerando un rango de 10 años. Para temperatura y precipitaciones los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica “Peine” (coordenadas 7.380.388 N y 596.045 E, Proyección UTM, Datum WGS-84) que es administrada por la Dirección General de Agua (DGA). Mientras que los datos de humedad relativa y radiación solar fueron obtenidos de la estación meteorológica “Socaire” (coordenadas 7.390.661 N y 613.252 E, Proyección UTM, Datum WGS-84) administradas por Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

#### **4.2.2 Recopilación de información Ecosistemas Microbianos Extremófilos**

Para recopilar y sistematizar la información acerca de las comunidades extremófilas se realizó una síntesis a partir de publicaciones científicas e informes técnicos referidos al área de estudio. Se identificaron y recopilaron antecedentes referentes a la información contenida en los proyectos aprobados en los últimos 10 años en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA) para la cuenca del Salar del Atacama en su sitio web (URL: <http://seia.sea.gob.cl/busqueda/buscarProyecto.php>).

Gran parte de los proyectos ingresados a la plataforma del SEIA, principalmente los Estudios de Impacto Ambiental presentan algún Plan de Seguimiento de Variables Ambientales (PVA), Monitoreos Voluntarios o una Línea Base de caracterización, las cuales permiten un autocontrol del impacto ambiental y una caracterización de la zona de estudio, por lo que, también se identificaron aquellos proyectos que dentro de sus PVA o Compromisos Ambientales Voluntarios presentan algún estudio en relación a los comunidades que forman los Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME). Además, se incluye en la revisión los estudios realizados en el área por organismos públicos, principalmente los desarrollados por el Ministerio del Medio Ambiente. Para complementar la información se incluyeron también los propios estudios y monitoreos realizados por el titular Albemarle Ltda.

Por otro lado, se revisaron publicaciones científicas de los últimos 10 años, incluyendo reportes de divulgación general, tesis de grado, programas, propuestas y proyectos. La búsqueda y recopilación de la información relacionada a los microorganismos extremófilos se llevó a cabo en diversas revistas de divulgación científica, tales como, *Frontiers in*

Microbiology, Extremophiles, Systematic and Applied Microbiology, ISI, SCIELO Scopus, WEBScience, Elsevier y ASFA utilizando como criterio de búsqueda 5 palabras claves: Microbial mats, Extremophile, Hypersaline lake, Microbialites y Atacama. Los resultados encontrados se organizaron identificando el autor, el año y título de las investigaciones realizadas en el Salar de Atacama.

## 5 RESULTADOS

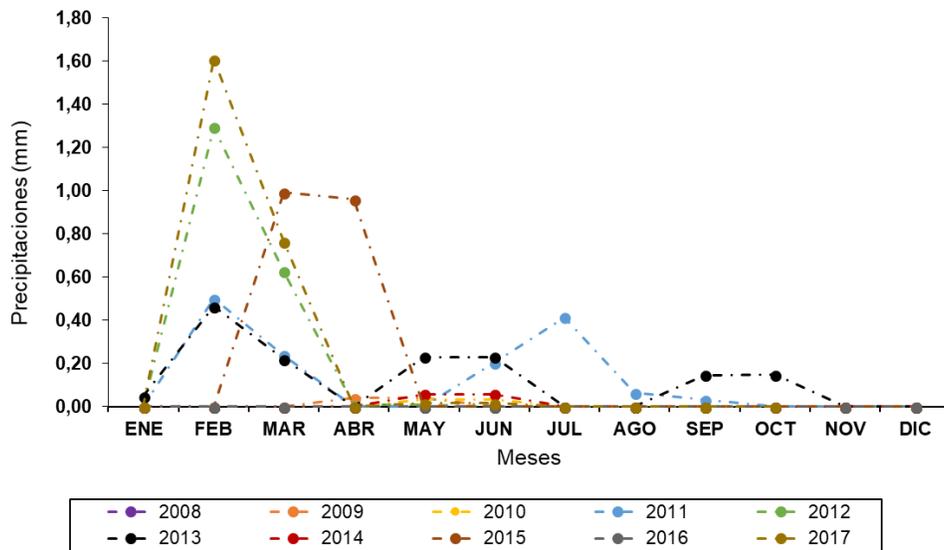
### 5.1 Descripción ambiental del Salar de Atacama

#### 5.1.1 Clima y Meteorología

El clima del área de estudio corresponde al tipo climático Desértico Marginal de Altura (Kottek *et al.*, 2006), el cual se presenta entre los 2.000 y 3.000 m de altura. Este clima se caracteriza por un régimen de precipitaciones escasas y se manifiesta en precipitaciones estivales y también de tipo ciclónico, las que se registran principalmente en el periodo estival y en mucho menor medida en el invierno. Las precipitaciones invernales abundantes ocurren con intervalos de varios años, y se relacionan con inviernos pluviométricamente rigurosos.

##### 5.1.1.1 Precipitaciones

Los datos registrados en el período desde enero del 2008 a octubre del 2017 en la estación meteorológica de Peine muestran una precipitación promedio anual de 0,09 mm, siendo febrero y marzo los meses más lluviosos con un promedio mensual de 0,3 y 0,2 mm respectivamente. Los meses más secos corresponden a noviembre y diciembre con 0,00 mm de precipitación (**Figura 5-1**).



**Figura 5-1 Precipitaciones promedio mensual de la estación meteorológica Peine en el Período 2008-2017. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.**

En la **Tabla 5-1** se presentan las precipitaciones máximas en milímetros (mm) registradas en 24 horas en la estación meteorológica de Peine en los periodos enero 2018 a octubre del 2017, en la que podemos observar que el máximo histórico registrado fue de 19,5 mm el día 18 de marzo del 2015, seguido por 18,5 mm registrados el día 09 de febrero del 2012, mientras que los años 2008 y 2016 no registraron precipitaciones. En general los

máximos registrados se concentran en verano, época en la que ocurre el fenómeno llamado invierno altiplánico.

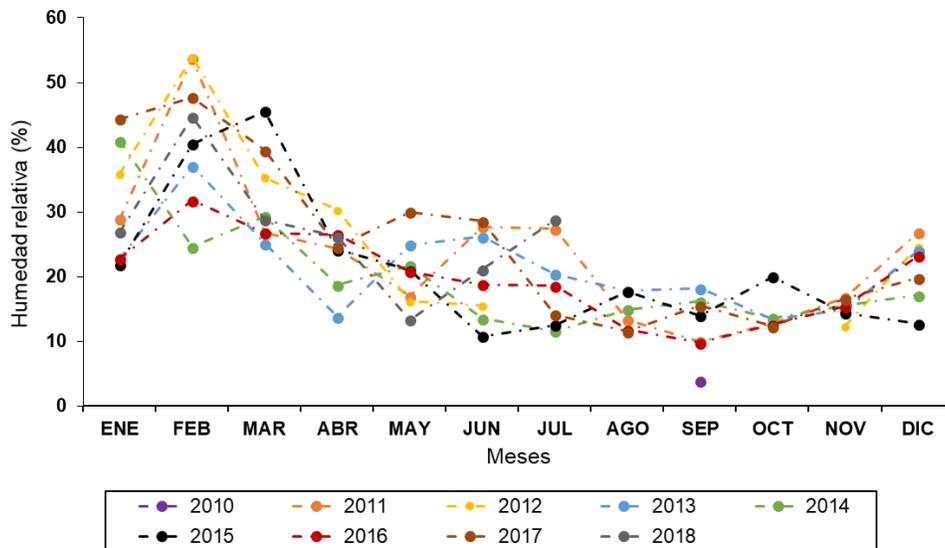
**Tabla 5-1 Precipitaciones máximas (mm) registradas en 24 horas en la estación meteorológica Peine en el Período 2008-2017.**

AÑO	FECHA	MÁXIMA EN 24 HS. PRECIPITACION (mm)
2008	-	-
2009	12-abr	2,5
2010	01-may	1
2011	04-feb	10,5
2012	09-feb	18,5
2013	17-may	14
2014	22-may	3,5
2015	18-mar	19,5
2016	-	-
2017	23-feb	33,5

Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

5.1.1.2 Humedad relativa

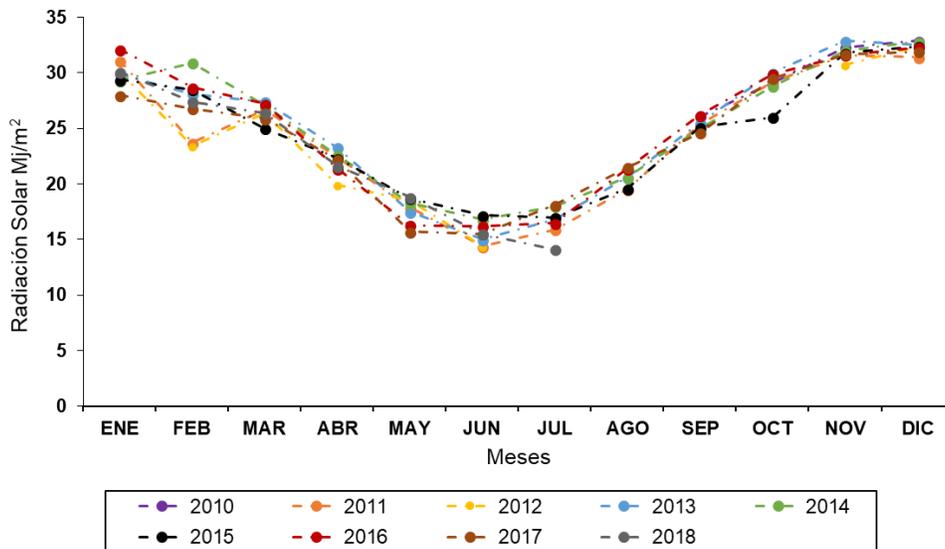
Los datos registrados en el período desde septiembre del 2010 a julio del 2018 en la estación meteorológica de Socaire muestran una humedad relativa promedio anual de 21,9 %, siendo febrero y marzo los meses con promedios más altos registrándose un 41,7% y 32,1% respectivamente. Mientras que los valores mínimos se registraron en septiembre con un 12,5% (Figura 5-2).



**Figura 5-2 Humedad relativa (%) promedio mensual de la estación meteorológica Socaire en el Período 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con datos de INIA.**

5.1.1.3 Radiación solar

La mayor radiación solar en el área de estudio se concentra durante la estación primavera-verano. En la **Figura 5-3** se presenta el promedio mensual de la radiación solar ( $Mj/m^2$ ) de la estación Socaire en el periodo enero 2010 a julio 2018, donde el promedio anual registrado corresponde a  $24,9 MJ/m^2$ . Los valores promedios mínimos se registran en los meses de junio y julio con  $15,6$  y  $16,6 MJ/m^2$  respectivamente, mientras que los valores promedios máximos se registran en noviembre con  $31,8 MJ/m^2$  y diciembre con  $32,3 MJ/m^2$ .



**Figura 5-3 Radiación Solar ( $Mj/m^2$ ) promedio mensual de la estación meteorológica Socaire en el Período 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con datos de INIA.**

Según la Dirección Meteorológica de Chile (Boletín 2016;2017), la región de Antofagasta presenta valores extremos de acuerdo con el índice UV-B, y rangos Altos de acuerdo con el índice UV-A, siendo las más extremos del país, sin embargo, estos índices se relacionan con la salud humana y sus efectos al corto y largo plazo.

Por otro lado, la Radiación Fotosintéticamente Activa o PAR por sus siglas en inglés, se refiere a la cantidad de radiación integrada o del rango de longitudes de onda que son capaces de producir actividad en organismos fotosintéticos, la cual se ha registrado en el Salar de Atacama en la laguna La Brava con un rango promedio de  $1,410 \pm 1,620 \mu E.m^{-2}.s^{-1}$  ( $S23^{\circ}43'48.1''-W68^{\circ}14'52.8''$ ) y  $1.850 \pm 2.550 \mu E.m^{-2}.s^{-1}$  ( $S23^{\circ}43'48.1''-W68^{\circ}14'52.8''$ ), los que corresponden a altos valores de radiación, presentando condiciones similares a la tierra primitiva (Fariás *et al.*, 2017).

5.1.1.4 Temperatura

Los datos registrados en el período desde enero del 2008 a octubre del 2017 en la estación meteorológica de Peine indican una temperatura media anual de 16,8°C. La temperatura máxima media mensual del mes más cálido se registró en enero con 21,1°C, mientras que la temperatura mínima media mensual del mes más frío se registró en julio con 10,4°C. En la **Figura 5-4** se presenta la temperatura promedio mensual para el periodo 2008-2017.

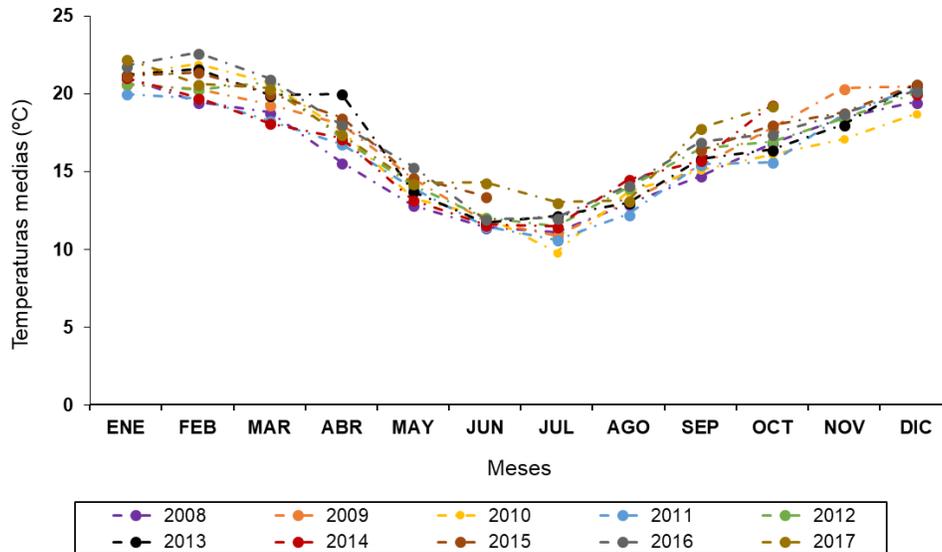


Figura 5-4 Temperatura promedio mensual de la estación meteorológica Peine en el Período 2008-2017. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

5.1.2 Geología y Geomorfología

La cuenca del Salar de Atacama está limitada hacia el Este, en el borde occidental de la Puna de Atacama por una línea de centros volcánicos andesíticos y basálticos, de edad Cuaternaria a Reciente. La superficie actual del Salar está formada por depósitos clásticos y evaporitas, distribuidas estas últimas en una zonación relacionada con la solubilidad relativa de las sales y que donde el borde del Salar hacia su centro corresponde a limos salinos, eflorescencias y el “núcleo” salino central. Los ejes del plegamiento tienen dos direcciones principales: Noroeste a Noreste, afectando a unidades Paleozoicas y Triásicas, y Norte-Noreste afectando a rocas del Jurásico al Terciario (MMA,2017).

En cuanto al Núcleo, su espesor promedio alcanza los 650 metros, con una profundidad máxima estimada de 1.400 metros y está impregnada por una salmuera intersticial muy rica en litio, potasio, magnesio y boro. En profundidad se pueden distinguir dos capas principales: una capa superior de potencia comprendida entre 15 y 30 metros, de mayor porosidad (alrededor de un 12%) y conductividad hidráulica, compuesta por sal con textura granulada; y una capa inferior de menor porosidad (alrededor de un 4%) y de

mucho menor conductividad hidráulica, conformada por un 90% de halita cristalizada porosa. Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio se presentan en la **Tabla 5-2**.

**Tabla 5-2 Formaciones geológicas de la zona.**

<b>Formación Geológica</b>	<b>Era Geológica</b>	<b>Tipo</b>
<b>CP2</b>	Carbonífero-Pérmico	Secuencias volcanosedimentarias
<b>CP3</b>	Carbonífero-Pérmico	Secuencias volcánicas
<b>CPg</b>	Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma)	Rocas metamórficas
<b>DC1</b>	Devónico-Carbonífero	Secuencias sedimentarias
<b>E2c</b>	Eoceno	Secuencias volcanosedimentarias
<b>EO1c</b>	Eoceno-Oligoceno	Secuencias sedimentarias
<b>JK1c</b>	Jurásico Superior-Cretácico Inferior	Secuencias sedimentarias
<b>Ks1c</b>	Cretácico Superior	Secuencias sedimentarias
<b>Ks2c</b>	Cretácico Superior	Secuencias volcanosedimentarias
<b>Ksg</b>	Cretácico Superior (90-65 Ma)	Rocas metamórficas
<b>KT1c</b>	Cretácico Superior-Terciario Inferior	Secuencias sedimentarias
<b>KT2</b>	Cretácico Superior-Terciario Inferior	Secuencias volcanosedimentarias
<b>KTg</b>	Cretácico Superior-Terciario Inferior	Rocas metamórficas
<b>M1c</b>	Mioceno Inferior-Medio	Secuencias sedimentarias
<b>M3i</b>	Mioceno Inferior-Medio	Secuencias volcánicas
<b>MP1c</b>	Mioceno Superior-Plioceno	Secuencias sedimentarias
<b>MP1l</b>	Mioceno Superior-Plioceno	Secuencias sedimentarias
<b>MQs</b>	Mioceno-Cuaternario	Secuencias sedimentarias
<b>Ms3i</b>	Mioceno Superior	Secuencias volcánicas
<b>Ms3t</b>	Mioceno Superior	Secuencias volcánicas
<b>OM1c</b>	Oligoceno-Mioceno	Secuencias sedimentarias
<b>OM2c</b>	Oligoceno-Mioceno	Secuencias sedimentarias
<b>OS1m</b>	Ordovícico-Silúrico	Secuencias sedimentarias
<b>OS3</b>	Ordovícico-Silúrico	Secuencias volcánicas
<b>OSg</b>	Ordovícico-Silúrico (466-415 Ma)	Rocas metamórficas
<b>P3i</b>	Plioceno	Secuencias volcánicas
<b>P3t</b>	Plioceno	Secuencias volcánicas
<b>PE1c</b>	Paleoceno-Eoceno	Secuencias sedimentarias
<b>PPI1c</b>	Plioceno-Pleistoceno	Secuencias sedimentarias
<b>PPI1l</b>	Plioceno-Pleistoceno	Secuencias sedimentarias
<b>PTrg</b>	Pérmico-Triásico (270-205 Ma)	Rocas metamórficas
<b>Q1g</b>	Pleistoceno-Holoceno	Secuencias sedimentarias
<b>Q3av</b>	Cuaternario	Secuencias volcánicas
<b>Q3i</b>	Cuaternario	Secuencias volcánicas
<b>Q3t</b>	Cuaternario	Secuencias volcanosedimentarias
<b>Qa</b>	Pleistoceno-Holoceno	Secuencias sedimentarias
<b>Qe</b>	Pleistoceno-Holoceno	Secuencias sedimentarias

Formación Geológica	Era Geológica	Tipo
Tr2c	Triásico Medio-Superior	Secuencias volcanosedimentarias
TrJ3	Triásico-Jurásico Inferior	Secuencias volcánicas

Fuente: SERNAGEOMIN. Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, N° 4, 2003.

Geológicamente, los materiales de relleno de la cuenca del Salar de Atacama son facies evaporíticas, cuya distribución está controlada por la típica secuencia de precipitación según un orden de solubilidades creciente: carbonatos, sulfatos y cloruros (desde el margen hacia el interior de la cuenca). Esta estructura se refleja superficialmente con el desarrollo de una serie de “costras”. La distribución de estas costras no es concéntrica respecto del depocentro del Salar, debido a que el aporte de solutos se realiza a través de la red de cursos de agua superficial y descargas subterráneas existente, en los sectores norte y este del Salar. En profundidad, y especialmente en el sector noreste, estas facies sedimentarias se encuentran intercaladas con tobas e ignimbritas (EDRA, 1999), como prolongación lateral de los cuerpos volcánicos que constituyen el zócalo del sector montañoso del margen este (**Figura 5-5**).

Tanto el zócalo como los márgenes de la cuenca son tectónicamente activos, lo que da lugar a una serie de plegamientos y fracturaciones evidentes mediante la prospección geofísica de las diferentes unidades (Salas *et al.*, 2010).

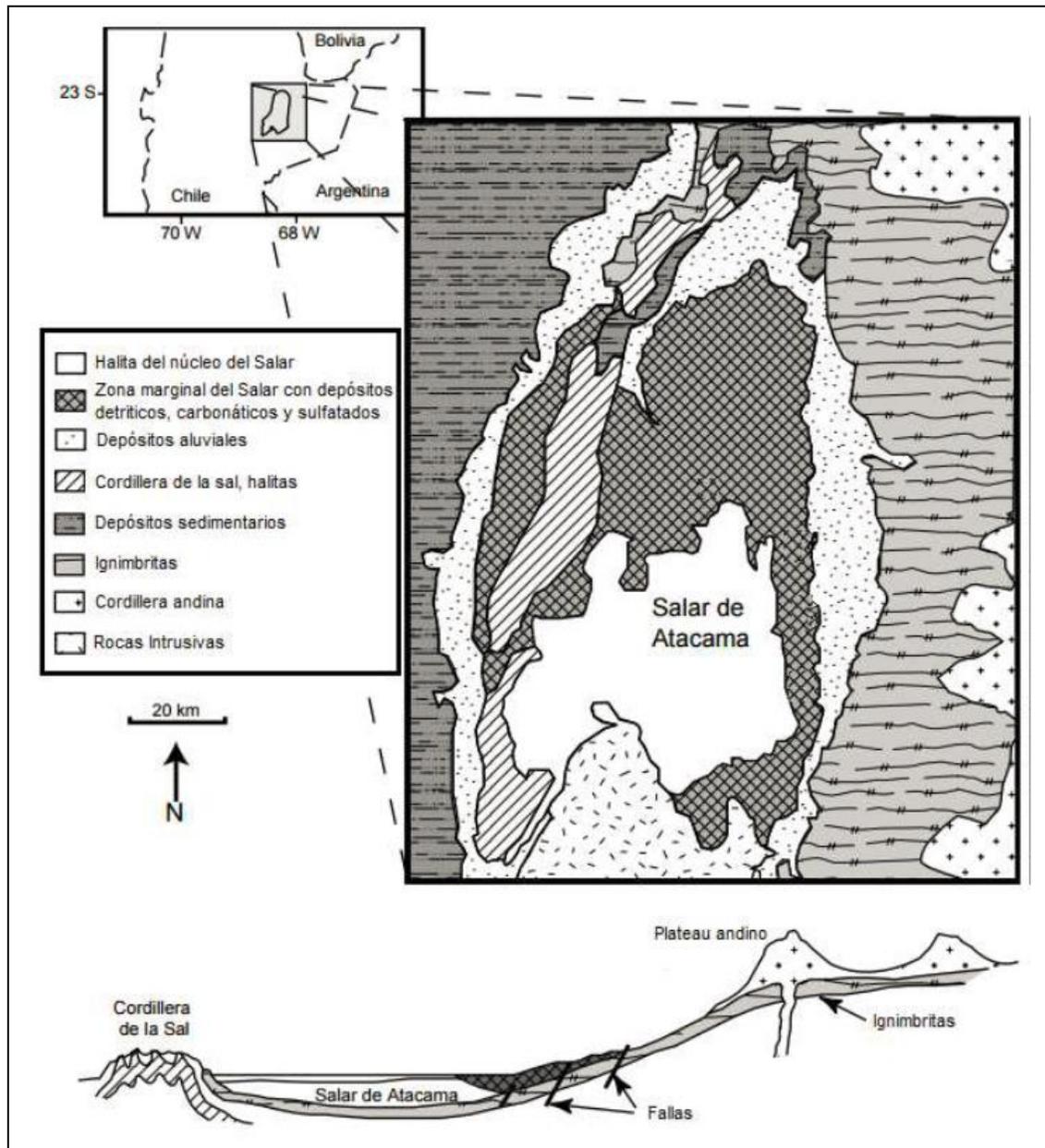


Figura 5-5 Geología generalizada de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Kampf *et al.*, 2005.

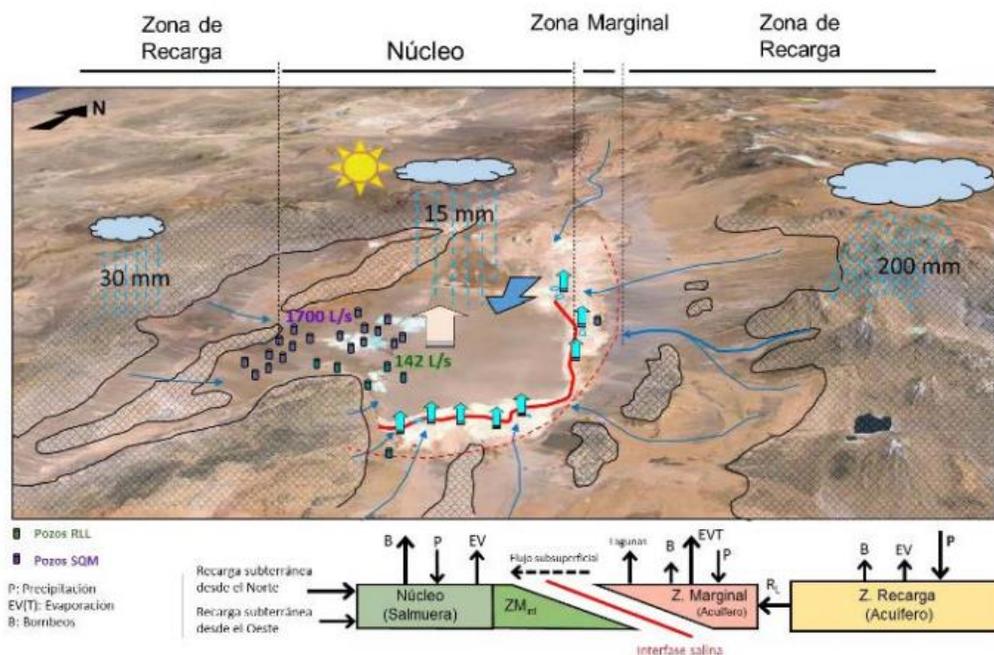
### 5.1.3 Hidrología

El Salar de Atacama hidrográficamente se caracteriza por tener una recarga continua de agua subterránea principalmente proveniente del extremo este, por la infiltración de la precipitación que se produce en el altiplano y sólo esporádicamente algunos cursos superficiales llegan a sus bordes (DGA, 2014).

Los principales cursos fluviales presentes en el entorno del Salar son los ríos San Pedro (con un caudal promedio de 1 m<sup>3</sup>/s, y con episodios torrenciales de hasta 25 m<sup>3</sup>/s) y

Vilama (con un caudal promedio de 0,2 m<sup>3</sup>/s). Ambos desembocan en el margen norte del Salar de Atacama: el río San Pedro forma un delta seco, mientras que Vilama, sometido a una fuerte presión extractiva, se infiltra y desaparece al Sur de San Pedro de Atacama. Los máximos caudales se registran entre los meses de enero a marzo, coincidiendo con los máximos pluviométricos (MMA,2017).

El Salar, está constituido por dos grandes unidades: el núcleo de 1.100 km<sup>2</sup> de superficie y de 900 m de espesor, y la zona marginal de limos salinos de unos 2.000 km<sup>2</sup> de superficie. El núcleo está constituido por un 90% de halita porosa impregnada con una salmuera de cloruro de sodio muy rica en litio (Li), potasio (K), magnesio (Mg) y boro (B) que ocupa los intersticios de la halita. El balance salino en el núcleo revela un gran exceso de Na y Cl con respecto a Mg, K, Li, B, lo que se atribuye a un alto contenido de NaCl en las antiguas soluciones de aporte producido por lixiviación de la Cordillera de la Sal. Alrededor del núcleo, se extiende la zona marginal del salar constituida de sedimentos salinos finos, ricos en sulfatos, especialmente yeso (Adenda 5 Albemarle Ltda., 2015) (Figura 5-6).



**Figura 5-6 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Estudio “EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”, Adenda V, Anexo 1, Figura 9-1.**

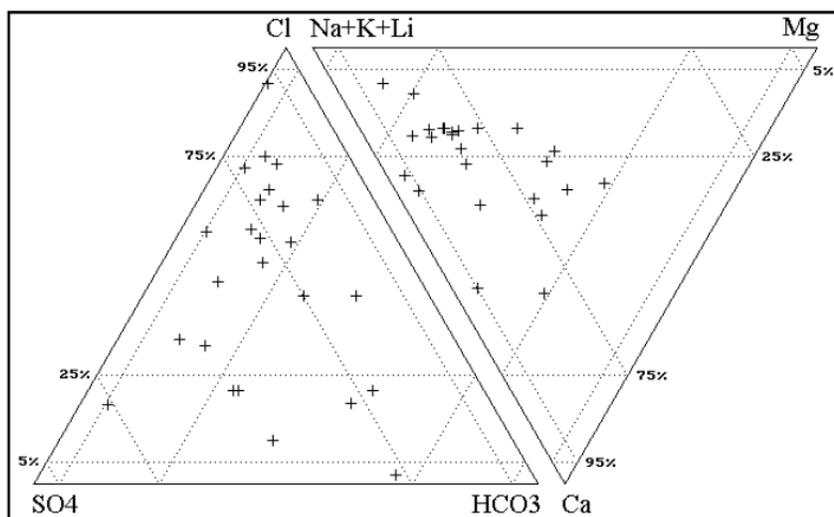
En el núcleo del salar las precipitaciones son muy escasas, los principales aportes se producen desde los extremos, en especial desde el extremo oeste, pues es ahí donde se producen la mayor cantidad de precipitaciones, por otro lado, gran parte de las precipitaciones se evapora y no alcanzan a llegar al núcleo, por lo que en esa zona del salar no se producen lagunas ni existe una zona marginal húmeda como en el caso de la zona oriente (DGA, 2016).

### 5.1.4 Caracterización fisicoquímica

El primer estudio extensivo sobre el salar de Atacama, incluyendo la caracterización hidroquímica de sus aguas, fue realizado por Moraga y colaboradores (1974) en Risacher y Salazar (1999), en el cual menciona que las altas concentraciones de litio y potasio en las salmueras incentivaron nuevos estudios del salar y de la hidrogeología de su cuenca de drenaje, lo cual se ha evidenciado en los últimos años donde titulares de proyectos mineros como Albemarle Limitada y SQM han desarrollado diversos estudios que han incluido una caracterización fisicoquímica de las lagunas del Salar.

Risacher y Salazar (1999) han descrito las características fisicoquímicas de las aguas superficiales reportando para el Salar de Atacama aguas con buena calidad en el norte y en el sector oriente alto de la cuenca. Destacándose que casi todos los aportes encontrados provienen de la Cordillera de los Andes al este y al norte del salar. Las salinidades varían desde 213 mg/l hasta 19.500 mg/l. El aporte más concentrado está probablemente contaminado por la cuña salina del salar. Por otro lado, dicho estudio señala que los aportes al salar de Atacama drenan esencialmente terrenos volcánicos.

En la **Figura 5-7** se observa que las composiciones de los aportes son muy variadas, lo que refleja la gran complejidad de la cuenca de drenaje.

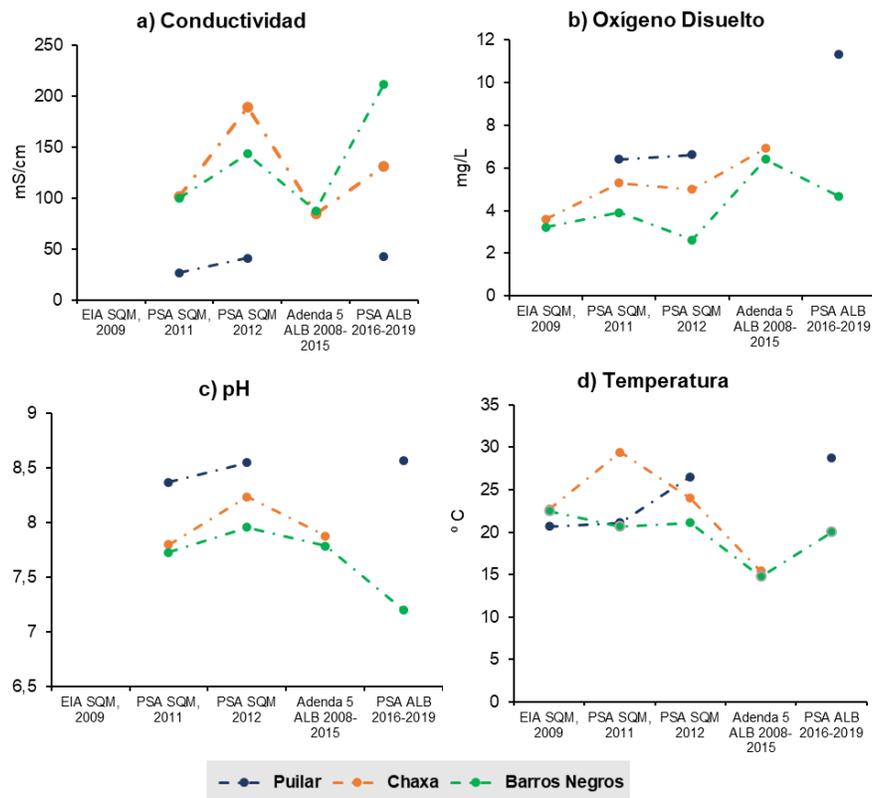


**Figura 5-7** Composición de aguas y salmueras del salar de Atacama. Fuente: Risacher y Salazar, 1999.

#### 5.1.4.1 Sistema Soncor

De acuerdo con la data histórica del sistema Soncor, este registra una variabilidad de condiciones ambientales diferentes en cada laguna que lo conforma. En cuanto a la conductividad, la Laguna Puilar presenta menores valores que Chaxa y Barros Negros, por su parte, la salinidad histórica registrada es también mayor en estas últimas. El oxígeno disuelto también registra una variación espacial, siendo la Laguna Puilar la que

registra valores promedios superiores a los 6 mg/L incluso alcanzando los 12 mg/L (PSA Albemarle Ltda, 2018), seguido por la laguna Chaxa y Barros Negros con un promedio mínimo histórico registrado de 2 mg/L (PSA SQM, 2012). En cuanto a la temperatura y pH las 3 lagunas registran rangos similares que van de 7 a 8,5 de pH y de 15 a 30°C de Temperatura promedio (**Figura 5-8**).



**Figura 5-8 Valores promedio registrados para el sistema Soncor. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.**

En cuanto a la alcalinidad se observaron mayores valores en la laguna Chaxa, mientras que el fósforo total fue superior en la laguna Barros Negros. En cuanto a nutrientes expresado como Nitrato, no se observan patrones temporales. En tanto la turbidez presenta un patrón similar desde el año 2015 a la fecha entre las distintas lagunas del sistema Soncor, según los promedios de parámetros fisicoquímicos históricos.

En términos de parámetros biológicos, se reporta que los parámetros correspondientes a coliformes fecales y coliformes totales presentaron valores inferiores al límite de detección en las 3 lagunas de estudios (Barros Negros, Chaxa y Puillar). En general, la laguna Barros Negros presenta concentraciones de metales y otros elementos de estudio superiores en relación con la laguna Chaxa y Puillar. El cadmio, cobalto, cromo, estaño, mercurio, níquel, selenio, plata y plomo, en su fracción disuelta, presentaron concentraciones bajo los límites de detección en las tres lagunas de estudio. Mientras que

los elementos más abundantes en orden descendente fueron el sodio, potasio, magnesio, calcio, arsénico, litio y boro, en su fracción disuelta.

A continuación, en la **Tabla 5-3** se presentan los antecedentes de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua expresados en promedios para el sistema de Soncor.

Tabla 5-3 Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema Soncor lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros.

Parámetro	Sector Fuente	Puilar				Chaxa					Barros Negros				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	Adenda 5 ALB 2008- 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	Adenda 5 ALB 2008- 2015	PSA ALB 2016-2018
Conductividad eléctrica (25°C)	mS/cm	-	26,7	40,9	42,5	-	101,2	188,6	84,7	131	-	99,8	143,33	87,5	211,35
Oxígeno disuelto	mg/L	-	6,4	6,62	11,34	3,6	5,3	5	6,92	5,6	3,23	3,9	2,63	6,4	4,67
pH	-	-	8,37	8,55	8,57	-	7,8	8,24	7,88	7,45	-	7,73	7,96	7,79	7,2
Salinidad	g/L	-	18	27	27,5	>70	29	99	>70	>70	-	83	195	>70	>70
Saturación de oxígeno	%	-	-	-	191,5	-	-	-	-	78,4	-	-	-	-	69,65
Temperatura	°C	20,7	21,1	26,52	28,8	22,7	29,4	24	15,43	19	22,5	20,67	21,06	14,8	20,05
Amonio (N-NH4)	ug/L	-	-	-	-	-	-	-	210	<10	-	-	-	-	<10
Cloruro	mg/L	-	-	-	13.520	-	-	-	-	56.973	-	-	-	-	130.149
Fósforo total	ug/L	-	-	-	1.320	-	-	-	<50-958	795	-	-	-	<50	1.798
Nitrógeno de nitrato (N-NO3)	ug/L	-	-	-	1.963	-	-	-	5.800	726	-	-	-	-	2.493
Nitrógeno de nitrito (N-NO2)	ug/L	-	-	-	1,6	-	-	-	1,67	1,81	-	-	-	-	3,91
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	-	-	-	2,02	-	-	-	2,63	2,15	-	-	-	1,45	3,15
Ortofosfato (P-PO4)	ug/L	-	-	-	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sólidos totales suspendidos	mg/L	-	-	-	39,5	-	-	-	-	119,28	-	-	-	-	301,7
Sólidos totales disueltos	mg/L	-	-	-	28.540	-	-	-	121.250	95.733	-	-	-	-	149.641
Sulfato	mg/L	-	-	-	1.603	-	-	-	-	9.619	-	-	-	-	19.462
Coliformes Fecales	mg/L	-	-	-	<1,8	-	-	-	<1,8	<1,8	-	-	-	<1,8	<1,8
Arsénico disuelto	mg/L	2,15	-	-	5,34	1,24	-	-	2,27	2,37	3,58	-	-	-	6,52

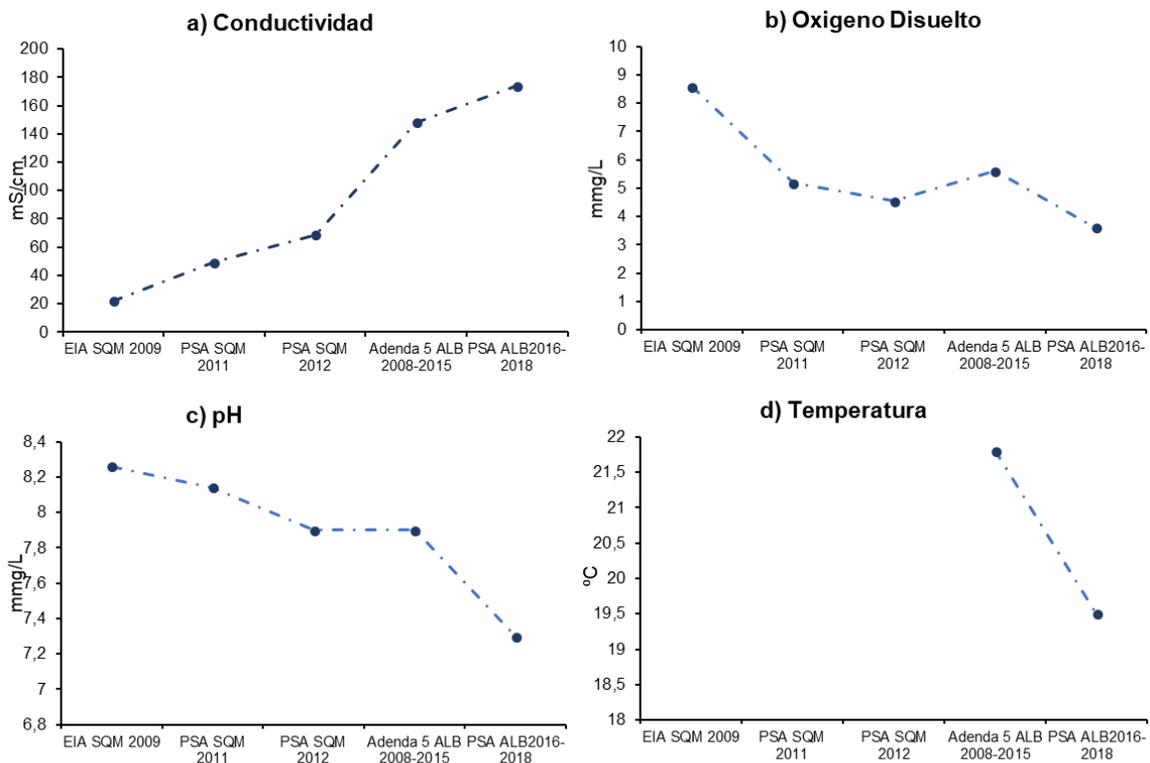
Parámetro	Sector Fuente	Puillar				Chaxa					Barros Negros				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	Adenda 5 ALB 2008- 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	Adenda 5 ALB 2008- 2015	PSA ALB 2016-2018
Calcio disuelto	mg/L	-	-	-	292	-	-	-	-	1.069	-	-	-	-	1.000
Potasio disuelto	mg/L	-	-	-	1.872	-	-	-	-	5.900	-	-	-	-	13.385
Magnesio disuelto	mg/L	-	-	-	773	-	-	-	-	3.403	-	-	-	-	7.801
Sodio disuelto	mg/L	-	-	-	9.309	-	-	-	-	34.296	-	-	-	-	90.605
Bicarbonato	mg/L	-	-	-	253	-	-	-	-	359	-	-	-	-	1.046
Carbonato	mg/L	-	-	-	404	-	-	-	469,2	616,22	-	-	-	623,01	858,22
Alcalinidad total	mgCaCO3/L	-	-	-	118	-	-	-	-	193,2	-	-	-	-	<5
Carbonato	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	16,5	10	-	-	-	25	12,5
Color verdadero	mg/L	-	-	-	1.012	-	-	-	811	314	-	-	-	-	704
Sílice	mg/L	-	-	-	10,7	-	-	-	147,6	13,65	-	-	-	7,8	16,49
Turbidez	NTU	-	-	-	15,87	-	-	-	10,77	1,66	-	-	-	8,65	2,3
Clorofila "a"	ug/L	-	-	-	<1,8	-	-	-	<1,8	<1,8	-	-	-	<1,8	<1,8
Coliformes Totales	NMP/100ml	-	-	-	18	-	-	-	-	6,5	-	-	-	-	10,5
DBO5	mg/L	-	-	-	0,014	-	-	-	0,08	0,016	-	-	-	-	<0,010
Aluminio disuelto	mg/L	-	-	-	0,08	-	-	-	1,2	0,05	-	-	-	-	0,09
Bario disuelto	mg/L	-	-	-	94,5	-	-	-	447	303	-	-	-	-	694
Boro disuelto	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	<0,001	-	-	-	-	<0,001
Cadmio disuelto	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	0,005	<0,001	-	-	-	-	<0,001
Cobalto disuelto	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	0,003	0,01	-	-	-	-	0,01
Cobre disuelto	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	0,03	<0,002	-	-	-	-	<0,002
Cromo disuelto	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	<0,005	<0,05	-	-	-	-	<0,05
Estaño disuelto	mg/L	-	-	-	0,006	-	-	-	-	0,05	-	-	-	-	0,02
Hierro disuelto	mg/L	-	-	-	203	-	-	-	-	536	-	-	-	-	1.379

Parámetro	Sector Fuente	Puilar				Chaxa					Barros Negros				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	Adenda 5 ALB 2008- 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM 2012	Adenda 5 ALB 2008- 2015	PSA ALB 2016-2018
<b>Litio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	-	-	-	-	0,22
<b>Manganeso disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	-	-	-	-	<0,001
<b>Mercurio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,02	-	-	-	-	0,06	-	-	-	-	0,11
<b>Molibdeno disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	<0,003
<b>Níquel disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,002	-	-	-	-	<0,002
<b>Plata disuelta</b>	mg/L	-	-	-	0,04	-	-	-	-	0,03	-	-	-	-	0,02
<b>Plomo disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,005	-	-	-	-	<0,005
<b>Selenio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,01	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	0,03

Símbolo menos (-) indica que no se reportó el valor o bien se encontró bajo el rango de detección del equipo, EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2 Sistema Aguas de Quelana

El sistema Aguas de Quelana es un complejo lagunar con una alta heterogeneidad espacial, esto se puede observar en la variación de sus parámetros fisicoquímicos realizados en distintos periodos. Podemos observar en la **Figura 5-9** que la conductividad varía de un rango promedio de 20 mS/cm registrada en el 2009 (EIA, SQM) a un máximo de 180 mS/cm reportado en el último periodo de PSA 2016-2018 de Albemarle Ltda., mientras que los otros parámetros como oxígeno disuelto, pH y temperatura han disminuido sus valores promedios reportados.



**Figura 5-9 Valores promedios registrados para el sistema Aguas de Quelana. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, PMB: Plan de Manejo Biótico, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.**

Por otro lado, entre los principales elementos químicos del agua destaca el sodio, potasio y boro. En tanto elementos químicos como aluminio, bario, cadmio, calcio, cobalto, cobre, cromo, estaño, hierro, mercurio, molibdeno, plata y selenio poseen concentraciones muy bajas. A continuación, en la **Tabla 5-4** se presentan los antecedentes de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua expresados en promedios para el sistema de Soncor.

**Tabla 5-4 Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema Aguas de Quelana.**

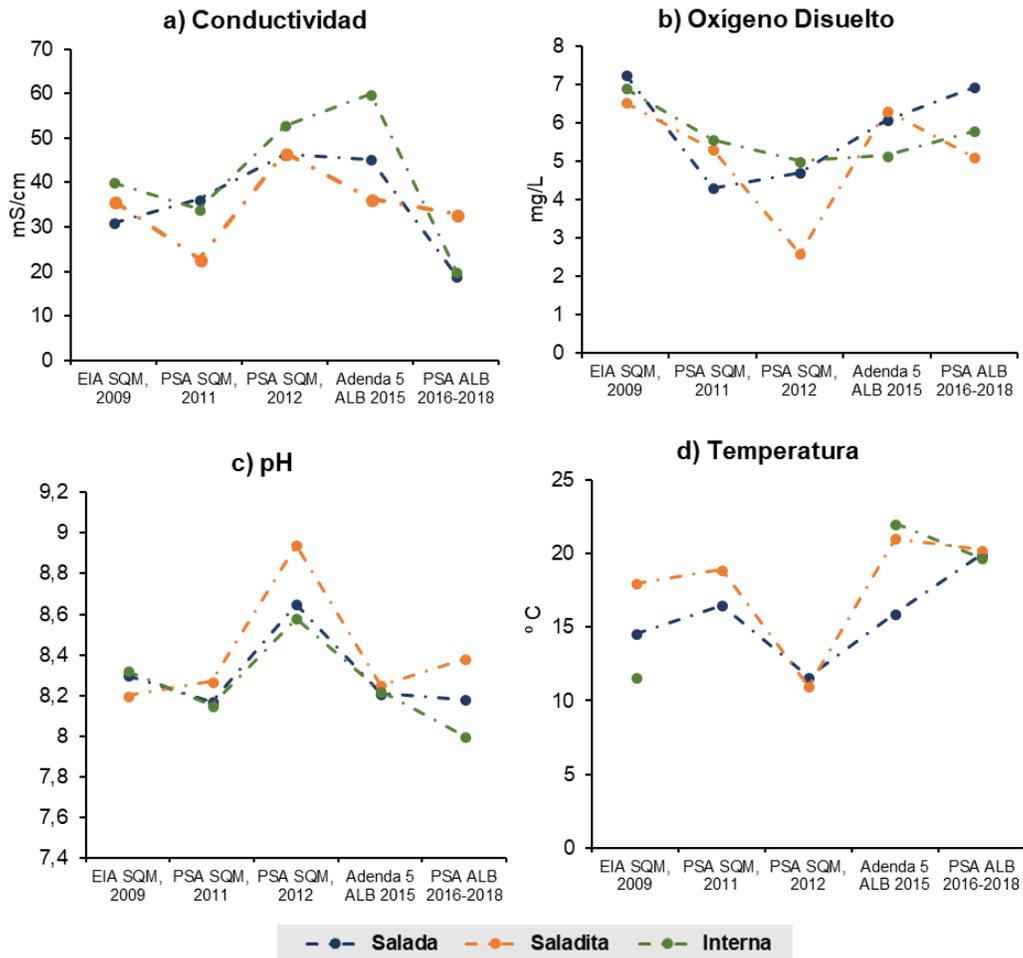
Parámetro	Sector unidad	Aguas de Quelana				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda 5 ALB 2008-2015	PSA ALB 2016-2018
Conductividad eléctrica (25°C)	mS/cm	22.584,28	49,3	68,72	148,1	173,9
Oxígeno disuelto	mg/L	8,59	5,18	4,55	5,6	3,6
pH	-	8,26	8,14	7,9	7,9	7,3
Salinidad	g/L	-	46,9	103,25	-	49,7
Saturación de oxígeno	%	22,64	25,74	24,85	-	35,2
Temperatura	°C	-	-	-	21,8	19,5
Amonio (N-NH4)	ug/L	-	-	-	<10-1.493,7	<10-902
Cloruro	mg/L	<0,01	-	-	132.252	103.005
Fósforo total	ug/L	<0,1	-	-	402	2.334
Nitrógeno de nitrato (N-NO3)	ug/L	1,14	-	-	570	3.840
Nitrógeno de nitrito (N-NO2)	ug/L	-	-	-	0,8	3
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	13.981	-	-	<0,20 - 2,30	3,3
Ortofosfato (P-PO4)	ug/L	-	-	-	<10 - 363	2.751
Sólidos totales suspendidos	mg/L	999	-	-	383,75	265,8
Sólidos totales disueltos	mg/L	39,71	-	-	200.732	114.618
Sulfato	mg/L	164,85	-	-	16.164	12.834
Coliformes Fecales	mg/L	-	-	-	-	82
Arsénico disuelto	mg/L	496,42	-	-	8,18	11
Calcio disuelto	mg/L	471,71	-	-	-	560,3
Potasio disuelto	mg/L	5.117	-	-	20.656	12.567
Magnesio disuelto	mg/L	656	-	-	7.192	10.470,50
Sodio disuelto	mg/L	-	-	-	102.042	42.167
Bicarbonato	mg/L	15,87	-	-	1.367,40	490,5
Carbonato	mg/L	8.591	-	-	982,6	488
Alcalinidad total	mgCaCO3/L	-	-	-	<5-68,5	102,9
Carbonato	mg/L	-	-	-	24,8	6,7
Color verdadero	mg/L	-	-	-	11,6	91
Sílice	mg/L	-	-	-	15,51	17,95
Turbidez	NTU	-	-	-	5,01	7,1
Clorofila "a"	ug/L	-	-	-	-	644
Coliformes Totales	NMP/100ml	-	-	-	-	13,1
DBO5	mg/L	-	-	-	0,24	0,1
Aluminio disuelto	mg/L	-	-	-	1,41	0,2
Bario disuelto	mg/L	-	-	-	458	567
Boro disuelto	mg/L	-	-	-	<0,001	<0,001
Cadmio disuelto	mg/L	-	-	-	0,0075	-
Cobalto disuelto	mg/L	-	-	-	0,005	-
Cobre disuelto	mg/L	-	-	-	0,03	<0,002
Cromo disuelto	mg/L	-	-	-	<0,05	<0,05
Estaño disuelto	mg/L	-	-	-	-	0,02

Parámetro	Sector unidad	Aguas de Quelana				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda 5 ALB 2008-2015	PSA ALB 2016-2018
<b>Hierro disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	1.678,60
<b>Litio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	0,12
<b>Manganeso disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	<0,001
<b>Mercurio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	0,1
<b>Níquel disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	<0,002
<b>Plomo disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	<0,005

Símbolo menos (-) indica que no se reportó el valor o bien se encontró bajo el rango de detección del equipo, EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.1.4.3 Sistema Peine

El sistema Peine formado por las lagunas Salada, Saladita e Interna presenta una baja variabilidad espacial, siendo más bien un sistema homogéneo. Los valores de conductividad varían en un rango de 20 a 69 mS/cm, siendo la Laguna Interna la que registra los máximos valores, por su parte el oxígeno disuelto varía de un mínimo de 2 mg/L registrados en el 2012 (PSA, SQM) a valores de 7 mg/L en el año 2009 (EIA, SQM). En cuanto al pH registra valores alcalinos, en general entre 8 y 9, mientras que la temperatura varía de un mínimo de 10°C a un máximo de 21°C (**Figura 5-10**).



**Figura 5-10 Valores promedio registrados para el sistema Peine. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.**

En general los elementos químicos disueltos en las lagunas Salada, Saladita e Interna con más concentración medidas en mg/L son el sodio, potasio, magnesio, litio, calcio, boro y arsénico. En tanto, aquellos con baja concentración disuelta en agua fueron el aluminio, bario, cadmio, cobalto, cobre, cromo, estaño, hierro, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio.

A continuación, en la **Tabla 5-5** se presentan los antecedentes de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua expresados en promedios para el sistema Peine.

**Tabla 5-5 Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema Peine: Lagunas Salada, Saladita e Interna.**

Parámetro	Sector Fuente	Salada					Saladita					Interna				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016- 2018
Conductividad eléctrica (25°C)	mS/cm	31.805	36,3	46,3	45,24	19.233	36.506	23	46,8	36,45	33.761	40.526	34,03	52,83	59,87	20.983
Oxígeno disuelto	mg/L	7,25	4,3	4,7	6,07	6,93	6,53	5,3	2,6	6,31	5,1	6,89	5,56	5	5,15	5,79
pH	-	8,3	8,17	8,65	8,21	8,18	8,2	8,27	8,94	8,25	8,38	8,32	8,15	8,58	8,22	8
Salinidad	g/L	24,21	23	29	31,96	72,05	28,03	22	19,3	27,2	60,3	31,3	23	31,66	49,4	76,88
Saturación de oxígeno	%	-	-	-	-	34,2	-	-	-	-	46,5	21,1	9,03	13,43	-	55,52
Temperatura	°C	14,56	16,5	11,6	15,92	19,95	18	18,9	11	21,04	20,26	11,58	-	-	22,05	19,71
Amonio (N-NH4)	ug/L	-	-	-	61,01	64,32	-	-	-	93,31	34,56	-	-	-	58,5	213,8
Cloruro	mg/L	12.308	-	-	16.492	16.673	14.257	-	-	13.798	21.372	15.923	-	-	20.379	32.099
Fósforo total	ug/L	-	-	-	1.442	138	-	-	-	295	128	-	-	-	493	728
Nitrógeno de nitrato (N-NO3)	ug/L	< 0,15	-	-	230	651,93	< 0,15	-	-	2.282	442,9	< 0,15	-	-	1.275	1.056
Nitrógeno de nitrito (N-NO2)	ug/L	< 0,5	-	-	<0,2	3,93	< 0,5	-	-	0,71	0,24	< 0,5	-	-	0,61	108,5
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	-	-	-	1,5	1,53	-	-	-	1,5	1,85	-	-	-	3,1	1,9
Ortofosfato (P-PO4)	ug/L	-	-	-	-	202,2	-	-	-	187	296	-	-	-	425	718
Sólidos totales suspendidos	mg/L	21.409	-	-	36,3	56,05	24.469	-	-	98,5	105,31	27.085	-	-	132	106,5
Sólidos totales disueltos	mg/L	-	-	-	32.321	36.789	-	-	-	28.414	52.885	-	-	-	50.337	68.072
Sulfato	mg/L	1.442	-	-	2.445	2.294	1.929	-	-	1.965	3.602	2.673	-	-	2.985	527

Parámetro	Sector Fuente	Salada					Saladita					Interna				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda ALB 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda ALB 2015	PSA ALB 2016- 2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda ALB 2015	PSA ALB 2016- 2018
<b>Coliformes Fecales</b>	mg/L	-	-	-	-	<1,8	-	-	-	-	<1,8	-	-	-	-	<1,8
<b>Arsénico disuelto</b>	mg/L	-	-	-	3,56	1,18	-	-	-	0,87	1,66	-	-	-	1.362	4,79
<b>Calcio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	144	1.001	-	-	-	-	1.480	-	-	-	165	1.892
<b>Potasio disuelto</b>	mg/L	147,6	-	-	1.786,331	286,70	150	-	-	1.563,252	221,75	161,14	-	-	4.306	2.721,57
<b>Magnesio disuelto</b>	mg/L	147	-	-	809	916	651	-	-	799	1.677	709	-	-	1829	2.086
<b>Sodio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	10.116	7.770	-	-	-	8.368	12.291	-	-	-	13.937	18405
<b>Bicarbonato</b>	mg/L	7.457	-	-	306,11	167,4	8.673	-	-	154,11	139,01	9.713	-	-	128,23	113,65
<b>Carbonato</b>	mg/L	-	-	-	399,74	251,4	-	-	-	218,28	230,51	-	-	-	252,21	236,45
<b>Alcalinidad total</b>	mgCaCO3/L	-	-	-	125,4	98,67	-	-	-	80,17	121,73	-	-	-	88,1	103,4
<b>Carbonato</b>	mg/L	-	-	-	18,52	5	-	-	-	14,2	5	-	-	-	16,51	5
<b>Color verdadero</b>	mg/L	-	-	-	24,7	100	-	-	-	22,11	123	-	-	-	23,9	-
<b>Sílice</b>	mg/L	-	-	-	4,11	18,99	-	-	-	15,41	22,85	-	-	-	9,9	10,6
<b>Turbidez</b>	NTU	-	-	-	10,63	2,15	-	-	-	3,64	1,575	-	-	-	-	1,4
<b>Clorofila "a"</b>	ug/L	-	-	-	-	<1,8	-	-	-	-	<1,8	-	-	-	-	<1,8
<b>Coliformes Totales</b>	NMP/100ml	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5,25	-	-	-	-	4,71
<b>DBO5</b>	mg/L	-	-	-	<0,073	0,03	-	-	-	<0,073	0,04	-	-	-	<0,073	0,06
<b>Aluminio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	1,09	0,17	-	-	-	1,11	0,1	-	-	-	1,33	0,12
<b>Bario disuelto</b>	mg/L	-	-	-	82,97	63,3	-	-	-	46,96	110,25	-	-	-	74,61	132,35
<b>Boro disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,001	<0,001	-	-	-	<0,001	<0,001	-	-	-	<0,001	<0,001
<b>Cadmio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,01	<0,002	-	-	-	0,008	<0,002	-	-	-	0,006	<0,002
<b>Cobalto disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,003	0,01	-	-	-	0,05	0,01	-	-	-	<0,001	<0,05

Parámetro	Sector Fuente	Salada					Saladita					Interna				
		EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda ALB 2015	PSA ALB 2016-2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda ALB 2015	PSA ALB 2016-2018	EIA SQM, 2009	PSA SQM, 2011	PSA SQM, 2012	Adenda ALB 2015	PSA ALB 2016-2018
<b>Cobre disuelto</b>	mg/L	-	-	-	-	<0,002	-	-	-	-	<0,002	-	-	-	-	<0,0002
<b>Cromo disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,005	<0,05	-	-	-	<0,005	<0,05	-	-	-	<0,005	<0,05
<b>Estaño disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,009	0,018	-	-	-	<0,001	0,065	-	-	-	0,01	296,79
<b>Hierro disuelto</b>	mg/L	-	-	-	131,03	128,1	-	-	-	0,02	238	-	-	-	111,6	0,12
<b>Litio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,01	343,02	-	-	-	0,004	<0,001	-	-	-	0,006	0,02
<b>Manganeso disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,0003	<0,001	-	-	-	<0,0003	<0,001	-	-	-	<0,0003	<0,001
<b>Mercurio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,008	0,07	-	-	-	0,05	0,09	-	-	-	0,08	0,353
<b>Molibdeno disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,003	0,068	-	-	-	<0,003	0,007	-	-	-	<0,003	0,01
<b>Níquel disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,005	<0,003	-	-	-	0,007	<0,002	-	-	-	0,01	<0,002
<b>Plata disuelta</b>	mg/L	-	-	-	<0,008	0,018	-	-	-	0,008	0,04	-	-	-	<0,008	0,04
<b>Plomo disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,005	<0,005	-	-	-	<0,001	<0,005	-	-	-	<0,005	<0,005
<b>Selenio disuelto</b>	mg/L	-	-	-	0,005	805,3	-	-	-	0,007	0,019	-	-	-	0,01	0,014

Símbolo menos (-) indica que no se reportó el valor o bien se encontró bajo el rango de detección del equipo, EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, PMB: Plan de Manejo Biótico, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.4 Sistema La Punta y La Brava

El sistema La Punta y La Brava a diferencia de Peine es más heterogéneo, observándose diferencias entre las lagunas, especialmente con el sector de Tilopozo, este último presenta menores niveles de conductividad y pH, con salinidades muy bajas a diferencia de las lagunas La Brava y La Punta que en relación con el pH son aguas más bien alcalinas, con mayores niveles de conductividad, sobre todo en la Laguna La Brava que registra el valor máximo histórico con 107 mS/cm (Fariás *et al.*, 2014). Por otro lado, en cuanto a la temperatura el sector de Tilopozo registra en el último periodo 2016-2018 un promedio de 25°C (PSA, Albemarle), mientras que La Brava presenta un rango de 24°C a 18°C, por su parte, la laguna La Punta varía entre 20°C a 16°C (Figura 5-11).

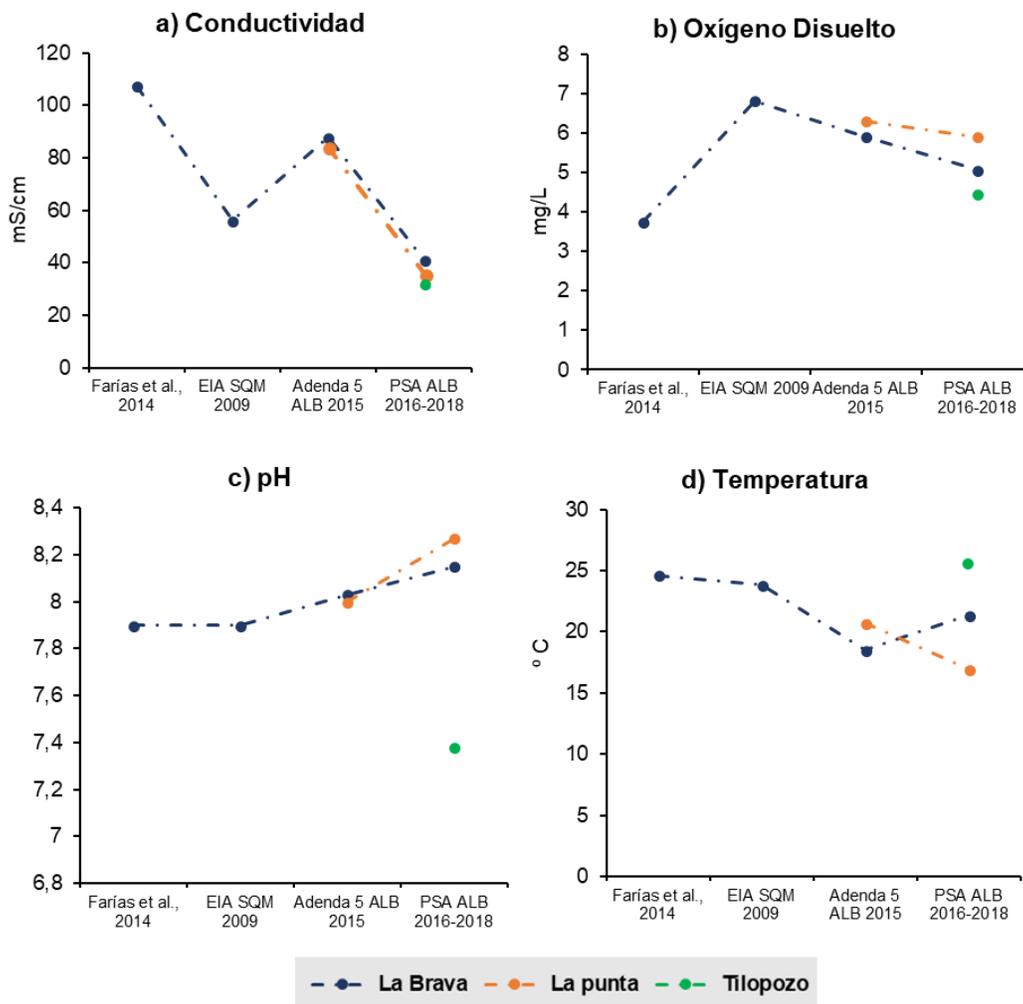


Figura 5-11 Valores promedios registrados para el sistema La Punta y La Brava. EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la alcalinidad se observa que en general, el sector La Brava presenta mayores valores que La Punta y Tilopozo, los compuestos nitrogenados presentan el mismo patrón, al igual que los sólidos totales disueltos y suspendidos mientras que el fósforo por el contrario es mayor en laguna La Punta. Por su parte, las vegas de Tilopozo destacan por registrar altos valores de clorofila a, ya que, a diferencia de las otras dos lagunas, este sector presenta aguas más bien dulces con alta presencia de vegetación acuática y de ribera.

En general los elementos químicos disueltos con más concentración medidas en mg/L son el sodio, potasio, magnesio, litio, calcio, boro y arsénico. En tanto, aquellos con baja concentración disuelta en agua fueron el aluminio, bario, cadmio, cobalto, cobre, cromo, estaño, hierro, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio.

A continuación, en la **Tabla 5-6** se presentan los antecedentes de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua expresados en promedios para el sistema La Punta y La Brava.

**Tabla 5-6 Valores promedios de parámetros fisicoquímicos históricos del Sistema la Punta La Brava: Laguna La Brava, La Punta y Tilopozo.**

Parámetro	Sector Fuente	La Brava				La Punta		Tilopozo
		EIA SQM, 2009	Farías et al., 2014	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016-2018	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016-2018	PSA ALB 2016-2018
Conductividad eléctrica (25°C)	mS/cm	56.109,75	107,3	87,73	41.882	84,3	36.340	3.261
Oxígeno disuelto	mg/L	6,82	3,75	5,9	5,07	6,3	5,9	4,46
pH	-	7,9	7,9	8,03	8,15	8	8,27	7,38
Salinidad	g/L	43,97	70,8	64,4	75,85	24,02	53,45	20,73
Saturación de oxígeno	%	-	70,8	-	>50,41	21,85	47,18	2,11
Temperatura	°C	23,85	24,6	18,52	21,36	20,71	16,93	25,51
Amonio (N-NH4)	ug/L	-	0,24	339,63	207,06	158,5	35,45	14
Cloruro	mg/L	22382,25	43,06	48.497	44.428	36.138	25.282	914
Fósforo total	ug/L	-	1,7	2.460	1.538	3.332	596	61
Nitrógeno de nitrato (N-NO3)	ug/L	< 0,15	2,6	8.313	328,69	196	229,33	400,08
Nitrógeno de nitrito (N-NO2)	ug/L	< 0,5	0,0002	1,3	0,55	<0,2	0,32	0,39
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	-	0,92	2,93	4,21	2,2	2,23	1,45
Ortofosfato (P-PO4)	ug/L	-	2,49	1.835	1.647	2.755	346,28	66,84
Sólidos totales suspendidos	mg/L	37.229	-	458,85	80,3	134,8	54,7	7,5
Sólidos totales disueltos	mg/L	-	-	140.310	89.300	95.383	54.492	3.017
Sulfato	mg/L	6.854	565	4.849	6.808	6.535	4.731	412
Coliformes Fecales	mg/L	-	-	-	<1,8	-	<1,8	285

Parámetro	Sector Fuente	EIA SQM, 2009	La Brava			La Punta		Tilopozo
			Fariás et al., 2014	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016-2018	Adenda 5 ALB 2015	PSA ALB 2016-2018	PSA ALB 2016-2018
<b>Arsénico disuelto</b>	mg/L	-	2,875	6,19	11,76	9,24	9,5	0,63
<b>Calcio disuelto</b>	mg/L	-	2.3	158,71	1.841	160	895	209,75
<b>Potasio disuelto</b>	mg/L	160	812	12.294	4.564,87	5.886	2.656,16	100,75
<b>Magnesio disuelto</b>	mg/L	934	2,57 - 2,70	3576	6.893	1830	1.501	67
<b>Sodio disuelto</b>	mg/L	-	6.072	32.646	28.289	24.033	14.367	531
<b>Bicarbonato</b>	mg/L	-	17.810	507,1	286,8	260,51	298	377,9
<b>Carbonato</b>	mg/L	-	-	560,31	496,58	656,3	419,35	368,25
<b>Alcalinidad total</b>	mgCaCO3/L	-	-	103,1	248,65	220,5	219,25	12
<b>Carbonato</b>	mg/L	-	-	15,4	7,1	22	5	-
<b>Color verdadero</b>	mg/L	-	-	17,52	141	25	74	130
<b>Sílice</b>	mg/L	-	-	26,66	2,68	11,7	4,55	2,21
<b>Turbidez</b>	NTU	-	-	1,05	0,6	0,51	1,3	3,57
<b>Clorofila "a"</b>	ug/L	-	-	-	<1,8	-	<1,8	2.400
<b>Coliformes Totales</b>	NMP/100ml	-	-	-	8,62	-	6,66	5,5
<b>DBO5</b>	mg/L	-	-	<0,073	0,05	0,083	0,04	0,08
<b>Aluminio disuelto</b>	mg/L	-	-	1,61	0,11	0,93	0,15	0,03
<b>Bario disuelto</b>	mg/L	-	-	391,92	285,12	2,59	157,83	13,5
<b>Boro disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Cadmio disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,008	<0,001	<0,005	<0,005	<0,002
<b>Cobalto disuelto</b>	mg/L	-	-	0,01	0,01	<0,006	0,004	0,003
<b>Cobre disuelto</b>	mg/L	-	-	-	<0,002	-	<0,002	<0,002
<b>Cromo disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,005	<0,05	<0,001	<0,05	<0,05
<b>Estaño disuelto</b>	mg/L	-	-	0,02	448,25	0,01	0,017	0,018
<b>Hierro disuelto</b>	mg/L	-	-	396,78	0,01	353,12	261	8,75
<b>Litio disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,005	<0,004	0,005	0,03	0,005
<b>Manganeso disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,0003	<0,001	<0,0003	<0,001	<0,001
<b>Mercurio disuelto</b>	mg/L	-	-	0,19	0,18	0,1	0,26	0,03
<b>Molibdeno disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,003	0,021	<0,003	<0,003	<0,003
<b>Níquel disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,006	<0,002	<0,007	<0,002	<0,002
<b>Plata disuelta</b>	mg/L	-	-	<0,008	0,04	<0,008	0,05	0,02
<b>Plomo disuelto</b>	mg/L	-	-	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
<b>Selenio disuelto</b>	mg/L	-	-	0,006	0,015	0,007	0,017	0,009

Símbolo menos (-) indica que no se reportó el valor o bien se encontró bajo el rango de detección del equipo, EIA: Estudio de Impacto Ambiental, PSA: Plan de Seguimiento Ambiental, PMB: Plan de Manejo Biótico, SQM: Sociedad Química Minera, ALB: Albemarle Limitada. Fuente: Elaboración propia.

## 5.1.5 Características Bióticas

### 5.1.5.1 Biota acuática

El Salar de Atacama presenta una alta heterogeneidad espacial debido a los gradientes de salinidad, lo cual crea patrones de distribución en la biota acuática lo que, asociado a puntos de afloramientos de agua, permite que haya organismos menos tolerantes a las concentraciones iónicas y en otras zonas con agua altamente salina se observan especies acuáticas adaptadas a esta condición (CEA, 2006).

En cuanto a las microalgas del plancton y bentos el sistema La Punta y La Brava registra una mayor productividad de fitobentos que los otros sistemas lagunares. Los componentes de zooplancton y zoobentos, en general son escasos, con bajos valores de riqueza y abundancia total, sin embargo, históricamente se han registrado insectos, gastrópodos y malacostracos, copépodos, rotíferos y branchiopodos, al igual que las microalgas se registraron las mayores diversidades y densidad de organismos los sistemas de La Punta y La Brava juntamente con el sistema Peine y La Punta- La Brava. En los sistemas hipersalinos estudiados se observa el desarrollo de sólo ciertas taxa que son capaces de soportar estos ambientes extremos, por ejemplo, la especie *Artemia franciscana* que se mantiene en el tiempo (Adenda 5, Albemarle Ltda., 2015).

Por otro lado, en algunos de estos sistemas salinos dentro del Salar de Atacama, han sido registrados gasterópodos branquiados del género *Heleobia* (Cazzaniga *et al.*, 2011), que se caracteriza por presentar individuos de pequeño tamaño que habitan en sistemas hidrológicos de agua dulce y salina. Específicamente en el sector de Tilopozo, se registra la presencia de *Heleobia atacamensis*, categorizada en Peligro Crítico según Decreto Supremo 52/2014 MMA en Chile.

### 5.1.5.2 Fauna

El salar de Atacama por su extrema aridez hace que su fauna se encuentre “adaptada” a las restricciones que imponen la condición del desierto y/o la escasez de agua. Esta región se caracteriza además por ser una de las de mayor extensión del país, representando un 16,6% de la superficie del territorio nacional y que cuenta un menor conocimiento respecto a su biodiversidad (Squeo *et al.*, 1998).

Dentro de estos, las especies de anfibios que potencialmente podrían estar presentes en la zona andina de la región de Antofagasta, cercanas al área de estudio, son dos especies clasificadas En Peligro Crítico (*T. dankoi* y *T. vilamensis*), una En Peligro (*T. philippii*) y una especie en Preocupación Menor (*R. spinulosa*). En cuanto a los reptiles, destaca la lagartija de Fabián (*Liolaemus fabiani*) la que generalmente se observa en áreas cercanas a cuerpos de agua en el interior del salar, lo que implicaría una dependencia de estos ambientes (Mella, 2017). Su estado de conservación se encuentra En Peligro por el RCE (D.S 52/2014)

Por su parte, dentro de las aves que se registran en el salar destacan los flamencos y parinas (*Phoenicopterus sp.*, *Phoenicoparrus sp.*), taguas (*Fulica sp.*), patos (*Anas.sp.*), gaviota andina (*Chroicocephalus serranus*), caití (*Recurvirostra andina*), piuquén (*Chloephaga melanoptera*), playero de Baird (*Calidris bairdii*), pollito de mar (*Phalaropus tricolor*) y chorlo de la puna (*Charadrius alticola*) entre otros (Martínez & González, 2017). La parina grande (*Phoenicoparrus andinus*) y la parina chica (*Phoenicoparrus jamesi*), son habitantes exclusivos de salares y lagunas salinas del prealtiplano y altiplano del Norte de Chile, Perú, Bolivia y Argentina.

Respecto a los macromamíferos se han reportado cuatro especies (zorro culpeo, zorro chilla, guanaco y burro), el zorro culpeo (*Lycalopex culpaeus*) es la especie que posee la mayor frecuencia de avistamiento en el área, siendo de estos cuatro, tres especies nativas y una introducida (el burro) (Albemarle Ltda., 2015). Para el caso de los micromamíferos, y según las distribuciones entregadas por Iriarte (2008), en toda el área de estudio es posible hallar ocho especies, de estas, cinco serían las con mayor probabilidad de encontrar: ratoncito andino (*Abrothrix andinus*), lauchita de pie sedoso (*Eligmodontia puerulus*), ratón orejudo amarillento (*Phyllotis xanthopygus*), yaca nortina (*Thylamys pallidior*) y tuco de Atacama (*Ctenomys fulvus*).

#### 5.1.5.3 Flora y vegetación

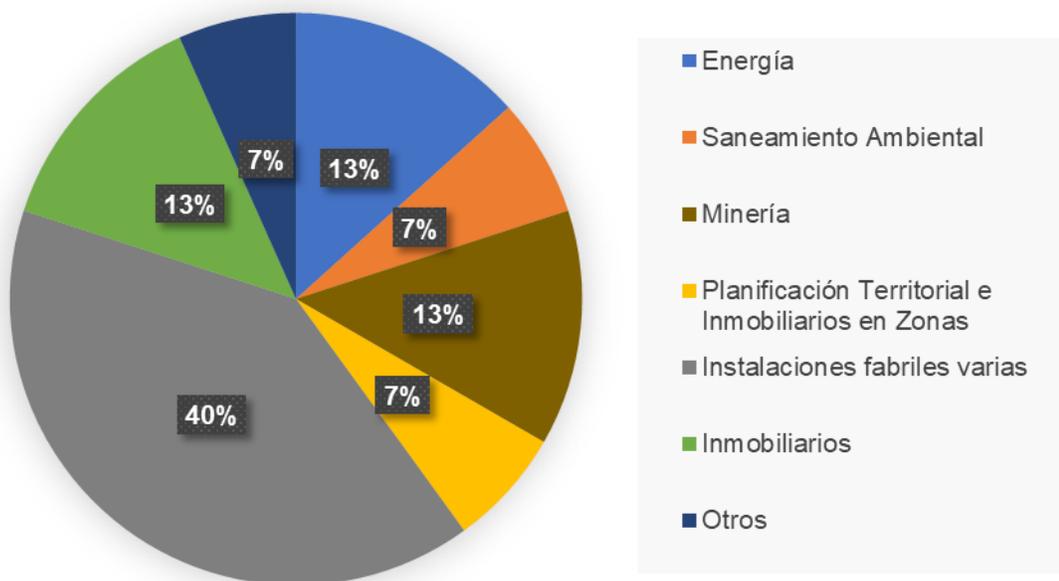
Reportes de Albemarle Ltda. (Adenda 5, 2015) ha registrado en el interior del salar grandes extensiones de superficie carentes de vegetación, las cuales se extienden hasta su borde. Mientras que en el borde Sur-Este del Salar es posible encontrar formaciones vegetacionales que se ensamblan con comunidades típicas de la zona y se relacionan a hábitos salinos, destacando principalmente los matorrales de *Tessaria absinthioides*. A este matorral se suman la especie *Baccharis juncea*; y herbazales de *Distichlis spicata*. El tipo biológico con mayor representatividad es el Matorral seguido del Herbazal. Se ha observado la vinculación de las formaciones vegetacionales al agua superficial y la cercanía de la napa freática, lo cual permite un mejor desarrollo de las especies (vegetación azonal), y por lo tanto un notable aumento de la cobertura, como por ejemplo el área de las vegas de Tilopozo.

Históricamente dentro del área se registraron 11 especies de origen Endémico, por otro lado, no se han registrado para el área de estudio especies en categoría de conservación según la normativa vigente, como tampoco se han reportado la presencia de líquenes, hongos y briófitas en los diferentes sistemas (Albemarle Ltda., 2015).

## 5.2 Estado de conocimiento de los Ecosistemas Microbianos Extremófilos

### 5.2.1 Información y antecedentes de proyectos en el SEIA

La recopilación de información del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) desde los últimos 10 años, identificó para la cuenca del Salar de Atacama, la existencia de 16 proyectos aprobados en diversos sectores. De estos, 14 corresponden a una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) y 2 a Estudios de Impacto Ambiental (EIA), en la **Figura 5-12** se presentan la proporción de los sectores productivos en la cuenca del Salar de Atacama, siendo los proyectos de instalaciones fabriles e inmobiliarios los que representan el 40%, mientras que minería equivale al 13%, sin embargo el rubro de instalaciones fabriles varias corresponden mayoritariamente a modificación y mejoramiento de instalaciones de producción de energía y minera.



**Figura 5-12** Proyectos aprobados en el SEIA y sectores productivos en la cuenca del Salar de Atacama en los últimos 10 años. Fuente: *Elaboración propia en base a datos del SEIA, 2018.*

Dentro de los proyectos aprobados en el SEIA desde el año 2009 a la fecha, no se presenta una caracterización de los microorganismos extremófilos en ninguno de sus estudios, ya sea DIA o EIA, ni tampoco el reconocimiento de éstos como ecosistemas microbianos extremófilos (EME). Sin embargo, cabe señalar que solo el 6% de los proyectos aprobados en la cuenca del Salar de Atacama se aprobó posterior al descubrimiento de estos ecosistemas en el área de estudio durante el año 2013 y que fueron datos publicados por Farías *et al.*, en el año 2014.

En la

**Tabla 5-7** se presenta en detalle los nombres de los proyectos aprobados en la cuenca del Salar de Atacama y su fecha de calificación, además se incluye si presentan una

Línea de base (LB), Plan Medidas de Mitigación (PMM), Plan de Seguimiento Variables Ambientales (PVA) o sólo Antecedentes Generales (AG), principalmente en el caso de las Declaraciones de Impacto Ambiental.

**Tabla 5-7 Proyectos SEIA aprobados en la cuenca del Salar de Atacama en los últimos 10 años.**

Nombre del Proyecto	Fecha calificación	Tipo	Titular	Sector Productivo	Planes y Estudios
Ramal de distribución para abastecimiento de gas natural al observatorio ALMA	3-oct-2017	EIA	European Southern Observatory, ESO	Energía	LB, PMM, PVA,
EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	25-ene-2016	EIA	Rockwood Lithium	Minería	LB, PMM, PVA
Normalización y Ampliación Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	7-ene-2015	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Saneamiento Ambiental	AG
Secador Planta Potasa Rockwood Litio Limitada	30-dic-2013	DIA	ALBEMARLE LIMITADA	Minería	AG
Reposición del museo arqueológico r.p. Gustavo le Paige, comuna de San Pedro de Atacama	6-sep-2013	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Otros	AG
Ampliación Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio	2-jul-2013	DIA	SQM Salar S.A.	Instalaciones fabriles varias	AG
Villa Carolina	27-feb-2012	DIA	Jorge Tellería Sepúlveda	Inmobiliarios	AG
Planta Generadora Multicombustible – Proyecto ALMA	18-oct-2011	DIA	European Southern Observatory, ESO	Energía	AG
Ampliación hotel Iorana Tolache	26-ene-2011	DIA	Turismo Sam Petero Ltda.	Inmobiliarios	AG
Aumento de Capacidad de Procesamiento de Carnalita de Potasio	14-ene-2011	DIA	SQM Salar S.A.	Energía	AG
Ampliación Planta SOP	16-dic-2010	DIA	SQM Salar S.A.	Instalaciones fabriles varias	AG
Actualización Plan Regulador San Pedro de Atacama	28-sep-2010	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Planificación Territorial e Inmobiliarios en Zonas	AG
Nueva Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio	27-sep-2010	DIA	SQM Salar S.A.	Instalaciones fabriles varias	AG

Nombre del Proyecto	Fecha calificación	Tipo	Titular	Sector Productivo	Planes y Estudios
<b>Aumento de Capacidad de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio</b>	7-sep-2009	DIA	SQM Salar S.A.	Instalaciones fabriles varias	AG
<b>Modificación Planta SOP</b>	12-ago-2009	DIA	SQM Salar S.A.	Instalaciones fabriles varias	AG
<b>Ampliación Producción Cloruro de Potasio Salar</b>	23-jul-2009	DIA	SQM Salar S.A.	Instalaciones fabriles varias	AG

Fuente: Elaboración propia con datos del SEIA.

En relación con lo señalado anteriormente, y considerando el reciente descubrimiento de los EME en el salar de Atacama, el titular Albemarle Limitada dentro de su Plan de Manejo Biótico, comprometido en el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”, aprobado mediante RCA N° 21 de fecha 20 de enero del 2016 considera el monitoreo de las comunidades microbianas extremófilas específicamente de los tapetes microbianos, en los sistemas lagunares: Sector Peine conformada por Laguna Salada, Laguna Saladita y Laguna Interna; y Sector La Punta-La Brava conformado por las Laguna La Brava, Laguna La Punta y zona Tilopozo realizando una campaña en invierno y otra en verano, resultados que se presentan en el Plan de Manejo Biótico Adenda 5 Anexo 2 Albemarle Ltda., 2015). Por otro lado, el titular también presenta el Compromiso Voluntario de profundizar el conocimiento científico en relación con los ecosistemas extremófilos (Adenda 5 Anexo 2 Albemarle Ltda., 2015), estudio que actualmente se está llevando a cabo.

Por otro lado, en la plataforma SEIA se presenta actualmente en proceso de evaluación ambiental del EIA el “Proyecto Monturaqui” de Minera Escondida Limitada, el cual en respuesta al ICSARA 0315/2017, levantó información de base de los ecosistemas microbianos presentes en las Lagunas La Punta y La Brava, encontrándose disponible la información en la Adenda 2018 numeral 31 páginas 162 a 173.

En dicho documento se describe para la laguna La Brava: tapetes microbianos, evaporitas habitadas por extremófilos (endoevaporitas), microbialitos, oncolitos, y tapetes carbonáticos litificados que nuclean sobre plantas (fitomicrobialitos), en su margen éste se observa una gran reserva de oncolitos en distintos grados de crecimiento con ecosistemas microbianos de endoevaporitas, por su parte en la laguna La Punta se observan tapetes microbianos y zonas con parches negros húmedos habitados por oncolitos con distintos grados de desarrollo. En la **Figura 5-13** se indica la distribución espacial de los diferentes ecosistemas microbianos encontrados en las lagunas La Brava y La Punta.

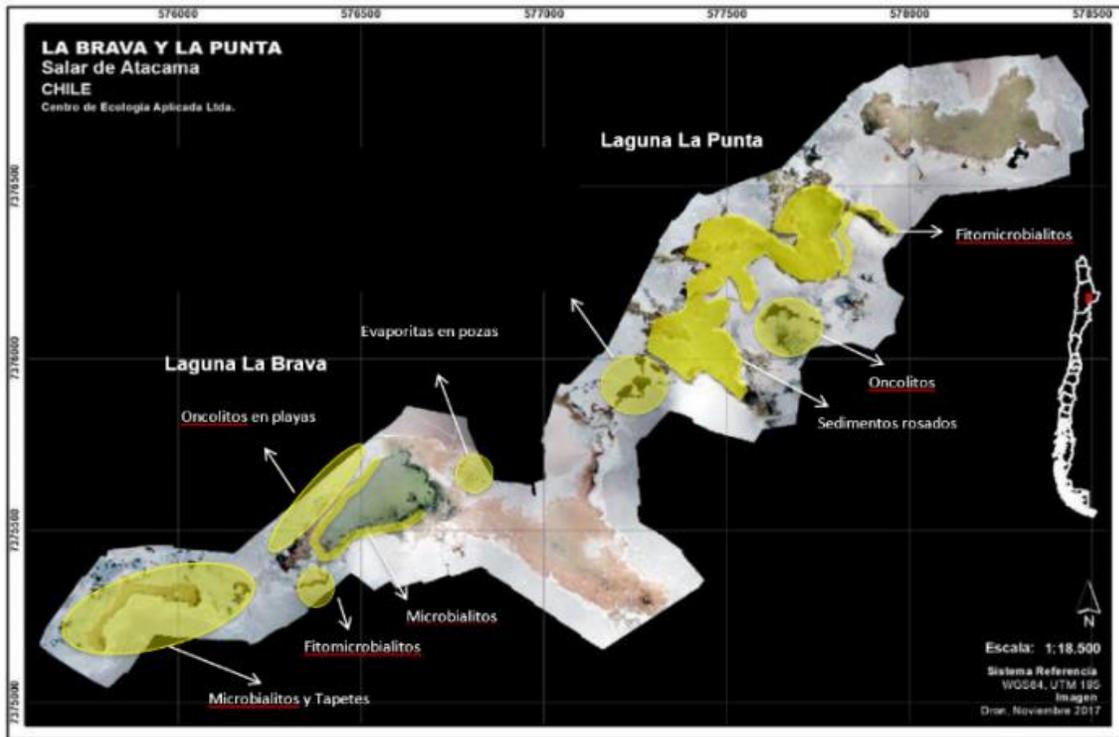


Figura 5-13 Distribución espacial de los ecosistemas microbianos en las Lagunas La Brava y la Punta. Fuente: Adenda MEL, 2018 (corresponde a Figura 3.54)

## 5.2.2 Investigaciones científicas

El estudio de extremófilos ha despertado interés en diversas disciplinas de la ciencia, tales como diversidad microbiana, biogeoquímica, biología molecular, cambio climático, e incluso estudios buscando suelos semejantes al planeta Marte. En el proceso de búsqueda y recopilación de la información de microorganismos extremófilos, se identificaron 145 artículos científicos publicados en el área de la microbiología, los cuales se pueden encontrar analizados en las publicaciones de Albarracín *et al.*, 2015; 2016 y Bull *et al.*, 2013; 2016 y fueron presentadas en la Línea de Base elaborada por el Ministerio del Medio Ambiente en el año 2017 (Tabla 5-8).

Según lo anterior, los microorganismos extremófilos aún son poco conocidos, una parte importante de los artículos científicos están centrados en detectar la diversidad biológica de estos microorganismos, en conjunto con los estudios de parentesco filogenético, alcanzando el 35% de todas las publicaciones indicadas en la Tabla 5-8. Mientras, que sus características metabólicas han sido abordadas desde el punto de vista molecular y biogeoquímica. Por su parte, un 15% está relacionado más directamente con el funcionamiento ecosistémico de los EME, mientras que el conocimiento orientado al estudio de grupos específicos de microorganismos como Cianobacterias, Actinobacterias y Arqueas corresponden aproximadamente al 15% de los estudios.

**Tabla 5-8 Número y porcentaje de artículos científicos por área de conocimiento en microbiología de extremófilos a nivel internacional.**

Temas	Nº de Artículos Científicos	% de Artículos Científicos
Diversidad Microbiológica	41	28,3
Biología Molecular	15	10,3
Análisis Filogenético	10	6,9
Biogeoquímica	9	6,2
Cianobacterias	8	5,5
Actinobacteria	8	5,5
Desarrollo de métodos y aplicaciones	6	4,1
Colonización Endolítica/Hypolítica de Evaporitas	6	4,1
Arqueas	5	3,4
Piro-secuenciación	5	3,4
Estudios de suelos buscando suelos análogos a Marte	5	3,4
Hongos/Líquenes	4	2,8
Medición de biomasa y test de variabilidad	4	2,8
Ecología microbiana en salares y humedales	4	2,8
Sistemática	4	2,8
Microalgas	3	2,1
Mixomicetos	3	2,1
Espectrometría de masa	3	2,1
Aplicación Molecular	2	1,4
<b>TOTAL</b>	<b>145</b>	<b>100</b>

Fuente: MMA, 2017.

Dentro de los trabajos presentados en la tabla anterior, más los publicados posterior a su elaboración del documento del MMA (2017) se registraron 42 investigaciones científicas sobre microorganismos extremófilos en áreas de estudio similares a las del Salar de Atacama, es decir, lagunas hipersalinas expuestas a condiciones extremas debido a la altura geográfica o bien por corresponder a zonas desérticas, los que se presentan en la Tabla 5-9. Por su parte, dentro de estas investigaciones 8 (celda destacada) caracterizan específicamente microorganismos extremófilos en el Salar de Atacama, principalmente en las lagunas Tebenquiche y La Brava.

**Tabla 5-9 Artículos científicos en microbiología de extremófilos en Lagunas hipersalinas.**

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Título</b>	<b>Localización</b>
<b>Belfiore C et al</b>	2018	Characterization and Comparison of Microbial Soil Diversity in Two Andean Peatlands in Different States of Conservation-Vega Tocorpuri	Vegas de Tocorpuri
<b>Farías M et al</b>	2017	Prokaryotic diversity and biogeochemical characteristics of benthic microbial ecosystems at La Brava	Laguna La Brava
<b>Rasuk M et al.</b>	2017	Characterization and antagonistic activities of UV-resistant actinobacteria isolated from High-Altitude Andean Lakes	Lagunas Andinas
<b>Aguayo et al.</b>	2017	Comparison of Prokaryotic Diversity in Cold, Oligotrophic Remote Lakes of Chilean Patagonia	Lagos región de Aysén
<b>Han R</b>	2017	Microbial community structure and diversity within hypersaline Keke Salt Lake environments	Lago hipersalino, China
<b>Albarracín V et al.</b>	2016	Forged Under the Sun: Life and Art of Extremophile from Andean Lakes.	Lagunas Andinas de gran altitud en Argentina
<b>Bull et al.</b>	2016	<i>Modestobacter caceresii</i> sp. nov., novel actinobacteria with an insight into their adaptive mechanisms for survival in extreme hyper-arid Atacama Desert soils.	Laguna Tebenquiche
<b>Fernandez A et al.</b>	2016	Microbial diversity in sediment ecosystems (evaporites domes, microbial mats and crusts) of hypersaline Laguna Tebenquiche, Salar de Atacama, Chile	Laguna Tebenquiche
<b>Rasuk M et al.</b>	2016	Bacterial diversity in microbial mats and sediments from Atacama Desert	Desierto de Atacama
<b>Albarracín V et al.</b>	2015	High-Up: A remote reservoir of microbial Extremophiles in Central Andean Wetlands.	Lagunas Andinas de gran altitud en Argentina
<b>Scott et al.</b>	2015	Microbial diversity and trophic components of two high altitude wetlands of the Chilean Altiplano.	Cuenca del Salar de Atacama
<b>Rizzo V et al.</b>	2015	Structures/textures of living/fossil microbialites and their implications in biogenicity. An astrobiological point of view.	Desierto de Atacama
<b>Farías ME et al.</b>	2014	Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile.	Lagunas Tebenquiche y La Brava
<b>Rasuk M et al.</b>	2014	Microbial Characterization of microbial ecosystems associated to evaporites domes of Gypsum in Salar de Llamara in Atacama Desert.	Salar de Llamara
<b>Dorador C et al.</b>	2013	Identification and characterization of a psychrotolerant Acidithiobacillus strain from Chilean Altiplano.	Altiplano de Chile
<b>Farías ME et al.</b>	2013	The Discovery of Stromatolites Developing at 3570 m above Sea Level in a High-Altitude Volcanic Lake Socompa, Argentinean Andes.	Lago Socompa
<b>Farías M y Contreras M</b>	2013	Ecosistemas Microbianos. ¿Nuevo patrimonio de la Humanidad?	Salar de Atacama
<b>Schneider D</b>	2013	Phylogenetic analysis of a microbialite-forming microbial mat from a hypersaline lake of the Kiritimati atoll, Central	Lago Hipersalino, isla

Autor	Año	Título	Localización
		Pacific.	océano pacífico
Demergasso C et al.	2012	Effects of organic extractant LIX 84IC, pH and temperature changes on bioleaching microorganisms during SX treatment.	Laguna Tebenquiche
Lara J et al.	2012	Enrichment of arsenic transforming and resistant heterotrophic bacteria from sediments of two salt lakes in Northern Chile.	Desierto de Atacama
Lynch RC et al.	2012	The potential for microbial life in the highest-elevation (> 6000 m.a.s.l.) mineral soils of the Atacama region.	Laguna Tebenquiche
Parro et al.	2011	A microbial Oasis in the hypersaline Atacama Subsurface Discovered by a life Detector Chip: Implications for the Search for Life on Mars.	Laguna Lejía
Fariás M et al.	2011	Modern stromatolite ecosystems at alkaline and hypersaline high-altitude lakes at the argentinean puna En Stromatolites Joseph Seckbach and Vinod Tewari	Lagunas Andinas de gran altitud en Argentina
Albarracín V et al.	2010	A harsh life to indigenous proteobacteria at the Andean Mountains: Microbial diversity and resistance mechanisms towards extreme conditions.	Desierto de Atacama
Demergasso C et al.	2010	Prokaryotic diversity patterns in high-altitude ecosystems of the Chilean Altiplano.	Desierto de Atacama
Dorador C et al.	2010	Unique clusters of Archaea in Salar de Huasco, an athalassohaline evaporitic basin of the Chilean Altiplano.	Salar de Huasco
Salas J et al.	2010	Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile).	Salar de Atacama
Stivaletta N et al.	2010	Biomarkers of Endolithic Communities within Gypsum Crusts (Southern Tunisia).	Desierto de Atacama
Demergasso C et al.	2010	Prokaryotic diversity patterns in high-altitude ecosystems of the Chilean Altiplano	Altiplano de Chile
Thiel et al	2010	Unique communities of anoxygenic phototrophic bacteria in saline lakes of Salar de Atacama (Chile): evidence for a new phylogenetic lineage of phototrophic Gammaproteobacteria from pufLM gene analyses	Salar de Atacama
Dorador C et al.	2009	Diversity of Bacteroidetes in high-altitude saline evaporitic basins in northern Chile	Salar de Atacama
Demergasso C et al.	2008	Novelty and spatio-temporal heterogeneity in the bacterial diversity of hypersaline Lake Tebenquiche (Salar de Atacama)	Laguna Socompa
Dorador C et al.	2008	Molecular analysis of enrichment cultures of ammonia oxidizers from the Salar de Huasco, a high altitude saline wetland in northern Chile.	Laguna Tebenquiche y La Brava
Jiang H et al	2007	Microbial response to salinity change in Lake Chaka, a hypersaline lake on Tibetan plateau.	Lago hipersalino Chaka, Tibet
Prado B et al.	2006	Chromohalobacter nigrandesensis sp. nov., a moderately halophilic, Gram-negative bacterium isolated from Lake Tebenquiche on the Atacama Saltern, Chile	Salar de Ascotán
Demergasso C et al.	2006	Distribution of prokaryotic genetic diversity in athalassohaline lakes of the Atacama Desert, Northern Chile	Desierto de Atacama
Dong H et al.	2006	Microbial diversity in sediments of saline Qinghai Lake, China: linking geochemical controls to microbial ecology.	Lago Magaddi, Kenia.

Autor	Año	Título	Localización
<b>Demergasso C et al.</b>	2005	Molecular characterization of microbial populations in a low-grade copper ore bioleaching test heap.	Laguna Tebenquiche
<b>Kampf S et al.</b>	2005	Evaporation and land Surface energy Budget at the Salar de Atacama, Northern Chile.	Volcán Llullaillaco
<b>Demergasso C et al.</b>	2004	Distribution of prokaryotic genetic diversity in athalassohaline lakes of the Atacama Desert, Northern Chile.	Salar de Llamara
<b>Davis J.A et al.</b>	2003	What happens when you add salt: predicting impacts of secondary salinization on shallow aquatic ecosystems by using alternative states model.	Salar de s, Salar de Atacama, Salar de Coposa, Salar de Pujsa
<b>Lizama C et al.</b>	2002	Halorubrum tebenquichense sp. nov., a novel halophilic archaeon isolated from the Atacama Saltern	Salar de Atacama

Fuente: Elaboración propia.

Las investigaciones realizadas en el Salar de Atacama y presentadas en la tabla anterior, están relacionadas principalmente con temas de diversidad microbiana (Dorador *et al.*, 2010) o resistencia a arsénico (Lara *et al.*, 2012) y existen escasos estudios sobre la distribución, tipología y estructura de comunidades (Albarracín *et al.*, 2015). Los lagos andinos que se ubican a gran altura son sistemas casi inexplorados, estos presentan una gama de condiciones extremas presentando además una notable diversidad de hábitat para los microorganismos, por lo que estos presentan múltiples propiedades de resistencia a los factores extremos a los cuales se enfrentan (Albarracín *et al.*, 2010).

Estudios sobre Ecosistemas Microbianos Extremófilos comienzan a ser reportados por primera vez en el año 2014 en las Lagunas La Brava y Tebenquiche (Farías *et al.*, 2014). En esta publicación se comprueba la presencia de tapetes microbianos y microbialitos de carbonato de Calcio conformados por diatomeas y bacterias de tipo Proteobacterias, Bacteroidetes y Firmicutes. A los tapetes microbianos reportados en el trabajo mencionado, se le agregan ecosistemas de concreciones calcáreas asociadas a plantas (fitomicrobialitos) que crecen en La Punta sobre plantas. Además, se realizaron estudios de genómica, geoquímica y mineralogía de estos ecosistemas en profundidad (capa por capa) demostrándose que estas comunidades estratificadas están dominadas Arqueas (Euryarchaeota, Crenarchaeota) y Bacterias (Acetothermia, Firmicutes y Planctomycetes) (Farías *et al.* 2017).

En la laguna La Brava, Farías y colaboradores (2017) ha documentado que son los oncolitos (microbialitos) las comunidades predominantes y en menor proporción se presentan los tapetes microbianos. Ambas comunidades presentan una diversidad microbiana importante, siendo los microbialitos (oncolitos) los que presentan mayor biodiversidad. Mientras que en los tapetes microbianos poseen una predominancia de los phyla Proteobacterias (22%) y Thermi (18%) y en menor cantidad se detectaron los phyla Spirochaetes (12%), Sin Clasificación (12%), Otros (10%), Chloroflexi (8%), Verrucomicrobia (6%), Planctomycetes (6%) y Bacteroidetes (6%). Por otra parte, los microbialitos (oncolitos) poseen una predominancia del phyla Proteobacterias (42%) y en

menor cantidad se detectaron los phyla Verrucomicrobia (13%), otros (11%), Chloroflexi (8%), Sin clasificación (7%), ZB2 (4%), Chlamydiae (4%), Bacteroidetes (4%), Thermi (4%), Planctomycetes (3%) (Figura 5-14).

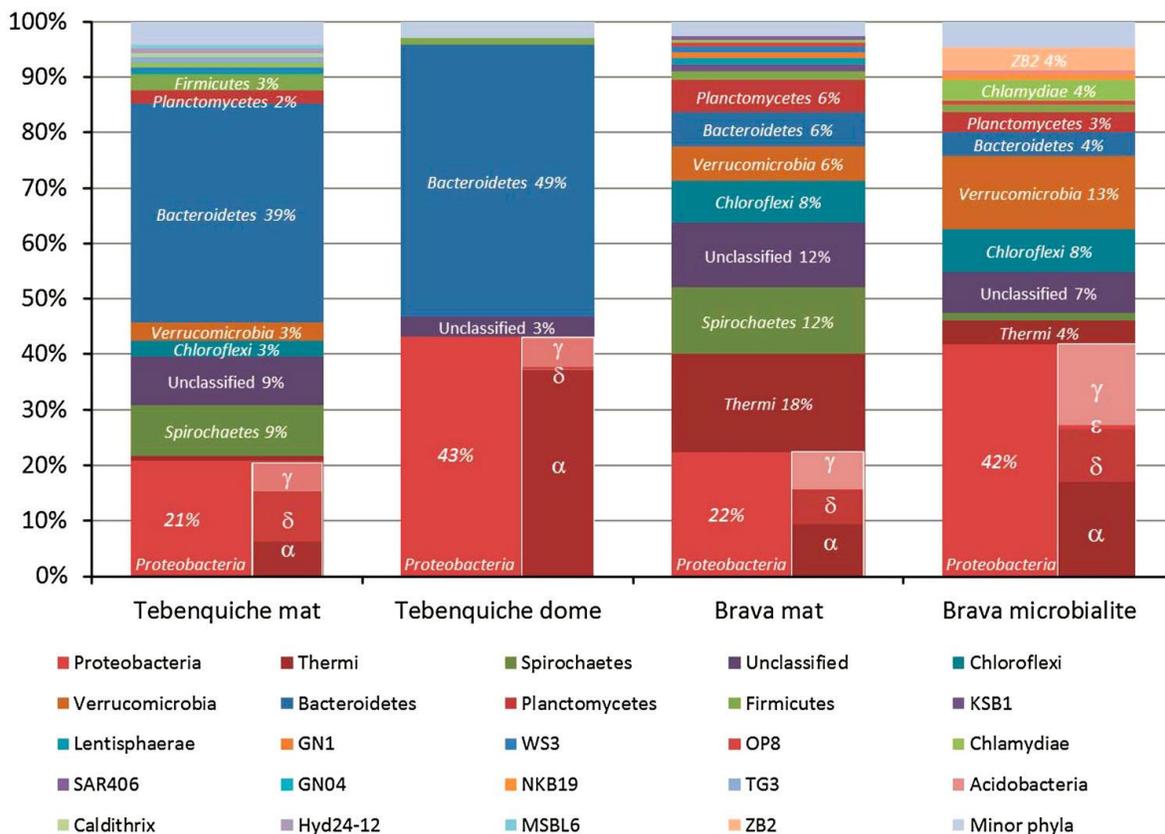


Figura 5-14 Abundancia a nivel de filo basado en la secuencia de clasificación 16S rRNA de las Lagunas Tebenquiche y La Brava. Fuente: Farías et al., 2014.

Por otro lado, se han descrito para la Laguna Chaxa la presencia de extensos mantos microbianos de color rojo-púrpura en la superficie (Thiel et al., 2010). Mientras que Demergasso y colaboradores (2008), ha evidenciado altos niveles de clorofila a, lo que lleva a suponer una considerable influencia de las bacterias fototróficas anoxigénicas en la productividad primaria en estos hábitats.

Por otro lado, investigaciones en salares con características similares al Salar de Atacama, se han realizado en el Salar de Llamara (Demergasso et al., 2005 y Rasuk et al., 2014). Al respecto, Demergasso y colaboradores (2005) describió tapetes microbianos distinguiendo tres tipos diferentes donde los microorganismos predominantes variaban de acuerdo con la capa del tapete, es decir, las capas fototróficas oxigénicas estaban formadas por diatomeas, cianobacterias unicelulares (*Cyanothece sp.* y *Synechococcus spp.*) y cianobacterias filamentosas (*Microcoleus sp.* y *Oscillatoria sp.*), mientras que las capas fototróficas anoxigénicas estaban constituidas por *Chromatium* y *Thiocapsa spp.* Por su parte, el estudio realizado por Rasuk y colaboradores (2014) describió un caso especial de tapetes microbianos litificados como “biohermas” con forma de domos de

yeso. Los domos parcialmente sumergidos en el agua presentan una diversidad microbiana dependiente de la temporada (invierno/verano). Su diversidad se compone principalmente de proteobacterias (*Alphaproteobacteria* y *Gammaproteobacteria*), *Bacteroidetes* y *Verrucomicrobia*.

Por otro lado, en el Salar de Huasco (Dorador *et al.*, 2008 y Dorador *et al.*, 2010) se han realizado investigaciones de microbiología orientadas al uso biotecnológico de los microorganismos extremófilos, revelando que existe una gran diversidad microbiana que tolera una amplia gama de salinidad y concentración de nutrientes.

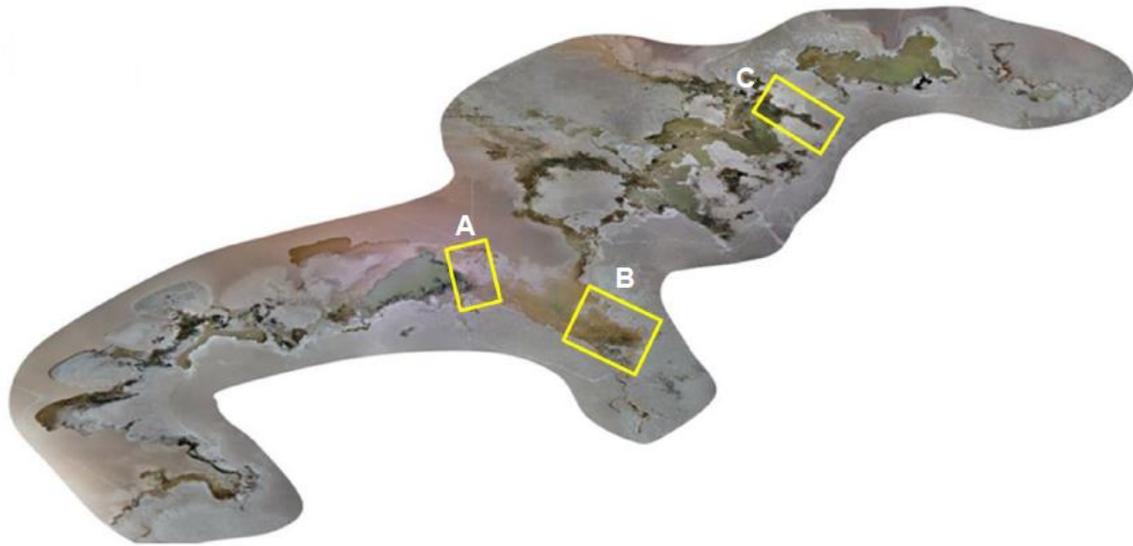
Mientras, que en el Salar de Ascotán se han realizado investigaciones relacionados con las comunidades microbianas y los ciclos biogeoquímicos del arsénico, evidenciándose que las comunidades microbianas estratificadas conocidas como estromatolitos participan en estos ciclos y son capaces de prosperar en un entorno poli extremo, presentando una alta diversidad (Kurth *et al.*, 2017)

### 5.2.3 Investigaciones de organismos públicos

Debido al desconocimiento del impacto que tienen las actuales actividades industriales y turísticas sobre el ecosistema microbiano extremófilo, como también los potenciales riesgos desde el punto de vista de los microorganismos que están inmersos dentro de las lagunas en el Salar de Atacama, el Ministerio del Medio Ambiente encargó al Centro de Ecología Aplicada la elaboración de dos investigaciones relacionadas con microorganismos extremófilos durante el año 2017.

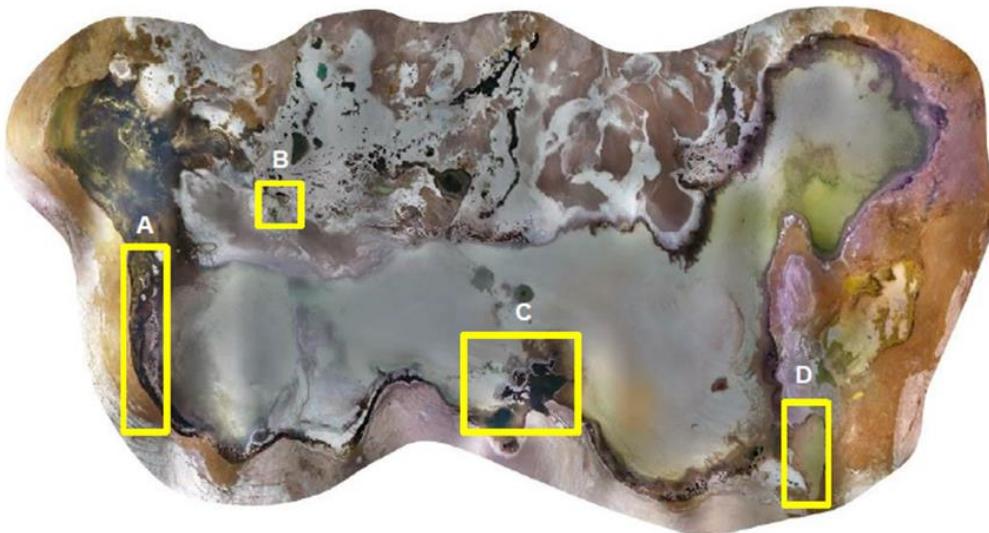
- Línea Base de microorganismos extremófilos de las lagunas Tebenquiche y La Punta y La Brava del Salar de Atacama, Comuna de San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, el cual tiene como principal objetivo generar información sobre los microorganismos extremófilos presentes en la laguna Tebenquiche y en el sistema de lagunas La Punta y La Brava del Salar de Atacama.
- Guía de Conservación y Seguimiento de Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME), con el objetivo de entregar conceptos básicos sobre la estructura y funcionamiento de los EME, mediante criterios que deben ser adoptados en el manejo y seguimiento ambiental, para asegurar su conservación.

De acuerdo con la línea de base de microorganismos extremófilos de las lagunas Tebenquiche y La Punta-La Brava (MMA, 2017), las lagunas La Punta y La Brava presentan una predominancia en la formación microbiana llamada oncolitos, seguido por tapetes microbiano que se “inflan como globos” debido a la acumulación de gases, producto de la actividad orgánica que se da en la región inferior. A medida que aumenta la salinidad, se precipita el yeso y halita en estas estructuras, formando domos que presentan una clara estratificación de comunidades microbianas (**Figura 5-15**).



**Figura 5-15 Lagunas La Punta y La Brava y sus comunidades microbianas. A) Tapetes Microbianos, B) Biofilms, C) Oncolitos. Fuente: MMA, 2017.**

Por su parte, la laguna Tebenquiche ubicada al norte del Salar de Atacama presenta diversos ecosistemas microbianos, tales como, biofilms, tapetes microbianos, fitomicrobialitos y evaporitas (**Figura 5-16**). La Laguna Tebenquiche presenta un ambiente evaporítico predominante, el cual se caracteriza por que la evaporación supera el ritmo de aporte de agua, resultando en elevadas concentraciones de cationes y aniones, que son más altos que los ecosistemas oceánicos. Estas evaporitas están compuestas principalmente por yeso y halita (sal). Los microorganismos que habitan suelos salinos están expuestos a estrés osmótico entre otros, lo que los lleva a buscar refugio en las evaporitas (MMA, 2017).



**Figura 5-16 Laguna Tebenquiche y sus comunidades microbianas. A) Fitomicrobialitos, B) Biofilms, C) Evaporitas, D) Tapete Microbiano. Fuente: MMA, 2017.**

Por otro lado en este documento se identificaron las principales amenazas a las que se enfrentan estas comunidades, y los mecanismos para enfrentarlas (MMA, 2017). Bajo este contexto, se generó la “Guía para la Conservación y Seguimiento de Extremófilos” en la cual se realizó una jerarquización estableciendo un gradiente de menor a mayor complejidad (0 a III), basado el número y tipo de EME presentes, siendo las Lagunas La Brava y Tebenquiche una categoría II.

En la **Tabla 5-10** se presentan los parámetros que se proponen en la guía para describir el estado ecológico de los EME a partir de los antecedentes aportados por diferentes estudios científicos (Farías y Contreras 2013, Farías *et al.*, 2013, Farías *et al.*, 2014, Rasuk *et al.*, 2014, Stivaletta 2010).

**Tabla 5-10 Parámetros para describir el estado ecológico de los EME, considerando diferente nivel de detalle.**

Nivel	Tipo	Variabes
1	Humedal natural	Parámetros físicos y químicos (nivel agua, STS, conductividad, redox T <sup>o</sup> , pH), determinación de EME y mineralogía
2	Humedal con presión antrópica	Considerar variables nivel 1, aniones, cationes, metales, diversidad microbiana de los 2-3 cm superiores.
3	Humedal con elevada riqueza	Considerar variables nivel 1 y 2, isotopos estables, producción de O <sub>2</sub> , HS <sup>-</sup> , diversidad microbiana en las 3 primeras capas

Fuente: MMA, 2017.

Para el desarrollo de un plan de monitoreo y seguimiento ambiental, la guía propone diversas variables (nivel de agua, salinidad, clorofila, presencia de domos, estratificación de colores, diversidad, entre otros) y su relación con diferentes actividades de origen antrópico e indicadores de cambio ecológico. El plan según la guía del Ministerio del Medio Ambiente debería considerar al menos 2 estaciones contrapuestas (verano e invierno).

#### 5.2.4 Plan de Manejo Biótico

El Monitoreo o Seguimiento Ambiental del Plan de Manejo Biótico comprometido en el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama” de Rockwood Lithium, actualmente Albemarle Limitada, aprobado por Resolución de Calificación Ambiental RCA N° 21 de fecha 20 de enero del 2016, incluye como componentes especiales una caracterización de las comunidades microbianas extremófilas y parámetros fisicoquímicos *in situ* de los sistemas lagunares: Peine conformada por Laguna Salada, Laguna Saladita y Laguna Interna; y La Punta-La Brava conformado por las Laguna La Brava, Laguna La Punta y zona Tilopozo. Monitoreo que es realizado actualmente por Cedrem Consultores en conjunto con la Universidad de Antofagasta a través de campañas semestrales contrapuestas (invierno – verano)

realizadas a partir del año 2016 donde se analizan parámetros *in situ* y un total de muestras de 16 puntos de monitoreo que son presentados en la **Tabla 5-11**.

**Tabla 5-11 Puntos de medición Tapetes Microbianos Plan Manejo Biótico.**

Sector	Punto de Monitoreo Fijo	Coordenadas Originales		Coordenadas UTM	
		UTM WGS 84 Huso 19		WGS 84 Huso 19	
		Norte	Este	Norte	Este
Sector Peine	S-5	7.380.789	587.547	7.380.789	587.547
	S-6A*	7.380.684	587.618	7.380.684	587.618
	S-9	7.380.551	588.061	7.380.551	588.061
	SA-25	7.381.430	587.117	7.381.430	587.117
	S-10	7.381.812	586.833	7.381.812	586.833
	S-11*	7.381.778	586.859	7.381.778	586.859
	I-11	7.382.095	586.494	7.382.095	586.494
	I-17**	7.382.940	586.058	7.383.061	585.995
La Punta y La Brava	LP-23	7.376.584	578.169	7.376.584	578.169
	LP-24	7.376.709	578.347	7.376.709	578.347
	LB-1	7.375.376	576.985	7.375.376	576.985
	LB-2**	7.375.494	576.782	7.375.378	576.978
Sector Tilopozo	LB-3*	7.375.157	577.270	7.375.157	577.270
	TB-1*	7.370.329	577.852	7.370.329	577.852
	TB-2*	7.370.316	577.952	7.370.316	577.952
	TB-3*	7.369.526	577.705	7.369.526	577.705

(\*): Estaciones adicionales voluntarias al PMB original. El año 2016, en base a un examen visual de localización de tapetes microbianos y con el fin de levantar información sobre esta materia, se determinaron los puntos adicionales de monitoreo a lo señalado por el Plan de Manejo Biótico, los cuales se identificaron como S-6A, S-11 en Sistema Peine, LB-3 en La Punta-La Brava. Los dos primeros puntos corresponden a sectores donde se evidenció una importante presencia de tapetes microbianos. (\*\*): Estaciones relocalizadas. Fuente: Albemarle, 2018.

Cabe destacar que el objetivo del seguimiento de las comunidades de microorganismos asociados a tapetes microbianos, es evaluar el comportamiento en el tiempo de dichas comunidades en los sistemas a través de la caracterización de la estructura del tapete microbiano y respecto a la pigmentación de las capas de microorganismos, con una frecuencia de monitoreo semestral, por lo que se presentan los resultados de los periodos monitoreados hasta la fecha que corresponden a invierno 2016 y verano 2017 (Informe Anual N°1, Albemarle 2017) e invierno 2017 y verano 2018 (Informe Anual N° 2, Albemarle 2018), los días en que se ha realizado cada campaña se presentan en la **Tabla 5-12**.

**Tabla 5-12 Campañas realizadas en el monitoreo semestral del PMB.**

Periodo	Campaña de monitoreo
Invierno 2016	24, 25 y 26 de agosto
Verano 2017	28, 29 y 30 de marzo
Invierno 2017	1, 2 y 3 de agosto
Varano 2018	3, 4 y 5 de abril

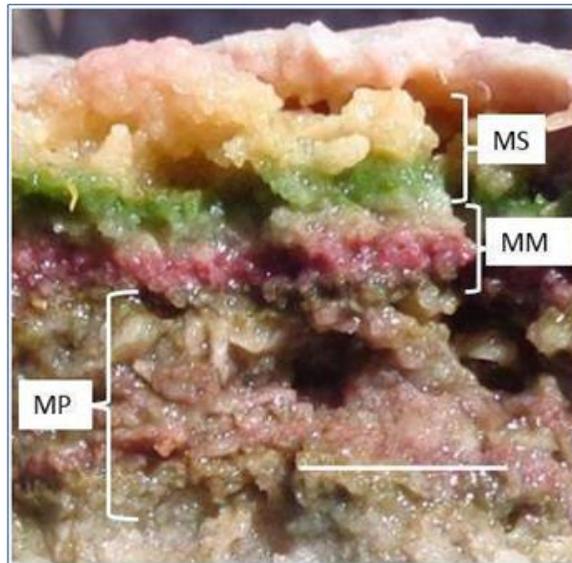
Fuente: Elaboración propia.

La metodología de muestreo consistió en el reconocimiento visual de zonas con microbialitos, evaporita y/o tapete microbiano. Posteriormente, se recolectan muestras de tapetes microbianos según lo propuesto por Demergasso *et al.* (2003) y Castell (2010). Para cada punto de monitoreo se toman muestras en triplicado realizando *in situ* el conteo y caracterización pigmentaria de las laminaciones estratificadas que presenta cada tapete. Junto con esto, en cada punto de monitoreo se tomaron datos de los siguientes parámetros fisicoquímicos: oxígeno disuelto (mg/L), pH, temperatura (°C), conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), salinidad (gr/Kg), turbiedad (UNT) y radiación solar ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).

Para efectos de caracterización de la estructura pigmentaria de los tapetes y análisis de los resultados se establecieron criterios de identificación de zonas macroscópicas pigmentadas de acuerdo con la estructura laminar distintiva de tapetes microbianos.

La clasificación de macro-zonas se elabora según zonación teórica propuesta por Riding y Awramik (2000) y Konhauser (2007) (**Figura 5-17**):

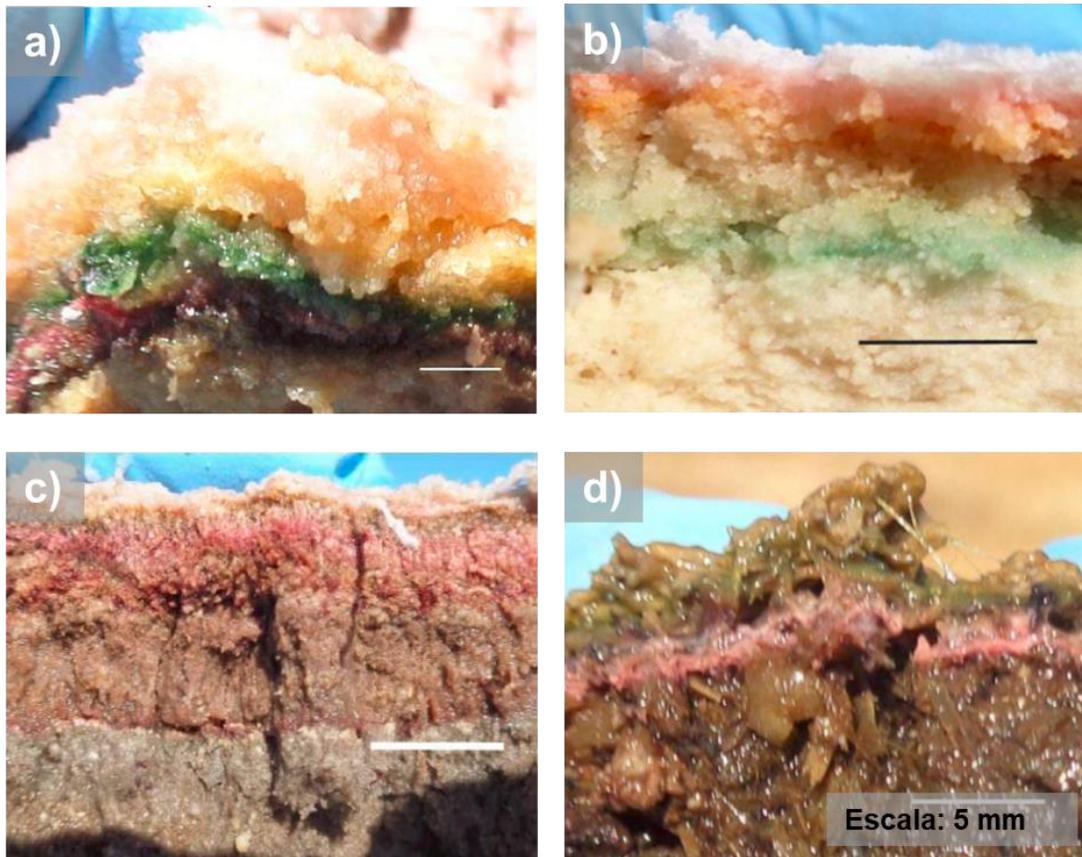
- Macro-zona sub-superficial (MS), representada por la capa más superficial del tapete hasta la presencia de una capa de coloración verde.
- Macro-zona intermedia (MM), comprendida desde la subcapa que sigue a la capa verde hasta una subcapa de pigmentación rosada-púrpura.
- Macro-zona profunda (MP), configurada por el conjunto de subcapas posteriores a la capa púrpura-rosada.



**Figura 5-17** Laminaciones pigmentadas observadas, en planicies del margen externo de Laguna Salada. Se indican las macro-zonas presentes: sub-superficial (MS), intermedia (MM), profunda (MP) (marca de escala=10 mm). Fuente: Albemarle, 2018.

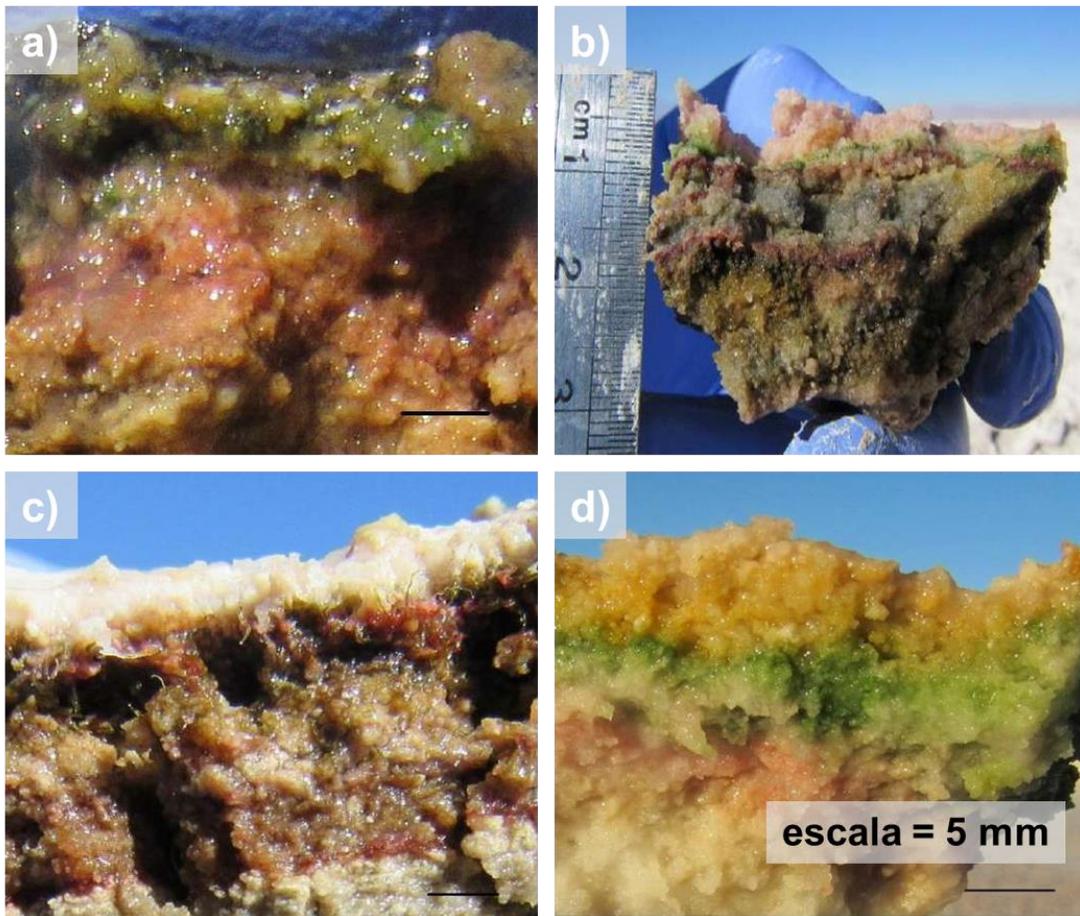
#### 5.2.4.1 Tapetes Microbianos

Durante el primer periodo de monitoreo (Informe Anual N°1, Albemarle 2017) se identificó la presencia de tapetes microbianos en 13 de los 16 puntos de monitoreo distribuidos en los sistemas La Punta-La Brava, Peine y Tilopozo. Por otro lado, a través de la identificación visual desde el borde de cada laguna, se registró la presencia de microbialitos en 4 puntos de monitoreo, en la Laguna Interna, La Punta y La Brava (I-11, LP-23, LP-24, LB-1), mientras que no se reporta la observación de evaporitas durante este periodo. En la **Figura 5-18** se presentan algunas imágenes de los Tapetes Microbianos observados durante las campañas.



**Figura 5-18 Tapetes Microbianos observados en a) Laguna Salada (S-6A); b) Laguna Saladita (SA-25); c) Laguna La Punta (LP-23); y d) Vega de Tilopozo (LB-2). Fuente: Informe N°1 PMB Albemarle Ltda., 2017.**

Durante el segundo periodo de monitoreo (Informe Anual N°2, Albemarle 2018) se detectó la presencia de tapetes microbianos en 11 puntos de los 16 de monitoreo, ya que a diferencia del periodo anterior estos no se observaron en el punto TB-2 de Tilopozo. Por otro lado, se observaron microbialitos en dos puntos de monitoreo en la laguna La Punta (LP-23) y La Brava (LB-1), mientras que la presencia de evaporitas se registró en la laguna Interna (I-11) y en La Punta (LP-24). En la **Figura 5-19** se presentan algunas imágenes de los Tapetes Microbianos observados durante el periodo.



**Figura 5-19 Tapetes Microbianos observados en a) Laguna La Brava (LB-3); b) Laguna Salada (S-6A); c) Laguna La Punta (LP-23) y d) Laguna Interna (I-17). Fuente: Informe N°1 PMB Albemarle Ltda., 2018.**

En la **Tabla 5-13** se presenta el resumen con la caracterización de todos los puntos monitoreados donde se identificaron distintos tipos de EME, los cuales fueron reportados en los Informes de PMB Anual 2017 y 2018 realizados por Albemarle Limitada. En dicha tabla podemos observar que en 12 puntos de monitoreo se han reportado Tapetes Microbianos. En los puntos S-5 (Laguna Salada), S-10 (Laguna Saladita), TB-1 y TB-3 (Vegas de Tilopozo) son los únicos donde no se han reportado Tapetes Microbianos en ninguna de las campañas realizadas, mientras que en el punto TB-2 de Tilopozo solo se reportó en la campaña de invierno 2016.

Los Microbialitos se han observado en 4 puntos de monitoreo, en la Laguna La Punta (LP-23 y LP-24), en la Laguna La Brava (LB-1) y en la Laguna Interna (I-11), sin embargo, en el último periodo de muestreo solo se reportaron en los puntos LB-1 y LP-23. Por su parte, las evaporitas se registraron solo durante el periodo invierno 2017-verano 2018 en la Laguna Interna (I-11) y Laguna La Punta (LP-24).

Según los resultados presentados, dentro de los sectores monitoreados destaca la Laguna Interna y la Laguna La Punta como las más diversas, ya que presentan los 3 tipos de EME.

**Tabla 5-13 Tipos de Ecosistemas Microbianos Extremófilos reportados en el Plan de Manejo Biótico periodos campañas semestrales de 2016-2017 y 2017-2018.**

Sector	Punto de monitoreo	Tapetes Microbianos				Microbialitos				Evaporitas			
		Inv-16	Ver-17	Inv-17	Ver-18	Inv-16	Ver-17	Inv-17	Ver-18	Inv-16	Ver-17	Inv-17	Ver-18
Sector Peine	S-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S-6A	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	S-9	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA-25	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	S-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S-11	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	I-11	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
	I-17	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
La Punta y La Brava	LP-23	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	LP-24	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
	LB-1	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	LB-2	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	LB-3	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Sector Tilopozo	TB-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TB-2	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TB-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia en base al PMB (Albemarle Ltda., 2017 y 2018)

En relación con las características de los Tapetes Microbianos y a su estructura o macrozonas, el número promedio de capas como la ubicación de los Tapetes Microbianos fueron similares en todas las campañas realizadas, esto es un resultado esperado, ya que este tipo de ecosistemas arcaicos presentan cambios en una temporalidad mucho mayor, por lo tanto, si se monitorea el mismo punto geográfico los resultados serán similares.

Respecto a las macro-zonas observadas en las muestras de Tapetes Microbianos en general se determinaron 3 tipos de tapetes presentes en el área de estudio: 1) el primer tipo se caracterizó por presentar las tres macrozonas pigmentarias: subsuperficial, intermedia y profunda, corresponde también al tapete de mayor frecuencia, este tipo de tapete es predominante en las Lagunas Salada, La Punta y La Brava. 2) El segundo tipo se distingue por la presencia de dos macrozonas: subsuperficial y media, este tipo de tapetes microbianos se observan principalmente en la Laguna Interna, Saladita y Vegas de Tilopozo. 3) El tercer tipo de tapete microbiano, en tanto, presentó solamente una macrozona subsuperficial, estos se observaron en la Laguna Saladita.

Cabe destacar que cada zona macroscópica está formada a su vez por un número variable de laminaciones, registrándose distintos números de capas y colores en las

muestras de Tapetes Microbianos, en general se observaron de 2 a 12 capas o laminaciones de colores, siendo los que presentan los 3 tipos de macro-zonas (Subsuperficial, intermedia y profunda) los que registran mayores laminaciones. Estas laminaciones observadas en general presentan una coloración rosa-verde-morado-negro presentado una variable composición microbiológica con diversas funciones, según lo señalado por Rodríguez-Aranda y Sanz-Montero (2015), las primeras laminaciones corresponden a microorganismos autótrofos fotosintéticos, un segundo estrato o macro-zona corresponde a microorganismos autótrofos fotosintéticos anoxigénicos, mientras que en las capas inferiores o macro-zona profunda los microorganismos son anaeróbicos. En la **Tabla 5-14** se presenta un resumen de la descripción general de las muestras de Tapetes Microbianos durante el periodo 2016-2017 y 2017-2018.

**Tabla 5-14 Descripción general y resumen de las muestras de Tapetes Microbianos colectadas en PMB periodo 2016-2017 y 2017-2018 en el Salar de Atacama.**

SistemaSector	Punto muestreo	Macro-zonas	Características del Tapete Microbiano	Ubicación	
Laguna Salada	S-6	Subsuperficial, intermedia y profunda	Se presenta estratificación con laminaciones en capas café, verde y negro.	Borde lagunar y planicie expuesta	
	S-6A	Subsuperficial, intermedia y profunda	Comunidades estratificadas, con laminaciones pigmentadas color verde-opaca-y café-morado.	Borde superficial de la laguna	
	S-9	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presentan una textura similar a S6A, con hasta 12 capas de pigmentación.	Borde superficial de la laguna	
Peine	Laguna Saladita	SA-25	Subsuperficial	Presentan estratificación, de dos capas sobre una base vegetal (color verde-amarillo)	Borde superficial de la laguna y sumergidos
		S-11	Subsuperficial e intermedia	Presenta una estratificación de 3 a 4 capas estructuradas con laminaciones de pigmentación intensa y variable.	Sumergidos y expuestos en el borde de la laguna
Laguna Interna	I-11	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presenta estratificación en 2 a 5 capas pigmentadas (rosa-claro-café).	Borde lagunar y sumergidos	
	I-17	Subsuperficial e intermedia	Las muestras superficiales presentan 2 capas definidas color naranja-verde, mientras que las muestras sumergidas presentan una pigmentación (rosada-naranja-amarilla).	Sumergidos y Borde superficial de la laguna	
La Punta-La Brava	Laguna La Punta	LP-23	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presentaron una morfología heterogénea con aspecto granular de 2 a 10 capas (color rosa-verde-morado).	Borde superficial de la laguna
		LP-24	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presentaron una estratificación de 3 a 6 capas (color naranja-verde-rosado-café claro).	Borde superficial de la laguna

SistemaSector	Punto muestreo	Macro-zonas	Características del Tapete Microbiano	Ubicación
Laguna La Brava	LB-1	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presentaron una estructura sólida con pigmentación intensa con 3 a 6 capas (color verde-verde claro-blanco rosado-café anaranjado)	Borde interno lagunar y sumergidos
	LB-2	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presentan características similares a LB-1, con 3 a 8 capas (naranja-verde blanco-rosado-café claro).	Borde interno lagunar
	LB-3	Subsuperficial, intermedia y profunda	Presentan una morfología compacta y regular a medianamente granular con 4 a 5 capas. (naranja-verde-rosado-café oscuro-café claro).	Borde interno lagunar
Vegas de Tilopozo	TB-2(*)	Subsuperficial e intermedia	Se presentan asociados a vegetación con una débil consistencia y estratificación con 1 a 2 capas (verde-rosado).	Sedimento zona central

Donde (\*): Solo reportado en la campaña invierno 2016. Fuente: Elaboración propia en base al PMB (Albemarle Ltda., 2017 y 2018).

#### 5.2.4.2 Parámetros físico-químicos

De acuerdo con los datos de parámetros físico-químicos registrados durante los 2 periodos de monitoreo se presenta en la **Tabla 5-15** los resultados de cada campaña.

Se observa que el oxígeno disuelto (mg/L) varía de un 1,5 mg/L reportados en el sector de Tilopozo a un máximo de 34 mg/L en la campaña de verano 2017 en la Laguna La Punta (Informe PMB Anual N°1, Albemarle, 2017). En general no se observa un patrón claro de variación temporal, ya que en verano 2018 los valores fueron menores a lo registrado en el verano anterior, mientras que el invierno en general solo disminuye en el sector de Tilopozo durante el 2017, por lo que los datos reportados resultan dudosos.

Por su parte, el pH presenta un rango estable durante todas las campañas, observándose un mínimo de 6,9 en el sector de Tilopozo a un máximo de 10 en la Laguna Salada e Interna. Mientras que la temperatura presenta una clara variación temporal, siendo las campañas de verano 2017 y 2018 las que presentan las máximas temperaturas registradas con 33°C registrados en la Laguna Saladita y 29,3°C en La Brava respectivamente. La temperatura mínima se registra en invierno 2016 en el sector de Tilopozo con 4,4 °C.

La conductividad presenta un patrón similar a la temperatura, observándose los mayores valores en verano que en invierno. Estos valores variaron de un máximo de 129 mS/cm en la Laguna La Brava a 4,3 mS/cm en las Vegas de Tilopozo. Por otro lado, se observa que las Lagunas La Brava e Interna presentan mayores conductividades, mientras que Tilopozo registra los menores valores durante las 4 campañas realizadas. La salinidad no presenta un patrón estacional, sin embargo, al igual que la conductividad los mayores valores se registran en la Laguna La Brava e Interna con 81,4 gr/Kg y 75,6 gr/Kg

respectivamente, mientras que Tilopozo registra en cada campaña 2 gr/Kg. Por su parte, la turbidez no presenta un patrón claro en cuanto a la temporalidad, pero espacialmente se observa que el sistema de Peine en general presenta mayores valores con un máximo de 187 NTU en a la Laguna Salada, mientras que La Punta, La Brava y Tilopozo registran en todas las campañas valores menores a los 26 NTU.

**Tabla 5-15 Parámetros fisicoquímicos de la columna de agua de los Puntos de Monitoreo durante invierno 2016, verano 2017, invierno 2017 y verano 2018 en el Salar de Atacama.**

Parámetros fisicoquímicos	Sector	Peine								La Punta y La Brava					Tilopozo		
	Punto de Monitoreo	S-5	S-6a	S-9	SA-25	S-10	S-11	I-11	I-17	LP-23	LP-24	LB-1	LB-2	LB-3	TB1	TB2	TB3
Oxígeno mg/L	Invierno 2016	7,4	7,0	7,9	5,4	5,3	7,3	5,9	5,6	4,4	4,7	3,4	4,4	8,1	3,6	9,6	3,4
	Verano 2017	6,4	6,2	10,0	3,4	4,5	5,0	3,6	4,5	34,0	1,1	0,7	1,3	4,2	16,9	2,6	1,5
	Invierno 2017	6,2	6,3	9,1	3,2	4,8	4,5	3,8	4,4	4,5	4,8	1,1	2,1	4,2	0,8*	1,2*	0,5*
	Verano 2018	2,1	2,3	2,6	3,3	3,2	2,9	2,6	2,1	2,0	2,4	1,7	1,6	3,9	3,7	4,9	3,5
pH	Invierno 2016	8,8	8,5	8,3	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,8	8,8	8,6	8,6	8,6	7,6	9,0	7,5
	Verano 2017	8,3	8,3	8,2	8,2	8,3	8,2	8,2	8,1	8,3	8,4	8,0	8,1	8,2	6,9	7,0	7,0
	Invierno 2017	8,4	8,3	8,1	8,3	8,3	8,1	8,3	8,2	8,3	8,3	8,1	8,2	8,2	7,1	8,3	7,0
	Verano 2018	8,3	10,0	8,3	9,4	9,0	10,0	9,3	8,6	8,3	8,6	8,1	8,2	8,6	6,9	7,9	8,1
Temperatura (°C)	Invierno 2016	11,1	19,3	17,3	15,5	20,9	21,6	19,7	21,3	9,9	9,4	12,5	17,1	21,8	25,6	25,7	4,4
	Verano 2017	26,3	31,0	33,0	20,2	16,8	20,3	14,7	14,2	22,5	17,4	25,9	31,3	30,6	22,9	24,4	25,1
	Invierno 2017	9,3	13,7	18,4	11,5	17,8	17,6	18,4	15,7	10,0	8,4	15,0	21,3	22,4	25,4	14,8	25,3
	Verano 2018	7,4	14,2	18,7	17,2	24,5	25,2	25,1	23,8	15,4	13,3	18,1	23,0	29,3	25,4	13,8	25,6
Conductividad (mS/cm)	Invierno 2016	43	39	32	42	42	44	44	46	34	38	82	83	31	4	5	4
	Verano 2017	69	60	42	80	79	85	80	97	59	66	108	84	35	4	4	4
	Invierno 2017	48	45	38	49	50	50	52	60	41	45	84	85	40	4	5	4
	Verano 2018	43	40	31	54	53	54	55	73	61	66	129	130	30	4	4	4
Salinidad gr/Kg	Invierno 2016	27,1	24,6	19,7	26,8	27,0	28,1	27,8	29,5	21,2	23,2	55,8	57,1	19,0	2,3	2,5	2,2
	Verano 2017	46,8	40,0	27,2	55,9	55,3	59,8	56,1	75,6	39,1	44,7	81,4	59,2	21,8	2,3	2,3	2,2
	Invierno 2017	28,0	26,0	22,0	29,0	29,0	29,0	30,0	35,0	23,0	26,0	49,0	49,0	23,0	2,0	3,0	2,0
	Verano 2018	21,0	20,0	15,0	26,0	25,0	27,0	27,0	36,0	30,0	32,0	63,0	63,0	15,0	2,0	2,0	2,0
Turbiedad UNT	Invierno 2016	27,6	154,0	6,2	17,8	187,0	16,8	31,5	21,7	2,9	1,4	4,0	3,9	2,6	1,7	4,1	4,4
	Verano 2017	2,0	40,0	4,0	6,4	8,4	32,0	2,5	2,6	26,0	1,3	1,2	2,4	2,2	0,4	1,9	0,6
	Invierno 2017	15,0	40,0	75,0	9,0	20,0	21,0	16,0	6,0	0,8	1,5	2,0	8,8	3,0	0,3	12,0	2,8
	Verano 2018	5,4	9,0	8,6	13,0	50,0	19,0	45,0	7,0	1,5	1,4	1,6	1,6	1,6	0,2	2,0	0,9

Donde (\*) datos fuera de rango<sup>1</sup>. Fuente: Elaboración propia en base al PMB (Albemarle Ltda., 2017 y 2018).

<sup>1</sup> Los datos resultan como “outliers” o fuera de rango, considerando los datos históricos que posee el Plan de Seguimiento Hidrico (PSAH) del mismo Titular en el mismo punto (para el punto LM-16).

## 5.2.5 Análisis por Sistema Hidrológico

### 5.2.5.1 Sistema Soncor

Respecto a los reportes de **Ecosistemas Microbianos Extremófilos** en el sistema Soncor, solo se tiene registro de presencia en la Laguna Chaxa de bacterias fototróficas anoxigénicas que podrían corresponder a Tapetes Microbianos. El autor Thiel *et al.* (2010) describió para la Laguna Chaxa la presencia de extensos mantos microbianos de color rojo-púrpura en la superficie.

### 5.2.5.2 Aguas de Quelana

Respecto a los reportes de **Ecosistemas Microbianos Extremófilos** en el sistema Aguas de Quelana no se registró información bibliográfica referente a estos ecosistemas.

### 5.2.5.3 Peine

Respecto a los **Ecosistemas Microbianos Extremófilos** en el Sistema Peine, según lo reportado en los periodos invierno 2016-verano 2017 e invierno 2017- verano 2018 del Monitoreo o Seguimiento Ambiental del Plan de Manejo Biótico de Albemarle Ltda. en las Lagunas Salada, Saladita e Interna existe la presencia de Tapetes Microbianos fuertemente estratificados bordeando las lagunas, mientras que los Microbialitos y Evaporitas solo se registraron en un punto en la Laguna Interna.

### 5.2.5.4 La Punta-La Brava

Respecto a los reportes de **Ecosistemas Microbianos Extremófilos** en el sistema La Punta y La Brava, fueron reportados por primera vez en el año 2014 (Farías *et al.*, 2014). En esta publicación se comprueba la presencia de ecosistemas de tapetes microbianos y microbialitos de carbonato de Calcio conformados por diatomeas y bacterias de tipo Proteobacterias, Bacteroidetes y Firmicutes, entre otros. A los tapetes microbianos reportados en el trabajo mencionado se le agregan ecosistemas de concreciones calcáreas asociadas a plantas (fitomicrobialitos) que crecen en La Punta sobre plantas. Además, se han realizado estudios de genómica, geoquímica y mineralogía de estos ecosistemas en profundidad (capa por capa) demostrándose que estas comunidades estratificadas están dominadas Arqueas (Euryarchaeota, Crenarchaeota) y Bacterias (Acetothermia, Firmicutes y Planctomycetes) (Farías *et al.* 2017).

Por otro lado, de acuerdo a lo reportado en la línea de base de microorganismos extremófilos de las lagunas Tebenquiche y La Punta-La Brava, realizada por el CEA en el año 2017 para el Ministerio del Medio Ambiente, las lagunas La Punta y La Brava presentan una predominancia en la formación microbiana llamada oncolitos, luego en menor cantidad se encuentran los biofilms, una película continua que cubre la laguna somera y los tapetes microbiano que se “inflan como globos” debido a la acumulación de gases, producto de la actividad orgánica que se da en la región inferior. A medida que aumenta la salinidad, se precipita el yeso y halita en estas estructuras, formando domos que presentan una clara estratificación de comunidades microbianas.

Resultados de los periodos invierno 2016-verano 2017 e invierno 2017- verano 2018 del Monitoreo o Seguimiento Ambiental del Plan de Manejo Biótico de Albemarle Ltda. registró la presencia de Tapetes Microbianos en las Lagunas La Punta, La Brava y Tilopozo, Microbialitos en las Lagunas La Punta y La Brava y Evaporitas solo se reportan en un punto en la Laguna La Punta.

Por su parte, estudios realizados por Minera Escondida Ltda. en el marco del proceso de evaluación ambiental del EIA "Proyecto Monturaqui" identificaron para las lagunas de La Brava y La Punta todos los tipos de ecosistemas microbianos descritos hasta ahora en el altiplano: Tapetes Microbianos, Microbialitos, y Evaporitas habitadas por extremófilos, oncolitos y fitomicrobialitos. siendo el ecosistema microbiano más relevante los tapetes microbianos que se presentan rodeando ambas lagunas por todos los márgenes y se extienden a lo largo de toda el área de inundación (MEL, 2018).

## 6 DISCUSIÓN

El Salar de Atacama corresponde al desierto más árido del mundo, presentando condiciones ambientales extremas, como oscilaciones térmicas, altura barométrica, escasas precipitaciones y altos índices de radiación solar que permiten una elevada evaporación del agua, lo cual origina una alta concentración de parámetros de calidad de agua y una alta heterogeneidad espacial (DGA, 2014). Sin embargo, a pesar de presentar atributos que lo hacen interesante de estudiar, la investigación sobre sus características ambientales se ha ido desarrollando lentamente, principalmente por los estudios de líneas de base realizados por titulares mineros Albemarle Ltda. y SQM, levantándose información de los distintos sistemas hidrológicos desde el año 2009 a la fecha.

De acuerdo con la información recopilada, el Salar de Atacama se ubica en el borde occidental de la Puna de Atacama por una línea de centros volcánicos andesíticos y basálticos, de edad Cuaternaria a Reciente. Hidrográficamente se caracteriza por tener una recarga continua de agua subterránea principalmente proveniente del extremo este y se han descrito sus aguas superficiales con buena calidad en el norte y en el sector oriente alto de la cuenca, donde el drenaje de los suelos volcánicos influye en sus características fisicoquímicas (MMA, 2017; DGA, 2014; Risacher *et al.*, 1999). En general, al observar los datos promedios históricos se evidencia que las lagunas a excepción de las Vegas de Tilopozo son de carácter alcalino (Hounslow, 1995), con distintas concentraciones de elementos químicos, siendo los más abundantes en general el sodio, potasio, magnesio, litio, calcio, boro y arsénico.

El salar de Atacama destaca por la presencia de humedales de extensión y profundidad reducida formados por el afloramiento de agua subterránea que fluye hacia zonas de menor altitud, lugar donde se conforman lagunas terminales de evaporación, y donde ocurre la acumulación de sales, generando una alta heterogeneidad espacial creando patrones de distribución de los organismos, los que presentan adaptaciones a las condiciones extremas del salar, constituyéndose así áreas de concentración de biodiversidad, donde tanto las especies animales como vegetales de estos lugares presentan un alto nivel de endemismo (“hot spot”) (CEA, 2006; Ahumada *et al.*, 2015).

De acuerdo a los monitoreos realizados por Albemarle Ltda., desde el 2008 a la fecha, el área de estudio históricamente tiene una alta riqueza y abundancia, debido al tipo de sustrato, alta radiación y aguas detenidas, destacando el sistema La Punta-La Brava como el más productivo en cuanto a microalgas, mientras que en el zooplancton destaca la presencia constante del crustáceo *Artemia franciscana* caracterizado por presentar una amplia resiliencia a las concentraciones de sal (Moraga *et al.*, 2015). Por otro lado, se registra al gasterópodo *Heleobia atacamensis* que de acuerdo a lo señalado por Collado (2013) estaría presente sólo en una localidad circunscrita a un pozón de Tilopozo, mientras que en el resto del salar existen poblaciones genéticamente diferenciadas, congruente con el aislamiento geográfico existente entre las lagunas del Salar de Atacama.

En cuanto a la fauna, también registra una alta riqueza de especies, destacándose varias clasificadas en peligro crítico, principalmente debido a su baja distribución y dependencia del agua, como en el caso de dos anfibios y un reptil. Mientras que, en la avifauna, destaca la importancia que poseen los flamencos en el área de estudio, ya que en esta zona se pueden observar tres de las cinco especies de flamencos que existen mundialmente en las lagunas del salar de Atacama (Caziani *et al.*, 2007). En cuanto a los macromamíferos es *Lycalopex culpaeus* (zorro culpeo) el que históricamente se reporta con mayor frecuencia en el área. Por otro lado, en el salar se han descrito grandes extensiones de superficie carentes de vegetación, observándose un paisaje más homogéneo. Históricamente se han registrado formaciones vegetacionales con comunidades típicas de la zona en el borde sur-este, destacando principalmente matorrales de *Tessaria absinthioides*, *Baccharis juncea* y herbazales de *Distichlis spicata* (Albemarle Ltda., 2015).

Como se ha mencionado el Salar de Atacama presenta condiciones extremas y una alta heterogeneidad espacial que lo ha convertido en un reservorio de biodiversidad adaptada a estas condiciones. A la ya relevancia mencionada, por sus componentes bióticos se ha sumado el reciente descubrimiento de los Ecosistemas Microbianos Extremófilos, despertando el interés por ampliar el conocimiento (Farías *et al.*, 2014), estos se han denominado de este modo debido a que en una escala muy pequeña de centímetros, se realizan un conjunto de procesos ecológicos como la producción de biomasa a través de mecanismos foto y quimiosintéticos, y los procesos de respiración y/o degradación de la materia orgánica generada en los procesos mencionados. Todos dominados por la actividad de microorganismos en condiciones extremas para la vida (Des Marais, 2003). Por otro lado, las condiciones extremas que se dan en estos ambientes hacen que esta diversidad microbiológica tenga un gran valor científico, patrimonial y biotecnológico.

Los primeros reportes de este tipo de ecosistemas se realizaron en las lagunas Tebenquiche y La Brava y fueron publicados por Farías y colaboradores el año 2014. En este reporte se evidenció la presencia de tapetes microbianos, microbialitos y endoevaporitas, siendo la laguna La Brava la que presenta estos tres tipos, por lo que a partir de este hallazgo comenzaron a desarrollarse esfuerzos tanto privados como públicos para levantar información respecto a ellos.

De acuerdo con la revisión de estudios realizados en el marco del desarrollo de proyectos de inversión en el Salar de Atacama (SEIA), estos no presentaron una caracterización de las comunidades extremófilas, sin embargo, como se ha señalado anteriormente, el estudio de los EME comenzó a partir de hallazgos realizados en el año 2014, mientras que las líneas de base de estos proyectos fueron levantadas anterior a este descubrimiento, por lo que, titulares como Albemarle Ltda. y Minera Escondida Ltda. han considerado este componente dentro de sus compromisos voluntarios con el fin de aportar al conocimiento y colaborar en la conservación de estos ecosistemas (ICSARA, 0315/2017 de MEL; RCA N°21/2016 ADENDA 5, Albemarle Ltda.). Este último, a pesar de que no corresponde a un proyecto aprobado y se encuentra en evaluación en el sistema

SEIA, presenta en su primera Adenda (MEL, 2018) una caracterización de los distintos tipos de EME en las lagunas La Punta y La Brava en que se identificaron todos los tipos de ecosistemas microbianos descritos hasta ahora en el altiplano: tapetes microbianos, microbialitos, evaporitas habitadas por extremófilos, oncolitos y fitomicrobialitos, siendo el ecosistema microbiano más relevante los tapetes microbianos, ya que se reportaron bordeando ambas lagunas por todos los márgenes extendiéndose a lo largo de toda el área de inundación, esto se condice con lo reportado en los trabajos de Farías y colaboradores 2014 y 2017.

Por su parte, Albemarle Ltda. dentro de su Plan de Manejo Biótico ha monitoreado los sectores La Punta-La Brava, Tilopozo y Peine desde el año 2016 con campañas semestrales contrapuestas (verano/invierno). Se registró la presencia de tapetes microbianos, microbialitos y evaporitas. Siendo las lagunas La Punta e Interna las únicas que registraron los 3 tipos mencionados. Cabe destacar, que el monitoreo realizado por el titular es el único de este tipo que se realiza en el país, por lo que la información entregada es complementada en cada campaña realizada, caracterizando principalmente a los tapetes microbianos, los cuales se han descritos como los más abundantes en la zona (Farías *et al.*, 2017; MMA, 2017).

En cuanto a los organismos públicos del Estado el Ministerio del Medio Ambiente de Chile ha realizado dos investigaciones hasta la fecha con el objetivo de ampliar el conocimiento de estos ecosistemas, la primera corresponde a una “Guía de Conservación y Seguimiento de Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME)” la cual presenta los antecedentes de estos ecosistemas y los criterios que deben ser adoptados para su estudio y conservación, mientras que el segundo documento corresponde a la primera Línea de Base que se ha levantado en el área de estudio respecto a estos ecosistemas, la cual consideró las lagunas La Brava y Tebenquiche por su valor científico y económico, sumado a que en la laguna Tebenquiche se desarrollan actividades turísticas. En el documento se presenta una distribución de los tipos de EME identificados por laguna, destacando la laguna La Brava por registrar la mayor diversidad de EME, mientras que en Tebenquiche las evaporitas son la unidad dominante.

Por otro lado, las investigaciones científicas revisadas en el presente documento están mayoritariamente orientadas al conocimiento de los microorganismos extremófilos y sus capacidades metabólicas (Dorador *et al.*, 2013, Demergasso *et al.*, 2010; Albarracín *et al.*, 2015; Stivalleta *et al.*, 2010), mientras que los estudios relacionados a la estructuración de las comunidades que forman partes de los ecosistemas microbianos extremófilos son más escasos.

Las investigaciones realizadas en el salar de Atacama han sido realizadas principalmente en las lagunas La Brava (Farías *et al.*, 2014;2017; Dorador *et al.*, 2008) y Tebenquiche (Bull *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2016; Farías *et al.*, 2014; Demergasso *et al.*, 2012; Lynch *et al.*, 2012; Dorador *et al.*, 2008 y Demergasso *et al.*, 2005). En estos estudios se han identificado tapetes microbianos, microbialitos y evaporitas, describiendo a la zona como rica en diversidad microbiana, destacando nuevamente a la laguna La Brava como

un sistema único y diverso, reportándose EME asociados a minerales que van desde tapetes microbianos con distintas morfologías a microbialitos de carbonatos de calcio sumergidos y de plataformas cuando alcanzan la superficie. Estos microbialitos corresponden a los únicos que se han reportado hasta la fecha en la Puna.

Otras investigaciones referentes a los EME se han llevado a cabo en sectores del Salar de Llamara donde se han descrito tapetes microbianos formados por diatomeas, cianobacterias y bacterias (Rasuk *et al.*, 2014). Por su parte, en el salar de Huasco el estudio ha sido sobre microorganismos extremófilos del grupo archaea y bacterias, identificándose taxa adaptados a las distintas condiciones del salar (Dorador *et al.*, 2010), mientras que el salar de Ascotán se han descrito estromatolitos muy estratificados que presentan una alta diversidad de microorganismos capaces de vivir en un ambiente poliextremo, es decir, enfrentan simultáneamente más de una condición extrema (Kurth *et al.*, 2017). Autores como Duché y colaboradores (2002) han señalado que estos microorganismos afinan su expresión génica para sobrevivir bajo estas condiciones.

Respecto del estado de conocimiento de los EME en el salar de Atacama se ha desarrollado mayoritariamente en el sistema La Punta-La Brava, recopilándose 3 investigaciones científicas (Fariás *et al.*, 2014 y 2017; Dorador *et al.*, 2008), 1 Informe de Línea de Base (MMA, 2017), 1 Informe técnico (Adenda MEL, 2018) y 2 Informes Anuales del Plan de Manejo Biótico (Albemarle Ltda., 2017 y 2018), en estos documentos se señala la presencia de Tapetes Microbianos, Microbialitos y Evaporitas ecosistemas ampliamente distribuidos en las lagunas La Punta y La Brava, mientras que en Tilopozo sólo se indica la presencia de Tapetes Microbianos. El sistema lagunar de Peine es el segundo más estudiado, ya que se registra información en 2 Informes Anuales del Plan de Manejo Biótico (Albemarle Ltda., 2017 y 2018), evidenciando Tapetes Microbianos en las lagunas Salada y Saladita, mientras que en laguna Interna se reportaron Tapetes Microbianos, Microbialitos y Evaporitas.

Los sistemas Aguas de Quelana y Soncor fueron los que presentan menor información respecto de los EME, solo se menciona para la Laguna Chaxa mantos microbianos en una investigación realizada por Thiel y colaboradores el año 2010, estos se describen como estratificados en color rojo-púrpura, por lo que según la clasificación presentada por el MMA (2017) podrían corresponder a Tapetes Microbianos.

Finalmente, el desarrollo del estudio de los EME en el Salar de Atacama, será de gran importancia para conocer los requerimientos ecológicos de los organismos extremófilos, y nutrir nuevos lineamientos de manejo biológico, colaborando así con los esfuerzos de conservación de estos ecosistemas poco estudiados, como el caso de Aguas de Quelana donde aún no se han investigado.

## 7 CONCLUSIONES

- El salar de Atacama se ha descrito como un ambiente extremo con una amplia heterogeneidad espacial, y que alberga a organismos con adaptaciones para sobrevivir bajo estas condiciones, constituyéndose como un área de altos endemismos y concentración de biodiversidad. Dentro de sus componentes destaca el descubrimiento de los Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME), los que corresponde a asociaciones de microorganismos que precipitan minerales producto de sus actividades metabólicas, además de cumplir importantes funciones ecológicas como la fijación de carbono, liberación de oxígeno y retención de agua por mencionar algunos. El estudio de estos ecosistemas es de vital importancia para su conservación y manejo así como para mantener la salud de los humedales altoandinos.
- Dentro de los documentos registrados en el SEIA, ya sea por Estudios de Impacto Ambiental (EIA) o Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA), no se registraron estudios relacionados con los microorganismos extremófilos, sin embargo, estos estudios fueron presentados mucho antes del hallazgo de los EME en el 2014, por lo que titulares como Albemarle Limitada y Minera Escondida han incorporado este componente en sus estudios recientes. En el caso de Albemarle Ltda. el Plan de Manejo Biótico de la RCA 021 considera el monitoreo de Tapetes Microbianos y la prospección de Microbialitos y Evaporitas en los sectores de La Punta-La Brava, Tilopozo y Peine.
- En cuanto a la información recopilada en estudios de organismos públicos, el Ministerio del Medio Ambiente ha desarrollado a la fecha dos documentos que levantan información en las lagunas La Punta, La Brava y Tebenquiche, y a la vez sientan las bases de los criterios que debiesen tomarse tanto para su estudio como su conservación.
- En relación con el estado de conocimiento de las comunidades extremófilas en el Salar de Atacama, estos se han desarrollado principalmente en las lagunas La Punta y La Brava donde al igual que Peine, se han reportado todos los tipos de EME descritos hasta la fecha en el salar de Atacama: Tapetes Microbianos, Microbialitos y Evaporitas, mientras que los sectores de Aguas de Quelana y Soncor no registraron estudios relacionados con los EME, sino más bien estudios de carácter microbiológico y no ecosistémico, sin embargo, los resultados de dichos estudios podrían estar indicando la presencia de tapetes microbianos en el caso de la Laguna Chaxa del sistema de Soncor.

## 8 REFERENCIAS

Ahumada L & Farías MA (2015) Ecosistemas Arcaicos en la Puna Moderna: un Libro de Turismo Científico. Mundo Editorial. ISBN 978-987-698-104-0.

Aitken, J.D (1967) Classification and environmental significance of cryptoalgal limestones and dolomites with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwester Alberta. *J Sedimentary Petrology* 37, 1163-1178.

Albarracín V., Dib J., Ordoñez O., Farías ME (2010) A Harsh life to indigenous proteobacteria at the Andean Mountains: Microbial Diversity and Resistance Mechanisms Towards Extreme Conditions. *Proteobacteria: Phylogeny, Metabolic Diversity and Ecological Effects*.

Albarracín, Virginia Helena; Farías, Maria Eugenia (2012) Biotecnología Turquesa; Universidad de Los Andes; *Revista Hipótesis*; 13; 11-2012; 32-39, Los ecosistemas de Lagunas de Altura de la Puna Andina (LAPAs).

Albarracín, V.H., Simón, J., Pathak, G.P., Valle, L., Douki, T., Cadet, J., et al. (2014) First characterisation of a CPD-classI photolyase from a UV- resistant extremophile isolated from High-Altitude Andean Lakes. *Photochem. Photobiol.Sci.* 13,739–750.doi:10.1039/C3PP 50399B.

Albarracín V., Kurth D., Ordoñez O., Belfore C., Luccini E., Salum G., Piacentini R., Farías (2015) High-Up: A remote reservoir of microbial Extremophiles in Central Andean Wetlands. *Frontiers in Microbiology*. 6:1404.

Albarracín V., Gartner W., Farías ME (2016) Forged Under the Sun: Life and Art of Extremophile from Andean Lakes. *Photochemistry and Photobiology*, 92: 14-28.

Albemarle (2017) Informe Anual N°1 del Plan de Manejo Biótico. Proyecto: “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)” ex Rockwood Lithium. Monitoreo Invierno 2016 – Verano 2017. Cap. 7: 212-220 pp.

Albemarle (2018) Informe Anual N°2 del Plan de Manejo Biótico. Proyecto: “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)” ex Rockwood Lithium. Monitoreo Invierno 2017 – Verano 2018. Cap. 7: 231-332 pp.

Aguayo P, González P, Campos V, Maugeri TL, Papale M, Gugliandolo C, Martinez MA. (2017). Comparison of Prokaryotic Diversity in Cold, Oligotrophic Remote Lakes of Chilean Patagonia Lagos región de Aysén. *74(5):598-613*.

Arriagada, C., Connold, P, Roperch, P. (2006). Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. *Tectonics*, 25, 19.

Babel M (2004) Models for evaporite, selenite and gypsum microbialite deposition in ancient saline basins. *Acta Geol Pol* 54:219 – 249.

- Belfiore C., Fernandez A., Santos A., Contreras M & Farías M (2018) Characterization and Comparison of Microbial Soil Diversity in Two Andean Peatlands in Different States of Conservation-Vega Tocopuri. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 194-2010: 17p.
- Belfiore, C., Ordoñez, O.F., and Farías, M.E (2013) Proteomic approach of adaptive response to arsenic stress in *Exiguobacterium* sp.S17, an extremophile strain isolated from a high-altitude Andean Lake stromatolite. *Extremophiles* 17,421–431.doi:10.1007/s00792-013-0523-y.
- Bowers RM, Lauber CL, Wiedinmyer C, Hamady M, Hallar AG, Fall R (2009) Characterization of airborne microbial communities at a high-elevation site and their potential to act as atmospheric ice nuclei. *Appl Environ Microbiol* 75: 5121–5130.
- Braga, J.C., Martin, J.M. and Riding, R. (1995) Controls on microbial dome fabric development along a carbonate siliciclastic shelf-basin transect, Miocene, SE Spain. *Palaios*, 10, 347-361.
- Brock, T.D. & Freeze, H. (1969) *Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a non sporulating extreme thermophile. *Journal of bacteriology*, 98(1): 289-297.
- Bruins, M.E.; Janssen, A.E.; Boom, R.M. (2001) Thermozyms and their applications: a review of recent literature and patents. *Appl Biochem Biotechnol*; 90(2): 155-86.
- Bull A. T., Asenjo J. A. (2013) Microbiology of hyper-arid environments: recent insights from the Atacama Desert, Chile. *Antonie Van Leeuwenhoek* 103, 1173–1179. 10.1007/s10482-013-9911-7.
- Bull a., Busarakam K., Trujillo M., Riesco R., Sangal V., P.Van Wezel G., Goodfellow M. (2016) *Modestobacter caceresii* sp. nov., novel actinobacteria with an insight into their adaptive mechanisms for survival in extreme hyper-arid Atacama Desert soils. *Systematic and Applied Microbiology* 39: 243-251.
- Burne, R., and Moore, L. (1987) Microbialites: organo sedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios* 2,241–254.doi:10.2307/3514674.
- Cade-Idepe (2004) Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. URL: <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Atacama.pdf>.
- Caziani S., Rocha O., Rodriguez E., Romano M., Derlindati E., Talamo A., RigaldE D., Quiroga C., Contreras J., Valqui M. & Sosa H. (2007). Seasonal Distribution, Abundance, and Nesting of Puna, Andean, and Chilean Flamingos. *The Condor* 109:276-287
- Cazzaniga, N. J., Martínez, S. A., De Francesco, C. G., Collado, G. A., Ciocco, N. F., Ovando, X. M. C., ... Merlo, M. J. (2011). El género *Heleobia* (Caenogastropoda: Cochliopidae) en América del Sur. *Amici Molluscarum*, 48(December), 11–48.
- Chien, A., Edgar, D.B. & Trela, J.M. (1976) Deoxyribonucleic acid polymerase from the extreme thermophile *Thermus aquaticus*. *Journal of Bacteriology*, 127(3): 1550-1557.

- Centro de Ecología Aplicada Ltda (CEA). (2006). Conceptos Y Criterios Para La Evaluación Ambiental de Humedales. Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura SAG, 1–81. <https://doi.org/10.1353/sir.2006.0139>
- Centro de Ecología Aplicada Ltda (CEA). (2017). Guía para la Conservación y Seguimiento de Ecosistemas Microbianos Extremófilos. 31 pp.
- Collado, G. A., Valladares, M. A., & Méndez, M. A. (2013). Hidden diversity in spring snails from the andean altiplano, the second highest plateau on earth, and the Atacama Desert, the driest place in the world. *Zoological Studies*, 52(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/1810-522X-52-50>.
- Davis J, McGuire M., Halse S y Sim L. (2003). What happens when you add salt: predicting impacts of secondary salinization on shallow aquatic ecosystems by using alternative states model. *Australian Journal of Botany* 51:715-724.
- Decreto Supremo N° 52/2017 (2014). Ministerio del Medio Ambiente en Chile. URL: [http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/Anexo\\_decimo\\_proceso/DS%2052\\_2014\\_DiariOficial\\_OficializaDecimoProceso.pdf](http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/Anexo_decimo_proceso/DS%2052_2014_DiariOficial_OficializaDecimoProceso.pdf)
- Dong H, Zhang G, Jiang H, Yu B, Chapman LR, Lucas CR, Fields MW. (2006). Microbial diversity in sediments of saline Qinghai Lake, China: linking geochemical controls to microbial ecology. *51: (1):65-82*.
- EDRA (1999). Evaluación hidrogeológica del acuífero del sector norte del Salar de Atacama. Riochilex S.A.
- Decreto Supremo N° 5/1998 (1998) Ley de Caza y Su reglamento. MINAGRI. Servicio Agrícola y Ganadero URL: [http://www.sag.cl/sites/default/files/ley\\_de\\_caza\\_y\\_su\\_reglamento\\_2015.pdf](http://www.sag.cl/sites/default/files/ley_de_caza_y_su_reglamento_2015.pdf).
- Decreto Supremo N° 33/2011 (2011) Ministerio del Medio Ambiente en Chile. URL: [http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/Anexo\\_quinto\\_proceso/DS\\_33\\_2012\\_oficializa\\_5\\_RCE.pdf](http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/Anexo_quinto_proceso/DS_33_2012_oficializa_5_RCE.pdf).
- Decreto Supremo N° 52/2017 (2014). Ministerio del Medio Ambiente en Chile. URL: [http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/Anexo\\_decimo\\_proceso/DS%2052\\_2014\\_DiariOficial\\_OficializaDecimoProceso.pdf](http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/Anexo_decimo_proceso/DS%2052_2014_DiariOficial_OficializaDecimoProceso.pdf).
- Demergasso C, Casamayor E, Chong G, Galleguillos P, Escudero L, Pedrós-Alió C. (2004). Distribution of prokaryotic genetic diversity in athalassohaline lakes of the Atacama Desert, Northern Chile. *FEMS Microbiol Ecol*.1;48(1):57-69.
- Demergasso C., Galleguillos P., Escudero L., Zepeda V., Castillo D., Casamayor E. (2005). Molecular characterization of microbial populations in a low-grade copper ore bioleaching test heap. *Hydrometallurgy*, 80: 241-253.
- Demergasso C., Casamayor E., Chong G., Galleguillos P., Escudero L., Pedros-Alio C. (2006) Distribution of prokaryotic genetic diversity in athalassohaline lakes of the Atacama Desert, Northern Chile. *FEMS Microbiology Ecology* 48: 57-69.

- Demergasso C., Escudero L., Casamayor E., Chong G., Balagué V., Pedrós-alió C. (2008) Novelty and spatio-temporal heterogeneity in the bacterial diversity of hypersaline Lake Tebenquiche (Salar de Atacama). *Extremophiles*, 12: 491-504.
- Demergasso C., Dorador C., Meneses D., Blamey J., Cabrol N., Escudero L., Chong G. (2010) Prokaryotic diversity patterns in high-altitude ecosystems of the Chilean Altiplano. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115.
- Des Marais D.J. (2003) Biogeochemistry of Hypersaline Microbial Mats Illustrates the Dynamics of Modern Microbial Ecosystems and the Early Evolution of the Biosphere. Author(s): David J. Des Marais. Source: *Biological Bulletin*, Vol. 204, No. 2: 160-167 pp.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2014) Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del Salar de Ataca.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2016) Diagnóstico de disponibilidad hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, Fase 3.
- Di Capua C., Bortolotti A., Farías M. E., Cortez N (2011) UV-resistant *Acinetobacter sp.* isolates from Andean wetlands display high catalase activity. *FEMS Microbiol. Lett.* 317, 181–189. 10.1111/j.1574-6968.2011.02231.x.
- Dib J., Motok J., Zenoff V. F., Ordoñez O., Farías M. E (2008) Occurrence of resistance to antibiotics, UV-B, and arsenic in bacteria isolated from extreme environments in high-altitude (above 4400 m) Andean wetlands. *Curr. Microbiol.* 56, 510–517. 10.1007/s00284-008-9103-2.
- Dib J. R., Weiss A., Neumann A., Ordoñez O., Estévez M. C., Farías M. E. (2009) Isolation of bacteria from remote high altitude Andean lakes able to grow in the presence of antibiotics. *Recent Pat. Antiinfect. Drug Discov.* 4, 66–76. 10.2174/157489109787236300.
- Dorador C., Busekow A., Vila I., Imhoff J., Witzel K-P (2008) Molecular analysis of enrichment cultures of ammonia oxidizers from the Salar de Huasco, a high altitude saline wetland in northern Chile. *Extremophiles*, 12: 405-414.
- Dorador C., Meneses D., Urtuvia V., Demergasso C., Vila I., Witzel K & Imhoff J. (2009) Diversity of Bacteroidetes in high-altitude saline evaporitic basins in northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* banner. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008JG000837>
- Dorador C., Vila I., Remonsellez F., Imhoff J., Witzel K-P (2010) Unique clusters of Archaea in Salar de Huasco, an athalassohaline evaporitic basin of the Chilean Altiplano. *FEMS Microbiol Ecol*, 73: 291-302.
- Dorador C., Barahona S., Remonsellez F (2013) Identification and characterization of a psychrotolerant *Acidithiobacillus* strain from Chilean Altiplano. *Advanced Materials Research* Vol. 825, 74-78.
- Duche O, Tremoulet F, Namane A y Labadie J (2002) A proteome analysis of the salt stress response of *Listeria monocytogenes*. *FEMS Microbiol. Lett.* 215. 183-8.

Dupraz, C., & Visscher, P. T (2008) Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*. (13,9), 429-438.

EDRA (1999) Evaluación hidrogeológica del acuífero del sector norte del Salar de Atacama. Riochilex S.A.

Evans, M. E. K., S. A. Smith, R. S. Flynn, Andm. J. Donoghue. (2009) Climate, niche evolution, and diversification of the “bird-cage” evening primroses (*Oenothera*, sections *Anogra* and *Kleinia*). *Am. Nat.* 173:225–240.

EIA. (2006). Estudio de Impacto Ambiental. Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. SQM Salar S.A, 65–84.

Farías ME, Fernández-Zenoff V, Flores R, Ordoñez O, Estévez C (2009) Impact of solar radiation on bacterioplankton in Laguna Vilama, a hypersaline Andean lake (4650 m). *J Geophys Res* 114:G00D04. doi: 10.1029/2008JG000784.

Farías, M.E.; Poire, D.G.; Arroiu, J.; Albarracín, V.H (2011) Modern stromatolite ecosystems at alkaline and hypersaline high-altitude lakes at the argentinean puna En *Stromatolites* Joseph Seckbach and Vinod Tewari (Eds). Book series: “Cellular Origins, Life in Extreme Habitats and Astrobiology” (COLE), published by Springer. Series Ed.: Seckbach, Joseph - ISSN: 1566-0400.

Farías M & Contreras M (2013) Ecosistemas Microbianos. ¿Nuevo patrimonio de la Humanidad?. *Revista Bitacora Ecológica* Vol:1 (Chile).

Farías, M. E., Rascovan, N., Toneatti, D., Albarracín, V., Flores, R., Ordóñez, O (2013) Discovery of Stromatolites Developing under Extreme Conditions in the Andean Lakes. <http://www.plosone.org/article/info:doi/10.1371/journal.pone.0053497>, 8 (1). *Plos One*.

Farías, M. E., Contreras, M., Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, M. R., Poiré, D. G (2014) Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile. *Extremophiles*. 18, 301-329.

Farías María Eugenia M. Cecilia Rasuk, Kimberley L Gallagher, Manuel Contreras, Daniel Kurth Ana B. Fernandez, Daniel G. Poiré, Fernando Novoa, Pieter T. Visscher (2017) Prokaryotic diversity and biogeochemical characteristics of benthic microbial ecosystems at La Brava, a hypersaline lake at Salar de Atacama, Chile *PLOS ONE*12(11): e0186867.

Farías, M.E. (2017) INFORME secretaría de Minería Provincia de Catamarca: Relevamiento y caracterización ecosistemas microbianos extremos en zonas de interés minero en la Provincia de Catamarca.

Farías M y Contreras M (2018) Documento Técnico Puesta en valor de los ecosistemas microbianos extremófilos en el altiplano. Ministerio de Agricultura DT: N° 236.

Fernandez Ana Beatriz, María Cecilia Rasuk, Pieter T Visscher, Manuel Contreras, Fernando Novoa, Daniel Poire, Molly M patterson, Antonio Ventosa and Maria Eugenia Farías (2016) Microbial diversity in sediment ecosystems (evaporites domes, microbial

mats and crusts) of hypersaline Laguna Tebenquiche, Salar de Atacama, Chile Front. Microbiol. - Extreme Microbiology doi: 10.3389/fmicb.2016.01284.

Fernández-Zenoff V., Siñeriz F., Farías M. E (2006) Diverse responses to UV-B radiation and repair mechanisms of bacteria isolated from high-altitude aquatic environments. Appl. Environ. Microbiol. 72, 7857–7863. 10.1128/AEM.01333-06.

Flores M. R., Ordoñez O. F., Maldonado M. J., Farías M. E (2009) Isolation of UV-B resistant bacteria from two high altitude Andean lakes (4,400 m) with saline and non saline conditions. J. Gen. Appl. Microbiol. 55, 447–458. 10.2323/jgam.55.447.

Fredrickson J. K., Romine M. F., Beliaev A. S., Auchtung J.M., Driscoll M.E., Gardner T. S, Nealson K. H., Osterman A. L., Pinchuk G., Reed J. L., Rodionov D. A., Jorge L. M. Rodrigues, Saffarini D. A., Serres M. H., Spormann A. M., Zhulin I. B. y Tiedje J. M. (2008) Towards environmental systems biology of *Shewanella*. Nat Rev Microbiol, 6: 592–603.

Gómez, Javier (2008) Tesis de Grado Microbiología industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias

Gorriti, M.F., Dias, G.M.,Chimetto,L.A., Trindade - Silva, A.E., Silva, B.S., Mesquita, M.M (2014) Genomic and phenotypic attributes of novel salinivibrios from stromatolites, sediment and water from a high altitude lake. BMC Genomics 15:473.doi:10.1186/1471-2164-15-473.

Haki Kalkowsky E (2003) Oolite und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft 60:68–125.

Han R, Zhang X, Liu J, Long Q, Chen L, Liu D, Zhu D. (2017). Microbial community structure and diversity within hypersaline Keke Salt Lake environments. 63(11):895-908.

Hounslow, A. (1995) Water Quality Data: Analysis and Interpretation. CRC Press, Boca Raton.

Kampfa S., W.Tylerb S., Ortizc C., Muñozc J. & Adkinsd P. (2005). Evaporation and land Surface energy Budget at the Salar de Atacama, Northern Chile.

Kampf, S. K., & Tyler, S. W. (2006). Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, Northern Chile. Advances in Water Resources, 29(2), 336–354. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.02.017>

Iriarte, A. (2008). Mamíferos de Chile. Lynx Edicions. Barcelona, España, 420 pp.

Javaux, E.J (2006) Extreme life on Earth—past, present and possibly beyond. Research in Microbiology, 157: 37-48.

Jiang H, Dong H, Yu B, Liu X, Li Y, Ji S, Zhang CL. (2007). Microbial response to salinity change in Lake Chaka, a hypersaline lake on Tibetan plateau. 9(10):2603-21

Johnson, D.B (1998) Biodiversity and ecology of acidophilic microorganisms. FEMS Microb. Ecol., 27: 307-317.

- Kampf K, Scoott T, Ortiz C y Muñoz F. (2005). Evaporation and land Surface energy Budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Journal of Hydrology*. Vol 310: 1-4.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 3, 259-263.
- Konhauser K. (2007). *Introduction to Geomicrobiology*. Blackwell Science. Australia. 425pp.
- Kurth D., Belfiore C., Gorriti M. F., Cortez N., Farías M. E., Albarracín V. H. (2015) Genomic and proteomic evidences unravel the UV-resistome of the poly-extremophile *Acinetobacter* sp. Ver3. *Front. Microbiol.* 6:328. 10.3389/fmicb.2015.00328.
- Kurth Daniel, Ariel Amadio, Omar F. Ordoñez, Virginia H. Albarracín, Wolfgang Gärtner & María E. Farías (2017) Arsenic metabolism in high altitude modern stromatolites revealed by metagenomic analysis *Scientific reports Nature* [www.nature.com/scientificreports/](http://www.nature.com/scientificreports/) | 7: 1024 | DOI:10.1038/s41598-017-00896-0.
- Lara J, Escudero Gonzalez L, Ferrero M, Chong DõÃaz G, PedroÃs-AlioÃ C, Demergasso C (2012) Enrichment of arsenic transforming and resistant heterotrophic bacteria from sediments of two salt lakes in Northern Chile. *Extremophiles*. 16: 523±38. <https://doi.org/10.1007/s00792-012-0452-1> PMID: 22555750.
- Lioliou, E, Pantazaki, A.; KYRIAKIDIS, D.A (2004) *Thermus thermophilus* genome analysis: benefits and implications. *Microb Cell Fact*; 3(1): 5.
- Lizama C, Monteoliva-Sánchez M, Suárez-García A, Roselló-Mora R, Aguilera M, Campos V, Ramos-Cormenzana A. (2002). *Halorubrum tebenquichense* sp. nov., a novel halophilic archaeon isolated from the Atacama Saltern. *Int J Syst Evol Microbiol.* 52(Pt 1):149-55.
- Lynch R., King A., Farías ME., Sowell P., Vitry C., Schmidt S (2012) The potential for microbial life in the highest-elevation (> 6000 m.a.s.l.) mineral soils of the Atacama región. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117.
- Martínez, D. & G. González. (2017). *Aves de Chile, nueva guía de campo y breve historia natural*. Ediciones del naturalista.
- Mella J (2017) *Guía de campo: Reptiles de Chile zona norte y zona centro*. Dos tomo: 640 pp.
- Minera Escondida (2016) *Informe de monitoreo ambiental del Salar de Atacama, campañas 2015 y análisis histórico realizado por el Centro de Ecología Aplicada*. 175 pp.
- Ministerio del Medio Ambiente (2017) *Línea Base De Microorganismos Extremófilos De Lagunas Tebenquiche Y La Punta y La Brava Del Salar De Atacama, Comuna De San Pedro De Atacama, Región De Antofagasta*. 166 pp.
- Minera Escondida (2017) *Informe Consolidado de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y/o Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto "Proyecto Monturaqui" (ICASARA). Antofagasta, Chile. URL:*

<http://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=18/36/a36221409a6951c4c6b5c2cd036835d1cb4e>.

Minera Escondida Limitada (2018) Adenda en respuesta a la Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones o Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto "Proyecto Monturaqui". URL:

[http://seia.sea.gob.cl/archivos/2018/05/24/EIA\\_MTQ\\_MEL\\_Adenda\\_Rev\\_0.pdf](http://seia.sea.gob.cl/archivos/2018/05/24/EIA_MTQ_MEL_Adenda_Rev_0.pdf)

Moraga P, Avila R y Vilaxa A (2015). Salinity and temperature optimum for oviparous reproduction and development of *Artemia franciscana*. *Idesia* vol.33 no.1

Niehaus, F, F.; Bertoldo, C.; Kahler, M.; Antranikian, G (1999) Extremophiles as a source of novel enzymes for industrial application. *Appl Microbiol Biotechnol*; 51(6): 711–729.

Ordoñez, O. F., Flores, M. R., Dib, J. R., Paz, A., and Farías, M. E (2009) Extremophile culture collection from Andean lakes: extreme pristine environments that host a wide diversity of microorganisms with tolerance to UV radiation. *Microb. Ecol.* 58, 461–473. doi: 10.1007/s00248-009-9527-7.

Parro V, de Diego-Castilla G, Moreno-Paz M, Blanco Y, Cruz-Gil P, Rodríguez-Manfredi JA, Fernández-Remolar D, Gómez F, Gómez MJ, Rivas LA, Demergasso C, Echeverría A, Urtuvia VN, Ruiz-Bermejo M, García-Villadangos M, Postigo M, Sánchez-Román M, Chong-Díaz G, Gómez-Elvira J.A. (2011) Microbial Oasis in the hypersaline Atacama Subsurface Discovered by a life Detector Chip: Implications for the Search for Life on Mars. *Astrobiology*. 2011 Dec;11(10):969-96.

Piñero J (2013) Importancia biotecnológica de la microdiversidad. Los nuevos cazadores de microbios. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 4 (2): 284-317.

Prado B, Lizama C, Aguilera M, Ramos-Cormenzana A, Fuentes S, Campos V, Monteoliva-Sánchez M. (2006). *Chromohalobacter nigrandesensis* sp. nov., a moderately halophilic, Gram-negative bacterium isolated from Lake Tebenquiche on the Atacama Saltern, Chile. *Int J Syst Evol Microbiol*. 57(Pt 11):2725.

Rascovan, N., Maldonado, M.J., Vázquez, M.P., Farías, M.E (2015) Bioenergetic use of arsenic in haloarchaea biofilms from Diamante Lake. *The ISME journal* 10 (2), 299-309.

Rasuk, Maria Cecilia Daniel Kurth, Regina Flores, Manuel Contreras, Fernando Novoa, Daniel Poire and Maria Eugenia Farias (2014) Microbial characterization of a gypsum endoevaporitic ecosystem in Salar de Llamara Chile. *Microbial Ecology*, Oct; 68(3):483-94.

Rasuk MC, AB Fernández, D Kurth, M Contreras, F Novoa, D Poiré, and ME Farias (2016) Bacterial diversity in microbial mats and sediments from Atacama Desert Microbial Ecology *Microbial ecology* 71 (1), 44-56.

Rasuk MC, Ferrer GM, Kurth D, Portero L, Farías ME, Albarracín VH (2017) Characterization and antagonistic activities of UV-resistant actinobacteria isolated from High-Altitude Andean Lakes. *Photochemistry and Photobiology* 93(3) 865-880. doi: 10.1111/php.12759.

Rizzo V, Fariás M, Cantasano N, Billi D, Contreras M, Pontenani F, Bianciardi G. (2015) Structures/textures of living/fossil microbialites and their implications in biogenicity. An astrobiological point of view. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261985762\\_El\\_primer\\_registro\\_de\\_Koskinobullina\\_a\\_socialis\\_Foraminifera\\_para\\_el\\_Triasico\\_de\\_Europa\\_y\\_sus\\_implicaciones\\_paleoecologicas](https://www.researchgate.net/publication/261985762_El_primer_registro_de_Koskinobullina_a_socialis_Foraminifera_para_el_Triasico_de_Europa_y_sus_implicaciones_paleoecologicas).

Riding R. y Awramik, S.M. (2000). Microbial Sediments. Springer-Verlag, Berlin. 331pp.

Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999b). Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones - Chile. Volumen III: Estudio de Cuencas de la II Región. Convenio de Cooperación DGA – UCN – IRD (S.I.T. N° 51), 299 pp.

Rockwood Lithium. (2015). Adenda 5. Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Elaborada por SGA. Antofagasta, Chile. 201 pp.

Rodríguez, E. (ED.) (2005). Flamencos alto andinos *Phoenicopterus andinus* (Philippi, 1854), *Phoenicopterus jamesi* (Sclater, 1886) y *Phoenicopterus chilensis* (Molina, 1782), en el Norte de Chile: Estado actual y plan de conservación. Corporación Nacional Forestal, CONAF. Antofagasta, Chile, 91 pp.

Rothschild, L.J. & Mancinelli, R.L (2001) Life in extreme environments. Nature, 409: 1092-1101. Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Guzmán, E., Tore, C., Von Igel, W., Moreno, R. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile). Boletín Geológico y Minero, 121(4): 357-372.3.

Rodríguez-Aranda P. y Sanz-Montero ME. (2015). Tapices microbianos: los organismos que fabrican estromatolitos. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 23(2), 208.

Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Guzmán, E., Tore, C., Von igel, W., Moreno, R. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile). Boletín Geológico y Minero, 121(4): 357-372.3.

Sánchez Avila, J.I., Kretzschmar, T (2017) Abundancia y distribución de ácidos grasos en sínteres silíceos del campo de geiseres del Tatio (Chile). Evidencia de actividad microbiana. Cartel presentado en: Reunión Anual 2017, Unión Geofísica Mexicana, A.C., Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Sigee D (2005) Biodiversity and Dinamic Interactions of Microorganisms in the Aquatic Environment. John Wiley & Sons, Ltd. University of Manchester, UK. England, 541 p.

Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA) (2016) Resolución Exenta N° 0021. Califica Ambientalmente el proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. URL: [http://seia.sea.gob.cl/archivos/2016/01/22/RCA\\_ROCKWOOD\\_LITIO.PDF](http://seia.sea.gob.cl/archivos/2016/01/22/RCA_ROCKWOOD_LITIO.PDF).

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2003). Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, N° 4.

- Scott, S, Dorador, C, Oyanedel, J, Tobar, I, Hengst, M, Maya, G, Harrod, C, & Vila, I. (2015). Microbial diversity and trophic components of two high altitude wetlands of the Chilean Altiplano. *Gayana (Concepción)*, 79(1), 45-56
- Stivaletta N., López-García P., Boihem L., Millie D., Barbieri R (2010) Biomarkers of Endolithic Communities within Gypsum Crusts (Southern Tunisia). *Geomicrobiology Journal*, 27: 101-110.
- Squeo, F.A., L.A. Cavieres, G. Arancio, J.E. Novoa, O. Matthei, C. Marticorena, R. Rodríguez, M.T.K. Arroyo, M. Muñoz. (1998). Biodiversidad de la Flora Vasculare en la Región de Antofagasta, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 571-591.
- SQM. (2011). Plan de Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama, Informe de Monitoreo Componentes.
- SQM. (2012). Plan de Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama, Informe de Monitoreo Componentes
- Schneider D, Arp G, Reimer A, Reitner J, Daniel R. (2013). Phylogenetic analysis of a microbialite-forming microbial mat from a hypersaline lake of the Kiritimati atoll, Central Pacific. *PLoS One* 10;8(6).
- Thiel V, Tank M, Neuling SC (2010) Unique communities of anoxygenic phototrophic bacteria in saline lakes of Salar de Atacama (Chile): evidence for a new phylogenetic lineage of phototrophic Gammaproteobacteria from pufLM gene analyses. *FEMS Microbiol Ecol* 74(3), 510-522.
- Toneatti Diego M. Virginia H. Albarracín María R. Flores Lubos Polerecky María E. Farías (2017) Stratified Bacterial Diversity along Physico-chemical Gradients in High-Altitude Modern Stromatolites *Frontiers in Microbiology* 8(1404) · April 2017.
- Vasquez C., Tarapow M & Mac-Cormack W (2007) Buscando bacterias sicrófilas en la Antártida. *Ciencia Hoy*. Vol 17 N° 99. URL: [https://www.researchgate.net/publication/260790459\\_Buscando\\_bacterias\\_sicrofilas\\_en\\_la\\_Antartida](https://www.researchgate.net/publication/260790459_Buscando_bacterias_sicrofilas_en_la_Antartida).

## 9 ANEXOS

### 9.1 Equipo de trabajo

A continuación se indica el equipo de trabajo multidisciplinario con experiencia en estudios de caracterización ambiental, evaluación de impactos y diseño de planes de seguimiento de ecosistemas acuáticos que participa en la caracterización de los microorganismos extremófilos presentes en las lagunas de los sistemas Aguas de Quelana, Soncor, La Punta-La Brava y Peine del Salar de Atacama y que aportaron en base a su experiencia y conocimiento de los ecosistemas acuáticos y EME en la revisión bibliográfica (**Tabla 9-1**).

**Tabla 9-1 Equipo de trabajo de Estudio de Ecosistemas Microbianos Extremófilos en el Salar de Atacama.**

Profesional	Cargo	Título
<b>Manuel Contreras</b>	Biólogo, MSc, PhD Ecología	Director del proyecto
<b>José María Peralta</b>	Ingeniero Agrónomo, PhD Ingeniería	Jefe de Proyecto
<b>Natalia Muñoz</b>	Biología Marina MS(c) Ciencias del Mar	Coordinadora proyecto/ Administradora de Contratos
<b>María Eugenia Farías</b>	Biólogo, PhD	Senior Ecosistemas Extremófilos
<b>Elizabeth Araya</b>	Prof. Biología, MSc Ecología	Análisis Genéticos
<b>Fernanda Díaz</b>	Geógrafo	Especialista Cartografía
<b>Marta Martin</b>	MSc Calidad de Agua	Especialista Calidad de Agua
<b>Ítalo Serey</b>	PhD Ecología	Senior Relaciones Ecosistémicas
<b>Fernanda Díaz</b>	Geógrafo	Especialista en cartografía
<b>Elizabeth Chihuailaf</b>	Ingeniero en Recursos Naturales	Especialista en Limnología

## 9.2 Control de cambios del documento

Versión	Fecha	Elaborado por	Revisado	Aprobado por
0	23/02/2018	María Eugenia Farías Manuel Contreras Ítalo Serey Natalia Muñoz Elizabeth Chihuailaf	José María Peralta Natalia Muñoz	Manuel Contreras Natalia Muñoz
1	15/05/2017	Elizabeth Chihuailaf	Ítalo Serey Natalia Muñoz	Manuel Contreras Natalia Muñoz
2	21/06/2018	Ítalo Serey Elizabeth Chihuailaf	María Eugenia Farías Natalia Muñoz	Manuel Contreras Natalia Muñoz
3	21/08/2018	María Eugenia Farías Ítalo Serey Elizabeth Chihuailaf	José María Peralta Natalia Muñoz	Manuel Contreras Natalia Muñoz
4	08/11/2018	Elizabeth Chihuailaf	Natalia Muñoz María Eugenia Farías	Natalia Muñoz Manuel Contreras
Versión final	15/11/2018	María Eugenia Farías Ítalo Serey Natalia Muñoz Elizabeth Chihuailaf	Natalia Muñoz Manuel Contreras	Manuel Contreras