

LanData

Laboratorio Natural Desierto de Atacama



Agencia
Nacional de
Investigación
y Desarrollo

Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación

Gobierno de Chile

COD.: NELI23N0014

CONCURSO NODOS ESPECIALIZACIÓN
PROYECTOS NODOS DE LABORATORIOS NATURALES LÍNEAS 1 Y 2 2024

FICHA CASO DE ESTUDIO CUENCA DE LLAMARA



**Desierto de Atacama,
Laboratorio Natural de la
adaptabilidad, la resiliencia,
y una ventana para mirar el
espacio, el origen y el futuro**

EQUIPO LANDATA

Directora Proyecto

Cecilia Demergasso

Director Alterno

Emilio Ricci

Coordinación

Sabrina Marín

Fabián Araya

Investigadores

Fernando Álvarez

David Andrade

Adriana Aránguiz

Jenny Blamey

Ricardo Cabrera

Guillermo Chong

Benito Gómez

Gabriel González

Nicolás Guiliani

Mauricio Lorca

José Luque

Marco Méndez

Marcia Montedónico

Alejandro Murillo

Rómulo Oses

Rodrigo Palma

Camila Salazar

Susana Soto

Cynthia Tebes

Equipo de profesionales

Valentina Cáceres

Manuel Castro

Vicente Danica

Raúl Flores

Ximena Retamal

CONTENIDOS

	pág.
1. El laboratorio natural Desierto de Atacama	05
2. El nodo de laboratorios naturales	07
2.1. Rol del nodo de laboratorios naturales	07
2.2. Casos de estudio del Laboratorio Natural Desierto de Atacama	07
3. Cuenca de Llamara: descripción y sus principales características	09
3.1. Ubicación geográfica del caso de estudio	09
3.2. Definición de los límites del caso de estudio	09
4. Singularidades	13
4.1. Evolución geológica de la cuenca	14
4.2. Sistema de salares	17
4.3. Yacimientos de nitrato y yodo	27
4.4. Hidrografía de la cuenca de Llamara	32
4.5. Relación de la cuenca con el río Loa	35
4.6. Biodiversidad de ambientes desérticos extremos	39
4.7. Desarrollo de la astrobiología	45
4.8. Energías limpias en la cuenca de Llamara	45
4.9. Nuevos recursos en la cuenca de Llamara	45
4.10. Presencia del hombre en la cuenca de Llamara	45
4.11. Conflictos presentes en la cuenca de Llamara	52
5. Oportunidades para el desarrollo de la actividad científica	55
6. Oportunidades para el sector productivo	62
7. Oportunidades para la sociedad	65
8. Qué vamos a hacer: Hoja de Ruta	67
9. Referencias bibliográficas	71

1. EL LABORATORIO NATURAL DESIERTO DE ATACAMA

El Laboratorio Natural Desierto de Atacama nace de la iniciativa de ANID “Nodos para el desarrollo en Investigación de Laboratorios Naturales (LLNN) en Chile”, que tiene por objetivo fomentar el desarrollo de los Laboratorios Naturales del país, a través de proyectos ejecutados de manera colaborativa entre actores del ecosistema de la Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, con foco en el fortalecimiento de la actividad científica, y en el desarrollo sustentable en sus tres ámbitos, ambiental, económico y social.

Durante la ejecución del primer proyecto de LLNN, se acordó entre todos los Nodos la siguiente definición conceptual de Laboratorio Natural: Territorio con una o más singularidades de relevancia planetaria, que otorga ventajas comparativas para realizar investigación inter-, multi- y/o transdisciplinaria con impacto científico, ambiental, social y económico.

Por otro lado, el nodo Landata ha acordado la siguiente definición de caso de estudio: Zonas de interés abordadas como ejemplos en los cuales se aplican las metodologías de análisis que alimentan el proceso de diagnóstico para la construcción/actualización de la Hoja de Ruta.

En este documento, usted podrá encontrar la información actualizada y consolidada que ha levantado el Nodo Landata en el territorio asociado al Laboratorio Natural Desierto de Atacama, en particular el trabajo de diagnóstico realizado en uno de sus cuatro casos de estudio, al que llamamos Cuenca de Llamara.



Salar Grande

2. EL NODO DE LABORATORIOS NATURALES

El Laboratorio Natural Desierto de Atacama, LANDATA, es un polígono que ocupa 105,000 km² comprendiendo gran parte de la Macrozona norte (MZN) de Chile, presente en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, completando una extensión de casi 1.600 km y un ancho máximo de 180 km. Presenta extraordinarias singularidades de relevancia planetaria, que otorga ventajas comparativas para realizar investigación inter-, multi- y/o transdisciplinaria con impacto científico, ambiental, social y económico.

Para mayor información, puede visitarnos en: landata@ucn.cl - <https://www.landata.cl> - @landataoficial

2.1 Rol del Nodo de Laboratorios Naturales

Se ha configurado un equipo inter, trans y multidisciplinario articulador para crear CTCI para y con la ciudadanía, con el propósito de promover un desarrollo sustentable (DS) y relevar el patrimonio natural, científico, cultural, educativo, social y económico de la MZN y del país.

2.2 Casos de estudio del Laboratorio Natural Desierto de Atacama

Con la finalidad de levantar la información de diagnóstico territorial asociada al Laboratorio Natural Desierto de Atacama, se priorizaron y seleccionaron distintos sitios que fuesen representativos de las singularidades del Desierto de Atacama, debido a que la gran envergadura del territorio asociado a este laboratorio natural no permite abordarlo

simultáneamente en toda su extensión. Para ello, se definieron criterios de selección, a través de los cuales se seleccionaron tres casos de estudio durante la primera Fase de Landata (2021 a 2023): Cuenca de Llamara (Región de Tarapacá), Cuenca del Río Loa (Región de Antofagasta) y Península de Mejillones (región de Antofagasta). Durante la segunda Fase del Nodo (2023 a 2025), se ha seleccionado un nuevo caso de estudio: Frontera Sur del Desierto de Atacama (Región de Atacama).

Los criterios utilizados para la selección de los casos de estudio son los siguientes:

- Sitios o polígonos que poseen múltiples singularidades (ver mapa de singularidades en la ficha del Laboratorio Natural Desierto de Atacama).
- Sitios o polígonos que poseen interés científico multidisciplinar en el ámbito nacional e internacional.
- Sitios o polígonos que representan la distribución territorial del Desierto de Atacama.
- Sitios o polígonos en los que el equipo de investigación de Landata tenga pertinencia y capacidades para para levantar un diagnóstico territorial.
- Sitios o polígono que presenten conflicto de intereses (Minería, industria, agricultura, turismo, comunidades, otros) o amenazas a la biodiversidad y/o a las comunidades presentes.
- Sitios con características que permitan la operatividad/factibilidad para realizar el diagnóstico territorial.

Cada caso de estudio cuenta con una ficha descriptiva, similar a este documento.

Para obtener información más detallada sobre el diagnóstico territorial, puede revisar el informe con la metodología y los resultados de la cartografía participativa de Landata disponible para descarga aquí:



Mina de sal abandonada en el Salar Grande

3. CUENCA DE LLAMARA: DESCRIPCIÓN Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

3.1 Ubicación geográfica del caso de estudio Cuenca de Llamara

El caso de estudio cuenca de Llamara se encuentra dentro del territorio asociado al Laboratorio Natural Desierto de Atacama. Para adentrarnos en este caso de estudio, primero necesitamos ubicarnos espacialmente en el Desierto de Atacama. Brevemente, el Desierto de Atacama, en el Norte Grande de Chile, se extiende desde, aproximadamente, los 18° de latitud sur hasta el Río Copiapó, y desde la costa hasta la vertiente occidental de la Precordillera. Además, abarca el territorio político chileno asociado a la Macrozona Norte, que comprende las regiones de Arica y Parinacota (XV), Región de Tarapacá (I), Región de Antofagasta (II) y Región de Atacama (III) (Fig. 1).

El sector que se describe aquí, genéricamente, como la Cuenca de

Llamará (CLI) se ubica en la parte sur de la Región de Tarapacá, que incluye en parte la Pampa del Tamarugal y central-oeste de la Cordillera de la Costa, con una superficie del orden de 4500 km² (Figura 1). Aquí se agrupan y se complementan, como rasgos destacados, varias de las singularidades del Desierto de Atacama reconocidas no solo a nivel nacional sino en un marco mundial como, por ejemplo, el hecho de ser el desierto más antiguo y seco del planeta, un “Dominio salino”.

3.2 Definición de los límites del caso de estudio Cuenca de Llamara

El polígono definido como caso de estudio Cuenca de Llamara se detalla en la Fig. 2.

La cuenca del Cenozoico Quillagua-Llamara (norte de Chile, Andes centrales) es una de las cuencas salinas más antiguas y grandes del norte de Chile. Ha sido descrita como un antiguo lago (Lago Soledad) en el límite Miocene/Pliocene (hace 6 millones de años)¹. Es una cuenca de antearco intramasivo asimétrica con un sector norte relativamente amplio separado de una extensión más estrecha hacia el sur por un umbral de basamento. En aspectos más amplios, el registro sedimentario de la CLI incluye información fundamental relacionada tanto con el paleoclima como con cambios climáticos actuales, con modelos hidrogeológicos. Su principal aporte hídrico proviene desde el norte a través de la Depresión Central y desde el este por el Sistema Aluvial de Arcas, descrito como uno de los de mayor dimensión a nivel mundial, en secuencias de hasta 900 m de espesor, mientras que el sector sur fue a menudo una zona de derivación con acumulación de sedimentos fluviales y lacustres más delgados.

La importancia de esta cuenca radica en que, a través de su historia, brinda amplia información sobre aspectos críticos de la evolución geológica, paleoclimática y geo microbiológica del Desierto de Atacama hasta la evolución social, política y económica del país.

Algunos sitios representativos del polígono de este caso de estudio se observan en la Fig. 3.

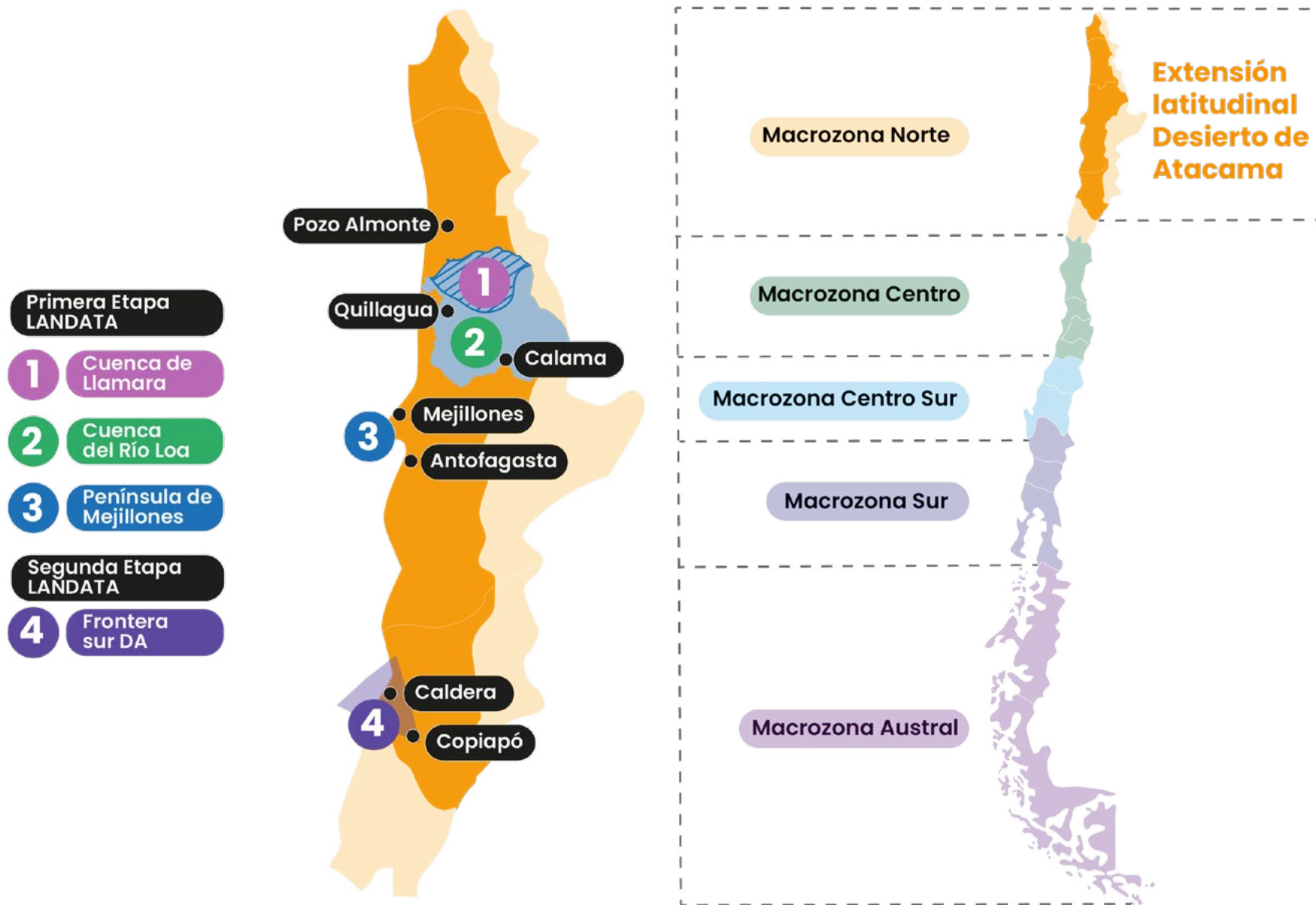


Fig 1. Ubicación geográfica y extensión del Desierto de Atacama y de los cuatro casos de estudio que, a la fecha, han sido abordados por el Nodo Landata, entre los que se encuentra la Cuenca de Llamara.



Fig 3. Se ubican algunos rasgos específicos de la CLL: Explotación de Nitratos: Un área en explotación para la obtención de yodo a través de pilas. Las áreas marcadas como Salar de Llamará corresponden principalmente a costras con sulfatos (yeso) dominantes. El Salar Grande aparece como una unidad separada, pero posee una clara relación con los materiales que provienen del este, desde el Salar de Llamará. Los sistemas de fallas aparecen claramente controlando la cuenca del Salar Grande, incluso atravesando el cuerpo salino. Se observa la conjunción de Quebrada Amarga y el cambio en las características del curso del Río Loa.

4. SINGULARIDADES

En su territorialidad, la Cuenca de Llamara reúne múltiples sitios y zonas de interés, donde se revela la existencia de aguas subterráneas, con formación de salares, rasgos geológicos únicos y una biodiversidad endémica. A esto se suma el patrimonio histórico y cultural, las operaciones mineras, la industria energética, agricultura, ganadería, y el gran potencial turístico.

La cuenca de Llamara es considerada una zona de gran interés científico en este marco geológico asociado a condiciones hiperáridas, como por ejemplo, debido a la microbiota en suelos, subsuelos, rocas de sal, tapetes microbianos y salmueras. Entre las principales singularidades que alberga este caso de estudio también se encuentran:

I. Está estrechamente relacionada con la génesis del fosilizado Salar Grande. Este salar corresponde a un cuerpo masivo de NaCl (120 km² de área y 80/90 m de profundidad promedio) y es considerado único en el mundo.

II. Está relacionado con un enorme sistema de fallas que aparecen como vía principal de aporte hídrico de las salmueras asociadas a las cuencas salinas.

III. El balance de masa entre el Abanico Aluvial de Arcas y la CLI más la asociación lago/salar proporciona información sobre la evolución del paleoclima durante el Terciario Superior.

IV. Su basamento, asociado a los depósitos de salitre, yodo y diatomeas, proporciona nueva información sobre la evolución de estos depósitos únicos, la evolución de los yacimientos de nitratos infrayacentes en diversos sectores de la Cuenca y la asociación de sistemas estructurales principales.

V. Su desarrollo está asociado al Río Loa, único río que cruza el Desierto de Atacama y que drena en parte la CLI y lleva sus aguas al mar.

VI. La elevada capacidad de conservación molecular de las sales en los depósitos salinos superficiales y subterráneos (subsurface) man-

tienen un registro biológico excepcional durante millones de años que permite investigar la evolución en una escala de tiempo reducida.

VII. La precipitación biótica y abiótica actual de yeso, y otros minerales en los "sink holes" (llamados localmente "puquios") proporciona información adicional sobre la génesis de las evaporitas en la CLI.

Se presentan a continuación las características de los principales rasgos mencionados arriba, que permiten visualizar los criterios que condujeron a la selección de este sitio como caso de estudio.

4.1 Evolución geológica de la cuenca

4.1.1 Cambio paleoclimático y climático

En el tema del cambio climático los distintos registros estratigráficos, fenómenos meteorológicos y evolución evaporítica, muestran procesos de evolución climática, paleoclimática y, eventualmente, la influencia antropogénica. Estudiar todos estos antecedentes, en su contexto, proporcionan información relevante en lo que se refiere al estudio de la evolución tanto de los paleoclimas como de los actuales (Fig. 4).

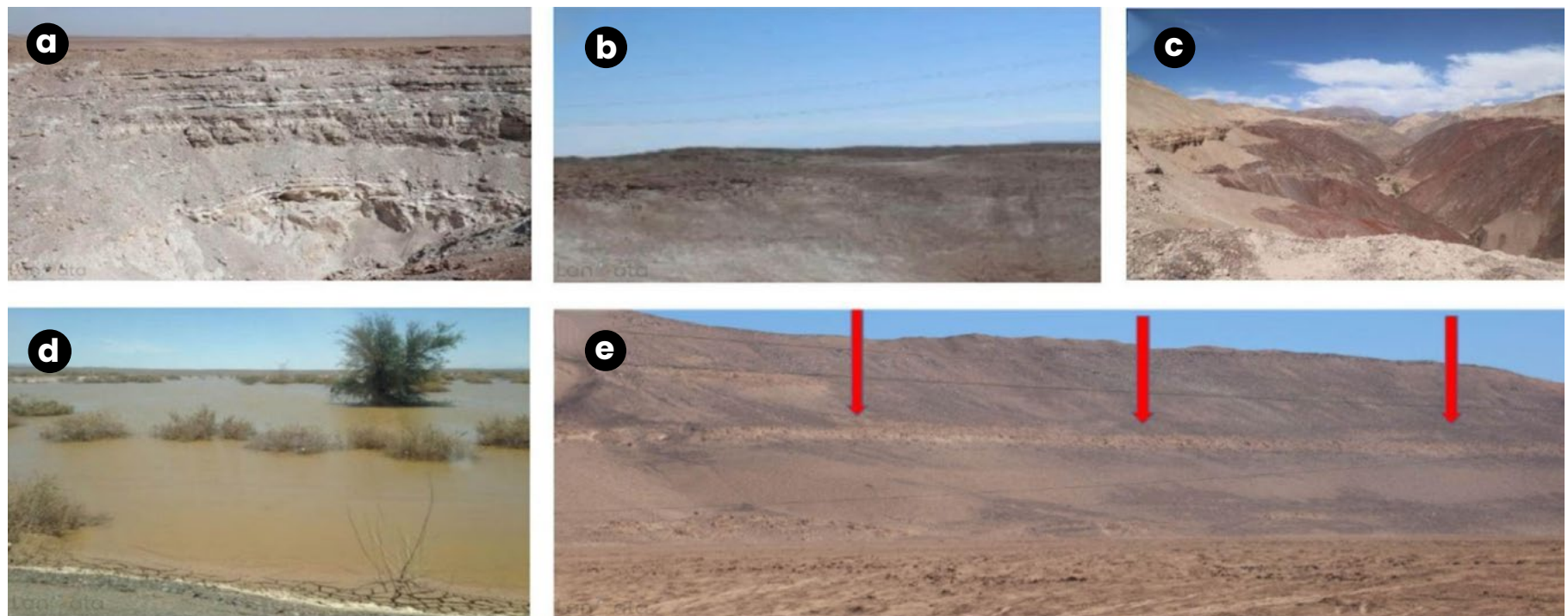


Fig. 4. a) Secuencias de cientos de metros que incluyen sedimentos de tipo lacustre que indican la presencia de lagos de envergadura, previos a la formación de la Cuenca de Llamará. Esto indica un clima marcadamente diferente al hiperárido actual en el Desierto de Atacama. b) Las grandes estructuras de disolución ("sink holes") y los sistemas de cavernas asociados, también indican importante presencia de agua subterránea. c) La profundidad y dimensiones de las quebradas que desembocan en la Pampa del Tamarugal, como en el caso de la imagen (Quebrada de Huatacondo) señalan cursos de agua de dimensiones considerables lo que concuerda con la presencia de un clima más húmedo que el actual. d) Las precipitaciones que inundan sistemáticamente la Pampa del Tamarugal en ciclos húmedos del Invierno Altiplánico demuestran la microciclicidad de etapas húmedas en el Desierto de Atacama. e) En la imagen se muestra una línea a media falda de los Cerros de Soledad que marca el desarrollo de una paleocosta del Lago Soledad, indicando la abundancia relativa de agua durante su emplazamiento.



Fig. 5. Se muestra el Acantilado de la Costa en la parte oeste de la Cuenca de Lllamará. Se observan rocas más oscuras, volcánicas e intrusivas del Mesozoico y, sobreyaciendo, rocas más claras, con estratificación horizontal, que son sedimentarias continentales de un antiguo relleno de quebrada que ahora está expuesto debido a la acción de las fallas del Sistema de Atacama que afectan la Cordillera de la Costa.

4.1.2 Cambio paleoclimático y climático

Este conjunto de conos aluviales es considerado uno de los de mayor tamaño a nivel mundial² e incluye una zona de aporte mayoritario a la CLI. Es un lugar cuyo estudio entrega información fundamental para evolución climática y paleoclimática, por lo menos desde los últimos 6 millones de años. Asimismo, entrega información fundamental sobre la naturaleza del agua subterránea que proviene desde la Precordillera y Alta Cordillera hacia la Pampa del Tamarugal, uno de los principales reservorios del recurso hídrico de la Pampa del Tamarugal³.

4.1.3 Sistema de Fallas activas

La Cuenca de Llamara contiene un registro de actividad de fallas que controlan de manera espectacular el relieve. Por una parte, se expone el Sistema de Fallas de Atacama que atraviesa en sentido longitudinal la Cordillera de la Costa, formando escarpes de fallas, campos de grietas y cuencas estructurales. En la parte oriental del Salar Grande existe los Cerros de Chuculay que guarda un registro de escarpes de fallas de alturas de cientos de metros formados por la propagación de fallas inversas. Asociado a estos escarpes existen impresionantes campos de grietas abiertas que dan cuenta del proceso de propagación de las fallas inversas. Dada la dominancia del clima hiperárido, la Cuenca de Llamara permite la preservación única de estos rasgos a escala planetaria.

Por otra parte, la Cuenca de Llamara contiene instrumental sismológico que permite monitorear esta deformación. Esta expresión espectacular de deformación activa es análogo único para la caracterización de la deformación en otras zonas de subducción de la Tierra. No existe en otras partes del mundo la preservación de este tipo de deformación, por lo tanto, la Cuenca de Llamara es un laboratorio natural único.



Fig. 6: Sistema de salares (Salar Grande, Salar de Llamara).

4.2 Sistema de Salares (Salar Grande, Salar de Llamara)

4.2.1 Salar Grande

Los salares, se definen como cuerpos evaporíticos-detriticos ubicados en el área más baja de una cuenca cerrada en ambientes desérticos y semidesérticos⁴ ya sea de origen tectónico controlado por el sistema de fallas como en el caso de los salares de Atacama y Punta Negra ($24^{\circ}28'S/68^{\circ}54'O$) y Salar Grande ($20^{\circ}57'S/69^{\circ}58'O$), por acumulación de material producto de la actividad volcánica en el caso de gran parte de la alta cordillera, o asociada a conos aluviales coalescentes propios de los salares de la Pampa del Tamarugal, como es el caso del Salar de Llamará formado en la parte distal del gran Cono Aluvial de Arcas ($21^{\circ}43'S/69^{\circ}08'O$)⁵. Existen más de 50 salares identificados en el Norte de Chile^{6,7} y dentro del caso de estudio se ubican, de sur a norte, los salares de Llamara ($21^{\circ}23'S/69^{\circ}37'W$), de Pintados y Bellavista, y Salar Grande, de los cuales sólo el Salar de Llamara es un salar activo.

Este salar es un caso único en el mundo. Posee una superficie de 120 km² con una profundidad media estimada en 80 m. Su composición es exclusivamente de cloruro de sodio (sal común) con una pureza general superior al 90% NaCl con sectores del orden de 99.8-99.9 % NaCl (Fig. 7). La calidad de esta sal permite exportar desde aquella aplicada a corrección de caminos nevados a química, pasando por la sal doméstica. Presenta, localmente, un horizonte único del orden de hasta 3 m de potencia que incluye cristales de sulfato de sodio (tenardita) que estaría demostrando una etapa de climas más frío. La cuenca que la contiene está controlada por grandes fallas del Sistema Tectónico de la Falla de Atacama, que es el mayor del país, extendiéndose por más de 1000 km entre La Serena e Iquique s.l. (Figs. 8 y 9).

En este tema se considera incluir como punto complementario el área del acantilado de la costa por la asociación al Sistemas de Fallas de Atacama y también por la instalación en el sitio de una gran planta desaladora de agua de mar.



Figura 7. Vista panorámica de una de las minas de sal de Minera Cordillera en el Salar Grande.



Fig. 8. Parte del sistema de fallas del Sistema Tectónico de la Falla de Atacama. Se observa formación de fallas paralelas que, en superficie incluye zanjas, escarpes y lineamientos a lo largo de decenas de km. Estas fallas alcanzan hasta la costa y en el área escogida se han incluido sectores de la costa donde se muestran valles "colgados" en el acantilado por la acción de las fallas (Fig. 9).



Fig. 9. Fallas del Sistema Tectónico de la Falla de Atacama. Parte suroeste del Salar Grande.

4.2.2 Salar de Llamara

El Salar de Llamara se encuentra en la Región de Tarapacá a 141 km SE de Iquique, en el límite sur de la Pampa del Tamarugal, en la depresión central, a una altitud aproximada de 800 m, limitado entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera. La recarga hidrológica de Llamara ocurre por activación de los sistemas aluviales o de forma subterránea⁵. Los eventos de recarga son ocasionales como los monzones que ocurren de la cordillera en décadas^{8,9,10} y episodios periódicos de nieblas costeras (camanchacas) que drenan a través del sistema del cono aluvial de Arcas¹¹. La dirección general del flujo progresa hacia el sur en la Depresión Central, pero flujos complejos se han descrito cerca del Cerro Soledad en la cercanía de los Puquios. La evaporación supera la recarga subterránea como lo indican las mediciones de conductividad eléctrica y la precipitación de minerales evaporíticos como carbonatos yeso y glauberita en los Puquios y halita eflorescente en la sección subaérea del salar.^{12,13,14,15,16}

El sistema activo salino está formado por cuatro lagunas denominadas Puquios, numerados del 1 al 4. El Puquio 1 es el de mayor superficie lacustre del sistema (4622 m²), seguido de Puquio 1 (1659 m²), Puquio 4 (1462 m²) y Puquio 3 (1085 m²). Los Puquios 1 y 3 son los menos profundos con 0.25 y 0.31 m, respectivamente. En contraste, los Puquio 2 y 4 son más profundos con 0.35 m y 0.55 m, respectivamente. En cuanto a la geoquímica del agua, los valores más bajos de conductividad eléctrica oscilan entre 30 y 95 mS/cm, en los Puquios 1 y 3, respectivamente, mientras que los valores los Puquios 2 y 4, presentan los valores más altos, 150 y 180 mS/cm, respectivamente. La variabilidad de factores como la composición del acuífero, la litología del subsuelo y la morfología del lago generan la heterogeneidad espacial evidente en el sistema¹⁷.

Las lagunas están sobresaturadas en sulfato de calcio, lo cual permite la formación de cristales de yeso selenítico en profundidad¹⁸ mientras que, en superficie, hay una dura costra salina de sulfatos y cloruros de color pardo-rojizos que, al saturarse de agua, se vuelven blancos^{15,19} (Fig. 10). Si bien predomina el yeso, se observan también eflorescencias de halita, de grano muy fino, propio de facies lacus-

tres²⁰ altamente solubles, cuya conservación requiere condiciones hiperáridas a largo plazo²¹ que mantengan el equilibrio dinámico entre los procesos fisicoquímicos y biológicos que controlan la función del ecosistema y los sedimentos resultantes¹⁷ (Fig. 11).

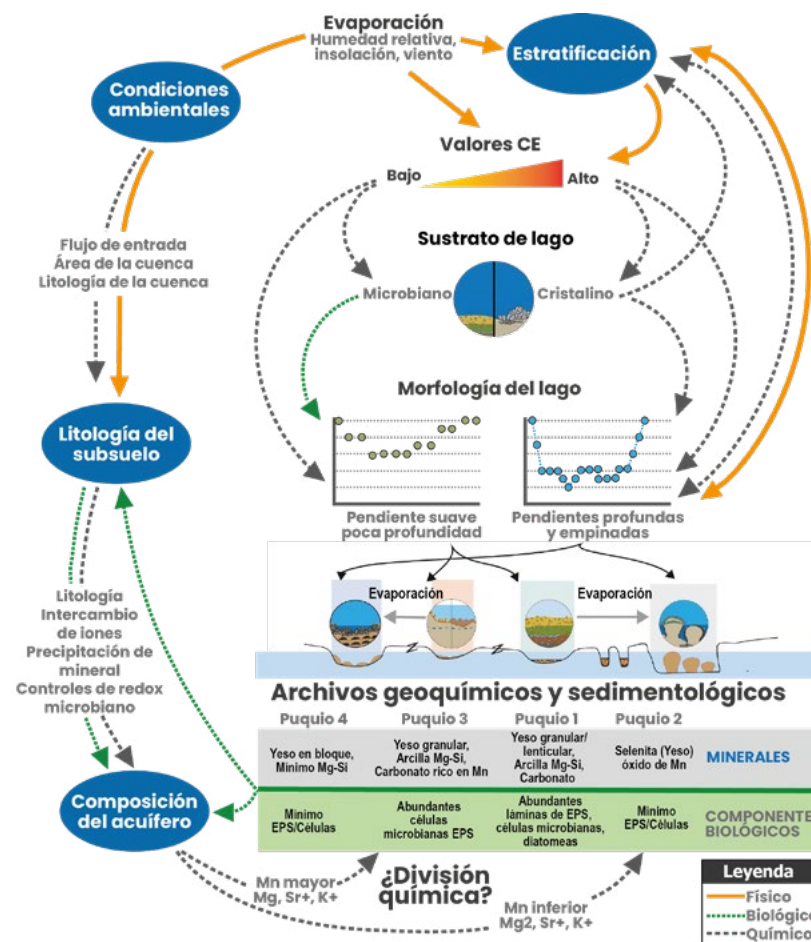


Fig. 10. Modelo conceptual que muestra los cambios físicos (flechas naranjas), químicos (flechas grises discontinuas) y microbianos (flechas verdes discontinuas) que interactúan en la generación de heterogeneidad en la química de las salmueras, el sustrato y la morfología de los lagos en el Salar de Llamara. Características geoquímicas y sedimentológicas heterogéneas, que incluyen la evidencia de minerales y comunidades microbianas, son el resultado de esta serie de transformaciones que aparentemente varían en respuesta a cambios de las condiciones ambientales¹⁷.

Asociados a los Puquios se han definido 3 nichos ecológicos, las estructuras evaporíticas subaéreas^{22,23} las subacuáticas¹⁹ y sedimentos^{24,25} y las salmueras²⁶ y aguas subterráneas (en estudio). Por otro

lado, las costras de sal asociadas al Salar de Llamara configuran un cuarto nicho ecológico¹⁴ (Fig. 12).

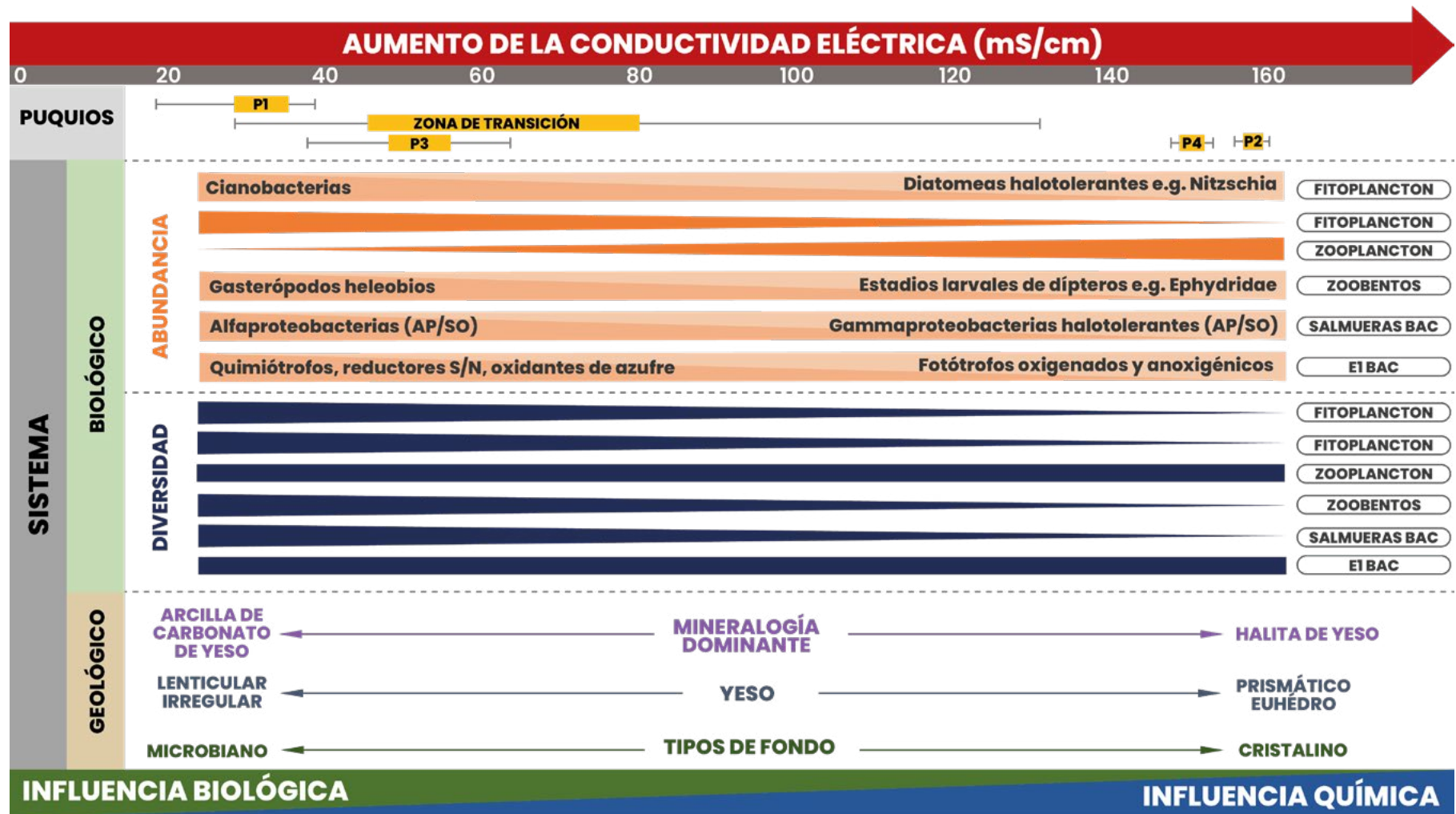


Fig. 11. Diagrama del marco conceptual que resume las tendencias observadas en los componentes geológicos y biológicos del sistema de los Puquios de Llamara en el gradiente de conductividad eléctrica. Brine BAC, se refiere a las comunidades bacterianas de las salmueras. EI BAC se refiere a las comunidades bacterianas del estrato EI de las estructuras subaéreas. El ancho de las barras de diversidad y abundancia indican tendencias generales. En casos donde la abundancia total no muestra relación aparente con la EC las barras se subdividen para resaltar el efecto de la EC grupos funcionales individuales. AP fotótrofos anoxigénicos, SO oxidantes de azufre, S sulfato, N nitrato. Desde Reid et al 2021.

La exploración de la diversidad microbiana del salar se inició con el estudio de dos de los nichos reconocidos en los Puquios, los tapetes microbianos (estructuras sub-acuáticas)¹⁹ y las salmueras²⁶. Posteriormente se investiga otro nicho que corresponde a las comunidades endolíticas que habitan en las estructuras sub-aéreas de yeso del margen de los Puquios^{22,23} y en las costras de sal de la cuenca¹⁴ y las que se encuentran en sedimentos ^{24,25}. Estas investigaciones muestra-

ron la abundante presencia de microorganismos que no es posible identificar debido a la ausencia de vecinos cercanos en las bases de datos y la necesidad de avanzar en su conocimiento para mejor comprender los ciclos biogeoquímicos, la variabilidad y las condiciones en las cuales se mantiene la resiliencia del ecosistema.

Los resultados del análisis metagenómico de las estructuras sub-aé-



Fig. 12. Nichos ecológicos asociados a los Puquios en el Salar de Llamara. B= Brines, SSAq= Estructuras subacuáticas, SSAir= Estructuras subaéreas.

reas (SSair) indican que la diversidad de las comunidades microbianas de las salmueras (B) disminuye con el aumento de la conductividad eléctrica (CE), como ha sido observado en sistemas similares, pero aumenta en las estructuras de depositación de yeso (SSair). Esta tendencia proviene de 86 metagenomas realizados en cuatro campañas, invierno y verano 2018 y 2019 (Informe ¹) (Geobiota, 2020).

El núcleo microbiano de las comunidades estudiadas (SSair y B) está conformado por Pseudomonadota (nueva denominación de Proteobacteria), Bacteroidota (orden Cytophagales y Flavobacteriales), Cyanobacteriota, Firmicutes, Actinobacteriota y Archaeas. El núcleo de las comunidades asociadas a SSair está compuesto por Pseudomonadota, Verrucomicrobiota, Firmicutes, Cyanobacteriota, Actinobacteriota, Bacteroidota, Planctomycetota, Balneolaeota y Gemmanimonadota, mientras que el de salmueras por Pseudomonadota (Alpha, Beta, Delta y Gamma), Firmicutes, Cyanobacteriota, Actinobacteriota y Bacteroidota.

El análisis basado en la similitudes y diferencias entre las comunidades microbianas de las SSair permite visualizar una separación entre las campañas de 2018 y 2019, el agrupamiento por similitud de las muestras de los estratos 1 de todos los Puquios y de los Puquios 2 y 4 entre sí, que son los de mayor CE. El análisis de las salmueras, en tanto, muestra el aislamiento del Puquio 4, de las salmueras de verano de 2019 de los sitios T1-112, T-P16 y T2-C y T2-D y del grupo de las salmueras de invierno.

La presencia/abundancia de microorganismos pertenecientes a los filos Euryarchaeota, Rhodothermaeota y Ectothiorhospiraceae, que comparten la capacidad de responder al incremento de la presión osmótica, se relacionan con la estructura de la comunidad del Puquio 4 que es el que presenta mayor conductividad. Las variables que mejor se correlacionan con el ordenamiento observado son CE para las SSair y oxígeno disuelto (OD) y el Nivel para las salmueras. El análisis de las capacidades funcionales claves de las comunidades microbianas

del Estrato 1 de todos los Puquios y de las salmueras de las campañas del 2019 indica que el mecanismo de producción de energía más abundante es la respiración aeróbica, seguido de la fermentación, fotosíntesis anoxigénica y oxidación de azufre. La diversidad de genes que soportan las funciones de oxidación de azufre, por ejemplo, es mayor que las que aportan en el metabolismo de reducción de sulfato y la de los genes que soportan la fotosíntesis anoxigénica es mayor que la de los que soportan la fotosíntesis oxigénica.

Campañas más recientes incluyeron el análisis de muestras del agua que se usa para el relleno del acuífero y muestran una comunidad microbiana dominada por microorganismos oligotróficos del filo Pseudomonadota y Archaea.

El análisis de las comunidades asociadas a las SSaq muestra una mayor diversidad microbiana. Destaca, por ejemplo, la abundancia de taxones pertenecientes a las clases Epsilon y Deltaproteobacteria, normalmente involucradas en el ciclo biogeoquímico del azufre (*Archaeobacter*, *Sulfurospirillum* and *Desulfomonile*, *Desulfovibrio* y *Desulfobacterium*, respectivamente) (Fig. 13). El grupo Epsilonproteobacteria se ha evidenciado como predominante en varias cuevas sulfídicas donde el metabolismo de oxidación de azufre es también predominante. Adicionalmente, la thiotrofia soportada por Epsilonproteobacteria se ha reportado como la fuente predominante de energía en depósitos de azufre.^{27,28}

Si bien la abundancia de Alphaproteobacteria es semejante en los tres nichos identificados (Fig. 13) los géneros predominantes en cada nicho dentro de esta clase son diferentes. El más abundante en las SSaq pertenece a *Dichotomicrobium* conocido por su capacidad de producción de carotenoides lo que explicaría la coloración de las SSaq.

Las comunidades microbianas de las costras de sal están dominadas por una gran variedad de Halobacteriales y de Bacteroidetes, más unas pocas especies de Cyanobacteriota. Estos resultados contrastan

¹ Los análisis metagenómicos fueron solicitados a la empresa SQM para dar cumplimiento a la Acción N°8 y el anexo 8.1 respectivo del Programa de Cumplimiento aprobado mediante Res. Ex. N° 24/ROL D-027-2016 de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), considerando además las instrucciones generales de la Res 223/2015 de SMA. Este análisis incluyó muestras de salmueras de los sitios correspondientes..

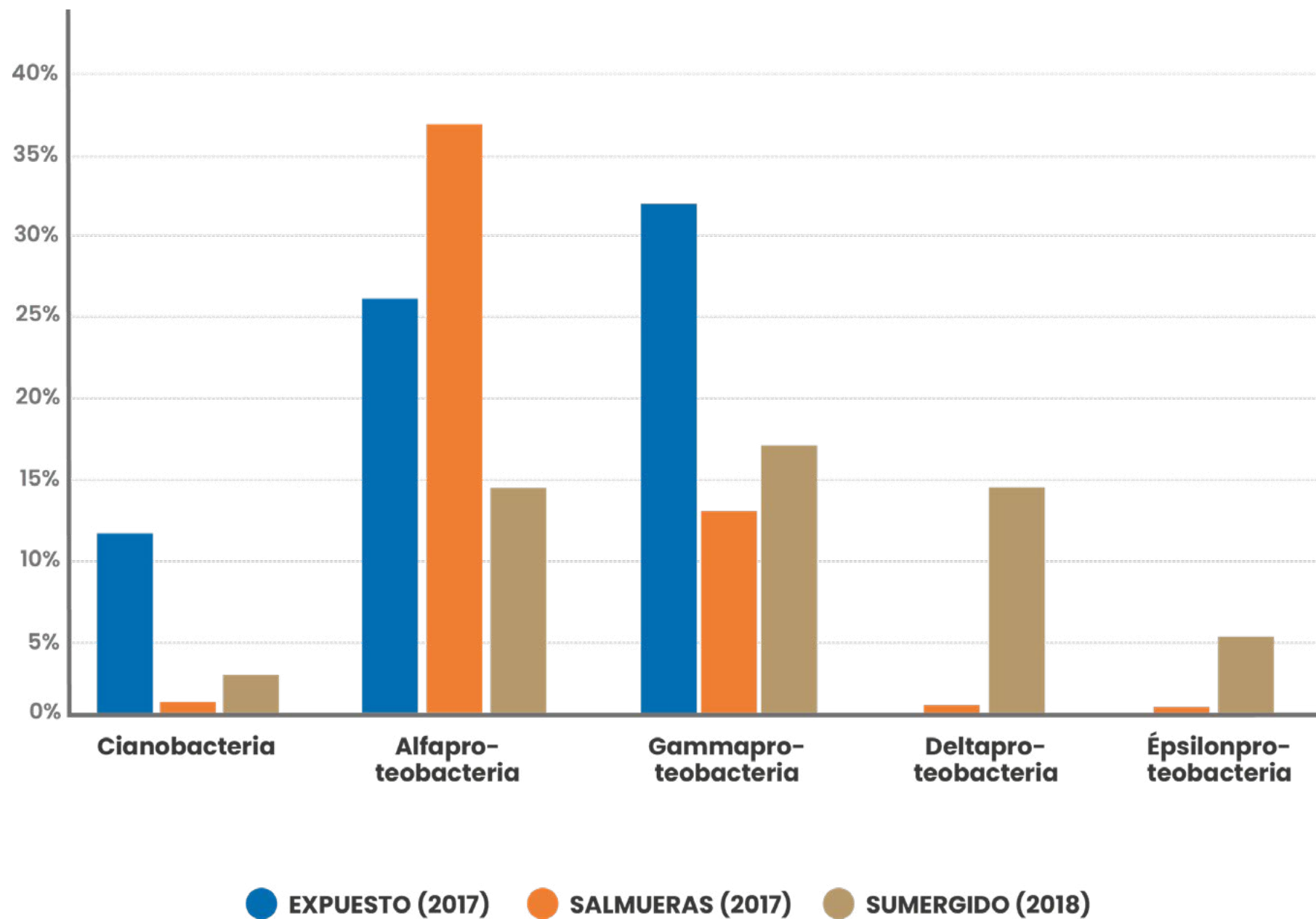


Fig. 13. Abundancia relativa de grupos microbianos predominantes en los tres nichos identificados en los Puquios del Salar de Llamara.

con la especificidad extrema de los otros grupos microbianos en las muestras. Como ejemplo, las arqueas identificadas como *Thermoplasmatales* y *Nanoharchaeas* sólo están presentes en los sitios de mayor humedad (Fig. 15). Desde el punto de vista metabólico; llama la atención la ausencia de mecanismos de fijación de N_2 lo que sugiere la incorporación desde la atmósfera. Las comunidades microbianas de los sitios más cercanos al océano se asemejan más entre sí que con los sitios más alejados, lo que indica que existe un control de las mismas por parte de la intensidad de la niebla costera. En este último nicho, la secuenciación de metagenomas ha permitido reconstruir un genoma casi completo de un nuevo *Thermoplasmatales*, archaea afiliada al Marine Group II, desde el sitio de mayor humedad. Las proteínas ribosomales que pertenecen a este microorganismo fueron identificadas exclusivamente en el sitio más húmedo.¹⁴

En todos los ambientes del Salar de Llamara estudiados existe una gran variedad de microorganismos que no han sido previamente des-

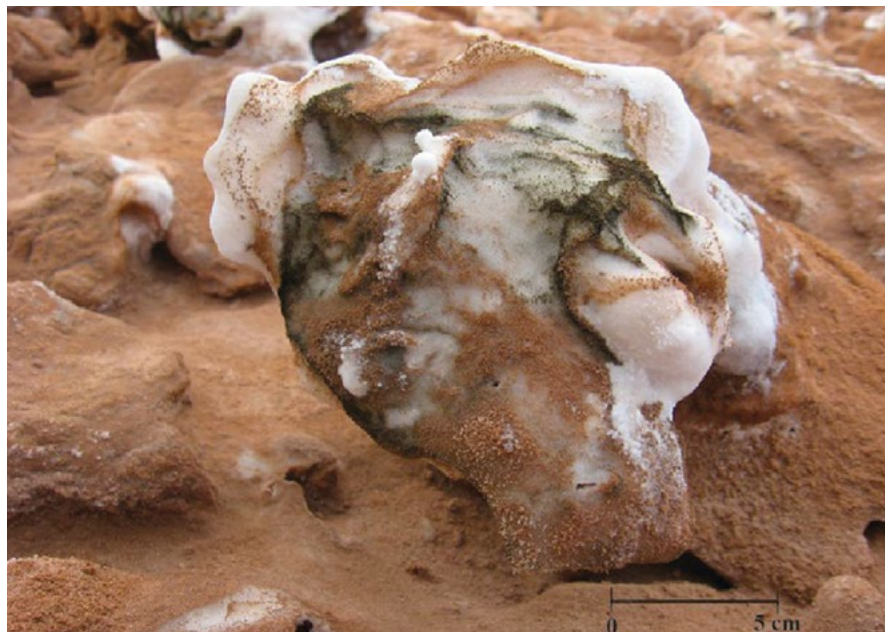


Fig. 14. Acercamiento de la costra salina con coloraciones verde oscuras que indican la presencia de comunidades microbianas.

critos y menos cultivados. Los análisis genómicos y metagenómicos aportan de forma importante a la descripción de la diversidad microbiana.

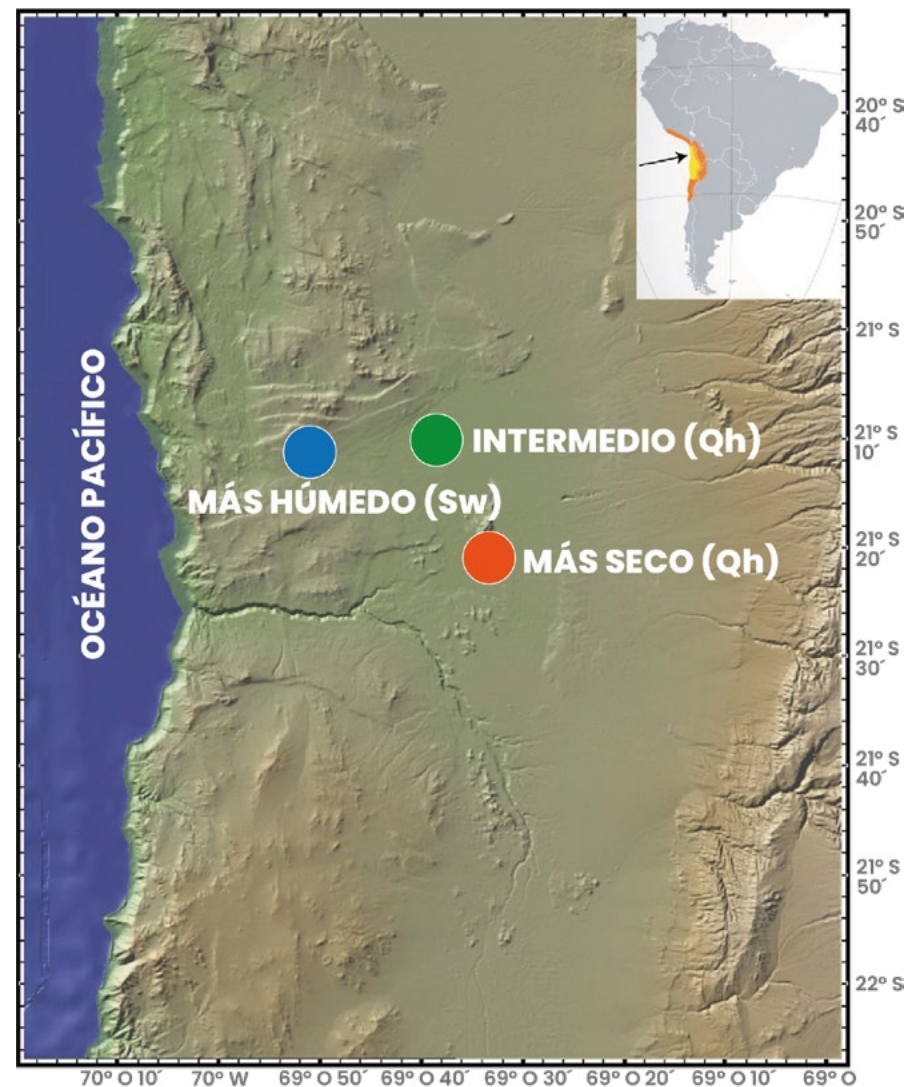


Fig. 15. Localización de los sitios de estudio en el DA. La coloración amarilla en el inserto muestra el sitio de estudio y la naranja muestra la extensión de la zona árida.



Fig. 16. Paisaje de la costra de sal que cubre el Salar de Llamara

4.3 Yacimientos de Nitrato y Yodo

Los yacimientos de Nitratos (Figs. 17 a 21) son depósitos de Minerales Industriales de los cuales se benefician nitratos de sodio y potasio junto a yodo como producto secundario. Su explotación continua se extiende prácticamente desde hace 200 años y a fines del siglo XXI es el yodo la mena principal y el subproducto los nitratos.

La mena se describe como "Caliche" y el producto comercial es el Salitre. Sus singularidades lo separan de cualquier tipo de yacimiento de sales a nivel mundial por factores muy especiales:

- Estos yacimientos son conocidos exclusivamente en Chile y los únicos similares se ubican en China, son de distribución restringida y no incluyen yodo en su mena. En Estados Unidos y en Namibia aparecen concentraciones anómalas de nitratos, pero no llegan a constituir yacimientos. Las sales de mena son escasas, aquí no sólo son abundantes, sino que constituyen yacimientos de millones de toneladas y están todas juntas.
- La génesis de algunas de las sales que los forman, (nitratos, yodatos, cromatos, percloratos) no es un tema resuelto.

- El ensamble total que forma el caliche, esto es nitratos, sulfatos, cloruros, boratos, yodatos, perclorato corresponde a sales solubles que se han desplazado, concentrado y diluido en diversos procesos climáticos por millones de años, pero no han desaparecido arrastradas hasta el mar.

El mayor experto en los yacimientos de nitratos, el geólogo G.E. Ericksen acota que "In fact, they are so extraordinary that, were it not for their existence, geologists could easily conclude that such deposit could not form in nature".²⁹

Estos depósitos se extienden a lo largo de una franja de 700 km en el Desierto de Atacama y se ha escogido su estudio en CLI porque aquí, y en sitios aledaños accesibles, se ubica una concentración que incluye prácticamente la totalidad de los tipos de yacimientos conocidos. Asimismo, la asociación de los yacimientos de nitratos con distintos tipos de salares en este lugar, permite establecer diferentes características y conclusiones sobre estos depósitos.

En este tema se estima incluir como "puntos complementarios", antecedentes de la Oficina María Elena, ex Oficina Chacabuco y Cantón de Aguas Blancas.



Fig. 17. Vista panorámica de campos explotados en la extracción del caliche ("Calicheras"). Se ubican en un "valle" en el límite oriental de la Cordillera de la Costa. Hacia el fondo se observa una mancha oscura que corresponde a bosques de tamarugos en la Pampa del Tamarugal (Depresión Central).



Fig. 18. Explotación de caliche en minas subterráneas por sistemas de piques y caserones.

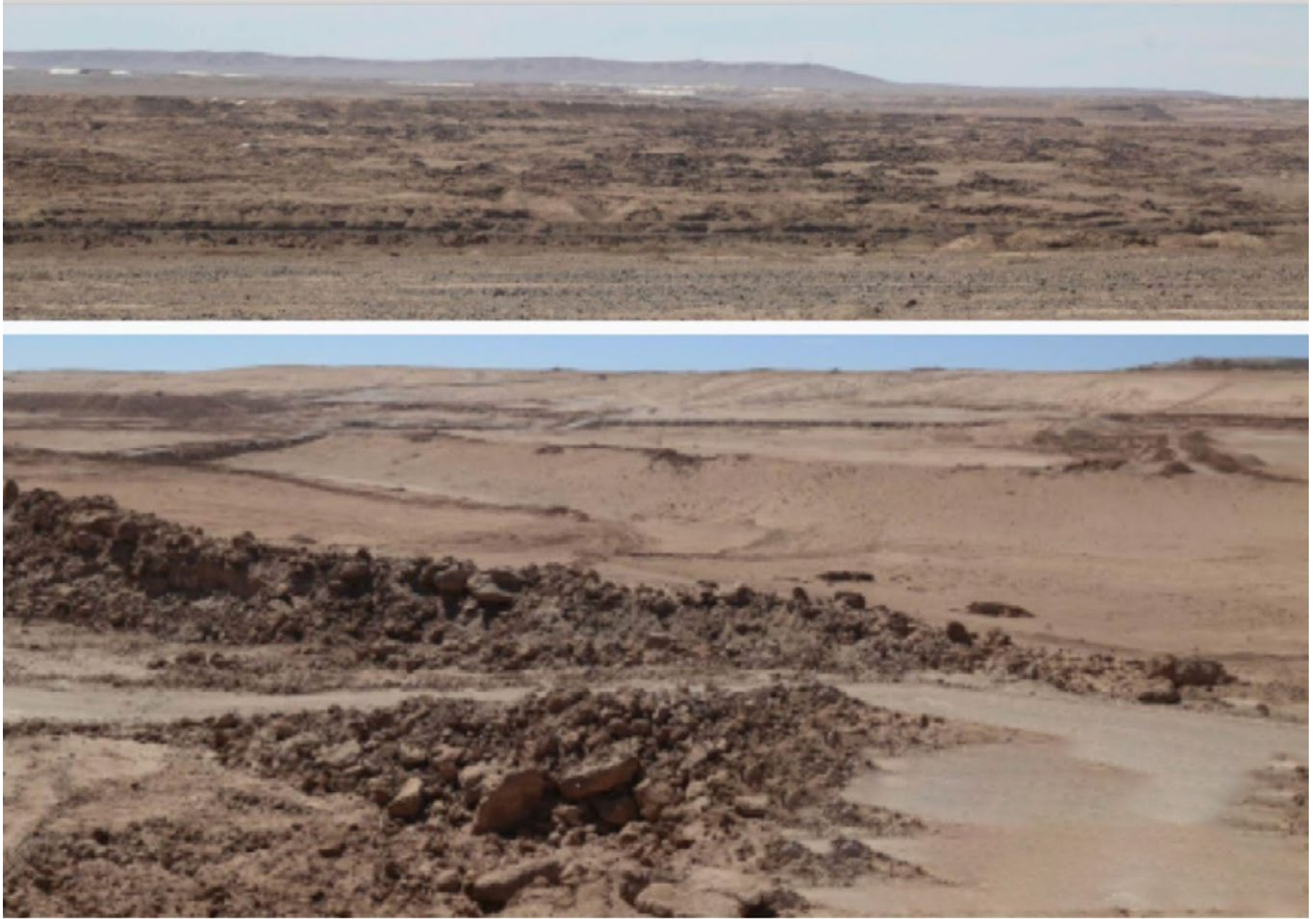


Fig. 19. Yacimientos sedimentarios de nitratos en las típicas pampas salitreras.



Fig. 20. Yacimientos de nitratos tipo vetas y mantos. Estos yacimientos se explotaron con minería subterránea, hasta 25 – 30 m de profundidad.



Fig. 21. Una de las más características distribución de yacimientos de nitratos en la Pampa del Tamarugal, es a lo largo del borde occidental de la Cordillera de la Costa, asociándose con salares que cubren la continuidad de los yacimientos.

4.4 Hidrografía de la cuenca de Llamara

Es un tema que, en la Pampa del Tamarugal, necesita un amplio proceso de revisión en la parte hidrogeológica, especialmente de aquella existente por parte de las empresas y otras relacionadas con aspectos de protección ambiental y la Dirección General de Aguas (DGA). En este aspecto la cuenca que se propone incluye mucha información en relación con su desarrollo geológico, procesos de recarga, naturaleza de las aguas, etc.

4.4.1 Cuenca hidrográfica del Salar de Llamara

La cuenca hidrográfica del Salar de Llamará es endorreica, es decir, ningún flujo superficial de agua fluye fuera del sistema hidrográfico. No obstante, la cuenca está conectada hidrogeológicamente al sur con el río Loa y la quebrada Amarga, por lo que la DGA la considera como subcuenca de la cuenca del río Loa.^{30,31}

La cuenca del Salar de Llamará limita por el norte con la quebrada de Chipana, por el sur con el río Loa (antes de su desembocadura), al este con la parte occidental de la Cordillera de Domeyko y al oeste con los afloramientos de roca impermeables correspondientes a la Cordillera de la Costa.

La cuenca hidrográfica presenta varias cuencas afluentes que, en general, se agrupan en 3 grandes subcuencas (Fig. 22). Las subcuencas son las siguientes^{31,32} (DICTUC, 2007; Moreno, 2022):

- Subcuenca del área drenada por la quebrada de Guatacondo.
- Subcuenca de “Maní y otras”, que comprende, de norte a sur, las quebradas de Pintados, Maní, Piscala y Sipuca.
- Subcuenca denominada “Mal Paso y otras”, que comprende al conjunto de quebradas que acceden a Llamará por el Suroeste, drenando las áreas que alimentan subterráneamente el sector sur del salar. De norte a sur, las quebradas que componen esta subcuenca son las quebradas de Tilpa, Pucana, Sama, Cerrillos, Tambillo, Mal Paso y Arcas.

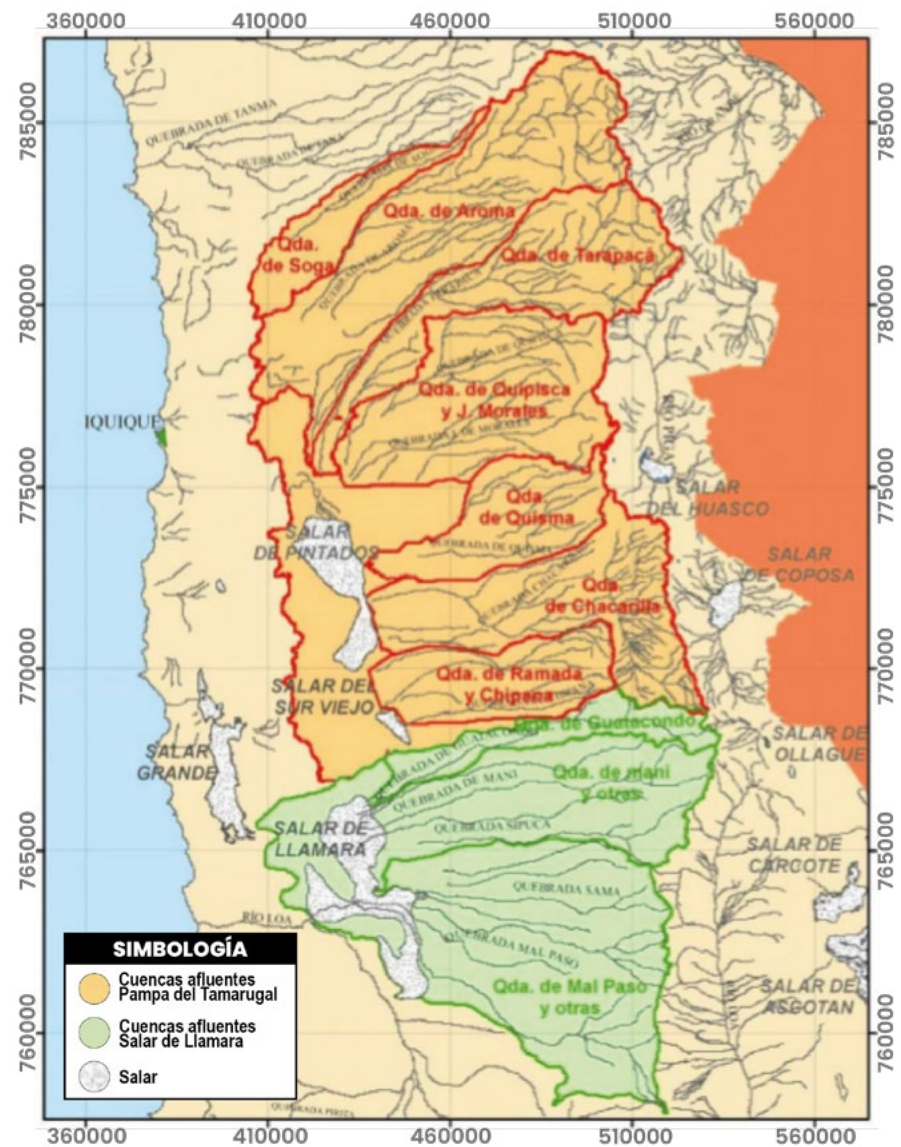


Fig. 22. Esquema general de la cuenca del Salar de Llamará y sus subcuencas afluentes. Las principales quebradas que alimentan el acuífero del Salar de Llamará se enumeran de norte a sur en quebradas de Guatacondo, Maní, Sipuca, Sama y Mal Paso^{31,32}.

4.4.2 Componentes del sistema hídrico

4.4.2.1 Precipitaciones y recargas pluviométricas

Las recargas del acuífero del Salar de Lllamará ocurren producto de la precipitación, escorrentía y por flujos subterráneos³³, ingresando al acuífero por su borde oriental como consecuencia de las precipitaciones que ocurren en la parte alta de las quebradas ubicadas en la Cordillera de Domeyko.³⁴

En la cuenca del Salar de Lllamará, y en las subcuencas afluentes, se estima que en las áreas ubicadas bajo los 3.000 m s.n.m. no se genera una recarga importante, producto de las escasas precipitaciones y que sus recursos se consumen directamente por evaporación. Entre los 3.000 y los 4.000 m s.n.m. se generan escurrimientos superficiales, producto de la escorrentía directa de la precipitación, logrando recargar el acuífero. Finalmente, sobre los 4.000 m s.n.m. Se generan la mayor parte de los escurrimientos superficiales a través del flujo base, y un importante porcentaje de la recarga a los acuíferos a través del proceso de percolación.^{31,35}

La precipitación ocurre en la parte alta de la cuenca, principalmente en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, recibiendo más del 50% de su precipitación anual durante estos cuatro meses de verano³⁶. La estimación de la precipitación para cada subcuenca es: Subcuenca de Guatacondo: se ha considerado que varía mucho según las fuentes.

Para Maní y Mal Paso, se estima una precipitación media de la cuenca en 91 mm/año y 47 mm/año, respectivamente³⁵.

En la estación de Collahuasi se han obtenido valores medios anuales que oscilan entre 133 mm/año y 150 mm/año³³.

4.4.2.2 Escorrentía superficial (circulación de agua en las quebradas)

En la Cuenca del Salar de Lllamará no existen flujos superficiales per-

manentes que alcancen el acuífero del Salar de Lllamará (DICTUC, 2007), sin embargo, se han estudiado los escurrimientos para las subcuencas de Guatacondo, Maní y Mal Paso, donde se estima que dicho caudal varía de 18 a 40 L/s³³.

La cuenca de este salar drena hacia el río Loa por el sector de Calate a una altura aproximada de 800 m s.n.m. La contribución de la cuenca del salar al río Loa ocurre sólo cuando hay una importante acumulación de recursos superficiales. Los tributarios de la cuenca se encuentran en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, y sus cursos superficiales son efímeros. Específicamente, estos provienen de las quebradas que descienden de las cumbres andinas, alimentadas por las lluvias de verano que se producen en el Altiplano. De la Cordillera de la Costa prácticamente no se recibe recarga debido a la inexistencia de precipitación en ella.^{31,34}

4.4.2.3 Flujo de aguas subterráneas

El principal medio por el cual se recarga el acuífero del Salar de Lllamará³⁴ es mediante un flujo de agua subterránea, y se estima que la recarga por este medio se produce desde:

- Las subcuencas Quebrada de Guatacondo y Quebrada de Maní y otras, por el Noreste, y
- La subcuenca Quebrada de Mal Paso y otras por el extremo Sur.

Se descarta una recarga desde la caja del río Loa por el extremo sur, ya que afloramientos intrusivos graníticos cretácicos lo impiden³². Se han estimado valores del flujo subterráneo en el relleno aluvial que varían entre 0.0026 L/s y 0.0064 L/s a lo largo de la quebrada de Guatacondo³³.

La recarga total del acuífero del Salar de Lllamará ha sido estimada por DICTUC en base a los datos obtenidos en la quebrada de Guatacondo, en la quebrada de Maní y la quebrada de Mal Paso, dando un total estimado de la recarga entre 500 y 600 L/s (Tabla 3)³³.

Tabla 3. Caudales de recarga de las diferentes subcuencas al acuífero del Salar de Llamará en L/s³³.

ÍTEM	IRH 1983	DICTUC 1994	DICTUC 2003	DICTUC 2006b
Guatacondo	-	105	122	91
Maní y otras	-	223	291	215
Mal Paso y otras	-	-	202	236
Total Salar de Llamara	350	328	615	542

4.4.2.4 Descarga del acuífero del Salar de Llamara

El acuífero se descarga de manera natural mediante cuatro mecanismos, y son los siguientes³¹:

- La evaporación: ocurre directamente desde el agua subterránea y corresponde a la principal salida del sistema;
- La descarga superficial hacia quebrada Amarga: corresponde a un afloramiento de agua subterránea que se canaliza por la quebrada y que finalmente se transforma en afluente del río Loa;
- Descarga subterránea directa hacia el río Loa: ³⁴ ha demostrado la existencia de esta conexión, pero, no obstante, no representa un caudal significativo;
- Descarga por transpiración del bosque de Tamarugos: es escasa debido a la baja densidad del bosque; y
- Descarga artificial representado por la extracción de los pozos de bombeo³² desde febrero de 2006 existe este proceso de descarga de las aguas subterráneas.

4.4.2.5 Evaporación

Mediciones de evaporación en terreno realizadas por³⁵ aportaron un valor medio de 6,09 mm/d para la tasa de evaporación superficial media anual. Asimismo, en los puquios se observa un valor promedio

de la tasa de evaporación superficial de 5,14 mm/d para el mes de agosto³⁷.

4.4.2.6 Descarga por la Quebrada Amarga

La Quebrada Amarga, ubicada en el sector centro oeste del Salar de Llamará, presenta la particularidad de ser un lugar donde aflora agua subterránea proveniente del acuífero que subyace la zona, la cual actúa como afluente del río Loa. Se ha estimado³² que hasta el 2007 el caudal se ha mantenido bastante constante, el cual se determina en un caudal promedio de 71 L/s en la Quebrada Amarga.

4.4.2.7 Descarga artificial mediante extracción de los pozos de bombeo

En total, actualmente existen 7 Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) subterráneos otorgados en el acuífero del Salar de Llamará que corresponden a 244,7 L/s³³.

4.4.2.8 Cuerpos de agua superficial

En el sector central del Salar de Llamará, cercano al Cerro Soledad, se ubican cuerpos lacustres de pequeña superficie, los que se deben al afloramiento de agua subterránea producto del hundimiento del terreno superficial y que consisten en estructuras denominadas localmente como 'puquios' ³¹. La superficie de los cuerpos de agua no supera las 0,6 ha y presentan una profundidad variable entre 80 y 20 cm.

A principios del año 2007 los puquios fueron objeto de bombeo directo de camiones aljibes que disminuyeron su nivel de agua aproximadamente en un 50 %. A partir del mes de abril de 2007, SQM inició el monitoreo del nivel en cinco puntos de control³¹.

4.4.3 Balance hídrico

El balance hídrico del acuífero del Salar de Llamará previo a febrero de 2006 está en equilibrio, dado que el sistema de entradas y sali-

das a largo plazo en esta cuenca endorreica se encuentra en equilibrio natural³¹. No obstante, esta situación cambia cuando se inician las extracciones, resultando en un balance hídrico negativo (Tabla 4).

Tabla 4. Balance hídrico del acuífero Salar de Llamará³³.

	DICTUC, 1994 DGA, 1997	DICTUC 2006
Recarga media (l/s)	328	542
Descarga total (l/s)	327	578,7
Balance (l/s)	0	-36,2

4.4.4 Hidrogeología

Desde el año 2006 el acuífero del salar está siendo explotado por la empresa SQM como parte del proyecto Pampa Hermosa³⁴. Debido a la importancia del recurso hídrico para el salar, se han realizado monitoreos mediante un Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH) por parte de SQM³¹.

El acuífero del Salar de Llamará se encuentra conformado por depósitos cuaternarios y terciarios en una sucesión de capas alternadas de material aluvional y evaporitas, lo que le confiere propiedades hidráulicas con gran variabilidad espacial. Se define como un sistema compuesto por dos unidades, y son las siguientes:

- Unidad Superior: representa las unidades superficiales (entre 20 a 70 m de profundidad) que en ciertas zonas presentan una permeabilidad muy baja; y
- Unidad Inferior: presenta una potencia de 200 m, en promedio, y representa las unidades más permeables. Las mejores condiciones para el flujo se presentan en el acuífero inferior.

La recarga hídrica en el acuífero se realiza por su borde oriental, producto de las precipitaciones que ocurren en la parte alta de las quebradas ubicadas en la Cordillera de Domeyko³⁴ y ésta es transmitida al acuífero por flujo superficial, subsuperficial y principalmente como flujo subterráneo. Con respecto al escurrimiento subterráneo, el flujo en el área al norte del Cerro Soledad se establece de acuerdo con la siguiente trayectoria de flujo de las aguas subterráneas³¹.

- De Este a Oeste: siguiendo las líneas de recarga en la zona de la Cordillera;
- De Norte a Sur: una vez que se infiltra el agua de recarga en la parte baja del acuífero.

El agua subterránea, luego de ser fuertemente evaporada en el área central, sigue su trayectoria hacia el sur y, pasado el cerro Soledad, se junta con el agua proveniente de la recarga generada por las quebradas de Mal Paso y otras, para finalmente descargar a través de la quebrada Amarga y, directamente, hacia el río Loa.

4.5 Relación de la cuenca con el Río Loa

La CLI tiene una estrecha relación con la parte final del curso del Río Loa, el río más largo de Chile con 440 km de longitud, una cuenca hidrográfica del orden de 33.500 km² y atraviesa la totalidad del territorio del norte de Chile. Su parte más desconocida es aquella aledaña a la Cuenca de Llamará, su biodiversidad es poco conocida e incluye diversos sitios arqueológicos.

El Río Loa muestra una conexión en tiempos geológicos más recientes, con la Cuenca de Llamará a través de la Quebrada Amarga y se estima que drenó total o parcialmente, su sistema lacustre. Esto parece evidenciado por el marcado cambio morfológico que se inicia hacia el oeste, en el punto de confluencia Río Loa-Quebrada Amarga (Figs. 23, 24, y 25).



Fig. 23. La imagen muestra el caudal actual del Río Loa en su desembocadura en el mar, el cual no supera los 10 m.



Fig. 24 Imagen del cañón del mismo río en el borde occidental de la Cordillera de la Costa. El contraste que se observa entre el actual curso del río y las dimensiones de su valle, demuestran la evolución de este drenaje en el pasado geológico.



Figura 25. a) La imagen muestra el tipo de relieve, un cañón profundo y con un perfil de V, de cientos de metros de profundidad y que corta salares probablemente del Plioceno/Pleistoceno. Esta forma de relieve se asume producto de un incremento significativo del caudal y energía del río debido a la captación de aguas del paleolago Soledad. b) Se observa el curso del mismo río antes de conectarse con Quebrada Amarga en la Cuenca de Llamara. La imagen muestra el curso que transcurre a través de una quebrada no superior a los 100 m, en forma de U, en cuyo fondo el río transcurre incluso formando pequeños meandros.

4.6 Biodiversidad de ambientes desérticos extremos (hiperáridos) en la cuenca

4.6.1 Flora y fauna

La Biodiversidad en la CLI y sitios aledaños muestra una gran variedad especialmente de flora especializada y/o endémica. Es, por ejemplo, el caso de Tillandsia ("Claveles del aire") asociadas a las "dripping fogs" lo que permite considerarlas como "bio-indicadores" climáticos. En el caso de la Pampa del Tamarugal están presentes los restos de los antiguos bosques y plantaciones recientes de tamarugos (*Prosopis tamarugo*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*) y pastos como la grama salada (*Distichlis spicata*). También se reconocen una gran variedad de cactáceas que se distribuyen tanto en la Cordillera de la Costa como en la Pre y Alta Cordillera descritos³⁸ y una variada flora costera asociada a la "camanchaca" descrita³⁹. Los aspectos de fauna no tienen un repertorio bibliográfico muy conocido. En el conocimiento de la CLI estimamos que hay algunos temas que podrían ampliarse en su conocimiento como, por ejemplo, parte de la flora de sectores del Río Loa y aquella asociada a las costras salinas de los distintos tipos de salares. (Fig. 26, 27, 28 y 29).

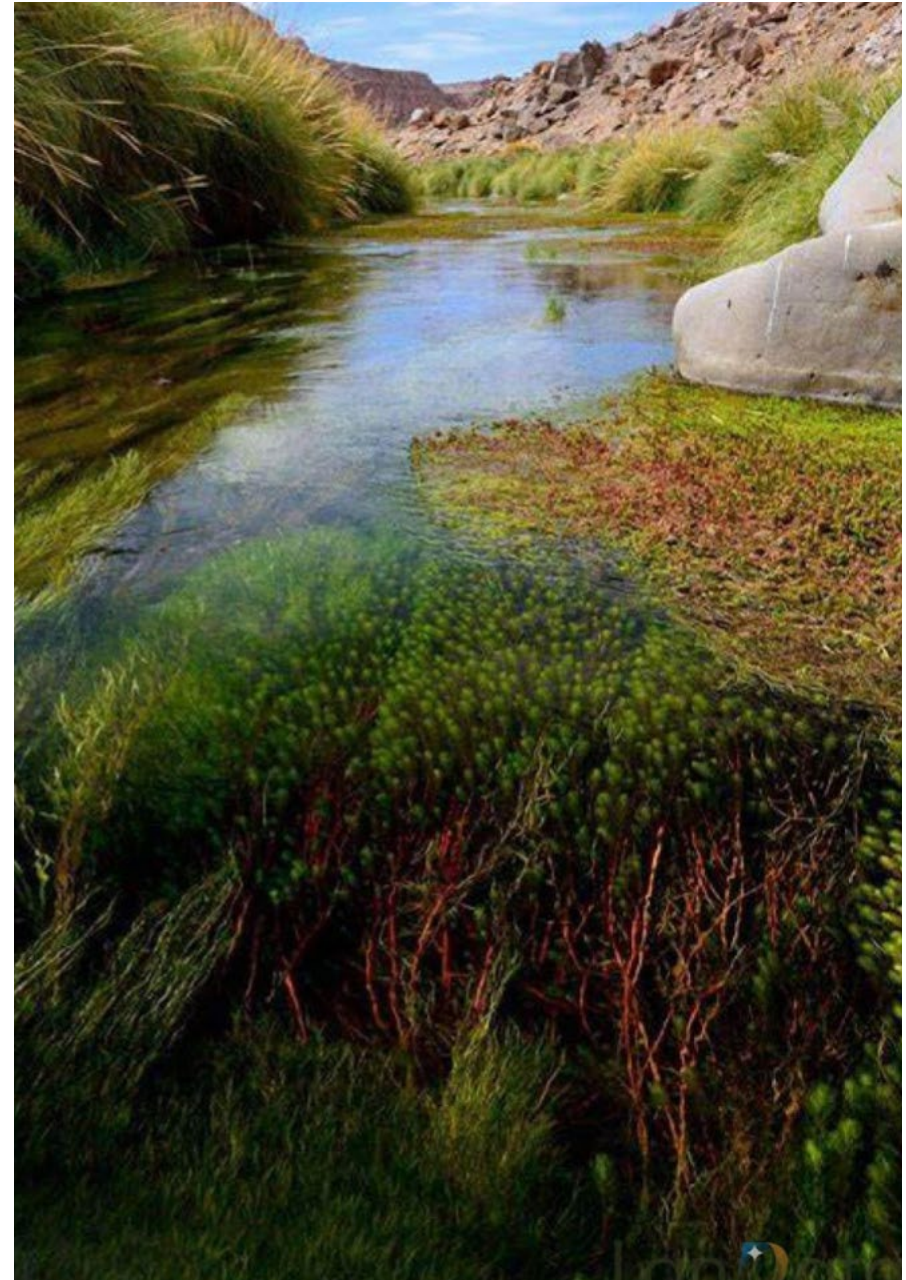


Fig. 26. Flora en el curso del Río Loa.



Fig. 27 Aspecto de las "dripping fogs" o camanchacas en su etapa inicial.



Fig. 28. Flora costera en la Cordillera de la Costa.



Fig. 29. Ejemplares de Tillanndasia.

4.6.2 Microbiología y Geomicrobiología de la cuenca

La estrecha relación que poseen estos temas, se vinculan a: La elevada capacidad para la preservación molecular de las costras salinas¹⁴ y subsuelos, asociadas a unidades deposicionales y mineralógicas diferentes⁴⁰ que evidencia mediante análisis metagenómicos una diversidad de microorganismos halófilos especializados, lo que permite completar la evolución en una escala acotada de tiempo. Se agrega que la precipitación biótica y abiótica en las estructuras de "sink koles" ("puquios") proporciona información adicional sobre la génesis de las evaporitas⁴¹ y que la variedad de costras en distintos lugares de la cuenca muestra, macroscópicamente, diversas manifestaciones de la presencia de microorganismos en estructuras subaéreas (costras) y subacuáticas (tapetes microbianos y sedimentos)^{17,42,43,44} (Fig. 30, 31, 32 y 33).

Los suelos de la zona se han descrito entre los de mayor hiperaridez^{45,46}. Más recientemente, se han observado comunidades microbianas en la superficie de depósitos evaporíticos⁴⁷. La clave de la supervivencia microbiana es que la halita se disuelve con una humedad relativa atmosférica superior al 75%, creando una solución altamente salina en sus poros minerales⁴⁸.



Fig. 30. La imagen muestra microorganismos (verde claro) en la facies de yeso de la Cuenca de Llamará.



Fig. 31. La imagen muestra tapices bacterianos sobre las costras de cloruro de sodio del Salar Grande.



Fig. 32. La imagen muestra líquenes en las fallas del Sistema de Fallas de Atacama en el Salar Grande.



Fig. 33. Se muestran los puquios de Lllamará o de Guatacondo con construcciones bacterianas en yeso

4.7 Desarrollo de la Astrobiología en la Cuenca de Llamara

En 2010 se estudiaron muestras del Salar Grande que revelaron organismos fotosintéticos capaces de colonizar el interior de cortezas de halita, como una adaptación a condiciones de extrema sequedad⁴⁹. Mediante técnicas espectroscópicas se detectaron biomoléculas sensibles a la luz UV que podrían ser usados como biomarcadores de este tipo de estilo de vida.

Todo esto sugiere que depósitos similares en Marte podrían haber provisto condiciones habitables para microorganismos en el pasado y que aún podrían preservar rastros de moléculas orgánicas, lo cual los hace importantes blancos de investigación en futuras misiones en el planeta rojo.

Por otra parte, en 2009 hubo una campaña de perforación en una locación adyacente a Salar Grande, en colaboración con investigadores de este proyecto. En 2011 se publicó el primer análisis de estas muestras a diferentes profundidades⁵⁰. En particular, se validó la utilización de un chip de "detección de vida", que incluye 300 anticuerpos para la detección de diferentes tipos de biomoléculas. Así, la caracterización geoquímica y biológica permitió revelar la existencia de un hábitat hipersalino en la subsuperficie que incluye microorganismos bacterianos y arqueales.

La presencia de minerales higroscópicos permite la retención de agua en estos hábitats. Más tarde, en 2013 se diseñó un sistema de anticuerpo para la detección de ácidos policarboxílicos, los cuales fueron detectados a diferentes profundidades⁵¹ de la perforación mencionada. De esta forma, es esperable que una acumulación de compuestos orgánicos también pueda ser detectada en Marte, bajo metros de regolito protegidos de la degradación total por la radiación UV altamente oxidante.

4.8 Energías limpias en la Cuenca de Llamara

El tema de las energías limpias es transversal y el campo de aplica-

ción en el área es de primer orden toda vez que reúne la casi totalidad de los factores requeridos para su aplicación.

4.9 Nuevos recursos en la Cuenca de Llamara

Desde el punto de vista industrial nuestros trabajos han identificado recursos de Minerales Industriales que pueden ser considerados, en este sector, como nuevos y cuyo potencial se debe evaluar. Es el caso, por ejemplo, de diatomitas y sal (Fig. 34 y 35).

4.10 Presencia del Hombre en la Cuenca de Llamara

En lo que dice relación con la habitación del hombre en los ambientes desérticos, esta cuenca es parte fundamental de sitios asociados a la prehistoria e historia. Está incluida en la Región de Tarapacá que cuenta con numerosos registros, algunos únicos y, en casos, excepcionales de la Prehistoria del Norte Grande de Chile. En una síntesis muy general se incluyen sectores del Camino del Inca, aldeas del Preformativo como las de Ramaditas y Guatacondo⁵², sitios de arte rupestre solo superados por los de Nazca y su postulación a Patrimonio Mundial de la Humanidad, como los de Pintados y el Gigante de Tarapacá con sus geoglifos y petroglifos⁵³. Se suman las rutas caravanas con todos sus sitios arqueológicos relacionados, que conectaban las actuales Amazonia y Pampa Argentina en sentido amplio con la costa del Pacífico.

En este marco debe incluirse la parte histórica que incluye, de manera principal, las epopeyas peruana y chilena de la Industria del Salitre, separadas por el conflicto bélico de mayor envergadura en América como lo fue la Guerra del Pacífico. Con posterioridad a este evento, que trajo a Chile la mayor opulencia económica de toda su historia, se generan los eventos que dieron origen a importantes cambios sociales a través de procesos reivindicativos con huelgas y clima de efervescencia social. Esto marcó hechos que son trascendentales en la historia de Chile como las matanzas de la Escuela Santa María, Oficinas San Gregorio y La Coruña y la Revolución de 1891.

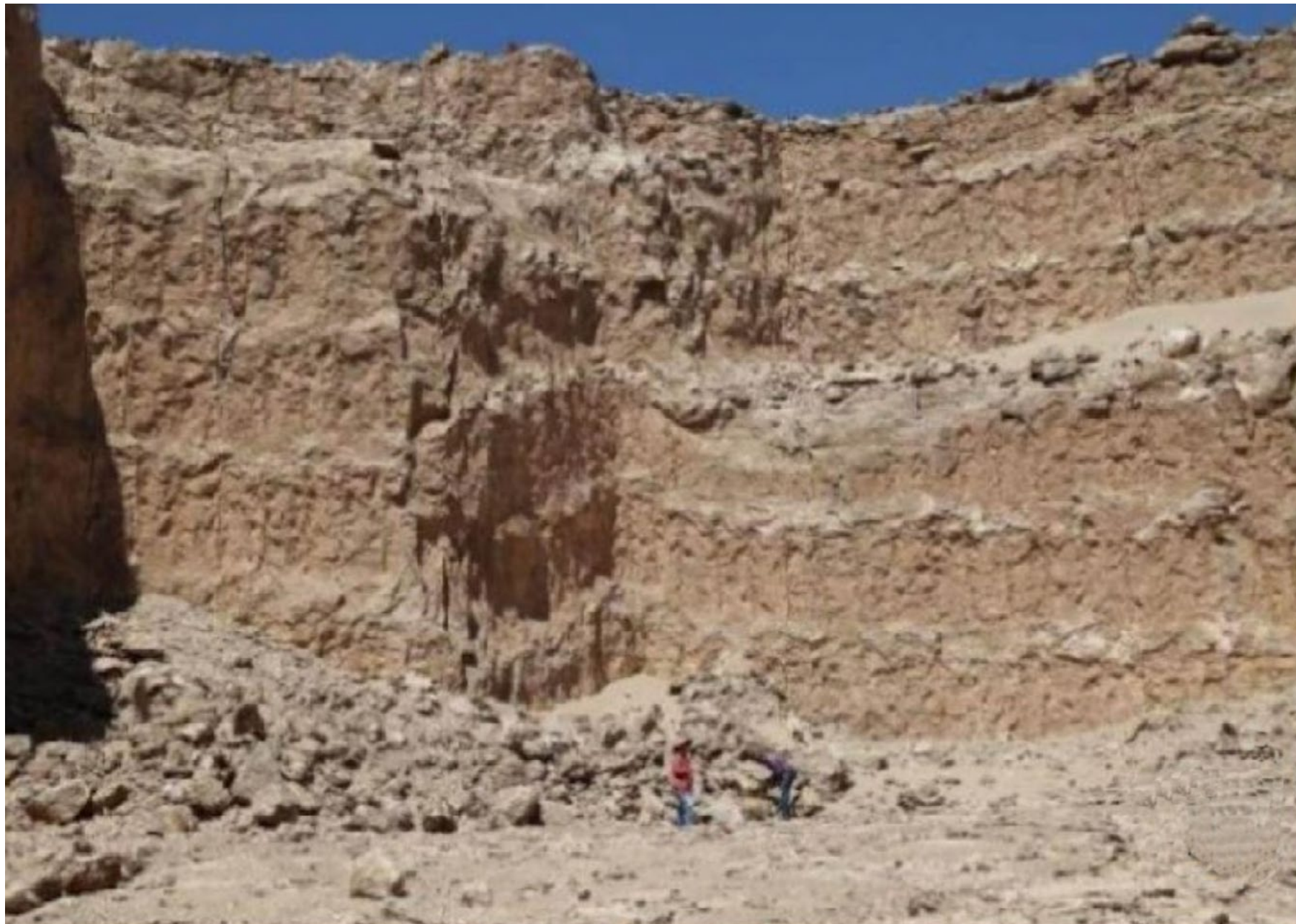


Fig. 34. Sal en grandes volúmenes en las Lomas de la Sal.



Fig. 35. Diatomitas entre Quillagua y Lomas de la Sal.

Resulta importante hacer una citación especial asociada al arte rupestre del desierto, en el caso de los geoglifos se trata de una modalidad arte rupestre, originalmente descritos como "Pebble Drawings", "Pintados" o "Indian Writing" y son obras ancestrales de personas de Perú, Bolivia, Argentina y el norte de Chile y, subordinadamente, en Brasil, Estados Unidos, Inglaterra y Australia. Los más famosos son los de Nazca, Sitio de Patrimonio Mundial de la Humanidad. Actualmente se gestiona la declaración del Sitio de Pintados y el Gigante de Tarapacá, como Patrimonio de la Humanidad a través de la Fundación Geoglifos de Tarapacá.

Son paneles con figuras antropomorfas, zoomorfas, geométricas y de

mensaje gráfico desconocido que se distribuyen en lugares topográficos relevantes que permitan su visualización a distancia. En el norte de Chile se reconocen desde Arica hasta, aproximadamente Calama y desde la Precordillera hasta la Costa Pacífico. Su construcción corresponde a diversas técnicas y pueden asociarse a petroglifos que son figuras grabadas en roca y pinturas rupestres. Su edad se asigna entre 1000 A.C. y 1550 DC y se asume que fueron puntos de referencia para las caravanas y asociados a diferentes cultos (agua, fertilidad, identificación) de las rutas caravaneras en lugares de referencia de rutas o de descanso. También se le asigna significados religiosos asociados al culto del agua y la fertilidad y como símbolos de identidades étnicas (Fig. 36, 37 y 38).



Fig. 36. Paneles con geoglifos del sitio de Pintados.



Fig. 37. Gigante de Tarapacá del Cerro Unitas.



Fig. 38. Paneles con geoglifos del sitio de Pintados.



Fig. 39. Aldea del Preformativo de Ramaditas. El lugar incluye sitios de agricultura prehistórica en el Sitio de Ramaditas asociados a una aldea con edad estimada del 800 A.C. También se describen los patrones de subsistencia y mantención de los habitantes, las construcciones de regadío, su adaptación medioambiental (Rivera,2005).

4.11 Conflictos presentes en la Cuenca de Llamara

Entre los conflictos que se visualizan resultan significativos aquellos relacionados con el uso del agua desde los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, que han requerido la intervención del Tribunal Ambiental y Mesas de Trabajo del Gobierno Regional de Tarapacá. Además, el impacto que puede significar la actividad minera, el tratamiento del patrimonio, el impacto sobre la biodiversidad, la intervención sobre el

paisaje del desierto y la contaminación directa por basurales abiertos (Figs. 40, 41 y 42).

En esta etapa de diagnóstico se consideran posibilidades asociadas a distintas posiciones de comunidades, eventuales situaciones especiales con empresas mineras, presencia de arsénico en el agua y uso del agua en general.



Fig. 40. Basurales abiertos en el desierto. El viento disemina esta basura en espacios de decenas de km².



Fig. 41. Destrucción sistemática del patrimonio. Ex Oficina Salitrera La Gloria.



Fig. 42. Saqueo y destrucción sistemática del patrimonio salitrero.

5. OPORTUNIDADES PARA EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA

El diagnóstico de Landata incluye un análisis estadístico de la literatura científica relacionada con el Desierto de Atacama (DA), tanto producida en el territorio como enfocada en él. Este análisis se orienta a evaluar el volumen de investigaciones, las redes de colaboración y a caracterizar líneas de investigación vigentes. Para ello, en WoS se identificaron topónimos presentes dentro del polígono definido como caso de estudio, los cuales se combinaron con diversos conceptos clave, permitiendo un análisis bibliográfico que incorpora publicaciones sobre territorios o fenómenos contenidos en dicho polígono. La base de datos fue construida a partir del siguiente algoritmo de búsqueda:

TS=((("Soledad" OR "Quebrada Mani" OR "Pintados" OR "Caleta Chipana" OR "Monton de gloria" OR "Quebrada tambillo" OR "Quebrada Mal Paso") AND "Atacama") OR ("Tarapacá" AND "Punta de Lobos") OR "Salar Grande" OR "Llamara" OR "Pozo Almonte" OR "Hilaricos")

Este enfoque presenta una limitación, ya que excluye investigaciones realizadas en el polígono que no mencionan explícitamente los topónimos seleccionados en sus títulos, resúmenes o palabras clave. Por ello, para una comprensión integral de las investigaciones en el DA, este análisis debe complementarse con la información disponible en la ficha extensa de Landata disponible para descarga aquí:



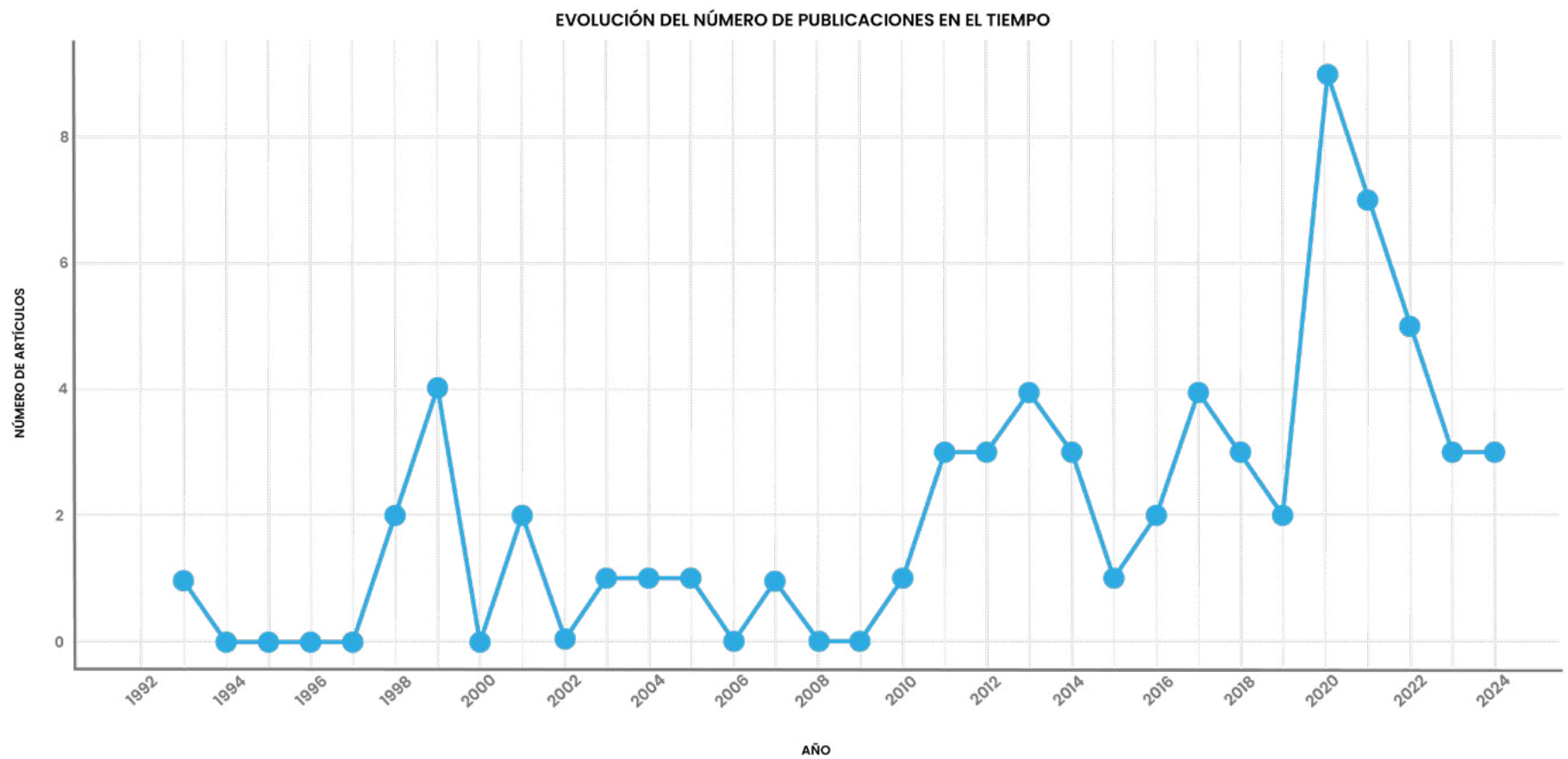


Fig 43. Número de publicaciones identificadas en este caso de estudio a través del análisis bibliométrico del mismo.

Con esta búsqueda se identificaron 66 publicaciones científicas, abarcando desde 1993 hasta 2024. La tasa de crecimiento anual es de 3,61 papers por año (Fig. 43), con un promedio de 27.4 citas por publicación. Las instituciones con mayor producción en el territorio incluyen la U. Católica del Norte, la U. de Colonia, la U. de Antofagasta, la Pontificia U. Católica de Chile y la U. de Barcelona. Respecto a la colaboración internacional, el 65% de las investigaciones en la BBDD fueron publicadas en cooperación entre dos o más países. Según la figura 44, los países con mayor número de publicaciones en el polígono son Chile, Estados Unidos y Alemania.

Se realizó también un análisis de co-ocurrencias de palabras clave para identificar y caracterizar las líneas de investigación, en colaboración con investigadores de Landata expertos en el caso de estudio, lo cual permitió contextualizar los datos. Cada línea se clasificó en función de dos variables: su conexión con el resto del área científica y su cohesión interna, facilitando así la medición de su centralidad y densidad. En la tabla 5, se presentan los nombres de las líneas de investigación, una breve descripción, el número de publicaciones categorizadas y una interpretación de su centralidad y densidad.

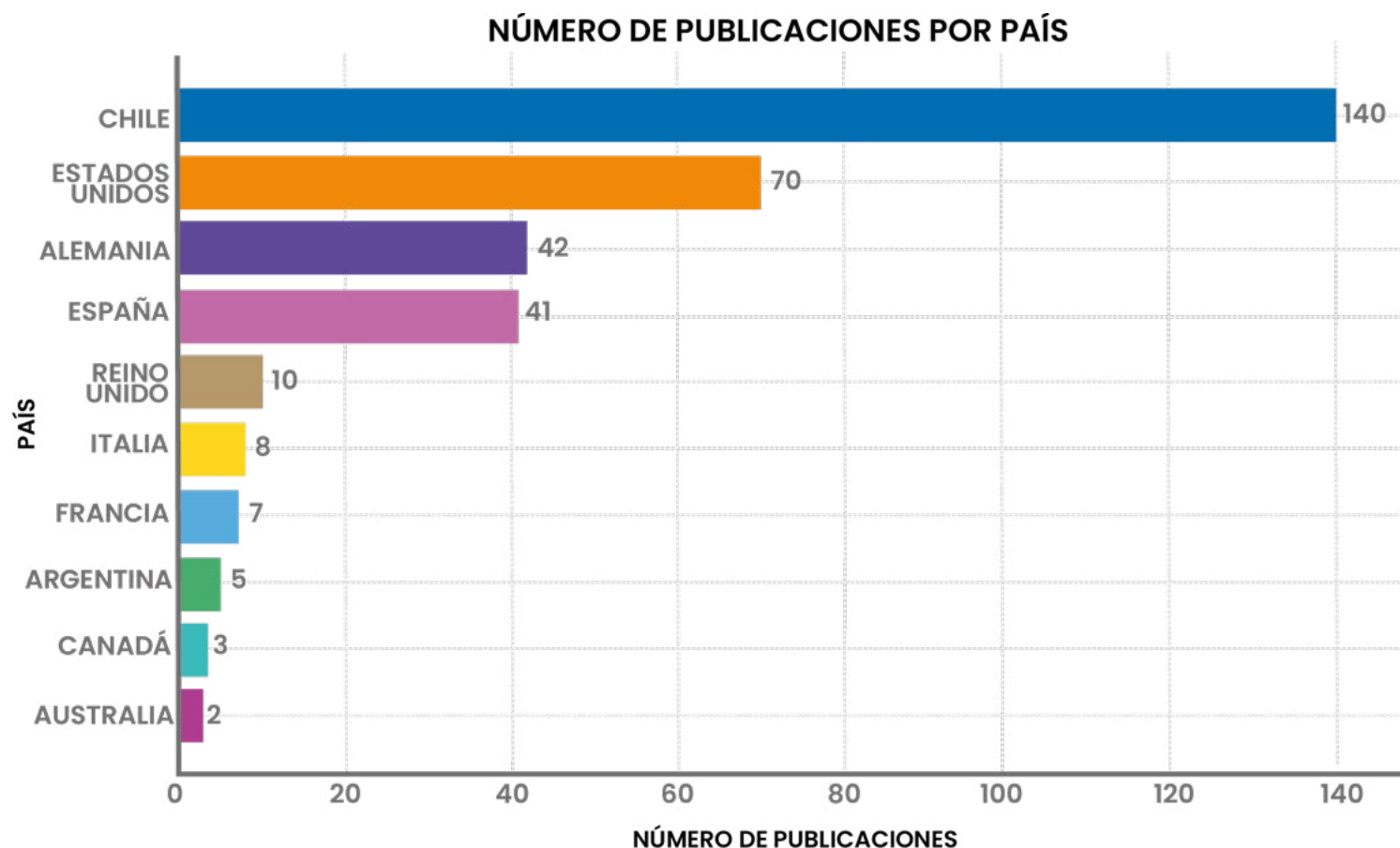


Fig 44. Número de publicaciones por país identificadas en este caso de estudio a través del análisis bibliométrico del mismo.

TABLA N°5: LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Nombre de la línea de investigación	Descripción general de la línea	N° de publicaciones	Posición en la red de clústeres (centralidad y densidad)
Geoquímica de Salmueras y Comunidades Extremófilas en Ambientes Evaporíticos del Salar	Esta línea de investigación examina las interacciones geoquímicas y biológicas que ocurren en los salares del Desierto de Atacama, con un enfoque en la evolución de las salmueras y la adaptación de microorganismos extremófilos. Los estudios abordan cómo los procesos físicos y químicos, junto con las comunidades microbianas, controlan la morfología de los lagos salinos y la composición mineral en estos ambientes hipersalinos. Se investigan también la diversidad genética de procariotas y las rutas evolutivas de las salmueras en sistemas como el Salar de Llamara, proporcionando una visión detallada de la retroalimentación entre la geoquímica y la ecología microbiana en condiciones extremas.	10	Centralidad baja (0,0833): Las conexiones con otros clústeres son limitadas, indicando que es un área especializada pero con cierta relevancia interdisciplinaria. Densidad alta (65,63): Existe una alta cohesión interna entre las publicaciones, reflejando un enfoque temático sólido y consistente.
Formación de Yeso y Evolución Hidroquímica en Ambientes Evaporíticos del Salar de Llamara	Esta línea se enfoca en la evolución mineralógica y geoquímica de las salmueras en el Salar de Llamara, con especial énfasis en la formación de yeso y sus estructuras asociadas. Los estudios abordan los procesos de precipitación evaporítica y la influencia de factores ambientales, como la salinidad y la actividad microbiana, en la morfología de los depósitos de yeso. Se exploran las condiciones extremas de los lagos salinos y cómo estas dan lugar a la formación de estromatolitos de yeso, así como el impacto de los gradientes químicos y físicos en la estratificación de las salmueras. Además, se investiga la cronología de estos depósitos mediante datación con isótopos de uranio-torio y el papel de las sustancias poliméricas extracelulares en la determinación de los tipos de fondo sedimentario.	7	Centralidad nula (0): No presenta conexiones con otros clústeres, lo que sugiere que es un área muy especializada o un nicho de investigación. Densidad alta (72,22): Las publicaciones están altamente interconectadas, indicando una fuerte cohesión temática y un enfoque bien definido.

Nombre de la línea de investigación	Descripción general de la línea	N° de publicaciones	Posición en la red de clústeres (centralidad y densidad e interpretación)
Astrobiología y Biomarcadores en Ambientes Análogos a Marte: El Salar Grande	Esta línea explora el Salar Grande como un análogo terrestre de Marte. Los estudios se centran en la detección y preservación de biomarcadores moleculares en depósitos de halita y otras sales, con el objetivo de comprender mejor los procesos biogeoquímicos que podrían preservarse en condiciones similares en Marte. Se investiga la formación de minerales orgánicos, como oxalatos, y la presencia de biomoléculas asociadas con entornos hipersalinos, subrayando el potencial de estos depósitos en la búsqueda de signos de vida en Marte.	10	Centralidad nula (0): Sin conexiones con otros clústeres, indicando que es un tema de nicho especializado en astrobiología. Densidad alta (65,28): Existe una fuerte cohesión interna entre las publicaciones, reflejando un enfoque temático consistente y especializado.
Nuevos Minerales y Estructuras Cristalinas en Ambientes Minerales Secundarios de Chile	Se centra en la identificación y caracterización de nuevos minerales encontrados en depósitos secundarios en el Desierto de Atacama y áreas circundantes. Los estudios incluyen la descripción de minerales como leverettita, magnesio-koritnigite, canutite y witzkeite, descubiertos en la mina Torrecillas y otros sitios del norte de Chile. Mediante técnicas avanzadas, se determina la estructura cristalina y las condiciones geoquímicas de formación.	8	Centralidad baja (0,0667): Presenta pocas conexiones con otros clústeres, sugiriendo especialización pero con cierto grado de relación interdisciplinaria. Densidad moderada (36,67): Las publicaciones están conectadas de manera aceptable, aunque hay espacio para fortalecer la cohesión temática.
Diversidad de Protistas y Tapetes Microbianos en Ambientes Salinos del Desierto de Atacama	Esta línea examina la diversidad y estructura de las comunidades microbianas en tapetes microbianos de salares y lagunas altoandinas. Utilizando técnicas de metabarcoding, se exploran las comunidades de protistas y su relación con la salinidad, destacando la adaptación a gradientes salinos en ecosistemas extremos. Se aborda la composición y distribución de microorganismos como amebas, ciliados, diatomeas y cianobacterias.	5	Centralidad nula (0): Sin conexiones con otros clústeres, indicando un enfoque especializado en microbiología de ambientes extremos. Densidad moderada-alta (50): Buena cohesión interna entre las publicaciones, reflejando un tema bien delimitado y consistente.

Nombre de la línea de investigación	Descripción general de la línea	Nº de publicaciones	Posición en la red de clústeres (centralidad y densidad e interpretación)
Evaporitas Neógenas y Adaptaciones Microbianas en Halitas del Desierto de Atacama	Se centra en el estudio de depósitos evaporíticos neógenos y las comunidades microbianas adaptadas a las halitas. Los estudios abordan la composición mineralógica de evaporitas y exploran los procesos geológicos que han permitido su preservación en un ambiente árido extremo desde el Mioceno hasta la actualidad. También se investiga cómo las cianobacterias desarrollan mecanismos de resistencia a la radiación UV.	4	Centralidad moderada (0,2083): Tiene conexiones con otros clústeres, indicando relevancia interdisciplinaria. Densidad baja (25): Cohesión interna limitada entre las publicaciones, sugiriendo diversidad temática dentro del clúster y potencial para mejorar la interconexión
Procesos de Evaporación y Formación de Costras Salinas en Ambientes Evaporíticos del Salar de Llamara	Esta línea examina los procesos geoquímicos y físicos impulsados por la evaporación en los salares, enfocándose en la formación de costras salinas y su relación con la dinámica del agua subterránea. Se investiga cómo la evaporación continua contribuye a la precipitación de sales y al desarrollo de perfiles químicos e isotópicos en los suelos, analizando el fraccionamiento isotópico del oxígeno en el agua estructuralmente ligada al yeso.	3	Centralidad moderada (0,1667): Presenta conexiones con otros clústeres, indicando relevancia en contextos interdisciplinarios. Densidad baja-moderada (33,33): Cohesión interna aceptable, pero hay espacio para fortalecer las interconexiones y colaboración entre las publicaciones.

El análisis de las líneas en el caso de estudio evidencia una marcada especialización en el estudio de ambientes extremos del Desierto de Atacama, como salares hipersalinos y depósitos evaporíticos. Estas investigaciones muestran una alta cohesión temática, lo cual sugiere un enfoque profundo en áreas específicas como geoquímica de salmueras, comunidades extremófilas, formación de yeso y astrobiología. No obstante, la baja centralidad revela conexiones limitadas entre las distintas líneas.

Estas investigaciones no solo enriquecen el conocimiento local, sino que también poseen implicancias globales en campos como la astrobiología y microbiología de extremófilos, posicionando al Desierto de Atacama como un entorno clave para estudios de alto impacto y como un análogo terrestre de Marte. La integración de disciplinas y el fortalecimiento de colaboraciones internacionales podrían amplificar

el valor científico de estas investigaciones, contribuyendo al entendimiento y preservación de estos ecosistemas extremos. Sin embargo, la descripción científica destaca áreas no reflejadas en las líneas de investigación actuales, como la importancia arqueológica y cultural de la cuenca, especialmente en relación con el arte rupestre y las rutas caravaneras, y su valor histórico vinculado a la era del salitre y los conflictos sociales de la época. También aborda la biodiversidad única, incluyendo flora endémica y fauna adaptada al ambiente hiperárido, aspectos que no figuran en los enfoques de microbiología y geología predominantes en la investigación actual.

Estos elementos presentan oportunidades para ampliar los estudios hacia la arqueología, la historia socioeconómica y los impactos ambientales, enriqueciendo así la comprensión integral del territorio.



Calicheras ubicadas en el límite oriental de la Cordillera de la Costa.

6. OPORTUNIDADES PARA EL SECTOR PRODUCTIVO

Resultados Cartografía participativa

En los talleres territoriales del caso de estudio Cuenca de Llamara, realizados en la localidad de Pozo Almonte, se identificaron los temas "Impacto Ambiental", "Investigación", "Turismo y Patrimonio" y "Trabajo colaborativo".

En el caso del tema "Impacto Ambiental", se identifican oportunidades para el sector productivo local considerando las ventajas comparativas locales: Fomento de investigación para el aprovechamiento sustentable de los servicios ecosistémicos del bosque de Tamarugos. En el caso del tema "Turismo y patrimonio", se identifican oportunidades para el sector Turismo local cómo: Promoción de un relato turístico coherente con el territorio, fomento de estudio de capacidad de carga turística de la cuenca de Llamará, fomento de interacción entre sector turismo y ciencia.

Resultados literatura gris

En la Cuenca de Llamara, la minería se posiciona como una actividad preponderante, la cual ha generado impactos afectando diversos ecosistemas del Salar de Llamara. De acuerdo con lo revisado en

el análisis a la literatura gris (Fig. 45), se mencionan problemáticas medioambientales que, según se constata, surgen en gran medida por los proyectos mineros presentes en el sector, los cuales generan una alta extracción hídrica.

Se reconocen impactos en el estudio de impacto ambiental (EIA) sobre los tapetes microbianos del Salar de Llamara. La medida de mitigación propuesta por SQM corresponde a un modelo que está fallando. Existen en el EIA una serie de impactos definidos como "de baja importancia", como disminución del caudal del río Loa, el aumento en los niveles de ruido, etc., proponiéndole la siguiente medida de mitigación: inyectar agua a Los Puquios del Salar de Llamara por un periodo de 30 años. Al respecto, actualmente los pozos ancestrales se están quedando sin agua y esa situación no está incorporada en la evaluación de los impactos. Es difícil pensar que se resolverá el impacto sobre la cuenca, ya que la empresa propone extraer agua de otro lugar para inyectar en el salar de Llamara, pero el lugar de extracción corresponde al mismo acuífero, y por tanto la medida en realidad sólo sacará el agua de un lugar y la inyectará en otro lugar en la misma cuenca (Coordinadora por la Defensa del Agua y la Vida, s.f.).

Ello ha generado diversos cuestionamientos y denuncias por parte del sector público como la Municipalidad de Pozo Almonte, organizaciones sociales y vecinales, las que han evidenciado las formas en las que diversas empresas presentes en la zona explotan sus derechos de agua. De hecho, según constata la Coordinadora por la Defensa del Agua y la Vida (s.f.), la comunidad local "reclama un uso ancestral del patrimonio natural y cultural del Salar de Llamara. Pese a esto, la DGA ha negado los derechos de agua a la comunidad y, a su vez, el Ministerio de Bienes Nacionales rehusó legalizar sus posesiones de tierras, al no contar los pobladores con derechos sobre recursos hídricos".

En este contexto, la actividad turística, si bien no ha podido detener el avance de la industria minera en las zonas con conflictos socioambientales, sí ha logrado avances en reconocimiento y visibilización del Sector gracias a la importancia como patrimonio natural que significa

la existencia del Salar y su biodiversidad, promoviendo para el caso de Llamara, la educación ambiental a través de la instalación del Centro de Educación Ambiental (CEDAM), circuito turístico que al mismo tiempo se ve enriquecido por la herencia arqueológica de la zona y

por la presencia de comunidades indígenas. En suma, las grandes temáticas analizadas en la literatura gris, se sintetizan en el siguiente esquema:

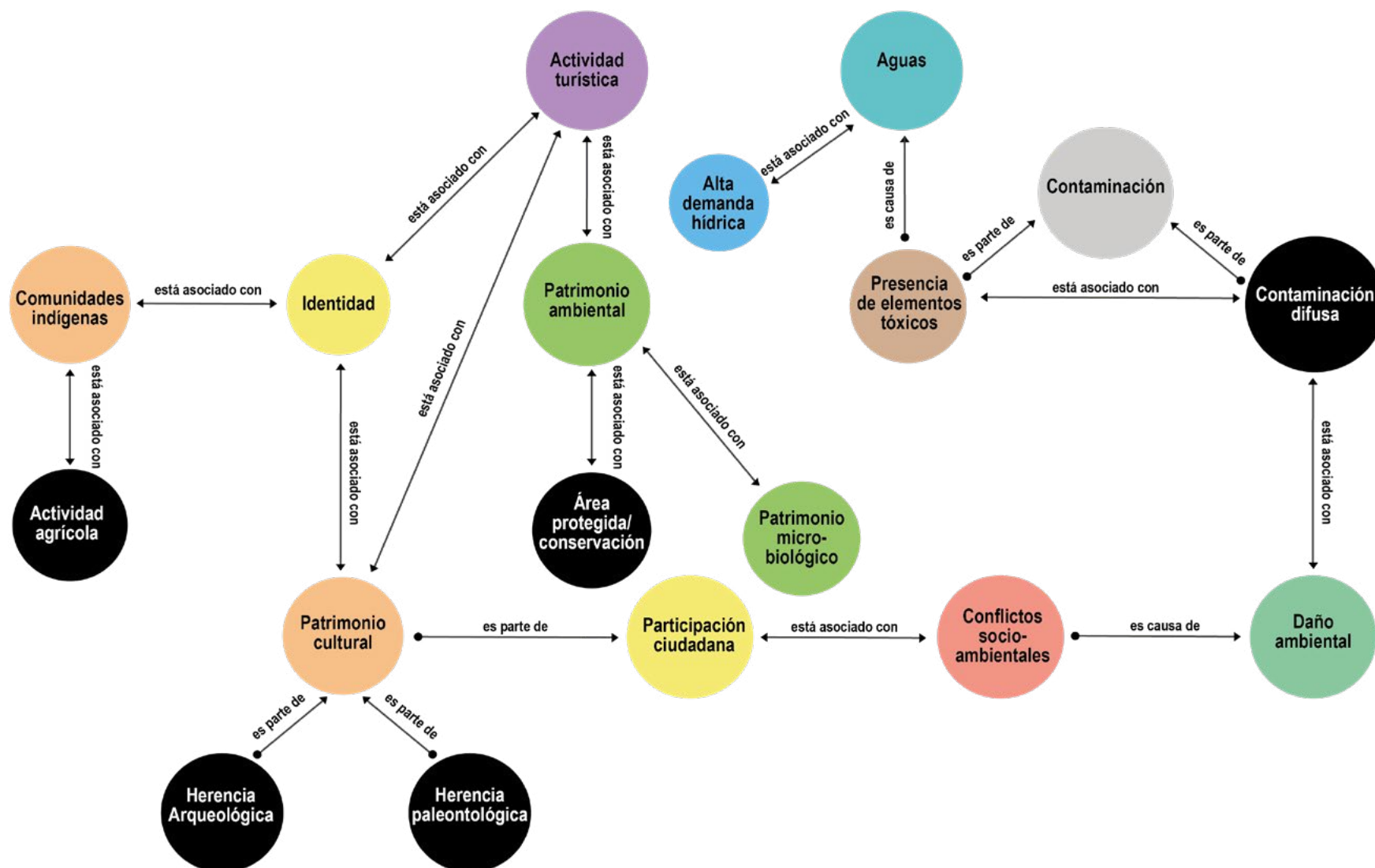


Fig 45: Relación temáticas principales en literatura gris sobre Salar de Llamara. Fuente: LANDATA, 2023.



Puquio Salar de Llamara

7. OPORTUNIDADES PARA LA SOCIEDAD

En este caso de estudio, los talleres territoriales permitieron obtener nociones del acontecer actual, como también brechas y visiones que surgen desde las condiciones y habitabilidades del territorio. Considerando las connotaciones negativas de algunas temáticas, se infieren oportunidades para la sociedad considerando la ejecución de soluciones como acciones necesarias para solventar las brechas existentes.

A continuación, se resumen las oportunidades identificadas según las temáticas emergentes de los talleres territoriales en la localidad de Pozo Almonte (Tabla 6).

TABLA N°6: OPORTUNIDADES PARA LA SOCIEDAD EN LA CUENCA DE LLAMARÁ

Tema	Oportunidades
Impacto Ambiental	• Gestión del riesgo sanitario de la comunidad, propiciando un entorno seguro y saludable. • Fomento de iniciativas asociadas a campañas de monitoreo de biodiversidad y conservación. • Fomento de investigación sobre afectaciones “naturales” y antrópicas considerando las singularidades geoquímicas del Desierto. • Fomento de investigación sobre desechos industriales para un desarrollo sostenible. • Fomento de estudios en propiedades del recurso suelo para la planificación territorial.
Investigación	• Fomento de transparencia a través del acceso a información científica vinculada al territorio. • Fortalecimiento de la Investigación y Capacidades Locales. • Desarrollo Sostenible y Gestión de Recursos. • Capacitación y adaptación para el acceso a la información. •
Turismo y Patrimonio	• Fortalecimiento en gestión de ventajas comparativas del territorio (Turismo). • Fomento de la actividad económica local. • Promoción de la Educación y la Cultura en función de las singularidades del territorio. • Fomento de desarrollo turístico sustentable afín a intereses culturales locales.

8. QUÉ VAMOS A HACER: HOJA DE RUTA

La Hoja de Ruta, construida en base a la visión compartida y a las brechas identificadas, propone el aporte que la ciencia debería hacer en una dinámica de multihélice para avanzar hacia un laboratorio natural Desierto de Atacama del que todos los actores estemos orgullosos y agradecidos.

Ejes estratégicos:





Desarrollo de procesos industriales alternativos y sustentables (nivel concepto a industrial)

Diversificación productiva sustentable: biotecnología microbiana (nivel concepto a industrial)

Diversificación productiva sustentable: nuevos minerales, valor agregado y fortalecimiento C&T

Proyecto de integración de información disponible y de monitoreos participativos de impacto ambiental

Construcción de un mecanismo de gobernanza de datos para todos los actores del territorio

Diseño e implementación de una estrategia de democratización del conocimiento científico



Oportunidades de retiro y reconversión de unidades de generación a base de combustibles fósiles

Investigación sobre línea base e impacto de proyectos energéticos en el territorio

Planificación territorial del DA con proyectos de energía en zonas previamente intervenidas

Diseño, implementación y operación de proyectos con enfoque de desarrollo sostenible

Realizar campañas participativas de monitoreo de los impactos de la industria energética

Material escrito y audiovisual para la difusión y divulgación



Estimación del uso y la capacidad de carga de los sitios turísticos

Construcción participativa de un relato turístico para el DA

Identificación y caracterización de sitios con potencial turístico, para preservación del patrimonio y protección de Geositios

Generación de programas participativos de rescate y preservación patrimonial y protección de Geositios

Estrategia de comunicación, valoración y formación de capital humano



Fomentar la investigación en biomedicina y en clínica

Investigación sobre fisiología en condiciones de hipoxia

Plataforma MZ de Datos en Salud



Fortalecer el curriculum formativo incorporando el conocimiento del patrimonio sociocultural y natural del DA

Elaboración de guías educativas de las singularidades del DA

Diseño de una estrategia de difusión efectiva del conocimiento científico

Innovación en instancias de divulgación (campamentos científicos, turismo subvencionado y talleres educativos, entre otros) del conocimiento sobre las singularidades del DA

Generación de una ruta de museos y muestras itinerantes

Fortalecimiento de la identidad mediante el estudio y rescate del patrimonio cultural ancestral junto a actores locales



Observatorio de geo y biodiversidad

Ampliación del imaginario del DA que considere las singularidades y complejidad del territorio

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brüggén, J., 1950, Fundamentos de Geología de Chile: Santiago de Chile, Instituto de Ericksen, G. E., 1983: The Chilean Nitrate Deposits. Am. Sci., 71: 366-374. Geografía Militar, 374 p.
2. Kiefer, E.; Dorr, M.J.; Ibbeken, H.; Götze, H-J. 1997. Gravity-based mass balance of an alluvial fan giant: the Arcas Fan, Pampa del Tamarugal, Northern Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 24, No. 2, p. 165-185.
3. Lictevout, E, Maass C., Córdoba, D., Herrera, V., Payana, R. (2013). Recursos Hídricos Región de Tarapacá: Diagnóstico y sistematización de la información. Centro de Investigación y Desarrollo de Recursos Hídricos (CIDERH). Universidad Arturo Prat, Iquique.
4. Chong, G. 1988. The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18°00' and 27°00' South Latitude. Springer Verlag, Lecture Notes in Earth Sciences 17: 87-102.
5. Chong Díaz, G., Demergasso, C., Urrutia Meza, J., & Vargas, M. (2020). El Dominio Salino del norte de Chile y sus yacimientos de minerales industriales. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72(3)

6. Risacher, F., & Fritz, B. (1991). Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, 90(3-4), 211-231.
7. Stoertz GE, Ericksen GE. 1974. Geology of Salars in Northern Chile. US Geological Survey, Professional Paper, No. 811.
8. Squeo, F. A., Olivares, N., Olivares, S., Pollastri, A., Aguirre, E., Aravena, R., ... & Ehleringer, J. R. (1999). FUNCTIONAL GROUPS IN NORTH CHILEAN DESERT SHRUB SPECIES, BASED ON THE WATER SOURCES USED. *Gayana Bot*, 56(1), 1-15.
9. Garreaud, R. (1999). Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Monthly Weather Review*, 127(5), 901-921.
10. Rutllant, J., & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 11(1), 63-76.
11. Cereceda, P., Larrain, H., Osses, P., Farías, M., & Egaña, I. (2008). The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile. *Atmospheric Research*, 87(3-4), 312-323.
12. Garcés, I., López, P. L., Auqué, L. F., Chong, G., Valles, V., & Gimeno, M. J. (1996). Características geoquímicas generales del sistema salino del Salar de Llamara (Chile). *Estudios Geológicos*, 52(1-2), 23-35.
13. López, P. L., Auqué, L. F., Garcés, I., & Chong, G. (1999). Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamará, Chile. *Revista geológica de Chile*, 26(1), 89-108.
14. Finstad, K.M., et al., Microbial Community Structure and the Persistence of Cyanobacterial Populations in Salt Crusts of the Hyperarid Atacama Desert from Genome-Resolved Metagenomics. *Frontiers in Microbiology*, 2017. 8(1435).
15. Otálora, F., Criado-Reyes, J., Baselga, M., Canals, A., Verdugo-Escamilla, C., & Garcia Ruiz, J. M. (2020). Hydrochemical and mineralogical evolution through evaporitic processes in Salar de Llamara Brines (Atacama, Chile). *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(6), 882-896.
16. Reid, R.P., et al., Electrical conductivity as a driver of biological and geological spatial heterogeneity in the Puquios, Salar de Llamara, Atacama Desert, Chile. *Scientific Reports*, 2021. 11(1): p. 12769.
17. Oehlert, A.M., et al., Physical, chemical, and microbial feedbacks controlling brine geochemistry and lake morphology in polyextreme salar environments. *Science of The Total Environment*, 2022. 836: p. 155378.
18. Suosaari, E. P., Reid, R. P., Mercadier, C., Vitek, B. E., Oehlert, A. M., Stolz, J. F., ... & Eberli, G. P. (2022). The microbial carbonate factory of Hamelin Pool, Shark Bay, Western Australia. *Scientific Reports*, 12(1), 12902.
19. Demergasso, C., Chong, G., Galleguillos, P., Escudero, L., Martínez-Alonso, M., & Esteve, I. (2003). Tapetes microbianos del Salar de Llamará, norte de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 76(3), 485-499.
20. Finstad, K., Pfeiffer, M., McNicol, G., Barnes, J., Demergasso, C., Chong, G., & Amundson, R. (2016). Rates and geochemical processes of soil and salt crust formation in Salars of the Atacama Desert, Chile. *Geoderma*, 284, 57-72.
21. Voigt, C., Klipsch, S., Herwartz, D., Chong, G., & Staubwasser, M. (2020). The spatial distribution of soluble salts in the surface soil of the Atacama Desert and their relationship to hyperaridity. *Global and Planetary Change*, 184, 103077.
22. Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, M. R., Contreras, M., Novoa, F., Poire, D., & Farias, M. E. (2014). Microbial characterization of micro-

bial ecosystems associated to evaporites domes of gypsum in Salar de Llamara in Atacama desert. *Microbial ecology*, 68, 483-494.

23. Drees, K. P., Neilson, J. W., Betancourt, J. L., Quade, J., Henderson, D. A., Pryor, B. M., & Maier, R. M. (2006). Bacterial community structure in the hyperarid core of the Atacama Desert, Chile. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(12), 7902-7908.

24. Saghaï, A., Gutiérrez-Preciado, A., Deschamps, P., Moreira, D., Bertolino, P., Ragon, M., & López-García, P. (2017). Unveiling microbial interactions in stratified mat communities from a warm saline shallow pond. *Environmental microbiology*, 19(6), 2405-2421.

25. Gutiérrez-Preciado, A., Saghaï, A., Moreira, D., Zivanovic, Y., Deschamps, P., & López-García, P. (2018). Functional shifts in microbial mats recapitulate early Earth metabolic transitions. *Nature ecology & evolution*, 2(11), 1700-1708.

26. Demergasso, C., Casamayor, E. O., 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 Microbiology Ecology*, 48(1), 57-69.

27. Thiem, J. D., Broadhurst, B. T., Lintermans, M., Ebner, B. C., Clear, R. C., & Wright, D. (2013). Seasonal differences in the diel movements of *M. acquarie perch* (*M. aquaria australasica*) in an upland reservoir. *Ecology of Freshwater Fish*, 22(1), 145-156.

28. Rossmassler, K., Hanson, T. E., & Campbell, B. J. (2016). Diverse sulfur metabolisms from two subterranean sulfidic spring systems. *FEMS Microbiology Letters*, 363(16).

29. Ericksen, G. E. (1983). The Chilean Nitrate Deposits: The origin of the Chilean nitrate deposits, which contain a unique group of saline minerals, has provoked lively discussion for more than 100 years. *American Scientist*, 71(4), 366-374.

30. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2016. Atlas del Agua

de Chile 2016.

31. Moreno, A. (2022). Estudio de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos en el Salar de Llamará a partir de sensores remotos, Región de Tarapacá, Chile. Tesina, Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

32. DICTUC (2007). Modelación de la evolución del nivel de la napa en el Salar de Llamará. Proyecto: Estudio de impacto ambiental proyecto Pampa Hermosa. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.

33. Lictevout, E, Maass C., Córdoba, D., Herrera, V., Payana, R., Rodríguez J., Aguilera, J., & Beltrán, P., 2013: Recursos Hídricos Región de Tarapacá. Diagnóstico y Sistematización de la Información. Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos. Universidad Arturo Prat (ISBN: 978 956 302 081 – 6)

34. SQM (2008). Estudio de Impacto Ambiental Pampa Hermosa. Disponible online: <http://bit.ly/2sATuYH> [Consulta el 20 de enero de 2023]

35. DICTUC (2006). Actualización de la estimación de la recarga acuíferos de Pampa del Tamarugal y Llamará. Proyecto: Estudio de impacto ambiental proyecto Pampa Hermosa. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.

36. VUILLE, M., y KEIMIG, F. (2004). Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data. *Journal of Climate*, 17(17), 3334-3348.

37. DICTUC (2007b). Medición de la tasa de evaporación desde acuíferos de la Pampa del Tamarugal y Llamará I región. Ingeniería DICTUC. Santiago, Chile.

38. Pinto, R. & Kirberg, A., 2009: Cactus del Extremo Norte de Chile. ISBN 978-956-319-749-5. Imprenta AMF- A. Molina Flores

SA.246 pp.

39. Pinto, R., & García, B., 2020: Flora Costera de Tarapacá. Fondo Nacional para el Desarrollo Cultural y las Artes. FONDART Regional. Seremía Región de Tarapacá. ISBN 978-956-402-564—3. Ograma Impresores. 217 pp.
40. Fernandez-Remolar, D.C., et al., Molecular preservation in halite- and perchlorate-rich hypersaline subsurface deposits in the Salar Grande basin (Atacama Desert, Chile): Implications for the search for molecular biomarkers on Mars. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2013. 118(2): p. 922-939.
41. Pueyo, J.J., G. Chong, and A. Jensen, Neogene evaporites in desert volcanic environments: Atacama Desert, northern Chile. *Sedimentology*, 2001. 48(6): p. 1411-1431.
42. Reid, P., et al., A Multidisciplinary Evaluation of Spatial Heterogeneity in the Puquios of the Salar de Llamara, Atacama Desert, Northern Chile. *Research Square*, 2020.
43. Reid, R., A. Oehlert, and E. Suosaari, A conceptual model for gypsum deposition in the puquios, Salar de Llamara. 2020: Miami, US. p. 42.
44. Reid, R. P., Oehlert, A. M., Suosaari, E. P., Demergasso, C., Chong, G., Escudero, L. V., ... & Palma, A. T. (2021). Electrical conductivity as a driver of biological and geological spatial heterogeneity in the Puquios, Salar de Llamara, Atacama Desert, Chile. *Scientific reports*, 11(1), 12769.
45. Azua-Bustos, A., L. Caro-Lara, and R. Vicuna, Discovery and microbial content of the driest site of the hyperarid Atacama Desert, Chile. *Environ Microbiol Rep*, 2015. 7(3): p. 388-94.
46. Azua-Bustos, A., C. Gonzalez-Silva, and G. Corsini, The Hyperarid Core of the Atacama Desert, an Extremely Dry and Carbon Deprived Habitat of Potential Interest for the Field of Carbon Science. *Frontiers in Microbiology*, 2017. 8. [2] Fernandez-Remolar, D.C., et al., Molecular preservation in halite- and perchlorate-rich hypersaline subsurface deposits in the Salar Grande basin (Atacama Desert, Chile): Implications for the search for molecular biomarkers on Mars. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2013. 118(2): p. 922-939.
47. Wierzchos, J., Ascaso, C., & McKay, C. P. (2006). Endolithic cyanobacteria in halite rocks from the hyperarid core of the Atacama Desert. *Astrobiology*, 6(3), 415-422.
48. Wierzchos, J., Ríos, A. D. L., & Ascaso, C. (2012). Microorganisms in desert rocks: the edge of life on Earth.
49. Vitek, P. et al. (2010). Microbial colonization of halite from the hyper-arid atacama desert studied by Raman spectroscopy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1922), 3205–3221.
50. Parro, V., de Diego-Castilla, G., Moreno-Paz, M., Blanco, Y., Cruz-Gil, P., Rodríguez-Manfredi, J. A., ... & Gómez-Elvira, J. (2011). A microbial oasis in the hypersaline Atacama subsurface discovered by a life detector chip: implications for the search for life on Mars. *Astrobiology*, 11(10), 969-996.
51. Blanco, Y. et al. Immunological detection of mellitic acid in the Atacama desert: Implication for organics detection on Mars. *Icarus*, 224(2), 326–333.
52. Rivera, M., 2005: Arqueología del Desierto de Atacama. La Etapa Fortiva en el área de Ramaditas/Guatacondo UB Colección de Estudios Regionales y Locales. Editorial Universidad Bolivariana. ISBN 956-8024-19-0. 299 pp.
53. Briones, L. (2008). Geoglifos del norte de Chile. Región de Arica y Parinacota. Santiago.



Sector Falla de Chomache

LanData

Laboratorio Natural Desierto de Atacama



f o ▶ in / landata@ucn.cl

I+56 55 2 355496

INSTITUCIONES ASOCIADAS



Universidad
Católica del Norte



UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ
Universidad del Estado



UNIVERSIDAD
DE CHILE



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

BIOCIENCIA
FUNDACION CIENTIFICA Y CULTURAL

