

# IMPLICANCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA BIODIVERSIDAD DEL SALAR DE AGUAS CALIENTES I, CHILE

Ingrid Garcés<sup>1</sup>, Gabriel Alvarez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Depto. de Ingeniería Química, U. de Antofagasta.

E-mail: igarces@uantof.cl

<sup>2</sup> Depto. de Geomensura, U. de Antofagasta

## RESUMEN

Se aborda la incidencia del cambio climático sobre la biodiversidad y los recursos hídricos en un ecosistema andino: el Salar de Aguas Calientes I, situado a 4280 msnm en un entorno geológico de características volcánicas y expuestas a condiciones ambientales de aridez extrema. Producto de la climatología actual es posible diferenciar tres tipos principales de aguas: los aportes de drenaje, las acumulaciones de agua en la aureola pantanosa externa o “bofedales”, y las aguas del interior del cuerpo salino (surgencias termales y salmueras). Los principales aportes de agua al salar ingresan por la zona norte y por el sector sur, siendo este último de carácter termal. Los restantes aportes se limitan a las escasas precipitaciones que acceden al salar en forma de escorrentía superficial o subsuperficial. Todas estas aguas circulan hacia las zonas más bajas del salar, y se acumulan en distintos puntos a lo largo de su sector occidental como consecuencia de un ligero basculamiento de su superficie. Las condiciones hidrológicas afectan factores abióticos, como anaerobiosis de suelos, disposición de nutrientes y salinidad, factores determinantes del desarrollo de la flora y fauna.

Las características hidroquímicas del salar indican que el sector norte es el más interesante desde el punto de vista ambiental, ya que constituye un refugio para comunidades vegetales y para camélidos, pero también que es el más sensible a cualquier cambio que pueda venir provocado por la puesta en explotación de los recursos del salar, principalmente boratos.

El reconocimiento en terreno ha permitido además comprobar que existen importantes diferencias entre las aguas acumuladas en distintos sectores. Así, en la zona norte del salar, las aguas de una surgencia no termal discurren hacia la base del salar, alimentando una zona de bofedal en la que se desarrolla una importante vida vegetal y que, además, suministra agua a los rebaños de camélidos del área. Todas estas aguas se mantienen en un rango de dilución elevado.

**Palabras claves:** Salar de Aguas Calientes 1, Hidroquímica, biodiversidad andina, clima andino.

## INTRODUCCIÓN

El noreste del Altiplano chileno es una zona volcánica que presenta numerosos salares y lagos salinos. Muchos factores relacionados con la tectónica, volcanismo y las condiciones climáticas, entre otros, favorecen el escenario para la depositación de sales, entre las cuales se encuentran boro, litio, potasio, etc. La exploración y explotación de estos recursos mineros conjuntamente con las exploraciones de potencial geotérmico, cuyo reflejo en superficie se traduce en manifestaciones termales, son algunas de las actividades económicas que amenazan la biodiversidad existente de estos ecosistemas de altura. Por lo que la riqueza específica y su conservación, así como la caracterización química y mineralógica de estos ecosistemas adquieren una gran relevancia.

El Salar de Aguas Calientes I es un depósito evaporítico tipo playa, ubicado en las coordenadas 23°07'22"S y 67°26'W, situándose su cota de base a una altitud de 4280 msnm, con una extensión de unos 15 Km<sup>2</sup> (fig. 1). Posee lagunas superficiales de extensión variable con un área relativamente reducida de la depresión, y está recubierto por una costra de materiales salinos, mayoritariamente halita y yeso [1].

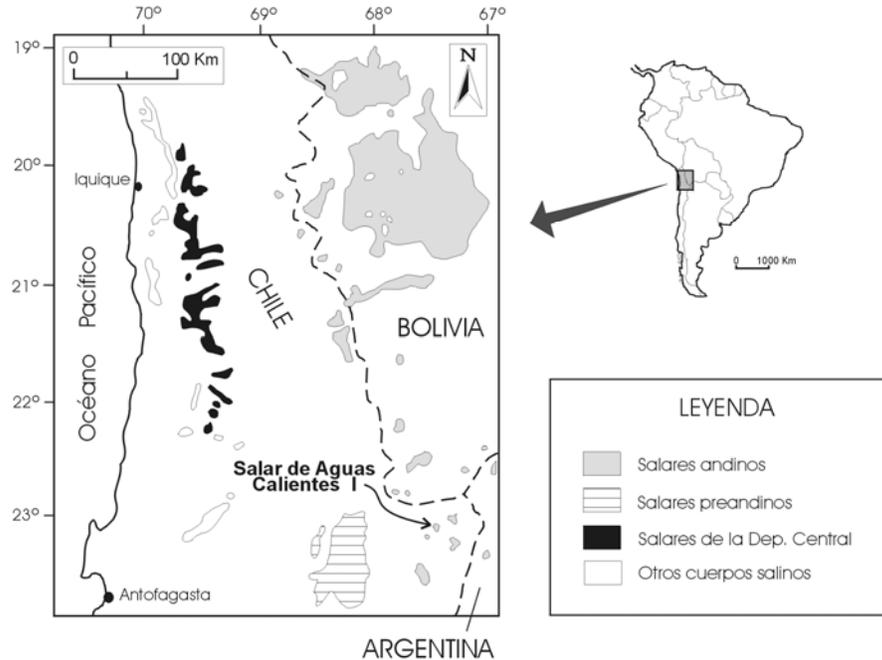


Figura 1: Ubicación geográfica del área en la que se encuentra el Salar de Aguas Calientes 1.

El sustrato geológico de la zona donde se sitúa el salar está constituido principalmente por rocas ígneas de edad Plioceno. La más importante es la Ignimbrita Atana con un volumen de unos 2500 Km<sup>3</sup> de tobas dacíticas blancas, rosadas y grises que pertenece a la zona geológica conocida como Complejo Volcánico Altiplano Puna (APVC). Esta unidad se sitúa estratigráficamente sobre otras unidades ignimbriticas más antiguas, asociadas a la actividad ígnea existente en este sector al menos desde el Mioceno Superior.

La presencia de depósitos aluviales se presentan por el sector este del salar, constituidos principalmente por arenas mezcladas con material piroclásticas, de cenizas pómez y gravas de formas angulosas. Mientras que, por el sector poniente del salar se encuentran depósitos sedimentarios de ignimbritas.

La actividad evaporítica actual en los salares se asocia a una elevada tasa de evaporación. La presencia de agua superficial está restringida a zonas reducidas y marginales en las que se acumulan las aguas procedentes de quebradas o donde aflora el agua subterránea, que en algunos casos es de carácter termal. Esta situación obedece al balance hídrico actual, claramente deficitario, ya que las precipitaciones que recibe la cuenca de drenaje se sitúan en torno a 150 mm/año, siendo la evaporación estimada superior a 1500 mm/año [2] lo que revela un ambiente marcadamente árido. La morfología superficial del salar es prácticamente plana, aunque un ligero basculamiento hacia el oeste condiciona que las aguas que acceden al mismo, discurren y se acumulen en su margen occidental.

**Clima:** Las precipitaciones se presentan como tormentas de corta duración y de poca extensión territorial. El agua precipitada en la montaña sostiene las zonas bajas que

son de aridez extrema. Según la clasificación Köppen, el área obedece a “clima de tundra por efecto de altura con precipitación estival”, con temperatura promedio anual de 1°C, humedad media anual del 27% [1]. Bajo estas condiciones climáticas se tiene el desarrollo de grupos humanos desde períodos tempranos, quienes se mantenían gracias a los recursos que las zonas de los bofedales les entregaban [3].

**Suelos:** La zona de la Puna, está compuesta por un primer piso prepuneño, donde se localizan los oasis de Atacama; un segundo piso correspondiente a valles serranos y por último el piso puneño propiamente tal o alta Puna. La zona se caracteriza por la presencia de contrastes en paisajes y recursos [3], reflejados en oasis y valles asentados en medio del desierto absoluto.

**Principales factores climáticos incidentes en los suelos:** Podemos citar entre los factores naturales, la temperatura, lluvia, viento y evapotranspiración, los cuales generan procesos que producen una degradación paulatina del suelo. Por otra parte, la ausencia de superficie vegetal, fomenta la desertificación, puesto que al no existir suelo expuesto y desprotegido, facilita los procesos erosivos, tal como la erosión hídrica (lluvia), eólica (viento) y deslizamientos de tierra por la acción del agua. En climas áridos, como en el norte de Chile, la capa superior de roca se expande debido al calor del sol y acaba por resquebrajarse, y si la roca que está compuesta por varios minerales, éstos sufren diferentes grados de dilatación y compresión que conducen a la fragmentación de ella. Unido a lo anterior, las precipitaciones (como agente erosivo), son más intensas que el viento, y dado que en esta zona el manto vegetal es escaso, las aguas se transportan con mayor cantidad de material mediante un escurrimiento brusco y cargado de barro, provocando mayor deterioro en la superficie. De esta forma, los vientos y las precipitaciones son los precursores en la desertificación por el alto nivel de degradación del suelo.

Otros factores anómalos que se presentan son las corrientes de El Niño y de La Niña, ambos productos de la interacción océano-atmósfera. En periodos del Niño se desarrolla una gran cantidad de precipitaciones, generando consecuencias catastróficas en la calidad del suelo, debido a los fuertes y excesivos flujos erosivos. Por su parte, en periodos de la Niña sucede el fenómeno inverso, la falta de agua, lo que se transforma en sequías, degradando y empobreciendo la calidad del suelo, hasta el punto que se inicia un proceso de desertificación en el sector afectado.

## **BIODIVERSIDAD**

Entre los sistemas acuáticos altiplánicos más importantes están los humedales o “bofedales”, formaciones vegetales que se establecen en un ambiente edáfico, principalmente orgánico, caracterizado por una condición hídrica de saturación permanente. El agua existente en los humedales altiplánicos corresponde al factor gravitante y fundamental que hace posible el desarrollo del hombre y la biota andina en esta planicie de altura [4]. Estos poseen valor económico y cultural para el hombre andino porque han sido por siglos las zonas de abrevadero del ganado de altura.

**Vegetación:** En el altiplano crecen sólo especies criófitas, formando un clima de estepa de altura, con especies tales como el matorral, los coironales y los bofedales. En áreas rocosas se encuentran llaretas que crecen adheridas a la superficie. La pradera herbácea de mayor potencial la constituyen pajonales de coirón (géneros *Festuca* y *Stipa*). El siguiente listado da cuenta de las comunidades identificadas:

- *Stipa crysophylla*, comúnmente llamado Coiron Amargo: La comunidad *Stipa crysophylla*, gramínea cespitosa se distribuye extensamente por las laderas pedregosas. La cobertura horizontal sobre el suelo no supera los 5% y el estrato vertical que conforma varía entre 0,1 y 0,2 m de altura.

- *Festuca crysophylla*-*Mulinum crassifolium*, llamada Paja Iro, Susurco: Vegetación con estrato herbáceo con dominio de *Festuca crysophylla* acompañada de *Stipa crysophylla*. La cobertura horizontal de este estrato llega al 70% y su altura no supera los 0,3 m. En las laderas sur y sureste, las gramíneas se entremezclan con un estrato arbustivo bajo, cuya especie dominante es *Mulinum crassifolium* y acompañada por *Adesmia horrida*, *Chaetanthera pulvinata* y *Parastrephia quadrangularis*. El estrato arbustivo presenta una cobertura horizontal que no supera el 15% y una distribución vertical que en los sectores de mejor desarrollo llega hasta los 0,5 m de altura.

Ninguna de las especies identificadas se encuentra en categoría de conservación [5]. La vegetación de los “bofedales” está adaptada a las condiciones ambientales extremas de la Puna Altoandina. Las especies dominantes son: *Oxychloe andina*, *Distichia muscoides*, *Patosia* cfr. *Clandestina* y *Scirpus atacamensis* [4].

**Fauna:** Durante la investigación las especies migratorias avistadas fueron la tagua gigante (*Fulica gigantea*), que es endémica; el pato jergón chico (*Anas flavirostris*); la guayata (*Chloephaga melanoptera*), la gaviota andina (*Larus serranus*) y flamencos (*Phoenicopterus Chilensis*, *P. Jamesis* y *P. Andinus*), los cuales emigran a lugares adyacentes en invierno cuando la temperatura baja los 0°C, puesto que las lagunas se congelan superficialmente dificultándose la obtención de su alimentación.

Los invertebrados acuáticos están representados principalmente por crustáceos, insectos y gastrópodos.

Conjuntamente se revisó literatura y estudios de impacto ambiental encontrándose sólo uno en que existen registros [6]. En este estudio citan 12 especies de vertebrados terrestres, entre los que indican la presencia de aves rapaces como el aguilucho (*Buteo polyosoma*), y el carancho cordillerano (*Phalcoboenus megalopterus*); la perdicita cordillerana (*Attagis gayi*), el minero grande (*Geositta isabellina*), el minero de la puna (*Geositta punensis*), la bandurrilla de pico recto (*Upucerthia ruficauda*), el cometocino de dorso castaño (*Phrygilus dorsalis*). Entre los mamíferos, el zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*), la vicuña (*Vicugna vicugna*), el tucu-tucu de Atacama (*Ctenomys fulvus*) y la vizcacha (*Lagidium viscacia*) y de entre los reptiles, la lagartiga de Fabian (*Liolaemus fabiani*). Por su parte Muhlhauser [7], menciona que ocasionalmente dos roedores entran desde el sistema terrestre a los bofedales, *Lagidium viscacia* (vizcacha) y *Phyllotis boliviensis* (lauchón orejudo).

## METODOLOGÍA

Se muestreó el salar en los puntos de existencia de soluciones superficiales, tanto en las áreas donde los aportes acceden al salar (vertientes y surgencias termales) como en las de acumulación en los sectores marginales (bofedales) y más internos (láminas de salmuera libre) del mismo. En los puntos de muestreo, todos georeferenciados, se determinó in situ, la temperatura y pH de las soluciones. Posteriormente las muestras son transportadas y analizadas para caracterizar las aguas. Los cationes Ca, Mg, Na, K, As y Li se determinaron por espectrometría de absorción atómica y en el caso del As por generación de hidruro. En la determinación de SO<sub>4</sub> se utilizó el método gravimétrico con BaCl<sub>2</sub>, el Cl por método de Mohr, HCO<sub>3</sub> y CO<sub>3</sub> mediante la técnica potenciométrica y el B por la técnica ácido-base.

A partir de los antecedentes bibliográficos disponibles para la zona y del reconocimiento visual y fotográfico en terreno, se analizó la vegetación asociada al salar mismo, conjuntamente con el reconocimiento de avefauna al salar, que posteriormente se contrasta la información con otras fuentes. Finalmente, se cuenta con fotografías aéreas digitalizadas del Salar de Aguas Calientes, las cuales nos sirven de referencias para visualizar el grado de afectación del salar en el tiempo.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El salar de Aguas Calientes 1 (17 Km<sup>2</sup>) presenta la existencia de tres cuerpos de agua (3 Km<sup>2</sup>), uno de los cuales, la Laguna Negra, es alimentado por manantiales geotérmicos [2], claramente definidos, localizados en la parte sur de la cuenca, con temperatura de alrededor de 50°C (A1-6). Estos cuerpos de agua se mantienen relativamente estables en el tiempo, excepto uno de ellos que presenta una disminución importante el año 2003 al 2009, siendo este el que aporta el mayor porcentaje de retroceso areal en el periodo estudiado.

En el caso del humedal se muestra una importante disminución de las masas de agua existentes en el tiempo. La disminución es aproximadamente del 30% ya que baja de 6.2 km<sup>2</sup> en 1989 a 4.4 km<sup>2</sup> en el 2009. Por otro lado, la tendencia en el tiempo es de reducción del espejo asociado al humedal.

La Tabla 1 muestra la composición química de las aguas muestreadas del salar. Claramente se observa que todos los puntos presentan un amplio rango de sólidos disueltos y por ende un amplio rango de salinidad. Son aguas casi neutras, cuyo pH oscila entre 6,43 a 7,9. Las muestras analizadas pertenecen al tipo químico, clorurado-sódico (figura 2). A pesar de mostrar una gran dispersión de concentraciones que van desde aguas muy diluidas (A1-1 y A1-2) hasta verdaderas salmueras (A1-4). La más diluida es la surgencia no termal del sector norte del salar (A1-2), de fuerza iónica 0,024 molal, y a continuación la muestra tomada en el bofedal situado al sur de la anterior (A1-1); de 0,037 molal. Por su parte, la surgencia termal del sur (laguna negra) presenta una concentración global superior a las dos anteriores (A1-6) con 0,457 molal y no alberga forma alguna de vida vegetal ni sirve de suministro de agua para la fauna que alberga el salar.

Las salmueras recogidas en varias lagunas del sector centro occidental muestran grados de concentración variable, que van de la más diluida (A1-5 con 0,155 molal) a la más concentrada (A1-4 de 4,319 molal).

En cuanto a la calidad de las aguas, la Tabla 2, indica la norma de agua potable y regadío, al comparar con las aguas muestreadas del salar, podemos concluir que ningún agua de aporte puede ser aprovechada para un uso potable o agrícola. El agua menos concentrada (A1-2) tiene exceso de Na, Cl, salinidad y sobre todo de arsénico (10 veces por encima de la norma de potabilidad). Puesto que la alta salinidad de los aportes se debe a una salinización de las napas diluidas de la cuenca de drenaje por salmueras de origen desconocido, podemos concluir que la posibilidad de encontrar aguas diluidas de buena calidad en la cuenca de Aguas Calientes 1 no muy alentadora. Estas características se atribuyen a tres agentes condicionantes principales: la composición geológica, el clima árido y el volcanismo.

En la figura 2, los datos químicos se han representado en diagramas triangulares, que al comparar con datos de un trabajo previo [1] realizado hace 15 años, se visualiza la coincidencia de los puntos, permitiendo comprobar la gran estabilidad de las soluciones superficiales del salar. Cabe mencionar que la salinización del agua en estas cuencas es producto de dos mecanismos, uno es el de incorporación de solutos como consecuencia de reacciones químicas de alteración de rocas y el otro, corresponde al proceso por concentración por evaporación.

La zona de mayor importancia ambiental se ubica en el sector noroccidental del salar, que por sus especiales características hidrológicas altitudinales, climatológicas, y por su alta sensibilidad a cualquier modificación (climatológica y humana), debiese ser monitoreada y con protección para preservar el agua a las escasas formas de vida vegetal y animal presentes en esta región.

Finalmente para concluir que el presente trabajo pretende orientar las acciones que se debiesen diseñar para la conservación de los ecosistemas andinos. A partir de

identificar en término de variaciones estacionales, la hidrología, las características de calidad química del agua, la flora y fauna acuáticas y la vegetación de las vegas, por una parte, y por otra las condiciones ambientales a que están sometido estos ecosistemas en altura, de esta manera podremos prevenir futuras amenazas

**AGRADECIMENTOS:** Este trabajo ha sido desarrollado gracias al aporte financiero de la Universidad de Antofagasta.

Tabla 1: Composición química de las aguas del Salar de Aguas Calientes 1.

Parámetro	En mg/L	A1-1	A1-2	A1-3f	A1-4	A1-5	A1-6
		pH=7,9 T°C=26,7	pH=6,7 T°C=17,6	pH=7,65 T°C=22,5	pH=6,8 T°C=22	pH=7,72 T°C=25,1	pH=6,43 T°C=47,3
Cloruros	Cl	924	619	12490	117655	4753	13755
Sulfato	SO <sub>4</sub>	185	78	403	1984	243	292
Sílicio	Si	26	23	27	28	27	16
Sodio	Na	524	361	6913	71581	2602	6880
Potasio	K	50	12	219	1831	71	156
Litio	Li	2,89	2,9	30	227	12	27
Calcio	Ca	109	59	1365	11938	435	1655
Magnesio	Mg	20	27	91	1030	36	164
Arsénico	As	0,639	0,61	2,4	41	12,03	2,67
Boro	B	18	8	78	729	28	73
Bicarbonato	CaCO <sub>3</sub>	117	120	47	727	50	53
Fuerza iónica	molal	0,037	0,024	0,418	4,319	0,155	0,457

Tabla 2: Composición química de las aguas potable y regadío, según la Norma Chilena, siendo STD el total de sólidos disueltos.

AGUA	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	B	As	Na	Li	Ca	Mg	STD
Potable	350	250	250	44	5	0,05	200	0	200	125	500
Riego	600	20	250	44	0,75	0,1	900	2,5	400	60	1000

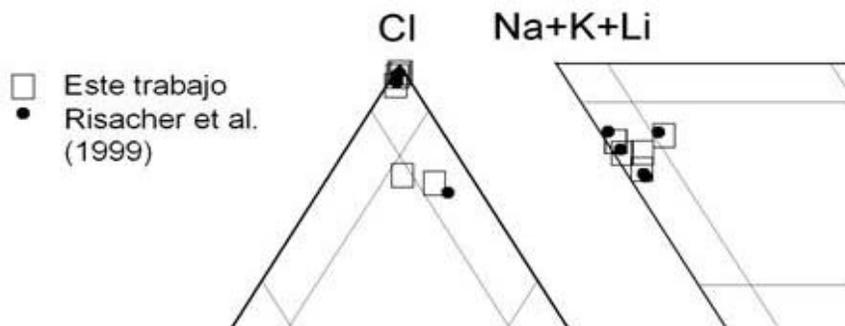


Figura 2: Comparación de los datos del presente trabajo con los de Risacher et al.[1] sobre diagramas triangulares.

## REFERENCIAS

1. Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. Salar de Aguas Calientes 1. En: Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones. Convenio de Cooperación DGA – UCN – IRD-, S.I.T. N°51. Santiago de Chile. 1999. pp: II-99 [AC1] - II-110 [AC1].
2. Garcés, I. y López, P. Antecedentes Hidroquímicos del Salar de Aguas Calientes I (Chile). Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 62. 2012. pp. 19-30.
3. Schiappacasse, V., Castro, V. y Niemeyer, H. Los Desarrollos Regionales en el Norte Grande (1.000 a 1.400 d.C.). En: Prehistoria Chilena (Serie Culturas de Chile). Ed. Andrés Bello. 1989.
4. Vila, Irma. Sistemas intertropicales de altura: humedales altiplánicos. En: El agua en Iberoamérica; de la escasez a la desertificación. Edit. Alicia Fernández Cirelli y Elena Abraham. 2002.
5. Benoit, I. (ed.). Libro Rojo de la Flora Terrestre de Chile. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 1989.
6. Dames y Moore. Estudio de Impacto Ambiental Gasoducto del Norte Grande. Norgas Chile y Cía. Ltda. 1997.
7. Muhlhauser, H. Significado de la estructura y funcionamiento de ecosistemas acuáticos y zonas ecotonales altiplánicos para su evaluación, gestión ambiental y conservación. El Altiplano. Ciencia y Conciencia de los Andes. En Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos.. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Octubre 1997. pp.127-133.



**Ingrid Garcés M.:** Ingeniera Civil Química, Doctora en Ciencias de la Universidad de Zaragoza, España. Se desempeña como académico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antofagasta. Realiza docencia de pregrado en el Departamento de Ingeniería Química y de Procesamiento de Minerales, y en el Centro Regional de Educación Ambiental en las cátedras de minerales industriales y desarrollo sustentable, depósitos salinos andinos, termodinámica de soluciones salinas, industrias químicas. Realiza docencia de posgrado en el Magister de Medioambiente y Desarrollo Sustentable y en el Magister de Desarrollo Energético. Su área de investigación es medio ambiente con énfasis en depósitos salinos andinos y minerales industriales.