

**ANTECEDENTES FISICOQUIMICOS PRELIMINARES DE CUERPOS DE AGUA SUPERFICIAL DEL ALTIPLANO DE LA III REGION DE ATACAMA, CHILE**

Aguirre, I.<sup>1</sup> y Clavero, J.<sup>1</sup>

**INTRODUCCIÓN**

Este trabajo presenta los resultados preliminares de 23 determinaciones analíticas realizadas a muestras provenientes de algunos cuerpos de agua superficial del Altiplano de la III Región de Atacama. Corresponden a seis lagunas: Escondida, Wheelwright, del Bayo, del Jilguero, Verde y Brava; dos salares: Piedra Parada y Grande, al río Juncalito, su afluente el río Negro y la fuente termal Río Negro (Fig. 1). Los ríos, lagunas y salares de la zona estudiada albergan un ecosistema que incluye desde microorganismos, flamencos, gaviotas altiplánicas y otras aves, hasta vicuñas, guanacos y zorros. El objetivo de este trabajo fue obtener antecedentes analíticos destinados a caracterizar químicamente las aguas, establecer sus cualidades, individualizar aquellos cuerpos de agua cuya concentración en determinados iones disueltos sobrepasen la norma chilena de agua potable e intentar establecer, de acuerdo al alcance de los datos, el posible origen de las sales contenidas en las aguas.

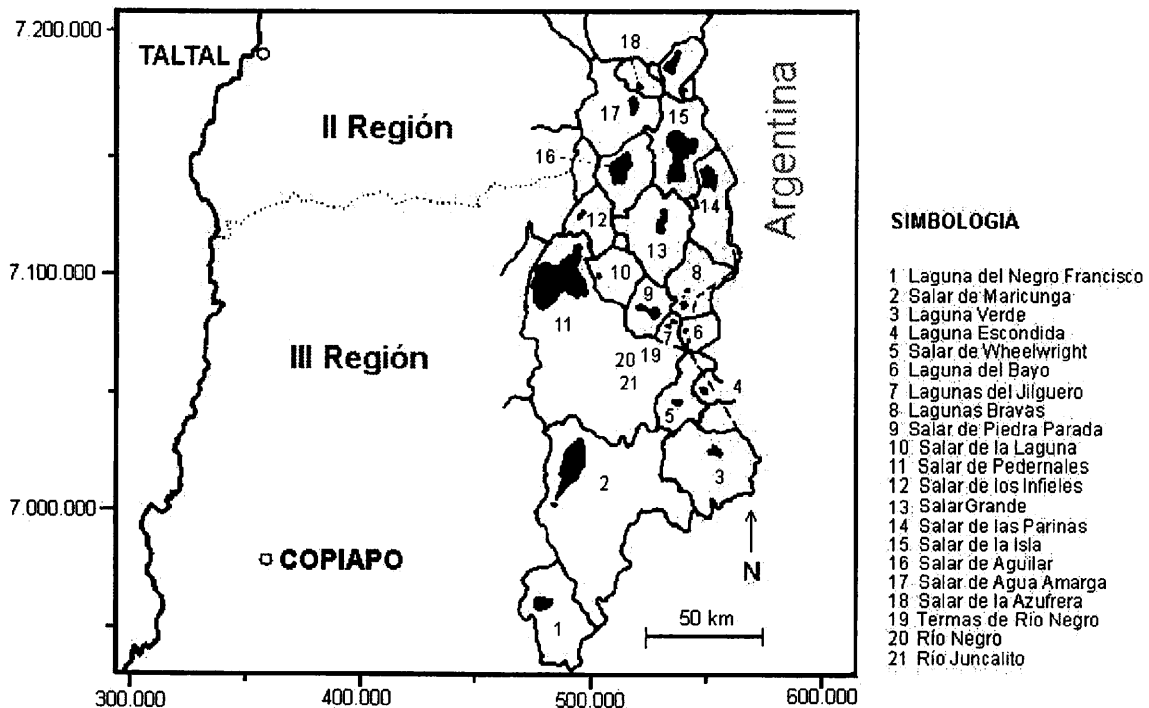


Figura 1. Ubicación área de estudio y de los cuerpos de agua analizados.

<sup>1</sup> Servicio Nacional de Geología y Minería, Avda. Sta. María 9104, Santiago.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra ubicada en el Altiplano de la III<sup>a</sup> Región de Atacama, al este de los salares de Maricunga y Pedernales y al norte del Complejo Volcánico Ojos del Salado. Las unidades geológicas que afloran en el área corresponden esencialmente a complejos volcánicos y depósitos piroclásticos del Mioceno Inferior al Cuaternario. El basamento de estas unidades volcánicas está constituido por rocas intrusivas y sedimentarias del Paleozoico Superior y Cretácico y secuencias volcanoclásticas del Oligoceno-Mioceno, las que afloran principalmente en el borde occidental del área formando la Cordillera de Claudio Gay y la Sierra de Aliste y, en el extremo nororiental de la zona, la Sierra del Medio (4, 10, 9, 5, 6). El sistema hidrográfico está controlado por la actividad volcánica y tectónica ocurrida, esencialmente a partir del Plioceno Superior, con la formación de estructuras de colapso volcánico, tales como las calderas Wheelwright y Laguna Escondida (Plioceno Inf. a Sup.) y el emplazamiento de voluminosos depósitos ignimbríticos (Mioceno Superior a Cuaternario), de los cuales el más importante corresponde a la Ignimbrita Laguna Verde (Plioceno Sup., 7). Las lagunas Wheelwright y Escondida se encuentran emplazadas en las depresiones cerradas formadas por estos eventos tecto-volcánicos. La Laguna Verde, por su parte, se ubica en una depresión tectónica, limitada por fallas normales de orientación NW-SE. Las lagunas y salares más septentrionales (del Bayo, Bravas, Salar Grande y Salar de Piedra Parada) corresponden a cuencas intramontañas de dimensión variable limitadas por los productos, lávicos y piroclásticos, de complejos volcánicos del Mioceno Medio a Plioceno. La fuente termal de Río Negro aflora a través de una pequeña falla normal que afecta a la Ignimbrita Laguna Verde y su fuente calórica está asociada al cercano Complejo Volcánico Los Cuyanos (Pleistoceno Inf. a Sup., 6 y 8).

## METODOLOGÍA ANALÍTICA

En terreno, al momento de tomar la muestra, se determinó instrumentalmente la temperatura, pH y conductividad eléctrica de las aguas. Once muestras para análisis por elementos mayores y menores fueron tomadas en envases de polipropileno de 1 lt, previamente ambientados con el agua a muestrear. Las muestras para análisis de elementos menores y trazas se tomaron en botellas de polipropileno de 120 ml, acidificadas con 2 ml de HNO<sub>3</sub> (1:1) ultrapuro. En el Laboratorio Químico del Sernageomin se efectuó la totalidad de las determinaciones analíticas. Na, K, Ca, Mg y Li fueron determinados por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) con llama. CO<sub>3</sub> y HCO<sub>3</sub> por titulación a pH 8.2 y 4,5 respectivamente, SO<sub>4</sub> por gravimetría; As por EAA con Generador de Hidruros; Cl por titulación; pH (laboratorio) y F mediante electrodo para iones específicos; NO<sub>3</sub> por Espectrofotometría - Ultravioleta. Además se calculó dureza y total de sólidos disueltos (TSD).

## CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS

A continuación se describen las propiedades de cada una de las muestras según el total de sólidos disueltos, dureza total del agua (1) y pH (2). En paréntesis se indica el número de muestras analizadas. Además se incluye el número de veces (valores redondeados) que los iones As, F, Cl, SO<sub>4</sub> y Mg superan la norma chilena para uso potable (2). La figura 2 muestra los máximos valores por sobre esta norma.

Laguna Escondida (3 muestras). Aguas eminentemente cloruradas sódicas, salobres a saladas (7.205 a 31.690 mg/l TSD), durísimas (2.130 a 8.400 mg/l de CaCO<sub>3</sub>) y de pH básico. Superan la norma de agua potable 4 a 16 veces para el As, hasta 2 veces para el flúor, 11 a 48 veces para el cloruro, 8 a 33 veces para el sulfato y 3 a 13 veces para el magnesio. Un valor de pH medido en terreno (8,77), también supera esta norma. Según (3), las aguas se originan a partir de una mezcla entre aguas subterráneas y una cuña salina antes de surgir como vertientes salobres en su orilla oriental.

Lagunas del Jilguero (4 muestras): Aguas eminentemente cloruradas sódicas, salobres (10.574 a 22.443 mg/l de TSD), durísimas (2.037 a 3.336 mg/l de CaCO<sub>3</sub>) y de pH básico. Superan la norma de agua potable de 50 a 70 veces para el As, 4 a 5 veces para el flúor, 15 a 38 veces para el cloruro, 11 a 17 veces para el sulfato y hasta 2 veces para el magnesio. El pH que poseen excede muy levemente la norma de agua potable (8,57 y 8,59). Estudios anteriores (3) indican que, el aporte a la laguna oriental es de agua del tipo clorurado sódico, el que interactúa con una cuña salina o con antiguas evaporitas y/o salmueras con alto contenido de

cloruro de sodio. Para la laguna occidental, señalan la presencia de un aporte diferente, eminentemente sulfatado cálcico, probablemente salinizado por antiguas evaporitas y/o salmueras residuales con alto contenido de sulfato de calcio. La naturaleza sulfatada de las aguas puede estar relacionado directamente a aportes de aguas termales provenientes o afectadas por el campo geotérmico de los Complejos Volcánicos Sierra Nevada y Los Cuyanos, ubicados sólo 5 km al norte de esta laguna, y/o por ubicuos depósitos de azufre asociados estos mismos complejos (Pleistoceno Inf. a Sup., 5, 6, 8).

Laguna Wheelwright (4 muestras): Aguas eminentemente cloruradas sódicas. Principalmente salmueras y aguas saladas aunque una muestra demostró ser salobre (2.124 a 193.030 mg/l de TSD), durísimas (9.650 a 53.650 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) con una muestra que resultó ser sólo dura (777 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ). Superan la norma de agua potable hasta 30 veces para el As, hasta 2 veces para el flúor, 472 veces como máximo para el cloruro y hasta 3 veces para el sulfato. Según (3), tanto en sus salmueras como en sus aguas de aporte predominan el Na, Ca y Cl, los que probablemente provienen de la salinización de aguas diluidas por salmueras de un antiguo salar.

Laguna Brava (1 muestra): Eminentemente clorurada sódica, por su elevada salinidad corresponde a una salmuera (106.080 mg/l de TSD), durísima (9.450 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y de ph básico. Para esta muestra no se cuenta con análisis de As ni F. Supera la norma potable 223 para el cloruro, 38 veces para el sulfato y 13 veces para el magnesio. Según (3), las Lagunas Bravas reciben aportes afectados por la probable redisolución de antiguas evaporitas (cloruro de sodio y sulfato de calcio) ubicadas por debajo de las formaciones volcánicas de la cuenca. Sin embargo, esta interpretación, es poco probable, ya que las únicas unidades geológicas de origen evaporítico en la zona afloran unos 50 km hacia el oeste en el borde occidental de la Sierra de Aliste, siendo difícil que estos depósitos evaporíticos continúen hacia el sector de Lagunas Bravas.

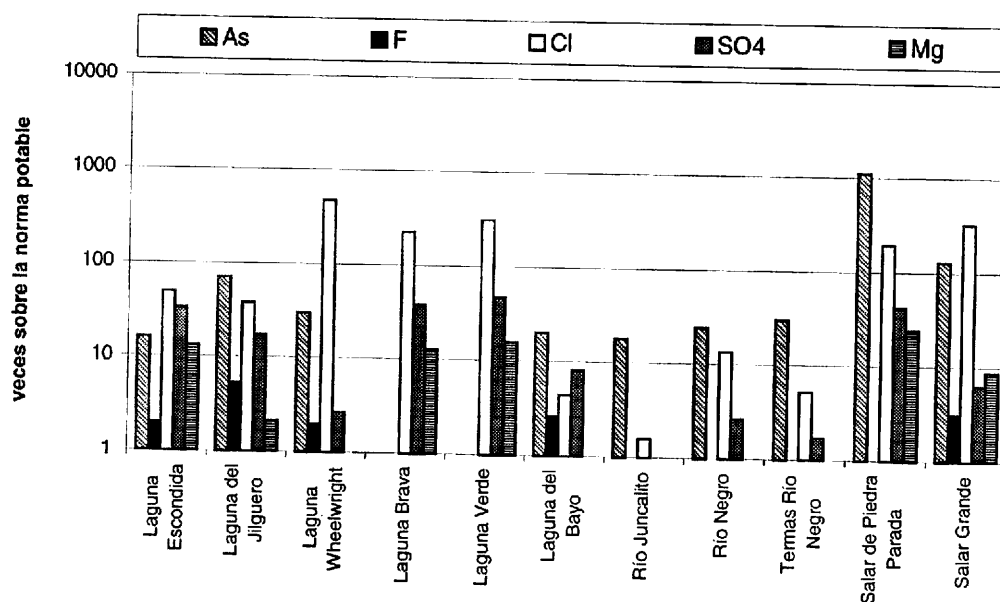


Figura 2. Cantidad de veces por sobre la norma de agua potable para cada uno de los cuerpos de agua superficial indicado. Las barras del gráfico muestran de izquierda a derecha As, F, Cl, SO4 y Mg.

Laguna Verde (1 muestra): Eminentemente clorurada sódica, su elevada salinidad indica que corresponde a una salmuera (145.010 mg/l de TSD), durísima (10.050 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y de ph básico. Para esta muestra no se cuenta con análisis de As ni F. Supera la norma potable 309 veces para el cloruro, 7 veces para el sulfato y 16 veces para el magnesio. Según (3), esta laguna recibe aguas de tipos y vías evolutivas muy distintos. Antiguas evaporitas o salmueras residuales de cloruro y sulfato de sodio salinizarían los aportes. La salmuera de la laguna, se señala, proviene de una mezcla de 3 tipos de aguas: al oeste, el río Peñas Blancas

de vía evolutiva neutra sulfatada (50% de aporte), al este, el río Agua Dulce, de vía carbonatada (40% de aporte) y por vertientes más ricas en calcio (10% del aporte total).

Laguna del Bayo (2 muestras): Aguas eminentemente sulfatadas sódicas, salobres (4.793 a 5.020 mg/l de TSD), duras (1.054 a 1.121 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y de ph básico. Superan la norma de agua potable de 16 a 20 veces para el As, 3 veces para el flúor, 4 veces para el cloruro y 8 veces para el sulfato. Su ph supera levemente la norma de agua potable (8,74). Según observaciones geológicas, el elevado contenido de sulfato estaría influenciado por su cercanía al CV Sierra Nevada, activo con depósitos de azufre en sus flancos.

Termas de Río Negro (2 muestras): Agua mesotermal (38°C), eminentemente clorurada sódica, levemente salobre (2.449 a 2.910 mg/l de TSD), relativamente dura a dura (578 a 838 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y de ph básico. Supera la norma de agua potable hasta 30 veces para el As, 4 a 5 veces para el cloruro y hasta 2 veces para el sulfato. Sus elevados valores de As, Cl y  $\text{SO}_4$  provienen posiblemente de las zonas de alteración asociadas al CV Los Cuyanos (Pleistoceno Inferior a Superior, 6, 8).

Río Negro (1 muestra): Agua eminentemente clorurada sódica, salobre (6.667 mg/l de TSD), muy dura (1.257 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ). Supera la norma de agua potable en 24 veces para el As, 14 veces para el cloruro y 3 veces para el sulfato. En razón de su posición geográfica y sus características químicas este río está fuertemente influenciadas por el aporte de las aguas que afloran en las termas de Río Negro.

Río Juncalito (2 muestras): Aguas eminentemente cloruradas sódicas, levemente salobres (1.129 a 1.205 mg/l de TSD), relativamente blandas (174 a 215 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y de ph básico. Superan la norma de agua potable hasta 18 veces para el As, y hasta 2 veces para el cloruro. Un valor de ph (9.43) medido en terreno también supera esta norma. Evidencias de la existencia de fuentes termales (11, 12, observaciones en terreno), tal como para el caso del río Negro, podrían explicar el enriquecimiento de las aguas en As y Cl.

Salar de Piedra Parada (2 muestras): Aguas eminentemente cloruradas sódicas, salada (94.230 mg/l de TSD), durísimas (11.100 a 16.000 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ) y de ph básico. Supera la norma de agua potable hasta 1.100 veces para el As, 144 a 169 veces para el cloruro, 19 a 42 veces para el sulfato y 17 a 24 veces para el magnesio. Según (3), los aportes que llegan a este salar son salobres debido a disolución de salmueras residuales y sales evaporíticas de un antiguo salar recubierto por las rocas volcánicas. Depósitos evaporíticos, principalmente yeso y halita con abundante material terrígeno, de edad probable Pleistoceno Inf. a Sup?. (6), afloran efectivamente, en la zona oriental del salar.

Salar Grande (1 muestra): Agua eminentemente clorurada sódica, que por su grado de salinidad corresponde a una salmuera (131.970 mg/l de TSD) durísima (23.100 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ). Supera la norma de agua potable 130 veces para el As, 3 veces para el flúor, 320 veces para el cloruro, 6 veces para el sulfato y 9 veces para el magnesio.

## DISCUSIÓN

Los elevados contenidos de cloruro de sodio en la mayor parte de las muestras (salvo para la Laguna Bayo) indican una fuerte interacción con salmueras y/o evaporitas halíticas. En el caso de las muestras con elevados contenidos de sulfato, su origen puede explicarse por aporte de aguas provenientes de fuentes subterráneas asociadas a los complejos volcánicos Sierra Nevada y Los Cuyanos y/o aporte de aguas provenientes de sectores con depósitos de azufre libre relacionado a estos mismos complejos volcánicos

El principal problema que presentan los cuerpos de agua estudiados para el consumo potable de sus aguas se relaciona con la presencia de elevados contenidos de arsénico y flúor, cuyos efectos en la salud tanto humana como animal son mucho mayores que los causados por los iones cloruro, sulfato y magnesio. De acuerdo a los datos obtenidos ninguno de los cuerpos de agua estudiados presenta una adecuada calidad de agua para su consumo como bebida.

## CONCLUSIONES

La gran mayoría de las muestras analizadas corresponden a aguas fuertemente cloruradas sódicas, salvo

las dos muestras provenientes de la Laguna del Bayo, las que demostraron ser fuertemente sulfatadas sódicas. Los elevados contenidos de arsénico, flúor y sales, en especial cloruro, sulfato y magnesio en los cuerpos de agua estudiados, indican que ninguno de ellos presenta una adecuada calidad fisicoquímica para consumo de bebida.

La química de las aguas está principalmente controlada por dos factores. El primero es la interacción de las aguas con antiguas salmueras y depósitos evaporíticos, directamente relacionados con la abundancia de cuencas intramontanas cerradas en la zona y a la alta tasa de evaporación reinante. El segundo factor corresponde a la presencia de fuentes termales, depósitos de azufre volcánico y zonas de alteración, principalmente asociados a los Complejos Volcánicos Sierra Nevada y Los Cuyanos, que explicarían el alto contenido de sulfato de algunas de esta agua y que sería, además, responsable de los altos contenidos de As que presentan las Termas de río negro, el río Negro y el río Juncalito.

## AGRADECIMIENTOS

Esta publicación ha sido auspiciada y patrocinada por la Subdirección Nacional de Geología, Sernageomin en el marco del proyecto MAP (Proyecto Multinacional Andino) y III Región Cordillera del Sernageomin. Así también se agradece el trabajo de edición efectuado por el Subdirector Nacional de Geología (Sernageomin), Dr. Constantino Mpodozis. El personal del Laboratorio Químico del Sernageomin, bajo la dirección de Carmen Espejo realizó los análisis químicos. Carmen Espejo, además colaboró en la edición de la metodología. Jorge Lemp colaboró amablemente en los trabajos de terreno. Edmundo Polanco colaboró activamente para el buen término de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. Davis, S.N., De Wiest, R. 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel. 563 p. España.
2. Instituto Nacional de Normalización – Chile. 1984. NCh409/1Of.84 Norma Chilena Oficial. Agua Potable – Parte 1 Requisitos. Edición de 1994. 10 p.
3. Dirección General de Aguas. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III Regiones Chile. Volumen IV Estudio de Cuencas de la II Región. Realizado por Francois Risacher, Hugo Alonso, Carlos Salazar.
4. Cisternas, M., 1977. Estudio geológico del flanco occidental de Cordillera de Claudio Gay: sector de la Ola al sur del Salar de Pedernales (26 30'S) III Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Informe inédito, U. de Chile, 152 p.
5. Clavero, J., Mpodozis, C. y Gardeweg, M., 1997. Mapa geológico del área del Salar de Wheelwright, III Región de Atacama, versión preliminar. Serie Mapas Geológicos N, Escala 1:100.000, SERNAGEOMIN-CHILE.
6. Clavero, J., Gardeweg, M. y Mpodozis, C., 1998. Mapa Geológico del área del salar de Piedra Parada, III Región de Atacama, versión preliminar. Serie Mapas Geológicos N, Escala 1:100.000, SERNAGEOMIN-CHILE.
7. Clavero, J., Mpodozis, C. y Gardeweg, M., 2000. Geología y geocronología de la Caldera Wheelwright, alta Cordillera de la IIIª Región de Atacama, Chile. Presentado al 9 Congreso Geológico Chileno, Pto Varas.
8. Gardeweg, M., Clavero, J., Mpodozis, C., Villeneuve, M. y Pérez de Arce, C., 1999. Volcanismo cuaternario en la región sur de los Andes Centrales (26-28S): Geocronología K-Ar, 39Ar/40Ar e implicancias regionales. In XV Congreso Geológico Argentino, Salta, Actas I, p.96.
9. Mpodozis, C., 1995. Informe final Proyecto Fondecyt 1950025. Delaminación cortical en los Andes Centrales: análisis de las consecuencias magmáticas y tectónicas.
10. Muñoz, J., 1984. Geología de la Hoja Salar de Maricunga (1:100.000): Informe de avance de la Hoja El Salvador (1:250.000), región de Atacama, Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Inédito, 64p.
11. Riso Patrón 1924. Diccionario Jeográfico de Chile. Imprenta Universitaria, 958 p. Santiago.
12. Hauser. 1987. Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile. Boletín, No 50, 89 p. Santiago, Chile.