

Los yacimientos de boratos de Chile

Guillermo Chong

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte
Angamos 0610, Antofagasta, Chile
gchong@socompa.ucn.cl

Juan J. Pueyo

Departamento de Geoquímica, Facultad de Geología,
Universidad de Barcelona, Martí i Franquès s/n 08028 Barcelona, España

Cecilia Demergasso

Laboratorio de Microbiología Marina, Universidad Católica del Norte,
Angamos 0610, Antofagasta, Chile

RESUMEN

Los recursos de boro de Chile se ubican, en su totalidad, en la zona norte del país, principalmente en las cuencas evaporíticas conocidas como salares y están relacionados genéticamente con la actividad volcánica del Terciario Superior-Cuaternario. Los yacimientos de mayor importancia económica se encuentran en los Salares Andinos del Altiplano entre los que destacan Surire, Ascotán, Aguas Calientes Norte, Quisquiro, Aguas Calientes Sur, Pedernales y Maricunga. Es probable que otras cuencas andinas posean estos recursos, pero sus reservas no han sido evaluadas. Los boratos se encuentran en cuerpos estratificados lenticulares, conocidos como 'barras', intercalados en secuencias detrítico-salinas y siempre en los primeros metros de la parte superficial del salar, o como nódulos de alta ley (hasta 30% B_2O_3) que pueden alcanzar decenas de centímetros, conocidas como 'papas', el clásico 'cotton-ball' de la nomenclatura norteamericana. El único mineral de recuperación económica conocido en Chile es la ulexita, un borato doble de Na y Ca, mientras que otros minerales han sido descritos sólo ocasionalmente. Una segunda alternativa es la recuperación económica de borato como subproducto en la explotación de salmueras ricas en litio/potasio del Salar de Atacama (0,84 g/l poliboratos). Yacimientos de importancia subordinada, en lo que se refiere al volumen de sus reservas, se ubican en la Pampa del Tamarugal y corresponden a horizontes de boratos asociados a paleosuelos. Finalmente, otras alternativas, económicamente irrelevantes en la actualidad, son la recuperación de boratos de las salmueras de los campos geotérmicos o de los yacimientos de nitratos.

Palabras claves: Boratos, Minerales industriales, Andes, Chile.

ABSTRACT

The borate deposits in Chile. The boron resources of Chile are all located in the northern part of the country mainly in the evaporitic basins known as 'salares' (salt flats) and are genetically related to Upper Tertiary - Quaternary volcanic activity. The most important deposits are located in the Andean basins of the Altiplano at Surire, Ascotán, Aguas Calientes Norte, Quisquiro, Aguas Calientes Sur, Maricunga and Pedernales. In addition other Altiplano basins may have boron resources, but have yet to be evaluated. The borates are present primarily in horizons known as 'barras' and usually form lenses which interdigitate with evaporitic and clastic detrital sediments. In other instances boron minerals form nodules referred to as 'papas' which are up to decimeters in diameter. Economic accumulations of boron are always located within the first few meters of the saline deposits. The only Chilean economic boron-bearing mineral is ulexite, a Ca-Na borate; other minerals

appear in minor amounts. Boron is also present in the lithium-rich brines of the Salar de Atacama from which boron can be recovered as by-product of lithium extraction (0,84 g/l as polyborates). A third, and far less important type of deposit, is present in the Pampa del Tamarugal within borate-rich horizons associated with paleosols. Finally, other boron accumulations, currently not exploitable, are associated with geothermal brines and the nitrate industry, both as by-products.

Key words: Borates, Industrial Minerals, Andes, Chile.

INTRODUCCION

ASPECTOS GENERALES

En este trabajo se aporta con una primera recopilación comprehensiva sobre el tema de los yacimientos de boratos en Chile, uno de los principales productores de este recurso en Sudamérica y que, además, posee importantes reservas a nivel mundial. En los aspectos generales se describen en su marco geológico, se ordenan y ubican geográficamente y se detallan, además, las alternativas económicas de este recurso como subproducto. Como aspectos específicos se hace una recopilación de nuevos antecedentes en su mineralogía, estratigrafía y aspectos químicos y se describe su potencial estimado. Se establecen algunos antecedentes de edad y sobre su génesis comparándolos con yacimientos similares argentinos.

RESEÑA HISTORICA

Antiguos informes inéditos, sin ningún tipo de referencias y, a su vez difícilmente referenciables, encontrados en la biblioteca y en archivos de la Corporación de Fomento de la Producción en Santiago y en la Región de Antofagasta, mencionan que en la primera parte del siglo veinte, Chile llegó a ser primer productor mundial de boratos, siendo los depósitos principales los salares de Surire y de Ascotán en las actuales Regiones de Tarapacá y Antofagasta, respectivamente (Garcés y Chong, 1993). También se registra que los depósitos eran explotados por la empresa británica Borax Consolidated, que los yacimientos ya eran conocidos en 1836 y su explotación se habría iniciado alrededor de 1852. Esta última parte de la información debe tomarse con reservas toda vez que en dicha época esos salares no formaban parte del territorio chile-

no. A su vez, Barker y Lefond (1985) describieron la explotación de Ascotán iniciándose en 1883 con un máximo de 36.000 toneladas métricas en 1913 y cesando en 1967. Finalmente, A. Tassara¹ escribe en su trabajo : 'el salar de Maricunga, junto con el de Pedernales y Punta Negra, constituyeron importantes fuentes de boratos entre 1850 y el primer decenio del siglo XX, época en que Chile ocupó el segundo lugar en la producción mundial de boratos'. De acuerdo a Harben y Kuzvart (1997), en 1887 Chile producía un cuarto del total de la demanda mundial de boratos. En todos los casos el único mineral explotado era la ulexita.

La importancia de estas explotaciones decayó rápidamente cuando se conocieron y comenzaron a producir los yacimientos de 'boratos duros' (bórax, colemanita, y otros) de Estados Unidos, Turquía y, posteriormente, Argentina. Estos minerales tienen importantes ventajas respecto de la ulexita, por su concentración en B_2O_3 y su mayor solubilidad en los procesos de beneficio. Por otra parte, la ubicación, el difícil acceso y la irregular distribución de las leyes de B_2O_3 en los depósitos de ulexita de los salares altiplánicos chilenos, son factores negativos adicionales para una explotación económica más competitiva. Cuando los 'boratos duros' mencionados aparecen en el mercado los yacimientos de los salares andinos chilenos fueron literalmente olvidados al punto de desaparecer su explotación en volúmenes significativos.

Esta situación se mantuvo hasta la década de 1970, época en que se reanudó el interés por los boratos, dado que se trata de un producto con una comercialización muy estable y que mantiene nichos de mercado que pueden ser aprovechados favorablemente por pequeñas y medianas empresas. Aunque la explotación se realizó en diversos yacimientos (La Joya, Salar de Aguas Calientes

¹ 1997. Geología del Salar de Maricunga, Región de Atacama (Inédito), Informe Registrado IR- 97-10. Servicio Nacional de Geología y Minería, 30 p.

Sur, Quisquiró), fueron, de nuevo, Surire y Ascotán los depósitos más estables en cuanto a su explotación, la que llega hasta hoy cuando estos salares representan la única producción del país. Empresas establecidas en otros depósitos de la Región de Antofagasta han tenido una irregular y/o corta trayectoria como en los casos de Quisquiró y Aguas Calientes Sur.

De acuerdo a Barker y Lefond (1985) el 'U.S. Bureau of Mines' ha calculado una reserva base de mena para Sudamérica del orden de 30 millones de toneladas métricas con un promedio de 20% de B_2O_3 . De acuerdo a Alonso (1986) en Chile existen sectores con depósitos de salares que forman parte de áreas con reservas que varían entre menos de

uno hasta 30 millones de toneladas de mena (Fig. 1C).

Finalmente, Garrett (1998) entregó cifras, en millones de toneladas, correspondientes a mena y equivalente en B_2O_3 respectivamente, de 100 y 20.5 para Argentina; 20 y 15 para Bolivia; 59.5 y 76 para Chile y 20 y 5 para Perú. En este caso hay que considerar que las altas cifras de reservas, especialmente las equivalentes en B_2O_3 para Chile vienen dadas por el contenido, como subproducto, de este recurso en el Salar de Atacama y en la industria salitrera.

En Chile no existen trabajos específicos sobre yacimientos que permitan establecer sus reservas reales de boratos por lo que las cifras y estimaciones mencionadas resultan especulativas.

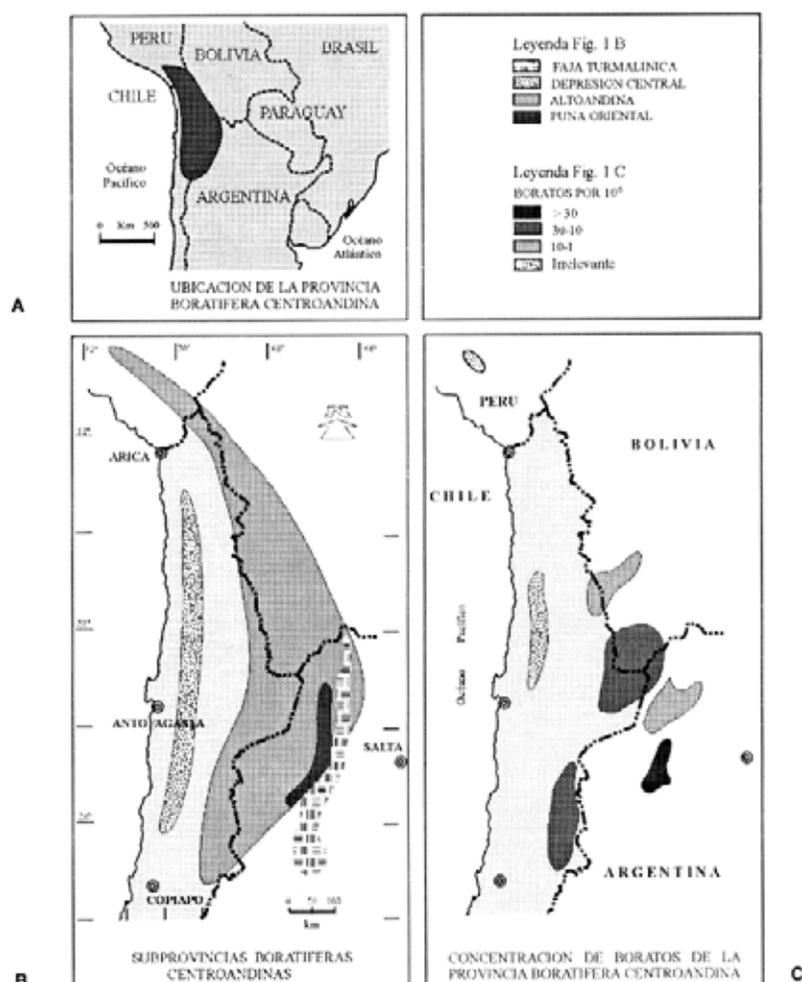


FIG. 1. A- muestra de la ubicación de la provincia boratífera centroandina, *sensu* Alonso (1986); B- concentración de la provincia centroandina *sensu* Alonso (1986); C- concentración de boratos de la provincia boratífera centroandina, *sensu* Alonso (1986).

LOS YACIMIENTOS

GENERALIDADES

Los yacimientos de boratos de Chile se ubican en lo que Alonso y Viramonte (1985) describieron como la Provincia Boratífera Andina y que, posteriormente Alonso (1986), separó en las subprovincias boratíferas centroandinas. (Figs. 1A, B). Corresponde a una región entre los 16 y 27°S y los 66 y 70° W con un eje mayor norte-sur del orden de 1.500 km, y otro este-oeste de ca. 400 km, que abarca parte del sur del Perú, la parte centro-oriental del Norte Grande de Chile, y los sectores altiplánicos del noroeste de Argentina y del suroeste de Bolivia. La totalidad de los yacimientos de boratos conocidos en Sudamérica se encuentran en este sector. Los yacimientos chilenos corresponden a dos de las tres subprovincias definidas por Alonso (1986), la de la Depresión Central y la Altoandina, ubicadas en las unidades geomorfológicas de la Pampa del Tamarugal y de la Alta Cordillera, respectivamente.

Esta gran concentración de boratos se sitúa en una región en la que los Andes alcanzan su ancho máximo, con particulares condiciones geotectónicas y de marco geológico, incluyendo una intensa actividad volcánica cenozoica. Resulta de interés mencionar que, en esta región andina, también, se ubican yacimientos de cobre, molibdeno, estaño, nitratos, yodo y azufre con dimensiones de escala mundial.

Los yacimientos de la Subprovincia Altoandina del sector chileno son exclusivamente del tipo salar y, hasta la fecha, no se han descrito depósitos asociados a secuencias sedimentarias miocenas, como sucede en Argentina. Estos últimos no están relacionados con salares, presentan una gran variedad mineralógica, y constituyen reservas de categoría mundial (Subprovincia de la Puna Oriental) alcanzando el orden de los cien millones de toneladas de B_2O_3 (Fig. 1C) Esta situación sitúa a Argentina, desde el punto de vista de reservas y producción, inmediatamente detrás de U.S.A. y Turquía, países que poseen los yacimientos de mayor envergadura del mundo (Alonso, 1986).

Chile se ubica en segundo lugar después de Argentina, en cuanto a reservas y capacidad instaladas de tratamiento entre los países andinos productores.

Tipos de yacimientos

Los yacimientos de boratos en Chile (Fig. 2) se agrupan de la siguiente manera:

A- Yacimientos en Salares

1. En los salares andinos (*sensu* Chong, 1984).
2. En los salares preandinos (*sensu* Chong, 1984).

B- Otros yacimientos

1. Yacimientos en la Pampa del Tamarugal.
2. Boratos de los yacimientos de nitrato y yodo.
3. Las salmueras de los campos geotérmicos.

En los salares se han explotado y/o se explotan boratos, siendo los de tipo salar andino los más importantes en mena y los preandinos en salmueras como subproducto. En ambos casos se supera, muy lejos en reservas, a los de la Pampa del Tamarugal.

La industria salitrera ha intentado fabricar ácido bórico como subproducto en diversas oportunidades, pero nunca con resultados económicos favorables. Finalmente, la recuperación de boratos, a partir de las salmueras de campos geotérmicos es una posibilidad actualmente irrelevante, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Todas las ocurrencias de boratos descritas en Sudamérica se asignan al Cenozoico con edades que van desde el Mioceno hasta la actualidad, situación que se puede reconocer bien en Argentina, donde hay una mayor cantidad y variedad de estos depósitos. En Chile no se han publicado trabajos específicos sobre la edad de estos yacimientos con la excepción del Salar de Maricunga, donde A. Tassara¹ concluyó que su edad se situaría en el período 'Mioceno Superior a Plioceno Inferior'.

Las observaciones de los autores indican que, en la actualidad, hay una deposición significativa de boratos a través de fuentes termales, y que todos los yacimientos conocidos en los salares se ubican, en relación con el nivel freático, en los primeros metros, a partir de la superficie, de las secuencias salino-detriticas de las cuencas. Los únicos sondajes en un depósito de este tipo se han realizado en

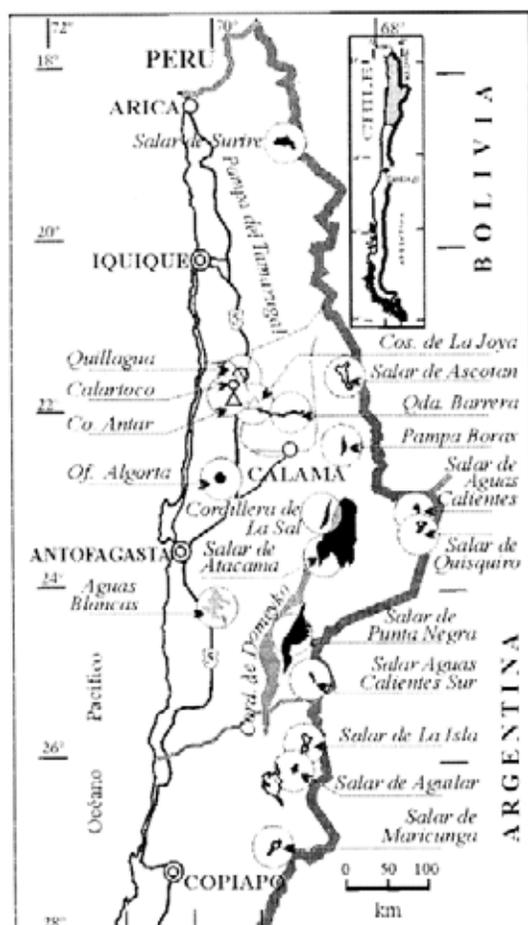


FIG. 2. Distribución de los principales recursos de boratos en Chile.

el Salar de Surire (R. Salas)² y no señalan la presencia significativa de boratos en profundidad. Tampoco hay antecedentes que permitan establecer la existencia de removilización de yacimientos antiguos y, hasta la fecha, no se han encontrado depósitos o anomalías de boratos en secuencias lacustres de edad Mioceno-Plioceno. Alonso (comunicación escrita, 1990) mencionó la presencia de ulexita secundaria diseminada en la Cordillera de la Sal, inmediatamente al oeste del Salar de Atacama. La ocurrencia es en forma de nódulos milimétricos en sedimentos clásticos, formando

parte del material detrítico más superficial y distribuidos erráticamente en un pequeño sector del Valle de la Luna.

Al igual como sucede en Argentina (Alonso, 1985), la génesis de los yacimientos está estrechamente relacionada a procesos volcánicos que serían los que proporcionan los boratos. Mecanismos de evaporación, en climas áridos a semiáridos, favorecerían los procesos de concentración en cuencas evaporíticas y/o lacustres.

Con la información existente se puede establecer que en el arco volcánico Mioceno-Reciente han existido procesos magmáticos que han dado lugar a yacimientos de boratos, como mínimo, desde el Mioceno, especialmente en Argentina. De acuerdo a las descripciones de Alonso (1986) se deduce que estos procesos se habrían desplazado de este a oeste, toda vez que este autor ubicó los yacimientos más antiguos en la 'Subprovincia de la Puna Oriental' (Fig. 1B). A su vez, los más modernos se encuentran en la Subprovincia Altoandina localizada en la zona altiplánica de la Cordillera Occidental. También indica que los procesos de mineralización habrían tenido una continuidad en el tiempo y, de acuerdo al volumen y variedad de los yacimientos, con un máximo desarrollo en el Mioceno.

De acuerdo a Tassara (1997), el depósito del Salar de Maricunga sería mioceno a plioceno inferior. Los antecedentes de los autores ubican a los depósitos tipo salar andino en la Subprovincia Altoandina *sensu* Alonso (1986) y, consecuentemente, se asume para ellos una edad desde el Mioceno superior hasta hoy.

Definir edades para el resto de yacimientos de boratos es un tema que actualmente se estudia en el marco de un nuevo proyecto de investigación de evaporitas en el Desierto de Atacama. En el caso de las salmueras del Salar de Atacama, éstas se consideran sincrónicas con la sedimentación de los salares andinos. Se estima que los boratos de los yacimientos de nitratos se han depositado junto al ensamble de sales con que se asocian y al cual Chong (1994) asignó, tentativamente, una edad oligocena y un origen primario volcánico. Acerca de la edad de los yacimientos de la Pampa del Tamarugal no se cuenta con ningún tipo de antecedente.

²1975. Estudio geológico del Salar de Surire. Provincia de Arica-Chile. Comisión Arica (Inédito). Instituto de Investigaciones Geológicas, 95 p.

MINERALOGIA

De acuerdo a Garrett (1998) se conocen en el mundo del orden de 230 minerales de boro y estima que el mejoramiento de las técnicas analíticas ofrece una posibilidad de encontrar varios otros en el mediano plazo. Sin embargo, desde el punto de vista económico, se reconocen sólo algunos, separándose en boratos de sodio como tincal o bórax, tincalconita o mohavita y kernita; de calcio, colemanita, priceíta, inyoíta y datolita; de sodio y calcio como la probertita y ulexita; de calcio y magnesio, hidroboraquita y los de magnesio como la szalbeliyita.

El único mineral de boro de interés económico presente en los depósitos chilenos es la ulexita, un borato doble de calcio y de sodio, llamado también boronatrocalcita, de fórmula general $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Es un mineral blanco brillante, de aspecto sedoso y muy característico por la formación de fibras o cristales aciculares, y suele ser descrita, en la literatura técnica norteamericana, como 'cotton ball' (Fig. 3). Eventualmente, se encuentra su equivalente deshidratado, la probertita ($\text{CaNa}(\text{B}_5\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$).

La presencia de minerales como kaliborita ($\text{KMg}_9\text{B}_{11}\text{O}_{39} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$); inyoíta ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$, bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y gowerita $\text{NaB}_6\text{O}_7(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ha sido indicada como minoritaria, en los yacimientos de nitratos (Ericksen, 1983). Garrett (1998) indicó, en los mismos yacimientos, la presencia de colemanita ($\text{Ca}(\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$, ginorita ($2\text{CaO} \cdot 7\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), hidroboraquita ($\text{MgCa}(\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), iquiqueita

($\text{Na}_8\text{K}_6\text{Mg}_2\text{Cr}^{+}\text{B}_{45}\text{O}_{87} \cdot 25\text{H}_2\text{O}$), probertita y ulexita. Alonso (1986) mencionó la presencia, en el Salar de Carcote, de 'pequeños depósitos de evapocristales de bórax, crecidos en el fango'.

Análisis sistemáticos de microscopía óptica, difracción de rayos X y microscopía electrónica en menas de boratos de distintos salares, han indicado la presencia exclusiva de ulexita y, en algunos casos hidroboraquita, en cantidades muy subordinadas. Análisis de difracción de rayos X, en brechas volcánicas de paleocampos termales asociados a yacimientos de nitratos (Chong, 1994) en el sector de la ex Oficina Salitrera Algorta, muestran la presencia de probertita junto a minerales de manganeso. En los yacimientos de nitratos de Pedro de Valdivia (Pueyo *et al.*, 1998) sólo se detecta la presencia de kaliborita ($\text{K}_2\text{Mg}_4\text{B}_2\text{O}_{41} \cdot 19\text{H}_2\text{O}$) y probertita (DRX y microscopía óptica). Tassara (1997) en su estudio sistemático del Salar de Maricunga, describió únicamente ulexita como mineral de boro.

Como minerales de ganga aparecen yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halita (NaCl), thenardita (Na_2SO_4) y, muy subordinadamente, calcita (CaCO_3), baritina (BaSO_4) y celestita (SrSO_4). Coloraciones amarillas y rojas observadas macroscópicamente en los salares de Surire y Ascotán se asignan a sulfuros de arsénico (Fig. 4), y aparecen tanto en los horizontes de boratos como en la sobrecarga. Su análisis indicó valores de 0,24% de As y 0,29% de S



FIG. 3. Cristales de ulexita mostrando su típica estructura en fibras. El grosor de cada fibra es del orden de 0,5 a 2 μ .

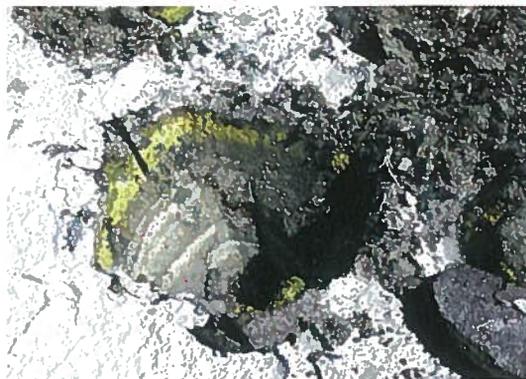


FIG. 4. Horizontes amarillos de sulfuros de arsénico (oropimente? rejalgar?) en el Salar de Ascotán, intercalados con ulexita, yeso y halita. El material oscuro corresponde a lodos orgánicos con pirita diseminada.

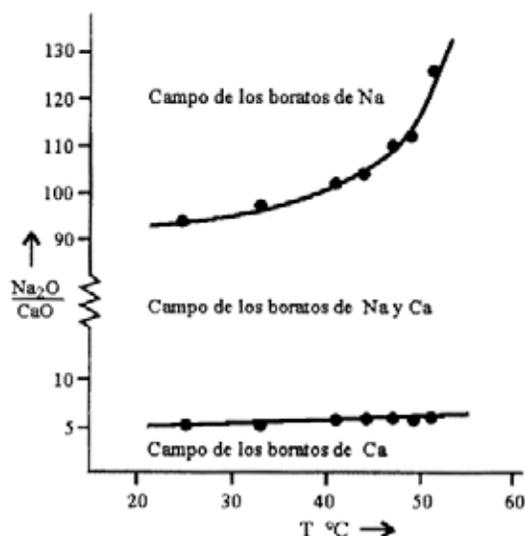


FIG. 5. Determinación experimental de los campos de estabilidad de isoboratos de Na y Ca como una función de $\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ y la temperatura (tomado de Inan *et al.*, 1973).

(porcentaje en peso seco). Esta situación es similar a la de los salares de Argentina, donde asociados a los yacimientos de boratos, Alonso (1986) describió directamente la presencia de rejalgar y oropimente, incluso en transformaciones de uno a otro por oxidación.

En el Laboratorio de Microbiología Minera de la Universidad Católica del Norte (LMM) se logró aislar una cepa bacteriana, que por su morfología es comparable con el género *Desulfotomaculum*, inoculando un medio selectivo con estos probables minerales de arsénico. En el laboratorio se evidenció la capacidad de esta cepa, de formar un precipitado amarillo brillante en condiciones similares a las descritas por Newman *et al.* (1997a, b), mediante la acción de una cepa aislada de lagos de U.S.A. La identificación del precipitado amarillo como As_2S_3 por Newman *et al.* (1997a, b) es una evidencia del proceso de biomineralización que involucra tanto la respiración de As (V) como de S (VI).

En los salares de Quisquiro y Surire, se han encontrado partículas milimétricas de azufre diseminado. En el caso de Surire se comprobó la presencia de *Thiobacillus* asociados a la fuente termal de Polloquere, sugiriendo el origen biológico del azufre. Finalmente, se ha observado pirita diseminada que se encuentra en lodos con alto contenido orgánico.

Inan *et al.* (1973) definieron los campos de

estabilidad para el sistema de los boratos de sodio y calcio, en función de la relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{Ca}$ en el agua y de la temperatura (Fig. 5). Los boratos de calcio solamente serían estables para razones $\text{Na}_2\text{O}/\text{Ca}$ en el agua inferiores a 5, mientras que los boratos de sodio necesitan una relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ superior a 100. En estudios en curso se ha comprobado que las salmueras de Surire y de otros salares se sitúan, en la gran mayoría de los casos, dentro del campo de los boratos dobles de Na y Ca como la ulexita. Esto explicaría la presencia, en exclusividad, de la ulexita en los depósitos chilenos.

Los perfiles de salares que contienen horizontes de ulexita son relativamente monótonos y un esquema genérico se describe para el Salar de Ascotán donde se ha analizado, por DRX y análisis químicos, los elementos mayoritarios y trazas de la 'secuencia económica' que contiene los horizontes de boratos con el objeto de conocer su composición de detalle (Tabla 1). La sección es la siguiente:

- costra superficial seca, formada por yeso, halita, ulexita, hidroboracita (13 cm).
- parte superior de la sobrecarga, con yeso, halita, ulexita e hidroboracita (20 cm).
- parte media, formada por idéntica mineralogía que la superior, además de plagioclasa, como material terrígeno procedente de la erosión de rocas volcánicas (22 cm).
- parte inferior de la sobrecarga con yeso, halita, ulexita e hidroboracita (25 cm).
- horizonte económico ('barra') cuyos 33 cm superiores, además de la ulexita predominante, contienen yeso y halita.
- continúa el mismo horizonte con yeso, halita, ulexita e hidroboracita, (35 cm).
- base del horizonte económico que contiene halita, ulexita, celestita y baritina, estas últimas como trazas (18 cm).
- limos oscuros con algo de pirita (8 cm).
- en la base, yeso y trazas de celestina, cubierta parcialmente por el nivel freático (mayor que 25 cm).

En una muestra tomada en arcillas que infrayacen al horizonte de boratos de ulexita se determinó la presencia de calcita, halita y yeso. No se ha estudiado la composición mineralógica de la fracción arcillosa, pero con lupa binocular se detectan numerosas frústulas de diatomeas.

TABLA 1. COMPOSICION QUIMICA DE MUESTRAS DE SOBRECARGA (9923-9926); 'BARRA' (9927-9928) Y 'BASAMENTO' (9929-9937) EN EL SALAR DE ASCOTAN.

Muestra	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₄	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	As ₂ O ₃	REE	Ba	Mo	Sr	Rb	Pb	Zn	W	Cu	V
9923	8,50	1,85	0,08	4,90		25,4	6,60	0,86	20,80	0,01		0,05	0,89	0,02	43	5	6425		7	9	12	11	27
9924	8,60	1,65	0,04	4,09		12,6	4,02	0,51	16,30	0,00		0,03	0,91	0,02	41		5920		6	10	6	2	32
9925	9,40	0,99	0,08	10,30	0,00	11,3	5,60	0,83	15,60			0,02	0,05	0,02	24		2110	16	6	9	8		34
9926	5,80	1,44	0,07	2,18	0,01	32,6	3,31	0,37	24,00	0,01	0,00	0,06	1,13	0,04	54		7270		6	8	8	4	18
9927	9,70	0,63	0,01	0,76		4,1	3,56	0,44	14,50	0,00		0,02	0,12	0,01			1520		8	15	3		16
9928	9,70	1,48	0,05	3,61	0,00	1,9	4,80	0,68	12,40	0,01	0,00	0,07	0,68	0,01	79		6000		8	18	11	0	26
9929	10,30	2,66	0,15	5,10	0,00	3,1	6,10	0,91	11,60	0,01	0,00	0,13	0,05	0,00	216		14620		7	18	16	8	39
9930	9,80	13,50	0,51	44,50	0,03	3,7	12,30	1,76	1,12	0,04	0,01	0,33	0,09	0,02	506		9300	24	9	18	18	7	108
9931	0,50	1,41	0,15	3,15	0,01	52,2	0,35	0,09	31,10	0,01		0,09	0,03	0,01	48		7520		6	8	6	4	18
9935	6,10	0,95	0,03	5,60	0,01	27,5	2,48	0,32	22,20	0,00		0,03	0,23	0,01	32	2	4820		9	9	4		24
9937	3,43	2,91	0,11	42,40	0,06	2,0	3,28	0,68	22,50	0,01	0,00	0,11	0,08	0,01	83	13	1520	24	4	11	34		90

Hasta las REE los valores están en %. A partir del Ba en ppm.

TABLA 2. COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGUAS DE LA PRINCIPAL SURGENCIA TERMAL DE POLLOQUERE (SURESTE DEL SALAR DE SURIRE).

Muestra	T°C	pH	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	K	Na	Ca	Mg	Li	B	Si	NO ₃	As	P	Pb	Ba	Ni	V	Cu	Fe	Mn	Sr	Al	Zn	Cd	Se	
SU A-7	75	6,4	0	61	1430	1058	228	1091	102	40	5,5	39	61	0	797	425	0	56	1	0	0	20	1305	2825	69	11	15	0	0
SU-70	75	6,3	.	.	1480	1039	219	1100	170	45	5,8	29	82	.	734	500	31	68	0	1	0	21	1850	3404	106	30	16	0	0

Hasta el NO₃ en ppm. A partir del As en ppb.

La presencia de hidroboracita aunque en cantidades muy subordinadas en relación a la ulexita, en la sobrecarga de los yacimientos en los Salares Andinos, es una novedad en estos depósitos. Alonso, comunicación escrita, indicó que este mineral, en Argentina, siempre ha sido considerado como terciario y diagénético o secundario. En nuestro caso la hidroboracita aparece en la sobre-

carga de los yacimientos y, consecuentemente, es de edad reciente y no se trata de un borato antiguo como los del Terciario de Argentina. Las opciones son que sea primario o secundario de otro anterior, pero con una transformación sinsedimentaria y no hay posibilidades de que se trate de una diagénesis de enterramiento o tardía.

LOS YACIMIENTOS DE BORATOS EN SALARES

CARACTERÍSTICAS DE LOS SALARES ANDINOS Y PREANDINOS

Los salares andinos (Chong, 1984, 1988) son las cuencas evaporíticas que se ubican en el Altiplano, en su mayoría a altitudes variables entre 4.000-4.500 m. Las cuencas pueden tener un control tectónico, haberse formado debido a la acumulación de materiales volcánicos, o estar ubicadas en estructuras volcánicas tipo caldera. Su marco geológico corresponde, casi exclusivamente, a rocas volcánicas del Terciario Superior-Cuaternario, sobreyaciendo a un basamento mesozoico-paleozoico.

En muchos casos, los yacimientos de boratos están relacionados directamente con volcanes en actividad o con campos geotérmicos. Las cuencas son someras y pueden alcanzar más de 100 m de espesor de relleno sedimentario-evaporítico. Además de los salares andinos están los Lagos Salinos Andinos que consisten en cuerpos lacustres ubicados en el mismo tipo de cuencas, pero con una masa de agua libre significativa. Dado que se presentan estadios intermedios, se habla de 'salar' cuando la superficie salina cubre una superficie superior al 50% de la cuenca evaporítica, y 'lago' cuando es el agua la que supera este porcentaje (Figs. 6, 7, Lám. 1). En algunos casos esta diferencia es difícil de precisar, toda vez que algunos salares, como es el caso de Surire (Fig. 7, Lám. 1) se convierten en lagos efímeros durante el período de lluvias torrenciales del 'Invierno Altiplánico'. Es común, además, que varias cuencas, que incluyen salares y lagos de distinta salinidad, se encuentren asociadas formando complejos sistemas hidrológicos.

La recarga hídrica de estas cuencas, tanto

subterránea como superficial, está, principalmente, influenciada por el volcanismo que actúa de diferentes formas. En algunos casos, la actividad volcánica se encuentra en el interior de las propias cuencas, como en el caso del Salar de Surire, en cuya parte central se emplaza el volcán Oquecollo que, de acuerdo a R. Salas' corta los sedimentos del salar (Fig. 7, Lám. 1), mientras que en su parte sureste incluye las fuentes termales de Polloquere (Fig. 8, Lám. 1). Las observaciones de los autores no reconocen la condición 'intrusiva' del cuerpo volcánico de Oquecollo, pero sí se observa que las sales, en el contacto con éste aparecen con deformaciones y cambios de color.

El volcanismo activo determina un alto gradiente geotérmico que incrementa, cuantitativa y cualitativamente, la lixiviación de grandes volúmenes de roca por el hidrotermalismo, cuyos solutos son transportados y acumulados en las cuencas salinas (Chong, 1984). Ejemplos de este tipo abundan en la Alta Cordillera, especialmente en los llamados 'Salares de Aguas Calientes'. En estos últimos, las aguas que ingresan a las cuencas contienen sobre los 50.000 mg/l de sólidos disueltos (TSD) lo que en promedio representa una salinidad 100 veces superior a la de las aguas meteóricas del entorno, y unas 10 veces mayor que la de las aguas termales. Las salmueras son esencialmente cloruradas con Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Li^+ y Mg^{2+} como cationes principales, y cloruros, sulfatos y boratos como aniones. La concentración de boro en las salmueras asociadas a los yacimientos oscila normalmente de 63 a 135 mg/l. Ocasionalmente, aparecen concentraciones anómalas de elementos como Cs y Rb con máximos de 8,5 y 1,2 mg/l, respectivamente (caso del Salar de Atacama, Moraga *et al.*, 1974) y otros como Sr, Ba, Fe y Mn.

LAMINA 1**Figuras**

- 6 Vista panorámica de un sector del lago Chungará, un modelo de Lago Andino de la Alta Cordillera en el Altiplano de Arica, Región de Tarapacá.
- 7 El Salar de Surire, vista panorámica hacia el norte. Se observa la cubierta de costras salinas blancas, los cuerpos de agua libre tanto en lagunas como en la zona marginal. En el centro, como una mancha oscura, se observa el volcán Oquecollo. Asimismo se puede observar el marco volcánico que rodea la cuenca, y que hace inferir que ésta se ubica en una estructura de caldera.
- 8 Vertientes termales de Polloquere en el Salar de Surire. Se pueden reconocer las partes blancas en la superficie azul de la laguna que corresponden al burbujeo de las aguas termales además del vapor que emana de éstas.
- 9 Vista panorámica, hacia el sureste de un sector del Salar de Punta Negra, uno de los salares preandinos. La parte central oscura corresponde a un núcleo principalmente de halita, mientras que los bordes blancos corresponden a zonas 'activas' donde la sobrecarga de agua subterránea entra a la cuenca.
- 10 Vista panorámica del 'Núcleo de Cloruros' del Salar de Atacama. Esta unidad salina es la que contiene las salmueras económicas, incluyendo los boratos.
- 11 Aspecto típico de una explotación de boratos en el Salar de Ascotán. La persona que aparece a la izquierda en la fotografía, está de pie sobre el horizonte económico de ulexita o barra, que se extiende con una potencia de ca. 80 centímetros.

LAMINA 1

6



7



8



9



10



11



Los Salares Preandinos (Chong, 1984), se ubican entre la Precordillera y el Altiplano. Corresponden a las cuencas de Atacama y Punta Negra (Figs. 9, 10, Lám. 1). Son los más antiguos y los de mayor dimensión de Chile, poseen un variado marco geológico, con predominio de rocas cenozoicas, especialmente volcánicas y detríticas. Posiblemente, en el Mioceno-Plioceno ambos salares formaron parte de una sola cuenca controlada tectónicamente.

Son cuencas evaporíticas que, en su sector occidental, están en etapa de funcionalidad mínima debido a que la recarga hidrológica que reciben de la Precordillera es subordinada. En cambio, la mayor recarga proviene, tanto subterránea como superficialmente, desde el este, norte y sur. Los iones que se concentran en estas cuencas tienen un origen volcánico, siendo una evidencia parcial la composición isotópica del azufre de los sulfatos (Spiro y Chong, 1996). Estos salares más antiguos se caracterizan por una zonación definida de facies pasando desde los abanicos aluviales externos, por la siguiente distribución concéntrica: **a-** una mezcla de costras salino-detríticas; **b-** un sector de costras sulfatadas y, finalmente, **c-** un 'núcleo' central formado, casi exclusivamente, por cloruros (Fig. 10, Lám. 1). En el caso del Salar de Atacama, el espesor salino en el núcleo supera los 500 m como se ha comprobado mediante sondajes que han terminado en sal sin alcanzar el basamento. En su registro estratigráfico se intercalan tobas volcánicas riolíticas con edades K-Ar de 4.0 Ma (Bevacqua, 1992).

LOS YACIMIENTOS DE BORATOS EN LOS SALARES ANDINOS

En estas cuencas se reconocen los mayores yacimientos de boratos del país, y su génesis está asociada a la sobresaturación de las salmueras en boratos y posterior precipitación de éstos. Alonso (1986) describió este mecanismo como 'la evolución de un proceso lacustre con enriquecimiento progresivo en boro, hasta alcanzar un estadio de precipitación continua en un marco de interrelación de mecanismos químico-evaporíticos'.

Los cuerpos mineralizados o mena son denominados 'barras' y 'papas' de ulexita, correspondiendo las primeras a horizontes y los segundos a nódulos. Las 'barras', que resultan de una acumulación de nódulos constituyendo un horizonte con-

tinuo, se forman por precipitación de la salmuera intersticial en la interfase vadoso-freática. Ese lugar está sometido a concentración progresiva por evaporación de las salmueras que ascienden por capilaridad a través de la capa vadosa, según un mecanismo clásicamente descrito para la formación de las evaporitas de crecimiento desplazativo en el seno de una matriz fangosa. La causa de que tanto las 'papas' como la 'barra' se presenten, según un nivel perfectamente definido, se debe a que es el nivel freático el que controla su posición en profundidad. Las zonas sometidas a evaporación capilar precipitan eflorescencias en superficie. Sin embargo, estas eflorescencias no dejan registro fósil porque son siempre recicladas por la lluvia, el viento y las inundaciones periódicas durante el 'invierno altiplánico' y vuelven a alimentar en solución al freático salino, contribuyendo así a su progresiva concentración en iones.

Alonso y Gutiérrez (1984), sobre la base de estudios sistemáticos realizados en la Puna argentina, propusieron un modelo de yacimiento que integra las distintas litofacies de ulexita descritas. Así encuentran, en sentido proximal-distal respecto de las paleofuentes termales, una distribución de ulexita en 'barras' en las proximidades de las surgencias, en 'papas' en zonas más alejadas y, finalmente, como diseminaciones, en zonas más distales.

Las 'barras' u horizontes explotables (Fig. 11, Lám. 1), tienen potencias variables desde algunos centímetros hasta, en casos excepcionales, dos metros de espesor, y se disponen sobre el nivel freático del salar que normalmente aparece entre 0,90 y 4 m. Su distribución areal es irregular y es común que tengan formas lenticulares, disponiéndose en extensiones de algunas decenas a centenares de metros cuadrados. En los cuerpos mineralizados los boratos muestran importantes variaciones en su distribución, tanto en sección como en su distribución areal, siendo muy variables los contenidos de B_2O_3 .

Las 'barras' están saturadas de agua intersticial la que puede alcanzar hasta un 40% del volumen total. Tanto la sobrecarga como el basamento están constituidos por arcillas y sales principalmente sulfatos y cloruros, de colores claros que suelen contener diatomeas. Frecuentemente aparecen, en la parte superior de la secuencia, barros orgánicos negros con abundante actividad de bacterias

reductoras de sulfato, producidos por la degradación de tapices cianobacterianos (Fig. 4). Los horizontes de boratos pueden repetirse y la irregularidad en sus concentraciones estaría indicando la existencia de diferentes procesos durante la evaporación incluyendo variaciones en el nivel freático y de la distancia a las fuentes generadoras de boratos.

La eventual presencia de concentraciones importantes de boratos bajo el nivel freático es, en la mayoría de los casos, desconocida debido a la falta de exploración sistemática. El único antecedente es el Salar de Surire, donde se han hecho sondajes de exploración (Salas, 1975) detectándose la presencia de lodo enriquecido en boratos hasta una profundidad de 23 m. Según Alonso (1986), la formación de salmueras sobresaturadas de boratos que migran desde profundidad, no puede interpretarse como la presencia de depósitos subyacentes.

En algunos casos los horizontes de boratos pueden estar aflorando, sin sobrecarga, como en sectores de los salares de Surire y Ascotán. Sin embargo, por lo general, infrayacen a una sobrecarga formada por yeso, halita, arcillas y material detrítico con clastos de rocas volcánicas, de vidrio, feldespatos, cuarzo y minerales ferromagnesianos que se intercalan con niveles de arcilla. Es común la presencia de las manchas amarillas y anaranjadas que han sido interpretadas como minerales de arsénico, y que pueden llegar a constituir lentes de algunos centímetros de espesor y algunos metros cuadrados de extensión lateral, o nódulos aislados decimétricos.

De numerosas secciones estudiadas en los salares de Quisquiro y Ascotán, se puede integrar un perfil tipo reconocible en la mayoría de las cuencas evaporíticas con estos yacimientos:

- superficie del salar, plana, con eflorescencias de cloruros y sulfatos, blancas o de colores claros.
- 0,30-0,40 m de arcillas de colores pardos claros, con abundante agua intersticial y diseminación de sulfatos, cloruros y boratos en menor proporción. Eventualmente nódulos de ulexita pura, centimétricos a decimétricos ('papas').
- 0,10-0,40 m. Nivel de ulexita, que puede alcanzar hasta 1 m de espesor, conocido como 'barra', con abundante agua intersticial. Las concentraciones expresadas en valores de B_2O_3 varían desde menos de 5% hasta valores superiores al 25%.

- 0,30-0,40 m de arcillas similares a los horizontes superiores.
- 0,10-0,05 m de boratos como laminaciones intercaladas con arcillas.
- más de 30 cm de limos arcillosos, algunos con abundante material orgánico, con emanaciones de H_2S y diseminación de sulfuros.
- nivel freático.

Todas las unidades descritas están saturadas de agua.

Este perfil tipo presenta cambios locales. Por ejemplo, presencia de los mencionados horizontes de color amarillo anaranjado con contenido de arsénico, con gran continuidad areal, especialmente en las proximidades de lagunas. Cuando el nivel de agua desciende estacionalmente, o durante períodos especialmente secos, también disminuye la cantidad de agua intersticial a lo largo del perfil. El nivel con laminaciones arcillas-boratos puede estar ausente o representado, exclusivamente, por arcillas incluyendo diatomeas.

La mayoría de los salares andinos tiene presencia de boratos, pero sólo algunos presentan volúmenes de reservas adecuados para constituir yacimientos. A ello, debe agregarse factores negativos de accesibilidad y de condiciones de explotación, ambos fuertemente limitados por las condiciones climáticas lo que permite solamente su explotación estacional.

Los salares con un mayor registro histórico de explotación y que incluyen los yacimientos más importantes, son los de Surire y Ascotán. Los siguen, con explotaciones muy subordinadas en volumen, los de Aguas Calientes Norte, Quisquiro (= Loyoques), Aguas Calientes Sur y en el pasado, los de Maricunga y Pedernales. Otros depósitos, especialmente en la III Región, como es el caso de los salares de Aguilar y La Isla, no cuentan con estudios publicados que describan su potencial.

En el caso de Maricunga, Tassara (1997) describió la presencia de costras boratadas de yeso, costras boratadas de halita y yeso y costras boratadas de halita con poco yeso. En cada una de estas unidades hay una distribución de ulexita, como único mineral de boro, al que se asocian sulfatos y cloruros, pudiéndose estimar que la fase de deposición de ulexita es posterior a la de halita y sulfatos que, normalmente, se asocian en los bordes de todos los salares. La costra boratada de yeso es descrita por Tassara (1997) como ...'interrumpida ocasionalmente por la presencia de montículos de

algunos centímetros de alto, por 1 a 1,5 m de diámetro, constituidos por un agregado de calcita y material detrítico que están rodeados por bolsones de ulexita'. Este autor interpretó la génesis de los boratos por precipitación a partir de aguas de géiseres o fuentes termales, de manera similar a los mecanismos descritos por Alonso (1991) e Igarzabal (1991) para yacimientos argentinos.

Se describen, a continuación, como ejemplos de estos depósitos, los Salares de Quisquiro y de Surire.

SALAR DE QUISQUIRO O DE LOYOQUES

Se ubica a ca. 150 km al sureste de San Pedro de Atacama y a ca. 30 km del límite con Argentina, posee un área de ca. 35 km² y está situado a una altitud de 4.200 m. El clima es extremadamente severo, con temperaturas que pueden registrar hasta -30°C en el invierno (junio-agosto) y con una fuerte influencia del 'invierno altiplánico' (diciembre-marzo). Esta situación limita, en forma muy marcada, la explotación que sólo puede hacerse durante parte del año.

La cuenca evaporítica es el nivel de base de las aguas subterráneas y de pequeños arroyos que, en el Altiplano, son denominados 'ríos' y corresponden al Loyoques, al Salado y al Agua Delgada.

El modo de presentación de los boratos es el clásico de 'barras y papas' y el perfil más común es el que se ha descrito como tipo.

Una sección poco común en este depósito muestra una sobrecarga similar a la descrita, pero sobreyaciendo a un horizonte continuo de ulexita que varía entre 1-2 m de potencia con halita y pequeñas cantidades de sulfuro de arsénico y partículas de azufre nativo. En este caso es interesante mencionar que la parte superior (30-40 cm), a pesar del aspecto homogéneo de la mineralización, es de baja ley no superando, la muestra seca, el 12% en B₂O₃. A su vez, su parte inferior, al eliminarse el agua intersticial, puede alcanzar concentraciones de hasta 24% en B₂O₃.

Hacia los bordes del salar, la sobrecarga puede estar totalmente seca y endurecida incluyendo cristales de yeso y halita con arcilla y arena. La ulexita infrayacente, mezclada con abundante yeso, sobreyace a horizontes de arcillas estériles. En este caso, la ulexita seca puede alcanzar valores cercanos al 24% de B₂O₃.

También hay secciones que no contienen mine-

ralización y están formadas por costras salinas duras (20-30 cm) sobreyaciendo a arcillas y arenas con abundante material orgánico bajo las que se encuentra, directamente, el nivel freático.

Este depósito, junto con el de Aguas Calientes, ubicado a ca. 20 km al norte fueron explotados, en la década de los '80, para usar la ulexita como materia prima para fabricar ácido bórico en Brasil. En cinco muestras orientativas tomadas en una superficie de varios km² las leyes promedio de B₂O₃, fueron del orden del 14%, valor que podía incrementarse hasta un 20% promedio en la muestra seca, y hasta alrededor de un 32%, como máximo, cuando la ulexita fue lavada. Este mineral ha servido para la obtención de ácido bórico de calidad técnica (cercano a 99,5% de pureza).

EL SALAR DE SURIRE

Este salar tiene una superficie del orden de 120 km² y se ubica prácticamente en el límite con Bolivia a unos 135 km, en línea recta, al ESE de la ciudad de Arica y a una altitud de 4.250 m. La cuenca, de forma elipsoidal, está totalmente rodeada de volcanes con una altitud promedio de 5.500 m. La disposición de los conos volcánicos sugiere que la cuenca evaporítica está ubicada en el interior de una caldera. Prácticamente en el centro de la cuenca, emerge el pequeño cono volcánico de Oquecollo y en su parte oriental se disponen las fuentes termales de Polloquere (Figs. 7, 8, Lám. 1). En la tabla 2 (p. 106), se indica la composición de algunas de las salmueras de las Termas de Polloquere.

El único mineral económico reconocido mediante difracción de rayos X corresponde a ulexita y a su equivalente deshidratado, la probertita. Se encuentra asociado a materiales volcánicos detríticos (feldespato, vidrio, minerales máficos), yeso, y silicatos de alteración. El contenido total de arsénico puede alcanzar valores de hasta un 4%. Las leyes de B₂O₃ en la ulexita varían entre 8 y 36% mientras que en las salmueras alcanzan valores entre 1 y 4%. Los contenidos en litio varían entre 20 y 400 ppm, valores relativamente altos, y se han encontrado, además, anomalías de estroncio. La ulexita que se encuentra en 'papas' ha sido analizada conjuntamente con las arcillas que las envuelven y, en algunos casos, el conjunto ha alcanzado valores superiores al 20 % de B₂O₃ (R. Salas)².

Los boratos del Salar de Surire están siendo explotados actualmente por la empresa Química e

Industrial del Boro (QUIBORAX) que tiene las instalaciones de su planta a ca. 80 km del salar donde producen esencialmente ácido bórico y concentrado de ulexita. De todos los yacimientos chilenos, éste es el más importante en lo que se refiere a volumen de reservas conocidas. R. Salas² indicó: '...la interpretación de los resultados químicos de un pequeño programa de sondajes efectuado en el Salar, han determinado que las evaporitas contienen, como principal compuesto de interés económico, significativas concentraciones de boratos, específicamente al estado de ulexita, cuya estimación es del orden de 1.500.000.000 de toneladas de mineral con alrededor del 35% de ulexita..' Sin embargo, al no especificarse las condiciones de explotación de éstas, la geometría de su distribución, ni su real importancia económica, estas cifras resultan subjetivas. Por otra parte, su explotación queda limitada por el hecho que el Salar se incluye parcialmente dentro del Parque Nacional del Lauca, sobre el cual se ha planteado su posible definición como Reserva de la Humanidad en el marco de Naciones Unidas.

LOS YACIMIENTOS DE BORATOS DE LOS SALARES PREANDINOS

Los salares preandinos son los de Atacama y de Punta Negra (Figs. 9, 10, Lám. 1). El primero posee salmueras enriquecidas en litio y potasio que constituyen el yacimiento de este tipo, más importante del mundo tanto por el volumen como por la calidad de sus reservas. En la fase de exploración que condujo al descubrimiento de este yacimiento se estimaron 40.000 toneladas de litio metálico y 400.000 toneladas de potasio metálico, por metro vertical de yacimiento, hasta una profundidad del orden de 20 m (Moraga *et al.*, 1974). Cifras similares entregaron F. Ide³ (1978) y Laborde (1978).

Entre los recursos que constituyen subproductos comerciales de las salmueras se encuentran sales de magnesio y compuestos de boro (poliboratos). Análisis de alrededor de 200 muestras de salmueras superficiales de distintos lugares del Salar entregaron, en un 80% de ellas, valores de B_2O_3 entre 0,1% y 0,2 % mientras que el 20% restante superaba el 0,2% (F. Ide³, y Laborde, 1978).

Bevacqua (1992) indicó que la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) cubicó, en el Salar de Atacama, del orden de 16.5 millones de toneladas en equivalente de H_3BO_3 . A su vez, Garrett (1998) señaló reservas del orden de 10 millones de toneladas de B_2O_3 . Estas concentraciones son adecuadas para la recuperación económica del boro si se explotan las otras sales de valor económico como potasio y litio, como está haciendo la Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH Salar) quien inició una operación destinada a producir 18.000 toneladas anuales de ácido bórico a partir de 1999.

En estos salares no aparecen boratos sólidos con una distribución tan amplia y bien definida como en los Salares Andinos. En el caso del Salar de Atacama aparece ulexita en horizontes de potencias centimétricas asociada a los sulfatos de calcio en el borde oriental y noreste del salar.

Estos horizontes se observan, en forma esporádica, con corridas de algunos cientos de metros y la ulexita es difícil de reconocer por su estrecha mezcla con el yeso. La ausencia de mayores volúmenes de ulexita puede deberse a que el sistema está saturado en sodio.

En el caso del Salar de Punta Negra (Fig. 9, Lám. 1) existen, en su parte oriental, algunos lentes de ulexita intercalados con sedimentos y con costas de sulfato de calcio, que fueron explotados en el pasado. No se cuenta con antecedentes de la importancia de esta explotación.

OTROS YACIMIENTOS DE BORATOS

LOS DEPOSITOS DE BORATOS DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL

La Depresión Central es una de las unidades geomorfológicas principales del norte de Chile y

se extiende entre Arica por el norte, hasta la latitud de Copiapó por el sur. Su expresión más típica se encuentra en la Región de Tarapacá donde se le conoce como Pampa del Tamarugal y corresponde a un relieve deprimido, plano, con pendiente hacia

³1978. Cubicación del yacimiento Salar de Atacama. Subgerencia de Desarrollo Agrícola Industrial, Área Química (Inédito), Corporación de Fomento de la Producción, 144 p.

el oeste y con escasos cerros islas emergiendo del relleno sedimentario formado por sedimentitas aluviales, lacustres, fluviales y evaporitas, además de intercalaciones de rocas volcánicas del Terciario Superior. Se ubica, con límites muy bien definidos, en parte tectónicos, entre la Cordillera de la Costa por el oeste y la Precordillera por el este, sirviendo como el más importante nivel de base para los aportes hídricos subterráneos y superficiales que provienen de la Alta Cordillera. La Pampa del Tamarugal recibe directamente los aportes tanto de la Precordillera como de la Alta Cordillera que, en esta región, forman una sola unidad geomorfológica.

Una de las características de la Depresión Central y de la Cordillera de la Costa, en el Desierto de Atacama, es la de presentar un horizonte sedimentario muy persistente que corresponde a un nivel de paleosuelo en ambiente árido que se extiende, como una cubierta continua, sobre la totalidad del relieve en forma muy homogénea. Puede aparecer bajo una delgada cubierta detrítica de suelos modernos, cubierto por abanicos aluviales o por materiales coluviales, pero en extensos sectores aflora sin ninguna sobrecarga. En la jerga de los mineros de la industria salitrera recibe el nombre de 'panqueque' (Figs. 12, 13, Lám. 2). Es de color amarillo o rosado, tiene potencias desde decimétricas hasta un máximo de dos metros, y está compuesto por material detrítico de las fracciones de arenas y limos, además de yeso, anhidrita y halita. Su constitución puede ser maciza y dura como una roca, especialmente cuando hay predominio de anhidrita, y, en otras partes, puede ser deleznable o porosa. En algunos sectores presenta estructuras sedimentarias, como grietas de desecamiento, que evidencian su exposición superficial.

Una característica muy particular de esta unidad sedimentaria, observada en extensos sectores, es que presenta, en su base, horizontes monominerales de gran pureza, normalmente de potencia decimétrica. Estos horizontes pueden estar constituidos por thenardita (Na_2SO_4), humberstonita, $(\text{K}_3\text{Na}_7\text{Mg}_2(\text{NO}_3)_2(\text{SO}_4)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ o ulexita. Recientemente se ha ubicado, en el área de Aguas Blancas, algunos de estos horizontes compuestos de darapskita ($\text{Na}_3\text{NO}_3\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y otras sales como tenardita (Figs. 12, 13, Lám. 2). Estos minerales presentan concentraciones que, en volumen y calidad, son suficientemente importantes como para ser explotadas económicamente, especialmente

las de sulfato de sodio como sucede en Aguas Blancas

Los mencionados horizontes monominerales se interpretan como el resultado de procesos repetitivos de aporte-lixiviación-precipitación. De acuerdo a esto, las inundaciones durante las épocas más lluviosas, serían responsables del aporte de sales y de los procesos de lixiviación. Posteriormente, durante ciclos más secos, el bombeo capilar desde el nivel freático de composición salina, causaría la precipitación intersticial y en eflorescencias.

Estos horizontes monominerales tienen una distribución regional relativamente restringida. En el caso de los sulfatos, se concentran en el antiguo Distrito Salitrero de Aguas Blancas, mientras que la humberstonita sólo ha sido descrita más al sur, en el ex Distrito Salitrero de Taltal. A su vez, los únicos horizontes con ulexita reconocidos en la Depresión Central, se ubican en la Pampa del Tamarugal, especialmente en la zona de Quillagua en sectores aislados que pueden cubrir algunas decenas de kilómetros cuadrados. Localidades de este tipo se encuentran en Cerros de la Joya, Quebrada Barrera, Calartoco, Pampa Bórax y Cerro Antar (Fig. 2). Los autores han reconocido sólo los depósitos de Cerros de la Joya y Cerro Antar, ambos con idénticas características.

El más típico de estos depósitos es el de Cerros de la Joya (Figs. 14A, B, Lám. 2) que posee el mayor volumen de reservas y fue explotado en el siglo XIX. Su área de mayor interés, que ha sido explotada en sectores aislados, es del orden de 3 x 3 km (Fig. 14B). Los materiales fueron beneficiados en una planta cuyas ruinas se observan en las márgenes del río Loa, ca. 10 km aguas arriba del caserío de Quillagua. En la década de los '80 se intentó la explotación de los boratos de Cerros de la Joya, pero la iniciativa no prosperó.

El modelo de depósito es muy simple y consiste en:

- 15-30 cm de una cubierta de material detrítico con esporádicas costras de anhidrita, yeso, glauberita accesoria y algo de cuarzo.
- hasta 40 cm de 'panqueque' formado por sedimentos finos, yeso, anhidrita y sal.
- hasta 30 cm de un horizonte monomineral formado por ulexita blanca, contaminada, en partes, por material detrítico.

Bajo esta secuencia hay otra de sedimentos clásticos cementados por sales, sin base expues-

ta, que alcanza hasta 10 m de potencia e incluye horizontes de 'caliche' con potencias de hasta dos metros.

Se analizaron del orden de 50 muestras de mena de Cerros de La Joya las que indican un valor máximo del orden de 16% B_2O_3 . El único mineral de reconocimiento macroscópico es la ulexita. Una muestra tomada de un antiguo acopio de mineral seleccionado fue analizada por difracción de rayos X e indicó la presencia de ulexita, anhidrita, yeso y halita, además de cuarzo, albita y microclina, en cantidades subordinadas y constituyendo la fracción terrígena.

En la misma Pampa del Tamarugal existen dos salares conectados entre sí, denominados Pintados y Bellavista. En la parte más baja de la cuenca del Salar de Pintados, definido como un salar de la Depresión Central (Chong, 1984) se ha reconocido yeso fibroso de crecimiento intersticial y pequeños nódulos (milimétricos a centimétricos) de ulexita diseminados, en sedimentos detríticos salinos. Los boratos han crecido por procesos capilares dentro de lodos saturados en salmueras (Fig. 15, Lám. 2). Es posible que en estas cuencas se encuentren concentraciones similares, pero de mayor volumen que puedan incluso ser explotables.

Estos yacimientos y ocurrencias son los que Alonso (1986) incluyó en la 'Subprovincia Boratífera de la Depresión Central' y para los cuales señaló: 'Aristarain y Hurlbut (1972), ante la imposibilidad de ubicar los depósitos de boratos de la Depresión Central dentro de algunos de los tipos de su clasificación, han preferido colocarlos independientemente como 'Tipo D', esto es, de génesis incierta'. La importancia que se asigna a estos yacimientos (Alonso, 1986) se estima aquí como excesiva, considerando sus bajas leyes, escasa distribución y reservas relativamente subordinadas. Asimismo, la extensión areal que en el mismo trabajo se les adjudica (Fig. 1B), haciéndolos coincidir con la distribución de los yacimientos de nitratos, no corresponde a la realidad. Sin embargo, esta distribución e importancia es válida si se considera el contenido marginal de boratos incluidos como parte de los yacimientos de nitratos y yodo.

Los yacimientos de boratos de la Pampa del Tamarugal en sentido estricto, sólo se distribuyen en un sector muy limitado de ésta, mientras que los nitratos se extienden a lo largo de una franja de ca.

700 km de largo y hasta decenas de kilómetros de ancho en la Depresión Central y Cordillera de la Costa (Chong, 1984).

La ubicación de estos horizontes de boratos se interpreta como debido al hecho que en este sector, la Pampa del Tamarugal recibe aportes directos de la Alta Cordillera, con aguas que incluyen una mayor cantidad de componentes volcánicos, situación que no se da hacia el sur, donde la Precordillera, en este caso la Cordillera Domeyko, es una unidad geomorfológica muy bien diferenciada, que actúa de barrera frente a los aportes de la Alta Cordillera.

BORATOS DE LOS YACIMIENTOS DE NITRATOS

Garrett (1998) mencionó en el 'caliche' de los yacimientos de nitratos los minerales de boro: colemanita, ginorita, hidroboracita, iquiqueíta, kaliborita, probertita y ulexita. Además, indicó que el ácido bórico como subproducto se produce en forma periódica desde 1880. De acuerdo al mismo autor estos iones podrían provenir desde salares, fuentes termales o de la lixiviación de terrenos adyacentes.

Los autores no cuentan con antecedentes en relación a la producción de ácido bórico por la industria salitrera y, por el contrario, poseen otros que indican que esta producción nunca ha sido económica. Asimismo, consideran que los boratos presentes en el caliche o mena de nitratos, provienen de fuentes asociadas a la génesis de estos últimos, y muy separados en edad de los yacimientos de salares.

En los procesos de beneficio de nitratos y yodo de la industria salitrera se reconocen contenidos significativos de boratos en las soluciones. Estos se estiman en promedios de 0,4 a 0,6% de $Na_2B_4O_7$ en los caliches y cerca de 200 ppm en las soluciones de los procesos de beneficio. Se ha intentado la recuperación de este elemento para usarlo en la fabricación de ácido bórico en la década de los '60. Sin embargo, la planta piloto instalada nunca tuvo un rendimiento adecuado. Esto se reintentó al final de la misma década con la instalación de una nueva planta piloto, más moderna que intentaba usar los excedentes salinos de las pozas de evaporación de Coya Sur, lo que tampoco prosperó debido a problemas económicos en el proceso y a una baja de los precios de los boratos.

LAMINA 2

Figuras

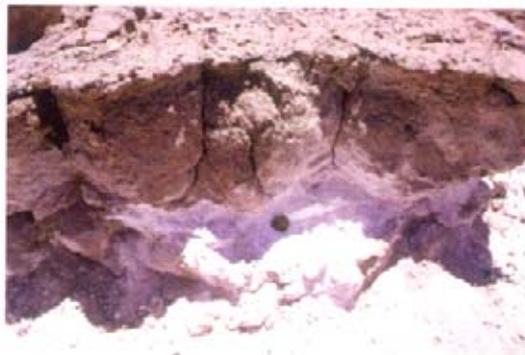
- 12 Se muestra , en la pendiente de un cerro, un horizonte blanco que corresponde a sulfato de sodio (thenardita), el que infrayace a una capa pardo rojiza que es el 'panqueque'. En este caso corresponde a un nivel de explotación en una 'calichera' en el sector de Aguas Blancas, II Región de Antofagasta. Se puede apreciar que el 'panqueque' sigue las formas del relieve.
- 13 Se observa, en detalle, el perfil homogéneo del 'panqueque' constituido de sedimentos finos, sulfato de calcio y cloruro de sodio. En este caso es de color amarillo en tono medio y, en la base, presenta un horizonte monomineral de sulfato de sodio (thenardita). De características similares en otras partes, estos 'panqueques' pueden presentar horizontes de boratos (ulexita), nitratos (humberstonita) o una mezcla de thenardita y darapskita. La fotografía corresponde a un horizonte de explotación en el Cantón de Aguas Blancas, II Región de Antofagasta. La escala es el punto oscuro en el centro (8 cm de diámetro).
- 14a Se muestra un laboreo para la extracción de ulexita en Cerros de La Joya, Segunda Región de Antofagasta. En primer plano se ve un acopio de la ulexita ya extraída, y donde está parada la pala se observa el 'panqueque' con una potencia de 30 a 40 cm. En su base hay un horizonte blanco, de algunos centímetros, que corresponde a la ulexita.
- 14b Se muestra una vista panorámica de los Cerros de la Joya. En primer plano aparece un acopio de ulexita. En la parte central de la fotografía, y rodeando un cerro aislado, se reconocen unas manchas blancas que corresponden a antiguas explotaciones cuya distribución puede dar una idea del sistema usado en éstas.
- 15 En una zanja abierta en el Salar de Pintados, I Región de Tarapacá, se observan nódulos ('papas') centimétricas a milimétricas blancas que corresponden a ulexita y cuerpos salinos fibrosos que corresponden a yeso. Se trata de sales creciendo en forma intersticial en la matriz de lodos saturados.

LAMINA 2

12



13



14a



15



14b



EL BORO EN LAS SALMUERAS DE LOS CAMPOS GEOTERMICOS

En las salmueras de los campos geotérmicos existen concentraciones importantes de sales entre las cuales se incluyen los boratos. En las salmueras del campo geotérmico del Tatio se han comprobado valores del orden de 200 ppm de boro. En campos similares en U.S.A. como Salton Sea, se detectan

valores promedio del orden de 250 ppm (Electroconsult)⁴.

El boro, y otros componentes de potencial valor económico de esas salmueras, sólo pueden ser recuperados si se explota la energía geotérmica en los mismos campos. En términos generales, la factibilidad de llevar a cabo este tipo de operación, por lo menos en el país, es actualmente muy baja.

CONCLUSIONES

En Chile los recursos de boratos son importantes y sus reservas y capacidad instalada de beneficio, los ubican a continuación de Argentina, tercer productor mundial de este recurso. Los yacimientos principales se concentran en los Salares Andinos (mena) y Preandinos (salmueras). Depósitos de importancia económica subordinada se encuentran en la Pampa del Tamarugal. Además, el boro es un subproducto potencial en los yacimientos de nitrato y yodo, y en salmueras de campos geotérmicos.

Los yacimientos se ubican, geográficamente, en el Altiplano, Depresión Preandina y Depresión Central. De acuerdo al concepto de subprovincias boratíferas de Alonso (1986), los yacimientos de los salares se ubican en la Subprovincia Altoandina mientras que la otra subprovincia presente en Chile sería la de la Depresión Central. La edad de los yacimientos sería mioceno-holocena y, en el caso de los boratos asociados a nitratos se estima una edad terciaria inferior.

El único mineral económico conocido es la ulexita, un borato doble de sodio y calcio que posee desventajas comerciales en relación a los 'boratos

duros' en lo que se refiera a su solubilidad y contenido de B_2O_3 . La presencia de otros minerales no es importante desde el punto de vista económico como en el caso de hidroboracita y proberita. En Chile no se han encontrado yacimientos del Mioceno asociados a secuencias lacustres con mineralización de 'boratos duros' como en Argentina.

Se asume que el origen de los boratos es volcánico y que se depositan, principalmente, a través de fuentes termales, de manera similar a los que se describen para la Puna argentina.

Los yacimientos más importantes son los salares andinos de Surire y Ascotán seguidos, en importancia, por las salmueras del Salar de Atacama, todos ellos en explotación actualmente. La presencia de boratos en los yacimientos de nitratos y yodo, considerando el volumen de las reservas de sales, constituye un subproducto de importancia que aumenta considerablemente las reservas globales del país. En los campos geotérmicos las concentraciones de boratos son irrelevantes y corresponden a potenciales subproductos explotables si se hace un aprovechamiento económico de la energía geotérmica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto FONDECYT 1970030 y fue financiado en su casi totalidad por éste. El 'link' de investigación 984/82, financiado por el 'British Council', permitió la asesoría de colegas británicos y acceso a sus

laboratorios. Los autores agradecen las contribuciones realizadas al manuscrito original, por el colega R. Alonso (Universidad de Salta), especialista argentino en yacimientos de boratos. Asimismo, las observaciones del experto en Minerales Industria-

⁴ 1975. Aprovechamiento del campo geotérmico de El Tatio en el Norte de Chile. Purchase and Transportation Services (Inédito), Naciones Unidas, 42 p. New York.

les, colega A. Gajardo (Servicio Nacional de Geología y Minería), del Dr. F. Risacher (Institut de la Recherche pour le Developpement (ex Orstom) y, muy especialmente, la excelente disposición del

Editor de la Revista Geológica de Chile, quienes contribuyeron directamente a hacer posible la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Alonso, R. 1986. Ocurrencia, posición estratigráfica y génesis de los depósitos de boratos de la Puna Argentina. Tesis Doctoral (Inédito), *Universidad Nacional de Salta*, 196 p.
- Alonso, R. 1991. Evaporitas Neógenas de los Andes Centrales. In *Génesis de Formaciones Evaporíticas. Modelos Andinos e Ibéricos* (Pueyo, J.J.; editor). *Ediciones de la Universidad de Barcelona*, p. 267-329.
- Alonso, R.; Gutiérrez, R. 1984. Zonación de ulexita en los salares de la Puna Argentina. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, Vol. 39, Nos. 1-2, p. 52-57. Buenos Aires.
- Alonso, R.; Viramonte, J. 1985a. Provincia Boratífera Centroandina. In *Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas*, Vol. 2, p. 23-44. Antofagasta.
- Barker, J.; Lefond, S. 1985. Borates: Economic Geology and production. *Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.*, 274 p.
- Bevacqua, P. 1992. Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su Núcleo y delta. Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo (Inédito), *Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas*, 284 p.
- Chong, G. 1984. Die Salare in Nordchile-Geologie, *Struktur und Geochemie-Geotektonische Forschung*, Vol. 67, 146 p. Stuttgart.
- Chong, G. 1988. The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18°00' and 27°00' south Latitude. In *The Southern Central Andes: contribution to structure and evolution of an Active Continental Margin* (Bahlburg, H.; Breitzkreuz, C.; Giese, P.; editors). *Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag*, Vol. 17, p. 137-152.
- Chong, G. 1994. The Nitrate Deposits of Chile. In *Tectonics of the Southern Central Andes: Structure and Evolution of an Active Continental Margin* (Reutter, K.J.; Scheuber, E.; Wigger, P.J.; editors). *Springer-Verlag*, p. 303-316.
- Ericksen, G. 1983. The Chilean Nitrate deposits. *American Scientist*, Vol. 71, p. 366-374.
- Garcés, I.; Chong, G. 1993. Minerales de boro de yacimientos chilenos: características, usos, mercados y aplicaciones. *Revista Innovación*, Año 6, No. 1, p. 23-36.
- Garret, D. 1998. Borates. Handbook of Deposits: processing, properties and use. *Academic Press*, 483 p.
- Harben, P.W.; Kusvar, M. 1997. Industrial Minerals, a Global Geology. *Industrial Minerals Information Ltd.*, 462 p.
- Igarzabal, A. 1991. Evaporitas cuaternarias de la Puna Argentina. In *Génesis de Formaciones Evaporíticas. Modelos Andinos e Ibéricos* (Pueyo, J.J.; editor). *Ediciones de la Universidad de Barcelona*, p. 333-374.
- Inan, K.; Dunham, A.C.; Esson, J. 1973. Mineralogy, Chemistry and Origin of Kirka Borate Deposits. Eskisehir Province, Turkey Transactions. Section B. *Institution of Mining and Metallurgy*, B114-B123. Nottingham.
- Laborde, M. 1978. El Salar de Atacama. *Minerales*, Vol. 33, No. 142, p. 19-26.
- Moraga, A.; Chong, G.; Fortt, M.A.; Henríquez, H. 1974. Geología del Salar de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 29, 56 p.
- Newman, D.; Beveridge, T.; Morel, F. 1997a. Precipitation of Arsenic Trisulfide by *Desulfotomaculum auripigmentum*. *Applied and Environmental Microbiology*, p. 2022-2028.
- Newman, D.; Kennedy, E.; Coales, J.; Ahmann, D.; Ellis, D.; Lovley, D.; Morel, F. 1997b. Dissimilatory arsenate and sulfate reduction in *Desulfotomaculum auripigmentum* sp. nov. *Archives of Microbiology*, Vol. 168, p. 380-388.
- Pueyo, J.J.; Chong, G.; Vega, M. 1998. Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 25, No. 1, p. 3-15.
- Spiro, B.; Chong, G. 1996. Origin of sulfate in the Salar de Atacama and the Cordillera de la sal: initial results of an isotopic study. *Third International Symposium on Andean Geodynamics, ORSTOM*, p. 703-706. St. Malo, France.