

LA INDUSTRIA DEL LITIO EN CHILE

Dra. Ingrid Garcés Millas
Depto. Ingeniería Química
Universidad de Antofagasta

INTRODUCCION

Chile es el primer productor de litio mundial con reservas conocidas en el Salar de Atacama del orden de 4.3×10^6 toneladas, siendo éste su mayor depósito correspondiendo al 40 % de las reservas de interés económico a nivel mundial. Con el ingreso al mercado de la Sociedad Minera Salar de Atacama Ltda., MINSAL, en 1998, Chile pasó a ser el primer productor y exportador mundial de litio, completando las 30.000 toneladas de concentrado, equivalentes al 50% de la demanda del mercado mundial, cifra con la que la Sociedad Chilena del Litio, SCL, lidera las exportaciones de este mineral.

El desarrollo de nuevos materiales constituyen hoy día el verdadero desafío para nuestro país, éste ha sido el paso limitante para el desarrollo tecnológico, no sólo en la electrónica donde la miniaturización a alcanzando niveles inimaginables, sino que en otros ámbitos de aplicaciones. Cada año, sólo en Japón se publican trabajos que contienen estudios de alrededor de 10.000 nuevos materiales, con propiedades físicas, químicas, eléctricas, magnéticas, iónicas y electroquímicas distintas.



FIGURA N°1: Mapa ubicación del Salar de Atacama, en la II región de Chile.

La industria del litio para Chile, presenta un buen futuro, no tan sólo por la cantidad y calidad de sus reservas, si no por ser capaz de desarrollar nuevos productos de litio, con mayor valor agregado, como por ejemplo, hidróxidos, cianuros y litio metálico.

CAPITULO 1

RESEÑA HISTORICA DEL LITIO Y SU CONSUMO

El litio fue descubierto por el químico Sueco August Arfvedson, en el año 1817 cuando realizaba un análisis de la petalita, mineral cuya fórmula química corresponde a $Al(Li, Na, H)(Si_2O_5)_2$. La obtención del litio metálico por electrólisis del cianuro de litio fue realizada con éxito por primera vez por Busen y Matthiesen en un pequeño crisol de porcelana, usando un fino hilo de hierro como cátodo y una varilla

de carbón como ánodo, indicando uno de los caminos que se mantienen hasta ahora, para la obtención industrial de algunos metales alcalinos.

Los primeros usos comerciales del litio fueron en metalurgia empleándose pequeñas cantidades de aleaciones de aluminio-zinc-litio y aleaciones de plomo en las cuales se adiciona litio para endurecerlos.

Entre los años 1953 y 1959, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos consumió grandes cantidades de hidróxido de litio para separar el isótopo litio 6, el que fue usado en el desarrollo y producción de la bomba de hidrógeno.

Desde 1961 comenzó a desarrollarse el uso de compuestos como el bromuro de litio, en la forma de salmuera concentrada, para equipos de acondicionamiento de aire por absorción; el carbonato de litio para la industria de cerámica; el litio metálico, como intermediario en la síntesis de productos farmacéuticos; el Butil-litio como catalizador en la polimerización de la fabricación del caucho sintético. Nuevos mercados se desarrollaron con múltiples propósitos, pero sigue siendo hoy día, el más importante mercado, la industria de las cerámicas, donde se utiliza el carbonato de litio se como agente fundente en la preparación de esmaltes enlozados y vidrios.

Desde 1974 el uso del litio metálico como ánodo en baterías primarias empezó a mostrar un rápido crecimiento, puesto que, el litio es electroquímicamente reactivo, además de poseer otras propiedades únicas.

En 1980 la industria del aluminio desplazó del primer lugar a la cerámica y vidrio como principal usuario en volumen de productos de litio. El desarrollo de las aleaciones de Li-Al, logran importantes avances en el desarrollo de nuevos usos, incorporando la participación a la investigación a los productores de aluminio, aeronáutica y militares. Como resultado, se logra una aleación más liviana, adicionando el 1.5% al 3 % de Li a la aleación convencional de aluminio, la que puede ser empleada en componentes para aviones comerciales y militares, con este material de un 10% más liviano, se ahorra combustible, para alcanzar hasta un 20% de la capacidad de carga del avión. Actualmente el consumo de litio metal para estas aleaciones es del orden de 45 toneladas anualmente, es decir unas 500.000 libras por año de carbonato de litio.

En el último tiempo, se han desarrollado pirocerámicas que encuentran una gran aplicabilidad en la industria aeroespacial, puesto que este tipo de material, al contener litio, hacen que las propiedades de expansión y compresión sean casi nulas, si el compuesto se encuentra bajo condiciones extremas de temperatura.

Estados Unidos, sigue siendo el primer productor de compuestos de mayor valor agregado de litio y el principal consumidor de todo tipo de materiales de litio, con un consumo de 2800 toneladas métricas de contenido en litio el año 2000. Los compuestos de litio además satisfacen las necesidades de la industria primaria de aluminio, componentes de baterías, aire acondicionado, lubricantes, sistemas de deshumidificación, producción de sofisticados textiles, desinfectantes para piscinas y baños, y como blanqueadores en lavanderías al seco.

CAPITULO 2

CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DEL LITIO

El litio es un metal alcalino que se presenta como el primer elemento del grupo IA de la Tabla Periódica, de color plateado claro, ligeramente más duro que el sodio, pero más blando que el plomo. Sin embargo, mezclado con el magnesio resulta una aleación sumamente resistente que puede ser usada para chalecos antibalas o placas de blindajes. El litio es el más liviano de todos los metales con densidad 0.534 g/cm^3 . El núcleo de átomo está constituido por tres protones y tres o cuatro neutrones. Los tres electrones orbitando en dos orbitales, dos en el interno y uno en el extremo. Por esta razón posee una gran tendencia a eyectar el electrón extremo, haciéndolo extremadamente reactivo electropositivo. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (figura N°2), sus electrones libres se desplazan dentro de la red cristalina con suma facilidad pudiendo conseguir y transferir cargas negativas a través de su estructura con muy poca resistencia, lo cual le confiere las propiedades de ser un excelente conductor de la electricidad.

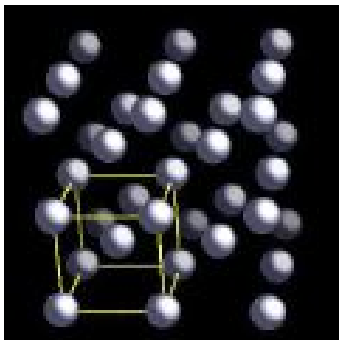


FIGURA N°2: Estructura química del Litio. De: <http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Li/xtal.html> , “La estructura cúbica centrada en el cuerpo, es la forma más estable para el litio metal a 298 K (25°C). Bajo condiciones normales, todo el Grupo 1 de metales alcalinos se basan en este tipo de estructura, bcc. En la red bcc, cada átomo de litio está rodeado por otros ocho átomos, que en su conjunto generan una estructura cúbica. El enlace Li-Li más el cercano es de separación 304 pm, implicando un radio metálico de 152 pm. Esto significa que el litio es menor que el potasio.” Referencias: M.R. Nadler and C.P. Kempfer, *Anal. Chem.*, 1959, **31**, 2109.

La estructura cristalina del litio se estabiliza únicamente a causa de las fuerzas electrostáticas atractivas entre los iones fijos en los sitios de la red y los electrones libres, pero como sólo existen pocos electrones libres, las fuerzas atractivas que interactúan no son muy fuertes y por consiguiente la red de litio es débil y fácilmente deformable originando muy baja dureza. Posee bajo punto de fusión, 180.5 °C, sin embargo, la cantidad de calor que requiere a dicha temperatura para destruir la red y fundir el metal, es extremadamente alta. Por esta razón, el litio es útil como resumidero de calor, particularmente en sistemas en que se requiere un bajo peso global en el diseño, lo que tiene gran importancia en la industria nuclear como material transportador de calor en circuito cerrado de reactores.

La facilidad con la cual el litio cede su electrón exterior, determina que sea un agente reductor super potente y, como tal, reacciona velozmente con los agentes oxidantes menos potentes, por ejemplo, reacciona con el nitrógeno a temperatura ambiente para formar el nitruro Li_3N , con el oxígeno del aire reacciona rápidamente formando el óxido Li_2O y con el flúor genera la reacción más violenta de todos los elementos. Debido a estas propiedades el litio encuentra aplicaciones en sistemas de muy alta generación de energía electroquímica como las baterías de litio-cloro o de litio-azufre y varios otros tipos de pilas, constituyendo actualmente una industria en expansión. El litio está formado por la combinación de isótopos, 7.4 % de litio 6 y 92.6 % de litio 7, lo que te da un peso atómico isotópico de 6.941.

El isótopo 6 tiene gran importancia, puesto que es la materia prima para la obtención del tritio H, que junto con el deuterio H serían los probables combustibles reactores de fusión nuclear (Tagger 1983), estimándose que estos reactores serán la solución del problema energético del mundo.

Las reacciones de formación del tritio y de generación de energía son las siguientes:



Los neutrones provienen a su vez de la reacción:



En que N_L y NR son neutrones lentos y rápidos. Sólo los neutrones lentos pueden ser eficaces para la conversión del litio 6 en tritio.

COMPUESTOS DE LITIO, PROPIEDADES Y ESTRUCTURA

Cloruro de litio:

- Fórmula química: LiCl
- Fórmula sistema Hill: Cl_1Li_1
- Peso Fórmula : 42.394
- Clase: cloruros

Propiedades físicas

- Color: blanco
- Apariencia: sólido cristalino
- Punto de Fusión: 610°C
- Punto de Ebullición: 1360°C; 1383°C
- Densidad: 2070 kg m⁻³

Estructura en el estado sólido

- Geometría del litio: 6 coordinación: octahédrica
- Estructura prototípica: NaCl (roca salina)

Un análisis por elemento y número de oxidación es :

		configuración electrónica
Cl:	83.63 (%); estado de oxidación -1	[Ne].3s ² .3p ⁶
Li:	16.37 (%); estado de oxidación 1	[He]

Una de manera para hacer cloruro de litio, es reaccionar el hidróxido de litio con el ácido clorhídrico. La sal resultante puede se purifica por recristalización. Otra forma pero, de muchísimo cuidado, es por descomposición térmica del perclorato de litio, LiClO₄.



Esta no es la ruta normal de preparación, por lo caro, el litio metálico reacciona vigorosamente con todos los halógenos para formar haluros de sodio. Al quemarse con el cloro, Cl₂, forma cloruro de litio, LiCl.

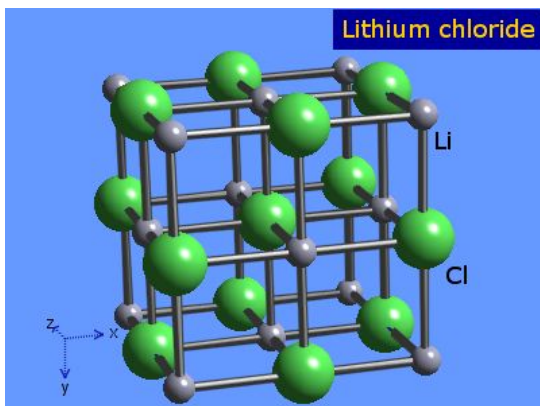


FIGURA N°3: Estructura cristalina del cloruro de litio, obtenida de: <http://www.webelements.com/webelements/elements.html>

Las Tablas N° 1 y 2 presentan un resumen de las propiedades físicas del litio y carbonato de litio respectivamente, mientras que, la Tabla N° 3 da cuenta de la solubilidad de la sal en 100 gramos de agua.

2.2 ESTADO NATURAL DEL LITIO

El litio se encuentra en la naturaleza en aproximadamente 145 minerales, pero sólo en algunos puede considerarse en cantidades comerciales, además de presentarse en salmueras, aguas termales y agua de mar, en cantidades muy diferentes que oscilan entre 20 ppm y 65 ppm.

Este elemento puede encontrarse de muy diversas formas, como ser en concentraciones anómalas de pegmatitas; en ambientes sedimentarios asociados con arcilla; en zonas de alteración hidrotermal asociados a minerales a bajas como a altas temperaturas; en evaporitas no marinas; en salmueras de ambientes desérticos; en aguas salinas o salmueras asociadas a yacimientos de petróleo; en yacimientos de boro; berilio, flúor, manganeso y posiblemente fosfato; en ambientes lacustre asociados a silicatos de magnesio; en aguas, plantas y suelos de ambientes desérticos; en rocas sedimentarias ricas en hierro.

A todo lo enumerado anteriormente, debe agregarse que los principales yacimientos que se encuentran en explotación, se ubican como pegmatitas o en salmueras de paleodepósitos lacustre salinos, y la gran mayoría de los factores de prospección sólo comprueban la presencia de concentraciones anómalas de litio, sin rendimiento económico en el mercado actual.

En Chile, el litio se encuentra en las áreas de depósitos salinos de la Alta Cordillera y, en menor proporción, en los campos de nitratos y yacimientos salinos asociados.

TABLA N° 1: Propiedades físicas del litio.

Número atómico	3
Peso atómico	6.941
Punto de fusión 0 °C	186
Punto de ebullición, 0 °C	1.336
Peso específico 0 °C	0.534
Calor específico del estado líquido (sobre 200 °C)	1.0
Calor específico, 0 °C cal/gr. °C	0.784
Resistividad, 0 °C	8.55
Coef. de temp. De resistividad por 0 °C	4.5×10^{-3}
Calor de fusión, cal/gr. °C	103.2
Dureza escala de Mohs	0.6
Calor de formación en Kcal/mol gr. (hidrox)	116
1 culombio deposita:	0.072823 mg de Li
1 amperio hora deposita	0.262162 gr. de Li
Presenta 2 isótopos estables	⁷ Li con 92.4 % peso ⁶ Li con 7.6 % peso
Potencial de oxidación, volts	3.05
Densidad (gr./cc.)	0.534

TABLA N° 2: Propiedades físicas y químicas de Li.

Peso Molecular	Estructura	Punto de Fusión °C	Peso específico	Densidad (gr./cm ³)
73.89	Monocíclico	618	2.11	0.534

Fuente: Kirk-Otkmer, 1961

TABLA N° 3: Solubilidades del Li_2CO_3 y LiCl en gr/100 gr H_2O

Temp. °C	0	5	10	20	25	30	40	50	60	70	80	100
Li_2CO_3	1.52	- - -	1.41	1.31	- - -	1.24	1.16	1.07	1.00	- - -	0.84	0.70
$\text{LiCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	40.9	42	42.7	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
$\text{LiCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$	- - -	- - -	- - -	- - -	45.85	46.3	47.3	48.3	49.6	51.1	52.8	56.51 ¹

Fuente: Linke y Siedell, 1965

¹Hutting and Steudemann, 1927

**Tomados por Kraus and Burgess, 1929; densidad de la sol. saturada 1.017 a 0°C y 1.014 15 °C.

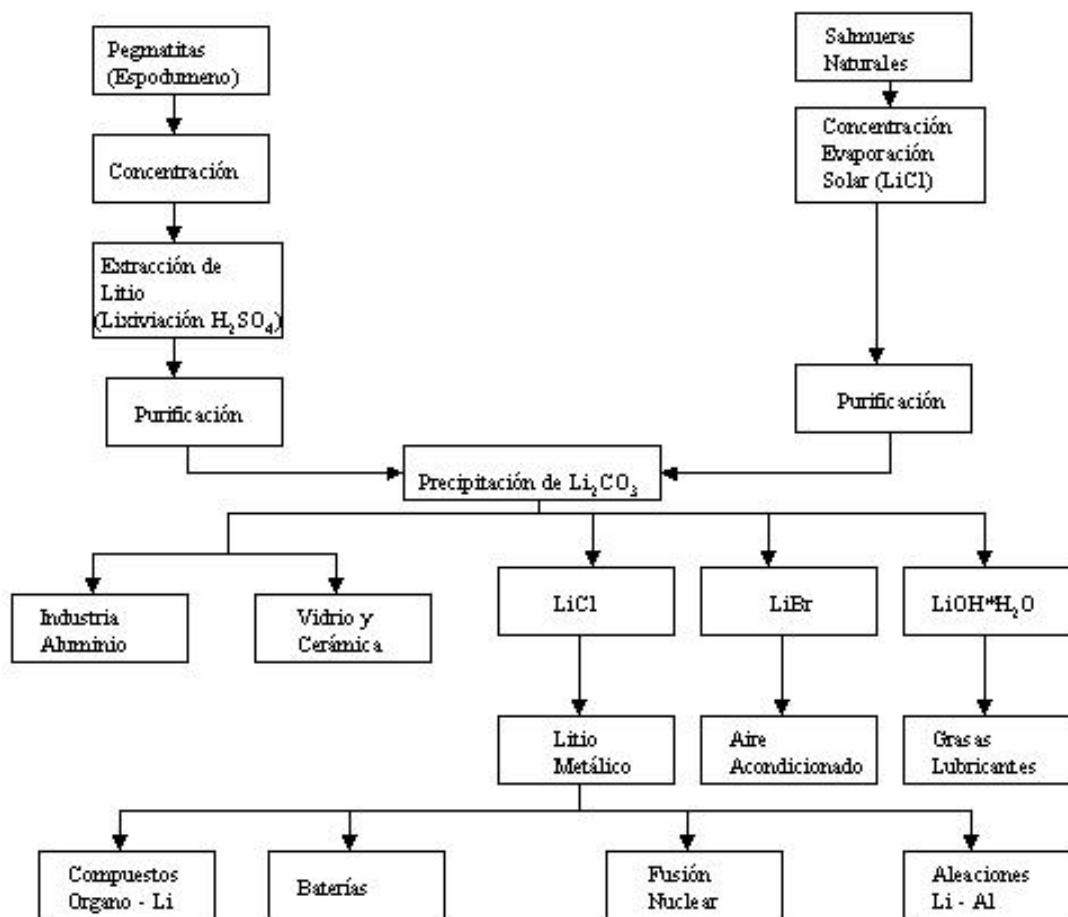


FIGURA N°4: DIAGRAMA EXTRACCION / APLICACIÓN DE LITIO

CAPITULO 3

3. FUENTES Y PROCEDIMIENTOS DE OBTENCION

El litio se obtiene a partir de dos fuentes naturales, del mineral espodúmeno que es un silicato doble de aluminio y litio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) que se encuentra asociado con el cuarzo, mica y feldespato. La otra fuente de obtención es a partir de salmueras naturales de los salares y geysers, encontrándose en forma de sales de litio, principalmente, sulfato doble de litio y potasio (KLiSO_4).

La Figura N°4, representa un diagrama de flujo simplificado para la obtención del litio, a partir de estas dos fuentes con sus respectivas aplicaciones que derivan de éstas.

3.1. Obtención de litio a partir de un mineral: Puede obtenerse, como se mencionó anteriormente, a partir de un yacimiento de silicato doble de aluminio y litio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ o $\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$), cuyos contenidos son 3.73% de Li y como óxido 8.03% de Li_2O , los otros elementos están en relación del 51.59% O; 30.18% Si y como óxido de silicio 64.58% SiO_2 ; 14.5% Al y 27.4% AlO_3 . El espodumeno (*spodumene*, proveniente originalmente de Grecia), también es conocido en América como Kunzita, un cristal de dureza 6.5 a 7, que presenta una densidad 3.1 g/cc; además posee la característica de presentar diversos colores, que van desde gris claro, amarillo, verde hasta púrpura.



FIGURA N°5: Foto con microscopio electrónico del mineral de espodumeno, a la izquierda se observa un cristal del Brasil de 12,5 cm, mientras que en la otra se muestra un trozo de mineral extraído del norte de Carolina, norteamérica, fuente: www.gamineral.org/BessemerCity.htm.

Los grandes yacimientos comerciales existentes en el mundo se encuentran en los Estados Unidos (Carolina del Norte), Australia, Canadá, Zaire, China, y Rusia. Como la mayoría de los minerales, no todos los que se presentan en la naturaleza son de importancia económica, de estos, los de mayor relevancia se resumen en la Tabla N°4.

El espodúmeno es una roca que forma un mineral en granitos y pegmatitas con otros minerales. Este es relativamente nuevo a la ciencia, se descubrió hace tres siglos y las variedades de gema únicas se han descubierto en los últimos 120 años: Kunzite y Hiddenite. La primera, la Kunzita es la más común y conocida, de color rosado a lila. La Hiddenite que proviene de Carolina del Norte, no es tan conocida y tan abundante; tiene un color verde usual, muy diferente a la peridotita y esmeralda.

TABLA N° 4: Principales minerales de litio.

Mineral	% Li max.	% Li comercial
Amblygonita	4.73	3.7-4.2
Eucryptita	5.50	2.6-3.0
Lepidolita	Variable	1.4-1.9
Petalita	2.26	1.4-2.2
Esodumeno	3.73	2.6-3.0

3.2. Obtención de litio a partir de salmueras naturales: Los depósitos salinos, fuentes geotermales, campos petrolíferos, son fuentes naturales para la obtención del litio. En Chile, la principal de estas fuentes es el salar de Atacama, el otro depósito relevante es el salar de Uyuni en Bolivia. En la Tabla N° 5, se puede apreciar la gran diferencia en los contenidos en litio que presentan las salmueras de los distintos lagos salinos explotados en la actualidad.

TABLA N° 5: Contenido promedio de litio en salmueras explotadas

Localización	%Li	%Na	%K	%Mg	%SO ₄	%Cl	%B	Li/Mg
Bolivia: salar de Uyuni	0.025	8.80	0.72	0.65	0.046	15.7	0.02	1/19
Chile: salar de Atacama	0.14	7.6	1.87	0.93	0.03	16	0.1	1/1.64
Israel-Jordan: Mar Muerto	0.0015	3.21	0.60	3.33	1.18	17.32	0.003	1/2200
EEUU.: Great Salt Lake, Utah	0.004	8.0	0.65	1.00	0.016	14.0	0.006	1/250
Silver peak, NV.	0.023	6.2	0.53	0.033	0.20	10.06	0.008	1/1.5

La recuperación de litio a partir de salmueras es más reciente, ya que en sus inicios sólo se explotaban los yacimientos de esodumeno. En los Estados Unidos, la obtención de compuestos de litio se realiza por diversos medios, una de ellas es como fosfato de sodio y litio, subproducto de la obtención de Potasa, Bórax y Ceniza de Soda. Otra forma es la producción de carbonato de litio a partir de salmueras, y también puede recuperarse, a partir de salmueras de campos petrolíferos como ocurre en Arkansas, Pennsylvania, Michigan y Utah.

a) Silver Peak, Nevada: Las salmueras de Silver Peak, explotadas por la Foote Mineral Co, se obtienen de ellas carbonato de litio y como subproducto sales de potasio.

Las dimensiones de este depósito son 12.8 km de largo por 6.5 km. de ancho y a una profundidad media de 450 metros, posee salmueras con contenido medio de 0.02 % en cloruro de litio. Se estima que sus reservas son de 3.800.000 ton de litio, lo que garantiza a Foote Minerals Co. una fuente de materias primas por un largo tiempo.

b) Searles Lake, California: El lago Searles Lake se encuentra ubicado en Searles Valley, California. Actualmente está seco y contiene el mayor contenido de sales conocida en ese estado. La parte central es una superficie útil de 31 km² formado en su mayor parte por halita pura, con un espesor medio de 21m, constituido por mantos salinos casi horizontales, Se estima que su cuerpo cristalino contiene alrededor de 25% de huecos, los que están rellenos con salmuera saturada principalmente de sulfatos, cloruros, carbonatos y boratos de sodio y potasio. Su contenido en litio oscila entre 0.006 y 0.011%. Las reservas de litio contenidos en estas salmueras alcanzan a 42.000 ton de litio.

Desde 1880, Searles Lake ha sido una importante fuente de abastecimiento de materias primas para la elaboración de productos químicos, operando en forma continua desde 1926.

En la actualidad la empresa American Potash and Chemical Corporation, recupera 16 productos químicos de estas salmueras, en las que se incluyen sales de litio.

c) Great Salt Lake, Utah: Las salmueras del gran lago salado, han contribuido en forma importante al desarrollo de la industria de sales minerales de Utah. Ellas se encuentran en mantos salinos porosos, con cristalización gruesa como sedimentos arcillosos apareciendo en gran parte del área del desierto de Great Salt Lake. Los

horizontes de salmueras, tanto en sales cristalinas como en las arcillas, tienen profundidades variables, pero en general se encuentran a 1.5 metros debajo de la superficie.

El Great Salt Lake es el mayor cuerpo de salmueras concentradas existente en U.S.A, según Halch y Langferd (1963), las salmueras del lago, durante el período Octubre de 1959 a Septiembre de 1961 tuvieron un volumen promedio de 2.4 billones de cm^3 con una concentración de 26.60% de sólidos disueltos. Desde finales de 1971, se recuperan unas 500 toneladas anuales de compuestos de litio, a partir de estas salmueras.

En este lago se distinguen dos áreas, una es el Brazo Norte, con aproximadamente el 35% del área del lago y la otra, el Brazo Sur. Las salmueras del Brazo Norte tienen una concentración de 28% en peso de sólidos disueltos, lo que constituye un factor importante que favorece las operaciones de tratamientos de estas aguas.

Se estima que el Brazo Sur recibe más del 85% del total del agua fresca que entra en el lago, y por lo tanto, su concentración de sales es mucho menor comparado con el Brazo Norte. Los límites de concentración de sólidos disueltos, en las salmueras del Brazo Norte, Tabla N°6, corresponden a muestras realizadas entre los años 1963 / 1965.

Si comparásemos la concentración en litio de las salmueras del Great Salt Lake, que se reportan en la Tabla N° 6, con las del Salar de Atacama, Tabla N°5, se puede apreciar que ésta se presenta con una concentración bastante menor, no sólo en litio, sino además en potasio y boro; mientras que los contenidos en litio del Salar de Uyuni, son bastantes parecidos a las salmueras de Silver Peak, pero hay que señalar que ambas difieren en cuanto a calidad y cantidad del recurso. Evidentemente, las salmueras del Salar de Atacama son lejos, la más rica fuente productora de materiales de valor comercial.

TABLA N° 6: Composición química de las salmueras del Great Salt Lake, Brazo Norte

Elemento	Mínimo	Máximo
SiO ₂	0.00011	0.000042
Ca	0.0164	0.0312
Mg	1.12	1.35
Na	7.60	8.56
K	0.677	0.774
Li	0.0042	0.0066
HCO	0.047	0.052
CO ₃	0.0	0.0
Cl	14.10	15.50
F	0.00048	0.00060
B	0.0029	0.0052
densidad	1.214	1.223
pH	7.4	7.7

d) Salar de Atacama, Chile: Con las salmueras obtenidas del Salar de Atacama se ha producido hasta 1997 sólo carbonato de litio, incorporando además a partir de 1998, el cloruro de litio en su proceso productivo. La obtención del carbonato, a partir de estas salmueras podría resumirse en dos etapas:

Concentración de las soluciones, mediante pozas de evaporación solar: Los contenidos iniciales de las salmueras del Salar de Atacama son alrededor de 0.17 % en Li, llegando a concentrar hasta valores del orden de 4.3 % a 5.8% Li.

Tratamiento de la salmuera concentrada en planta química: Para la producción del Li₂CO₃ (99,5% de pureza), las salmueras concentradas son purificadas y cristalizadas, luego se realiza un proceso de carbonatación, una posterior precipitación y por último el secado de los cristales.

El proceso aplicado por la Sociedad Chilena de Litio (SCL), perteneciente a Foote Míneral Co., subsidiaria de Cyprus Amax Minerals Co, para la recuperación de litio fue desarrollado por esta empresa en su planta en Silver

Peak, Nevada (U.S.A.), pero adecuándolo a las características propias de estas salmueras. La producción de Chemetall Foote, cubre la demanda necesaria para la producción de compuestos de litio con mayor valor agregado, de sus plantas químicas ubicadas en los Estados Unidos y además, suple las necesidades de sus parientes Chemetall en Alemania y Taiwan.

CAPITULO 4

4. DEPOSITOS DE LITIO EN CHILE*

El Salar de Atacama, es el salar más importante en cuanto a concentración y reservas de litio, se encuentra ubicado en el norte de Chile. Otros salares chilenos en que se ha comprobado la existencia de litio, son los salares de Pedernales, Maricunga y Surire. Además se sabe de la existencia de litio en el caliche con un contenido promedio de 0.038 gr. de litio por kilogramo de caliche. Existencia en salares de la región andina con contenidos importantes en Li, se ubican en la parte occidental de Bolivia (Salares de Uyuni, Coipasa y Empexa) y de menor importancia en el norte de Argentina.



FIGURA N°6: Cuenca del Salar de Atacama, con referencias de sus contenidos salinos.

El Salar de Atacama ubicado en una fosa tectónica, en la parte más baja de una cuenca cerrada de características endorreicas, entre la Precordillera y la Alta Cordillera, es conocido como el mayor depósito salino del país, con una superficie alrededor de 3000 km², de una cuenca de drenaje interno, cuya superficie total es de más de 13.300 Km², ubicado entre las coordenadas 23° 30'sur y 68°15'oeste, a 2300 m n s m, clasificado como un salar Pre Andino. Es la cuenca evaporítica de mayor importancia del país, tanto en tamaño, cantidad y variedad, drenando una hoya hidrográfica diez veces mayor, como potencia de depósitos salinos detríticos, que supera los 1000 m. El salar posee múltiples accesos, de estos, los principales son los del camino paralelo a su lado este, conectando

* Garcés, Ingrid: *Modelización Geoquímica de soluciones concentradas. Aplicación al estudio de la evolución de algunos salares-tipo chilenos. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.*

San Pedro de Atacama con Peine y el camino por el Llano de la Paciencia que penetra al salar en su parte suroeste (vea el mapa que se presenta en la Figura N°12). A la cuenca drenan tanto aguas subterráneas como superficiales que provienen desde la Alta Cordillera, tanto del este, norte y sureste. La recarga del oeste es irrelevante. Lo anterior hace que el salar esté activo tanto en el sector oriental, norte y sur, y por el contrario, su borde occidental esté fosilizado. La cuenca del Salar de Atacama, es lejos la mayor fuente productora de materiales de valor comercial. De especial importancia resulta el hecho de que en esta cuenca se depositan salmueras que, en su formación original están favorecidas por la elevada gradiente geotérmica del sector. Debido a la recarga de soluciones ricas en sales y a la continua evaporación por las condiciones climáticas de extrema aridez, se ha formado un cuerpo central (núcleo) de aproximadamente 1400 Km², compuesto casi exclusivamente de NaCl. Esta masa salina porosa, se encuentran ocluidas salmueras saturadas en NaCl que contienen también altas concentraciones de otros elementos tales como, potasio, litio, magnesio, boro, sulfatos, etc., lo que ha determinado la importancia económica del salar. Un resumen de los contenidos químicos de las salmueras del Salar de Atacama teniendo una concentración media de litio de 1.7 g/L, una relación porcentual se entrega en la Tabla N°7.

La zona donde está ubicado el Salar de Atacama presenta características climáticas que determinan altas tasas de evaporación (aproximadamente 10 L/m² día, como promedio anual), razón esta del alto nivel en K, B y Li. Otro factor relevante es la escasa precipitación, según datos de la estación de Minsal, la precipitación media llega a 12.5 mm; la humedad relativa alcanza un promedio de 24%, la radiación solar alcanza a 6.3 x 10⁶ cal/m²día, la temperatura en verano oscila entre 10° y 35°C, mientras que en invierno va de -3° a 24°C.

Más del 40% de las reservas mundiales conocidas de litio están ubicadas en el Salar de Atacama en forma de salmueras, donde el litio está presente en concentraciones diez veces superior a aquellas concentraciones encontradas en los salares norteamericanos. Las reservas de litio en las salmueras contenidas en la superficie abarcada por el núcleo, considerando los primeros 30m de profundidad, se estiman en 4.5 x 10⁶ toneladas. Según estudios de Minsal, estas salmueras tienen por lo menos 3 veces más concentración de potasio, 7 a 100 veces más de litio y 6 a 10 más de boro que las salmueras del Mar Muerto, Great Salt Lake y Silver Peak. Cabe destacar que, los productos que derivan de sus salmueras, pueden separarse en una secuencia única, no factible de obtener en las operaciones de Great Salt, Lake y Mar Muerto, cuyos productos mixtos requieren de mayor procesamiento para ser separados.

TABLA N° 7: Composición química de salmueras del Salar de Atacama

Componentes	gr/lt.	% peso
Na	93.18	7.6
K	22.00	1.87
Mg	14.40	0.93
Ca	0.36	0.03
SO ₄	21.8	1.78
Cl	198	16.0
B	1.1	0.1
Li	4.1	0.33
salinidad	250	25
densidad	1.22	1.22

De acuerdo a los estudios realizados por Minsal en sus comienzos, las reservas a 40 m, con un 95% de confiabilidad en 790.7 Km² dieron una concentración media en potasio de 1.93% en peso, para sulfato se estimó 1.65%, para el ácido bórico del 0.31% y 0.14% en litio, esto permite cubicar el area con cifras, de 24.5 millones de ton en K; 2.1 millones ton en sulfatos; 1.67 millones de ton en litio y 4.04 millones de toneladas en ácido bórico.

El origen principal del litio y las demás sales solubles presentes en el salar, entre ellas los iones Na, Ca, K, Mg, B, Rb, Cs, está en la lixiviación por aguas superficiales y sub-superficiales (fuentes termales) de las rocas

volcánicas intermedias a ácidas del norte del país y concentración por evaporación de las sales solubles resultantes del proceso.

El volumen y calidad de estas reservas convierten este depósito como la fuente de litio económicamente más atractiva en la actualidad, junto con el Salar de Uyuni. La Tabla N°8, cuantifica el contenido en litio existente en los principales depósitos salinos que actualmente son explotados.

TABLA N° 8: Comparación de las reservas de Li, en diferentes salmueras explotadas en el mundo.

Salmueras	Ton de Li
Footo Mineral, Silver Peak (Nevada)	118.000
Searles Lake (California)	24.000
Great Salt Lake (Utah)	260.000
Salar de Atacama	4.290.000
Salar de Uyuni (Bolivia)	5.500.000
Total salmueras	10.192.000

CAPITULO 5

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCION DE LICO₃

El carbonato de litio, es el compuesto base más importante entre las sales de Li, su demanda representa el 60% de los productos de Li. Su importancia principalmente radica en que es fácil de purificar y sirve para la conversión de otras sales de litio inorgánicas y orgánicas tales como, LiCl, LiBr y LiOH-H₂O y otros compuestos.

Se estima que la producción mundial es de 45.000 toneladas anuales, siendo Chile el principal productor, mientras que el principal consumidor de carbonato de litio es Estados Unidos.

La extracción de las salmueras del Salar de Atacama han sido realizadas por la Sociedad Chilena del Litio, desde 1984, la cual cuenta con una planta con capacidad de producción de 11.800 ton al año de Li₂CO₃.

La extracción de las salmueras del salar, Figura N°7, se realiza mediante bombas que succionan la salmuera a 30m de profundidad, descargándolas a través de cañerías a un sistema de pozas de evaporación solar, donde el Li se concentra desde 0.17% a 4.3%. La construcción de las pozas dentro del salar, se efectuó rompiendo la costra salina y dejando una superficie plana en la cual yace una capa de arcilla. Tanto los diques como el fondo de las pozas de evaporación se revistieron con un plástico resistente de 0.5mm de espesor. La protección del poliuretano se logra con una capa de sales de NaCl de aproximadamente 30cm de espesor.

Durante el proceso de evaporación, precipitan sales en las pozas en forma secuencial, las que son cosechadas y descartadas como impurezas: halita (NaCl), silvinita (NaCl + KCl), carnalita (KCl x MgCl₂ x 6H₂O) y bischofita (MgCl₂ x 6H₂O). En las pozas de mayor concentración precipita carnalita de litio. (LiCl-MgCl₂ x 7H₂O), con el objeto de recuperar el litio que contiene, es repulpeada y lavada con una solución saturada en cloruro de magnesio, pero no saturada en cloruro de litio. La bischofita (MgCl₂ x 6H₂O) presente y no disuelta, se separa por centrifugación y es eliminada del sistema.

La salmuera finalmente así concentrada alcanza 5,8% Li, 20% Mg y 0.7% B expresada como ácido bórico (H₃BO₃), encontrándose lista para ser transportada a la planta química ubicada en Antofagasta a 170 km del Salar de Atacama.

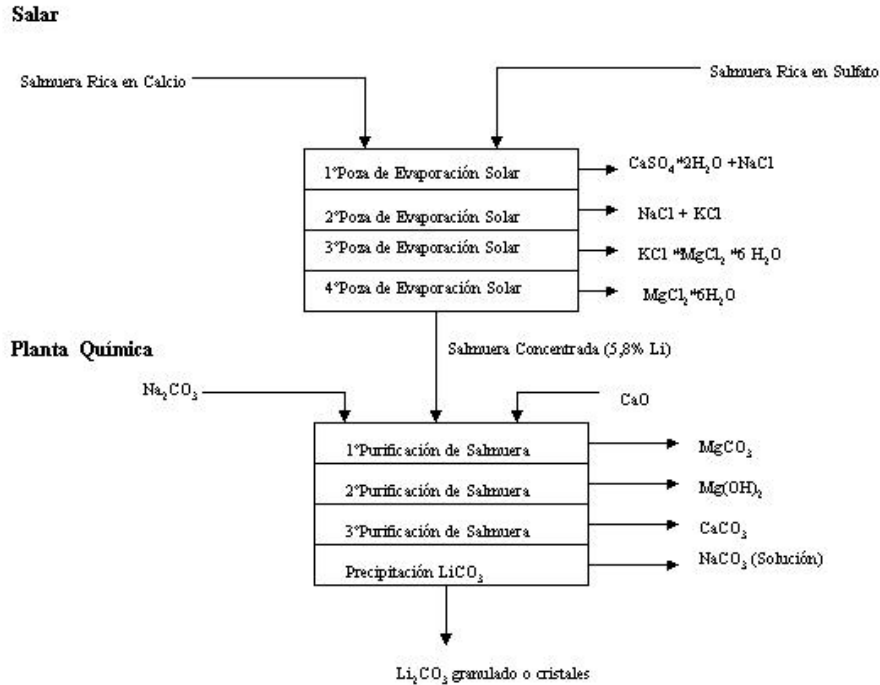
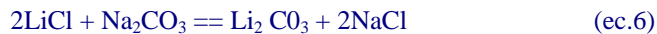


FIGURA N°7: OBTENCIÓN DE Li_2CO_3 UTILIZANDO SALMUERAS DEL SALAR DE ATACAMA

El tratamiento químico en la Planta La Negra consiste en eliminar el magnesio remanente, en dos etapas de purificación, como carbonato e hidróxido de magnesio, respectivamente. Para ello, la salmuera concentrada se diluye hasta un contenido de 0,6% de Li, con el agua madre proveniente de la etapa final de precipitación del carbonato de litio. Este producto se obtiene por reacción en caliente (alrededor de 85°C), entre la salmuera purificada libre de magnesio (1ppm) y una solución de Na_2CO_3 , precipitando el Li_2CO_3^* . El producto final se seca y se comercializa en cristales (70%), o bien se compacta para ser vendido en forma de gránulos (30%). La pureza del producto es cercana al 99.5% Li_2CO_3 . No obstante, su contenido en boro (400-600 ppm) impide su utilización como materia prima para la fabricación de litio metal, vía cloruro de litio.



Con el objeto de resolver el problema anterior y poder lograr un carbonato de litio con las mayores especificaciones exigidas por el mercado, FOOTE diseñó un proceso que permite eliminar el boro de la salmuera, mediante extracción por solvente, en una etapa previa a la separación del magnesio remanente. La unidad de extracción líq-líq, primeramente separa el boro remanente de la salmuera concentrada procedente del salar, para luego proseguir con el proceso anteriormente descrito. Finalmente se obtiene un producto final de carbonato de litio con contenidos bajísimos en boro (inferiores a 5 ppm). En una primera etapa es lixiviado la mayor parte de magnesio, el proceso conduce a la formación de una solución de cloruro de litio con bajo contenido de sulfato, finalmente se trata con carbonato de sodio, para la obtención de carbonato de litio. En 1998 MINSAL estimó una producción de 9.000 toneladas de Li_2CO_3 con capacidad sobre las 20.000 ton/año. Esta compañía ha estado considerando la expansión para construir una planta de butil-litio en Texas y así facilitar la producción de materiales de batería.

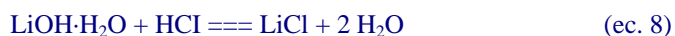
El proceso desarrollado por MINSAL, es muy diferente en sus primeras etapas al que utiliza SCL, ya que contempló la utilización como materia prima de sales cosechadas de las pozas que contenían sulfato de litio.

* Alcanzar los 80°C o más, asegura una mayor eficiencia del proceso de precipitación, debido a que el Li_2CO_3 disminuye su solubilidad, con el aumento de la temperatura.

En 1997, SQM, líder en la comercialización del salitre, inicia la comercialización y producción de carbonato de litio, a partir de las salmueras del Salar de Atacama. Una fracción de la salmuera resultante del proceso de evaporación solar para la producción de cloruro de potasio continúa su proceso de concentración y se constituye en la fuente de litio a partir de la cual SQM produce el carbonato de litio en una planta ubicada en el Salar del Carmen. La salmuera concentrada en litio es transportada en camiones desde el Salar de Atacama hasta la planta, donde es purificada para extraerle primero, su contenido remanente de boro y luego magnesio mediante procesos de extracción y de filtración. Finalmente, la salmuera purificada de litio reacciona con carbonato de sodio para producir el carbonato de litio el cual es filtrado, lavado, secado y envasado en distintos formatos de productos que abarcan desde productos finos, como los utilizados en la industria de las baterías recargables de ion litio, hasta productos granulares que son usados en el proceso de producción del aluminio. Ambas compañías, SQM y FMC (SCL), transportan las salmueras concentradas desde el salar hasta sus plantas ubicadas en Antofagasta y prácticamente cubren el mercado global americano (88% del litio es que importa Estados Unidos es proveniente de Chile, el 7.5% de Argentina y el resto son pequeñas cantidades de China, Japón).

5.2 PRODUCCIÓN DE LiOH y LiCl, A PARTIR DEL Li₂CO₃.

El proceso de obtención del cloruro de litio, a partir del carbonato o de hidróxido de litio, se puede lograr reaccionando con ácido clorhídrico, Figura N°8.



Para eliminar el sulfato y el calcio que contiene la salmuera de carbonato, es necesario agregar ácido oxálico y cloruro de bario al reactor. Posteriormente, la salmuera es filtrada para eliminar sus impurezas.

A continuación, el sistema pasa a la etapa de cristalización, centrifugación y secado. El cloruro de litio cristalizado es lavado con agua enfriada en contracorriente y posteriormente es tamizado.

A partir de LiCl es posible obtener Li metálico, el cual es de utilidad en las aleaciones de Li-Al y en baterías primarias (fuentes de energía). Una de las ventajas de este elemento es calentarse hasta 600°C sin que se llegue a descomponerse. Al ser calentado a 800°C en atmósfera de hidrógeno, se descompone parcialmente en óxido de litio y gas carbónico, compuesto poco soluble.

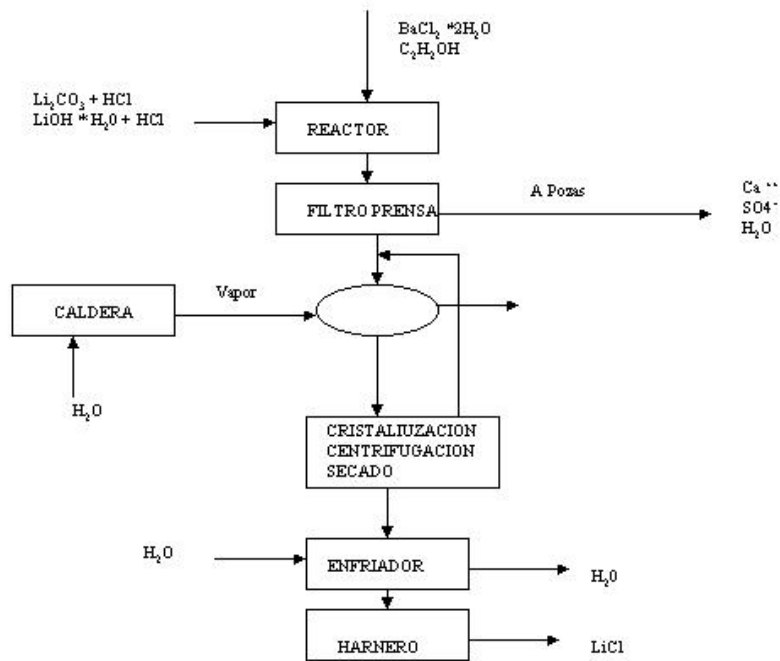


FIGURA N°8: OBTENCION DE CLORURO DE LITIO, A PARTIR DE CARBONATO O HIDROXIDO DE LITIO

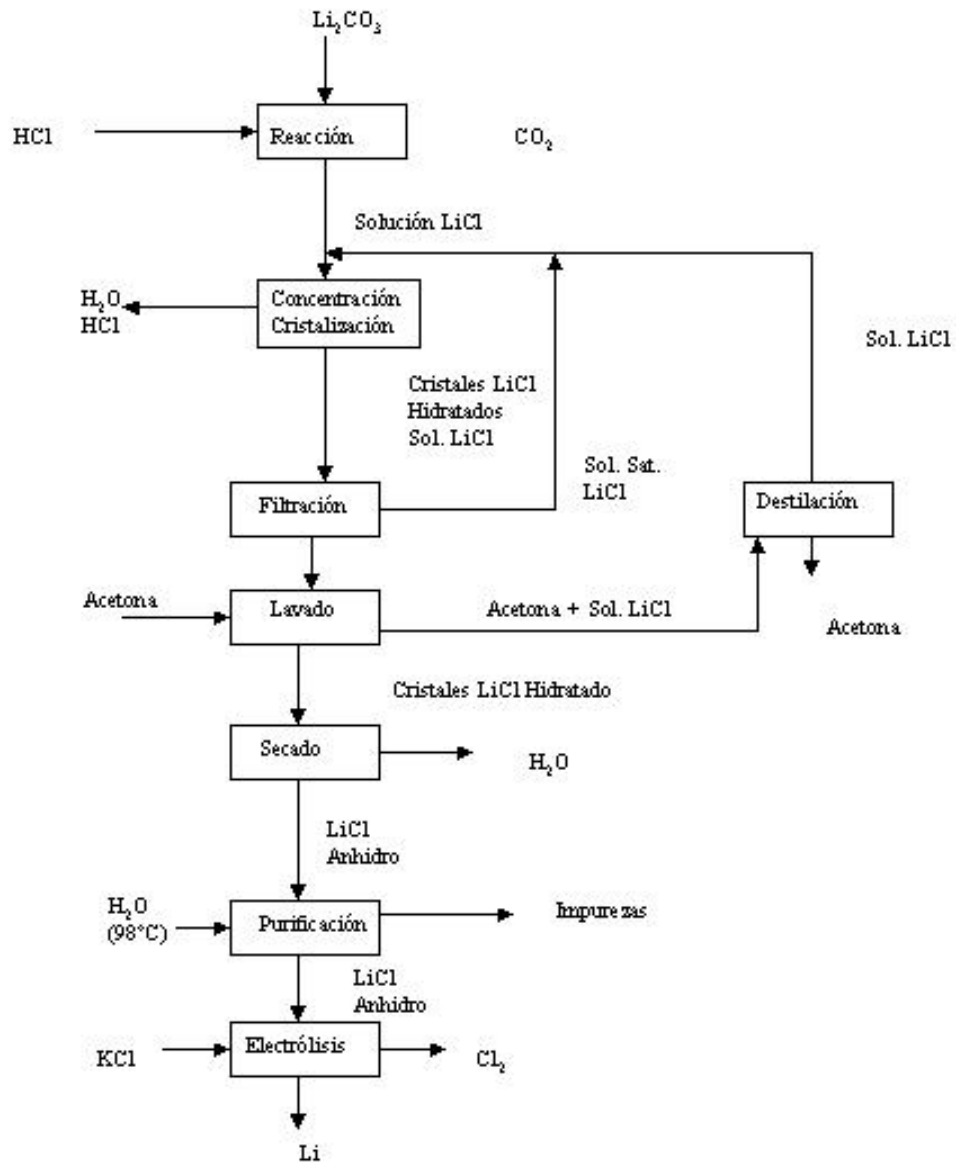


FIGURA N°9: OBTENCIÓN DE LITIO METÁLICO A PARTIR DE CARBONATO DE LITIO

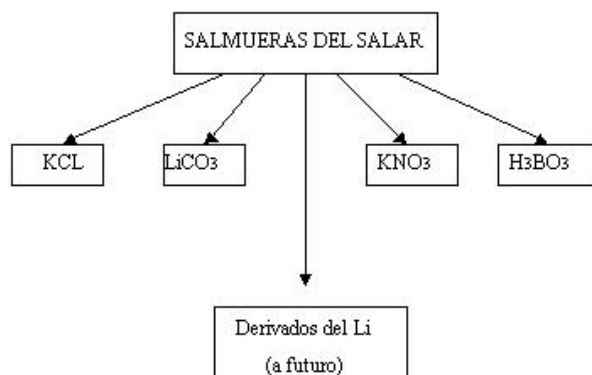


FIGURA N°10: PRODUCTOS QUE SE OBTIENEN A PARTIR DEL PROCESAMIENTO DE LAS SALMUERAS EVAPORADAS DEL SALAR DE ATACAMA.

CAPITULO 6

6. RESERVAS Y RECURSOS DE LITIO

Las reservas estimadas para el Salar de Atacama son del orden de 4.5 millones de toneladas de litio, correspondientes al 40% del total de reservas conocidas del mundo, si tan sólo se consideran las reservas mundiales de Li en salares.

En la Tabla N°9 se indican la distribución de reservas y recursos más importantes de litio conocidos en el mundo occidental. No se han considerado en esta tabla, las reservas de todos los salares andinos, lo que haría subir estos valores aproximadamente a 36,7 millones de toneladas de litio metálico.

TABLA N°9: Reservas mundiales de litio.

PAIS	Ton. Métricas Li metálico eqiv.
Bolivia (Uyuni)	5.500.000
Chile (Atacama)	5.000.000
EEUU	6.557.000
Australia	1.041.00
Canadá	668.000
Zaire	2.340.000
Total	21.106.000

Si comparamos numéricamente las reservas de Li de los salares de Uyuni y Atacama, el primero presenta una mayor cantidad, pero sus salmueras contienen menor concentración en Li. Por otra parte, la mayor relación entre Magnesio/Litio (Tabla N°5) del Salar de Uyuni desfavorece su explotación, unido a la ubicación no propicia para el transporte, lejos de los puertos de embarque y unido a ello el salar se encuentra a 3653 m.s.n.m., con una tasa de precipitación alta. Para obtener una producción similar a la del Salar de Atacama, se debiera contar con grandes áreas de pozas de evaporación solar, que sólo son productivas en ciertos periodos, puesto que las lluvias torrenciales del invierno, imposibilitan la extracción de sales.

CAPITULO 7

7. MERCADOS

7.1 MERCADO INTERNACIONAL

En Estados Unidos, la producción de litio está en manos de dos productores que son Foote Minerals Company (adquirida por Cyprus-Amax Minerals Company) y Lithium Corporation of America, las cuales producen concentrados de litio, compuestos de litio y litio metálico a partir de pegmatitas; sólo Foote produce Li_2CO_3 a partir de salmueras. La amplia variedad de compuestos de litio que pueden ser procesados a partir del carbonato de litio se muestra en la figura N°11. Lithium Corporation produce y ofrece al mercado alrededor de 70 compuestos de litio desde sus plantas ubicadas en Estados Unidos e Inglaterra. Estos representan la producción del 50% total mundial.

Otros productores importantes de litio son la ex-Unión Soviética y China, con una producción anual de 5.500 ton y 3.600 toneladas, respectivamente.

La capacidad instalada mundial al año 1985 se ilustra en la Tabla N°10 (Evans, 1986).

Pese a que la demanda de litio metálico para baterías y otras aplicaciones aumenta, el consumo total del metal permanece bajo en comparación con la demanda de compuestos de litio. El consumo anual de litio, se ha estimado en 14.000 ton métricas (mineral concentrado y LiCO_3), siendo Estados Unidos su principal consumidor.

TABLA N°10: Capacidad instalada mundial.

País	Capacidad (lb/año) Li_2CO_3 equiv ¹
EEUU	70.000.000
Chile	14.000.000
Rusia	12.000.000
China	8.000.00
Australia ²	6.600.000
Zimbabwe ²	4.400.000
Brasil ²	600.000

¹ lb. de Li_2CO_3 0.0878 Kg Li

² producen concentrado del mineral

Se estima una tasa de crecimiento acumulativa anual en la demanda de todos los derivados del litio del orden de 8.6% lo que significa en el año 2000 una demanda mundial anual del orden de 30.000 toneladas equivalentes a litio metálico (estimaciones del U. S. Bureau of Mines).

En relación con los precios, existen sólo dos compañías que abarcan todos los productos derivados del litio y que suman unas 70 variedades, estas empresas americanas prácticamente son las que fijan los precios. El carbonato de litio es el producto de más bajo precio y se ha mantenido estable en el tiempo. La Tabla N°11 muestra una relación de los precios en el mercado americano, observándose poca variabilidad del Li_2CO_3 desde 1994. Situación similar se produce en Chile, en que osciló alrededor de US\$2700 por tonelada métrica durante la década de los 90.

TABLA N° 11: Precios del Li_2CO_3 e Li(OH) en US\$/Kg.

Años	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
LiOH	5.62	5.62	5.51	5.74	5,74	5,74	5,74
Li_2CO_3	4.41	4.34	4.34	4.47	4,47	4,47	4,47

Fuente: Joyce A. Ober (1999,2000).

7.2 MERCADO NACIONAL

Nueve mil toneladas métricas de litio equivalente exportó durante 1997 SQM en su primer año de operaciones, para 1998 las ventas de la empresa alcanzaron a 18.000 ton métricas, su máxima capacidad de producción (figura N°12).

El ingreso de SQM al mercado del litio, convirtió a Chile en el primer productor y exportador mundial de este producto. Los volúmenes de venta durante el año 2000 de carbonato de litio aumentaron significativamente (18%) respecto al año anterior, de 17.6 ton métricas a 20.6 ton métricas. Los precios de venta aumentaron levemente (4%) respecto al año anterior y se mantienen significativamente inferiores a los precios que prevalecían en el mercado antes de que SQM iniciara su producción. El ingreso de SQM al mercado, obligó a Chemmetall Foote y FMC a reducir sus precios, tanto que, el valor del LiCO_3 ha disminuído de US\$ 2.7 en 1996 a US\$ 1.45 al año 2000.

El precio promedio en 1997 para el Li_2CO_3 fue de US\$ 2834,7 FOB, (periodo 1991-1997). El ingreso por divisas al país superó los US\$30 millones desde el año 1992, alcanzando en 1997 la cifra de US\$ 40.5 millones. En 1999 Chile alcanzó las 30231 toneladas métricas, lo que significa cubrir poco más del 50% de la demanda mundial de litio.

SQM contempla a futuro integrarse en la producción de diversos derivados de litio, participando de los distintos segmentos del mercado (figura N°10). Para lograr estos objetivos, cuenta con: estudiar distintas alternativas para desarrollar nuevos negocios, hasta potenciales Joint Ventures con otras empresas. Mejorar el rendimiento del proceso productivo, en conjunto con la mejor calidad de las soluciones tratadas que le permitan tener costos de producción significativamente más bajos que los costos originales del proyecto.

La producción mundial de carbonato de litio se aproxima a 45000 TM anuales, siendo el país del norte su principal consumidor. Para el año 2000, Estados Unidos cubrirá sus importaciones con el 88% del carbonato de litio de nuestro país.

Los principales destinos de las exportaciones chilenas, principalmente son Estados Unidos, y en menor proporción Alemania, Japón, Canadá, Corea del Sur, Venezuela.

Unos US\$10 millones invirtió la Sociedad Chilena del Litio, propiedad de Cyprus Foote Minerals, para construir una planta de cloruro de litio cuya capacidad de producción es de 3.628 toneladas al año, ingresando al mercado a fines del 1998. En el corto plazo, SCL podrá producir otros derivados del litio, con productos más competitivos y de mayor valor agregado al mercado internacional.

En relación a las importaciones chilenas, el país requiere de hidróxido de litio, necesario en industrias de grasas y lubricantes, cuyos requerimientos alcanzan a 50 toneladas anuales. Las importaciones las realiza a Estados Unidos y su precio ha ido en aumento, al igual que sus requerimientos.

TABLA N°12: Precios del carbonato de litio exportado (prom anual en dólares/ton métricas)

Años	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	Prom.
Li_2CO_3	3057	3011	2994	3070	2945.9	2891.7	1873	1542.5	2673.1
LiCl	---	---	---	---	---	---	---	2190.4	2190.4

Fuente: Ministerio de Minería

TABLA N°13: Producción de carbonato de litio (ton métricas)

AÑOS	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Li_2CO_3	8575	10823	10369	10439	12943	14180	24246	28377	28000	28500

Fuente: Ministerio de Minería

TABLA N°14: Exportaciones chilenas valoradas de Li_2CO_3 (miles de dólares FOB)

Años	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Li_2CO_3	25262	30937	31707	32436	38557	39599	4050	38099
LiCl	---	---	---	---	---	---	---	6948

Fuente: Registro Exportaciones Banco Central

TABLA N°15: Precios de compuestos de litio en US\$ / Kg

Compuesto	1999 US\$ / Kg	2000 US\$ / Kg
Bromuro de litio	12,83	12,83
Carbonato de litio (técnico)	4,47	4,47
Cloruro de litio	11,0	11,0
Fluoruro de litio	16,94	16,94
Hidróxido de litio	5,74	5,74
Litio metálico (técnico)	85,92	85,92
N butil litio en n-hexano (15%)	44,88	44,88

Fuente: Chemical Market Reporter, 2000

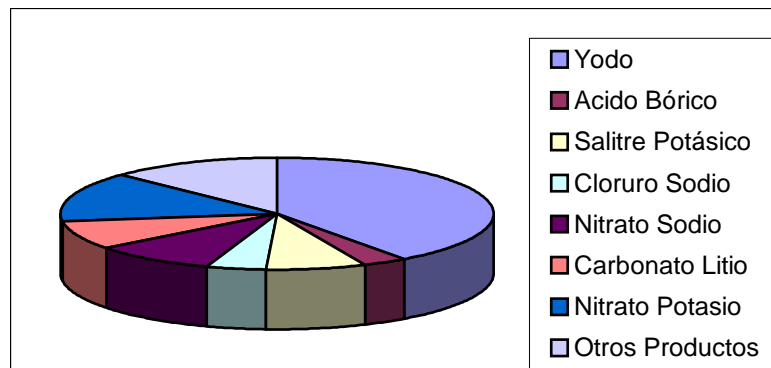


FIGURA N°12: Porcentaje de exportaciones de productos no metálicos, en el cual el 8.3% está representado por el carbonato de litio, durante 1998.

CAPITULO 8

8. PRINCIPALES INDUSTRIAS CONSUMIDORAS DE LITIO

El carbonato de litio es el producto de mayor consumo y su precio ha permanecido estable desde 1997. La industria de la cerámica y vidrio, y las aleaciones de aluminio-litio, son las mayores consumidoras de carbonato de litio, que aproximadamente demandan un 65% del mercado de litio en general. Chile satisface gran parte de estos requerimientos. Además el carbonato de litio sirve de punto de partida en la obtención de la mayor parte de los otros derivados químicos de litio, los que suman alrededor de 70 productos, Figura N°10; le sigue en orden de importancia el hidróxido de litio el que abarca un cuarto del mercado. El resto del mercado está constituido por el fluoruro de litio, el hipoclorito de litio, el cloruro de litio, butil litio, litio metálico y una variedad de otros productos más sofisticados.

En el mercado del litio y sus productos, se usa como medida de referencia el carbonato de litio, el que contiene 18.8% de litio metálico.

Las principales industrias consumidoras de litio son:

Industria de aluminio, vidrio y cerámica con el 65% del mercado aproximadamente.

Fabricación de grasas industriales de tipo multiuso con menos del 20% de la demanda.

La diferencia restante se reparte en distintas aplicaciones

Sistema de aire acondicionado y deshumidificación

Fabricación de caucho sintético

Fabricación de productos farmacéuticos

Fabricación de baterías primarias (pilas secas)

Aleaciones, y otros variados usos de los diferentes productos químicos de litio que se fabrican (alrededor de 70 variedades, que consumen alrededor del 14% del carbonato de litio).

TABLA N° 16: Principales usos de los compuestos de litio

USOS	1985
Aluminio	28 %
Cerámicas	24 %
Vidrios	14 %
Grasas Lubricantes	17 %
Productos químicos	7.5 %
Aire acondicionado	3 %
Cauchos sintéticos	2.5 %
Baterías de litio	1.5 %

Fuente: Diagnóstico de Minería No Metálica en Chile, 1996

CAPITULO 9

9. USOS Y APLICACIONES

En la actualidad, la utilización de los productos derivados del litio son diversos, tal como se manifiesta en la Figura N°11 y Tabla N°16, los que podemos reagrupar en:

- Elaboración de vidrios cerámicos de aluminosilicatos de litio.
- Producción de aluminio metálico.
- Fabricación de tubos de televisión.
- Usos farmacéuticos e industriales.
- Elaboración de esmaltes para cerámica

Tratamientos médicos: depresión, esquizofrenia, alcoholismo, desórdenes esquizoafectivos, etc.

9.1 INDUSTRIA DEL ALUMINIO

El metal aluminio se obtiene fundamentalmente en el proceso antiguo de Hall - Heruold, con algunas modificaciones que consiste en una electrólisis de la Alúmina (Al_2O_3) fundida en un baño de composición variable de 2 a 8% de Alúmina, 5 a 7% de Fluoruro de Aluminio, 5 a 7% de Fluoruro de Calcio y 80 a 85% de Criolita ($NaF \cdot AlF_3$). Al baño se le adiciona un 3,5% en peso de Li_2CO_3 en gránulos con respecto al peso del electrolito, lo cual permite los siguientes beneficios:

- Disminuye el punto de fusión del baño, como la viscosidad.
- Aumenta la conductividad eléctrica del electrolito fundido.

Estos cambios permiten trabajar con una temperatura de operación más baja, lo cual reduce el consumo de energía y aumentar la eficiencia de corriente eléctrica, y por ende, aumenta la productividad. Se agrega aproximadamente 2 kilogramos. de carbonato de litio por tonelada de aluminio producido. Además de los efectos mencionados, el litio permite reducir los consumos de ánodos de carbón y de criolita y reduce entre un 20% a 30% la emisión de flúor al ambiente, bajando la contaminación[®].

En la industria aereo espacial de varios países, se ha considerado el uso de las aleaciones Al-Li, en piezas tanto del ala y fuselaje, para diferentes tipos de aviones. La utilización de este material, permite reducir significativamente el peso de los aviones en más del 10%, por otra parte, aleaciones con un 2% a 3% en litio, resultan atractivas para esta industria a causa de su reducida densidad y mayor resistencia a la corrosión, comparándola con las aleaciones tradicionales de aluminio. A pesar de la ventajas comparativas, estas aleaciones no se han incorporado al mercado en gran escala como se pensó en un comienzo. En la construcción de aviones, estas aleaciones compiten con los compuestos de boro, grafito y fibras poliméricas. Mc Cook Metals LLC[®], produjo una aleación Al-Li, para el reemplazo de ciertas piezas críticas que están sometidas a tensión, como por ejemplo, remaches y pernos, para sus aviones F-16.

Otra gran utilidad en la industria aeronáutica, es el incorporar esta aleación en un nuevo diseño de tanques de combustibles, los que son utilizados en los puentes aereos, principalmente su ventaja radica en ser ultra liviano, adicionando un 4% Cu, 1% Li, 0.4% Ag, 0.4% Mg y la diferencia en Al. Esta aleación es 30 % mas dura y 5 % menos densa que la aleación de aluminio previamente usada. El rediseño[®] del tanque de combustible pesa aproximadamente 3400 Kg menos que el diseño original, la diferencia se utilizó para aumentar la capacidad de carga útil.

9.2 INDUSTRIA DEL VIDRIO Y DE LA CERÁMICA

El óxido de litio es un aditivo importante en la industria del vidrio y la cerámica. Su efecto es disminuir el punto de fusión y mejorar las propiedades de escurrimiento del material fundido, reducir el coeficiente de expansión térmica y de viscosidad del producto terminado. La fuente de Li_2O más utilizadas es el Li_2CO_3 y además los concentrados de minerales de litio.

En las piezas cerámicas resistentes al choque térmico “*pirocerámicas*” (vajillas de loza, vidrio tipo Corning) se utilizan preferentemente concentrados de minerales de litio con bajo contenido de hierro. Otra aplicación importante la constituye la fabricación de tubos de televisión monocromáticos y en colores.

Hasta 1997, los minerales concentrados de litio eran los preferentemente usados en la industria de vidrios y cerámicas, hoy en día se utiliza el carbonato de litio, puesto que desde entonces su precio se ha estabilizado, es bajo y además se consigue de esta forma eliminar la utilización de compuestos más tóxicos.

9.3 GRASAS LUBRICANTES

Las grasas a. base de jabones de litio (fabricados a partir de hidróxido de litio) denominadas grasas multipropósito, conservan sus propiedades lubricantes en un amplio rango de temperatura (bajo 0 hasta 200°C) poseen muy buena resistencia al agua y a la oxidación, por estas cualidades son utilizadas en todo tipo de transportes, tanto industriales, militares, automotriz, aéreos y también en aplicaciones marinas. Representan alrededor de un 60% de todas los lubricantes producidos en los Estados Unidos y la mayoría de los países industrializados.

9.4 SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO Y CONTROL DE HUMEDAD

El Bromuro de Litio y el Cloruro de Litio en forma de salmueras, se usan en sistemas industriales de acondicionamiento y deshumidificación del aire, aprovechando que ambos compuestos tienen propiedades altamente higroscópicas que les permiten absorber la humedad del aire.

[®] <http://www.chemetallithium.com/lithium/lithium.nsf>

© Light Metal Age, 1998

9.5 CAUCHO SINTÉTICO

En la fabricación de elastómeros sintéticos intervienen compuestos órgano-Litio, como catalizadores de polimerización de plásticos, como el polietileno. El litio es utilizado en esta aplicación en forma de Butil - Litio. Este compuesto órgano - metálico es un catalizador específico en la polimerización iónica del isopreno, estireno y butadieno, para la obtención de cauchos espaciales empleados en la manufactura de neumáticos de alta duración, y con gran resistencia a la abrasión. El N-butil-litio reacciona con el estireno y butadieno, formando una goma sintética que no requiere vulcanización.

9.6 PILAS DE LITIO

La utilización de litio metálico (99.9% pureza) como ánodos en baterías primarias (pilas), ha tenido un rápido crecimiento en los últimos años, aunque el consumo es relativamente bajo por las pequeñas cantidades requeridas. Existe una familia de pilas que tienen un ánodo común, pero pueden diferir del tipo de cátodo y electrolito.

Las pilas de litio presentan varias ventajas con respecto a las pilas tradicionales:

- Mayor densidad de energía por peso y volumen.
- Mayor vida útil, entregando un voltaje, constante.
- Menor peso.
- Funcionamiento a alta capacidad y bajas temperaturas.
- Mayor tiempo de almacenamiento.

Las baterías de litio no recargables se han usado ampliamente en relojes, microcomputadores, cámaras, juegos y aparatos electrónicos. Otra gran aplicación es en la industria militar, puesto que el uso de baterías de oxihalide de litio, fueron seleccionadas para el uso en misiles de defensa aéreas y otros programas de los Estados Unidos[Ⓢ]. Este tipo de baterías presenta varias ventajas, entre otras, su durabilidad, gran capacidad de potencia disponible y seguridad de almacenamiento.

Otra área probada es en la industria automotriz de potencia eléctrica. En este caso una de las ventajas de la utilización de baterías de litio es la no contaminación, ahorro de combustible, durabilidad, etc. Nissan Motor Corp. USA, introdujo la primera batería en 1998, presentando en la exposición Auto Show de Los Angeles, un minibus para cuatro pasajeros, potenciado con baterías de Li-ión, desarrollado conjuntamente con Sonny Corp[®].

9.7 OTRAS APLICACIONES DEL LITIO

Se ha potenciado un gran mercado farmacológico, puesto que la incorporación de litio metálico y algunos compuestos, se utilizan como catalizadores en la producción de analgésicos, agentes anticolesterol, antihistamínico, anticonceptivos, inductores del sueño, algunos tipos de esteroides, tranquilizantes, vitamina A y otros productos. El carbonato de litio grado farmacológico, es utilizado en el tratamiento de la psicosis maníaca depresiva.

9.8 USOS FUTUROS

Hay tres mercados potenciales importantes para el litio que actualmente se encuentran en etapa de desarrollo tecnológico. Ellos son las aleaciones de aluminio-litio, las baterías secundarias (recargables) y los reactores de fusión nuclear.

Reactores de fusión nuclear

Una aplicación potencial del litio de grandes expectativas es en la producción de energía eléctrica mediante la fusión nuclear controlada de Deuterio y Tritio. Por ser escaso en la naturaleza el tritio se obtiene irradiando el litio con neutrones. El consumo de litio como combustible para generar tritio no es significativo, pero podría ser un gran requerimiento al ser usado también como escudo contra radiaciones y como medio de transferencia de calor (litio-líquido).

Estas aplicaciones están supeditadas al éxito de un programa de desarrollo de reactores de fusión que impulsa el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Se espera que el año 2015 se ponga en marcha un reactor demostrativo.

Baterías secundarias

[Ⓢ] *McHale, 2000*

[®] *Advanced Battery Technology, 1998*

En Norteamérica, con el apoyo gubernamental, se han realizado importantes esfuerzos en investigación para desarrollar baterías secundarias (recargables) de litio de alta capacidad, a fin de ser empleadas en vehículo de propulsión eléctrica y en instalaciones de almacenamiento de energía para nivelación de carga.

Especialistas en el rubro señalan que las baterías recargables de litio están todavía en el comienzo de su ciclo de desarrollo, aunque enfatizan que ellas llegarán algún día a ser realidad, pero para que ello suceda, se requiere de cierto tiempo y un fuerte incremento en los fondos destinados a su investigación.

Aleación livianas de Aluminio-Litio

La aleación de 1,5-3% de litio al aluminio permite obtener materiales que en promedio son un 10% más livianos que las aleaciones convencionales de aluminio. Además de reducir la densidad, el contenido de litio antes indicado permite obtener aleaciones con más resistencia y mayor módulo de elasticidad que las corrientemente utilizadas en la fabricación de partes y componentes de aviones. Su utilización en la fabricación de aviones se traduce en un ahorro significativo de combustible, el que puede ser equivalente a un 20% de aumento de capacidad de carga del avión.

Actualmente, la Mc Donnell Douglas está utilizando aleaciones de aluminio-litio en varios modelos de aviones. El principal inconveniente de estos materiales es su alto costo, el cual podría disminuir si se resuelven los problemas de reciclar los desechos generados en su fabricación. Por otra parte ha contribuido a una lenta introducción en el mercado el hecho de que el petróleo se mantiene aún en un precio relativamente bajo.

Proyectos Chilenos

Cabe destacar, en este apartado el “Programa del Litio” que constituye la materialización de la doble responsabilidad ante la ley que le cabe a la Comisión Chilena de Energía Nuclear, CCHEN, en lo referente al litio como elemento de carácter nuclear. La primera responsabilidad es la supervisión y autorización de la producción y exportación del litio y sus compuestos. La segunda es la promoción de la investigación y desarrollo (I y D) en materia de litio para su utilización en aplicaciones pacíficas.

Los objetivos de este proyecto son investigar y desarrollar materiales avanzados de litio, y por otra, investigar y desarrollar procesos químicos, físicos y nucleares básicos relacionados con compuestos de litio.

La meta a mediano y largo plazo, es transferir la tecnología derivada de este programa al sector industrial del país.

Principalmente la acción se orienta a las baterías de Litio, la cual incluye un amplio espectro de posibilidades de I y D, desde los procesos metalúrgicos para la eliminación de impurezas en los compuestos finales de litio, hasta el desarrollo de materiales para el uso en batería de litio de alta capacidad. CCHEN se ha propuesto implementar un laboratorio básico a fines de 1995 para el estudio integral de materiales para baterías de alta capacidad. Este es el resultado del esfuerzo de CCHEN y varias universidades nacionales e investigadores extranjeros.

Otra área en la que se ha avanzado en materiales cerámicos de litio para el reactor de Fusión Nuclear. En esta área se está llevando a cabo dos actividades. Una es la fabricación de materiales cerámicos de titanato de litio en forma de pellets, mediante dos rutas alternativas de síntesis: Solgel y de estado sólido. La segunda, consiste en el diseño, implementación y operación de un sistema de irradiación in situ para evaluar la capacidad de dicho pellets como liberadores de tritio bajo irradiación de neutrones. Este sistema está instalado en el reactor RECH-I de la CCHEN y cuenta con la colaboración internacional de Argonne National Laboratory de E.E. U.U. y del Chalk River Laboratory, de Canadá.

También se ha contemplado la Investigación y Desarrollo de materiales avanzados compuesto de litio, además de aquellos usados en pellets para fusión nuclear. Ejemplos de éstos son los cerámicos superconductores dopados con litio y películas delgadas con propiedades de conductividad muy atractivas para su uso en sensores y semiconductores.



FIGURA N°11: Salar de Atacama, con

referencias de sus caminos y pueblos aledaños.

REFERENCIAS

- Advanced Battery Technology, Nissan minivan uses Li-ion technology: Advanced Battery Technology, v.34, N°2, 24-25., 1998.
- Anuario de la Minería de Chile. SERNAGEOMIN, Junio, 1996.
- Brown, Robert: FMC upgrades its core industrial, specialty chemicals. Chemical Market Reporter, v. 256, N°11, September 13, 32-37, 1999
- Chemical Market Reporter, v.258, n°25, Dec 18, 2000
- Diagnóstico de la Minería No Metálica en Chile, CORFO INTEC Chile, Santiago de Chile, vol I, 546-582, 1989.
- Evans, R. Keith. Reservas y recursos de litio en el mundo occidental *en*: Litio un nuevo recurso para Chile, Santiago, Universitaria, 45-52, 1986.
- Garcés, Ingrid: Modelización Geoquímica de soluciones concentradas. Aplicación al estudio de la evolución de algunos salares-tipo chilenos. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Industrial Minerals: SQM to increase capacity for nitrates, lithium and potash: Industrial Minerals, N°380, May, 1-9, 1999.
- Indicadores de Comercio Exterior. Banco Central de Chile. ISN 0716/2405, Febrero, 1998.
- Joyce A. Ober: Lithium. *In*: Commodity Summaries, U.S. Geological Survey Mineral Year Book, 47.1- 47.10 2000.
- Joyce A. Ober: Lithium. *In*: Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, Enero, 1999
- Kirk Othmer: Enciclopedia de Tecnología Química, 1ª ed. Edit. Alianza, 1961.
- Light Metal Age, Aluminium-lithium alloys: Light Metal Age, v.56, N°1-2, Feb., 102-105, 1998
- La Minería No Metálica de Chile Anuario Estadístico. Comisión Chilena del Cobre, Santiago de Chile, 1998.
- Linke, W y Seidell, A: Solubilities Inorganic en metal organic compounds. A compilation of solubility Data from the periodical literature, 4ª ed., American Chemical Society, Washington D.C. vol I, 384, 391, 1965.
- McHale, John: Eagle-Picher designs lightweight batteries for missile applications: Military & Aerospace Electronics, v.11N°7, July, 1-8, 2000
- Ministerio de Minería: www.economía.cl
- Revista Minería Chilena N° 155: MINSAL en la oferta futura de litio, N° 155, 55-59, 1994.

Registro de Exportaciones del Banco Central de Chile
Schmitt, Bill: Drugs and batteries energize the market: Chemical Week, v. 162, N°37, October 4, 1-29, 2000
www.bcentral.cl/ Registro de Exportaciones del Banco Central de Chile
www.chemetallithium.com/lithium/lithium.nsf
www.webelements.com

M.R. Nadler and C.P. Kempfer, *Anal. Chem.*, 1959, **31**, 2109.