



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**“Diseño de una planta de producción de litio a partir
de salmueras residuales de la extracción de cloro
proveniente de agua de mar”**

TESIS

**Para optar el título profesional de:
Ingeniera Química**

**Presentado Por:
Bach. Arteaga Bernal, Suzzette Fiorella**

**Asesor:
Ing. Santamaria Baldera, Gerardo**

**Lambayeque – Perú
2019**



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**“Diseño de una planta de producción de litio a partir
de salmueras residuales de la extracción de cloro
proveniente de agua de mar”**

TESIS

**Para optar el título profesional de:
Ingeniera Química**

Presentado Por:

Bach. Arteaga Bernal, Suzzette Fiorella

Ing. Dra. CABRERA SALAZAR TARCILA
PRESIDENTE

Ing. Dr. DIAZ EYZAGUIRRE ADOLFO
SECRETARIO

Ing. Dr. GARCIA ESPINOZA CESAR
VOCAL

Ing. Santamaría Baldera Gerardo
ASESOR

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2019**

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
I. RESUMEN	5
II. INTRODUCCIÓN	6
III. ESTUDIO DE MERCADO	8
3.1. EL LITIO	8
3.1.1. Usos del Litio	9
3.2. PRODUCTO PRINCIPAL DEL PROYECTO: Carbonato de Litio.....	10
3.2.1. Usos del carbonato de litio	10
3.2.2. Propiedades físicas y químicas del carbonato de litio.....	11
3.3. MATERIA PRIMA	11
3.3.1. MATERIA PRIMA PRINCIPAL: Salmuera residual de la producción de cloro	11
3.3.2. CARBONATO DE SODIO.....	12
3.3.3. CAL	12
3.3.4. SULFATO DE SODIO.....	13
3.3.5. ACIDO SULFURICO	13
3.3.6. CARBONATO DE SODIO.....	13
3.3.7. HIDROXIDO DE SODIO	13
3.4. ESTUDIO DE MERCADO	13
3.4.1. MERCADO INTERNACIONAL	13
3.4.2. MERCADO NACIONAL	16
3.4.3. ANALISIS DE PRECIO	19
3.4.4. COMERCIALIZACION.....	20
3.5. TAMAÑO DE PLANTA	21
3.6. UBICACIÓN DE LA PLANTA	21
3.7. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MERCADO	24
IV. INGENIERIA DEL PROYECTO	25
4.1. PROCESOS PARA LA OBTENCION DE CARBONATO DE LITIO	25
4.1.1. EVAPORACION DE POZOS.....	25
4.1.2. OSMOSIS INVERSA.....	27
4.1.3. EXTRACCION POR SOLVENTE	28
4.2. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGIA ADECUADA	29
4.3. DESCRIPCION DETALLADA DEL PROCESO.....	30
4.4. BALANCE DE MASA DEL PROCESO	34
4.5. EQUIPOS PRINCIPALES DEL PROCESO	35

4.6.	DISTRIBUCION DE LA PLANTA	37
4.7.	CONSIDERACIONES AMBIENTALES	39
V.	EVALUACION ECONOMICA.....	40
5.1	ESTIMACION DE INVERSION TOTAL	40
5.1.1	CAPITAL FIJO TOTAL	40
5.1.2	COSTO DIRECTO O FÍSICO	40
5.1.3	CAPITAL DE PUESTA EN MARCHA O CAPITAL DE TRABAJO.....	44
5.1.4	ESTIMACION DEL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN	46
5.1.5	BALANCE ECONÓMICO Y RENTABILIDAD.....	50
VI.	CONCLUSIONES	53
VII.	RECOMENDACIONES.....	54
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	APÉNDICE.....	58
	ANEXOS	71

I. RESUMEN

El reciente interés en utilizar vehículos eléctricos hace prever que la demanda de litio crecerá en forma exponencial en los próximos años. Nuestro país es importador de litio en su forma más comercial, es decir carbonato de litio. Por tal motivo se desarrolló el presente proyecto sobre “Diseño de una planta de producción de lito a partir de salmueras residuales de la extracción de cloro proveniente de agua de mar”.

Las proyecciones a nivel internacional indican que la demanda pasará de 0.277 a 2.248 millones de toneladas de carbonato de litio en menos de 20 años. A nivel nacional la demanda insatisfecha proyectada para el 2028 asciende a 920 toneladas. La materia prima principal será las salmueras residuales que elimina actualmente la empresa que produce cloro, QUIMPAC S.A. La disponibilidad de esta materia limita tanto la capacidad como la ubicación de la futura planta industrial. La capacidad se fijó en 900 toneladas de carbonato de lito por año y la ubicación será en el complejo industrial Paramonga.

Por razones de simplicidad y economía se seleccionó el proceso por evaporación en pozas. Con las salmueras residuales disponibles se determinó que usando 241.733 toneladas de salmuera residual y trabajando 360 días al año se puede obtener 900 toneladas de carbonato de litio.

El análisis económico fue alentador. Con una inversión de 5,148,481 dólares, se determinó el costo de producción será de 2.5 dólares el kilogramo. A un precio proyectado de 7.0 dólares el kilogramo se obtuvo una tasa interna de retorno sobre la inversión después de impuestos de 54.13%, un periodo de recuperación del dinero de 1.45 años, y un punto de equilibrio de 23.77%.

Por estar usando un líquido residual, que en estos momentos se desecha al mar, el impacto ambiental se considera que será mínimo.

II. INTRODUCCIÓN

El litio es un metal con propiedades altamente valoradas en el presente, destacando una elevada conductividad eléctrica, baja viscosidad, muy liviano y bajo coeficiente de expansión térmica. Estas cualidades favorecen que tenga múltiples aplicaciones en el sector industrial y especialmente en el ámbito de las baterías, dada la tendencia tecnológica actual. El electro movilidad impulsada por las campañas ambientales y por las regulaciones para disminuir la utilización de combustibles fósiles, sumado al desarrollo tecnológico de dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía son los factores que presionan al alza la demanda del litio futura. El significativo crecimiento que se proyecta para los automóviles eléctricos que utilizan baterías recargables como fuente de energía ha impulsado la demanda proyectada de litio, atendiendo la mayor densidad de carga de las baterías ion-litio ya que éstas han disminuido significativamente su valor (Donoso, Garay y Cantallopts, 2017). Además del uso en baterías el litio tiene innumerables aplicaciones en la elaboración de esmaltes, cerámicas, barnices, vidrios, tinturas, fármacos, grasas y catalizadores (Arteaga, 2013).

La demanda mundial del litio, en forma de carbonato de litio alcanzo un nivel de 188000 toneladas para el 2017. Se proyecta que para el 2035 la demanda se situará a un nivel de 611000 toneladas, de las cuales cerca de 290000 ton se proyectan para demanda de baterías. Solo en el mercado de baterías los ingresos por baterías de litio representarán para el 2022 cerca de 45 mil millones de dólares (CORFO & InvestChile, 2017).

En la naturaleza, el litio se halla en unos 150 minerales, pero únicamente en unos pocos se considera en cantidades comerciales, y también está presente en salmueras y en aguas de mar y termales. Se lo encuentra en varias formas, asociado a minerales, en sedimentos con arcilla, en salinas o salmueras, en yacimientos de boro o berilio, en suelos de ambientes desérticos y rocas sedimentarias. La explotación del litio proviene, como mencionamos, básicamente de dos fuentes: de minerales, que es la más tradicional y que representa un 34%; y de las salmueras de los salares, que es más moderna y con procesos de tecnologías de extracción es menos costosas, con un 59%. De ambas fuentes, la primera transformación permite obtener carbonato de litio (Manrique, 2015).

Perú cuenta con grandes yacimientos salinos como por ejemplo Las Salinas de Huacho en Lima, Las Salinas de Otuma en Ica, Las Salinas de Paita en Piura, Salinera de Maras en Cuzco y Las Salinas Huito y Salinas de Moche en Moquegua (Zeballos, Ochoa y López, 2010). Debe tenerse en cuenta que la empresa Quimpac, División Químicos tiene dos plantas de producción de soda caustica y cloro; una en Oquendo y otra en Paramonga. En ambos sitios se genera cantidades representativas de salmueras residuales que bien pueden servir para la extracción de otras sales presentes en el agua de mar, en especial el litio.

La extracción de litio de salmueras naturales o de salmueras residuales es ampliamente conocido. Normalmente junto con el litio se separa otros minerales como magnesio, boro, cesio, rubidio. Estos procesos son extensos y costosos (Rocasalbas, 2010). A la fecha, el avance tecnológico tiende a buscar procesos que sean simples, de alto rendimiento y por lo tanto económicos. Dentro de esta tendencia se han desarrollado materiales adsorbentes altamente específicos para extraer litio, los cuales pueden ser recuperados y vueltos a utilizar. Dentro de estos materiales sorbentes comerciales se tiene referencia de sorbentes inorgánicos de óxido de manganeso, absorbentes basados en alúmina policristalina y otros (León, 2016).

En el mercado mundial del litio, el 46% es por carbonato de litio, 21% por concentrado de litio, 13% por hidróxido de litio, 55% por butil litio, 4% por litio metálico, 3% por cloruro de litio, y un 8% por otros derivados (Neometals Ltd., 2017). Un gran consumidor de carbonato de litio en nuestro país son las industrias de cerámica, vidrio y lubricantes (grasas), donde se utiliza este insumo en una gran proporción, tanto que en las formulaciones de vidrio o cerámicas se utiliza de 10 a 20% como fundente (Arteaga, 2013).

Teniendo en cuenta que se cuenta con suficiente materia prima y que existen demanda asegurada en el mercado peruano, en el presente proyecto se plantea la producción de carbonato de litio para abastecer el mercado nacional y de ser el caso para su exportación como materia prima para baterías de litio.

III. ESTUDIO DE MERCADO

3.1. EL LITIO

El litio es el metal alcalino más liviano que se conoce, de baja densidad y de bajo punto de fusión (180.5°C), en comparación con la mayoría de los otros metales. Sin embargo, tiene mayor punto de fusión que otros metales de la misma familia como sodio (98°C) y potasio (63°C). El litio como metal es el elemento más reductor que se conoce y por ello no se le encuentra en estado nativo en la naturaleza, sino formando compuestos oxidados. El litio metálico se obtiene mediante electrólisis de cloruro de litio fundido, en una atmósfera inerte. En su forma pura es un metal blando, de color blanco plata que se oxida rápidamente en aire o agua, cambiando su color a amarillo. Su densidad es la mitad de la del agua, siendo el metal y elemento sólido más ligero.

Algunas características físicas principales son (INSHT, 2005):

Punto de ebullición: 1336°C Solubilidad en agua: reacción violenta

Punto de fusión: 180.5°C Presión de vapor: 133 Pa @ 723°C

Densidad: 0.5 g/cm³ Temperatura autoignición: 179°C



Figura 3.1: El litio metálico. El litio en su forma pura es un metal blando, de color blanco plateado y sumamente ligero. Recuperado de: <https://concepto.de/litio/>

Los minerales de litio más importantes económicamente son el espodumeno o feldespato de litio, $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$, que contiene aproximadamente un 4% de litio, o mica de litio, que contiene del 0.8 al 2.7% del metal. La mayor parte de las aguas minerales, salinas y pozos, así como el agua de mar contienen litio. En esta última la concentración media puede ser hasta de 1 ppm.

3.1.1. Usos del Litio

Algunos de los compuestos de litio empleados en la industria son: carbonato de litio (para baterías recargables, esmaltes para cerámicas, vidrios, aluminio metálico, aplicaciones farmacéuticas), hidróxido de litio (fabricación de grasas lubricantes de usos múltiples, obtención de litio metálico, isótopo-6 de litio, adsorbente de CO₂ en vehículos espaciales y submarino, fuentes de energía eléctrica para ferrocarriles y teléfonos); bromuro de litio (control de humedad de gases, acondicionamiento del aire, aplicaciones fotográficas y farmacéuticas); fluoruro de litio (aleaciones y soldaduras especiales, metalurgia del aluminio); cloruro de litio (aleaciones, soldaduras especiales y otros fundentes, obtención de litio metálico); hipoclorito de litio (esterilización del agua de piscinas); peróxido de litio; borohidruro de litio (producción de oxígeno e hidrógeno); hidruro de litio (producción de hidrógeno); estrato de litio (grasas automotrices e industriales). En la Figura 3.1, se resume las principales aplicaciones del litio en sus diferentes presentaciones:

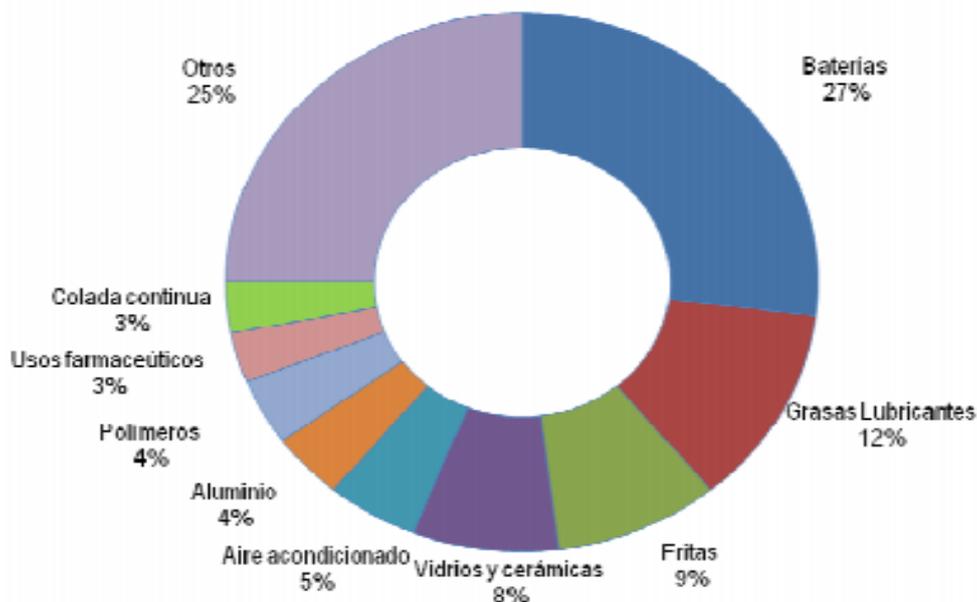


Figura 3.2: Principales usos del litio. Los valores son estimaciones al 31 de diciembre del 2008. Recuperado de: Sociedad Química y Minera (SQM) de Chile S.A., 2009

3.2. PRODUCTO PRINCIPAL DEL PROYECTO: Carbonato de Litio

En la actualidad, de la demanda mundial por litio y sus derivados, el 46% es por carbonato de litio, 21% por concentrado de litio, 13% por hidróxido de litio, 5% por butil litio, 4% por litio metálico, 3% por cloruro de Litio, y un 8% por otros derivados del litio (Neometals Ltd., 2017).

Por el comportamiento del mercado se ha considerado la producción de carbonato de litio. Comercialmente *cuando se habla de producción de litio se refiere a la cantidad de carbonato de litio equivalente*. El valor comercial que se utiliza es 1 ton de Li = 5.32 ton de carbonato de litio = 5.32 LCE.

Entonces todos los datos que se presentan son para el estudio de mercado de carbonato de litio.

3.2.1. Usos del carbonato de litio

En el árbol del litio que se presenta en la Figura 3.2, se muestra que los principales usos del carbonato de litio son en baterías, industria del vidrio, producción de cerámicas, elaboración de aluminio, industria metalúrgica y en la construcción.

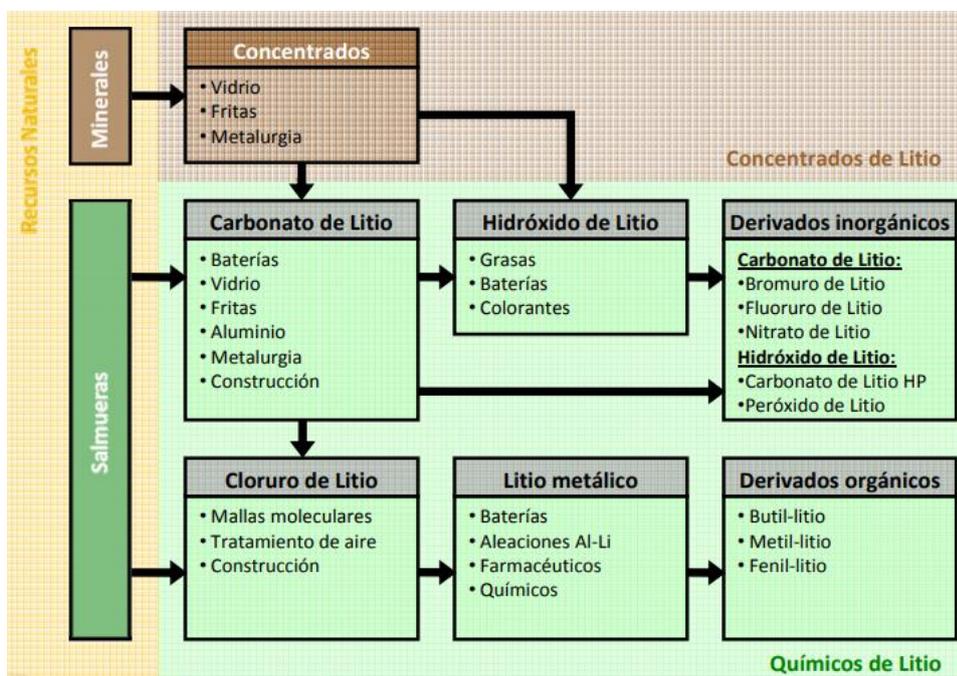


Figura 3.3: Árbol del litio. Destaca el carbonato de litio para usos diversos. Recuperado de la conferencia “Recursos de Litio en el Mundo y Chile” por Solminihac, en el 2010

3.2.2. Propiedades físicas y químicas del carbonato de litio

El carbonato de litio, conocido también como sal de litio del ácido carbónico, se vende a nivel comercial a una pureza mayor a 99% en peso. Su fórmula molecular es Li_2CO_3 , con un peso molecular de 73.89 g/mol. Su estado es sólido, de color blanco, inodoro.

Se considera una sustancia alcalina porque cuando se disuelve 5 g/litro a 20°C el pH es 10.5.

Su punto de fusión es 722°C a 101.3 kPa. La densidad registrada es 2.11 g/cm³ a 25°C, pero tiene una densidad aparente de 250 kg/m³. Es medianamente soluble, llegando a disolverse 8.4 g/L a 20°C. Punto de ebullición es 1310°C, pero se descompone por debajo de su punto de ebullición. La pérdida de peso cuando se calcina (PPC) alcanza el 60%.

3.3. MATERIA PRIMA

3.3.1. MATERIA PRIMA PRINCIPAL: Salmuera residual de la producción de cloro

Según la Figura 3.3, en la producción de cloro e hidróxido de sodio por electrolisis de salmuera de agua de mar se produce como subproducto una salmuera agotada.

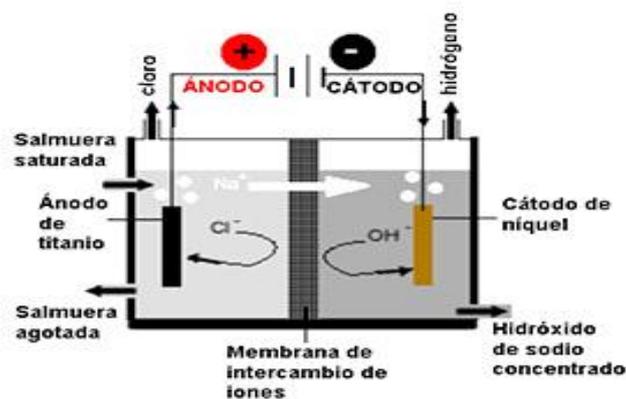


Figura 3.4: Obtención de cloro e hidróxido de sodio a partir de salmuera de agua de mar. En la parte inferior izquierda sale la salmuera agotada, recupera de Oficios Técnicos, 2018

Esta salmuera agotada, constituye una fuente inagotable de litio. En el agua de mar se tiene reservado cerca de 230 mil millones de toneladas de litio a una concentración muy baja de 1 a 2 ppm, pero que concentrado por evaporación como salmuera puede alcanzar niveles de 90 a 120 ppm, semejante a los grandes salitrales con alto contenido de litio (600 ppm). Estos salitrales constituyen las, reservas mundiales del litio, de las cuales más del 98% se encuentran ubicadas en Chile, Argentina, China y Australia (García, 2018).

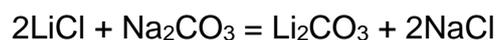
En el Perú, QUIMPAC S.A., es el único productor de cloro e hidróxido de sodio a partir de salinas de agua de mar. Esta empresa tiene concesiones mineras de sal indefinidas en las Salinas de Otuma (Pisco) y Huacho, con un total de 7000 hectáreas, estando en actualidad en producción 100 hectáreas para abastecer a la planta productora de cloro e hidróxido de la QUIMPAC S.A., ubicada en el complejo Paramonga (QUIMPAC S.A., 2015).

Según la Dirección General de Asuntos Ambientales de Industria, del Ministerio de la Producción, la cantidad de salmuera residual que elimina QUIMPAC en su planta de producción de cloro de Paramonga es de 296 toneladas por hora (DGAAMI, 2019). Con una proporción promedio de 100 ppm de Li en la salmuera residual se puede disponer de una fuente de cerca de 213.12 toneladas de litio por año, o 1125 ton de LCE. Por lo tanto, se puede considerar que existe disponibilidad de materia prima.

Por ser una salmuera residual, se considera que su costo es nulo, pues este se envía de regreso al mar.

3.3.2. CARBONATO DE SODIO

El carbonato de sodio se requiere para precipitar carbonato de litio a partir de soluciones concentradas de cloruro de litio se acuerdo a la reacción:



Perú no produce carbonato de sodio y por lo tanto se tiene que comprar de importación. Las importaciones provienen de EE.UU., seguidas de China, y Bulgaria. El precio varía entre 400 a 600 dólares por tonelada. Para el proyecto se va a considerar un precio promedio de 500 dólares la tonelada.

3.3.3. CAL

Este insumo químico se produce en nuestro país como cal viva y como hidratado. En el proyecto por su mayor pureza, 90-92% de CaO, se va emplear cal viva selecta. Este insumo se adquiere a granel. El precio promedio actual llega a 80 dólares la tonelada.

3.3.4. SULFATO DE SODIO

El sulfato de sodio se expende a granel como un polvo blanco con una pureza mínima de 99%, en bolsas de polipropileno de 50 kg de peso neto. su precio de venta en el mercado nacional bordea los 110 dólares la tonelada.

3.3.5. ACIDO SULFURICO

El ácido sulfúrico concentrado es un ácido fuerte que se vende en forma líquido con una concentración no menor a 97% en peso. Perú, es un gran productor de ácido sulfúrico, el cual se produce como un subproducto de la industria de concentrados mineros. Su precio de venta está en promedio a 200 dólares la tonelada.

3.3.6. CARBONATO DE SODIO

Este insumo se expende en forma de polvo con una pureza de 99%. Su mayor uso, así como el sulfato de sodio, es la industria textil. El precio de los últimos años está en promedio 190 dólares la tonelada.

3.3.7. HIDROXIDO DE SODIO

Es una base fuerte. Actualmente es producido por QUIMPAC S.A., a partir de las salmueras de agua de mar. Se vende en escamas con una pureza de 98%, o en forma de líquido con una pureza de 49 – 5.05%. El precio promedio es de 400 dólares la Tonelada.

3.4. ESTUDIO DE MERCADO

El litio se suele denotar en toneladas de carbonato de litio (LCE) equivalente, en vez de toneladas de metal de litio. Esto se debe a que el carbonato de litio es el químico de litio de producción más común y es fácilmente "convertible" a otras formas químicas. En contraste, el metal de litio no es de producción ni de comercialización común. El uso de LCE permite informar de forma consistente y comparable a lo largo de toda la compleja cadena de valor del litio.

3.4.1. MERCADO INTERNACIONAL

A nivel mundial la demanda mundial de litio alcanzo el nivel de 244.290 ton. de LCE. De este total el 36% se utilizó en la producción de baterías de ion litio. Ver Figura 3.4.

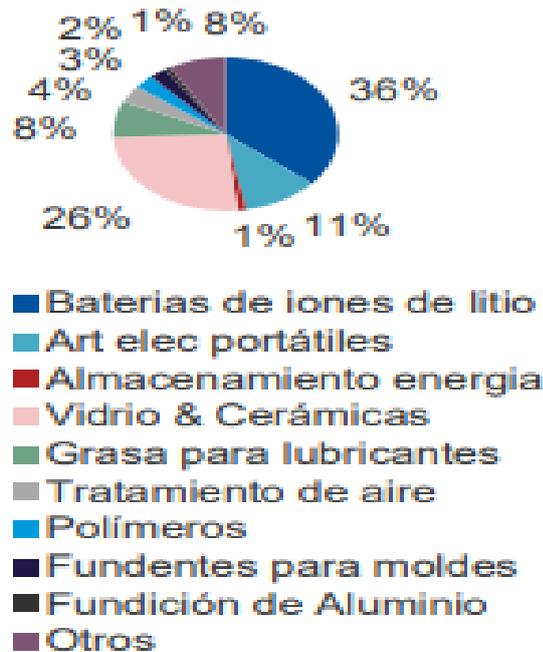


Figura 3.5: Consumo de litio por uso final, 2017. Sobresale el consumo para baterías de iones de litio; recuperado de CRU International Limited, 2018.

El consumo histórico de litio (en LCE) ha venido creciendo sostenidamente como se muestran los datos de la Figura 3.5. Este crecimiento se debe en gran parte a China. El mercado de vehículos eléctricos (VEs) en China ha recibido un importante apoyo del gobierno, haciendo de ciertos VEs costo-competitivos con otras alternativas del mercado. El consumo total de VEs en 2008 fue de menos de 1kt de LCE; para 2017 era de 88kt de LCE. Se espera que esta tendencia acelere a medida que los VEs ganan participación de mercado.

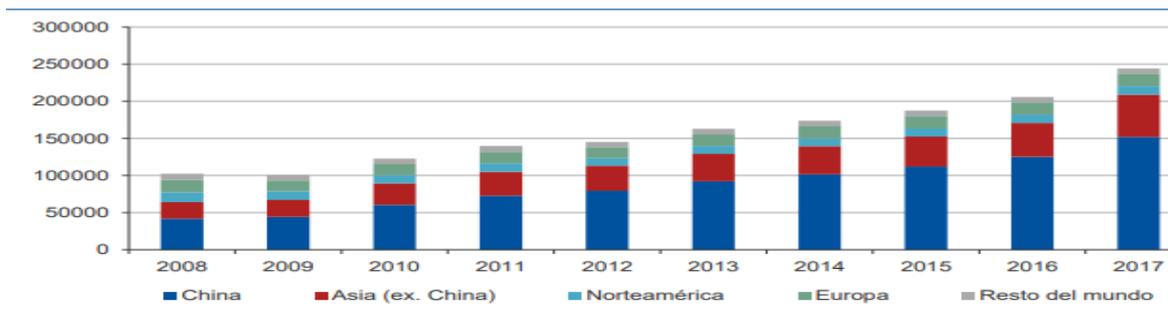


Figura 3.6: Consumo histórico de litio, 2008 -2017, en toneladas de LCE. El consumo ha tenido un aumento sostenido; recuperado de CRU International Limited, 2018.

La demanda proyectada de litio a nivel mundial se estima que saltará de 277 000 toneladas de LCE en el 2018 a 2 248 000 ton de LCE en 2035, como se puede apreciar en la Figura 3.6. La proyección de demanda general, indica que el segmento de los VE será el principal impulsor de consumo de litio en el futuro. Se espera un crecimiento en la fabricación de baterías de VE de 114000 a 1 826 000 toneladas de LCE desde 2018 hasta el 2035.

Los especialistas indican que del 36% del uso de litio en baterías en el 2018 pasará cerca de 59% en el 2021, hasta 70% para el 2035. La razón principal es que, según la batería, cada teléfono inteligente requiere entre dos y tres gramos de litio. Un computador portátil 30 gramos, mientras que una tableta necesita unos 18 gramos de litio. Para la fabricación de autos, el uso de litio varía de entre 1.6 a 22.6 kilos.

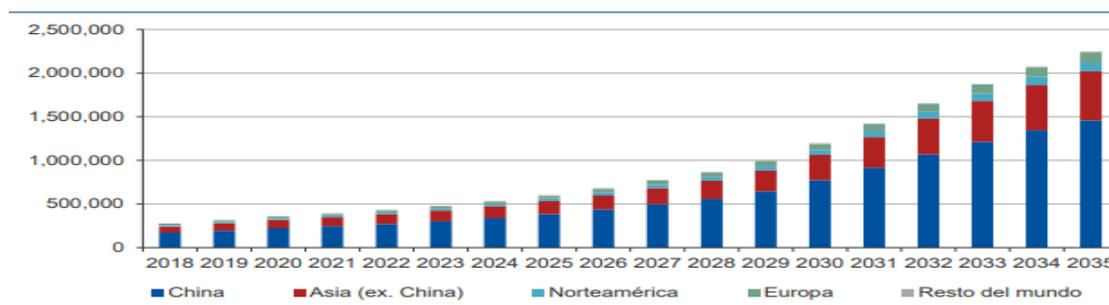


Figura 3.7: Proyección de demanda de litio, 2018-2035, en toneladas de LCE. A partir del 2028 se nota un crecimiento exponencial; recuperado de CRU International Limited, 2018.

LA OFERTA PROYECTADA para el 2035 alcanzaría los 1.5 millones de ton LCE, lo cual significaría que existirá un gran déficit de este producto. Por lo tanto, se concluye que el mercado internacional asegura un gran

consumo de carbonato de litio que tendrá que ser satisfecho con otras producciones además de los tradicionales abastecedores a nivel mundial: Chile, Argentina y Australia (Comisión Chilena del Cobre, 2018).

3.4.2. MERCADO NACIONAL

Teniendo en cuenta que el carbonato de litio es un insumo importante para la producción de vidrios y cerámicas, se analiza la demanda de estos sectores para determinar el consumo histórico y proyectado de carbonato de litio en nuestro país.

En la fabricación de vidrio y cerámica se usan dos fuentes de óxido de litio: carbonato de litio y concentrado de minerales de litio. Los beneficios del uso de litio en cualquiera de sus formas son los siguientes (Rivera, 2008):

- Reducción de la temperatura de fusión de los materiales, lo que produce un importante ahorro de energía.
- Mejora la eficiencia productiva
- Permite un mejor control de emisiones contaminantes.
- Mejora notablemente la calidad del producto obtenido por reducción de la expansión térmica, produciendo un producto estable, resistente al calor.

3.4.2.1. Consumo Histórico y Proyectado de Carbonato de Litio

Teniendo en cuenta que nuestro país no produce carbonato de litio, el consumo nacional se basa en las importaciones. El carbonato de litio corresponde a la subpartida arancelaria 2836910000. En la Tabla 3.1, se presenta las importaciones históricas de los últimos 10 años.

Tabla 3.1

Importaciones de carbonato de litio, periodo 2009-2018 (ton/año)

AÑO	TON
2009	38.2
2010	75.7
2011	47.3
2012	54.5
2013	56.1
2014	18.8

2015	54.9
2016	68.3
2017	97.5
2018	185.0

Nota: elaborada por la autora en base a datos de Aduanas, (http://www.aduanet.gob.pe/cl-ad-itconsultadwh/ieITS01Alias?accion=consultar&CG_consulta=2)

A pesar que el precio en el 2009 hasta el 2015 estuvo en promedio 6000 dólares la tonelada, y que desde 2016 comienza aumentar hasta llegar a nivel de cerca de 12000 dólares la tonelada, el consumo casi se ha quintuplicado en este periodo de tiempo. El crecimiento acelerado se debería a un mayor consumo en la producción de vidrios y cerámicos, industrias que se vienen desarrollando exponencialmente en estos últimos años, incluso somos exportadores de cerámicas para la construcción.

Con los datos históricos se realizó una regresión lineal y se obtuvo una regresión de 0.3454, valor muy bajo para el ajuste de datos de este tipo. Empleando una regresión polinómica de segundo grado se obtuvo una regresión de 0.7404, valor que si es aceptable. Por lo tanto, se realizó una representación gráfica y se hizo la proyección para dentro de 10 años, es decir al 2028, obteniéndose una demanda proyectada de 920 toneladas de carbonato de litio por año. Los datos resumidos se presentan en la Figura 3.7.

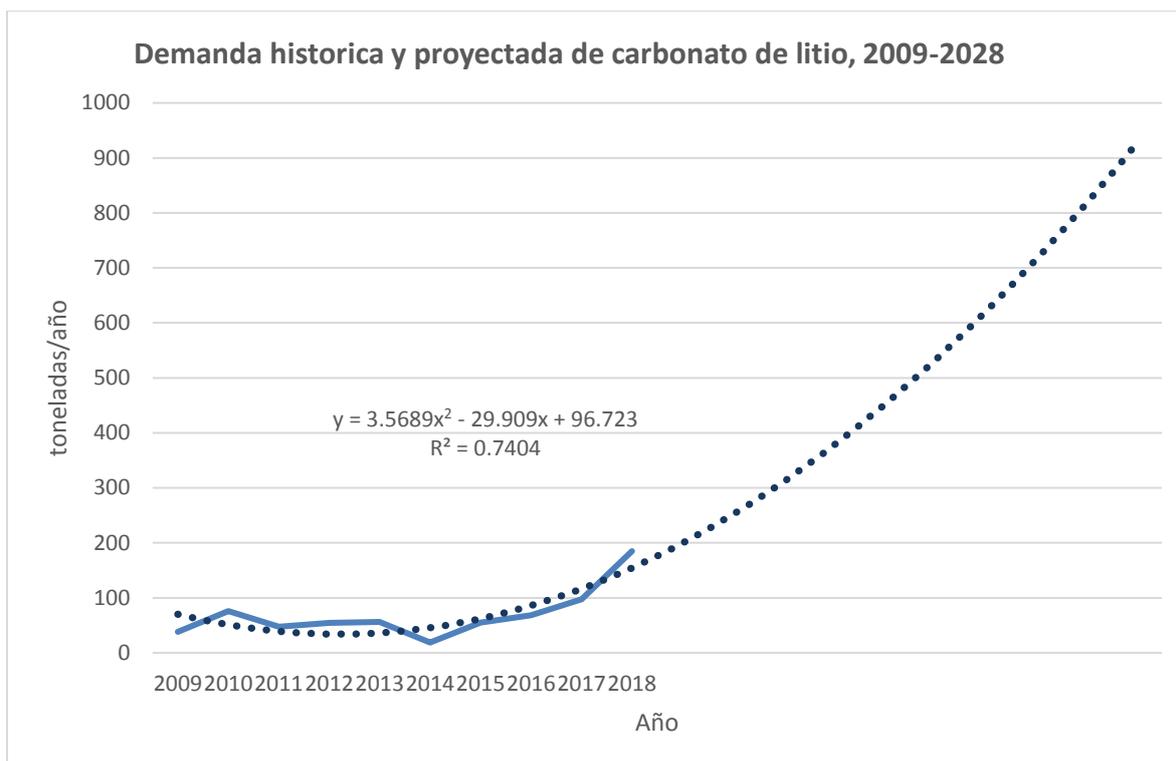


Figura 3.8: Demanda histórica y proyectada de carbonato de litio, ton/año. El crecimiento es polinómico; elaborada por la autora en base a los datos de CRU International Limited, 2018.

3.4.2.2. Oferta histórica y proyectada

Por ser un producto netamente de importación se considera que no existe oferta de este insumo, que, en nuestro país, se utiliza básicamente en las industrias de vidrio y cerámicas. Por lo tanto, con lo que se produciría en base al presente proyecto se cubrirá en parte la demanda proyectada para el 2028.

3.4.2.3. Demanda insatisfecha proyectada

Matemáticamente, la demanda insatisfecha proyectada (DIP) es igual a la demanda proyectada (DP) menos la oferta proyectada (OP). Teniendo en cuenta esa ecuación la DIP para el 2028 es igual a la DP para dicho año, es decir 92 años.

3.4.3. ANALISIS DE PRECIO

Respecto al precio histórico este ha sufrido una gran variación, desde cerca de 6000 dólares la tonelada. CRU Groups tiene registrado los precios del carbonato de litio en el periodo 2008 al 2017. Del 2008 al 2018 el precio se ha duplicado, llegando para los 2018s niveles de 12000 dólares la tonelada. La razón principal de este aumento es por la mayor demanda mundial de carbonato de litio para el uso de vehículos eléctricos. Ver Figura 3.8.

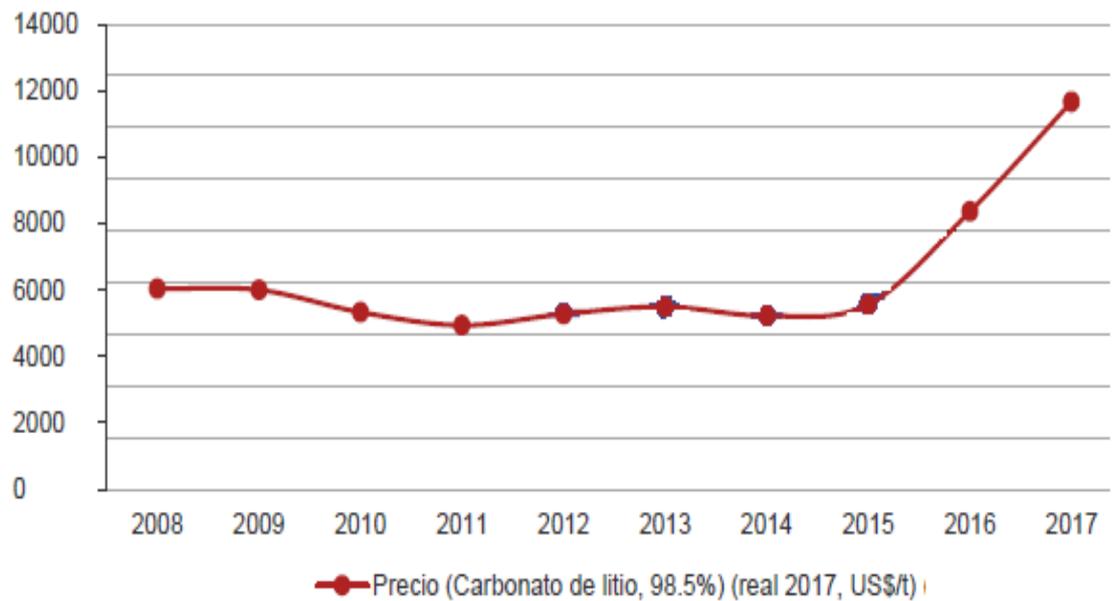


Figura 3.9: Precios históricos del carbonato de litio, 2008-2017. A partir del 2015 hay un aumento subido debido al mayor uso en autos eléctricos; recuperado de CRU International Limited, 2018.

Sin embargo, los precios a futuro se esperan que sean menores que el actual. La razón principal es que Chile y Argentina tienen planificado aumentar su producción. Por otro lado, Perú acaba de confirmar que tiene reservas de más de tres millones de toneladas de litio. Otra razón para la posible disminución del precio del carbonato de litio es que la industria de vehículos eléctricos necesitara más hidróxido de litio que carbonato de litio. Esta mayor oferta, hace que las proyecciones del precio del carbonato de litio tengan tendencia a disminuir. Este comportamiento se presenta en el Figura 3.9.

Teniendo en cuenta que el escenario futuro será más optimista, se considera que el precio para el 2028, y el cual se tomará en el desarrollo del presente proyecto será de 7000 dólares la tonelada.

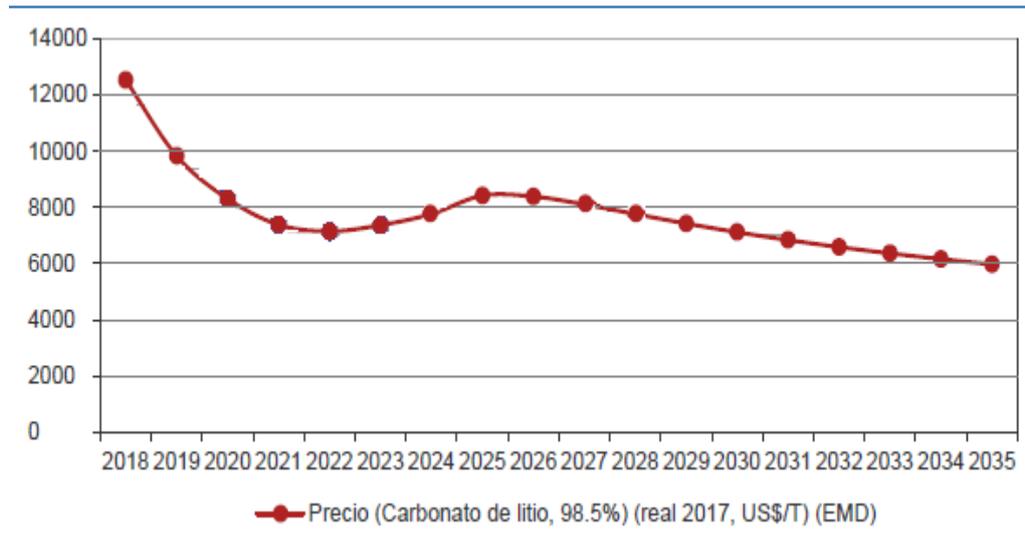


Figura 3.10: Proyecciones del precio del carbonato de litio, 2018-2035. Debido a una mayor oferta en los próximos años se prevé una disminución del precio; recuperado de CRU International Limited, 2018.

3.4.4. COMERCIALIZACION

El carbonato de litio es un insumo en la producción de vidrios y cerámicos. Teniendo en cuenta que los fabricantes de vidrios y cerámicos no pasan de una docena a nivel nacional, se considera que el sistema de comercialización será a través de un solo canal, es decir con venta directa y bajo contrato con los consumidores primarios. Ver Figura 3.10

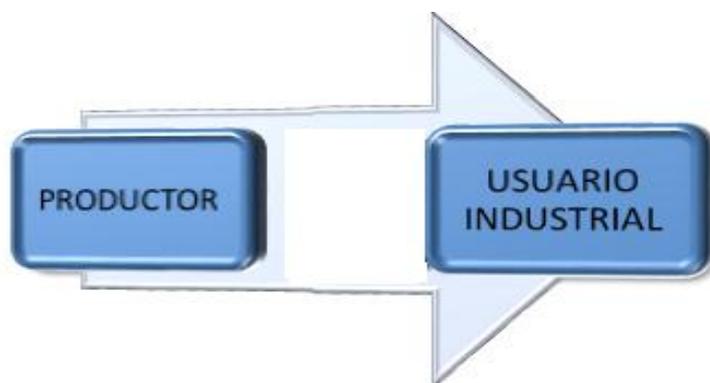


Figura 3.11: Comercialización del carbonato de litio. Por se un insumo la venta es directa al usuario final; elaborado por la autora.

3.5. TAMAÑO DE PLANTA

La demanda insatisfecha proyectada, no debe ser el único factor determinante de la capacidad de la planta; aun considerando solo un porcentaje de éste; sino que existen otros factores determinantes, los cuales son:

- A. Materia prima
- B. Demanda
- C. Capital
- D. Tecnología
- E. Financiamiento

La demanda insatisfecha proyectada a nivel nacional de carbonato de litio asciende a 92 ton/año, y a nivel mundial sobrepasa los dos millones de toneladas; lo cual significa que considerando solo 1% de este mercado, habría una posibilidad de colocar en el mercado internacional 20000 toneladas. Por lo tanto la demanda no es un factor limitante.

Sin embargo, la única planta industrial que genera salmueras residuales de la extracción de cloro en nuestro país es QUIMPAC S.A., quien elimina estas salmueras residuales a un ritmo de 296 toneladas por hora con una riqueza de Li de 100 ppm, con lo cual se asegura sólo un fuente de materia prima para producir 213.12 ton de litio al año o 1125 ton de carbonato de litio equivalente. Por lo tanto, la disponibilidad de materia prima es el factor limitante para determinar el tamaño de la planta industrial.

De acuerdo a la disponibilidad de salmueras residuales la capacidad máxima de la planta industrial se limita a 973.2 ton LCE por año. La operación es por ciclo, que en para este proceso dura cerca de un mes.

Combinando la demanda insatisfecha proyectada (920 ton LCE) y la máxima disponibilidad de materia prima (973.2 LCE) se considera que el tamaño definitivo del proyecto será 900 toneladas por año. Considerando una operación intermitente, en ciclos de 30 días, y con un total de 300 días al año se tendría una producción diaria de 3000 kg/día.

3.6. UBICACIÓN DE LA PLANTA

El objetivo del Estudio de la Localización de un proyecto es analizar las diferentes alternativas de ubicación espacial del proyecto. La localización tiene por

objetivo, analizar los diferentes lugares donde es posible ubicar el proyecto, buscando establecer un lugar que ofrece los máximos beneficios, los mejores costos, es decir en donde se obtenga la máxima ganancia, si es una empresa privada, o el mínimo costo unitario, si se trata de un proyecto social.

Los principales factores que influyen en la macro localización de una planta industrial son: Ubicación de los consumidores o usuarios; localización de la materia prima y demás

insumos; vías de comunicación y medios de transporte; infraestructura de servicios públicos; políticas, planes o programas de desarrollo; normas y regulaciones específicas; tendencias de desarrollo de la región; condiciones climáticas, ambientales, suelos; e interés de fuerzas sociales y comunitarias (Corrillo y Gutiérrez, 2016).

Teniendo en cuenta que la materia prima principal son los lodos residuales de la planta de cloro e hidróxido de sodio de QUIMPAC, las cuales normalmente se desechan directamente al mar, y por lo tanto no tiene valor comercial para la empresa, sería antieconómico pretender transportar esta materia prima en estado de lodo. Considerando que los lodos disponibles tienen un bajo contenido de litio (90 ppm) y el alto costo de transporte, se deduce que su traslado a otro lugar alejado de la planta de QUIMPAC no es recomendable, y que la futura planta industrial de producción de carbonato de litio a partir de estas salmueras residuales deberá estar en las cercanías a la planta de cloro e hidróxido de sodio de QUIMPAC.

La planta de cloro e hidróxido de sodio de QUIMPAC está ubicada en la Zona Industrial S/N, distrito de Paramonga, provincia de Barranca y departamento de Lima.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la disponibilidad de materia prima es el factor limitante de la ubicación de la planta se decide ubicarlo en las cercanías a la presente planta de cloro e hidróxido de sodio. Ver mapa.



Figura 3.12: Fotografía aérea de Paramonga. Se muestra la ubicación de empresa QUIMPAC S.A., obtenido de Google Maps.

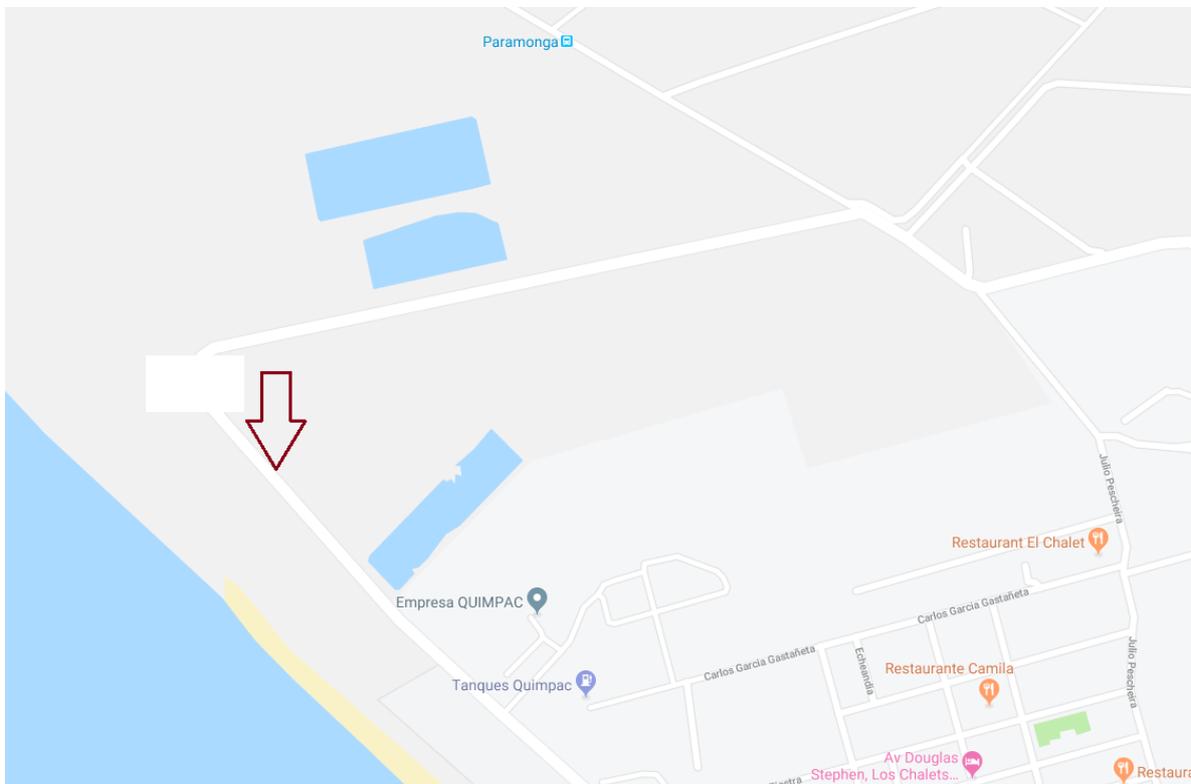


Figura 3.13: Ubicación de la futura planta de carbonato de litio. Estará en las cercanías de la empresa QUIMPAC S.A., elaborado por la autora en base a fotografía de Google Maps.

3.7. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MERCADO

Los datos estadísticos secundarios nos demuestran que existen una demanda nacional e internacional para el carbonato de litio. En nuestro país la demanda insatisfecha proyectada para el 2028 asciende a 920 toneladas, mientras que a nivel mundial las proyecciones para el 2035 será unos 2 millones de toneladas. Por lo tanto, el mercado para colocar este tipo de producto está asegurado.

La disponibilidad de materia prima es el factor limitante, tanto para el tamaño de la planta como para su ubicación. Realizando un análisis respectivo de la disponibilidad de materia prima se toma la decisión de instalar una planta de producción de 900 toneladas de carbonato de litio al año, y la ubicación será en la planta de álcali de la empresa QUIMPAC, en Paramonga.

IV. INGENIERIA DEL PROYECTO

4.1. PROCESOS PARA LA OBTENCION DE CARBONATO DE LITIO

En la actualidad, el litio se extrae de las salmueras de salares y de rocas pegmatíticas. Para ello se aplican solo dos procesos de extracción comercialmente:

a) Evaporación solar y concentración de salmueras extraídas de salares y la extracción posterior de carbonato o cloruro de litio.

b) Explotación de minerales pegmatíticos de litio (p.ej. espodumeno, lepidolita y petalita) y su conversión a carbonato o hidróxido de litio.

Sin embargo, ha habido iniciativas para desarrollar nuevas tecnologías con el objetivo de optimizar tiempos y costos de producción. Las diversas alternativas, tanto tradicionales como nuevas, en especial a lo que se refiere a la extracción de litio de salmueras, se discuten a continuación.

Uno de los métodos convencionales de extracción de litio es la evaporación de salmueras a partir de salares. Sin embargo, el tiempo de elaboración se extiende entre 12 y 24 meses. Por ello, ha habido varias iniciativas para encontrar tecnologías que puedan acortar el proceso productivo y aumentar el aprovechamiento de las salmueras.

4.1.1. EVAPORACION DE POZOS

El desarrollo del proceso de recuperación del litio a partir de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria, al constituir este proceso una fuente de litio con costos mucho más bajos en comparación a la obtención de litio a partir de los minerales pegmatíticos. La composición de las salmueras en cuanto a los niveles de contenidos de litio varía considerablemente, también en la presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos, lo cual requiere que cada salmuera sea tratada en forma particular, de acuerdo a su composición; por lo que se enuncia de manera general las etapas que se tienen dentro de este proceso. La salmuera es bombeada a los estanques de baja profundidad y de dimensiones considerables, en los cuáles, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales tales como cloruro de

potasio, cloruro de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, entre otras, así como de litio, las cuales presentan impurezas de magnesio, boro y sulfato.

Posteriormente, la salmuera concentrada de litio es transportada por camiones a las plantas de procesamiento, donde es sometida a procesos de purificación y precipitación a modo de obtener carbonato de litio, con una pureza cercana al 99,5%, aunque el mercado exige un mínimo de 99,1%, que puede comercializarse en cristales o se compacta para ser vendido en forma de gránulos. El carbonato de litio puede ser la materia prima para la producción de hidróxido de litio o bien de cloruro de litio de alta pureza que se emplea en la obtención de litio metálico por electrólisis de sales fundidas. Ver Figuras 4.1 y 4.2 (Secretaría de Economía, 2014)

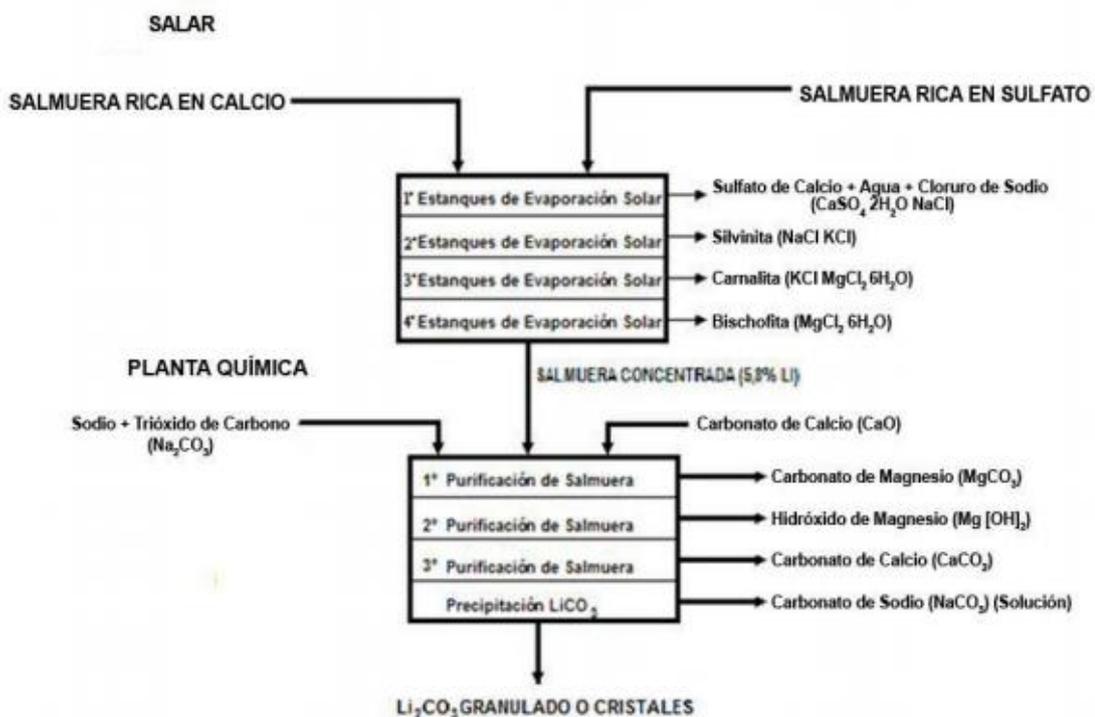
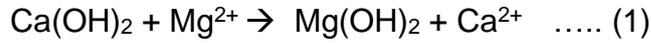


Figura 4.1: Proceso de producción de carbonato de litio a partir de la salmuera del Salar de Atacama, obtenido de la publicación de Sociedad Chilena del Litio (SCL).

Luego de la extracción de la salmuera desde el salar, la misma es bombeada a enormes piletas para la concentración del litio, llevando el contenido de litio desde un valor medio de 600 mg/L en los salares de la puna, hasta los 5000 -10000 mg/L. Consecuencia de la evaporación del agua, cristalizan en las piletas importantes cantidades de NaCl, luego cristaliza también KCl, junto con el NaCl y dependiendo de la composición

de la salmuera, otras sales, tal como el CaSO_4 . Previo a la precipitación del litio, es necesario reducir el contenido de calcio y magnesio, que se realiza por precipitación (Ecuaciones 1 y 2), para ello se emplea hidróxido de calcio, Carbonato de sodio, o Sulfato de Sodio. En el caso del boro, su remoción se logra por extracción con solventes o intercambio iónico.



La etapa de precipitación del carbonato de litio, se realiza en caliente (90°C), adicionando a la salmuera concentrada y purificada carbonato de sodio (Ecuación 3).



Una alternativa para la purificación del Li_2CO_3 precipitado es la disolución con CO_2 , que produce bicarbonato de litio (LiHCO_3), por filtración son separadas las impurezas insolubles y luego el bicarbonato se descompone térmicamente, produciendo carbonato de litio. Fig. 4.2



Figura 4.2: Piletos de evaporación en el Salar de Atacama, Chile. Muestra los salares de Puna, en Atacama, recuperado de Martínez y Vedia, 2013.

4.1.2. OSMOSIS INVERSA

Simbol Materials desarrolló un proceso para aprovechar una planta geotérmica de 50 MW cerca de Salton Sea, en el Valle Imperial de California, que bombea salmuera caliente de las profundidades para generar vapor que,

a su vez, mueve una turbina de generación eléctrica (Fig. 4.3). Actualmente, la planta reinyecta la salmuera nuevamente en el suelo después de que ésta produzca el vapor que alimenta las turbinas. Estas soluciones, sin embargo, contienen un 30% de sólidos disueltos, entre ellos de litio, manganeso y zinc. Con el objetivo de aprovechar los minerales contenidos en la salmuera, la salmuera aún caliente fluirá a través de un sistema de osmosis inversa el cual filtra las sales en cuestión de horas. Luego se purifica creando un carbonato de litio de alta pureza de hasta 99.999% y capacidades de hasta 20000 toneladas de LCE (Orrego, 2013).

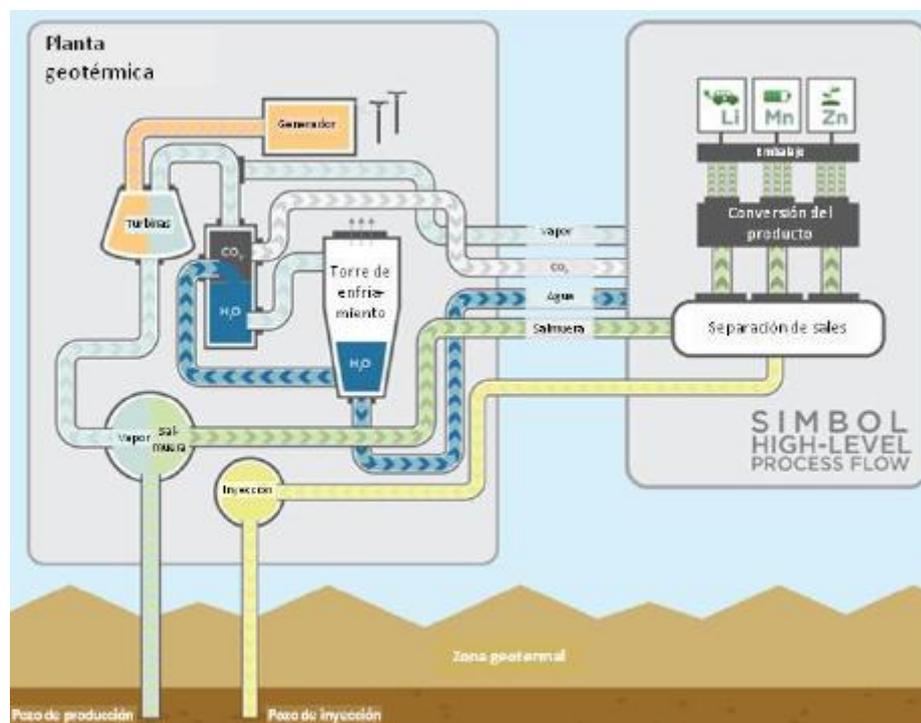


Figura 4.3: flujo de proceso de la planta de osmosis inversa de litio. La fuente de energía es una planta geotérmica; recuperado de Simbol Materials, 2013.

4.1.3. EXTRACCION POR SOLVENTE

Bateman Lithium Projects, una división de Bateman Litwin Group, ha desarrollado y patentado el proceso LiSx™ en el cual se obtiene el litio a través de la extracción por solventes desde salmueras o soluciones posteriores a la lixiviación de minerales (Fig. 4.4). Las soluciones son mezcladas inicialmente con un solvente orgánico en el cual se disuelven los iones de litio. El solvente orgánico luego es separado de la solución acuosa y con la adición de un fuerte ácido se elimina el litio produciendo cloruro de

litio. El solvente limpio puede ser reutilizado en el proceso. Mediante este método se pueden extraer directamente las tres sales básicas de litio: cloruro, carbonato e hidróxido.

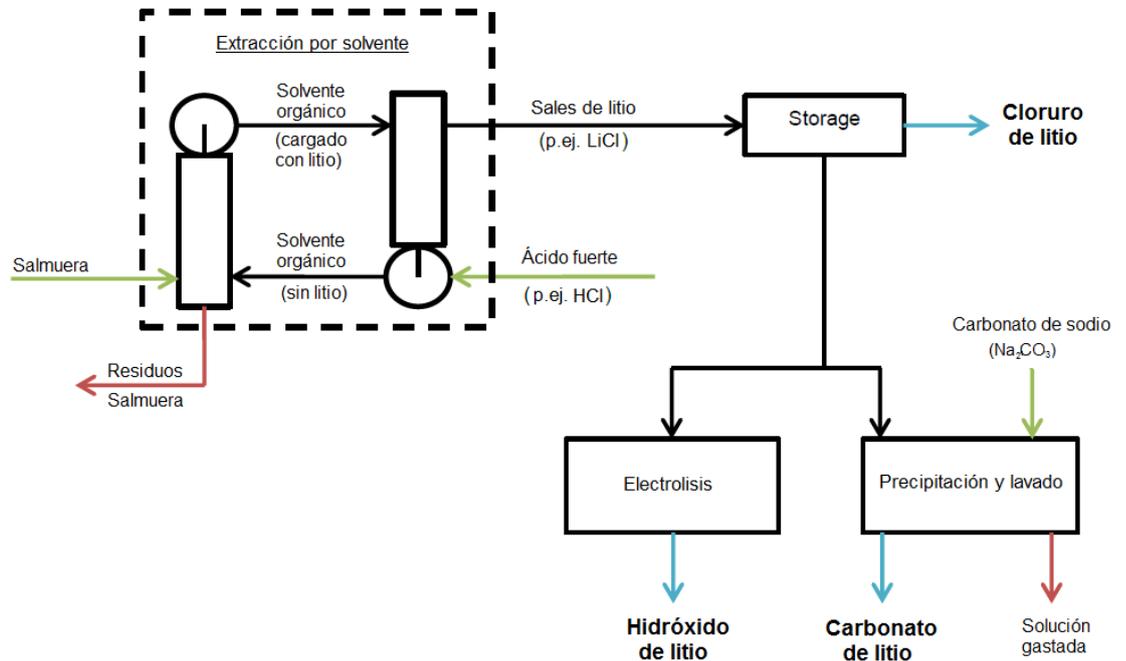


Figura 4.4: Proceso de extracción por solvente de litio LiSx™. El solvente se vuelve a recuperar y el solvente es específico para recuperar sales de litio; desarrollado por Bateman Lithium

4.2. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ADECUADA

Actualmente, el método de extracción más competitivo es la evaporación solar ya que no requiere mayores instalaciones de planta y utiliza la energía del sol. Los únicos costos de producción a partir de las salmueras son por el uso de reactivos químicos (Na₂CO₃ y otros), energía y combustibles durante el proceso de purificación y precipitación en la planta química. Por ello este tipo de operaciones actualmente tiene el menor costo productivo, el cual varía entre 2000 a 3000 dólares la tonelada de carbonato de litio. El punto más negativo es la demora para cosechar el litio es entre 12 y 24 meses según los componentes del salar.

En cambio, las otras tecnologías, osmosis inversa y extracción por solvente, solo demoran horas. Además, tienen el beneficio de que no dependen del clima. Aun así, requerirán de instalaciones mayores de planta que la evaporación solar y tendrán un mayor consumo de energía eléctrica. La desventaja principal es que depende de la economía de escala, es decir es rentable para grandes producciones que superan las 50000 toneladas de carbonato de litio al año. Ver Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Comparación competitiva de tecnologías extractivas de litio

	Método	Ventajas	Desventajas
Salmueras	Evaporación solar	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de grandes instalaciones de planta, ni de equipamiento mayor. • No requiere proceso de conminución. • Bajo costo operacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo requerido para cosechar el litio es entre 12 y 24 meses. • Evaporación depende del clima (evaporación vs. precipitaciones). • Blevada concentración de Mg complica extracción y requiere mayor consumo de reactivos. • Residuos salinos con poco valor (p.ej. sales impuras de Na y Mg).
	Osmosis inversa	<ul style="list-style-type: none"> • Se extrae el litio dentro de horas reduciendo considerablemente el tiempo de operación frente a la evaporación solar en los salares. • No requiere evaporación solar y por ende no depende del clima. • Se aprovecha sinergia con planta geotérmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de producción de litio depende de la extracción de salmueras en la planta de energía geotérmica. • Producción a escala comercial recién a partir de 2014.
	Extracción por solvente	<ul style="list-style-type: none"> • Se extrae el litio dentro de horas reduciendo considerablemente el tiempo de operación frente a la evaporación solar en los salares. • No requiere evaporación solar y por ende no depende del clima. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de solventes y reactivos químicos. • Consumo de energía eléctrica. • Requiere instalaciones de planta. • Aún no probado a escala mayor/comercial.

Nota: obtenida de Velásquez y Cabrera, 2018.

De lo expuesto, por ser un sistema más simple, y en especial por el menor costo de producción se decide por el método de evaporación solar.

4.3. DESCRIPCION DETALLADA DEL PROCESO

La obtención de litio desde salmueras naturales es una creciente e importante fuente de litio y representa actualmente cerca del 80% de litio producido en el mundo como carbonato, cloruro e hidróxido de litio. El proceso se describe en base al diagrama de flujo de la Figura 4.5.

Inicialmente las salmueras son previamente concentradas por evaporación solar para aumentar el contenido de litio y además precipitar otras sales que pueden ser comerciales, como KCl, NaCl, K₂SO₄, Na₂SO₄, etc., así como otras sales dobles como silvinita, carnalita, bishoffita, schoenita, kainita, glasserita, glauberita, eponita, singerita, etc. Las salmueras más abundantes son las que tienen mayoritariamente sulfatos y cloruros, particularmente estas últimas. En este caso particular del uso de salmueras del proceso de obtención de cloro e hidróxido de

sodio, contiene NaCl en muy pequeñas cantidades, pues este fue la materia prima para obtener dichos reactivos.

Las pozas o piscinas de evaporación tienen una profundidad de 1.5 m y grandes dimensiones (600 x 800 m, o mayores) donde comienza la cristalización secuencial de sales. Como generalmente las salmueras de cloruros están saturadas en NaCl, la primera sal que precipita es la halita (NaCl) o la halita y sulfato de calcio hidratado, si hubiera sulfatos presentes. La precipitación continua con la silvinita (KCl-NaCl) y luego silvita (KCl). Esta última es un producto de uso industrial (fertilizante) de tal forma que hacia el término de la precipitación de silvinita se transfiere la salmuera a otra piscina y recupera la sal precipitada de KCl + silvinita para así obtener KCl por flotación diferencial, volviendo luego a proseguir la evaporación de la salmuera para cristalizar seguidamente la carnalita que es un cloruro doble de potasio y magnesio ($\text{KCl-MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) y luego la bishoffita, ($\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), cloruro de magnesio hidratado.

En esta etapa, el litio se ha incrementado hasta cerca de 4.5% con un contenido de magnesio cercano a 4%. Debido a que para la posterior purificación química de la salmuera requiere tener entre 5.5 a 6% de litio, al proseguir la evaporación de la salmuera precipita el cloruro doble de Li-Mg llamado carnalita de litio ($\text{LiCl-MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) lo que disminuye el rendimiento de la operación, sin embargo, es posible lixiviar la carnalita de litio con salmuera fresca para recuperar parte del litio contenido.

La salmuera concentrada en litio contiene entre 5.5 a 6.0% de litio, equivalente a 35 a 40% de LiCl y se purifica en una o dos etapas para eliminar el resto de otros elementos, esencialmente el magnesio y calcio remanentes. La precipitación se hace en dos etapas: primero con carbonato de sodio (ceniza de soda) y luego con hidróxido de calcio (lechada de cal).

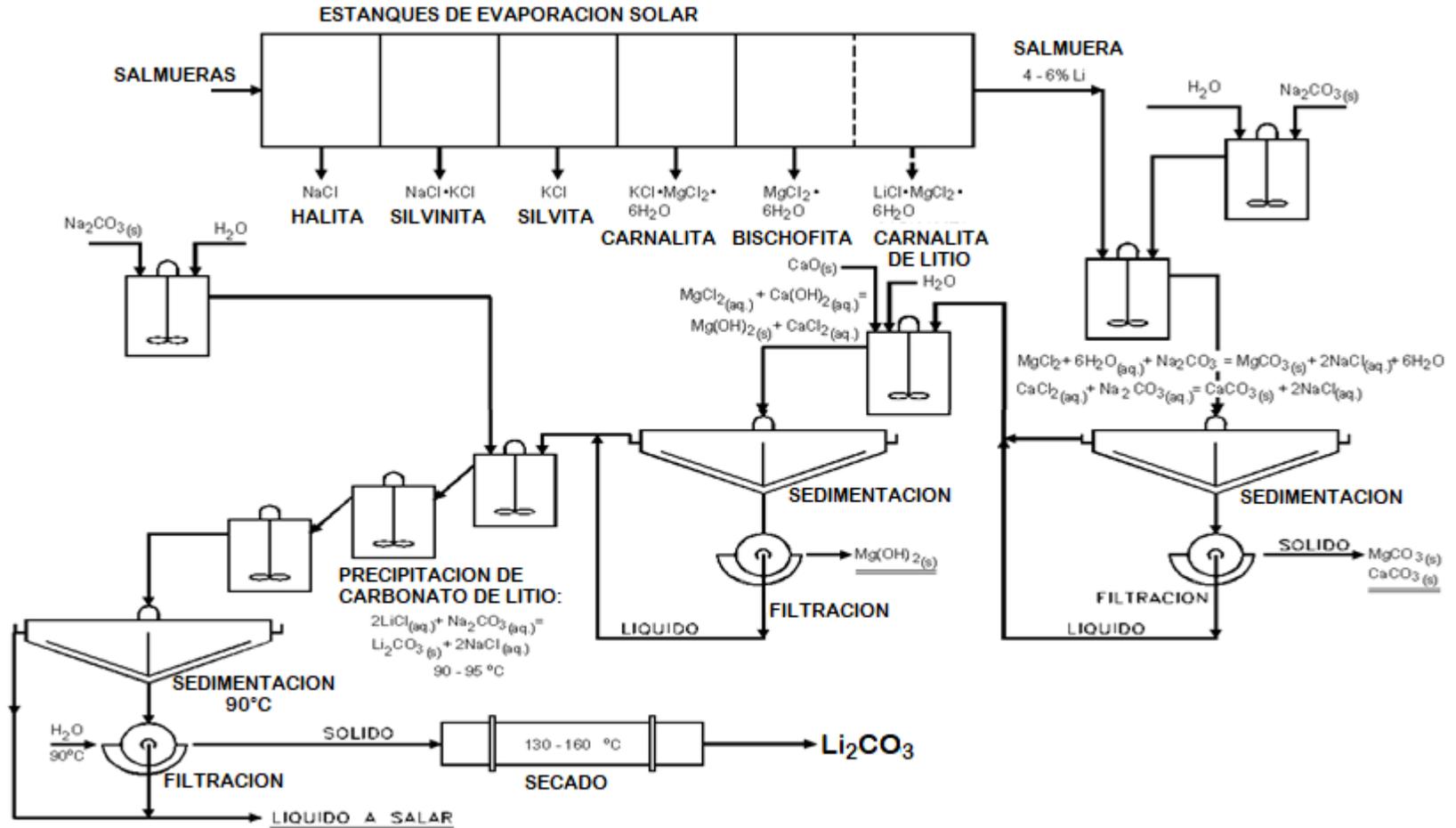
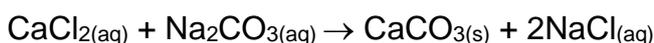
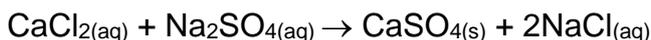
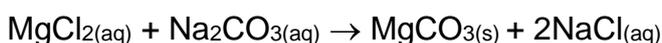


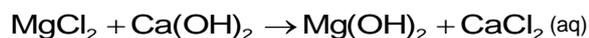
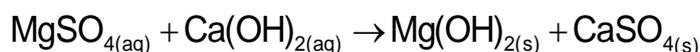
Figura 4.5: Diagrama de Flujo del Proceso de Carbonato de Litio a partir de Salmueras. Elaborada por la autora en base a la planta de producción de Litio por tratamiento químico de salmueras del Salar de Uyuni, Potosí, Bolivia.

Sulfato presente en la forma de sulfato de sodio también precipita como sulfato de calcio. En esta etapa, se introduce al circuito del proceso agua fresca presente en la solución de 23-24% de Na₂CO₃, de manera que ahora el sistema es acuoso y no anhidro (sin agua libre). Las reacciones que ocurren son:

Primera etapa:

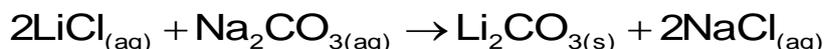


Segunda etapa: Se precipita el resto del magnesio residual con Ca(OH)₂



El carbonato de sodio que se agrega en la primera etapa se hace para evitar una excesiva cantidad de precipitado de hidróxido de magnesio en la 2^a etapa, el cual es muy difícil de separar de la salmuera por ser excesivamente fino (submicrónico) en tanto que también contribuye a precipitar el cloruro de calcio, como sulfato de calcio (yeso) ya que normalmente la cantidad de sulfato de sodio presente en la salmuera no es suficientemente para precipitar todo el cloruro de calcio a sulfato de calcio.

La salmuera purificada, previamente filtrada para separar el sólido suspendido, se trata finalmente con carbonato de sodio en caliente (90-95°C) para precipitar el litio según la reacción:



Como se obtuvo anteriormente el carbonato de litio muestra una solubilidad inversa con la temperatura, se requiere mantener la salmuera sobre 90°C para evitar excesiva disolución del carbonato. El carbonato de litio precipitado se sedimenta y filtra en caliente y luego se lava extensamente con agua caliente desmineralizada en el filtro. El queque de carbonato se seca a 130-160°C en un secador rotativo indirecto y envasa, protegido de la humedad, ya que es higroscópico. El producto final tiene sobre 99% de Li₂CO₃ y es la materia prima para la producción de hidróxido de litio o bien

de cloruro de litio de alta pureza que se emplea en la obtención de litio metálico por electrolisis de sales fundidas (Collazo, 2017).

4.4. BALANCE DE MASA DEL PROCESO

El balance de masa se ha realizado empleando el factor de escalamiento, tomando como base el balance de masa de la Planta de Producción de Litio por tratamiento químico de salmueras del Salar de Uyuni, Potosí, Bolivia. El balance se base en la producción de carbonato de litio al 99.2% en peso, en forma de cristales finos, con una humedad máxima de 0.5%.

Se trabajará 360 días al año, teniendo en cuenta que el proceso global dura 12 meses, se tiene que instalar suficientes pozas para darle continuidad al proceso. Los cálculos se basan en un ciclo de un mes. Los cálculos se presentan en el Apéndice. El diagrama de bloques se presenta en la Figura 4.6.

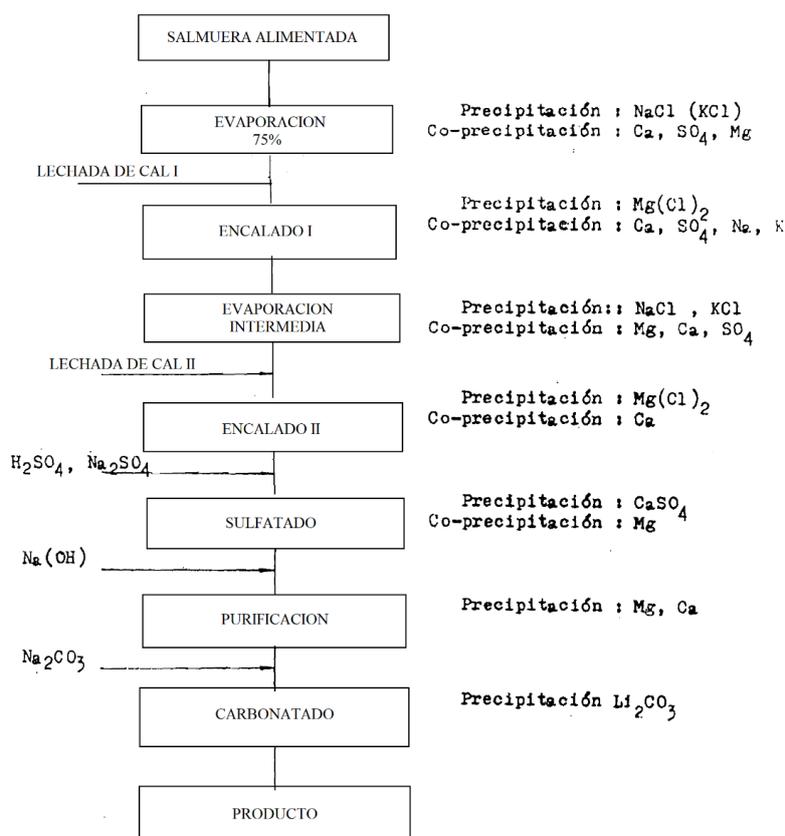


Figura 4.6: Diagrama de bloques de producción de carbonato de litio a partir de salmueras residuales. Se indica los reactivos que se van a utilizar, elaborado por la autora.

Las condiciones principales del proceso son las siguientes:

Días de operación al año: 360 días

Producción anual: 900 toneladas carbonato de litio al 99.2%

Alimentación de salmuera residual: 241.733 ton/hr

Alimentación de salmuera residual: 5801.6 ton/día

Contenido de Li^+ en la salmuera residual: 100 mg/kg

Contenido de LCE en la salmuera residual: 532 mg/kg

Rendimiento global: 81%

Reactivos que se deben usar para un año de operación:

CaO 431074.05 kg

Na_2SO_4 8178.48 kg

Na_2CO_3 134036.2 kg

H_2SO_4 113.59 kg

NaOH 227.18 kg

4.5. EQUIPOS PRINCIPALES DEL PROCESO

En la Figura 4.7 se presentan una lista de las máquinas y equipos principales del proceso de acuerdo con las etapas del proceso. De acuerdo al proceso se tiene en orden ascendente las operaciones siguientes:

- Transporte de fluidos
- Evaporación
- Agitación
- Encalado I
- Encalado II
- Sulfatado
- Carbonatado
- Filtración
- Secado
- Envasado

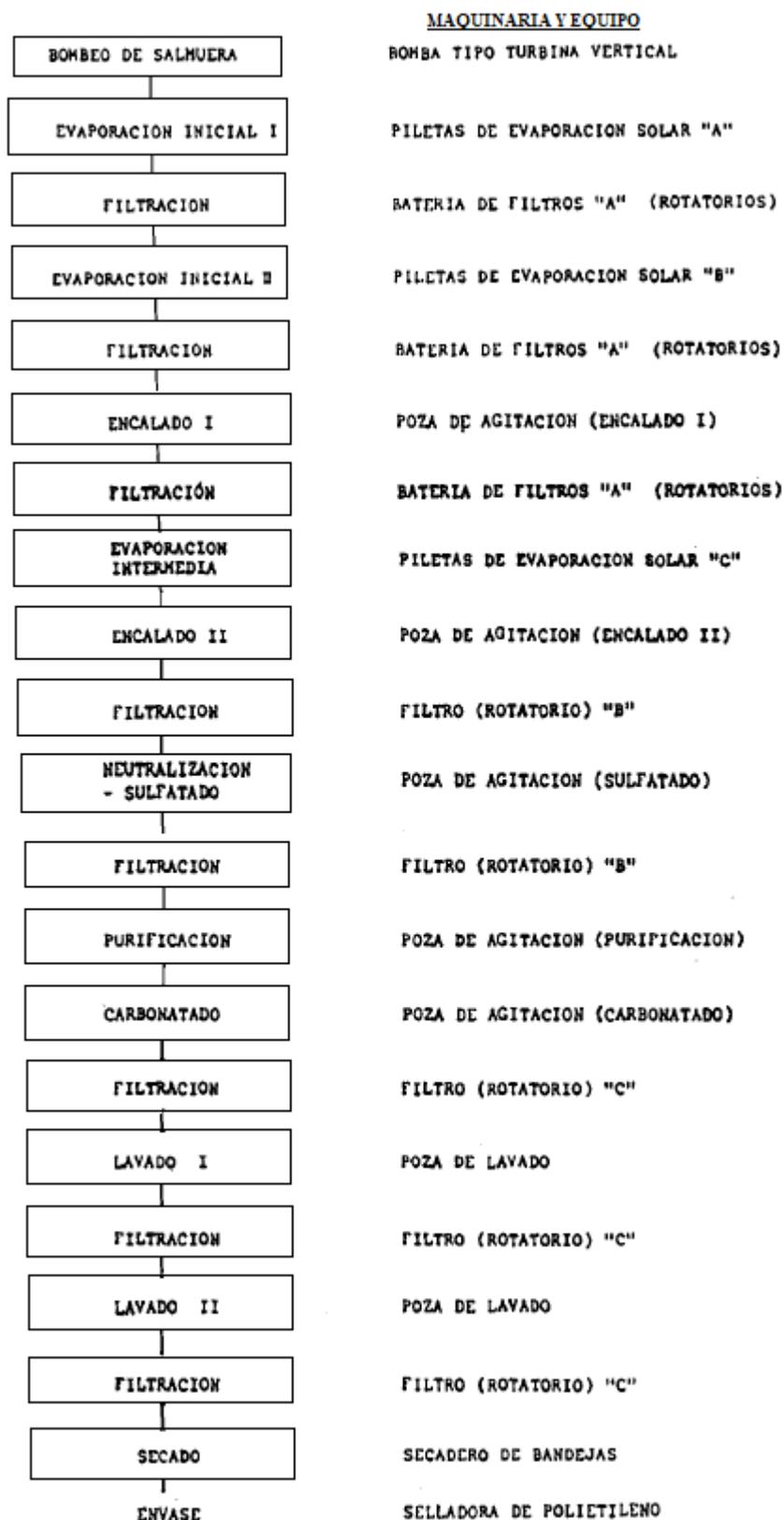


Figura 4.7: Maquinaria y equipos para la obtención de carbonato de litio a partir de salmueras residuales; elaborado por la autora

4.6. DISTRIBUCION DE LA PLANTA

La Figura 4.8 muestra, de acuerdo al uso de equipo programado, la distribución de maquinaria en planta. Se ha diseñado un modelo tal, que no existen interferencias entre el flujo de operaciones de las cuatro series propuestas: S_A , S_B , S_C , S_D .

En esta distribución se muestra que, por ejemplo, la serie de proceso S_A comienza el ciclo en la evaporación inicial I por los extremos de este grupo; ello evita la interferencia de las cuatro piletas iniciales en la batería de filtros A. Secuencialmente conforme avanza el proceso del ciclo en el tiempo, se van adjuntando a esta operación las tres series restantes (centrales) en similar forma.

Las líneas punteadas indican la dirección que sigue en el proceso de serie A, También se muestra cómo, tras la evaporación inicial 1, la salmuera pasa a la batería de filtros A, de aquí es transportada mediante bombeo a las piletas B y de allí devuelta, tras la operación, a los mismos filtros. El filtrado pasa a la poza de agitación de Encalado I y, filtrada la salmuera, nuevamente es bombeada (con la misma bomba) a la serie de piletas C, de Evaporación Intermedia. Concluida esta operación se continúa el proceso conforme el flujograma estudiado.

La forma modular de la planta hace que con solo añadir uno o dos grupos de piletas y programando el uso de filtros, agitadores y demás maquinaria en el tiempo, pueda ampliarse la producción sin una inversión grande en equipo.

La secuencia que siguen las demás series (S_A' , S_B , S_C), es similar a la mostrada en la figura para la serie A. Se ha logrado de este modo una correcta distribución que minimiza los tiempos de recorrido en planta, evitando en todo momento las posibles obstrucciones dado que cuatro series utilizan la misma maquinaria.

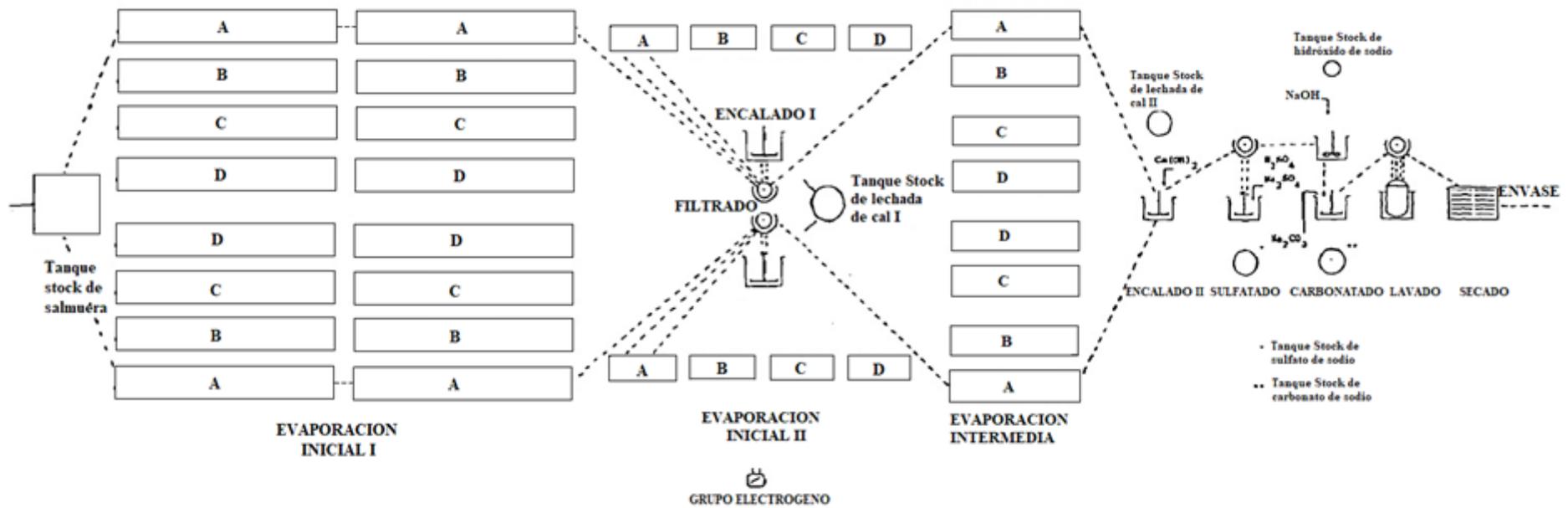


Figura 4.8: Distribución de la planta industrial de obtención de carbonato de litio a partir de salmuera residual. Elaboración propia, basada en la planta de Producción de Litio por tratamiento químico de salmueras del Salar de Uyuni, Potosí, Bolivia.

4.7. CONSIDERACIONES AMBIENTALES

La materia prima para este proceso son las salmueras residuales de la planta de álcali de QUIMPAC, que en la actualidad se vierten al mar a un ritmo de 296 ton/hr, de las cuales se van a utilizar para el proyecto 241.733 ton/hr. Desde este punto de vista, la reutilización de un líquido residual para obtener un producto valioso hace que el presente proceso sea amigable con el medioambiente y su impacto será el mismo que el actual que realiza la empresa QUIMPAC.

Algunos profesionales del área medioambiental sugieren que el uso intensivo de agua de pozo necesario para realizar todos los procesos de lavado, ocasionaría una disminución de la disponibilidad de agua para las poblaciones cercanas, debido a que el nivel freático de las fuentes de agua disminuiría, ocasionando escasez de agua subterránea.

Sin embargo, localizando la planta industrial lo más cercano al mar y lejos de poblaciones aledañas, el impacto será mínimo, porque el nivel freático se podría mantener estable por las corrientes internas de agua de mar. Por este motivo, se considera que este impacto ambiental sobre poblaciones aledañas será mínimo.

Respecto al uso de algunos reactivos necesarios para el proceso, como sulfato de sodio, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, se debe considerar que estos representarían un peligro inminente para el medio ambiente en caso de derrames. Por lo tanto, se considera que estos reactivos deberán ser almacenados y manejados en forma segura para prevenir cualquier derrame de estos al medioambiente.

En conclusión, se considera que el presente proyecto no ocasionara ningún impacto ambiental adicional por el uso de un líquido residual como materia prima para la obtención de un producto valioso como es el carbonato de litio.

V. EVALUACION ECONOMICA

Durante el presente capítulo, se hace una descripción detallada del Balance Económico del proyecto, donde se evalúa la factibilidad económica del mismo.

La evaluación económica del presente proyecto obedece a la dinámica seguida por la mayoría de proyectos de Plantas de procesos de industrias alimentarias. Según esto, se ha considerado dos aspectos importantes como la “Estimación de la inversión total y Estimación del costo total de producción”, para finalmente determinar la rentabilidad del proyecto.

Para las estimaciones se han usado los índices de Peters & Timmerhaus, indicados en el apéndice.

5.1 ESTIMACION DE INVERSION TOTAL

La inversión total es el capital necesario para la ejecución del proyecto y se estima en **\$ 5,148,481.00 dólares**.

La inversión total está constituida por el capital fijo total que asciende **\$4,313,400.00**; y un capital de trabajo u operación estimada en **\$ 835,081.00**.

5.1.1 CAPITAL FIJO TOTAL

- COSTO FIJO

El costo fijo es de **\$ 4,313,400.00** y está formado por la suma de los costos directos y los costos indirectos de la planta.

5.1.2 COSTO DIRECTO O FÍSICO

EL costo directo es **\$3,740,100.00** y está constituido por:

- A. Costo total del equipo de proceso instalado.
- B. Costo total del equipo auxiliar de proceso instalado.
- C. Costo total de tuberías y accesorios.
- D. Costo total de instrumentación.
- E. Costo de instalaciones eléctricas.
- F. Costo de edificios.
- G. Costo de terreno y mejoras.
- H. Costo de servicios

5.1.2.1 COSTOS INDIRECTOS

El costo indirecto es **\$573,300.00** y está constituido por:

- I. Costo de ingeniería y supervisión.
- J. Costos de construcción
- K. Costos de seguros e impuestos de la construcción
- L. Costos de honorarios para contratistas.
- M. Costos Imprevistos.
- N. Costos Indirectos Totales
- O. Inversión del Capital Fijo

A continuación, detallamos los costos directos e indirectos:

A. COSTO DE EQUIPO PRINCIPAL Y AUXILIAR DE PROCESO

La estimación del costo de los equipos se realiza sobre la base de: Capacidad, características de diseño, tipo de material e información disponible sobre precios de los equipos para el año 2014 según la fuente Matches.

En este caso particular la mayoría de equipos son pozas de evaporación que se pueden construir con geomembranas y otros materiales de bajo costo

El costo CIF del equipo principal y auxiliar a precios actualizados al 2018 asciende a \$2,600,000.00 dólares, y colocado en planta asciende a \$2,730,000.00 **dólares**. Con este último valor y utilizando los índices de Peter Timmerhaus y West, se obtiene los distintos valores para calcular la inversión total del proyecto, que se resume en la Tabla 5.1.

B. COSTO DE INSTALACION DE TODOS LOS EQUIPOS:

Por ser la cantidad mínima de equipos que deben instalarse y algunos de los equipos son modulares se considera

10% del costo del equipo puesto en la planta, es decir:
\$273,000.00.

C. INSTRUMENTACION Y CONTROL

Este renglón ha sido estimado según los costos unitarios de los principales equipos a usar en automatización de la planta. Los sistemas de bombeo para el trasiego de soluciones purificadas se considera que serán automatizadas. El reto de la planta es semiautomatizada. 5% del costo del equipo total. El costo es \$136,500.00.

D. INSTALACIONES ELECTRICAS

Se estima de acuerdo a las recomendaciones dadas por Peter Timmerhaus y West, siendo el 3 % del costo de compra total del equipo, se obtuvo un valor de \$81,900.00.

E. ESTRUCTURAS DE LA PLANTA

El costo de estructuras incluye los costos de cimentación para el área de proceso a precios locales. Realmente el costo es mínimo puesto que se instalará dentro de los ambientes de la facultad. 4% del costo del equipo total. El costo asciende a \$109,200.00 dólares.

F. TERRENOS Y MEJORAS

El costo del terreno se ha estimado teniendo en cuenta el lugar y ubicación de la planta, comprende los costos de: preparación del terreno, asfaltado, veredas, sardineles y cercado de la planta. La planta se instalará en su mayor parte a cielo abierto, y en su mayoría el espacio estará ocupada por las 32 pozas de evaporación. Por tal motivo se considera el 2% del costo del equipo total. El costo considerado es de solo \$54,600.00

G. SERVICIOS

Incluye los gastos de instalaciones de agua, vapor, aire comprimido. En este caso el gasto corresponde a sistemas de bombeo de agua subterránea, aire para los sistemas de control y vapor para el calentamiento del reactor de carbonatación y el calentamiento del aire para el secado. Corresponde al 8% del costo del equipo total. El costo es de **\$218,400.00**.

H. COSTOS DIRECTOS TOTALES

Es la suma del costo del equipo de la planta, más los costos de instalación, control e instrumentación, tubería y accesorios, sistema eléctrico, edificios, mejora de terrenos, servicios. Alcanza un valor de \$3, 740,100.00

I. INGENIERIA Y SUPERVISION

Por ser un sistema modular, se considera el 5% del costo total de la planta. La mayor cantidad de equipos serán construidos en el mismo lugar. El valor asciende a **\$136,500.00**.

J. COSTO DE LA CONSTRUCCION

Se considera 8% del costo total de la planta. Asciende a **\$218,400.00**.

K. COSTO DE SEGUROS E IMPUESTOS DE LA CONSTRUCCION:

Por estar construido a mar abierto, en especial los pozos de evaporación, se considera solo el 4% del costo del todo el equipo. Asciende a **\$54,600.00**.

L. HONORARIOS PARA CONTRATISTAS

Este renglón considera el 4% del costo físico de la planta, **\$109,200.00**.

M. IMPREVISTOS

Se ha considerado **\$54,600**, con la finalidad de subsanar cualquier eventualidad que demande el gasto y que no se haya

considerado dentro del costo de construcción de la planta. Se estima como el 2% del costo total de la planta.

N. COSTOS INDIRECTOS TOTALES

Es la suma de los costos de ingeniería y supervisión, gastos de construcción, seguros e impuestos, honorarios para contratistas y gastos imprevistos. Alcanza la suma de **\$573,300.00**.

O. INVERSION DE CAPITAL FIJO

Es la suma de los costos directos totales y los costos indirectos totales. Llega a **\$4,313,400.00.39**

5.1.3 CAPITAL DE PUESTA EN MARCHA O CAPITAL DE TRABAJO

Este renglón abarca los gastos efectuados para realizar pruebas y reajustes del equipo del proceso antes de la operación comercial de la planta. El periodo de prueba se ajusta a nivel de planta piloto. Un ciclo de producción demora aproximadamente un mes. Se calculó un capital de **\$835,081.00**

Se considera que se va a procesar en forma intermitente durante 360 días al año, es decir 8640 horas al año

A. Inventario de materia prima: se considera un mes de materia a los precios de puesto en planta. Alcanza la suma de **\$5,081.00**.

B. Inventario de materia en proceso: se considera un día de operación. En promedio es **\$5,000.00**

C. Inventario de producto en almacén: el producto se vende dentro de la misma planta, por ese motivo solo se considera costo para una semana de producción. El valor alcanzado es **\$150,000.00**.

D. Cuentas por cobrar: equivale a un mes de ventas. Pero por los motivos expuestos en el ítem anterior llega a **\$525,000.00**.

E. Disponibilidad en caja: sirve para pagar salarios, suministros e imprevisto. **Se considera un mes de producción. Ascende a \$150,000.00.**

: LA INVERSION TOTAL: es la suma de capital fijo más el capital de trabajo, y alcanza el valor de \$5,148,481.00.

Tabla 5.1
Plan Global de Inversiones

1. ACTIVOS FIJOS		
1.1. Costos directos		
Costo de equipos en planta	\$2,730,000.00	\$3,740,100.00
Costos de instalación	\$273,000.00	
Costo de instrumentación y control	\$136,500.00	
Costo de sistema eléctrico	\$81,900.00	
Costo de edificios	\$109,200.00	
Costo de mejoras de terrenos	\$54,600.00	
Costo de servicios	\$218,400.00	
Total costos directos		
1.2. Costos indirectos		
Costos de ingeniería y supervisión	\$136,500.00	\$573,300.00
Costo de la construcción	\$218,400.00	
Costos de seguros e impuestos a la construcción	\$54,600.00.	
Costo de honorarios para los contratistas	\$109,200.00	
Costo de imprevistos	\$54,600.00	
Total costos indirectos		
2. CAPITAL DE TRABAJO		
Inventario de materia prima	\$5,081.00	\$835,081.00
Inventario de materia prima en proceso	\$5,000.00	
Inventario de producto en almacén	\$150,000.00	
Cuentas por cobrar	\$525,000.00	
Disponibilidad de caja	\$150,000.00	
Total capital de trabajo		
INVERSIÓN TOTAL DE PROYECTO		\$5,148,481.00

Nota: Elaboración Propia

5.1.4 ESTIMACION DEL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

El costo total de fabricación está constituido por el costo de manufactura y los gastos generales. El costo total anual es de **\$2,245,932.00**. El resumen de la estima del costo de producción y del costo unitario se muestra en la Tabla 5.2.

5.1.4.1 COSTO DE MANUFACTURA

Este renglón incluye:

- A.** Costo directo de manufactura.
- B.** Costos indirectos.
- C.** Costos fijos.

Detallamos a continuación cada costo:

A. COSTO DIRECTO DE MANUFACTURA

Constituido por los costos de materia prima, mano de obra, supervisión mantenimiento y reparación de la planta, suministros para las operaciones y servicios auxiliares. El costo asciende a **\$982,121.00**

- MATERIA PRIMA

La materia prima principal para la obtención de carbonato de litio se considera sin costo. La razón principal es que actualmente la salmuera residual la empresa QUIMPAC S.A., los envía al mar como desecho. Los otros costos de insumos corresponden a productos químicos de bajo costo comercial, como la cal, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, carbonato de sodio. Para la capacidad diseñada el costo total asciende a **\$60,966.00**.

- MANO DE OBRA

La operación de la planta es intensiva en mano de obra por se un proceso intermitente y por la cantidad de pozos de evaporación que se deben procesar y mantener. Se requiere de 25 obreros para 3 turno de 14 horas. Este número de operarios ha sido estimado por el método Wessel, el cual se

basa en el número de pasos principales del proceso, capacidad de producción y el grado de automatización.

El costo de mano de obra por año asciende a **\$525,000.00**.

- **SUPERVISION E INGENIERIA**

En este renglón se considera todo el personal comprometido con la supervisión directa de las operaciones de producción de las distintas instalaciones, es el 20% del costo de la mano de obra es de **\$105,000.00**.

- **MANTENIMIENTO Y REPARACIONES**

Están comprendidos los gastos que se requieren para mantener la planta en óptimas condiciones de operación, y se estima como el 5% del capital fijo que es **\$215,670.00**

- **AUXILIARES Y SERVICIOS**

Se considera los gastos por conceptos de lubricantes, pintura, materiales de limpieza, agua, energía eléctrica, etc. para su estimación se ha considerado el 15% del costo anual de mantenimiento, cuyo costo es de **\$32,350.00**.

Suministros de operación: 20% del costo de mantenimiento asciende a **\$43,134.00**

B. COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN

Comprende los gastos de laboratorio, cargas a la planilla y los gastos generales de la planta. Asciende a **\$320,250.00**

- **CARGAS A LA PLANILLA**

Constituye todos los gastos por concepto de beneficios sociales. Se ha considerado como el 21% (**\$110,250.00**) de la suma de los Costos de mano de obra y supervisión.

- **LABORATORIO**

Comprende los costos de los ensayos de laboratorio para el control de las operaciones y el control de calidad del producto, así como también las remuneraciones por supervisión.

Costo: 20% del costo de mano de obra. Ascende a **\$105,000.00.**

- **GASTOS GENERALES DE LA PLANTA**

Lo conforman gastos destinados a satisfacer servicios, tales como: asistencia médica, protección de la planta, limpieza, vigilancia, servicios recreacionales, etc.

Se ha estimado como el 20% del costo de mano de obra. Ascende a **\$105,000.00.**

C. COSTOS FIJOS DE FABRICACION

Los costos fijos son independientes del volumen de producción de la planta, están formados por la depreciación, impuestos y los seguros. El total asciende a **\$647,010.00**

- **DEPRECIACIÓN**

El capital sujeto a depreciación es el capital fijo total excluyendo el costo del terreno. Para determinar se ha considerado el 10% del capital fijo **\$431,340.00.**

- **IMPUESTOS**

El pago de impuestos a la propiedad para zonas poco pobladas se considera el 4% del capital fijo total, **\$172,536.00.**

- **SEGUROS**

Se ha considerado el 1% del capital fijo total, **\$43,134.00.**

5.1.4.2 GASTOS GENERALES (VAI)

Comprende los gastos realizados por concepto de: administración, ventas y distribución, investigación y desarrollo. Y se ha tomado como el 10% de los costos fijos de fabricación **\$64,701.00.**

A. ADMINISTRACION

Comprende los gastos por derecho de salarios de funcionarios, contadores, secretarias, así como los gastos

de gerencia de actividades administrativas. Se estima como el 15% del costo de la mano de obra, supervisión y mantenimiento. Ascende a **\$126,581.00**.

B. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Este renglón está encaminado a mejorar la calidad, proceso y en general para abaratar los costos de producción. Se estima como el 20% de la mano de obra, **\$105,000.00**.

5.1.4.3 COSTO TOTAL DE FABRICACION:

Es igual a la suma del costo de fabricación y los gastos generales (VAI). Ascende a **\$2,245,932.00 dólares**.

5.1.4.4 COSTO UNITARIO:

La producción anual de 900,000 kg. al año, por lo tanto, el costo unitario es el costo fijo total entre la producción anual el costo unitario llega a **2.50 dol/kg**.

Este costo sale muy cercano al costo registrado para otras plantas similares que emplean esta tecnología y que en promedio es 3.0 dólares por kilogramo. El menor costo se atribuye a que la materia prima en este caso tiene un costo cero y de disponibilidad a las puertas de la nueva fábrica.

Tabla 5.2

Costo de Manufactura y Costo Unitario

1. COSTOS DE MANUFACTURA
1.1. COSTOS DIRECTOS DE MANUFACTURA

Costos de materia prima	\$60,966.00	\$982,121.00
Costo de mano de obra	\$525,000.00	
Costo de supervisión e ingeniería	\$105,000.00	
Costo de mantenimiento y reparación	\$215,600.00	
Costo de auxiliares y servicios	\$32,351.00	
Costo de suministros de operación	\$43,134.00	
TOTAL COSTOS DIRECTOS		
1.2. COSTOS INDIRECTOS DE MANUFACTURA		
Costos de planillas	\$110,250.00	\$320,250.00
Costo de laboratorio	\$105,000.00	
Costos generales de planta	\$105,000.00	
TOTAL COSTOS INDIRECTOS		
1.3. COSTOS FIJOS DE MANUFACTURA		
Depreciación	\$431,340.00	\$647,010.00
Impuestos	\$172,536.00	
Seguros	\$43,134.00	
TOTAL DE COSTOS FIJOS		
1.4. GASTOS GENERALES		
Administración	\$64,701.00	\$296,552.00
Ventas	\$126,851.00	
Investigación y desarrollo	\$105,000.00	
TOTAL GASTOS GENERALES		
COSTO TOTAL DE MANUFACTURA		\$2,245,932.00
2. COSTO UNITARIO		\$2.50 dol/kg
Producción: 900,000.00 Kg.		

Nota: Elaboración Propia

5.1.5 BALANCE ECONÓMICO Y RENTABILIDAD

En el análisis de la rentabilidad del proyecto se considera el precio de venta puesto en la fábrica de 7.0 dólares por kilogramo. El precio proyectado es de cerca de 8.0 dólares por kilogramo, por lo que el precio considerado para la evaluación es competitivo y se podrá ofertar el producto con mayor facilidad en el mercado nacional, que actualmente lo adquiere de importación.

5.1.5.1 RETORNO SOBRE LA INVERSION

- **Antes de Impuesto**

Se expresa como la relación porcentual entre las utilidades antes de impuestos y de inversión total.

El retorno sobre la inversión antes de los impuestos obtenidos es de 74.23%, lo que demuestra la factibilidad económica del proyecto

- **Después del Impuesto.**

Se expresa como la relación porcentual entre las utilidades después de impuestos y de inversión total.

El retorno sobre la inversión después de impuestos obtenidos es de 54.13%, lo que demuestra nuevamente la factibilidad económica del proyecto (Ver Apéndice).

A. TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Es el tiempo expresado en años, en que se recupera la inversión de capital fijo, operando solo un turno de 8 horas.

El tiempo de repago antes de impuestos es de 1.15 años y después de impuestos es de 1.45 años.

B. PUNTO DE EQUILIBRIO

Es el nivel de producción, en el cual no se obtiene ni pérdidas ni ganancias. Según los cálculos realizados el punto de equilibrio es 23.77% de la capacidad total de la planta.

Tabla 5.3

Estado de Pérdidas y Ganancias

ESTADO DE PERDIDAS Y GANANCIAS		
Producción anual	900,000	kg
Precio de venta por unidad	7.0	\$/kg
Ingreso neto de ventas anuales	6,300,000.00	\$
Costo total de fabricación (producción)	2,245,932.00	\$
Utilidad Bruta	4,054,068.00	\$
Impuesto a la renta (30 %)	935,554.00	\$
Utilidad neta	3,118,514.00	\$
Ingreso neto de ventas anuales = Producción anual * Precio de venta unitario		
Utilidad Bruta = Ingreso Neto de Ventas Anuales - Costo Total de Fabricación		
Utilidad Neta = Utilidad Bruta - Impuesto a la Renta.		

Nota: elaboración propia

Tabla 5.4

Análisis Económico

VALORES CALCULADOS	VALOR	ACEPTABLE
a. Retorno sobre la Inversión antes del pago de impuestos	74.26%	> 35 %
b. Retorno sobre la Inversión después del pago de impuestos	54.13%	> 12 %
c. Tiempo de recuperación del dinero antes de impuestos	1.15	< 5 años
d. Tiempo de recuperación del dinero después de impuesto	1.45	
e. Punto de equilibrio	23.77%	< 50%

Nota: Elaboración Propia

VI. CONCLUSIONES

a. De análisis de mercado

Se analizó el mercado nacional e internacional del mercado de litio. A nivel internacional se estima que la demanda pasará de 0.277 del 2018 a 2.248 millones de toneladas para el 2035. A nivel nacional, para el 2028 se estimó que la demanda insatisfecha en nuestro país llegará a 920 toneladas de carbonato de litio. El tamaño de la planta está limitado por la disponibilidad de salmuera residual que desecha la empresa QUIMPAC S.A, y se determinó que será de 900 toneladas por año, trabajando 360 días. Por lógica, la planta estará ubicada en las cercanías de la planta de álcali de QUIMPAC S.A., en el complejo industrial Paramonga.

b. De análisis técnico

Se determinó que, de las tecnologías existentes, por el tamaño y la economía la mejor es la evaporación de pozos. La tecnología es por tanto fácil de manejar. Se estimó que una captación de 241.733 toneladas por hora

de salmuera residual y una concentración de 900 ppm de Li^+ se puede obtener 900 toneladas de carbonato de litio por año.

c. De análisis financiero

Se evaluó de factibilidad financiera y se hizo un análisis económico. La inversión alcanza un valor de **5,148,481** dólares. El costo de producción es de 2.5 dólares por kilogramo de carbonato de litio. Considerando un precio de venta de 7.0 dólares por kilogramo (precio ex – fábrica) se obtuvo una tasa interna de retorno sobre la inversión después de impuestos de 54.13%, un periodo de recuperación del dinero de 1.45 años, y un punto de equilibrio de 23.77%.

d. De análisis ambiental

El impacto ambiental es muy bajo. Hay que considerar que se va a reutilizar una salmuera residual que en este momento se desecha al mar.

VII. RECOMENDACIONES

- ✍ Instalar la planta de producción de carbonato de litio
- ✍ Evaluar tecnologías emergentes de producción directa de carbonato de litio del agua de mar.
- ✍ Ampliar la capacidad de planta con salmueras frescas de las salinas de Huacho.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arteaga, J. (2013).** Incremento de la solubilidad de litio en las pegmatitas del relave de lixiviación de uranio. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Ingeniería Metalúrgica.
- Collazo, U. (2017).** Evaporación mecánica de salmueras de litio. Tesis de pregrado. Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.
- Comisión Chilena del Cobre. (2018).** Mercado Internacional del Litio y su Potencial en Chile. Ministerio de Minería. Gobierno de Chile.
- CORFO y InvestChile. (2017).** Oportunidades de integración de la cadena de valor del litio en Chile. Convocatoria Litio. Comité CORFO (Corporación de Fomento de la Producción).
- Corrillo, M., y Gutiérrez, Q. (2016).** Estudio de localización de un proyecto. *Ventana Científica*, 7 (11), 29-33.

- Crespo, P., Palma, H., Quintanilla, J., Quispe, L. (2007).** Tratamiento Químico de Salmueras del Salar de Uyuni, Potosí. Informe N° 7, Convenio UMSA-ORSTOM, Instituto de Investigaciones Químicas, FCPN.
- CRU International Limited. (2018).** Lito: Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035.
- DGAAMI. (2019).** PAMA de la planta de álcalis de la empresa QUIMPAC S.A.. resolución Directoral N° 166-2019-PRODUCE-DVMYPE-I/DGAAMI. Ministerio de la Producción. Perú.
- Donoso, R., Garay, V. y Cantallopts, J. (2017).** Mercado internacional del litio y su potencial en Chile. Comisión Chilena del Cobre, Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Gobierno de Chile.
- García, G. (2018).** El agua de mar podría convertirse en una fuente de litio prácticamente inagotable. Prototipo alimentado por energía solar. En Híbridos y Eléctricos, ecotecnología del vehículo. Recuperado de: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/investigadores-chinos-obtienen-litio-partir-agua-mar/20180730124048020741.html>
- Hoz, M., Martínez, V., y Vedia, J. (2013).** El litio: desde los salares de la Puna a nuestros celulares. Conicet, 3 (3), 58-67.
- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). (2005).** Fichas Internacionales de Seguridad Química. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España.
- León, R. (2016).** Extracción de minerales de agua de mar en base a procesos de sorción. Tesis de pregrado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona – Ingeniería Química. España.
- Manrique, A. (2015).** Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina. -1a ed. - Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Neometals Ltd. (2017).** Review of Operations. Annual financial report for the financial year ended 30 June 2017. A.C.N. 099 116 631.
- QUIMPAC S.A. (2015). Memoria Anual.
- Oficios Técnicos (2018).** Producción de cloro por electrolisis de salmuera. Recuperado de: http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/electrolisis_y_cloro.php

- Orrego, B. (2013).** Mercado Internacional del Litio, el potencial de litio en los salares del Norte de Chile. Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería, Gobierno de Chile.
- Rivera, R. (2008).** Proponer estrategias de crecimiento para la industria chilena del litio, sobre la base de un estudio del comportamiento competitivo de las empresas. Tesis de pregrado. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Industrial.
- Rocasalbas, N. (2010).** Estudio de la extracción de metales del rechazo de la desalación. Tesis de pregrado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona – Ingeniería Química. España.
- Secretaría de Economía. (2014).** Perfil de Mercado del Litio. Coordinación General de Minería, Dirección General de Desarrollo Minero. Estados Unidos Mexicanos.
- Simbol Materials. (2013).** Sustainable Extraction of Valuable Elements. Recuperado de: https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/conferences/event/b.1_burba_suschem.pdf
- Solminihac, P. (2010).** Litio: ¿Material Estratégico u Oportunidad de Desarrollo? SQM S.A.
- SQM. (2009).** SQM Lithium Resources and View of the Lithium Industry”. Presentación de Patricio de Solminihac, Vice-Presidente Ejecutivo SQM S.A. En la Conferencia “Lithium Supply Markets 2009”. Enero, 2009. Santiago.
- Velásquez, C., y Cabrera, V. (2018).** Producción de litio a pequeña escala a partir de salmueras. 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Innovation in Education and Inclusion”, 19-21 July 2018, Lima, Perú.
- Zeballos, H., Ochoa, J. y López, E. (2010).** Diversidad biológica de la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca. Lima: Desco, PROFONANPE, SERNANP, 314 pp. Ministerio del Ambiente. Perú.

APÉNDICE

BALANCE DE MASA DEL PROCESO

Datos de la planta piloto experimental de producción de litio, Salar de Uyuni, Potosí (Crespo et al., 2007):

Concentración de litio: 427 mg Li⁺/kg de salmuera

Carbonato de litio equivalente: $427 \times 5.32 = 2271.64$ mg Li₂CO₃/kg salmuera.

Salmuera alimentada: 9.6 ton/día

Rendimiento real: 81%

Datos del presente proyecto:

Concentración de litio: 100 mg Li⁺/kg de salmuera

Carbonato de litio equivalente: $100 \times 5.32 = 532$ mg Li₂CO₃/kg de salmuera

Salmuera disponible: 296 ton/hr

Salmuera alimentada (necesaria): $241.733 \times 24 = 5801.6$ ton/día

Carbonato de litio producido teórico: $532 \times 5801.6 = 3086451.2$ gm = 3086.4512 kg/día.

Carbonato de litio producido real: $3086.4512 \times 0.81 = 2500.25$ kg/día

Producción anual de carbonato de litio al 99.2% de pureza:

$$2500.25 \times 360 = 900000 \text{ kg} = 900 \text{ ton}$$

Factor de escalamiento para usarse en el cálculo de insumos:

$$FE1 = 5801.6/9.6 = 604.333, \text{ este factor corrige la capacidad}$$

$$FE2 = 532/100 = 5.32; \text{ este factor corrige la concentración de LCE}$$

$$FE = 604.333/5.32 = 113.59, \text{ factor que se va a aplicar}$$

Consumo total de insumos por año para Salar de Uyuni, Potosi

CaO: 3795 kg

Na₂SO₄: 72 kg

Na₂CO₃: 1180 kg

H₂SO₄: 1 kg

NaOH: 2 kg

Corrección para el presente proyecto:

$$\text{CaO: } 3795 \times 113.59 = 431074.05 \text{ kg}$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4: 72 \times 113.59 = 8178.48 \text{ kg}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3: 1180 \times 113.59 = 134036.2 \text{ kg}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4: 1 \times 113.59 = 113.59 \text{ kg}$$

$$\text{NaOH: } 2 \times 113.59 = 227.18 \text{ kg.}$$

EVALUACION ECONOMICA

Costo CIF de equipo principal y auxiliar:

Se considera que los principales equipos se construyen en nuestro país. Los precios se basan en los costos de equipos del 2014 de la empresa Matches (<https://www.matche.com/equipcost/Default.html>). Los precios se actualizaron al 2018 con los índices de costos de equipos para las plantas de ingeniería química.

CEPCI 2018: 603.1

CEPCI 2014: 576.1

Factor de corrección: $603.1/576.1 = 1.047$

Precios CIF de los principales equipos (2014):

Bomba tipo turbina vertical (2)	US\$ 32000
Piletas de evaporación solar "A" (16)	US\$ 340000
Filtros rotatorios "A" (3)	US\$ 180000
Piletas de evaporación solar "B" (8)	US\$ 170000
Poza de agitación, encalado I (2)	US\$ 160000

Piletas de evaporación solar "C" (8)	US\$ 170000
Poza de agitación, encalado II (2)	US\$ 160000
Filtro rotatorio "B" (2)	US\$ 120000
Poza de agitación, sulfatado (2)	US\$ 160000
Poza de agitación, purificación (2)	US\$ 160000
Poza de agitación, carbonatado (2)	US\$ 180000
Filtro rotatorio "C" (2)	US\$ 100000
Poza de lavado (2)	US\$ 180000
Secadero de bandejas (8)	US\$ 200000
Selladora de polietileno (1)	US\$ 14000
Otros servicios, vapor, electricidad	US\$ 107286
Total:	US\$ 2483290

Precio CIF 2018: $2483290 \times 1.047 = 2'600,000$ dólares americanos

COSTOS FIJOS

❖ **Costo CIF equipo principal y auxiliar** = 2,600,000.00 dólares

❖ **Costo de entrega:** $2,600,000 \times 0.05 = 135,000.00$ dólares

❖ **Costo de equipo en la planta:**

$$\text{CEP} = 2,600,000 + 130,000 = \mathbf{2,730,000.00 \text{ dólares}}$$

❖ **Costo de instalación de todos los equipos** : Es del 10% del equipo en planta.

$$\text{CEInst} = 0.10 \times 2,730,000.00 \quad \text{CEInst} = 273,000.00 \text{ dólares}$$

❖ **Costo de control por instrumentación:** Es del 5% en equipo en planta

$$\text{Cont.} = 0.05 \times 2,730,000.00 \quad \text{Cont.} = 136,500.00 \text{ dólares}$$

❖ **Costo de tuberías y accesorios:** Es del 5% en equipo en planta

$$\text{Cont.} = 0.05 \times 2,730,000.00 \quad \text{Cont.} = 136,500.00 \text{ dólares}$$

❖ **Costo de instalaciones eléctricas:** Es del 3% del equipo en planta

$$\text{CElec} = 0.03 \times 2,730,000.00 \quad \text{CElec} = 81,900.00 \text{ dólares}$$

❖ **Costo de Edificios:** Es del 4% del equipo en planta

$$\text{CostEdif} = 0.04 \times 2,730,000.00 \quad \text{CostEdif} = 109,200.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos de Terrenos y Mejoras:** Es del 2% del equipo en planta

$$\text{CostMej} = 0.02 \times 2,730,000.00 \quad \text{CostMej} = 54,600.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos de Servicios:** Es del 8% del equipo en planta

$$\text{CostSer} = 0.08 \times 2,730,000.00 \quad \text{CostSer} = 218,400.00 \text{ dólares}$$

COSTOS DIRECTOS TOTALES

$$\text{CDT} = \text{CEP} + \text{CEInst} + \text{CTubAcc} + \text{CElec} + \text{CCimEst} + \text{CEdif} + \text{CTerrMej} + \text{CSer}$$

$$\text{CDT} = 3,740,100.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos de Ingeniería y supervisión:** Es del 5% del equipo en planta

$$\text{CIngsup} = 0.05 \times 2,730,000.00 \quad \text{CIngsup} = 136,500.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos de construcción:** Es del 8% del equipo en planta

$$\text{Const} = 0.08 \times 2,730,000.00 \quad \text{Const.} = 218,400.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos de Seguros e impuestos de la construcción:** Es del 2% del equipo en planta.

$$\text{CSeg} = 0.02 \times 2,730,000.00 \quad \text{CSeg} = 54,600.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos de honorarios para contratistas:** Es del 4% del equipo en planta

$$\text{Chon} = 0.04 \times 2,730,000.00 \quad \text{Chon} = 109,200.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costos imprevistos:** Es del 2% del equipo en planta

$$\text{Cimpr} = 0.02 \times 2,730,000.00 \quad \text{Cimpr} = 54,600.00 \text{ dólares}$$

COSTOS INDIRECTOS TOTALES

$$\text{CI} = \text{CIngsup} + \text{Const.} + \text{CSeg.} + \text{Chon} + \text{Cimpr}$$

$$\text{CI} = 573,300.00 \text{ dólares}$$

CAPITAL FIJO TOTAL

Es la suma de costos directos, costos indirectos, capital de puesta en marcha e intereses de financiamiento.

$$CFT = CD + CI$$

$$CFT = 4,313,400.00 \text{ dólares}$$

CAPITAL DE TRABAJO

NOMBRE	CANTIDAD	PRECIO
Oxido de calcio	49.8928 kg/hr	0.08 dol/kg
Sulfato de sodio	0.9466 kg/hr	0.11 dol/kg
Carbonato de Sodio	15.5134 kg/hr	0.19 dol/kg
Ácido sulfúrico	0.0131 kg/hr	0.2 dol/kg
Hidróxido de sodio	0.0263 kg/hr	0.4 dol/kg

Operación continua: 360 días al año = 8640 horas al año.

- ❖ **Inventario de Materia Prima:** Se considera un mes de materia a los precios de puesto en planta.

$$InvMP = 5,081.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Inventario de Materia en Proceso:** Se considera un día del costo total de producción
 - Producto: 104.1667 kg/hr
 - Costo Producto: 2 dol/kg (costo tentativo)

$$InvMPProc = \text{Producto} \times 24 \text{ hr} \times \text{Costo Producto} = 5,000.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Inventario de Producto en almacén:** Se estima el costo de manufactura para una semana de producción

$$InvPro = 8640/12 \times 15 \text{ hr} \times \text{Producto} \times \text{CostoProducto} = 150,000.00 \text{ dólares}$$

❖ **Cuentas por cobrar:** Equivalente a un mes de ventas

Precio de venta = 7.0 dólares/kg (Precio estimado del producto)

Cuenta por cobrar = $8640/12 \times 15 \text{ hr} \times \text{Producto} \times \text{Precio venta}$

Cuenta por cobrar = 525,000.00 dólares

❖ **Disponible en Caja:** Se considera el costo de un mes de producción. Sirve para pagar salarios, suministros e imprevistos.

DispCaja = $8640/12 \times 15 \text{ hr} \times \text{Producto} \times \text{Costo Producto} = 150,000.00 \text{ dólares}$

CAPITAL DE TRABAJO

Es la sumatorio de inventario de materia prima, inventario de materia en proceso, inventario de producto, cuentas por cobrar y disponible en caja.

$CTra = InvMatPri + InvMatPro + InvPro + Cuentas + DispCj$

CTra = 835,081.00 dólares

INVERSION TOTAL DEL PROYECTO

Es la suma del capital fijo total y el Capital de Trabajo.

$INVT = CFT + CapTra$

INVT = 5,148,481.00 dólares

COSTOS DE MANUFACTURA (COSTO TOTAL DEL PRODUCTO)

❖ **Costo de Materia Prima:**

CostMatPri 1 = 34,486.00 dólares

CostMatPri 2 = 899.00 dólares

CostMatPri 3 = 25,467.00 dólares

CostMatPri 4 = 23.00 dólares

CostMatPri 5 = 91.00 dólares

$$\text{CMP} = 60,966.00 \text{ dol.}$$

- ❖ **Costo de mano de obra:** Depende del número de personas por turno lo cual está en relación con el grado de automatización de la planta. Se considera 10 – 20% del costo total de manufactura.

Trab Turno: 25

Mens: 500 dol

$$\text{CMobra} = 25 \times 3 \times 15 \times \text{Mens}$$

$$\text{CMobra} = 525,000.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costo de supervisión e ingeniería:** 20% del costo de la mano de obra

$$\text{Cing} = 0.20 \times 525,000.00$$

$$\text{Cing} = 54,600.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costo de mantenimiento:** 2-10% del capital fijo total. Se va a considerar 5%

$$\text{Cmant} = 0.05 \times \text{CFT}$$

$$\text{Cmant} = 215,670.00 \text{ dollars}$$

- ❖ **Costo de auxiliares y servicios:** El 15% del costo de mantenimiento.

$$\text{Caux} = 0.15 \times \text{Cmant}$$

$$\text{Caux} = 32,351.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Costo de suministros de operación:** 20% del costo de mantenimiento o 0.5 al 1% de la inversión del capital fijo.

$$\text{Csum} = 0.20 \times \text{Cmant}$$

$$\text{Csum} = 43,134.00 \text{ dólares}$$

COSTO DIRECTO DE MANUFACTURA (O DE FABRICACIÓN)

$$\text{CDF} = \text{CMP} + \text{CMobra} + \text{Cing} + \text{Cmant} + \text{Caux} + \text{Csum}$$

$$\text{CDF} = 982,121.00 \text{ dólares.}$$

- ❖ **Cargas a planillas:** 21% de la mano de obra

$$\text{Cplan} = 0.21 \times \text{CMobra}$$

$$\text{Cplan} = 110,250.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Gastos de laboratorio:** 20% del costo de mano de obra

$$\text{Clab} = 0.20 \times \text{CMobra}$$

$$\text{Clab} = 105,000.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Gastos generales de planta:** 20% del costo de mano de obra

$$\text{Gen} = 0.20 \times \text{CMobra}$$

$$\text{Cgen} = 105,000.00 \text{ dólares}$$

COSTO INDIRECTO DE MANUFACTURA (O DE FABRICACIÓN)

$$\text{CIF} = \text{Cplan} + \text{Clab} + \text{Gen}$$

$$\text{CIF} = 320,250.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Depreciación:** 10% del capital fijo total

$$\text{Dep} = 0.10 \times \text{CFT}$$

$$\text{Dep} = 431,340.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Impuestos:** 4% del capital fijo total

$$\text{Imp} = 0.04 \times \text{CFT}$$

$$\text{Imp} = 172,536.00 \text{ dólares}$$

- ❖ **Seguros:** 1% del capital fijo total

$$\text{Seg} = 0.01 \times \text{CFT}$$

$$\text{Seg} = 43,134.00 \text{ dólares}$$

COSTOS FIJOS DE FABRICACIÓN

$$\text{CFF} = \text{Dep} + \text{Imp} + \text{Seg}$$

$$\text{CFF} = 647,010.00 \text{ dólares}$$

COSTO DE MANUFACTURA (FABRICACIÓN)

Es la suma de los costos directo de fabricación, Costo indirecto de fabricación y el costo fijo de fabricación.

$$CFab = CDF + CIF + CFF$$

$$CFab = 1,949,381.00 \text{ dólares}$$

GASTOS GENERALES (GASTOS VAI)

– Gastos de ventas, administración e investigación.

Ventas: gastos en oficina de ventas, personal de ventas, propaganda, distribución se considera 10% del costo fijo de fabricación.

$$Vent = 0.10 \times CFF = 64,701.00 \text{ dólares}$$

Administración: salario de ejecutivos, planilla de oficinistas, suministros de oficinas, comunicaciones. Corresponde al 15% de costo de mano de obra, supervisión y mantenimiento

$$Adm = 0.15 (CMobra + Csupeing + Cmant) = 126,851.00 \text{ dólares}$$

Investigación y Desarrollo: se considera 20% del costo de Mano de obra

$$Inv = 0.20 \times CMobra = 105,000.00 \text{ dólares.}$$

$$VAI = Vent + Adm + Inv$$

$$VAI = 296,552.00 \text{ dólares}$$

COSTO TOTAL DE FABRICACIÓN

Es la suma de los costos de Fabricación y los Gastos Generales (VAI).

$$CTF = CFab + VAI$$

$$CTF = 2,245,932.00 \text{ dólares}$$

TOTAL DE UNIDADES PRODUCIDAS AL AÑO.

$$NumProd = Producto \times 8640 \text{ hr}$$

$$NumProd = 900,000 \text{ kg}$$

COSTO UNITARIO

$$CostUnit = \frac{CTF}{NumProd}$$

$$Costo\ Unitario = 2.50\ \text{dólares/kg}$$

Este costo sale muy cercano al costo registrado para otras plantas similares que emplean esta tecnología y que en promedio es 3.0 dólares por kilogramo. El menor costo se atribuye a que la materia prima en este caso tiene un costo cero y de disponibilidad a las puertas de la nueva fábrica.

ESTADO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

❖ Precio de ventas por unidad

$$Pventa = 7.0\ \text{dólares/kg}$$

❖ Ingreso neto de ventas anuales

$$Ingventas = Panual \times Pventa = 6,300,000.00\ \text{dólares}$$

❖ Costo total de fabricación (producción)

$$CTfabri = CFab$$

$$CTfabri = 2,245,932.00\ \text{dólares}$$

❖ Utilidad Bruta

$$Ubruta = Ingventas - Ctfabri$$

$$Ubruta = 4,054,068.00\ \text{dólares}$$

❖ Impuesto a la renta

$$ImpRenta = \frac{Ubruta}{1.3} \cdot 0.30$$

$$ImpRenta = 935,554.00\ \text{dólares}$$

❖ Utilidad Neta

$$Uneta = Ubruta - ImpRenta$$

$$Uneta = 3,118,514.00\ \text{dólares}$$

ANALISIS ECONOMICO

❖ **Tasa interna de Retorno**, antes del pago de impuestos

P: inversión inicial: 5,148,481.00 dólares

A: ingreso neto de ventas: 6,300,000.00

VS: depreciación: 431,340.00 dólares

n: periodo en el que espera recuperar el dinero, 5 años

i: tasa interna de retorno

Aplicando la fórmula:

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + \frac{VS}{(1+i)^n}$$

Se despeja el valor de i:

$$i = 74.26\%$$

❖ **Tasa interna de Retorno**, después del pago de impuestos

U = utilidad neta, después de impuestos

$$P = U \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + \frac{VS}{(1+i)^n}$$

$$i = 54.13\%$$

❖ **Tiempo de recuperación del dinero antes de impuestos**

Se aplica la siguiente formula:

$$TRI = I / (U \text{ bruta} + D)$$

$$TRI = 1.15 \text{ años}$$

❖ **Tiempo de recuperación del dinero después de impuestos**

Se aplica la siguiente formula:

$$TRI = I / (U \text{ neta} + D)$$

$$TRI = 1.45 \text{ años}$$

❖ **Punto de Equilibrio:**

$$CFF = 982,121.00 \text{ dólares}$$

Para no pierda ni ganar el número de unidades que se debe producir será:

$$Q = \frac{CFF}{\frac{Inventas}{Panual} - \frac{C \text{ var}}{Panual}}$$

$$Q = 213,888 \text{ kg}$$

$$Pequilibrio = \frac{Q}{Panual} \cdot 100$$

$$P. \text{ Equilibrio} = 23.77\%$$

ANEXOS

ANEXO

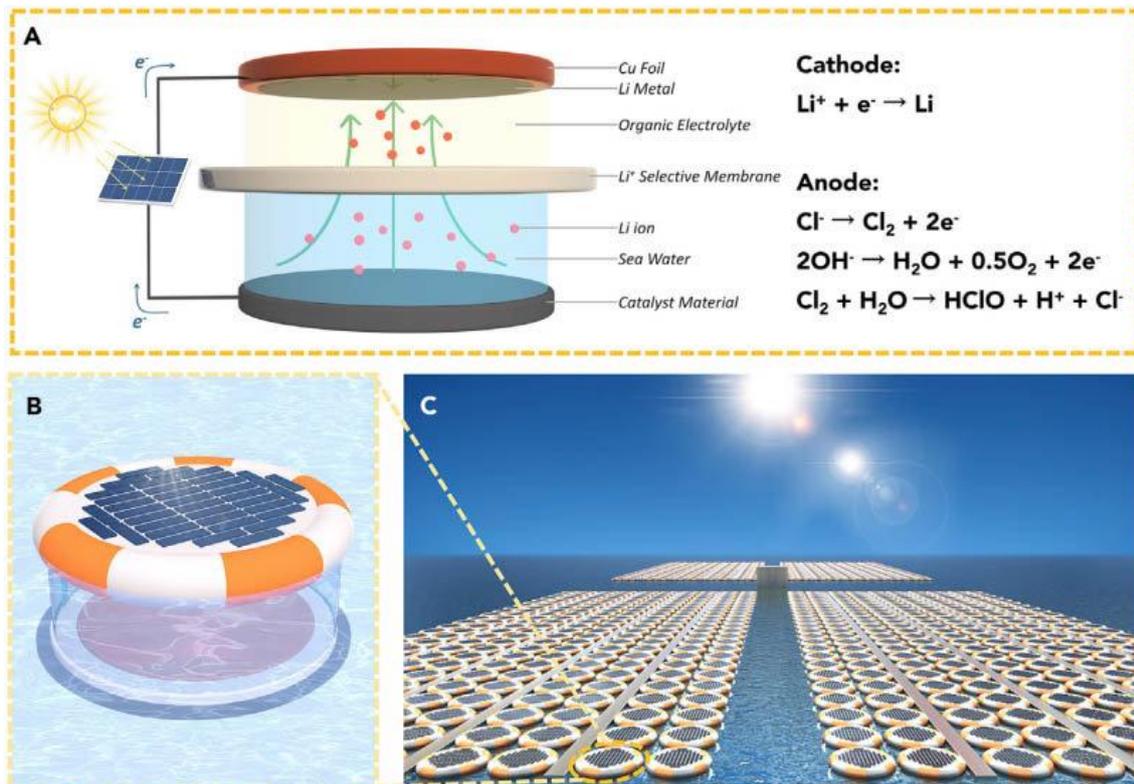


Diagrama esquemático del prototipo del dispositivo de extracción de litio con energía solar: (A) Extracción de litio; (B) Prototipo; (C) Matriz de dispositivos a escala situados en el mar.

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/investigadores-chinos-obtienen-litio-partir-agua-mar/20180730124048020741.html>