

M
622
T649
2015

UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS



ANÁLISIS DEL MERCADO DEL LITIO CON ENFASIS
EN LA PROYECCIÓN DEL PRECIO

“Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para
Obtener el Título de Ingeniero Civil de Minas”



Profesor Guía: Enrique Santibañez

JOSE LUIS TOLEDO VEGA
CINTYA LORENA VEGA HIDALGO
2015

U. DE ATACAMA
BIBLIOTECA CENTRAL



Bib 25.483



AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos de Cintya Vega Hidalgo:

A mis padres **Sergio y Mariluz**, por haber confiado en mí, desde el primer día que me vine a estudiar la enseñanza media y la Universidad a Copiapó, por todo el esfuerzo que ellos hicieron para que no me faltara nada, y esas llamadas telefónicas que me alegraban los días y me preguntaban cómo me iba en mis estudios, gracias papitos, los quiero y adoro con todo mi corazón.

A mis tíos **Sylvia y Pedro Pablo**, que son como mis segundos padres, ya que me dieron un espacio en su casa y entregaron todo el cariño y apoyo durante los años que estude. Gracias tíos. A mi prima **Danita** por su incondicional apoyo, los quiero mucho.

Mis hermanos **Karina y Steven**, que son mi gran apoyo, mis dos gotas de agua, mis almas gemelas, estoy muy feliz de tenerlos al lado mío, ya que ustedes me entregaron y entregan todo ese cariño y consejos que yo necesitaba, los adoro, al igual a mi sobrino hermoso **Dieguito**.

A mi gran amigo **Cristian Araya**, por motivarme todos los días para terminar mi tesis y ayudarme en concretar mi gran objetivo. Te conocí cuando estaba en 3er año de la Universidad y desde ahí formamos una linda amistad y equipo de trabajo junto a Daniela, Mauricio y Waldo, que son mis demás amigos.

Gracias Cristian por estar a mi lado en las buenas y en las malas, Te quiero mucho.

Y a mi querido amigo **José Toledo**, te conocí a la semana después que entramos a la Universidad, y desde ahí emprendimos el camino de nuestras vidas, terminar la carrera de Ingeniería Civil en Minas. Compartimos muchos momentos de alegrías, frustraciones cuando nos iba mal en algunas pruebas, pero logramos salir adelante y llegar a la meta con gran esfuerzo, te quiero mucho amigo.



AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos de José Toledo Vega:

A mi madre Viviana, todo lo que soy se lo debo a usted, desde pequeño siempre me alentó y me enseñó que el mejor legado que usted podía dejarme era el estudio, es la mujer más fuerte que conozco y un pilar fundamental para mí, a donde valla siempre llevare sus consejos conmigo.

A mi padre Gabriel, siempre ha sido mi modelo a seguir, el mejor padre y amigo, cada día luchaste por sacar a nuestra familia adelante sin descanso, espero poder ser la mitad del buen hombre que tú eres

A mi amada María, llegaste a mi vida para hacerla mejor, soy un mejor hombre a tu lado, gracias por tu paciencia, en este tiempo, por tu amor y por creer en mi persona, caminare siempre a tu lado apoyándote para crecer como familia junto a almendrita y Gabrielito.

A mi gran amigo Jorge Luis Martínez Hincapié, si no hubiera vivido este proceso contigo quizás todo esto hubiese terminado de otra forma, hace mucho que tomamos caminos separados, pero siempre estaré en deuda, nunca olvidare las noches de estudios, las incontables anécdotas en nuestros años de universidad y todo lo que me enseñaste para ser un mejor profesional.

A mi querida amiga Cintya Vega Hidalgo, siempre me ayudaste en los momentos que más lo necesite, espero siempre poder llamarte mi mejor amiga y que este nuevo paso reafirme nuestra amistad, en mí siempre tendrás a alguien en quien contar y confiar.



Agradecimientos de Cintya y José a:

Profesor **Enrique Santibáñez**, muchas gracias por brindarnos su ayuda y su experiencia académica, pero más que todo por siempre mantener sus puertas abiertas para nosotros en cualquier momento de su tiempo, darnos consejos y sobre todo tener fe en nosotros, muchas gracias. Estaremos eternamente agradecidos.



RESUMEN

El uso cada vez más extendido de las baterías recargables en la vida moderna ha presionado para un rápido crecimiento de la demanda por uno de sus principales componentes, como lo es el litio. El desarrollo de las baterías de iones de litio (Li-Ion¹), ha significado que el litio se convierta en un insumo prácticamente “Insustituible” de la vida moderna. Cada uno de los miles de millones de celulares, computadoras personales, herramientas eléctricas, agendas electrónicas o reproductores de música, entre otros, que se construyen año a año, necesitan para su funcionamiento el litio, por ello, en los años 1979 en nuestro país fue considerado como un metal estratégico, es decir no concesible, por sus propiedades de generar interés nuclear, y para poder producir este metal, se llegó al acuerdo de realizar contratos especiales (CEOL) efectuada en el año 2012, donde Rockwood Lithium produce un total autorizado de 200.000 ton, volumen que alcanzaría hacia el año 2030, y SQM con una cantidad permitida de 180.000 ton a la que llegaría en 2023. Toda Explotación está reservada al Estado o a través de los privados como CORFO, donde este último posee contratos de explotación con las empresas SQM y Rockwood, autorizados con la CCHEN. La empresa Junior Li3 Energy, es una empresa que está evaluando la viabilidad de explotar el litio en el salar de Maricunga.

En el salar de Atacama se calculan reservas de 6,3 millones de toneladas (2000 Km² de superficie), donde Chile genera aproximadamente 65.000 ton/ anuales de carbonato de litio equivalente, con bajos costos de producción, debido a la alta tasa de evaporación que favorece la aglutinación de salmueras y cristalización de sales.

Sin embargo, se espera un crecimiento en la demanda de 8 a 9%, dependiendo de la penetración de los vehículos eléctricos, lo que ha despertado el interés de los mercados internacionales sobre este metal.

En este estudio se buscó un modelo que permita hacer una predicción con un mejor ajuste y con intervalos de confianza de 95%.

¹Li-Ion: La batería de iones de litio, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica.



Lo complicado de este análisis es la estimación de los precios, ya que en datos existentes son muy pocos.

Es por ello que se analizaron distintos modelos de series temporales, donde varios de ellos se fueron descartando verificando el mejor ajuste. Este proceso se hacía comparando cada modelo generado con los criterios de información Akaike (AIC²), este valor es significativo, siempre y cuando se pueda comparar con otros valores de los demás modelos. Para la selección del mejor ajuste de los modelos es el menor valor del AIC.

Por lo tanto el mejor modelo que se ajustaba a los datos, era el proceso de “Camino Aleatorio” (Random Walk) sin tendencia, logrando una proyección de los años, 2015 y 2016.

Para poder ver una estimación a largo plazo del precio del litio, se realizó una simulación de Montecarlo, donde se generó una secuencia de números aleatorios para llevar a cabo una simulación estadística, con el fin de llegar a conocer las propiedades estadísticas del sistema. Para poder generar muestras aleatorias, se analizaron los datos del precio del litio con distintos modelos de función de densidad de probabilidad en el Software Statgraphic y el mejor ajuste de bondad analizado con el test Kolmogorov-Smirnov fue el de una distribución normal con una media de 3057,92 US\$/Ton y desviación estándar de 1316,56 US\$/Ton. Luego de conocer la función de densidad se generan en forma rápida y efectiva los números aleatorios y se inicia la simulación haciendo muestreos aleatorios de la misma. Las múltiples simulaciones realizadas, da un resultado deseado tomándose como valor promedio 3017, 73 US\$/Ton. La tendencia de la simulación es a largo plazo de los años 2015 a 2024 dando un promedio de 4770,65 US\$/Ton, que es un valor esperado, ya que la demanda del carbonato de litio es cada vez mayor, debido a sus diversos usos en el mercado.

²AIC: El **criterio de información de Akaike**, es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico, para un conjunto dado de datos. Como tal, el AIC proporciona un medio para la selección del mejor modelo.



INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	6
INDICE.....	8
CAPITULO I “INTRODUCCION”	14
1.1 Introducción.....	14
1.2 Alcances Del Estudio	16
1.3 Objetivos Generales	16
1.4 Objetivos Específicos	16
1.5 Metodología de la Investigación	17
CAPITULO II “ANTECEDENTES DEL LITIO”	18
2.1 Ubicación Geográfica del Litio.....	18
2.2 Características del Litio	19
2.2.1 Reseña histórica.....	19
2.2.2 Mineralogía del Litio.....	20
2.2.3 Efectos del Litio sobre la salud.....	23
2.2.4 Efectos ambientales del Litio	24
2.3 Métodos de Producción del Litio.....	25
2.4 Yacimientos de Litio	28
2.4.1 Distribución de los Salares.....	29
2.4.1.1 Salares Preandinos	29
2.4.1.2 Salares y lagos andinos	29
2.4.1.3 El salar de Atacama	31
2.5 Métodos de Extracción del Litio.....	35
2.5.1 Método de Extracción del Litio en las Salmueras.....	35
2.5.1.1 Evaporación de Pozos.....	36
2.5.1.2 Osmosis Inversa.....	38
2.5.1.3 Extracción por solvente (SX)	39
2.5.2 Método de Extracción del Litio en Rocas Pegmatitas	40
2.5.2.1 Método de Extracción del Litio en Depósitos de Arcillas.....	40



2.6	El proceso de la extracción de SQM en el Salar de Atacama.....	41
2.7	Política del Litio	42
2.7.1	Marcos Legales y Regulatorios del Litio	42
2.7.2	Políticas públicas internacionales en el ámbito del litio.....	45
2.7.3	Contrato Especial.....	47
2.8	Progreso de La Minería del Litio	48
2.9	Royalties y los aportes económicos al país	50
2.10	Reservas y Recursos de Litio.....	51
2.10.1	Triangulo del litio	52
2.11	Usos del Litio	57
2.11.1	Baterías de Litio.....	57
2.11.2	Industria del Aluminio	59
2.11.3	Industria del vidrio y de la cerámica.....	60
2.11.4	Grasas Lubricantes.....	61
2.11.5	Sistema de aire Acondicionado	61
2.11.6	Caucho Sintético	61
2.11.7	Otros usos del litio	62
2.11.8	Usos futuros	63
2.11.9	Consumo por aplicación y tasa de crecimiento	65
2.11.10	Proyección del uso del litio	66
CAPITULO III MARCO TEORICO		68
3.1	Análisis de series de tiempo.....	68
3.1.1	Elementos estadísticos en el análisis de series de tiempo.....	68
3.1.2	Series de tiempo vistas como procesos estocásticos	70
3.1.3	Series de tiempo discretas.....	70
3.1.4	Procesos estocásticos lineales	72
3.1.5	Procesos Estacionarios.....	73
3.1.6	Serie de Tiempo no Estacionaria.....	74
3.1.7	Proceso estocástico no estacionario	74
3.1.7.1	Método de Random Walk (Camino aleatorio).....	75
3.2	Métodos de Suavizamiento Exponencial	76
3.2.1	Método de Holt-Winters	77



3.3	Manejo de Datos.....	78
3.3.1	Distribuciones de Frecuencia.....	78
3.3.2	Gráficas de Distribuciones de Frecuencia	78
3.4	Medidas Descriptivas.....	79
3.4.1	Media (\bar{x}):.....	79
3.4.2	Varianza (s^2).....	80
3.4.3	Desviación Estándar (s)	80
3.5	Modelos Probabilísticos	80
3.5.1	Distribución Uniforme	80
3.5.2	La Ley Exponencial con parámetros λ ($\lambda > 0$):	81
3.5.3	Distribución Gamma:.....	82
3.5.4	Distribución Normal	83
3.5.5	Distribución Lognormal.....	85
3.5.6	Distribución de Weibull	86
3.6	Pruebas no paramétricas.....	87
3.6.1	Bondad de ajuste.....	88
3.6.1.1	<i>Prueba de Kolmogorov-Smirnov</i>	88
3.6.1.2	<i>Contraste de normalidad</i>	90
3.7	Simulación Montecarlo	91
CAPITULO IV "ESTUDIO DE MERCADO".....		93
4.1	El mercado del carbonato de litio	93
4.2	Análisis de la Oferta	94
4.2.1	Producción potencial de litio a partir de minerales.....	94
4.2.2	Producción potencial de litio a partir de salmueras.....	96
4.2.3	Proyección de la capacidad instalada hacia 2020.....	96
4.3	Análisis de la Demanda	98
4.3.1	Demanda actual y proyección futura	98
4.3.2	Demanda a través de los años	102
4.4	Costos de producción del Carbonato de Litio:	104
4.5	Precio del Litio.....	105
4.5.1	Determinación del Precio del Litio.....	107



4.5.2	Proyección del Precio del Litio	110
4.5.2.1	Análisis de Modelos de Series de Tiempo para el Precio del Carbonato de Litio:	110
4.5.2.2	Análisis Estadístico en Statgraphic de los precios históricos del Carbonato de litio.....	119
4.5.2.3	Resumen Estadístico para el Precio	120
4.5.2.4	Tabla e Histograma de Frecuencias para el Precio	120
4.5.2.5	Estudio de Ajuste de distribución al precio histórico del Carbonato de Litio.	121
4.5.2.6	Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov	122
4.5.3	Simulación Montecarlo para el precio del litio a largo plazo	124
CAPITULO V "CONCLUSIONES"		127
BIBLIOGRAFÍA		129
ANEXOS.....		130

Índice de Tabla

Tabla N°1.	Tabla detallada de las Propiedades Físicas.	21
Tabla N°2.	Lista de Salares con potencial de explotación.	31
Tabla N°3.	Composición química de salmueras del Salar de Atacama.	34
Tabla N°4.	Comparación de litio en diferentes salmueras del mundo.	35
Tabla N°5.	Catastro de Concesiones Mineras, Fuente de Sernageomin.	45
Tabla N°6.	Políticas públicas en el ámbito del litio en otros países	46
Tabla N°7.	Progreso de la minería del litio.	50
Tabla N°8.	Indica los años de las estimaciones, su autor, y los tonelajes de reservas y recursos.	55
Tabla N°9.	Consumo por aplicación y tasa de crecimiento.	65
Tabla N°10.	Puesta en marcha de proyectos según tipo de yacimiento.	95
Tabla N°11.	Costos de producción según país y tipo de materia prima.....	104
Tabla N°12.	Tabla con los precios del litio 1991-2014, fuente Cochilco.	119
Tabla N°13.	Resumen de Estadísticos.	120
Tabla N°14.	Tabla de frecuencia.	121
Tabla N°15.	Tabla de frecuencia.	122
Tabla N°16.	Tabla resumen de ajuste de distribución.....	124
Tabla N°17.	Simulación del precio del carbonato de litio en los años 2015 a 2024.....	126



Índice de Figuras

<i>Figura 1. Localización de los Salares.</i>	18
<i>Figura 2. Fuentes principales con su cadena de producción.</i>	25
<i>Figura 3. Cadena de Producción.</i>	27
<i>Figura 4. Sistemas de los salares.</i>	30
<i>Figura 5. Salar de Atacama.</i>	32
<i>Figura 6. Proceso de producción de carbonato de litio a partir de la salmuera del Salar de Atacama, Sociedad Chilena del Litio (SCL).</i>	37
<i>Figura 7. Flujo de proceso de la planta de osmosis inversa de litio.</i>	38
<i>Figura 8. Proceso de extracción por solvente de litio, desarrollado por Bateman Lithium.</i>	39
<i>Figura 9. Producción de carbonato de litio a partir de arcillas sedimentarias (hectoritas).</i>	41
<i>Figura 10. Proceso de Extracción de SQM.</i>	42
<i>Figura 11. Línea de tiempo de la política del litio.</i>	44
<i>Figura 12. Triangulo del Litio</i>	52
<i>Figura 13. Flujo de proceso para las baterías de Li-on.</i>	57
<i>Figura 14. Información de las empresas productoras de litio.</i>	62

Índice de Gráficos

<i>Grafico N° 1. Participación del Litio en el Mercado.</i>	15
<i>Grafico N° 2. Reservas Mundiales</i>	51
<i>Grafico N° 3. Proyecciones de consumo de litio en relación a sus aplicaciones y el respectivo crecimiento.</i>	66
<i>Grafico N° 4. Gráfica de la distribución Gamma.</i>	83
<i>Grafico N° 5. Gráfica distribución normal.</i>	84
<i>Grafico N° 6. Distribución Lognormal.</i>	86
<i>Grafico N° 7. Gráfica de Kolmogorov- Smirnov.</i>	89
<i>Grafico N° 8. Participación en la producción de carbonato de litio.</i>	93
<i>Grafico N° 9. Principales países exportadores de Carbonato de Litio con su participación porcentual.</i>	94
<i>Grafico N° 10. Participación porcentual proyectada en el total mundial de la capacidad productiva de LCE.</i>	97
<i>Grafico N° 11. Demanda del Carbonato de Litio.</i>	100



<i>Grafico N° 12. Proyección de demanda del litio de 2011 a 2020.</i>	<i>101</i>
<i>Grafico N° 13. Demanda Ton de litio a nivel global</i>	<i>103</i>
<i>Grafico N° 14. Costo de producción de carbonato de litio.</i>	<i>105</i>
<i>Grafico N° 15. Evolución de Precios promedio anual del Carbonato de litio, datos de Cochilco.</i>	<i>105</i>
<i>Grafico N° 16. Precio Carbonato de Litio por país.</i>	<i>109</i>
<i>Grafico N° 17. Precios del Li_2CO_3.</i>	<i>111</i>
<i>Grafico N° 18. Serie temporal con el ajuste de los modelos del Precio del Litio.</i>	<i>113</i>
<i>Grafico N° 19. Predicción con Modelo de Holt-Winters.</i>	<i>114</i>
<i>Grafico N° 20. Intervalo de Confianza 80 y 95% con parámetro de suavizamiento (ETS).</i>	<i>116</i>
<i>Grafico N° 21. Predicción de dos años desde Random Walk</i>	<i>117</i>
<i>Grafico N° 22. Histograma de Frecuencia.</i>	<i>121</i>
<i>Grafico N° 23. Histograma de Frecuencia.</i>	<i>123</i>
<i>Grafico N° 24. Gráfica de Distribución Normal.</i>	<i>125</i>
<i>Grafico N° 25. Ajustes del precio del litio usando simulación.</i>	<i>125</i>
<i>Grafico N° 26. Histograma de frecuencia distribución Lognormal.</i>	<i>131</i>
<i>Grafico N° 27. Histograma de frecuencia distribución Exponencial.</i>	<i>132</i>
<i>Grafico N° 28. Histograma de frecuencia distribución Weibull.</i>	<i>133</i>
<i>Grafico N° 29. Histograma de frecuencia distribución Uniforme.</i>	<i>134</i>
<i>Grafico N° 30. Histograma de frecuencia distribución Triangular.</i>	<i>135</i>
<i>Grafico N° 31. Histograma de frecuencia distribución Gamma.</i>	<i>136</i>



CAPITULO I “INTRODUCCION”

1.1 Introducción

El litio se ha convertido en un metal de enorme interés a nivel mundial. Esto se debe al intensivo uso en baterías recargables que sirven para un conjunto de aplicaciones, y por ende la demanda de carbonato de litio se ha ido incrementando. Chile tiene ventajas comparativas no sólo debido a la cantidad, calidad y el bajo costo de extracción de recursos como el litio en salmuera, sino principalmente porque en el exterior somos reconocidos como un país confiable, seguro y estable en materia de inversión minera.

Chile cuenta con las mayores reservas a nivel mundial, y se debe aprovechar la oportunidad para volver a ser líderes en el mercado minero. Cuando se habla de cobre en el mundo todos piensan en Chile. ¿Qué sucede cuando se habla del litio?, nuestro país fue líder de este mercado durante varios años y eso se debió a distintas razones. Una de ellas, como se mencionó anteriormente, es que posee las mayores reservas mundiales contenidas principalmente en los salares de Atacama y Maricunga, además de los bajos costos de producción.

El litio es un mineral abundante en el mundo y existe no sólo en Chile, sino también en países como Bolivia, Argentina y China por nombrar sólo algunos. En un futuro cercano no sólo se observaran nuevos productores de litio, sino además nuevas tecnologías que permitirán explotar este recurso de manera más abundante, eficiente y limpia. No obstante, en la legislación chilena, el litio posee un régimen jurídico excepcional, puesto que no es concesible, por ser un mineral estratégico, como muchos otros. Esto ocurrió hace unos 35 años atrás cuando el litio pasó a catalogarse como un mineral “estratégico” y de “interés nuclear”, en consecuencia, de reserva exclusiva para el Estado de Chile. Diversos factores recientes, como el interés del nuevo gobierno por establecer una definición de la política nacional respecto al litio, sin duda plantean la pregunta de si es razonable que este mineral mantenga dicho carácter de exclusividad estatal.



Se debe perfeccionar la legislación del litio para poder explorar y luego explotar este mineral, modificando la Ley Orgánica de Concesiones Mineras, y lograr que este mineral en un futuro llegue a ser producido por una empresa estatal, como lo es el cobre a través de Codelco, además de mejorar el marco normativo que regula la extracción de dicho mineral, permitiendo su aprovechamiento diversificado y así no llegar a perder presencia en el mercado mundial.

Como se puede apreciar en el gráfico N°1, el litio desde los años 1984 a 2011, ha liderado, en cuanto a la participación en el mercado, con respecto a otros productos, como lo son los metales base, petróleo, hierro y metales livianos. Los grandes productores de litio en el mercado mundial son; Talison, SQM, Chemetall y FMC.

A través de este estudio se formulará un modelo para la proyección del precio del litio, específicamente la proyección se realizará para el largo plazo, los datos que se usarán serán sacados de las fuentes de estudios y estadísticos de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Los software estadísticos a utilizar son el R, Statgraphic y Crystall Ball, cada uno cumplirá una función de análisis del precio del litio.

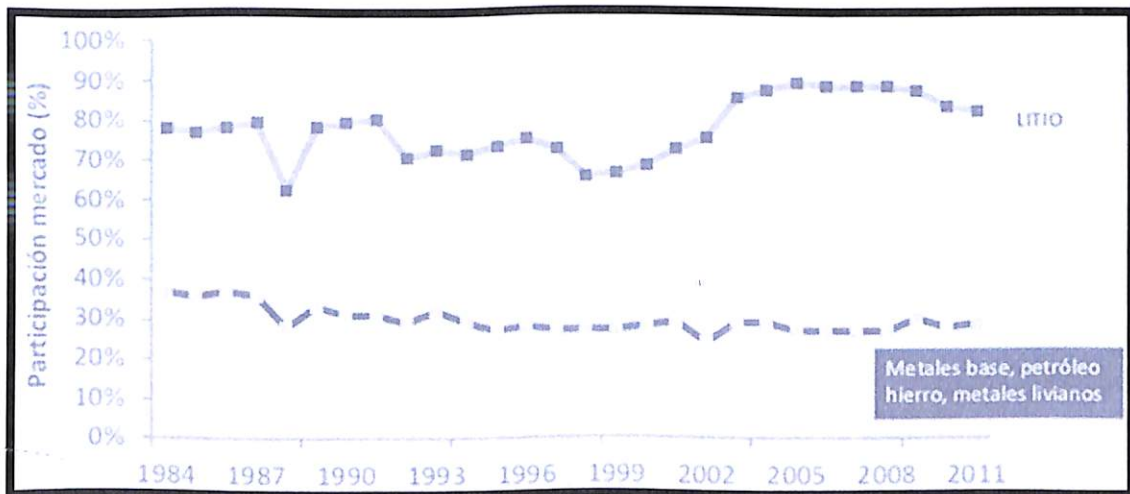


Gráfico N° 1. Participación del Litio en el Mercado.



1.2 Alcances Del Estudio

La finalidad de esta tesis es investigar, sobre la industria del Carbonato de Litio en Chile, como ha sido su participación en la oferta mundial, el consumo y proyecciones de la demanda, se centrara únicamente en los antecedentes del carbonato de litio, ya que es el producto más comercializable. Se analizará el precio histórico y actual del litio desde el año 90 al presente, tratando de obtener una proyección confiable del precio de este metal.

1.3 Objetivos Generales

Entregar los antecedentes más importantes que permitan comprender el interés creciente por el litio a nivel nacional y la evolución que este metal podría generar, y en este contexto se realizará un estudio de mercado, para mostrar que el litio puede ser un negocio importante para el País, analizando el precio del carbonato de litio, para ver cuáles son las expectativas en un tiempo futuro.

1.4 Objetivos Específicos

- Establecer la importancia del Litio con sus diversos usos y aplicaciones.
- Realizar un estudio sobre series de tiempo del precio del carbonato de litio, con análisis en su comportamiento y proyección.
- Formular un modelo para la proyección del precio del carbonato de litio a largo plazo, lo que implica a través de un proceso de investigación utilizando el software R.
- Realizar un análisis estadístico de los datos, definiendo sus medidas descriptivas y con ello determinar la mejor función de distribución de probabilidad.
- Generar pronósticos de los precios del litio.



1.5 Metodología de la Investigación

La metodología a emplear implica el desarrollo de varias etapas, como:

✓ Análisis del Mercado del Litio:

Se comenzará con un estudio detallado del mercado del litio, en él se describe como se determina el precio, la evolución histórica del mercado, y un análisis del comportamiento de la oferta y la demanda. El desarrollo de esta etapa, se basa en un trabajo de investigación y revisión bibliográfica, donde destacan como principales fuentes de información COCHILCO, Sernageomin, revistas y bibliografía especializada en Minería.

✓ Análisis del precio del Carbonato de litio:

Incluye la investigación y descripción de modelos de series de tiempo a utilizar. Para ello se selecciona el mejor ajuste de los datos. La etapa finaliza con la proyección del precio del litio a largo plazo. El desarrollo de esta etapa, se basa en información estadística obtenida en COCHILCO, y la aplicación en el software R, STATGRAPHICS y Crystall Ball.

✓ Discusión y Conclusiones:

Dados los dos pasos anteriores, el trabajo finaliza con las proyecciones a largo plazo, luego de eso se dará conocer las respectivas conclusiones y posibles mejoras a considerar.

CAPITULO II “ANTECEDENTES DEL LITIO”

2.1 Ubicación Geográfica del Litio

Localización de los grandes salares que posee Chile, siendo los de mayor consideración:

- Salar de Atacama: con 3000 km², se ubica a 55 km al norte de San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta.
- Salar de Surire: con 175 km², se ubica en el extremo norte de Chile, en la comuna de Putre, Región de Tarapacá.
- Salar de Punta Negra: con 250 km², se ubica en una depresión tectónica entre la cordillera de Domeyko y la cordillera de los Andes, Región de Antofagasta.

En la figura N°1 se muestra la localización de distintos salares distribuidos en la zona norte del país.

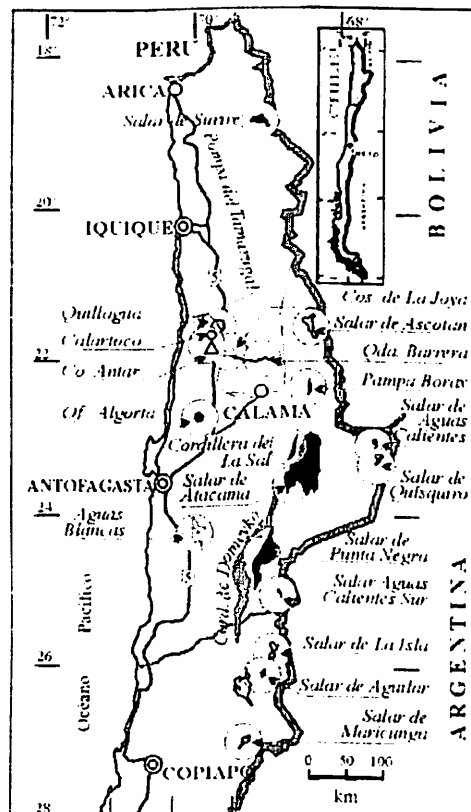


Figura 1. Localización de los Salares.



2.2 Características del Litio

2.2.1 Reseña histórica

El litio fue descubierto en 1817 por Arfvedson, en Estocolmo, Suecia y lo individualizó con el nombre de “Lithos” que es una palabra griega que significa piedra, para indicar que dicho elemento proviene de un mineral y que no se encontraba libre en la naturaleza.

Posteriormente en 1855, Bunsen y Matthiesen consiguieron la obtención del litio metálico libre, en grandes cantidades por electrólisis del cloruro de litio (LiCl), en un pequeño crisol de porcelana, usando un fino hilo de fierro como cátodo y una varilla de carbón como ánodo.

La primera producción comercial de minerales de litio se inició en USA en 1898 con el envío de 30 toneladas de Espodumeno proveniente de la mina ETTA de Dakota del Sur. Desde entonces otras minas comenzaron a producir minerales de litio y por el año 1910 la producción de USA alcanzó 238 toneladas procedentes totalmente de Dakota del Sur.

En 1953, la Comisión de Energía Atómica (AEC) requiere grandes cantidades de hidróxido de litio a partir de la cual se separó el isótopo litio-6 y reservado para su uso en la producción de armas termonucleares. Durante unos cinco años, el gobierno era el mayor consumidor de litio. Después expiraron los contratos de AEC en 1960, la industria de litio, se enfrentó a un gran exceso de capacidad, buscó desesperadamente a desarrollar sus pequeños mercados comerciales.

En 1984 la Sociedad Chilena de Litio (SCL), comenzó la producción de carbonato de litio de las salmueras en el Salar de Atacama con el procesamiento final que se realiza cerca Antofagasta, Chile.

En 1997 SQM (anteriormente Minsal SA) también comenzó a producir carbonato de litio desde el Salar de Atacama, y reducir el precio de venta de carbonato de litio más o menos por la mitad para ganar cuota de mercado.



Desde el año 2004 el precio del carbonato de litio comenzó a subir, debido a la fuerte demanda, principalmente impulsado por la aplicación de la batería. Esto obligó a los actuales 3 principales productores (SQM, Chemetall y FMC) a expandir sus operaciones.

2.2.2 Mineralogía del Litio

El litio encabeza la familia de los metales alcalinos en la tabla periódica. En la naturaleza se encuentra como una mezcla de los isótopos Li6 y Li7. Es el metal sólido más ligero, es blando, color blanco plata, se oxida rápidamente en aire o agua, de bajo punto de fusión y reactivo. Muchas propiedades físicas y químicas, que se darán a conocer a continuación, son tan o más parecidas a las de los metales alcalinotérreos que a las de su grupo.

El principal uso industrial del litio es en forma de estearato de litio como espesante para grasas lubricantes. Otras aplicaciones importantes de compuestos de litio son en cerámica, de modo específico en la formulación de esmaltes para porcelana; como aditivo para alargar la vida y el rendimiento en acumuladores alcalinos y en soldadura autógena y soldadura para latón.

El litio es un elemento moderadamente abundante y está presente en la corteza terrestre en 65 partes por millón (ppm). Esto lo coloca por debajo del níquel, cobre y tungsteno y por encima del cerio y estaño, en lo referente a abundancia.

➤ Propiedades Físicas

En el sistema periódico de los elementos, el litio encabeza el grupo I o grupo de los metales alcalinos, constituido por Li, Na, K, Rb, Cs, (Fr), los que se caracterizan por tener un sólo electrón en un orbital “s” más allá de la capa central electrónica.

El litio metálico, es de color blanco plateado y blando. Es el metal más liviano que se conoce, densidad de 0,531 g/cm³, de número atómico 3 y peso atómico 6,941. Posee el mayor punto de fusión (186°C) y ebullición (1336°C) del grupo de metales alcalinos;



posee además, el calor específico más alto de este grupo (0,784 cal/g°C a 0°C). En estado natural existen dos isótopos estables: Li7 en proporción de 92,4 % en peso y Li6 con 7,6 %.

Es interesante la comparación de los tres metales más importantes del grupo I, como son: Li, Na y K en sus propiedades más características porque pueden deducirse posibles usos industriales, métodos de obtención del metal o de sus compuestos, etc., por sus semejanzas en sus propiedades físicas y químicas. En la tabla número 1 se indican las propiedades físicas más relevantes del litio.

Propiedades Físicas	
Número atómico	3
Peso atómico	6,94
Punto de fusión, °C	186
Punto de ebullición, °C	1336
Peso específico a 0°C	0,534
Densidad (Kg/m3)	534
Volumen Atómico (cm3/mol)	12,99
Peso específico en el punto de fusión	----
Calor específico a 0°C	0,784
Resistividad a 0°C en ohmios/cm ³	8,55
Coefficiente de temp. De resistividad por °C	4,5x10 ³
Calor de fusión, cal/g	103,2
Dureza de Mohs	0,6
Calor de formación en Kcal/mol.g. hidróxido	116
Carbonato	54,23
Cloruro	98,7

Tabla N°1. Tabla detallada de las Propiedades Físicas.



➤ Propiedades Químicas

El litio, así como el resto de los metales del grupo I es fuertemente electropositivo lo que le confiere gran poder de reactividad frente a los agentes químicos. El núcleo de átomo está constituido por tres protones y tres o cuatro neutrones. Los tres electrones orbitando en dos orbitales, dos en el interno y uno en el extremo. Por esta razón posee una gran tendencia a eyectar el electrón extremo, haciéndolo extremadamente reactivo electropositivo.

El Li reacciona lentamente con el H₂O a 25 °C, el sodio lo hace en forma violenta, el potasio se inflama, mientras que el rubidio y el cesio lo hacen en forma explosiva. Es el único metal alcalino que reacciona con el nitrógeno a temperatura ambiente para producir un nitruro, el cual es de color negro. Los metales, Li y Mg, se pueden usar para separar N de otros gases.

Con él Oxígeno (O), reacciona en caliente, formando solamente el Li₂O (a veces trazas de Li₂O₂); en cambio con los otros metales alcalinos la oxidación puede continuar formando los peróxidos (M₂O₂) y en el caso del K, Rb y Cs se obtienen los superóxidos correspondientes (MO₂).

Con el H a la temperatura ambiente, el Li, igual que el resto de los metales alcalinos, no reacciona. El Li reacciona fácilmente con el H₂ a 600 - 700 °C formando el hidruro de litio (LiH), mientras que los otros metales alcalinos lo hacen a 350 - 400°C. El LiH es el más estable de los hidruros alcalinos, se funde antes de descomponerse y no es atacado por el oxígeno.

Por acción del NH₃ gaseoso a temperaturas inferiores a 70 °C, se forma una disolución azul intensa. Calentando el Li en corriente de NH₃ a 400 °C se produce la amida: LiNH₂. Por calentamiento de la amida se forma:



El Li, es el único metal alcalino que forma la imida Li₂NH.



El litio reacciona en forma directa con el carbono para producir el carburo. Se combina fácilmente con los halógenos y forma halogenuros con emisión de luz. Aunque no reacciona con hidrocarburos parafínicos, experimenta reacciones de adición con alquenos sustituidos por grupos arilo y dienos. También reacciona con compuestos acetilénicos, formando acetiluros de litio, los cuales son importantes en la síntesis de la vitamina A.

El compuesto principal del litio es el hidróxido de litio. Es un polvo blanco; el material comercial es hidróxido de litio monohidratado. El carbonato tiene aplicación en la industria de cerámica y en la medicina como un antidepresivo. Tanto el bromuro como el cloruro de litio forman salmueras concentradas que tienen la propiedad de absorber humedad en un intervalo amplio de temperaturas; estas salmueras se emplean en los sistemas comerciales de aire acondicionado.

Entre los compuestos más comunes que forma están:

- Carbonato de Li (Li_2CO_3)
- Bromuro de Li (LiBr)
- Cloruro de Li (LiCl) ;
- Hidróxido de Li (Li (OH))

2.2.3 Efectos del Litio sobre la salud

Efectos de la exposición al litio:

- ✓ Fuego: Inflamable. Muchas reacciones pueden causar fuego o explosión. Libera vapores (o gases) irritantes y tóxicos en un incendio.
- ✓ Explosión: Riesgo de incendio y explosión en contacto con sustancias combustibles y agua.
- ✓ Inhalación: Sensación de quemadura. Tos. Respiración trabajosa. Falta de aire. Dolor de garganta. Los síntomas pueden ser retrasados.
- ✓ Piel: Enrojecimiento, quemaduras cutáneas, dolor, ampollas.



- ✓ Ojos: Enrojecimiento, dolor, quemaduras severas y profundas.
- ✓ Ingestión: Calambres abdominales, dolor abdominal, sensación de quemadura, náuseas, shock o colapso, vómitos, debilidad.
- ✓ Vías de exposición: La sustancia puede ser absorbida por el cuerpo por inhalación de su aerosol y por ingestión.
- ✓ Riesgo de inhalación: La evaporación a 20°C es insignificante; sin embargo cuando se dispersa se puede alcanzar rápidamente una concentración peligrosa de partículas suspendidas en el aire.

Efectos de la exposición a corto plazo: La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo si es ingerido. La inhalación de la sustancia puede causar edema pulmonar. Normalmente los síntomas del edema pulmonar no se manifiestan hasta después de unas horas y son agravados por el esfuerzo físico. El reposo y la observación médica son por lo tanto esenciales. Debe ser considerada la administración inmediata de un spray apropiado, por un médico o una persona autorizada por él.

Riesgos químicos: Su calentamiento puede provocar combustión violenta o explosión. La sustancia puede arder espontáneamente en contacto con el aire cuando se dispersa en finas partículas. Cuando se calienta se forman vapores tóxicos. Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, ácidos y muchos compuestos (hidrocarburos, halógenos, halones, cemento, arena y asbestos) provocando peligro de incendio y explosión. Reacciona violentamente con el agua, formando gas hidrógeno altamente inflamable y vapores corrosivos de hidróxido de litio.

2.2.4 Efectos ambientales del Litio

El litio metálico reacciona con el nitrógeno, el oxígeno, y el vapor de agua en el aire. Consecuentemente, la superficie del litio se recubre de una mezcla de hidróxido de litio (LiOH), carbonato de litio (Li₂CO₃), y nitrato de litio (Li₃N). El hidróxido de litio

representa un peligro potencialmente significativo porque es extremadamente corrosivo. Se debe prestar especial atención a los organismos acuáticos.

2.3 Métodos de Producción del Litio

La obtención del litio proviene de dos fuentes principales, una de ellas es en yacimientos en vetas que son minerales de litio en rocas pegmatíticas y la otra es en Sales disueltas en salmueras de salares, de ellas se recupera el litio en forma de carbonato, cloruro o hidróxido.

En los yacimientos de minerales se explota la roca, y mediante distintos procesos como el chancado, molienda y flotación diferencial se obtiene un concentrado del mineral que contiene el litio, como el espodumeno o la petalita. Éste, a su vez, se utiliza directamente en el mercado técnico, por ejemplo, en procesos de la industria de vidrio y en la industria cerámica para fabricar esmaltes vidriados, y como material base en el mercado químico para la elaboración de compuestos de litio.

En la figura 2 se pueden ver los dos procesos de producción del litio. Ambos son la materia prima para la producción de químicos de litio utilizados tanto en los mercados técnicos como químicos.

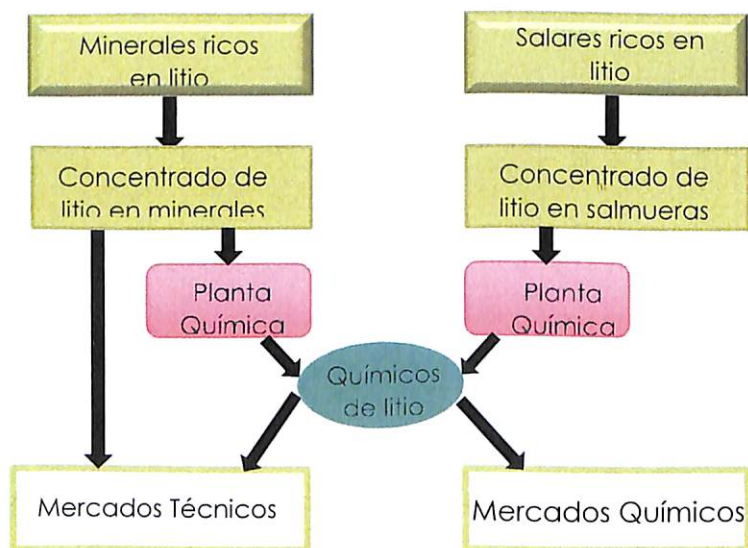


Figura 2. Fuentes principales con su cadena de producción.



Los químicos de litio que se producen a partir de los concentrados, son el carbonato y el hidróxido de litio. Ellos son la materia prima para la elaboración de una cadena de compuestos y productos especiales que se detallan en Fig.3.

Por su parte, en los salares se extraen las salmueras que contienen diversas sales disueltas que se separan mediante la evaporación solar. La solución restante es tratada en una planta química, donde se producen carbonato o cloruro de litio. A partir de estas sales se elaboran el litio metálico e hidróxido de litio, entre otros, que es la materia prima de una serie de químicos de litio como los halogenuros o el butil litio, entre otros. En este contexto, es preciso señalar que el cloruro y el hidróxido de litio también se obtienen como producto secundario a partir del carbonato de litio.

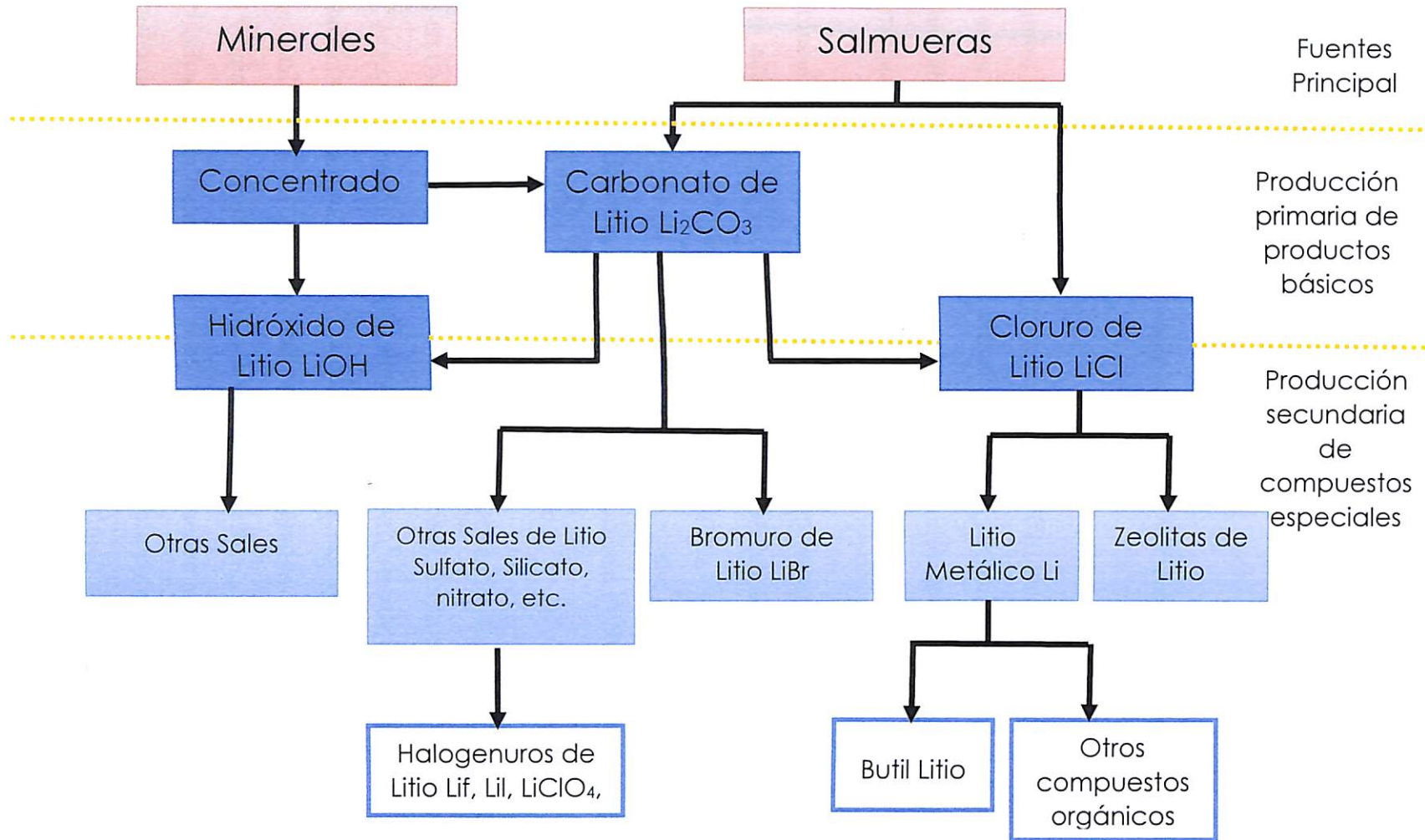
De la cadena de producción minera se obtienen los siguientes productos básicos de litio:

- Concentrado de minerales de litio
- Carbonato de litio,
- Cloruro de litio, e
- Hidróxido de litio.

Todos ellos tienen aplicaciones directas o son la base para la elaboración de una serie de compuestos derivados para aplicaciones específicas.



Figura 3. Cadena de Producción.





2.4 Yacimientos de Litio

Según investigaciones y la opinión de Varios expertos pronostican que en unos 40 o 50 años el mundo agotará sus reservas de petróleo. Para ese entonces habrá que encontrar fuentes alternativas para el transporte.

Los científicos ya creen haber encontrado la solución: vehículos híbridos o eléctricos que funcionan a base de una batería de litio.

Las proyecciones más conservadoras estiman que para 2020 habrá en el mundo unos 20 millones de estos autos, aunque otros elevan esa cifra a 200 millones. Además se debe considerar las baterías de litio que ya se usan en teléfonos celulares, computadoras y otros dispositivos electrónicos.

En lo que coinciden todos es en que el litio es el gran protagonista de una revolución energética. En este contexto, muchos miran con atención hacia el Cono Sur, donde se encuentra la mayor reserva de este metal alcalino del mundo, Bolivia, Chile y Argentina concentran más de la mitad de las 40 millones de toneladas de litio que, se estima, subyacen en el planeta, esto llevó a la revista estadounidense Forbes a denominar a la región como la "Arabia Saudita del litio,"

Los principales depósitos salinos del norte de Chile corresponden a campos de nitratos y salares, que, en conjunto, se localizan en las cuatro regiones del norte del país, entre los 18° y los 27°S, y comprenden un área de unos 250.000 km², desde 1.000 m.s.n.m. en el W, hasta casi 5.000 m.s.n.m. en el E. Los salares corresponden a depósitos salinos continentales localizados en cuencas endorreicas, generados debido a altas tasas de evaporación y bajas tasas de precipitación. Están compuestos por costra salina, salmuera y fracción clástica, cuyas extensiones y profundidad pueden variar muy ampliamente. Contienen carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos, en diferentes concentraciones, tanto en la costra salina como en la salmuera. Los aproximadamente 60 salares conocidos en el norte del país, se distribuyen en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. De acuerdo a su ubicación W-E son clasificados en salares de



la Cordillera de la Costa, de la Depresión Central, Preandinos y Andinos, y en conjunto contienen, principalmente, sales de litio, potasio, boro y sodio.

2.4.1 Distribución de los Salares

Los salares de principal interés por litio son los salares Preandinos y Andinos, que además tienen sales de potasio y boro. De ellos, el más importante y único en explotación actual para producir compuestos de litio, potasio y boro, desde la década del 80' del siglo 20, es el salar de Atacama, salar preandino ubicado en la Región de Antofagasta.

2.4.1.1 Salares Preandinos

Localizados en cuencas preandinas controladas tectónicamente, generalmente alineadas en dirección N-S, al oriente de la Precordillera y a unos 2.500 a 3.000 m s.n.m. El Salar de Atacama, Punta Negra, Pedernales y Maricunga corresponden a los más antiguos salares activos, con costras salinas bien desarrolladas que presentan zonación concéntrica de carbonatos, sulfatos y cloruros, y con salmueras con una alta concentración de sólidos disueltos, sobresaturadas en cloruro de sodio. Prácticamente toda la recarga de aguas superficiales y subsuperficiales, altamente concentradas, proviene de la Cordillera Andina. Son sistemas dinámicos, en los cuales la mena de interés es la salmuera, la cual migra y varía en volumen, concentración y distribución en el cuerpo salino, dificultando la determinación de sus propiedades físicas y químicas

2.4.1.2 Salares y lagos andinos

Localizados en el Altiplano, a más de 4.000 m.s.n.m., principalmente en cuencas controladas por el volcanismo, este tipo de salmueras están subsaturadas en cloruro de sodio y contienen Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ como los principales cationes. Los salares y lagos preandinos Corresponden a los depósitos más jóvenes y están espacial y

genéticamente relacionados con el volcanismo Pliocuaternario y afectados por la pluviosidad, estos se caracterizan por contener importantes concentraciones de sales de boro en la fase sólida, como Surire, Ascotán y Aguas Calientes, y sales de litio y potasio en la salmuera, como La Isla, Loyoques y Pujsa.

La figura 4 representa los sistemas de los salares, muy dinámicos frágiles, debido a su ubicación y características geológicas, climáticas y ambientales.



Figura 4. Sistemas de los salares.

Otros salares chilenos en que se ha comprobado la existencia de litio, son los salares de Pedernales, Maricunga y Surire. Además se sabe de la existencia de litio en el caliche con un contenido promedio de 0.038 gr. de litio por kilogramo de caliche. En la siguiente tabla N°2 se muestra los distintos salares con potencial de explotación.

Salares con Potencial de Explotación de Litio

Salar o Cuenca Cerrada	Región	Áreas Protegidas	Categoría	Superficie (km ²)	Altitud (msnm)	Media Li (e) (mg/l)
1 Atacama	II	Reserva y humedal	1	3 000	2 300	1.500
2 Maricunga	III	Parque y humedal	1	145	3 760	800
3 Pedernales	III	Área silvestre en trámite	1	335	3 370	400
4 La Isla	III	-	1	152	3 950	800
5 Punta Negra	II	-	1	250	2 945	350
6 Aguas Calientes 2 (Centro)	II	-	1	134	4 200	200
7 Pajonales	II	-	1	104	3 537	300
8 Quisquiro o de Loyoques	II	-	2	80	4 150	550
9 Aguilar	III	-	2	71	3 320	300
10 Tara	II	Reserva y humedal	2	48	4 400	500
11 Las Parinas	III	Área silvestre en trámite	2	40	3 987	400
12 Pujsa	II	Humedal	2	18	4 500	550
13 Aguas Calientes 1 (Norte)	II	Reserva y humedal	2	15	4 280	250
14 Capur	II	-	2	27	3 950	250
15 Aguas Calientes 4 (Sur-Sur)	II	Humedal	2	19.5	3 665	200

Tabla N°2. Lista de Salares con potencial de explotación.

Con el ingreso al mercado de la Sociedad Minera Salar de Atacama Ltda., MINSAL, en 1998, Chile pasó a ser el primer productor y exportador mundial de litio, completando las 30.000 toneladas de concentrado, equivalentes al 50% de la demanda del mercado mundial, cifra con la que la Sociedad Chilena del Litio, SCL, lidera las exportaciones de este mineral.

2.4.1.3 El salar de Atacama

El Salar de Atacama, es el salar más importante en cuanto a concentración y reservas de litio, se encuentra ubicado en el norte de Chile. Ubicado en una fosa tectónica, en la parte más baja de una cuenca cerrada de características endorreicas, entre la Precordillera y la Alta Cordillera. En la figura 5 se muestra la ubicación del salar de atacama



Figura 5. Salar de Atacama.

Es conocido como el mayor depósito salino del país, con una superficie alrededor de 3000 km², de una cuenca de drenaje interno, cuya superficie total es de más de 13.300 Km², ubicado entre las coordenadas 23° 30'sur y 68'15'oeste, a 2300 m n s m, clasificado como un salar Pre Andino. Es la cuenca evaporítica de mayor importancia del país, tanto en tamaño, cantidad y variedad, drenando una hoya hidrográfica diez veces mayor, como potencia de depósitos salinos detríticos, que supera los 1000 m. El salar posee múltiples accesos, de estos, los principales son los del camino paralelo a su lado este, conectando San Pedro de Atacama con Peine y el camino por el Llano de la Paciencia que penetra al salar en su parte suroeste. A la cuenca drenan tanto aguas subterráneas como superficiales que provienen desde la Alta Cordillera, tanto del este, norte y sureste. La recarga del oeste es irrelevante. Lo anterior hace que el salar esté activo tanto en el sector oriental, norte y sur, y por el contrario, su borde occidental esté fosilizado. La cuenca del Salar de Atacama, es lejos la mayor fuente productora de materiales de valor comercial. De especial importancia resulta el hecho de que en esta cuenca se depositan salmueras que, en su formación original están favorecidas por la



elevada gradiente geotérmica del sector. Debido a la recarga de soluciones ricas en sales y a la continua evaporación por las condiciones climáticas de extrema aridez, se ha formado un cuerpo central (núcleo) de aproximadamente 1400 Km², compuesto casi exclusivamente de NaCl. Esta masa salina porosa, se encuentran ocluidas salmueras saturadas en NaCl que contienen también altas concentraciones de otros elementos tales como, potasio, litio, magnesio, boro, sulfatos, etc., lo que ha determinado la importancia económica del salar. Un resumen de los contenidos químicos de las salmueras del Salar de Atacama teniendo una concentración media de litio de 1.7 g/L, una relación porcentual se entrega en la zona donde está ubicado el Salar de Atacama presenta características climáticas que determinan altas tasas de evaporación (aproximadamente 10 L/m² día, como promedio anual), razón esta del alto nivel en K, B y Li. Otro factor relevante es la escasa precipitación, según datos de la estación de Minsal, la precipitación media llega a 12.5 mm; la humedad relativa alcanza un promedio de 24%, la radiación solar alcanza a 6.3 x 10⁶ cal/m² día, la temperatura en verano oscila entre 10° y 35°C, mientras que en invierno va de -3° a 24°C.

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



Componentes	Gr./Lts	% Peso
Na	93.18	7.6
K	22.00	1.87
Mg	14.40	0.93
Ca	0.36	0.03
SO4	21.8	1.78
Cl	198	16.0
B	1.1	0.1
Li	4.1	0.33
Salinidad	250	25
Densidad	1.22	1.22

Tabla N°3. Composición química de salmueras del Salar de Atacama.

De acuerdo a los estudios realizados por Minsal en sus comienzos, las reservas a 40 m, con un 95% de confiabilidad en 790.7 Km² dieron una concentración media en potasio de 1.93% en peso, para sulfato se estimó 1.65%, para el ácido bórico del 0.31% y 0.14% en litio, esto permite cubicar el area con cifras, de 24.5 millones de ton en K; 2.1 millones ton en sulfatos; 1.67 millones de ton en litio y 4.04 millones de toneladas en ácido bórico. El origen principal del litio y las demás sales solubles presentes en el salar, entre ellas los iones Na, Ca, K, Mg, B, Rb, Cs, está en la lixiviación por aguas superficiales y sub-superficiales (fuentes termales) de las rocas volcánicas intermedias ácidas del norte del país y concentración por evaporación de las sales solubles resultantes del proceso. El volumen y calidad de estas reservas convierten este depósito como la fuente de litio económicamente más atractiva en la actualidad, junto con el Salar de Uyuni. En la tabla N°4 se realiza una comparación entre los salares con más importancia a nivel mundial.



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

Tabla N°4. Comparación de litio en diferentes salmueras del mundo.

2.5 Métodos de Extracción del Litio

Hoy en día, el litio se extrae de dos diferentes procesos, dependiendo si es una concentración de rocas pegmatíticas o salmueras de salares. Los procesos son:

- Evaporación Solar y concentración de salmueras extraídas de salares y la extracción posterior de carbonato o cloruro de litio.
- Explotación de minerales pegmatíticos de litio (p.ej. espodumeno, lepidolita y petalita) y su conversión a carbonato o hidróxido de litio.

2.5.1 Método de Extracción del Litio en las Salmueras

En el caso de las salmueras, uno de los métodos convencionales de extracción del litio es a través de evaporación solar. Su tiempo de elaboración se extiende entre 12 y 24 meses. Como su tiempo de proceso productivo es muy largo, han existido iniciativas para encontrar tecnologías que puedan reducir este tiempo y aumentar el aprovechamiento de las salmueras.

Descripción del proceso de extracción de evaporación solar utilizado actualmente, con los recientes métodos que aún no cuentan con experiencia comercial.



2.5.1.1 Evaporación de Pozos

La obtención del material parte primero por sacarlo desde la salmuera a través del bombeo por debajo de la corteza salina para ser depositado en pozas o lugares de evaporación solar. Las salmueras que no fueron utilizadas son reinyectadas al salar.

Estos lugares de evaporación solar constan de lagunas en las cuales son depositadas las concentraciones de litio obtenidas de la salmuera, pasando por diferentes etapas para obtener una salmuera concentrada con más de 4% de litio. En el caso de Soquimich, cuenta con pozas de 1.700 hectáreas aproximadamente. Este proceso demora entre 12 y 24 meses. El Desierto de Atacama, presenta un índice de evaporación solar de 3200 mm, y precipitaciones promedio de solo 15 mm al año, es decir, concentración de energía solar más que eficaz para la evaporación.

Luego, la solución concentrada es tratada en una planta química para purificarla, donde el producto es tratado con Na_2CO_3 , para desechar los mínimos residuos que no habían sido eliminados antes y posteriormente precipitar el litio en la forma de carbonato. También existe la posibilidad de obtener cloruro de litio directamente de la salmuera tal como se realiza en el Salar del Hombre Muerto, en Argentina. Actualmente, este método es el de menor costo de producción.

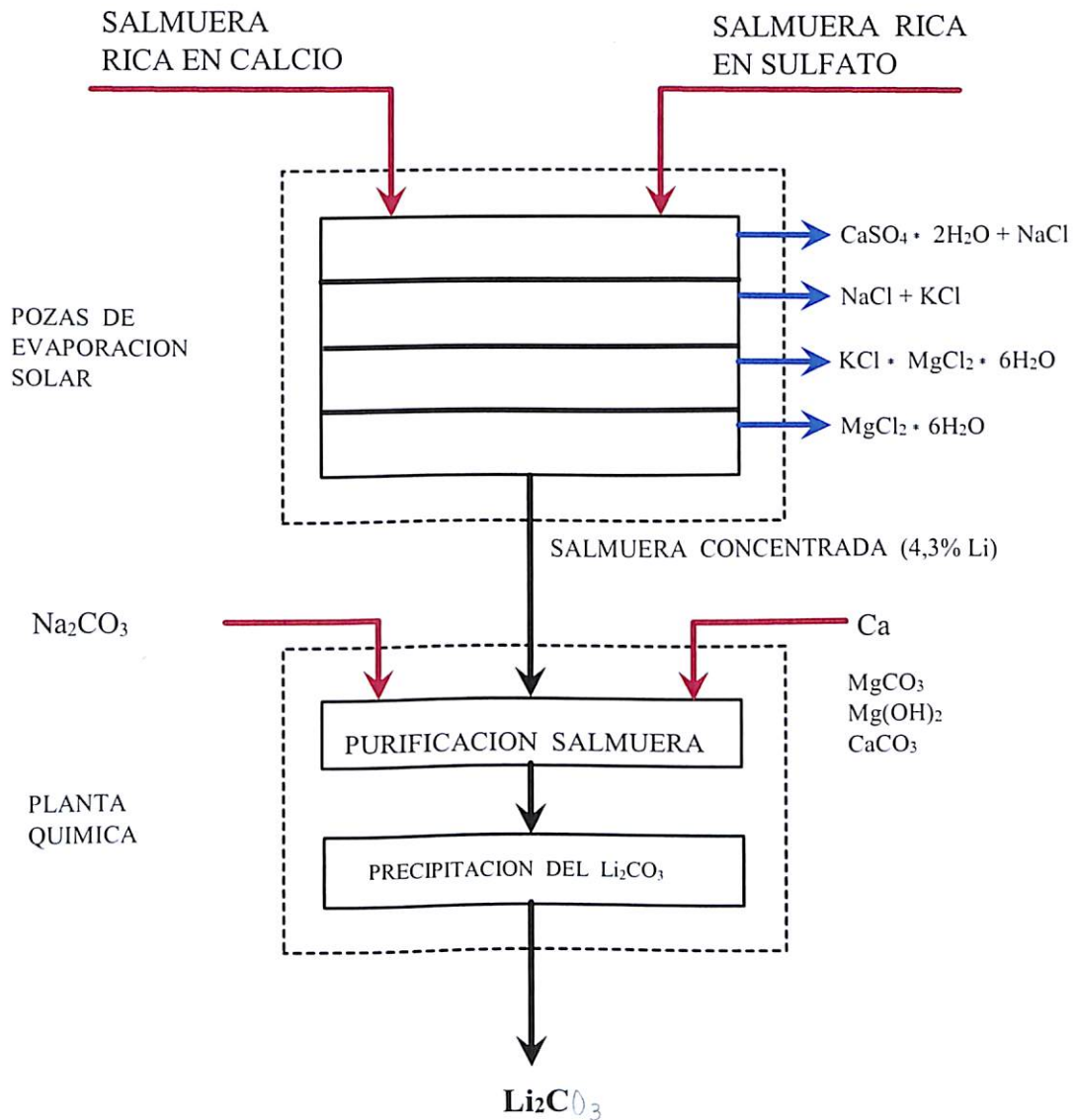


Figura 6. Proceso de producción de carbonato de litio a partir de la salmuera del Salar de Atacama, Sociedad Chilena del Litio (SCL).

2.5.1.2 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. 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, se encuentra en construcción un proyecto que pretende desviar la salmuera de la planta de energía antes de su reinyección, hacia equipos de procesamiento. Allí, la salmuera aún caliente fluiría a través de un medio que filtra las sales en cuestión de horas. Luego se purifica creando un carbonato de litio de alta pureza, figura 7.

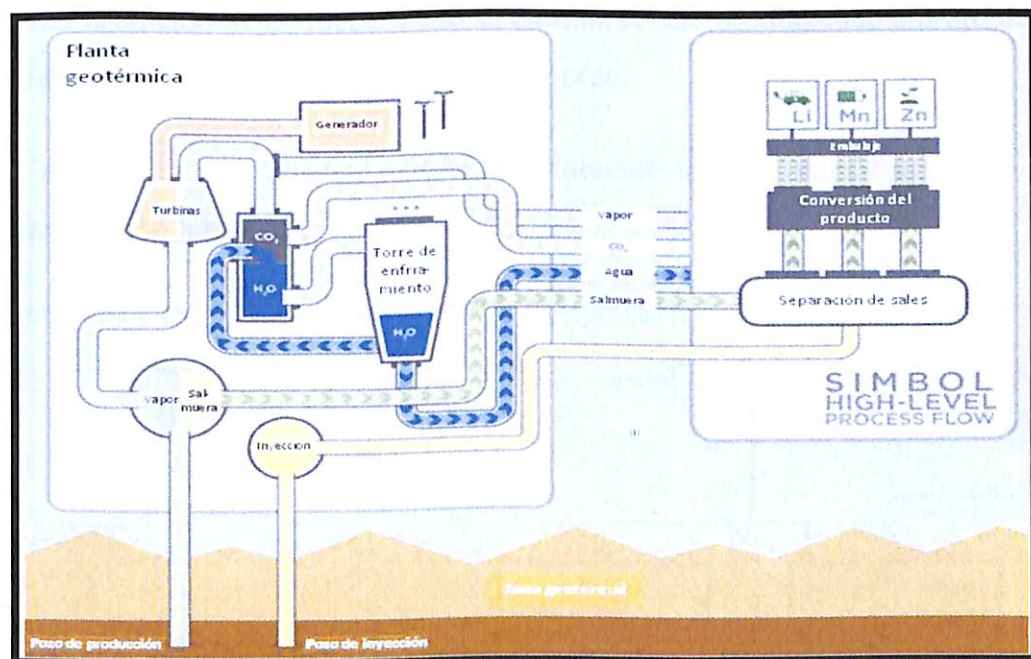


Figura 7. Flujo de proceso de la planta de osmosis inversa de litio.

Fuente: Simbol Materials.

La surcoreana POSCO ha desarrollado una tecnología para extraer en forma química el litio de una salmuera. Ésta reduce el tiempo de extracción a horas y aumenta la tasa de recuperación a 80%-99.99%. La misma tecnología puede utilizarse, además, para extraer magnesio, calcio, potasio y boro, entre otros, de salmueras de diversas fuentes. Actualmente la compañía está operando una planta piloto en el Salar de Maricunga en conjunto con Li3 Energy con una capacidad de 20 tpa de carbonato de litio.

2.5.1.3 Extracción por solvente (SX)

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. 8). 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.

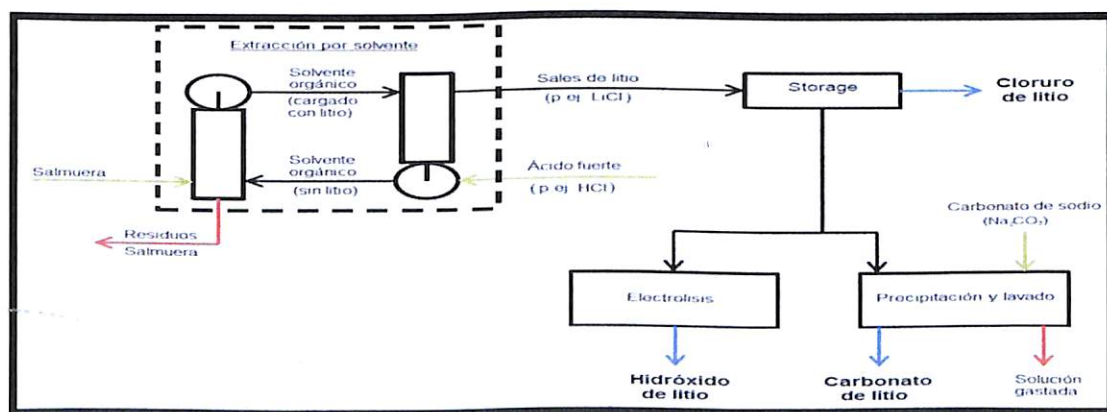


Figura 8. Proceso de extracción por solvente de litio, desarrollado por Bateman Lithium.

Fuente: Roskill (2013) en base a información entregada por Bateman Lithium.



2.5.2 Método de Extracción del Litio en Rocas Pegmatitas

La mayoría de los yacimientos de litio en pegmatitas se encuentran cerca de la superficie, lo que hace posible su explotación mediante métodos mineros de rajo abierto incluyendo perforación y tronadura. Para producir concentrados de espodumeno, petalita o lepidolita, el mineral primero es sometido al proceso de conminución con chancadores, seguido por la separación en medio denso, molienda y clasificación. Posteriormente los minerales son separados magnéticamente o vía flotación. Los últimos pasos son el filtrado, lavado y secado del concentrado obtenido.

El proceso cuenta con instalaciones de planta y equipamiento, intensivo en el uso de energía eléctrica. Por ende, su costo operativo es considerablemente mayor al de la evaporación solar.

2.5.2.1 Método de Extracción del Litio en Depósitos de Arcillas

Los depósitos de arcillas sedimentarias, como la hectorita, también son una fuente interesante de litio. Antiguamente no se creía que su explotación fuera una alternativa a los métodos existentes. Sin embargo, la compañía Western Lithium desarrolló un método pirometalúrgico que se basa en el tostado (*roasting*).

En este proceso la arcilla es mezclada y granulada con anhídrita (CaSO_4) y caliza, y luego esta mezcla es calentada a $1.050\text{ }^\circ\text{C}$ para así liberar el litio en forma de sulfatos y hacerlo soluble en agua (Fig. 9). De este modo se genera una salmuera desde la cual se extrae el carbonato de litio. Como subproductos se producirían sulfato de potasio y sodio.

Western Lithium estima el costo operacional en torno a US\$ 3.000 por tonelada de carbonato de litio, es decir, por debajo de la conversión de mineral actualmente aplicada en las plantas de China y comparable con las operaciones en los salares de Argentina y China.

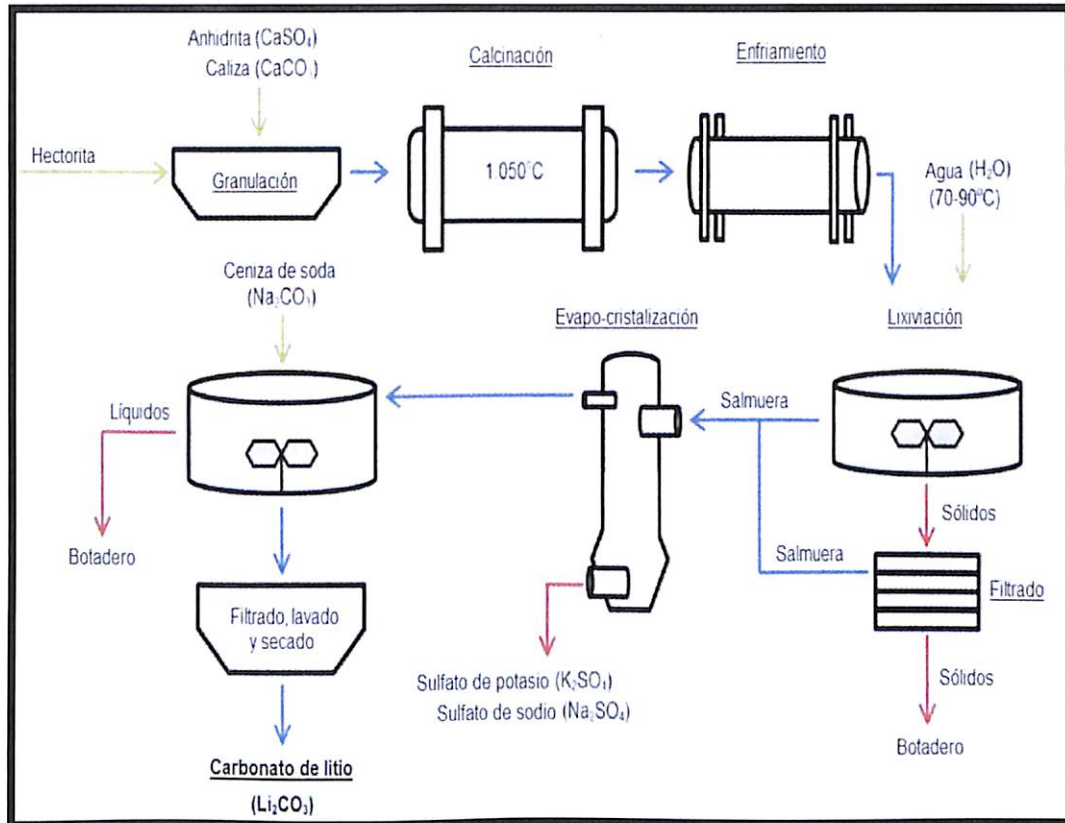


Figura 9. Producción de carbonato de litio a partir de arcillas sedimentarias (hectoritas).

Fuente: Roskill (2013) en base a información de Western Lithium

2.6 El proceso de la extracción de SQM en el Salar de Atacama

El proceso de extracción utilizado en el Salar de Atacama en Chile es un ejemplo de uno de los procesos más económicos, con el valor agregado que aun genera un producto de buena calidad. En el Salar de Atacama, la concentración de litio en salmueras es una de las más altas del mundo, llegando al 0,16 %. También posee condiciones climáticas óptimas para la evaporación.

La extracción del mineral que es directamente desde la piedra, es utilizada en el oeste de Australia en las minas de Greenbushes y McCattlin. Allí existen grandes yacimientos de piedras de pegmatita en las cuales hay una importante concentración de litio. En estos

depósitos también se extrae tantalio mediante el cual el litio es generado como subproducto. En la figura 10 el proceso de extracción de SQM

Como la extracción de litio de la piedra resulta más costosa y la concentración por lo general es baja, esta forma de extracción no ha recibido una inversión importante.

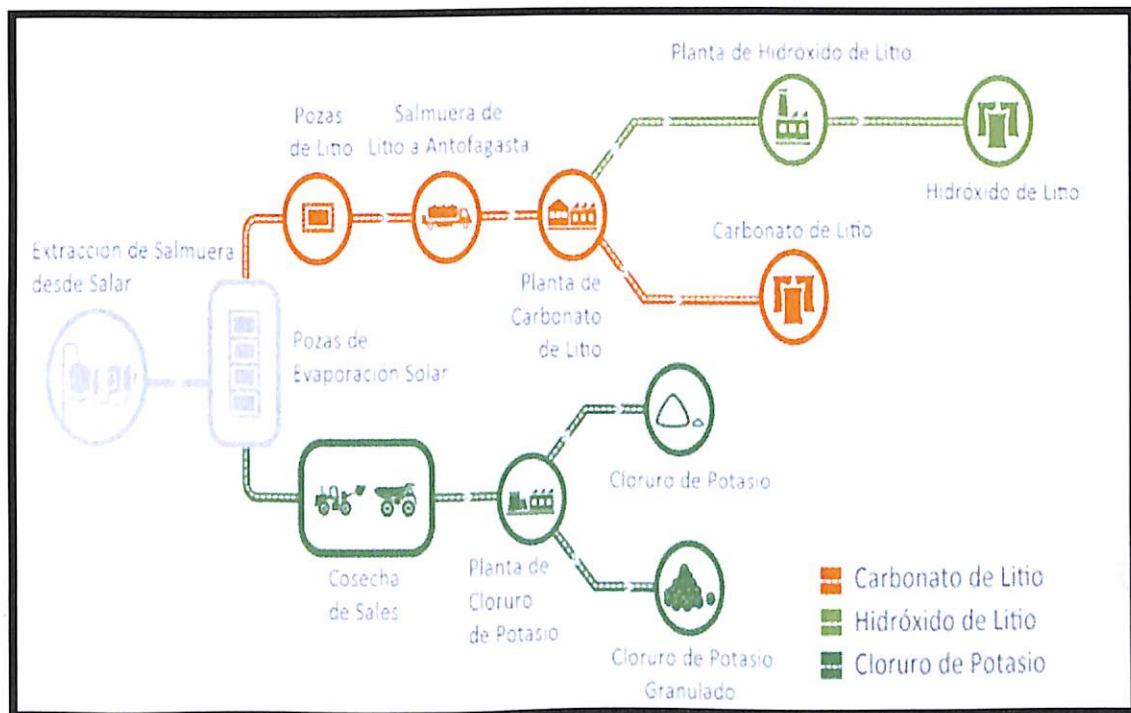


Figura 10. Proceso de Extracción de SQM.

2.7 Política del Litio

2.7.1 Marcos Legales y Regulatorios del Litio

El régimen jurídico de la minería en Chile permite a cualquier persona, ya sea un individuo o una empresa, nacional o extranjera para obtener una concesión minera. Para ello se debe seguir un procedimiento judicial no contencioso ante los tribunales con jurisdicción en la zona donde se encuentra la concesión. La concesión se otorga por una resolución judicial.



El sistema de propiedad minera en Chile está regulada principalmente por las siguientes leyes y reglamentos:

- Constitución de la República, el artículo 19 N°24, párrafos 6 al 10 (el derecho de propiedad sobre una concesión minera está protegida por la Constitución);
- Ley Orgánica Constitucional N°18.097 sobre Concesiones Mineras (de 21 de enero de 1982);
- Código de Minería (Ley N°18.248 de 14 de Octubre de 1983); y
- Reglamento del Código de Minería (de 27 de febrero de 1987).

Se hizo una distinción entre los minerales concesionables y no concesionables, la mayoría de los minerales se colocaron en la primera categoría, quedando el litio y los hidrocarburos como no concesibles.

Es por ello que el marco regulatorio de la extracción de litio en Chile es particular en el mundo, ya que considera el metal una sustancia de interés nacional cuya explotación solo es posible bajo condiciones especiales.

Pero no siempre fue así, ya que en el año 1932, se decretó el primer Código de Minería, donde el litio era un recurso concesible, sin embargo, con las potencialidades de generación eléctrica nuclear, que se vislumbraban en los años 50, nació el interés por los minerales radioactivos.

En el año 1955, CORFO firmaría un acuerdo de cooperación con EE.UU. para el desarrollo pacífico de la energía nuclear. Y en el año 1965 se crearía la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) creando la Ley N°16.319 donde estableció que toda exploración y/o explotación de material atómico natural, o que se utilizaran para la producción de energía nuclear u otros fines, no podrían ser objeto de ninguna clase de actos jurídicos sino cuando ellos se ejecuten o celebren por la CCHEN. Y en los años 70 se determinó que el litio es un material estratégico debido a su rol en los reactores de fusión nuclear.

Finalmente, el Decreto Ley N°2.886 de 1979 destinó al litio como reserva del Estado, por lo que no es susceptible de ser explotado a través de una concesión minera, salvo

aquellas propiedades establecidas con anterioridad. La agencia de Desarrollo Económico de Chile (CORFO) se otorgó algunas concesiones de litio que son anteriores a la reforma de 1980, y que ha autorizado a empresas privadas o empresas mixtas a explotar dicho mineral. Además define que la explotación requiere la autorización de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

Con la entrada en vigencia de la Ley N°18.097 Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras en 1982 y el nuevo Código de Minería en 1983, se definió que se entregan concesiones mineras sobre todos los minerales metálicos y no metálicos excepto los hidrocarburos, el litio y los depósitos submarinos. En el caso que el concesionario encuentre sustancias no concesibles en su yacimiento, debe comunicar al Estado su existencia, para que este decida si le exige o no la separación y entrega de las sustancias no concesibles. En la figura 11 se ilustra un desglose temporal de la política del litio en el tiempo

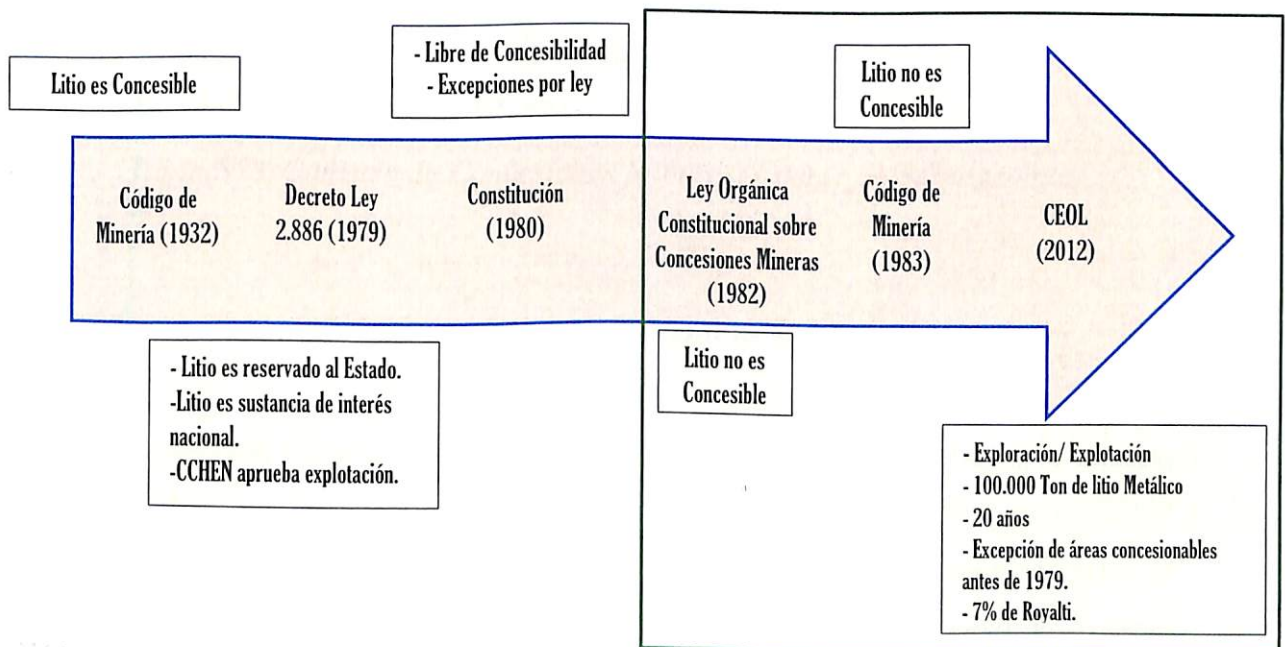


Figura 11. Línea de tiempo de la política del litio.

Así es que en la actualidad, únicamente los tenedores de las concesiones establecidas según el Código de 1932 (Tabla N°5) pueden extraer litio, aunque su comercialización la debe autorizar la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), de no contar con este tipo de pertenencias, solo el estado y sus empresas tienen el permiso de explotarlo.



En cambio, las compañías privadas sin propiedad minera de acuerdo al código 1932 solo pueden explotar litio, si el estado les otorga un permiso exclusivo a través de un Contrato Especial de Operación (CEO) o a través de concesiones administrativas. A raíz de lo anterior, nace el CEO de litio (CEOL).

En la tabla N°5 se muestran algunas empresas que mantienen concesiones constituidas antes de 1979 en los quince salares con potencial de explotación de litio.

Salar	Tenedor de concesiones entre 1932 y 1979
Salar de Atacama	Corfo
Salar de Maricunga	Codelco Salvador Simbalik Minera Kainita Otros
Salar Pedernales	Codelco Salvador
Salar de Quisquiro	Minera Fénix
Salar de Aguilar	ENAMI

Tabla N°5. Catastro de Concesiones Mineras, Fuente de Sernageomin.

2.7.2 Políticas públicas internacionales en el ámbito del litio

La presente sección resume las políticas públicas que, en el ámbito del litio, se observan en los principales países productores. Como se aprecia en la Tabla N°6, en la mayoría de los países en los cuales se explota el litio, o que cuentan con proyectos en desarrollo, este mineral se define como concesible o explotable, tal como es el caso de Australia, Canadá y Estados Unidos.

País	Propiedad	Legislación	Impto. a la	Royalty
------	-----------	-------------	----------------	---------



		Renta	
Chile	No	Litio considerado estratégico y debe explotarse por el Estado o sus empresas o con contratos especiales. En concesiones anteriores al año 1979 se puede extraer.	-6,8% para litio.
	Concesible		19% - Arriendo a CORFO (SQM)
Argentina	Concesible	Considerado un recurso estratégico en las provincias de Catamarca, Salta y Jujuy. En estos casos los proyectos son aprobados por un comité de expertos.	35% 3% - 7%
Bolivia	No Concesible	Por decreto, desde 6 de diciembre de 2010 todas las concesiones mineras vigentes pasan a ser “transitorias”. Litio pertenece al Estado quien lo administra.	25% 12,5%
Australia	Concesible	Minerales son del Estado. El litio es tratado como cualquier otro producto mineral.	30% 5%
Canadá	Concesible	Minerales son del Estado.	16,5% 10% – 16%
EEUU	No se requiere concesión	Dueño de un terreno es dueño del subsuelo. Al explotar litio, extrae minerales de su propiedad.	15 – 35% --

*Tabla N°6. Políticas públicas en el ámbito del litio en otros países
 Fuente: Cochilco.*



2.7.3 Contrato Especial

Con el objetivo de potenciar la minería del litio en el país y fortalecer la posición competitiva de Chile en este sector, a principios de 2012 el gobierno a través del Ministerio de Minería, anuncio la licitación de un Contrato Especial de Operación de Litio (CEOL).

Su propósito es explorar, explotar y beneficiar una cuota de hasta 100.000 toneladas de litio metálico, en cualquier área del territorio nacional, con excepción de aquellas zonas cubiertas por concesiones mineras constituidas conforme al Código de Minería del año 1932, y durante un periodo de 20 años contados desde el momento de la suscripción del contrato. A cambio, el contratista debe transferir al Estado el 7% de las ventas brutas anuales de litio, medido en carbonato de litio equivalente.

Su adjudicación se basa en la mayor oferta económica, además del cumplimiento de los requisitos administrativos establecidos en las bases de licitación.

Para desarrollar un proyecto de litio en el marco del CEOL, el adjudicatario deberá seguir el mismo procedimiento como para cualquier otro recurso minero, es decir, constituirse en una propiedad minera o, en su defecto, adquirir o arrendar una propiedad ya existente, o asociarse a un actual tenedor de concesiones. Además debe realizar los estudios y obtener las aprobaciones administrativas correspondientes.

El primero en adjudicar este Contrato Especial fue la empresa de SQM licitado en el país, donde explotarán una cantidad total de 100 mil toneladas de litio, lo que significa unas 532 mil toneladas de carbonato de litio, por un período máximo de 20 años, a partir de la fecha de firma del contrato.

A pesar que en Chile, el litio no es concesible, por ser un mineral estratégico, el uso de este contrato CEOL, ha resultado ser exitoso en su administración y colocación del producto a los precios actuales. Hasta el 2004, el precio de la tonelada de carbonato de litio no superaba los US\$ 2.500, hoy su valor es cerca de los US\$ 5 mil y generará en



los próximos 20 años ingresos por unos US\$ 3.192 millones, es decir, unos US\$ 159 millones anuales.

2.8 Progreso de La Minería del Litio

El litio es un mineral que se puede obtener tanto de mineral de roca y de salmueras continentales, y durante los años 70's el Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile ha estado estudiando los minerales que contiene el Salar de Atacama, y como resultado de estos estudios, CORFO solicitó, mensuró y durante el año 77 obtuvo 59.820 pertenencias mineras sobre gran parte del Salar. Después de un tiempo CORFO renunció a 27.052 pertenencias, quedando solo con 32.768, que hasta el día de hoy las mantiene.

Para explotar de manera eficiente el litio disponible en el Salar, la autoridad necesitaba realizar fuertes inversiones en capital e incorporar tecnología, es así que, en el año 1975, CORFO suscribió un contrato básico con la empresa Foote Mineral Co.

En el año 1980, se forma la Sociedad Chilena del Litio (SCL) a través de las empresas Foote Mineral Co. aportando con un 55% de las inversiones, y CORFO con un 45%, con la idea de explorar y vender productos de litio procedentes de las salmueras del Salar de Atacama hasta por 200.000 toneladas métricas de litio metálico. Durante el mismo año 1980, la CCHEN autorizó a SCL para que vendiera, en términos competitivos, toda clase de productos de litio, salvo aquellos destinados a la creación de energía nuclear por fusión, luego más adelante este contrato expiró en el año 2001, pero se renovó hasta el año 2014 bajo las mismas condiciones del contrato firmado en 1980, es decir autorizando una venta acumulada de 200.000 toneladas métricas de litio metálico en el periodo en cuestión, y renovación por períodos de cinco años hasta completar el límite de extracción autorizado.

Más tarde, entre los años 1988 y 1989, CORFO vendió el 45% de su participación a Foote Mineral Company por US\$15.2 millones, no obstante, el contrato establece que una vez finalizadas las operaciones, las pertenencias deben volver a propiedad de CORFO.



En el año 1986, se conformó la empresa Minsal Ltda, entre CORFO con un 25%, Amax con un 63.75% y Molymet con un 11.25%, para explorar, explotar y comercializar litio, potasio, boro y cualquier otro producto o subproducto proveniente de las salmueras del Salar de Atacama, el contrato estableció limitar la producción total de litio a 180.100 toneladas métricas de litio metálico en un plazo de 30 años, y así evitar las ventas para fines de fusión nuclear y otorgar a la CCHEN una opción preferente para comprar litio. Además en el mismo contrato, CORFO se comprometió en aportar un máximo de 14.814 pertenencias OMA, las que finalmente entregó en arriendo.

Soquimich (SQM) se creó en el año 1993, a partir de que las empresa Amax y Molymet que fueron reemplazadas por esta, y por ello se amplió en el plazo de todos los acuerdos adoptados inicialmente hasta el año 2030. Frente a esto se dejaron sin efecto el aporte y arrendamiento de las pertenencias pactadas en 1986 y CORFO dio en arrendamiento 16.384 pertenencias OMA a MINSAL en vez de las 14.814 que habían quedado en acuerdo.

Durante el año 1995, la CCHEN confirmó la aprobación de producir y comercializar sales de litio provenientes del Salar con que había favorecido a Minsal en 1986, por 30 años desde la primera venta comercial y hasta por un máximo acumulado de 180.100 toneladas métricas de litio equivalente, se reservó la primera opción de compra de este material, y se reiteró la prohibición de usar o transferir litio para efectos de fusión nuclear. Todo lo extraído de litio, luego procesado, sus concentrados y derivados debían ser aprobados directamente por la CCHEN, donde quedo constancia de todo acto jurídico. En este mismo año, CORFO vendió la totalidad de sus acciones a Minsal S.A.

En la actualidad, CORFO cuenta con pertenencias mineras en el Salar de Atacama, en las cuales se obtuvo la concesión de litio antes de la entrada en vigor el código minero de 1979. CORFO tiene en arriendo parte de estas pertenencias a SCL y SQM, y por contrato, imposibilitado a arrendar o explotar para sí, el resto de las pertenencias. En la tabla número 7 se describe el avance de la minería del litio



Tabla N°7. Progreso de la minería del litio.

- 1984 Primera producción de salmuera concentrada en la Planta Salar de Atacama.
Primera producción de carbonato de litio en la Planta Química La Negra.
- 1988 Entra en operación la Planta de Cloruro de Potasio en el Salar de Atacama.
- 1998 Comienza la producción de cloruro de litio en la Planta Química La Negra.
- 2000 Ampliación del sistema de pozas de evaporación solar en la Planta Salar de Atacama.
Ampliación de la Planta de Cloruro de Potasio en el Salar de Atacama.
- 2004 Primera producción de carbonato de litio de alta pureza en la Planta Química La Negra.
- 2009 Inicio del proceso de producción de cloruro de litio directo en la Planta Química La Negra.
- 2011 Inversión de más de US\$ 300 millones en nueva planta para la producción de carbonato de litio grado batería, que comenzará a funcionar en 2015 en la Planta Química La Negra.
- 2014 Entra en operación la Planta de Secado de cloruro de potasio en el Salar de Atacama.

2.9 Royalties y los aportes económicos al país

La explotación del Salar de Atacama está sujeta al cobro de una serie de impuestos específicos y compromisos con el Estado. Las empresas productoras que operan en el Salar como Soquimich (SQM) y la Sociedad Chilena del Litio (SCL), pagan un impuesto específico, como lo es el royalty, que es cobrado trimestralmente y corresponde a un 6,8% de las exportaciones de litio, como carbonato, hidróxido o minerales. Adicionalmente, SQM paga USD 15.000 anuales por concepto de arriendo de pertenencias.

La explotación del salar también establece el pago de royalty por extracción de otros minerales como potasio, ácido bórico, magnesio, entre otros, los cuales van desde los 1,8% de las exportaciones de potasio, borio y sulfato a 10% por magnesio, que es vendido conjuntamente por SQM y SCL.

2.10 Reservas y Recursos de Litio

Existen diversas fuentes de litio en todo el mundo, entre ellas los minerales de litio en rocas pegmatíticas y sedimentarias, y las salmueras en salares, campos de petróleo y geotermales, y el agua del mar. En la actualidad, la extracción a partir de pegmatitas y salmueras de salares es la más común.

Chile cuenta con 23% de las reservas totales de Litio y con el 39% de las reservas disponibles como salmuera, las que tienen un menor costo de extracción de Litio. En el gráfico N°2 se muestra en detalle las reservas mundiales.

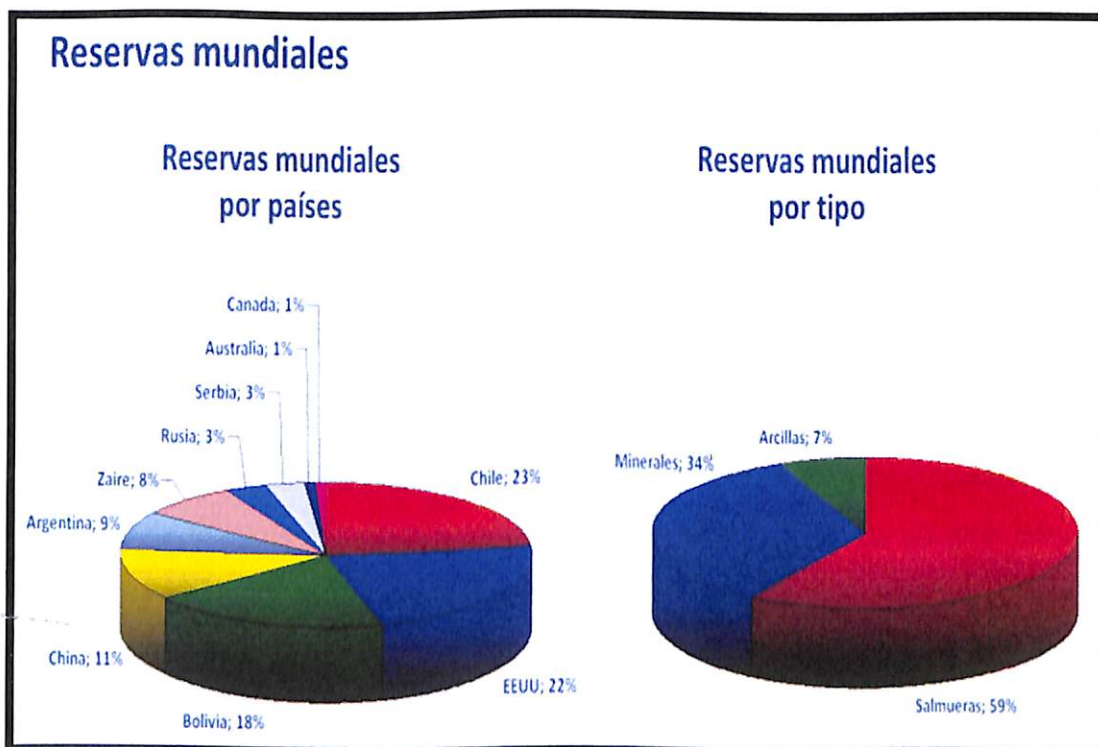


Grafico N° 2. Reservas Mundiales

2.10.1 Triángulo del litio

El triángulo, cuyos ejes o vértices forman e incluyen el Salar del Hombre Muerto (Argentina), el Salar de Uyuni (Bolivia) y el Salar de Atacama (Chile), sumados a los salares que se ubican dentro del área comprendida, se ubican todos en altura, más precisamente en la región de la Puna de Atacama. Según expertos, la zona del triángulo contiene recursos de litio equivalentes al petróleo existente en Arabia Saudita. Como se muestra en la figura 12 la distribución de las reservas de litio.

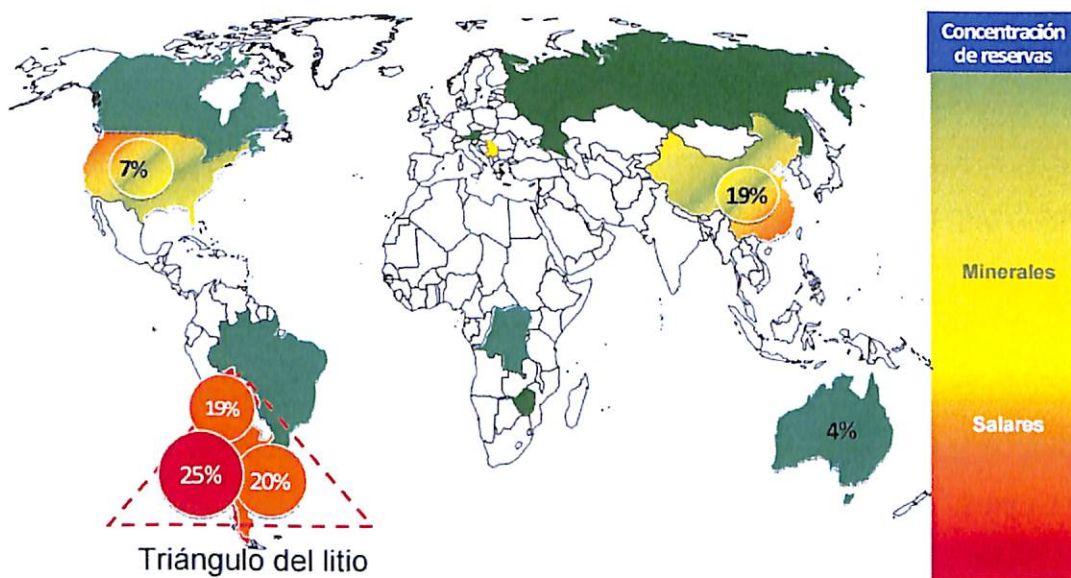


Figura 12. Triangulo del Litio

Las estimaciones de reservas y recursos de litio en los últimos cinco años varían entre 17 y 56 millones de toneladas de litio contenido. Ello denota el interés que el litio está suscitando debido a sus potenciales aplicaciones futuras, por lo que un gran número de empresas a través del mundo tiene prospectos de exploración y está interesada en ingresar al sector.

Ello no considera el litio que podría recuperarse a partir de agua de los océanos. De acuerdo a Yaksic (2009) los costos de explotación del carbonato de litio a partir del agua de mar eran entre 7 y 10US\$/lb (dólares del año 2009), obtenidos originalmente



por Steinberg y Dang (1975), cuando había grandes expectativas de demanda para los reactores de fusión nuclear y se pensaba que habría insuficientes yacimientos convencionales de litio para abastecer dicha demanda.

Considerando que se recuperaba el 20% del litio de los océanos, los recursos eran de 44,8 billones (miles de millones) de toneladas. Aun cuando estos costos fueron estimados en 1975, con menores posibilidades tecnológicas que las existentes en 2014, es difícil pensar que en el futuro cercano haya suficiente demanda para explotar el litio del océano. Antes habría que agotar cuantiosas reservas y recursos disponibles con menores costos.

Sin embargo, y a pesar de estos datos, el cómo se determina o se define que es recurso o reserva y como debe ser cuantificado, es una tarea engorrosa, es por esto que diferentes autores han expuesto diferentes puntos de vista.

En el año 2009 una revisión de los valores de reservas y recursos citados para el litio y concluyeron que las estimaciones para reservas de litio variaban entre 4 y 30 millones de toneladas de litio contenido, y que las estimaciones para los recursos de litio variaban entre 8 y 56 millones de toneladas. Weil y sus coautores concluyeron que la utilización de la nomenclatura por parte de diferentes actores variaba hasta el punto en que incluso las estimaciones de reservas eran muy disímiles. Por otra parte, las estimaciones de recursos incluían aquellos valores medidos, indicados e inferidos. CRIRSCO definía un método para clasificar el tonelaje y ley de reservas y recursos, los que tenían que ser reportados para cada sitio por las compañías que realizaban la exploración o que operaban los sitios. De acuerdo a Weil (2009), las compañías no respetaron este estándar y por ello la comparabilidad de las cifras reportadas era restringida.

La secuencia más consistente en la evolución de las reservas y recursos de litio estaba compuesta por el Panel convocado por el National Research Council (NRC) de los Estados Unidos en 1976, la estimación de Evans en 1986, y las nuevas estimaciones de



Evans en 2008 y 2009. La estimación de 1978 era de 10,6 millones de toneladas de litio contenido, en 1986 Evans aumentó la estimación a 36,7 millones de toneladas, como se detalla en la sección sobre el período desde 1967 hasta la entrada de Chile en la industria. La cifra de Evans de 1986 sobre estimó los recursos de litio presentes en Hectorita en los Estados Unidos, los que colocaba en 15,1 millones de toneladas. En sus trabajos de marzo y julio 2008 y en 2009 Evans adjudicó sólo 2 millones de toneladas de litio metálico contenido a Hectoritas, con lo que redujo el valor de recursos y reservas a 28, 29,8 y 30,1 millones de toneladas de litio respectivamente. En su última estimación, de 2009, Evans añade a los recursos aquellos de las salmueras geotérmicas llegando a valorarlas en un millón de toneladas, y de las salmueras petrolíferas, llegando a valorar estas en 750 mil toneladas de litio. Además, Evans agregó 850 mil toneladas de jadaritas en 2009, correspondientes a un informe de Rio Tinto de un nuevo mineral localizado cerca de Belgrado en Serbia. Esto no incluye el yacimiento de litio reportado en 2010 en Afganistán, el que tendría 36,8 millones de toneladas de litio contenido, completando recursos mundiales por 92,1 en un escenario optimista.

De acuerdo a Evans (2008) y Solminihac (2009), SQM habría realizado exploraciones que confirman la existencia de salmueras ricas en litio y otras sales hasta 200 metros de profundidad, las que confirmarían la cifra de 6,9 millones de toneladas, mientras que anteriormente había sondajes sólo hasta 40 metros de profundidad, lo que se estimaba en 4,29 millones de toneladas. En la tabla número 8 se muestra las reservas y recursos establecidas por Evans desde 1976 a 2012.



Panel EEUU

	<i>1976</i>	<i>Evans 1986</i>	<i>Evans 2008-a</i>	<i>Evans 2009</i>	<i>Evans 2012</i>
<i>Pegmatitas</i>	<i>5.939.000</i>	<i>7.430.000</i>	<i>7.654.100</i>	<i>7.654.100</i>	<i>9.930.000</i>
Carolina del Norte (operaciones anteriores)			230.000	230.000	230.000
Carolina del Norte sin desarrollar	3.150.000	3.150.000	2.600.000	2.600.000	2.600.000
Barraute, Quebec	109.000	109.000	90.000	90.000	230.000
Bernic Lake, Manitoba	47.000	47.000	18.600	18.600	
Otras Canadá	112.000	512.000	147.000	147.000	430.000
Bikita, Zimbabue	113.000	113.000	56.700	56.700	56.700
Manono, Zaire	2.340.000	2.340.000	2.300.000	2.300.000	2.300.000
Greenbushes, Australia		1.100.000	223.000	223.000	1.500.000
Mount Marion, Australia			19.800	19.800	93.500
Mount Cattin, Australia (Galaxy)	41.000	41.000	20.000	20.000	90.000
Karalpa, Austria			100.000	100.000	134.000
Larritta, Finlandia			14.000	14.000	14.000
Varias, Rusia			1.000.000	1.000.000	1.000.000
Varios Brasil	18.000	18.000	85.000	85.000	185.000
Varias, China			750.000	750.000	750.000
Varias en resto de EEUU, Canadá, Namibia, Argentina	9.000	9.000			317.000
<i>Salmueras continentales</i>	<i>4.672.000</i>	<i>9.908.000</i>	<i>17.590.000</i>	<i>17.590.000</i>	<i>25.160.000</i>
Silver Peak, Nevada	118.000	118.000	40.000	40.000	40.000
Salar de Uyuni, Bolivia		5.500.000	5.500.000	5.500.000	8.900.000
Salar de Hombre Muerto, Argentina			850.000	850.000	850.000
Salar de Rincón, Argentina			1.400.000	1.400.000	1.400.000
Salar de Olaroz, Argentina			300.000	300.000	1.200.000
Salar de Cauchari, Argentina					1.520.000
Sal de Vida, Argentina					1.020.000
Salar de Diablillos, Argentina					530.000
Salar de Atacama, Chile	4.290.000	4.290.000	6.900.000	6.900.000	6.900.000
Salar de Maricunga, Chile					200.000
China y Tibet (varios)			2.600.000	2.600.000	2.600.000
Searles Lake, Great Salt Lake, EEUU	264.000	264.000			
<i>Total otros</i>	<i>0</i>	<i>19.100.000</i>	<i>3.066.000</i>	<i>4.600.000</i>	<i>4.800.000</i>
Salmueras geotérmicas		4.000.000	316.000	1.000.000	1.000.000
Salmueras petrolíferas			750.000	750.000	850.000
Hectoritas		15.100.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000
Jadaritas				850.000	950.000
Total	10.611.000	36.438.000	28.310.100	29.844.100	39.890.000

Tabla N°8. Indica los años de las estimaciones, su autor, y los tonelajes de reservas y recursos.



La distribución de reservas y recursos según origen del mineral en 2009 fueron reportadas por Evans en 2009, y sumaban 29,8 millones toneladas de litio contenido. De estas un 59% estaba en salmueras continentales, 25,6% en pegmatitas, 3,3% en salmueras geotérmicas, 6,6% en hectoritas, 2,5% en salmueras petrolíferas, y 2,8% en jadaritas.

De acuerdo a Evans (2009) siete yacimientos en el mundo daban cuenta del 72% de las reservas y recursos en 2009. Estos eran, el Salar de Atacama en Chile, con el 23% de reservas y recursos, el salar de Uyuni en Bolivia, con un 18,4%, el yacimiento de pegmatitas en Kings Mountain, Carolina del Norte, con 8,7%, el yacimiento de pegmatitas de Manono en Zaire, con un 7,7%, el Salar de Zhabuye en Tíbet un 6,7%, y los Salares de Rincón y Hombre Muerto en Argentina, con un 7,5%. Como ya se mencionó, Kings Mountain fue cerrado por Chemetall, Manono está prácticamente inexplorado y además tendría costos altos debido a la distancia de transporte del mineral hasta puerto, y los Salares de Olaroz, DXC del Tíbet, Caucharí, Diablillos, Salinas Grandes, y Uyuni están inexplorados, aunque en el primero hay una planta piloto. Entre los siete mayores yacimientos, hay sólo dos en explotación, el Salar de Atacama y el Salar de Hombre Muerto.

Por país la distribución de reservas y recursos en 2009 eran, según Evans, los Estados Unidos con 25%, Chile con 23,1%, China con 11,2%, Argentina con 8,5%, Zaire con 7,7%, con un 24,5% distribuido en otros países.

Según Gerry Clarke (Clarke 2011) quien publicó el Lithium Availability Wall Map 2011, habría más de 100 proyectos en diversas etapas de desarrollo en junio 2011, con 10 proyectos iniciando producción entre 2010 y 2014, la mayor parte de los cuales no estaban considerados en el listado de yacimientos con recursos de litio de Evans en 2009. Además, las cuatro mayores empresas del mundo (Talison, SQM, Chemetall, y FMC) aumentarían su producción en 55% entre 2011 y 2015.

De todas formas, los recursos de litio alcanzaban en 2009, según la estimación de Evans, para producir dicho metal durante 1.150 años al ritmo de explotación de dicho año. Cuando se considera una creciente demanda debido a automóviles, los recursos alcanzarían para varios cientos de años (Modelo de demanda desarrollado por la empresa Signum Box Inteligencia de Mercado). La última estimación de Evans (2012) deja de manifiesto que Chile se quedó significativamente atrás en recursos, pasando desde tener un 40% de estos en 1976 a 24% en 2008, y a 17,8% en 2012. Cuando no hay nuevos proyectos productivos en el horizonte, la exploración se estanca.

2.11 Usos del Litio

2.11.1 Baterías de Litio

La batería de litio es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica. Entre sus principales características se encuentran la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y su resistencia a la descarga.

La tecnología Li-ion (recargable) se caracteriza por su alta densidad de energía, tanto en peso como en volumen, haciendo posible la fabricación de baterías de alta capacidad, a la vez pequeñas y livianas. En la figura 13 se muestra el camino del Li hasta convertirse en una batería

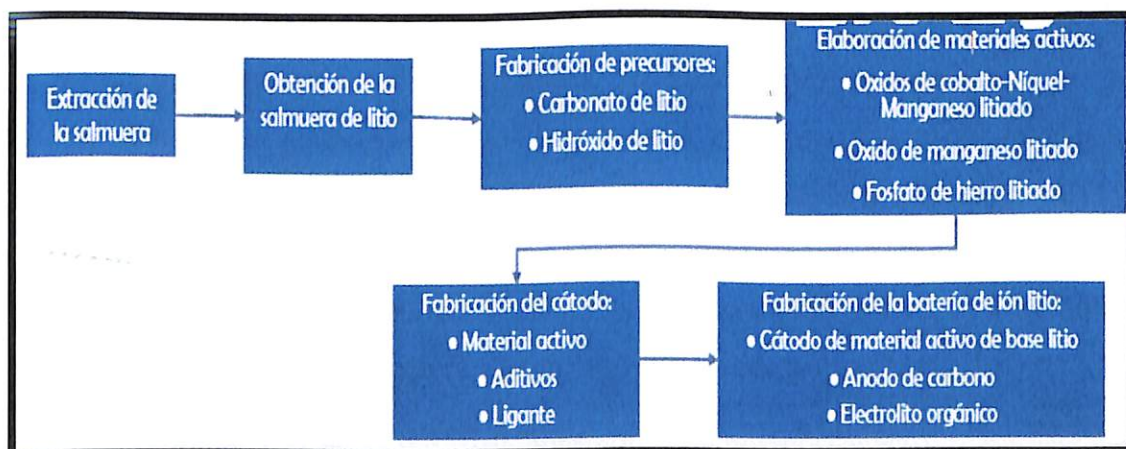


Figura 13. Flujo de proceso para las baterías de Li-on.



La mayor parte de las plantas para la elaboración de baterías de litio están instaladas en China, Japón y Corea del Sur. En la actualidad, hay más de 100 fabricantes sólo en China, que producen para un mercado mundial de componentes.

Cabe señalar que todos esos países poseen una cantidad de litio mucho menor en comparación a nuestro país, con baja calidad según los expertos y con costos de producción mucho más altos.

Otro dato a considerar es que el segmento de baterías Li-ion para la industria automotriz, se encuentra menos desarrollado que el de las baterías destinadas a la electrónica.

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

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

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

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

Otra área probada es en la industria automotriz de potencia eléctrica. En este caso una de las ventajas de la utilización de baterías de litio es la no contaminación, ahorro de



combustible, durabilidad, etc. Nissan Motor Corp. USA, introdujo la primera batería en 1998, presentando en la exposición Auto Show de Los Ángeles, un minibús para cuatro pasajeros, potenciado con baterías de Li-ión, desarrollado conjuntamente con Sonny Corp.

La proyección del mercado de las baterías de Li-ion litio, para el año 2015 es de 25 mil millones de dólares en comparación a la industria de la materia prima, el carbonato de litio que recién el 2012 llegaría a los mil millones de dólares.

2.11.2 Industria del Aluminio

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

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

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

En la industria aéreo espacial de varios países, se ha considerado el uso de las aleaciones Al-Li, en piezas tanto del ala y fuselaje, para diferentes tipos de aviones. La utilización de este material, permite reducir significativamente el peso de los aviones en



más del 10%, por otra parte, aleaciones con un 2% a 3% en litio, resultan atractivas para esta industria a causa de su reducida densidad y mayor resistencia a la corrosión, comparándola con las aleaciones tradicionales de aluminio. A pesar de las ventajas comparativas, estas aleaciones no se han incorporado al mercado en gran escala como se pensó en un comienzo. En la construcción de aviones, estas aleaciones compiten con los compuestos de boro, grafito y fibras poliméricas.

Otra gran utilidad en la industria aeronáutica, es el incorporar esta aleación en un nuevo diseño de tanques de combustibles, los que son utilizados en los puentes aéreos, principalmente su ventaja radica en ser ultra liviano, adicionando un 4% Cu, 1% Li, 0.4% Ag, 0.4% Mg y la diferencia en Al.

Esta aleación es 30 % más dura y 5 % menos densa que la aleación de aluminio previamente usada. El rediseño del tanque de combustible pesa aproximadamente 3400 Kg menos que el diseño original, la diferencia se utilizó para aumentar la capacidad de carga útil.

2.11.3 Industria del vidrio y de la cerámica

El óxido de litio es un aditivo importante en la industria del vidrio y la cerámica. Su efecto es disminuir el punto de fusión y mejorar las propiedades de escurrimiento del material fundido, reducir el coeficiente de expansión térmica y de viscosidad del producto terminado. La fuente de Li_2O más utilizadas es el Li_2CO_3 y además los concentrados de minerales de litio. En las piezas cerámicas resistentes al choque térmico “piro cerámicas” (vajillas de loza, vidrio tipo Corning) se utilizan preferentemente concentrados de minerales de litio con bajo contenido de hierro. Otra aplicación importante la constituye la fabricación de tubos de televisión monocromáticos y en colores. Hasta 1997, los minerales concentrados de litio eran los preferentemente usados en la industria de vidrios y cerámicas, hoy en día se utiliza el



carbonato de litio, puesto que desde entonces su precio se ha estabilizado, es bajo y además se consigue de esta forma eliminar la utilización de compuestos más tóxicos.

2.11.4 Grasas Lubricantes

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

2.11.5 Sistema de aire Acondicionado

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

2.11.6 Caucho Sintético

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

2.11.7 Otros usos del litio

Se ha potenciado un gran mercado farmacológico, puesto que la incorporación de litio metálico y algunos compuestos, se utilizan como catalizadores en la producción de analgésicos, agentes anti-colesterol, antihistamínico, anticonceptivos, inductores del sueño, algunos tipos de esteroides, tranquilizantes, vitamina A y otros productos. El carbonato de litio grado farmacológico, es utilizado en el tratamiento de la psicosis maníaca depresiva. En la figura 14 se muestra información sobre empresas productoras de litio.

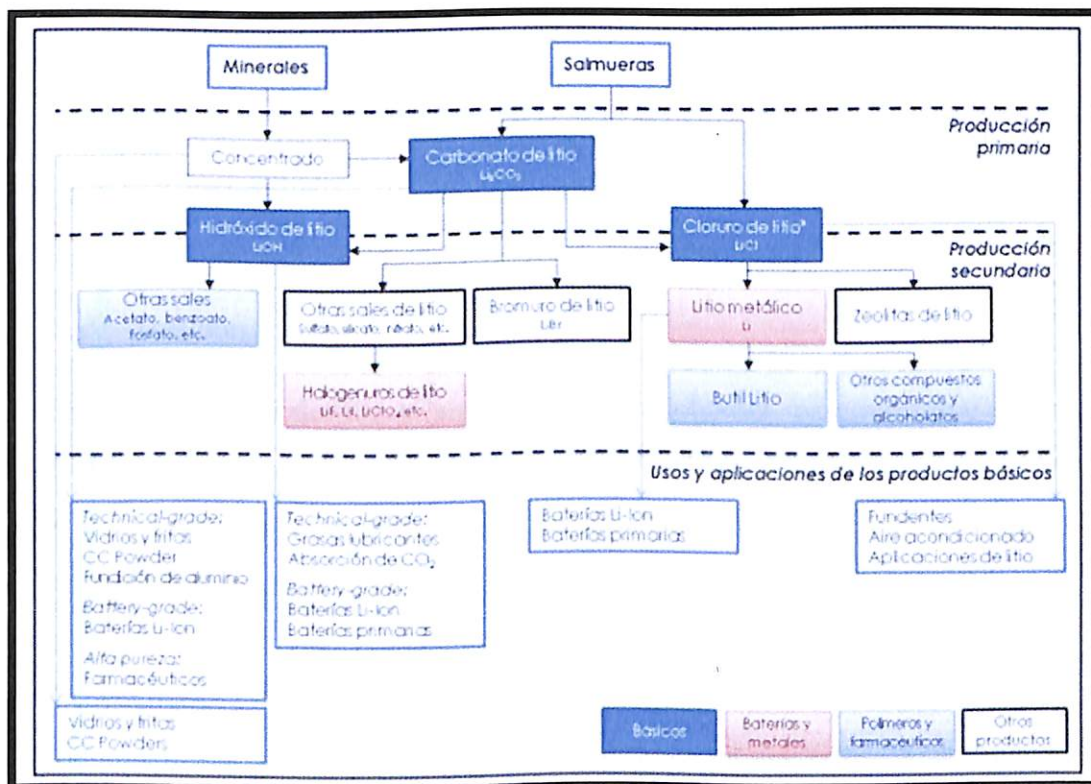


Figura 14. Información de las empresas productoras de litio.

Fuente: Cochilco.



2.11.8 Usos futuros

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

✓ Reactores de fusión nuclear

Una aplicación potencial del litio de grandes expectativas es en la producción de energía eléctrica mediante la fusión nuclear controlada de Deuterio y Tritio. Por ser escaso en la naturaleza el tritio se obtiene irradiando el litio con neutrones. El consumo de litio como combustible para generar tritio no es significativo, pero podría ser un gran requerimiento al ser usado también como escudo contra radiaciones y como medio de transferencia de calor (litio-líquido). Estas aplicaciones están supeditadas al éxito de un programa de desarrollo de reactores de fusión que impulsa el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Se espera que el año 2015 se ponga en marcha un reactor demo.

✓ Aleación liviana de Aluminio-Litio

La aleación de 1,5-3% de litio al aluminio permite obtener materiales que en promedio son un 10% más liviano que las aleaciones convencionales de aluminio. Además de reducir la densidad, el contenido de litio antes indicado permite obtener aleaciones con más resistencia y mayor módulo de elasticidad que las corrientemente utilizadas en la fabricación de partes y componentes de aviones. Su utilización en la fabricación de aviones se traduce en un ahorro significativo de combustible, el que puede ser equivalente a un 20% de aumento de capacidad de carga del avión. Actualmente, la McDonnell Douglas está utilizando aleaciones de aluminio-litio en varios modelos de aviones. El principal inconveniente de estos materiales es su alto costo, el cual podría disminuir si se resuelven los problemas de reciclar los desechos generados en su fabricación. Por otra parte ha contribuido a una lenta introducción en el mercado el hecho de que el petróleo se mantiene aún en un precio relativamente bajo.

✓ Proyectos Chilenos



Cabe destacar, el “Programa del Litio” que constituye la materialización de la doble responsabilidad ante la ley que le cabe a la Comisión Chilena de Energía Nuclear, CCHEN, en lo referente al litio como elemento de carácter nuclear. La primera responsabilidad es la supervisión y autorización de la producción y exportación del litio y sus compuestos. La segunda es la promoción de la investigación y desarrollo (I y D) en materia de litio para su utilización en aplicaciones pacíficas. Los objetivos de este proyecto son investigar y desarrollar materiales avanzados de litio, y por otra, investigar y desarrollar procesos químicos, físicos y nucleares básicos relacionados con compuestos de litio. La meta a mediano y largo plazo, es transferir la tecnología derivada de este programa al sector industrial del país. Principalmente la acción se orienta a las baterías de Litio, la cual incluye un amplio espectro de posibilidades de I y D, desde los procesos metalúrgicos para la eliminación de impurezas en los compuestos finales de litio, hasta el desarrollo de materiales para el uso en batería de litio de alta capacidad. La CCHEN se propuso implementar un laboratorio básico a fines de 1995 para el estudio integral de materiales para baterías de alta capacidad. Este es el resultado del esfuerzo de CCHEN y varias universidades nacionales e investigadores extranjeros. Otra área en la que se ha avanzado en materiales cerámicos de litio para el reactor de Fusión Nuclear. En esta área se está llevando a cabo dos actividades. Una es la fabricación de materiales cerámicos de titanato de litio en forma de pellets, mediante dos rutas alternativas de síntesis: Solgel y de estado sólido. La segunda, consiste en el diseño, implementación y operación de un sistema de irradiación in situ para evaluar la capacidad de dicho pellets como liberadores de tritio bajo irradiación de neutrones. Este sistema está instalado en el reactor RECH-I de la CCHEN y cuenta con la colaboración internacional de Argonne.



2.11.9 Consumo por aplicación y tasa de crecimiento

Las aplicaciones del litio se pueden dividir en usos convencionales, emergentes y futuros, dependiendo de la evolución de la demanda, es decir, en función de su desarrollo presente y futuro. Mientras los usos convencionales mostrarán un bajo crecimiento durante los próximos años, las aplicaciones emergentes y futuras tendrán un alto crecimiento con una tasa igual o mayor a 15% anual. Los usos convencionales del litio son sus aplicaciones en la industria de vidrios y cerámicas, farmacéuticos y grasas lubricantes de alta temperatura, acumulando cerca del 60% de la demanda actual. La tasa de crecimiento de la demanda es menor y depende del PIB global. En la tabla N°9 se ilustra el consumo por aplicación con su respectiva tasa de crecimiento.

Tipo de uso	Aplicaciones	Tasa de crecimiento de la demanda
Convencional	Fabricación de vidrios y cerámicas. Grasas lubricantes de alta temperatura. Continuous casting, aire acondicionado, polímeros, farmacéuticos, entre otros.	Menor
Emergente	Baterías de alta densidad energética. Aleaciones de bajo peso en la industria aeroespacial. Refuerzo de hojas de turbinas. Baterías de gran escala para almacenamiento de energía eléctrica.	Alta (15% anual)
Futuro	Baterías recargables para vehículos eléctricos Reactores de fusión nuclear	Alta a partir de 2015/16 ($\geq 15\%$ anual) A partir del 2050 (ver Cap. 3.4)

Tabla N°9. Consumo por aplicación y tasa de crecimiento.

2.11.10 Proyección del uso del litio

Las aplicaciones de baterías están creciendo muy rápido. Se espera que ese sector crezca en torno al 12,6% por año hasta 2025. Los otros sectores continuarán creciendo, pero más al ritmo con el PIB mundial, cerca del 3%, como se puede apreciar en el gráfico N°3.

El crecimiento del litio ha aumentado un 7-8% por año, gracias a la demanda en el sector de las baterías, que se relaciona con la adopción de los vehículos eléctricos y dispositivos inteligentes, como iPhones, iPads y ordenadores portátiles más ligeros.

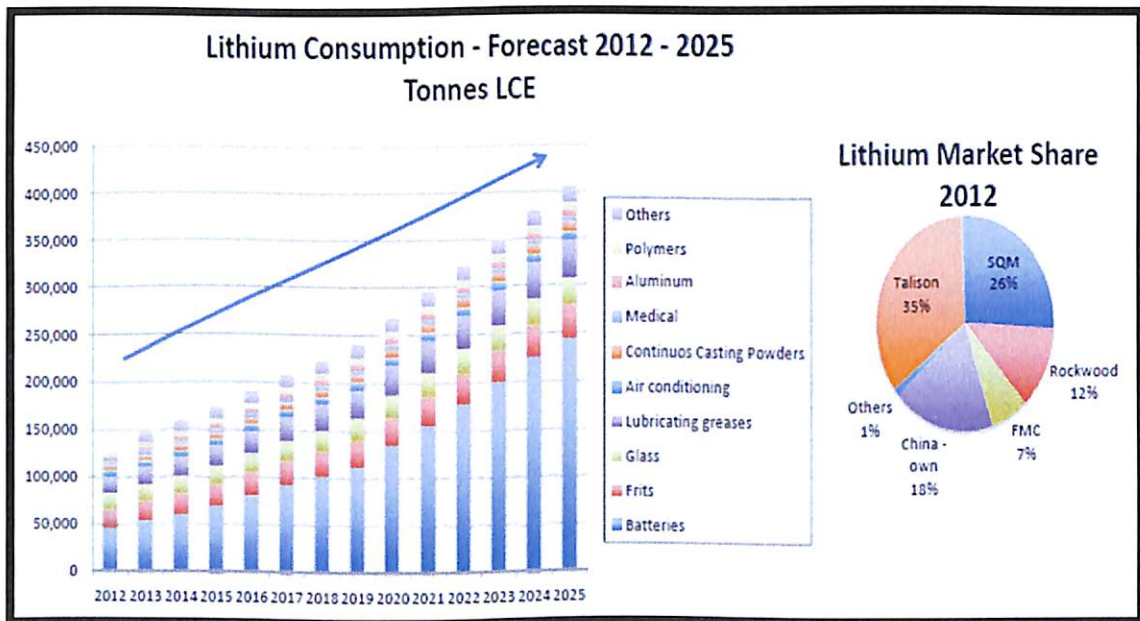


Grafico N° 3. Proyecciones de consumo de litio en relación a sus aplicaciones y el respectivo crecimiento.

En tanto, los usos emergentes incluyen las aplicaciones con altas tasas de crecimiento de la demanda, tales como las baterías de alta densidad energética (recargables en portátiles), baterías de gran escala para estabilización de redes eléctricas, aleaciones de bajo peso y refuerzo de hojas de turbinas.



Actualmente, estos sectores acumulan cerca del 30% de la demanda. Respecto del crecimiento de la demanda, durante los últimos años registraron un incremento anual de 20% y hacia el 2020 se espera que se mantenga en un nivel de 15%.

En relación a los usos futuros son aquellos cuya magnitud de aumento depende de las innovaciones tecnológicas de las baterías sobre todo en cuanto a su densidad energética y precio, para hacer viable su aplicación más masiva en vehículos. Además influye el desarrollo económico de Asia y el incremento del consumo que implica para los usos de las baterías. Uno de los usos futuros son las baterías para vehículos eléctricos (bicicletas, scooters, autos, buses, taxis y camiones) que en este momento solo abarcan el 2% de la demanda total mundial. Sin embargo, se prevé un fuerte crecimiento a partir de 2015/2016 que podría llevar a que esta aplicación sea responsable de un cuarto del consumo.



CAPITULO III MARCO TEORICO

3.1 Análisis de series de tiempo

Una gran cantidad de información acerca de las características económicas, tanto de individuos como de empresas o países, se recopila con fines de análisis, para llevar a cabo la planeación y toma de decisiones. Al registro metódico de la medición u observación numérica, efectuada a intervalos de tiempo fijos, de tales características o variables económicas, generalmente se les conoce como “series de tiempo”.

3.1.1 Elementos estadísticos en el análisis de series de tiempo

Debido a que las series de tiempo constan de datos numéricos es natural usar la herramienta de la estadística para describirlas y analizarlas, así como ocurre con cualquier otro conjunto de información numérica. Se debe recordar entonces que la estadística utiliza dos enfoques básicos:

- ✓ **Enfoque descriptivo:** se ocupa esencialmente de resumir y describir en forma concisa ya sea mediante gráficas o a través de unas cuantas medidas descriptivas, la información con que se cuente.
- ✓ **Enfoque Inferencial:** El objetivo primordial de este enfoque es utilizar datos muestrales para realizar inferencias, que sean válidas para toda la población de donde se obtuvo la muestra.

Dentro de los elementos descriptivos de una serie de tiempo se encuentran pues las gráficas y las medidas descriptivas y, posiblemente, el orden en que se mencionarán estos elementos represente su orden de importancia, ya que es primordial construir gráficas antes de llevar a cabo cualquier tipo de cálculo, aunque sea solo para verificar visualmente la congruencia de los datos.

Por su parte los elementos de inferencia estadística son aquellos que se utilizan para responder preguntas acerca de una población o universo, con base en un conjunto de



datos muestrales. En el estudio de series de tiempo, la población sobre la cual se desea inferir, depende fundamentalmente del tipo de análisis y/o modelo que se emplee. Por consiguiente, conviene mencionar que el análisis de una serie de tiempo se realiza de distintas maneras; por ejemplo uno de los métodos de análisis considerado como clásico es el conocido como descomposición de series, el cual presupone que la serie de tiempo está formada por una componente de **tendencia-ciclo**, que representa el movimiento de largo plazo de la serie. Otro componente es la **estacionalidad**, cuya utilidad es la de representar los efectos producidos por fenómenos que se repiten cada año con cierta constancia, y un componente más es la **irregularidad**, que sirve para caracterizar los movimientos imprevisibles y considerados como aleatorios.

Con la metodología de descomposición de series se pretende identificar y estimar cada uno de los componentes por separado; además dentro de este contexto se considera que los componentes de tendencia-ciclo y estacionalidad constituyen la parte determinista o semi determinista de la serie, mientras que el componente irregular vendría a ser su parte no determinista o estocástica. En este caso es razonable pensar que, la población sobre la que desea inferirse es el conjunto de series de tiempo formadas por la parte determinista o semi determinista, combinada con las posibles realizaciones imaginables de la parte estocástica.

Aun cuando la metodología anterior es bastante útil, en fechas recientes su empleo se ha visto limitado, en esencia, a la estimación del componente estacional a fin de obtener series desestacionalizadas. Esto se debe en parte a la aparición y unificación de ciertos métodos estadísticos relacionados con **procesos estocásticos**, que han probado su eficacia en la construcción de modelos para series de tiempo. Una de las principales ventajas del enfoque de procesos estocásticos, aplicado a series de tiempo, es la flexibilidad que se logra para representar un buen número de fenómenos reales mediante una sola clase general de modelos; otra ventaja es la facilidad y precisión para realizar pronósticos y, finalmente, una ventaja más es la generalización de modelos para las series individuales, a modelos para varias series consideradas simultáneas



3.1.2 Series de tiempo vistas como procesos estocásticos

Para describir lo que es una serie de tiempo dentro del contexto de procesos estocásticos es necesario definir los procesos estocásticos, esto es: un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias asociadas a un conjunto índice de números reales, de tal forma que a cada elemento del conjunto le corresponda una y solo una variable aleatoria, esto se escribirá como $Z(\tau); \tau \in T$ en donde T es el conjunto índice y $Z(\tau)$ es la variable aleatoria correspondiente al elemento τ de T . si T es un intervalo de números reales, ya sea cerrado o abierto, se dirá que el proceso estocástico es continuo, y si T es un conjunto finito o infinito pero numerable, el proceso estocástico se dirá que es discreto. El hecho de que el proceso estocástico sea continuo o discreto, no indica nada de la naturaleza de las variables aleatorias involucradas, ya que estas son continuas o discretas.

3.1.3 Series de tiempo discretas

Con base en lo anterior, una serie de tiempo es la sucesión de observaciones generadas por un proceso estocástico, cuyo conjunto índice se toma en relación con el tiempo. Por tanto la inferencia que se realice será acerca de las características del proceso estocástico generador de la serie observada. Además así como existen procesos estocásticos discretos y continuos, también existen series de tiempo discretas y continuas. En particular si las observaciones de una serie de tiempo discreta se toma en los momentos $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, el proceso estocástico respectivo se denotará por $Z(\tau_1), Z(\tau_2), \dots, Z(\tau_n)$.

Es importante notar que una serie de tiempo observada no es más que una realización de un proceso estocástico, lo cual significa que bien pudo haberse observado otra realización del mismo proceso, pero cuyo comportamiento fuese distinto del que se observó en la realidad. Con esto se pretende subrayar al elemento probabilístico presente en una serie de tiempo; ese mismo elemento será el que conduzca a tener en



cuenta la función de densidad conjunta de las variables aleatorias que constituyen el proceso estocástico.

El comportamiento de una variable aleatoria Z lo representa su función de densidad $f(Z)$. Similarmente dos variables aleatorias Z_1 y Z_2 quedarán completamente descritas (en términos probabilísticos) por su función de densidad conjunta $f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$.

En prácticamente todo el análisis estadístico, excepto en el análisis de series de tiempo, se supone que las observaciones que se tienen provienen de variables aleatorias independientes, de forma tal que con el conocimiento de las funciones de densidad individuales, es posible obtener fácilmente la función de densidad conjunta.

En contraste en el caso de las series de tiempo se supone que existe toda una estructura de correlación entre las observaciones; por consiguiente, no es posible obtener la función de densidad conjunta de manera tan directa y deberá utilizarse otra forma para caracterizar las variables aleatorias que intervienen. Con este objetivo en mente y para facilitar la exposición subsecuente, es conveniente presentar algunos operadores y polinomios de uso frecuente en el análisis de series de tiempo.

El primer operador que se mencionará se llama operador de retraso que se denota por la letra B (del inglés backward) dicho operador se define mediante la relación:

$$BZ_t = Z_{t-1} \quad \text{Para toda } t \quad (1.1)$$

Por la aplicación sucesiva del operador B se obtiene:

- ✓ $(B^2)(Z_t) = B(BZ_t) = Z_{t-2}$
- ✓ $(B^3)(Z_t) = B((B^2)Z_t) = Z_{t-3}$
- ✓ $(B^k)(Z_t) = B((B^{k-1})Z_t) = Z_{t-k}$

Así que, en general la expresión a la que se llega es:

$$\checkmark (B^k)(Z_t) = Z_{t-k} \quad \text{para } K=0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{Y toda } t \quad (1.2)$$



Adviértase que al multiplicar a (B^k) por Z_t se obtiene la variable retrasada k periodos y, debido a que $(B^0)=1$ se tiene que $(B^0)(Z_t) = (Z_t)$. Debe notarse también que, de hecho, el operador modifica toda la sucesión de valores $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_t, Z_n\}$ y la transforma en la nueva sucesión $\{Z_{1-k}, Z_{2-k}, \dots, Z_{t-k}, Z_{n-k}\}$. Con base en lo anterior conviene apreciar que, si únicamente se cuenta con las observaciones $Z_1 \dots Z_n$ no se tendrá las observaciones $Z_{1-k}, Z_{2-k}, \dots, Z_0$, por tanto la serie que originalmente constaba de N observaciones, se reducirá a una serie de solamente $N-K$ observaciones, por el solo hecho de aplicar (B^k)

3.1.4 Procesos estocásticos lineales

Los modelos para los procesos estocásticos se basan en la idea de que una serie de tiempo, cuyos valores sucesivos pueden ser altamente **dependientes**, puede considerarse generada a partir de una serie de choques aleatorios **independientes** $\{\alpha_t\}$. Estos choques aleatorios se supone que son realizaciones independientes de una variable aleatoria cuya media es constante (generalmente se les considera igual a cero) y cuya varianza es (σ^2) . A esta situación de variables aleatorias $\{\alpha_t\}$ se le conoce como **proceso de ruido blanco** (o solo ruido blanco). El nombre se debe a que el concepto de ruido blanco se utiliza en la ingeniería electrónica y de comunicaciones, en donde es necesario distinguir las señales con mensaje de las de ruido.

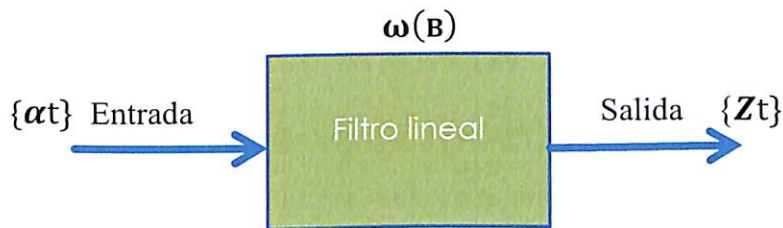
La idea expuesta previamente fue concebida por Yule (1927) quien propuso en esencia expresar al proceso $\{Z_t\}$ en función de $\{\alpha_t\}$ mediante la relación lineal:

$$\begin{aligned} \checkmark Z_t &= \mu + \alpha_t - \omega_1 \alpha_{(t-1)} - \omega_2 \alpha_{(t-2)} - \dots \\ \checkmark Z_t &= \mu + \omega(B) \alpha_t \quad (1.3) \end{aligned}$$

En donde μ es un parámetro que determina el nivel (no necesariamente la media) del proceso y $\omega(B)$ es el polinomio de retraso.

$$\omega(B) = 1 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots \dots (1.4)$$

Que convierte al proceso $\{\alpha_t\}$ en el proceso $\{Z_t\}$ de hecho aquí se tiene en mente un filtro lineal:



Filtro lineal que transforma $\{\alpha_t\}$ en $\{Z_t\}$

3.1.5 Procesos Estacionarios

El concepto de estacionariedad es de suma importancia para el análisis de series de tiempo, como se verá a continuación. En general, para caracterizar completamente un proceso estocástico es necesario conocer la función de densidad conjunta de sus variables aleatorias, sin embargo, en la práctica no es realista pensar que esto pueda lograrse con una serie de tiempo. No obstante, puesto que los primeros momentos de las variables aleatorias resumen en buena medida su distribución, conviene analizar los momentos de primer y segundo orden, es decir, las medias, las varianzas y las covarianzas de las variables del proceso estocástico.

Suponga que la media $\{Z_t\}$ es $\{\mu_t\}$ o sea

$$E\{Z_t\} = \{\mu_t\} \quad (1.5)$$

Entonces, de acuerdo con (1.3) se tiene

$$\mu_t = \mu + E(\alpha_t - \omega_1 \alpha(t-1) - \omega_2 \alpha(t-2) - \dots) \quad (1.6)$$



Con esta expresión, podría intentarse obtener la esperanza de la suma en paréntesis mediante la suma de las esperanzas de cada uno de los sumandos, pero esto no es válido necesariamente, a menos que se tenga:

$$\omega_0 + \sum |\omega_i| < \infty \quad (1.7)$$

Donde $\omega_0 = 1$; esto es, para que la esperanza de la suma exista se requiere que el valor absoluto de la serie de ponderaciones converja, si esto ocurre se tendría entonces:

$$E\{Z_t\} = \{\mu\} \quad (1.8)$$

Ya que $E\{\alpha_t\} = 0$ para toda t , por consiguiente si (1.7) se cumple, la media del proceso no depende del tiempo lo cual implica en particular que aun cuando durante un cierto periodo el proceso se aleje de la media, este siempre regresará a una vecindad de la misma.

3.1.6 Serie de Tiempo no Estacionaria

Una serie de tiempo no estacionaria tendrá una media que varía con el tiempo o una varianza que cambia con el tiempo, o ambas. ¿Por qué las series de tiempo son tan importantes? Porque si una serie de tiempo es no estacionaria, solo se puede estudiar su comportamiento durante el periodo en consideración. Por tanto, cada conjunto de datos perteneciente a la serie de tiempo corresponderá a un episodio particular. En consecuencia, no es posible generalizar para otros periodos. Así, para propósitos de pronóstico, tales series de tiempo (no estacionarias) tienen poco valor práctico.

3.1.7 Proceso estocástico no estacionario

El interés se centra en las series de tiempo estacionarias, a menudo se topa con series de tiempo no estacionarias, cuyo ejemplo clásico es el Modelo de Caminata Aleatoria (MCA). A menudo se dice que los precios de valores, como las acciones o las tasas de



cambio, siguen una caminata aleatoria; es decir, son no estacionarios. Hay dos tipos de caminatas aleatorias:

- 1) Caminata aleatoria sin deriva o sin desvío (es decir, sin término constante o de intercepto), y
- 2) Caminata aleatoria con deriva o con desvío (es decir, hay un término constante).

3.1.7.1 Método de Random Walk (Camino aleatorio)

El criterio para usar el método de Random Walk (paseo aleatorio) es precisamente, no haber encontrado ningún modelo que explique el comportamiento y evolución de la serie temporal del precio del litio. Quizás sea posible ajustar un mejor modelo, en caso que los datos de precio sean mensuales, entonces es muy posible identificar un patrón significativo entre un año y otro. Por ejemplo, es típico que las ventas de juguetes sean mayores en diciembre, entonces, todos los diciembre de una serie temporal tiene una similitud.

1) Caminata aleatoria sin deriva:

Suponga que u_t es un término de error de ruido blanco, con media 0 y varianza σ^2 . Entonces se dice que la serie Y_t es una caminata aleatoria si

$$Y_t = Y_{t-1} + u_t \quad (1)$$

En el modelo de caminata aleatoria, como se ve en la ecuación (1), el valor de Y en el tiempo t es igual a su valor en el tiempo $(t - 1)$ más un choque aleatorio, por tanto, es un modelo autorregresivo (AR). En resumen, el MCA sin deriva es un proceso estocástico no estacionario.

En la práctica, Y_0 a menudo se iguala a cero, en cuyo caso $E(Y_t) = 0$.

La suma $\sum u_t$ se conoce también como tendencia estocástica:

$$(Y_t - Y_{t-1}) = Y_t = u_t$$



2) Caminata aleatoria con deriva:

Si se modifica la ecuación (1) de la siguiente forma:

$$Y_t = \delta + Y_{t-1} + u_t \quad (2)$$

donde δ se conoce como el parámetro de deriva. El término deriva proviene del hecho de que, se escribe la ecuación anterior como;

$$Y_t - Y_{t-1} = \delta + u_t \quad (3)$$

Se demuestra que Y_t se deriva o desvía hacia arriba o hacia abajo, según δ sea positiva o negativa. El modelo (2) también es un modelo AR.

Según el procedimiento analizado en la caminata aleatoria sin deriva, se puede demostrar que, para el modelo de caminata aleatoria con deriva (2),

$$E(Y_t) = Y_0 + t \cdot \delta$$

$$\text{var}(Y_t) = t\sigma^2$$

Como se puede observar, para el MCA con deriva, la media, al igual que la varianza, se incrementa con el tiempo, lo que viola de nuevo las condiciones de la estacionariedad (débil). En resumen, el MCA, con o sin deriva, es un proceso estocástico no estacionario.

A fin de dar una ligera idea de la caminata aleatoria con y sin deriva, se llevará a cabo dos simulaciones a continuación:

$$Y_t = Y_0 + u_t \quad (4)$$

donde u_t son términos de error de ruido blanco de forma que cada $u_t \sim N(0, 1)$; es decir, cada u_t sigue la distribución normal estándar.

3.2 Métodos de Suavizamiento Exponencial

En esencia son métodos para ajustar una curva apropiada a datos históricos de una determinada serie de tiempo. Existen diversos tipos, como el de suavizamiento



exponencial simple, el método lineal de Holt y el método de Holt-Winters, así como sus variaciones. Se emplean en varias áreas para pronósticos en los negocios y la economía.

3.2.1 Método de Holt-Winters

Holt-Winters, método que recibe este nombre en honor a dos investigadores. Holt y su estudiante Winters que desarrollaron juntos esta metodología. Este método se utiliza para hacer un pronóstico del comportamiento de una serie temporal a partir de los datos a utilizar. En este caso el pronóstico se hace para el año siguiente a partir del último dato obtenido. El método se basa en un algoritmo iterativo que a cada tiempo realiza un pronóstico sobre el comportamiento de la serie en base promedios debidamente ponderados de los datos anteriores. El peso que se le da a los datos decrece de manera exponencial hacia atrás en el tiempo. Este método es similar a los métodos de alisamiento exponencial pero mejorado, ya que incorpora información sobre la tendencia de la serie. El algoritmo tiene tres parámetros, cada uno de ellos asociado a diferentes componentes de la serie. El valor de estos parámetros se ajusta, comparando la serie real con la pronosticada para ese mismo lapso. Una vez realizados los ajustes, se procede a hacer el pronóstico para el período en donde no hay datos.

Las tres componentes consideradas en el método son el valor medio, la tendencia y la estacionalidad. Al contemplar componentes estacionales, el método se adapta muy bien para el pronóstico de series asociadas con un fuerte carácter estacional. Cada una de estas componentes está asociada a un parámetro, generalmente llamados α , β , γ . Los valores de α , β , γ pueden estar fijados por el usuario o escogerse de manera que minimicen el error cuadrático medio comparando el comportamiento de la serie real y la serie pronosticada en la zona en la que se superponen. Para usar este método es necesario estimar condiciones iniciales.

Este método fue utilizado principalmente porque tiene una variante para series temporales que no muestran estacionalidad. Esta variante del Holt-Winters es usada sin



el parámetro Gamma, que es el que agrega la estacionalidad. Solo busca identificar tendencia. Similar a la regresión simple como la pendiente de una recta.

3.3 Manejo de Datos

Todo aquello que se relaciona con la recolección, procesamiento, análisis e interpretación de datos numéricos pertenece al campo de la estadística. En ingeniería, permite comprender fenómenos sujetos a variaciones y predecirlos o controlarlos eficazmente, como calcular o predecir precios de cualquier metal, como lo es del estudio del precio del litio. Los datos estadísticos, obtenidos de muestras, experimentos o cualquier colección de mediciones, a menudo son tan numerosas que carecen de utilidad a menos que sean condensados o reducidos a una forma más adecuada.

3.3.1 Distribuciones de Frecuencia

La distribución de frecuencia es una tabla que divide un conjunto de datos en un número de clases o categorías apropiadas, mostrando también el número de elementos en cada clase. Esta construcción de distribución de frecuencia consiste en decidir cuantas clases a utilizar y elegir los límites de cada clase, es decir, de dónde a dónde abarcará cada una. En general, el número de clases que se use depende del número de observaciones, pero tiene muy poca utilidad utilizar menos de 5 o más de 15, depende así mismo del rango de los datos, es decir, la diferencia entre la observación más grande y la más pequeña. Así, pues, se ordenan las observaciones y se determinan así las frecuencias de clase, que son el número de observaciones en cada clase.

3.3.2 Gráficas de Distribuciones de Frecuencia

Las propiedades de las distribuciones de frecuencia relacionadas con su forma se hacen más evidentes por medio de gráficas. La forma más común de presentar gráficamente una distribución de frecuencia es el histograma. El histograma de una distribución de



frecuencia se construye con rectángulos adyacentes, las alturas de estos representan las frecuencias de clase y sus bases se extienden entre fronteras de clases sucesivas.

Al observar una gráfica de una distribución de frecuencia a menudo resaltan características que no eran evidentes en los datos mismos, aparte de que tal gráfica ofrece una excelente imagen de los datos en conjunto, donde se puede exhibir dos o más modas (máximos) que puede proporcionar información pertinente, como por ejemplo, un cambio en el proceso que está siendo medido o que los datos provienen de varias fuentes, detectar irregularidades o anomalías.

Cuando la muestra es pequeña, se usa la raíz de n , para sacar los intervalos y analizar el histograma.

$$N^{\circ} \text{ de Intervalos} = \sqrt{n}$$

Cuando la muestra es grande, se usa la regla de *Sturges* que sería;

$$\text{Sturges} = 1 + 3,3 \log n$$

3.4 Medidas Descriptivas

3.4.1 Media (\bar{x}):

Una media o promedio es una medida de tendencia central que resulta al efectuar una serie determinada de operaciones con un conjunto de números y que, en determinadas condiciones, puede representar por sí solo a todo el conjunto. Existen distintos tipos de medias, tales como la media geométrica, la media ponderada, la media armónica y la mediana. La media es la que se usa en algunos problemas de estimación y en otros de inferencia estadística, una razón intuitiva que justifica tal predilección es que la mediana no emplea toda la información contenida en las observaciones.

Dado un conjunto de n mediciones u observaciones, x_1, x_2, \dots, x_n , existen varias formas de describir su centro o punto medio, que está definida por la fórmula;



$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

3.4.2 Varianza (s^2)

La varianza es el promedio de sus desviaciones de su media \bar{x} elevadas al cuadrado. Es decir mide la variación de un conjunto de datos en términos de las cantidades por las que se desvían de su promedio. Si un conjunto de números x_1, x_2, \dots, x_n tiene la media \bar{x} , las diferencias $x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x}$ se llaman desviaciones de la media. Pero es conveniente trabajar con los cuadrados de las desviaciones con respecto al promedio. La varianza se define por la fórmula;

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

3.4.3 Desviación Estándar (s)

La definimos la desviación estándar de n observaciones x_1, x_2, \dots, x_n como la raíz cuadrada de su varianza, esta mide cuanto se separan los datos de su media. Su fórmula es;

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

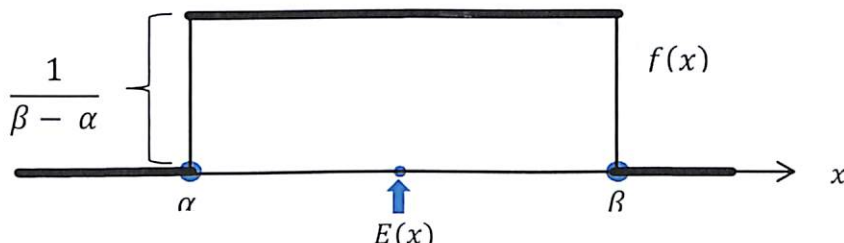
3.5 Modelos Probabilísticos

Se refiere a una serie de modelos de variables aleatorias unidimensionales.

3.5.1 Distribución Uniforme

Sea X una variable aleatoria continua. Se dice que X sigue una ley uniforme si su densidad $f(x)$ está dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha}, & \text{si } x \in [\alpha, \beta] \\ 0, & \text{si } x \notin [\alpha, \beta] \end{cases}$$



En la gráfica se muestra que todos los valores de entre α y β son igualmente probables en el sentido de que la probabilidad de que x esté situado en un intervalo de longitud Δx completamente contenido en el intervalo de α a β es igual a $\Delta x / (\beta - \alpha)$, sin importar la localización exacta del intervalo.

En consecuencia se puede demostrar que si X sigue una ley uniforme.

Ecuación de la Media de la Distribución Uniforme:

$$E(x) = \frac{\alpha + \beta}{2}$$

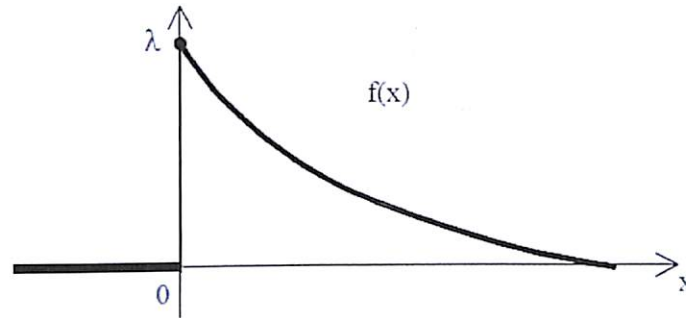
Ecuación de la Varianza de la Distribución Uniforme:

$$V(x) = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12}$$

3.5.2 La Ley Exponencial con parámetros λ ($\lambda > 0$):

Se dice que X sigue una ley exponencial con parámetros λ si su densidad está dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}, & \text{si } x > 0 \\ 0, & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$$



La media de la función de distribución exponencial es:

$$E(x) = \frac{1}{\lambda}$$

Y la Variancia de la función de distribución exponencial es:

$$V(x) = \frac{1}{\lambda^2}$$

3.5.3 Distribución Gamma:

La distribución gamma es una densidad de probabilidad importante. Esta distribución está dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, & \text{para } x > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{en los demás puntos} \end{cases}$$

Donde $\Gamma(\alpha)$ es el valor de la función gamma, definido por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

Mediante la integración por partes es posible demostrar que

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)\Gamma(\alpha - 1)$$

Para cualquier $\alpha > 1$ y, en consecuencia, que $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$, donde α es un entero positivo. En la figura se muestran varias gráficas de distribuciones gamma en las cuales

se observa el hecho de que estas distribuciones son positivamente sesgadas. En realidad, el sesgo decrece cuando α se incrementa manteniendo fija a β .

La media y la variancia de la distribución gamma pueden obtenerse utilizando la función gamma y sus propiedades especiales mencionadas antes.

Para la media de la distribución gamma se tiene que

$$E(x) = \alpha\beta$$

La variancia de la distribución gamma está dada por

$$V(x) = \alpha\beta^2$$

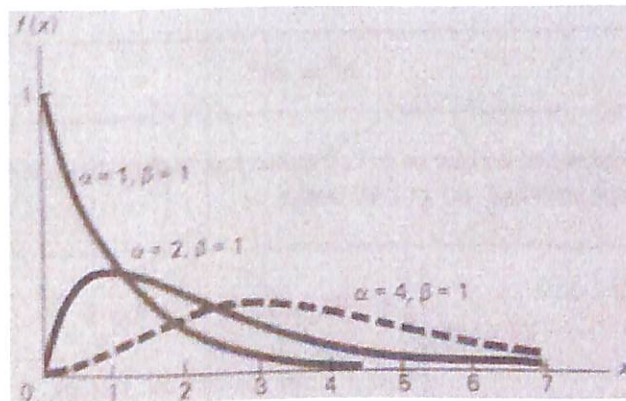


Gráfico N° 4. Gráfica de la distribución Gamma.

3.5.4 Distribución Normal

Se da el nombre de variable aleatoria normal (o gaussiana) a toda variable definida en el eje $(-\infty, +\infty)$ y que tiene la densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde m es la media y σ es la variancia.

Se puede demostrar la esperanza es:



$$E(x) = m$$

$$V(x) = \sigma^2$$

El parámetro m no influye en la forma de la curva $f(x)$, su variación conduce a un desplazamiento de la curva a lo largo del eje x . En cambio, al variar σ se altera la forma de la curva; en efecto, es fácil de ver que el máximo de $f(x)$ es igual a:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \text{ en el punto } x = m$$

O sea que si disminuye σ , aumenta de $f(x)$ entonces:

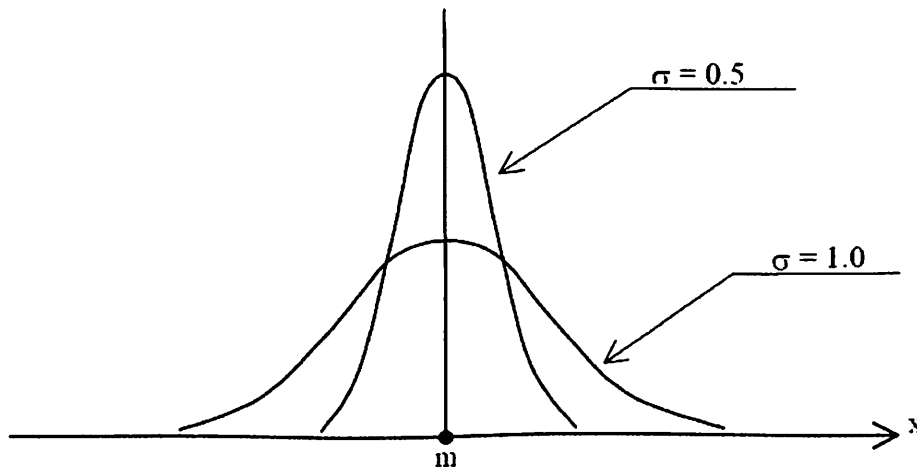
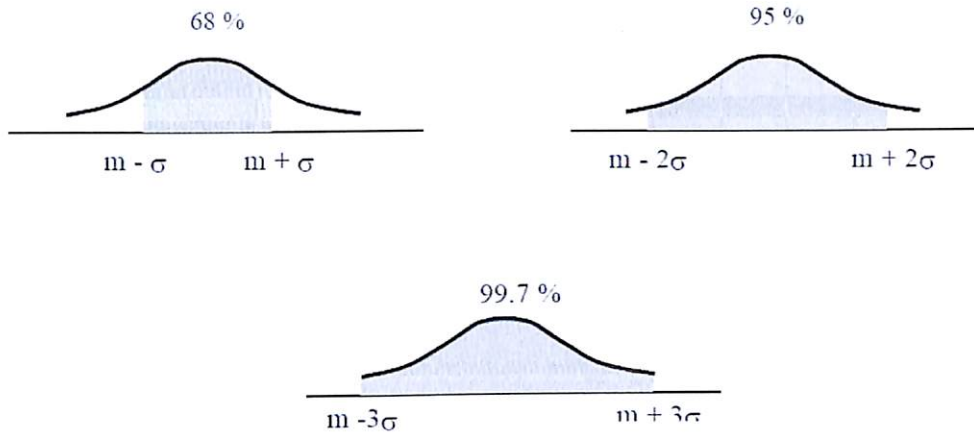


Gráfico N° 5. Gráfica distribución normal.

Donde conviene recordar las siguientes áreas bajo la curva de la Ley de Gauss:



En símbolos, si X sigue una ley de gauss, con parámetros m y σ , por lo tanto:

$$\begin{aligned}P(m - \sigma \leq X \leq m + \sigma) &= 0,68 \\P(m - 2\sigma \leq X \leq m + 2\sigma) &= 0,95 \\P(m - 3\sigma \leq X \leq m + 3\sigma) &= 0,997\end{aligned}$$

Las variables aleatorias normales aparecen con gran frecuencia en Estadística. Por ejemplo los errores de mediciones siguen como regla una variable aleatoria normal.

3.5.5 Distribución Lognormal

Se dice que una variable aleatoria X sigue una Ley Lognormal si su logaritmo (neperiano, en base e) sigue una ley normal. A partir de esta definición se puede demostrar que la función de densidad tiene por expresión:

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{1}{\sigma \cdot X \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-m)^2}{2\sigma^2}}, & \text{Si } x > 0 \\f(x) &= 0, & \text{Si } x \leq 0\end{aligned}$$

Donde m y σ son la media y la desviación estándar.

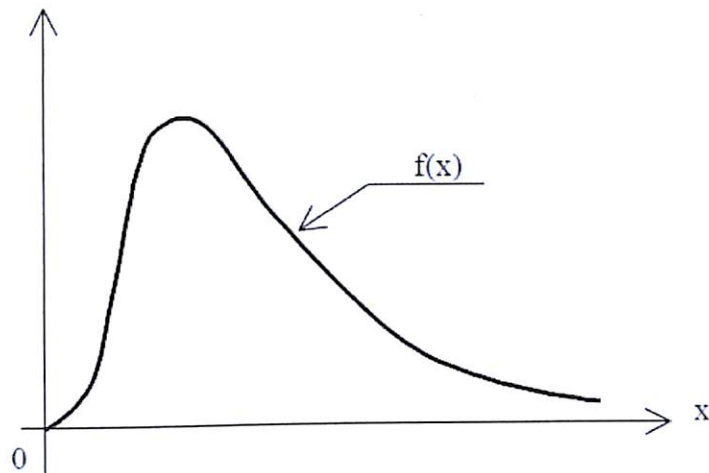


Grafico N° 6. Distribución Lognormal.

La ley lognormal se presenta con frecuencia en el estudio de histogramas asociados con leyes de muestras provenientes de yacimientos mineros.

El valor esperado es:

$$E(x) = e^{m+\sigma^2/2}$$

Y la varianza es:

$$V(x) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2m+\sigma^2}$$

3.5.6 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua, asociado a variables del tipo tiempo de vida, la función de densidad de este modelo viene dada por:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad \text{si } x \geq 0$$
$$f(x) = 0, \quad \text{si } x < 0$$



Como se puede ver, depende de los parámetros $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, donde α es un parámetro de escala y β es un parámetro de forma (lo que proporciona una gran flexibilidad a este modelo).

Propiedades de la distribución Weibull

Si se toma $\beta = 1$ tenemos una distribución Exponencial.

Su esperanza vale:

$$E(x) = \alpha \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

Su varianza vale:

$$V(x) = \alpha^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) \right]^2 \right\}$$

Donde $\Gamma(x)$ representa la función Gamma, que fue vista anteriormente.

3.6 Pruebas no paramétricas

Estas se caracterizan por el conocimiento del modelo de distribución de la población bajo estudio, y donde, se desconoce un número finito de parámetros de dicha distribución. Es preciso desarrollar métodos que no requieran el conocimiento de la distribución de la muestra para inferir propiedades de población, y estos son las llamadas pruebas no paramétricas. Estos se caracterizan por el desconocimiento de dicha forma funcional, y se utilizan estadísticos cuya distribución se determina con independencia de cuál sea la distribución de la población. Esta requiere de hipótesis mucho más generales, como por ejemplo que sea continua o discreta.

Las pruebas no paramétricas son una alternativa, cuando no pueden emplearse métodos paramétricos por no verificarse sus condiciones específicas. Además permiten resolver



problemas planteados, por ejemplo, obtener información sobre la forma de la distribución de la población de la que se ha extraído la muestra.

3.6.1 Bondad de ajuste

El objetivo de los tests de bondad de ajuste es contrastar si los datos muestrales pueden considerarse procedentes de una distribución determinada. Donde se seguirá el siguiente esquema de planteamiento de las hipótesis, estadístico asociado, región crítica, y se citaran algunas de las propiedades del test.

Como contraste de bondad de ajuste se destacan:

- ✓ Test de Kolmogorov- Smirnov y test de X^2 de bondad de ajuste.
- ✓ Contrastes específicos para la distribución normal.

3.6.1.1 Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov- Smirnov son pruebas no paramétricas que se utilizan para diferencias entre distribuciones acumuladas. Para muestras pequeñas, se prefiere usar el test de (KS), por tener mayor potencia. Esta prueba se usa para muestras menores a 25 datos.

Cuando la prueba Kolmogorov-Smirnov se aplica para contrastar la hipótesis de normalidad de la población, el estadístico de prueba es la máxima diferencia:

$$D = \text{máx} |F_n(x_i) - F_0(x_i)|$$

Donde:

- ✓ x_i es el i -ésimo valor observado en la muestra (cuyos valores se han ordenado previamente de menos a mayor).

- ✓ $F_n(x_i)$ es la función de distribución muestral, que es un estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i .
- ✓ $F_0(x_i)$ es la función teórica o correspondiente a la población normal especificada en la hipótesis nula. Es decir es la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i cuando H_0 es cierta.

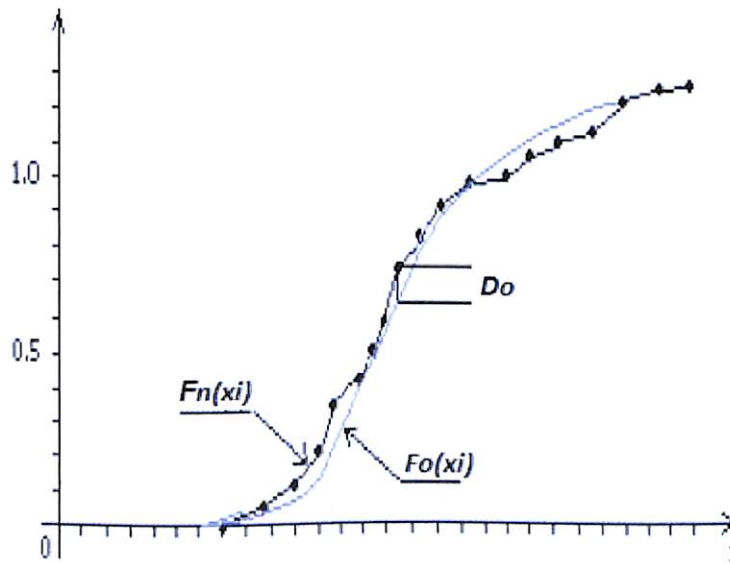
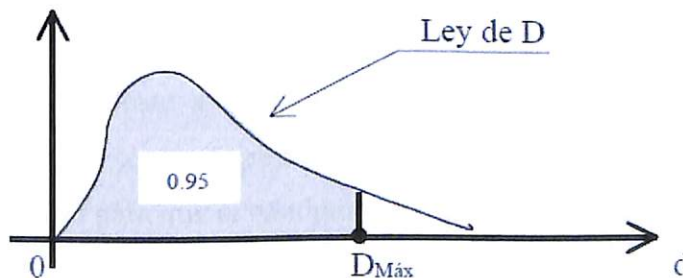


Gráfico N° 7. Gráfica de Kolmogorov- Smirnov

Se demuestra que si los datos observados corresponden a una variable aleatoria con función de distribución $F_0(x_i)$, entonces D sigue una ley de Kolmogorov (Kn):





Lo anterior induce la siguiente regla de decisión:

- I. Aceptar la hipótesis si $D_0 \leq DM_{\text{Máx}}$
- II. Rechazar la hipótesis si $D_0 > DM_{\text{Máx}}$

La tabla siguiente nos proporciona el valor de $DM_{\text{Máx}}$ para el nivel de confianza $1 - \alpha = 0.95$:

Número de datos n:	$DM_{\text{Máx}}$:
5	0,56
10	0,41
15	0,34
20	0,29
25	0,26
30	0,24
40	0,21
n>40	$1,36/\sqrt{n}$

Valor crítico para el test de
Kolmogorov - Smirnov
 $1 - \alpha = 0.95$

La distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov es independiente de la distribución poblacional especificada en la hipótesis nula y los valores críticos de este estadístico están tabulados. Si la distribución postulada es la normal y se estiman sus parámetros, los valores críticos se obtienen aplicando la corrección de significación propuesta por Lilliefors.

3.6.1.2 Contraste de normalidad

Un caso específico de ajuste a una distribución teórica es la correspondiente a la distribución normal. Este contraste se realiza para comprobar si se verifica la hipótesis de normalidad necesaria para que el resultado de algunos análisis sea fiable.



Para comprobar la hipótesis nula de que la muestra ha sido extraída de una población con distribución de probabilidad normal se puede realizar un estudio gráfico y/o analítico.

3.7 Simulación Montecarlo

Consecuentemente resulta que la simulación es uno de los procesos cuantitativos más ampliamente utilizados en la toma de decisiones, pues sirve para aprender lo relacionado con un sistema real mediante la experimentación con el modelo que lo representa. Así, el objetivo consistirá en crear un entorno en el cual se pueda obtener información sobre posibles acciones alternativas a través de la experimentación usando la computadora. En administración, los modelos matemáticos se construyen y se utilizan para comprobar los resultados de decisiones antes de aplicarlas a la realidad.

Hoy día, la simulación es ampliamente aceptada en el mundo de los negocios para predecir, explicar y ayudar a identificar soluciones óptimas. En particular, se aplicará la simulación Monte Carlo para realizar una tendencia de los precios del litio con el fin de poder estimar el riesgo de un fracaso.

La simulación se utiliza para predecir las consecuencias que tendrá la toma de una decisión determinada, como:

- Introducción de productos nuevos
- Políticas de inventario
- Líneas de espera
- Finanzas
 - Aplicaciones para determinar políticas de mantenimiento óptimo.
 - Simulando precios
 - El uso de la simulación en administración de proyectos
 - Proyección de ventas



- Análisis de mercado, entre muchas otras operaciones más que se pueden desarrollar.

La simulación permite resolver problemas complejos, aunque lo que obtendremos será una aproximación de la solución.

La utilización de modelos matemáticos permite:

- ✓ Introducir nuevas variables
- ✓ Hacer variar sus valores
- ✓ Analizar las consecuencias de estas modificaciones

Los modelos de simulación no se han diseñado para encontrar la mejor solución o soluciones óptimas, como en la programación lineal o en análisis de decisiones, sino que evalúan diferentes alternativas y se toma una decisión con base en una comparación de los resultados. Es decir, se evalúa el desempeño de sistemas previamente especificados.

Los modelos de simulación incluyen elementos aleatorios o probabilísticos; estos contienen ejemplos de sistemas de colas, de inventario y modelos de análisis de riesgos, a menudo llamados Simulación Monte Carlo.

CAPITULO IV “ESTUDIO DE MERCADO”

4.1 El mercado del carbonato de litio

El carbonato de litio es el producto más importante transado en los mercados internacionales. Su producción se concentra básicamente en Chile, donde se recupera a partir de las salmueras del Salar de Atacama, y en China a través de la conversión de concentrados de mineral, sobre todo del importado desde Australia.

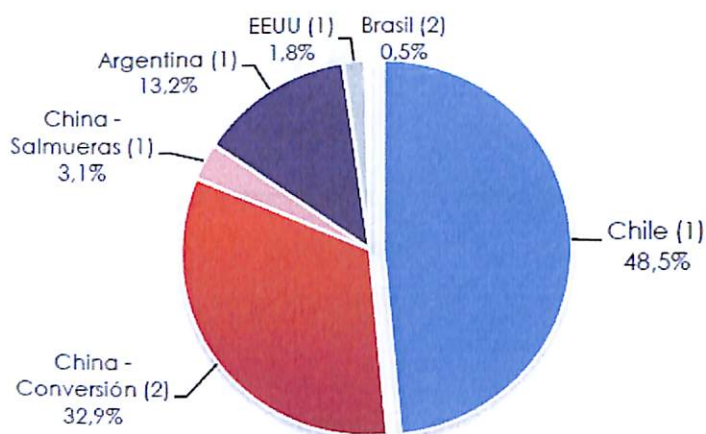


Gráfico N° 8. Participación en la producción de carbonato de litio.

Respecto de las exportaciones globales de este compuesto, ellos ascendieron a alrededor de 79.000 ton en 2012 (Roskill, 2013), siendo Chile y Argentina los mayores exportadores de carbonato de litio con una participación del 71% y 12% del total mundial, respectivamente (gráfico N°8).

De acuerdo a lo anterior, el destino principal de carbonato de litio proveniente de Sudamérica es Asia; y a nivel países, China, Japón y Corea del Sur son responsables de la mitad de las importaciones internacionales. Las internaciones de estos tres países alcanzan cantidades parecidas: alrededor de 13.000 ton cada uno en 2012 (en torno al 16%). Asimismo, EEUU recibe el 16% y la UE al menos 25%. En el caso de China, salta a la vista la diferencia entre su destacable participación en la producción mundial de carbonato de litio (36%) y el bajo porcentaje en las exportaciones globales (4%), lo

que refleja el alto consumo interno del compuesto. El gráfico N°9 muestra principales países exportadores de litio

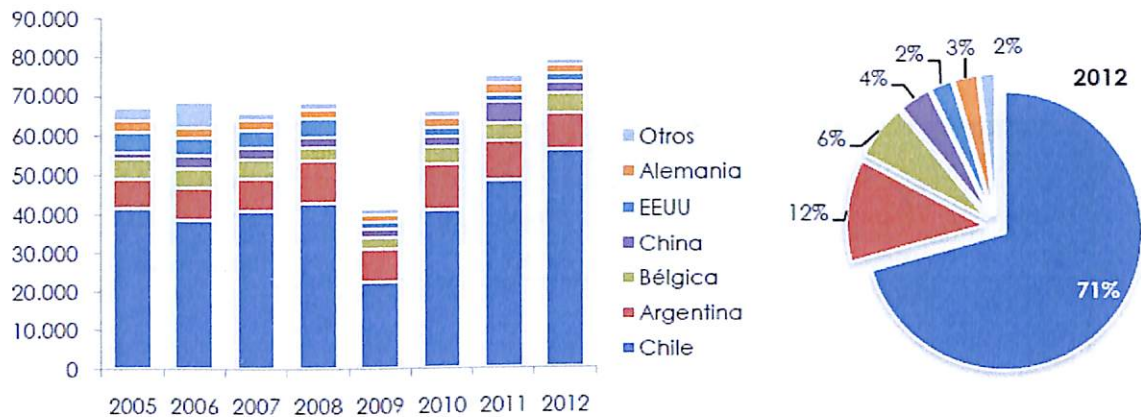


Gráfico N° 9. Principales países exportadores de Carbonato de Litio con su participación porcentual.

4.2 Análisis de la Oferta

En este momento existe una amplia cartera de inversión en varios países que en total podrían agregar más de 500.000 tpa² LCE a la capacidad actual hacia fines de la presente década. Los países de mayor relevancia son Canadá, en el caso de proyectos para producir concentrados de litio, y Argentina en el caso de la recuperación de litio a partir de salmueras de los salares andinos. Ello significa una clara amenaza al liderazgo que Chile ha mantenido durante muchos años en la producción mundial de litio.

4.2.1 Producción potencial de litio a partir de minerales

Los proyectos que prevén la explotación de litio a partir de minerales tanto en rocas pegmatíticas como sedimentarias suman una capacidad de alrededor de 185.000 tpa de LCE (Tabla 10). Entre los países con recursos de litio en roca, Canadá es el más importante y alberga proyectos que agregarían al menos 84.600 tpa LCE a la oferta actual durante los próximos cinco años.

²tpa: toneladas por año.

La iniciativa más avanzada es Québec Lithium de la compañía Canada Lithium, que actualmente se encuentra en etapa de puesta en marcha. Su capacidad de diseño alcanzará 20.000 tpa LCE contenido en carbonato e hidróxido. En la tabla N° 10 se muestran los proyectos en proceso de puesta en marcha.

Tipo de yacimiento	País	Año de puesta en marcha				Cap. adicional (suma)
		2014	2015	2016	2017	
Mineral		35.000	86.000	30.300	60.100	184.800
Espodumeno	Varios	35.000	60.000	30.300	60.100	158.800
	Australia		22.000 ⁽¹⁾		22.000 ⁽¹⁾	44.000
	Austria			3.700		3.700
	Canadá	20.000	38.000	26.600 ⁽¹⁾		84.600
	China	15.000			7.500	22.500
	Finlandia				4.000	4.000
Hectorita	EEUU		26.000			26.000
Salmuera		43.500	91.000	127.000	-	261.500
Campo de petróleo	EEUU			20.000		20.000
Geotermal	EEUU		16.000			16.000
Salar	Varios	43.500	75.000	92.000		225.500
	Argentina	23.500	60.000	10.000		93.500
	Bolivia			30.000 ⁽¹⁾		30.000
	Chile	20.000		62.000 ⁽¹⁾		82.000
	China		10.000	5.000		15.000
	EEUU		5.000			5.000
Total general		78.500	177.000	157.300	33.500	446.300

Tabla N°10. Puesta en marcha de proyectos según tipo de yacimiento.

Otro proyecto en desarrollo es Wabouchi, que comenzará en 2015 a producir carbonato e hidróxido de litio a partir de concentrados de espodumeno. La capacidad instalada será de 38.000 tpa LCE.

Una novedad es el proyecto Kings Valley en EEUU de la empresa Western Lithium que considera la recuperación de litio a partir de arcillas sedimentarias, o hectoritas, para lo cual desarrolló una nueva tecnología extractiva. Este proyecto ya cuenta con estudio de factibilidad que prevé una capacidad equivalente a 26.000 tpa de LCE y su puesta en marcha para 2015. En caso de resultar exitosa su ejecución, y comprobar la viabilidad



de la explotación de hectoritas, ello podría cambiar el futuro escenario del mercado de litio, dado que existen cuantiosos recursos de este tipo en EEUU, entre otros países. Dependiendo del precio del litio y el costo de producción involucrado, este tipo de yacimiento se podría convertir en una fuente competitiva de litio.

4.2.2 Producción potencial de litio a partir de salmueras

En total, existen iniciativas en salares de Argentina, Bolivia, Chile y China que durante los próximos cinco años añadirían 225.500 tpa de LCE a la capacidad actual instalada. Entre estos países, Argentina es el que concentra el mayor número de proyectos importantes sumando 93.500 tpa LCE a la capacidad total instalada hacia 2017. Incluso tiene el potencial de superar hacia 2020 la capacidad de Australia

En Chile, en tanto, hay solo un proyecto seguro que es la expansión de la planta La Negra de SCL que agregaría una capacidad de 20.000 tpa de carbonato y cuya puesta en marcha se realizó durante el 2014. Sin embargo, si se realizaran los otros proyectos en carpeta de Simbalik, Li3 Energy y SQM se podría llegar a cerca de 160.000 tpa y reconquistar el liderazgo.

Aparte de los salares, existen más proyectos innovadores y nuevas fuentes de litio en EEUU. Por un lado, está la iniciativa de extraer litio desde las salmueras del campo geotermal Salton Sea en California, la que se encuentra en etapa de construcción.

Por otro lado, Albemarle Corp. desarrolló una tecnología que permitirá a la compañía producir carbonato de litio a partir de las mismas salmueras que procesa en su planta de bromo en el campo de petróleo de Magnolia, Arkansas. Actualmente, el proyecto se encuentra en etapa de factibilidad y considera una producción de 20.000 tpa de carbonato de litio a partir de 2016.

4.2.3 Proyección de la capacidad instalada hacia 2020

En la actualidad, la capacidad instalada de producción de litio llega a cerca de 307.000 tpa LCE. Para proyectar la oferta hacia el año 2020, se consideran solo los proyectos

probables en etapa de al menos prefactibilidad y con el año de puesta de marcha definido. Además, se calcula con un ramp up de dos años, con un 50% de la capacidad de diseño logrado durante el primer año, 75% en el segundo año y 100% a partir del tercer año.

Sobre esta base, se estima que a fines de la presente década se podría duplicar la capacidad instalada en el mundo, superando la marca de 600.000 tpa LCE. A nivel de países, Argentina liderará con 129.000 tpa LCE, seguido por Australia y China. Chile, por su parte, quedaría en el cuarto lugar con 96.000 tpa LCE.

Cabe destacar además los aumentos de Estados Unidos que podría llegar a más de 70.000 tpa y Canadá a casi 60.000 tpa; ambos se ubicarían cerca del 10% de participación del total mundial. En tanto, Chile reduce su participación del 25% en 2013 a solo 16% en 2020, y si en Australia (actualmente líder con 41%) no se desarrollan más proyectos, caería a 21%. En el gráfico N° 10 se muestra la participación proyectada de países líderes.

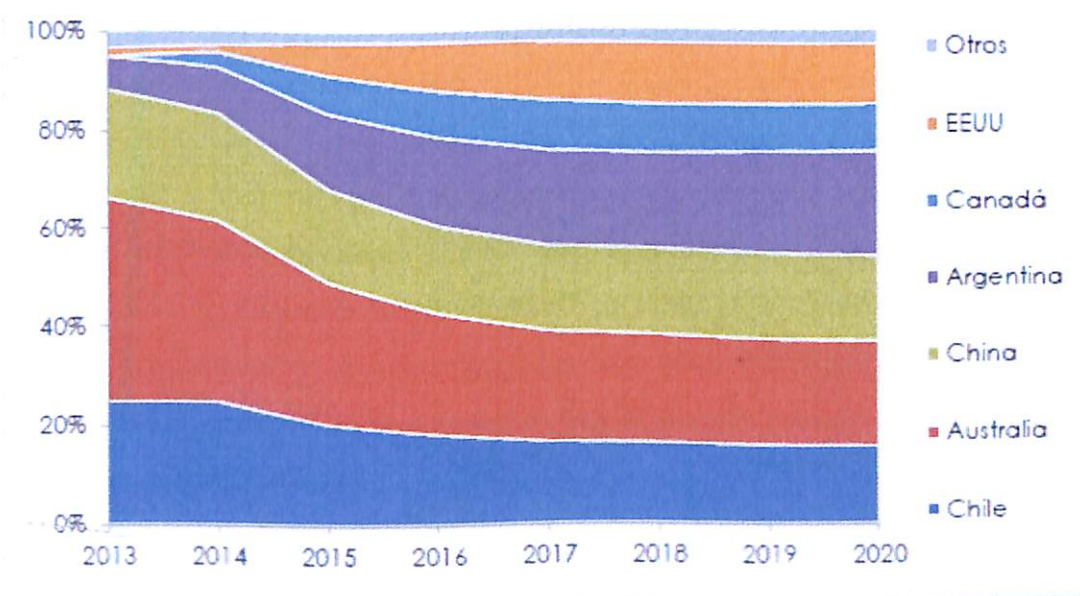


Gráfico N° 10. Participación porcentual proyectada en el total mundial de la capacidad productiva de LCE.



4.3 Análisis de la Demanda

Para cualquier empresa o proyecto, entra en la preocupación por si la creciente demanda de un producto y sus perspectivas a futuro tendrán respuestas por el lado de la oferta.

Hoy en día el litio se ha convertido en un metal de enorme interés a nivel nacional como internacional, esto se debe al extensivo uso de baterías recargables para un conjunto de aplicaciones ha presionado para un rápido crecimiento de la demanda por carbonato de litio. En nuestro país el litio cuenta con las mayores reservas a nivel mundial, liberando en la producción de carbonato de litio en la participación del mercado.

4.3.1 Demanda actual y proyección futura

El uso del litio ha experimentado un significativo crecimiento. En el año 2002 alcanzo apenas 70.000 toneladas de litio. Según SQM (2009), en los últimos 10 años la demanda global por litio creció en promedio entre un 7 y 8% anual, a partir, principalmente, del desarrollo de las baterías recargables pero también del crecimiento por parte del resto de las aplicaciones. En efecto, la demanda por litio, excluyendo el uso en baterías eléctricas, ha crecido en torno a un 5% por año.

Para el 2008, la demanda por litio alcanzó aproximadamente las 92.000 toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE), correspondiente a 17.000 toneladas de litio metálico, lo que representa un crecimiento en torno al 2% con respecto al 2007. La caída del crecimiento en comparación a los promedios históricos antes obtenidos es el resultado de la desaceleración económica que el mundo empezó a vivir a partir de la segunda mitad del 2008³.

³ No existe en la actualidad información clara sobre los impactos de la crisis económica en la industria del litio, no obstante, algunas estimaciones indican una caída del 20% en la demanda de carbonato de litio durante el 2009, ubicándola en alrededor de 68.000 toneladas métricas de LCE (Credit Suisse, 2009).



En 2012 el consumo aumento a alrededor de 150.000 toneladas de litio, ello corresponde a una utilización de la capacidad de producción de litio instalada a nivel mundial de alrededor del 50%.

Hacia 2018, las baterías recargables representarán el 42% de la demanda (en 2008 la cifra fue de 27%) y las destinadas a vehículos representarán entre el 10 y el 15%.

Para los próximos 10 años, proyecta un crecimiento anual de la demanda por litio en un 5%. Y dentro, de eso, las baterías recargables serían las protagonistas, con tasas cercanas al 10% anual.

Se estima que la demanda mundial de litio en el 2018 alcanzará las 158.000 toneladas de carbonato de litio (29.700 toneladas de litio)⁴. En términos de la capacidad de producción no hay un conocimiento exacto, y dependerá de la evolución de los proyectos de implementación en particular, en China. No obstante, Evans (2009) hace una estimación moderada de la capacidad actual de producción y la fija en 104.000 toneladas de carbonato de litio equivalente. Lo anterior implicaría un déficit de 54.000 toneladas para el 2018, el cual podría disminuir notablemente si se cumplen las metas de producción en China de 60.000 toneladas para el 2010. El déficit sería entonces en torno a las 14.000 toneladas.

En el gráfico N°11 se puede observar durante los años 2001 a 2011 como ha ido aumentando la demanda del litio con sus diversos usos en el mundo, donde Chile posee el 41% del mercado del litio. Las baterías de litio son la mejor opción para almacenar energía en vehículos eléctricos (EV) y en los vehículos eléctricos híbridos (HEV). En el 2007, 500.000 vehículos híbridos fueron vendidos, siendo Toyota la principal empresa productora de HEV. Para el 2012, se estiman un número mayor de 2.000.000 de vehículos eléctricos y eléctricos híbridos.

⁴ Otras estimaciones, señalan que la demanda de carbonato de litio alcanzará el 2020 entre 250.000 y 300.000 toneladas respectivamente, lo que significaría crecimientos promedio anual entre un 9 y 11% (TR Group, 2009).

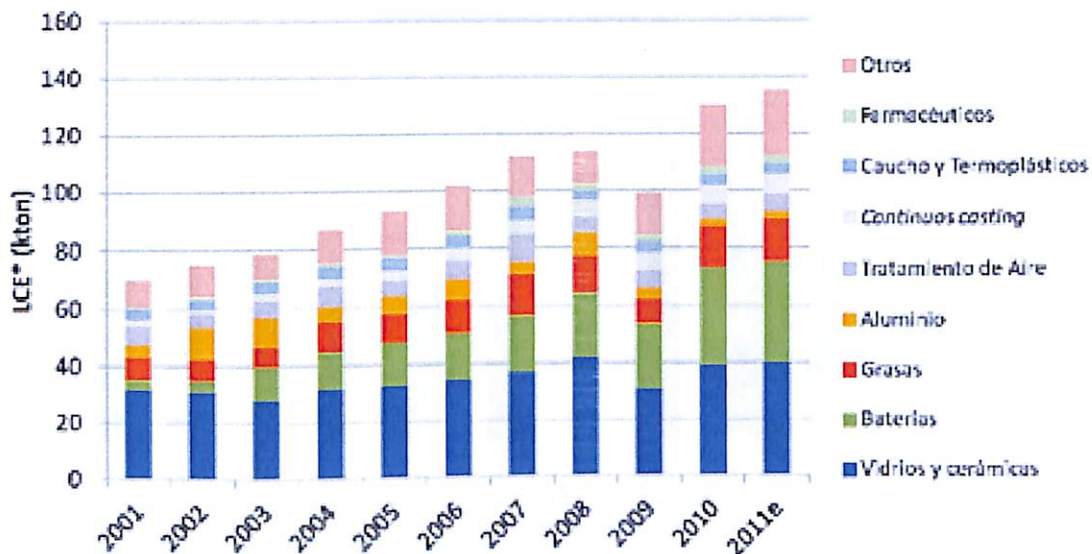


Grafico N° 11. Demanda del Carbonato de Litio.

En la actualidad está en pleno proceso el desarrollo de baterías de íon-litio para vehículos eléctricos e híbridos “enchufables” (plug-in). Estas aplicaciones tendrán un potencial significativo para el mercado del litio. Durante el año 2012 aproximadamente 10 fabricantes de vehículos presentaron EV/HEV⁵ utilizando baterías de ion-litio.

En el año 2010 las baterías producidas para autos eléctricos que utilizan litio fueron 141.000 y el durante este año 2015 se espera que lleguen a 1.732.000, vale decir 12 veces más, donde la escasez de petróleo agudizará este fenómeno. En el grafico N° 12 se muestra la proyección de la demanda del litio de 2011 a 2020.

⁵ EV: Vehículos eléctricos, VHE: Vehículos híbridos eléctricos.

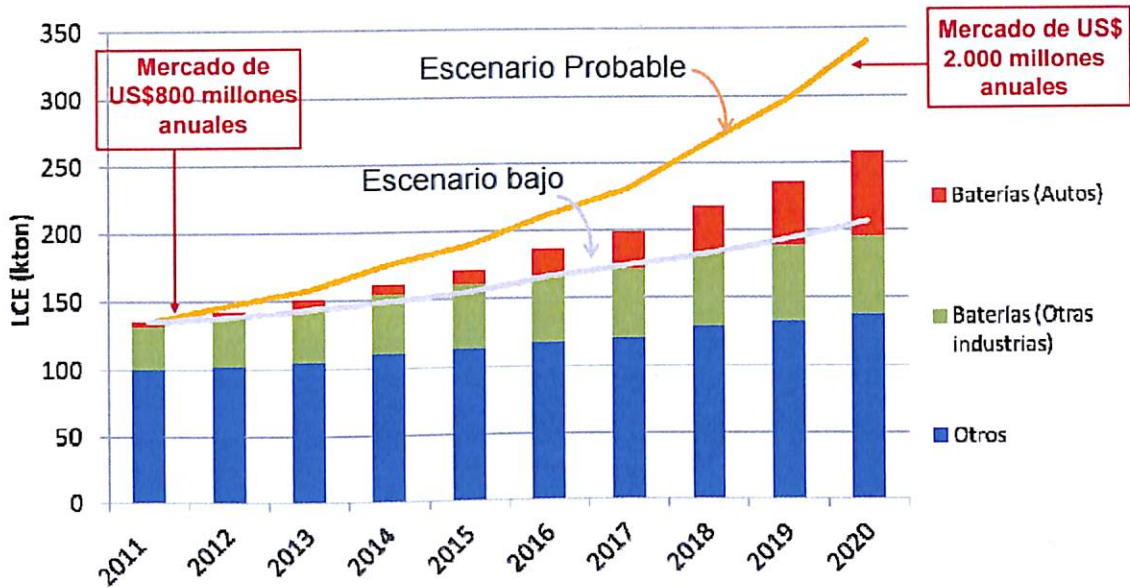


Gráfico N° 12. Proyección de demanda del litio de 2011 a 2020.

SQM declaró que vehículos híbridos y eléctricos debiesen contener de 1 a 5 kg. (2,4 a 12 lbs) de carbonato de litio equivalente. Los rangos de requerimientos de litio son altamente variados, y van de 3,3 lbs en leves híbridos de alta potencia, 6,6 en híbridos completos (2.0 KWh), 50 lbs en híbridos avanzados (plug-in) hasta las 85 lbs en autos eléctricos completos.

Chemetall (2009), sobre la base de una estimación de 60 millones de nuevos vehículos, estima dos escenarios probables, sobre la base de que la industria espera un crecimiento de los autos eléctricos del 1 al 10% al 2020. Un primer escenario con un 1,6% de HEV/EV de los nuevos 60 millones de vehículos y otro escenario con un 10% de HEV/EV. Lo anterior significa, un primer escenario con 1.000.000 de nuevos vehículos HEV/EV o un segundo escenario con 6.000.000 de nuevos vehículos HEV/EV. Este sería el rango de desarrollo esperado al 2020.



Lo anterior, sumado al crecimiento en otros usos, permite proyectar (según Chemetall), una demanda de litio en torno a los rangos de 90.000 y 145.000 toneladas de LCE. Ambas, perfectamente cubiertas con las reservas del Salar de Atacama.

4.3.2 Demanda a través de los años

Una de los aspectos curiosos de estas proyecciones tan ostentosas de la demanda futura en 1985 es que ocurrían en un período en que la demanda aumentó en forma muy lenta (1984-1993), mientras que desde 1994 hasta el comienzo de la crisis asiática en 1997, el consumo de litio aumentó más rápidamente debido a al uso del metal en los nuevos monitores monocromáticos para computadores.

Para 1990 el uso del litio en cerámicas y vidrios había subido a 52%, el litio en la fabricación de aluminio se mantenía en 31%, y el uso del metal en grasas lubricantes había caído a 8%. La utilización de litio en baterías se había elevado marginalmente y era menos de 10%. Nuevamente en 2007 se expresaron dudas sobre la capacidad de la industria para proveer el litio necesario para abastecer la demanda de litio para baterías y en particular para las baterías de ión litio para vehículos eléctricos. Pero en 2007 ya había un patrón de consumo que apoyaba estas estimaciones.

En 2008 el consumo de litio en baterías había ganado el segundo lugar entre los mayores usos del metal con un 20% del mercado, después de los vidrios y cerámicas (37%), desplazando al uso en fabricación de aluminio (7%) y a las grasas lubricantes (13%). Las baterías de litio habían desplazado a las de níquel cadmio y níquel hidruro metálico en muchas aplicaciones electrónicas. En 2009 se estimaba que el 90% de los computadores portátiles y el 60% de los teléfonos celulares usaban baterías de litio (Metal Bulletin 2009).

El período 2000 a 2008 hay que segmentarlo en dos partes, la primera desde 2000 a 2003, caracterizada por las secuelas de la crisis asiática, con baja demanda y precios por minerales. La producción de litio prácticamente no creció entre 2000 y 2003, más aún,

decreció en un 13% desde el comienzo de la crisis asiática en 1997 hasta 2003, señalando que la industria tenía una sobrecapacidad de producción. Desde fines de 2003 emergió el poder de China en el mercado y la demanda aumentó muy agudamente para todos los commodities minerales hasta la crisis financiera global de 2008.

En el caso del litio el uso más importante de este período fue la industria de la cerámica y vidrio, los que estaban fuertemente determinados por la construcción y la industria automotriz (Metal Bulletin 2009). Las baterías de litio para usos electrónicos emergieron fuertemente en el uso del litio desde 2000, aumentando su uso desde un 6% en dicho año a un 20% en 2008. Debido al aumento del uso de las baterías de litio retrocedió el uso relativo de las otras aplicaciones del litio, con excepción de las grasas lubricantes, las que mantuvieron su participación en el mercado global. El grafico N°13 representa la demanda de litio mundial en toneladas.

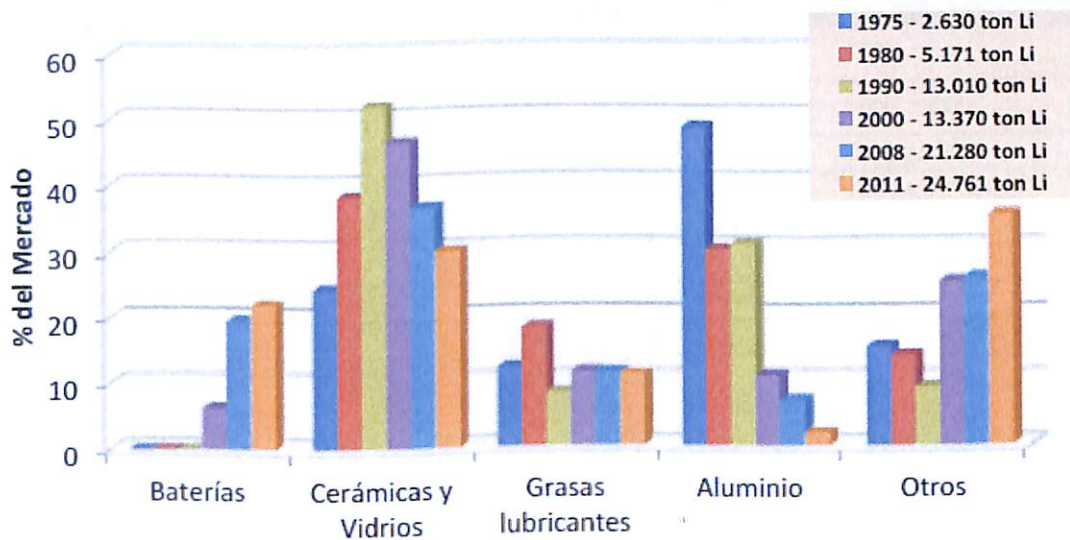


Grafico N° 13. Demanda Ton de litio a nivel global



4.4 Costos de producción del Carbonato de Litio:

Chile es líder en la producción de carbonato de litio a partir de salmueras por las ventajas en los bajos costos que tiene en el Salar de Atacama con respecto a China, su principal competidor.

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 (Na_2CO_3 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 Tabla N°11.

Tipo de materia prima	Método	País de la operación	Yacimiento / Compañía	Costo de producción (US\$/t LiCO_3)
Salmuera (sales)	Evaporación solar	Argentina	Hombre Muerto / FMC	3.000
		Chile	Atacama / SQM y SCL (Rockwood)	2.000-2.300
		China	Zabuye y Taijinaier	3.000-3.300
Conversión de minerales	Método convencional (1)	China	Diversos	3.800-4.500
		China	Jiangsu / Galaxy	5.000
		Brasil	CBL	7.800
	Tostado de arcillas	--	Western Lithium	3.000

Nota: (1) Método tradicional minero utilizado en yacimientos pegmatíticos vía conminución, y separación física
Fuente: COCHILCO en base a Roskill (2013)

Tabla N°11. Costos de producción según país y tipo de materia prima.

En el gráfico N°14, se puede observar el bajo costo en la producción de salmueras en los países de Chile y Argentina, el costo marginal de producción es fijado por los productores que extraen carbonato de litio en rocas pegmatitas con un alto costo de producción en Australia y China.

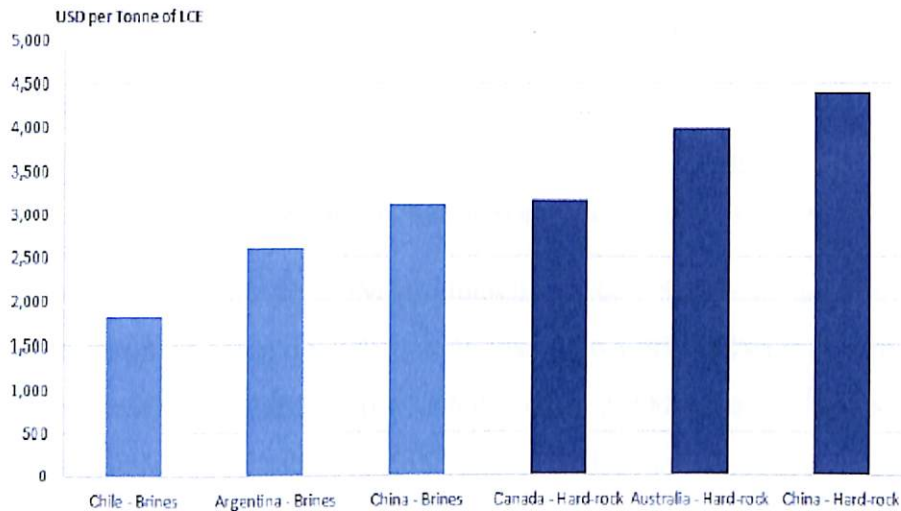


Grafico N° 14. Costo de producción de carbonato de litio.
Fuente: Estimación de capital de mercados en Australia

4.5 Precio del Litio

Las grandes expectativas de demanda futura de litio han disparado los precios en los últimos años. Entre 1999 y 2008, el precio promedio del carbonato de litio creció en 222%, lo que significa un crecimiento promedio anual del orden de 13,9%.

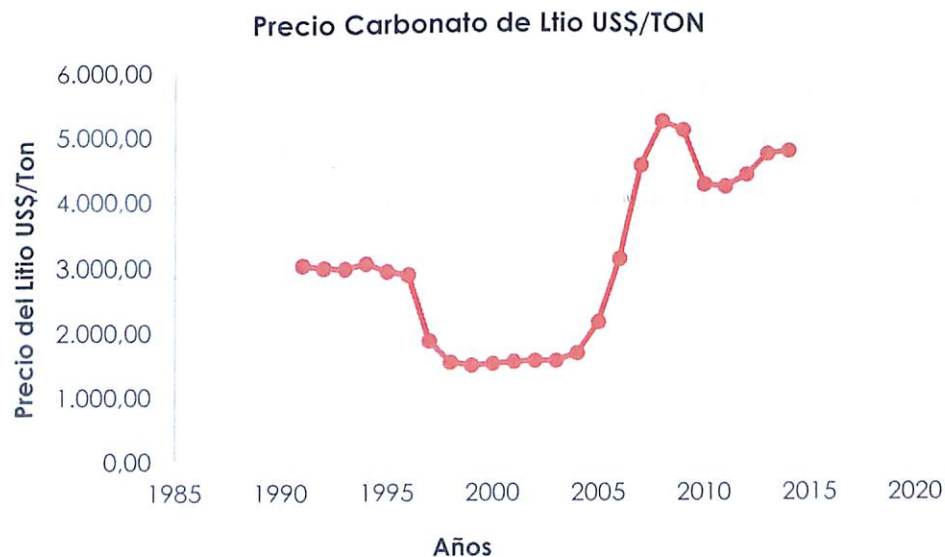


Grafico N° 15. Evolución de Precios promedio anual del Carbonato de litio, datos de Cochilco.



En el gráfico N°15 se aprecia el precio en los años 1991 a 2014.

Entre 1991 y 1996 el carbonato de litio fue producido desde yacimientos de minerales y salmueras fundamentalmente por las operaciones de Chemetall en SCL (Salar de Atacama) y Silver Peak. El precio de mercado estuvo en torno a los 3.000 US\$/ton.

Con la entrada al mercado de SQM produciendo 9.000 toneladas de carbonato de litio los precios cayeron en cerca de 40%, situándose bajo 1.800 US\$/ton. Entre 1999 y 2004 los precios promedios se mantuvieron estables entre 2.000 y 2.500 US\$/ton., mientras la producción de SQM aumentaba a 24.000 ton. de LCE el 2003.

Desde el 2005, los precios del carbonato de litio experimentaron un brusco aumento (el precio promedio aumentó en 90%), a causa de la escasez en el mercado producida por varios factores: un fuerte incremento de la demanda en las aplicaciones de baterías, problemas de producción en el Salar de Atacama y la puesta en marcha de la planta de hidróxido de litio de SQM⁶; a lo que se debe sumar el propio impacto del ciclo económico mundial que elevó el precio de todos los minerales.

Posterior al 2006, los precios del carbonato de litio han tendido a estabilizarse por sobre los 6.000 US\$/ton⁷. La crisis económica mundial experimentada desde el 2007, parece no haber afectado mayormente los precios de referencia del carbonato de litio, más aún, si bien el precio promedio aumentó en solo 1,8% entre el 2007 y 2008, el precio mínimo informado aumentó en 3,7% en el mismo período⁸. Lo anterior se puede explicar por la fuerte demanda que está teniendo el litio para las baterías secundarias, en particular, la apuesta de la industria automotriz por enfrentar su propia crisis con el desarrollo en masa de los modelos híbridos y eléctricos.

⁶ Ehren, Peter (2009). Chilean Lithium Carbonate Export. En http://www.lithiumsite.com/Lithium_Market.html.

⁷ Los precios son informados por "Industrial Minerals", quienes consultan directamente a los principales proveedores y usuarios de la industria del carbonato de litio, puesto que el litio es transado directamente mediante contratos entre clientes y proveedores, y no mediante bolsa.

⁸ Industrial Minerals, informa un rango de precios mínimo y máximo, para las transacciones de carbonato de litio.



4.5.1 Determinación del Precio del Litio

Los precios están relacionados con los deseos de compra o venta de los agentes que en él intervienen. Son bien conocidas las representaciones de la oferta y de la demanda por sus curvas características, como también es sabido que el punto de intersección de ambas curvas determina el precio y que este varía con las traslaciones respectivas de una y otra curva. El precio se moverá en un sentido o en otro, de acuerdo con las tendencias del mercado.

El litio metálico es un commodity, y como es así, se dan en diferentes formas en la corteza terrestre, en salmueras y minerales, y con distintos procesos de extracción, para obtener diferentes usos y productos. El litio establece una fuerte segmentación de los mercados de este metal, lo que lo diferencia de los metales de grandes mercados como el cobre, al aluminio, el hierro y el oro. El mayor mercado del litio en 2008 era el carbonato de litio (40%), seguido por los minerales de litio (24%), el hidróxido de litio (13%), el bromuro de litio (5%), el butyl litio (3%), el litio metálico (1%), y el cloruro de litio (1%). El carbonato de litio aumento su uso en el año 2012 a 54% del mercado mundial.

La determinación del precio de los productos del litio lo establecían dos compañías productoras de este metal, ambas de propiedad norte americanas hasta la década de 1990, y las compañías más pequeñas se regían por los precios que ellos imponían. Pero las compañías mayores establecieron precios que eran considerablemente distintos entre sí.

Existen cinco métodos para la fijación del precio de los metales, estos son:

- 1.- Precio de productor; este lo fijaban Foote y Lithco, y los demás se alienaban a este precio.
- 2.- Bolsas de Metales; tales como la Bolsa de Metales de Londres (LME), el Commodity Exchange de Nueva York (COMEX), la bolsa de Shanghai.
- 3.- Precios negociados directamente entre productores y compradores, tales como los usados en contratos de concentrados de cobre.



4.- Precios citados por una institución independiente de alto prestigio en forma periódica, y al que los productores y compradores se atienen. Por ejemplo Metals Week.

5.- Carteles o monopolios (como Salitre Chileno).

El precio de productores utilizado por las compañías de litio es uno de los cinco métodos usados para fijar el precio de los metales (Strauss 1986).

Además hay que diferenciar el precio de productores con el precio establecido por carteles, monopolios y oligopolios. Strauss cita como monopolios el nitrato (salitre) chileno a principios del siglo XX, y la criolita producida en Groenlandia en la década de 1980, en ambos casos, ellos controlaban más de la mitad del mercado, fijaron precios mucho mayores que los que habrían correspondido a mercados competitivos, pero en ambos casos se desarrollaron sustitutos sintéticos, los que dejaron fuera de mercado a los minerales originales.

En el caso de los oligopolios, unas pocas compañías que dominan el mercado, Strauss citaba los ejemplos de las industrias del aluminio, el níquel, y el molibdeno después de la segunda guerra mundial. Más adelante en 1978, la Bolsa de Metales de Londres comenzó a transar el aluminio, y en 1979 el níquel. Pero estos metales dejaron de tener la estabilidad de precio de la que gozaban y pasaron a tener, en cambio, una alta volatilidad, la que retienen en la actualidad, junto a los commodities minerales transados en bolsa. El precio del hierro era fijado anualmente por tres compañías hasta 2010, Río Tinto, Vale y BHP Billiton. En el año 2005, muchos compradores usaban el precio spot de este metal por lo que la volatilidad del precio había aumentado a niveles que superaban la volatilidad de los precios del aluminio y del cobre. La crisis global de 2008 cambió esto ya que el precio spot del hierro se ubicó por bajo el precio anual fijado por los tres grandes, por lo que los fabricantes de acero de China eligieron transar con base al precio spot. Por ello el precio Benchmark anual establecido por las tres grandes colapsó y se llegó a acuerdo para instaurar un precio trimestral basado en el precio spot, que sería mucho más transparente y ajustado a las condiciones de oferta y demanda.

Con respecto a los carteles, muy pocos han sido exitosos durante toda su historia, los diamantes constituyendo tal vez el caso más prolongado de éxito. El cartel del petróleo es un ejemplo de éxitos cortos y fallas prolongadas.

El comportamiento de precios fijados por la industria del litio durante su breve historia, fue muy distinto al de algunos carteles, que pecaron de la ilusión que podrían derrotar a los mercados.

El escenario de unas pocas compañías dominando la producción mundial de litio puede ser categorizado como oligopolio. En 2008 el 85% de la producción mundial la generaban sólo cuatro compañías, Chemetall de origen alemán, recientemente adquirida por la empresa Rockwood de los Estados Unidos, la Sociedad Química y Minera de Chile, Soquimich (SQM), FMC9 Lithium Division (ex Lithco), y Talison de Australia (Metal Bulletin 2009).

Hoy en día el litio no se transa en la bolsa y el precio es el resultante de las negociaciones directas entre productor y cliente final. En el grafico N° 16 se aprecia el precio del carbonato de litio por país

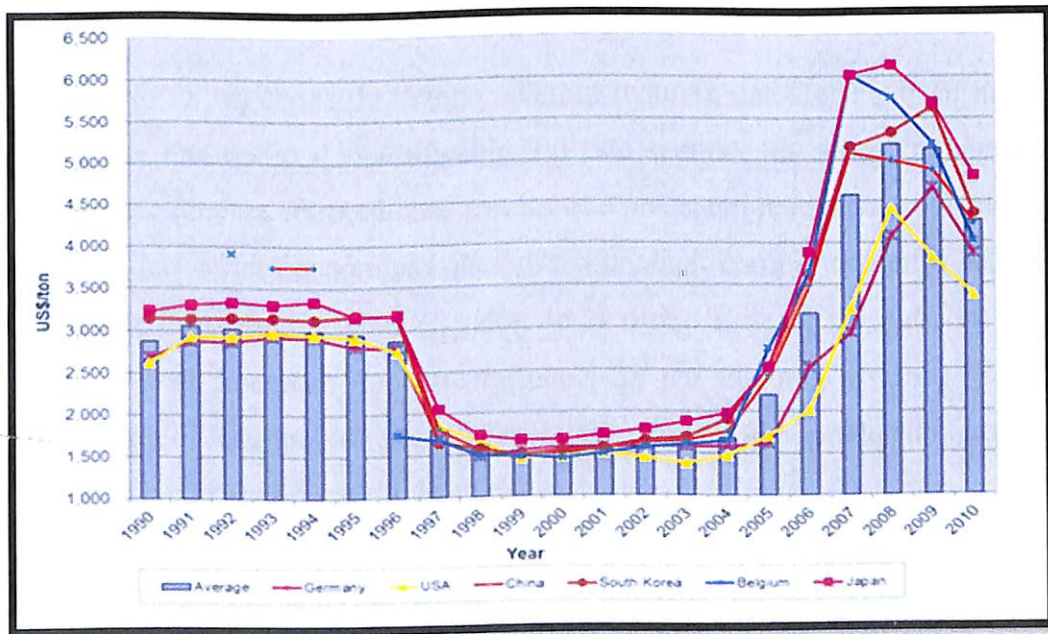


Grafico N°16. Precio Carbonato de Litio por país.



4.5.2 Proyección del Precio del Litio

Chile es líder en la producción de carbonato de litio a partir de las salmueras en los salares de Atacama, debido a sus bajos costos en la extracción de este compuesto y a las grandes reservas que poseemos en la zona norte de nuestro país. Por otra parte, para determinar el precio del litio, este no es como los demás metales que se transan en la bolsa, pues este se genera a través de las negociaciones directas entre productor y cliente, ya que la industria del litio es pequeña si se compara con la de otros metales. Como se refleja en el gráfico N°17, la serie de tiempo no muestra una periodicidad definida, ya que en los años 91 a 96 el precio del Li_2CO_3 se había conservado constante con muy pocas variaciones, pero a finales del año 96 Soquimich (SQM) entró al mercado, produciendo la caída del precio del litio que llegó hasta los 1872,9 US\$ la tonelada, recuperándose recién en el año 2005 llegando hasta los 5245 US\$/Ton de Li_2CO_3 .

4.5.2.1 Análisis de Modelos de Series de Tiempo para el Precio del Carbonato de Litio:

En este estudio de las series de tiempo siempre requiere datos que por su naturaleza, sean reflejo de una realidad cuantificable. En este sentido, las series temporales con mayor información para ser predichas son las que presentan tendencia, estacionalidad y ruido blanco. Las series económicas que buscan predecir comportamientos económicos como el valor de cierto metal o el valor de la moneda de cierto país, es sin duda compleja, pues es frecuente que esté influenciada por factores externos. Es posible realizar un moldeamiento coherente y con ello, hacer una predicción con mayor información cuando se conocen dichos factores.

En este estudio se dispone de una serie temporal con desglose anual del precio del Carbonato de Litio, que es un metal con un alto potencial de crecimiento en su valor, y se analizarán los distintos modelos de series, escogiendo el mejor ajuste que tengan cada uno de ellos con los datos históricos a estudiar en el software estadístico llamado R.

Los parámetros α , β y γ , son parámetros de suavizamiento, se les da un valor entre 0 y 1, cuanto mayor sea ese valor, mayor se le dará a la observación.

La serie del Litio es una serie anual con una media de 3058 US\$/tonelada y variabilidad, representada por una desviación estándar de 1316,48 US\$/tonelada.

Debido a que la naturaleza de los datos no es estacionaria, no hay un periodo de frecuencia, principalmente, como se puede apreciar en el gráfico N°17, es por ello que los datos se acomodan a un modelamiento Holt- Winters no estacional a uno de suavizamiento exponencial, que será visto a continuación.

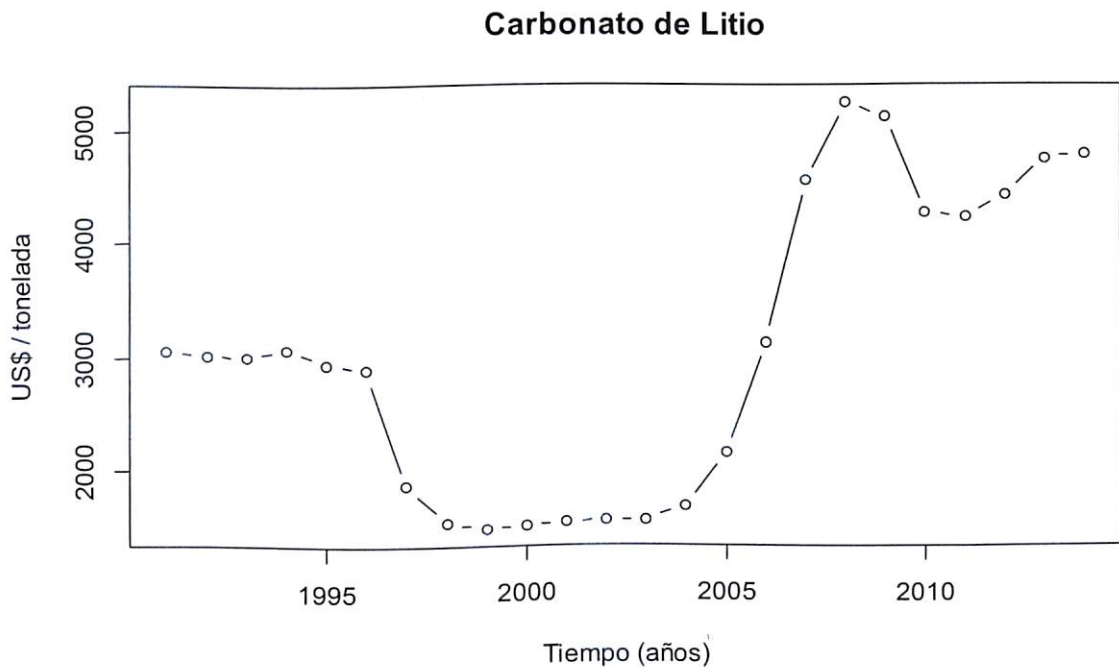


Grafico N° 17. Precios del Li_2CO_3 .

La serie de tiempo no muestra una periodicidad definida. Esta característica hace complejo desarrollar un modelo predictivo basado en moldeamiento con una estacionalidad conocida con frecuencia identificable.



Para realizar la identificación de un modelo con el método de Holt-Winter, con una suavización exponencial con tendencia y sin componente estacional, los parámetros identificados son los siguientes: α y β igual a 1.

```
Holt-Winters exponential smoothing with trend and without seasonal component.  
  
Call:  
HoltWinters(x = xts, gamma = FALSE)  
  
Smoothing parameters:  
alpha: 1  
beta : 1  
gamma: FALSE  
  
Coefficients:  
      [,1]  
a 4790.68  
b   43.88  
> |
```

Luego se analizó con el mismo modelo Holt-Winter, suavizamiento exponencial y sin tendencia y sin componente estacional y sin considerar los parámetros beta y gamma, siendo α igual a 0,9999541, indica los siguientes resultados:

```
Holt-Winters exponential smoothing without trend and without seasonal component.  
  
Call:  
HoltWinters(x = xts, beta = FALSE, gamma = FALSE)  
  
Smoothing parameters:  
alpha: 0.9999541  
beta : FALSE  
gamma: FALSE  
  
Coefficients:  
      [,1]  
a 4790.678  
> |
```

Los modelos al ser graficado, muestran los siguientes ajustes a los valores observados. Lo cual se ilustra en el grafico N° 18.

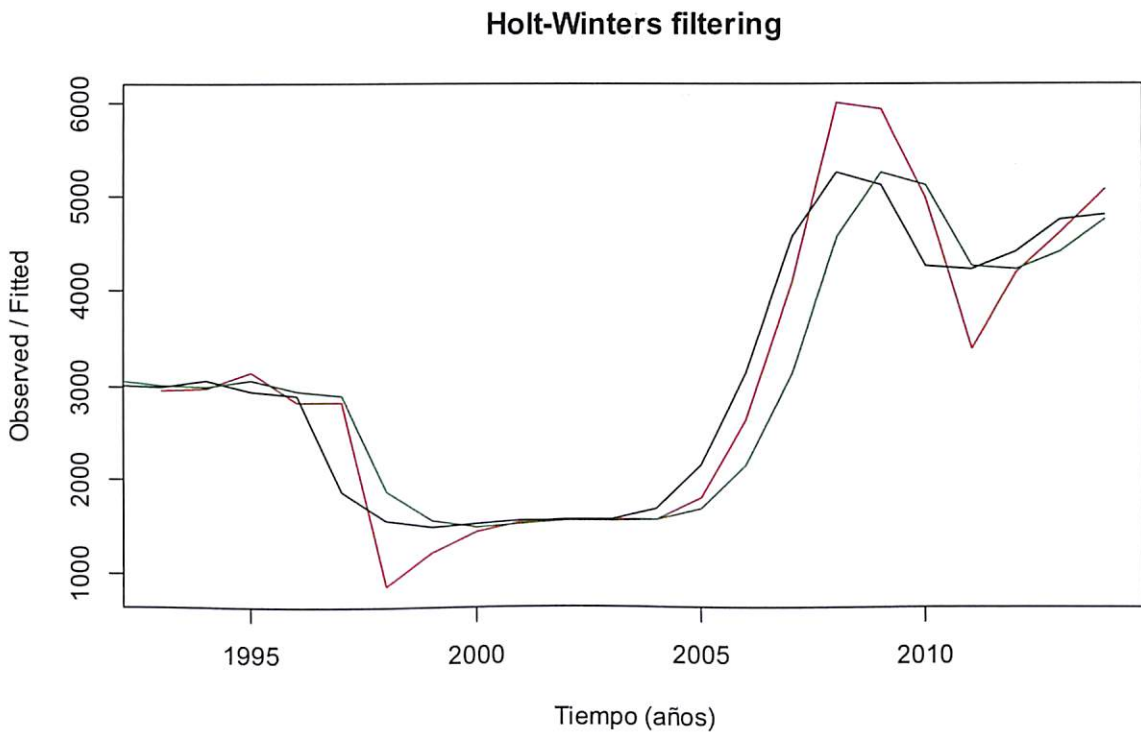


Grafico N° 18. Serie temporal con el ajuste de los modelos del Precio del Litio.

La línea de color negro en el grafico N°18 representa el valor del precio del litio desde el año 1991 hasta 2014, la Línea de ajuste de color rojo muestra el modelo Holt-Winter no estacional y en la línea de ajuste de color verde del mismo modelo, pero sin considerar el parámetro gamma y beta, muestra que este último modelo de ajuste indica una mejor predicción del tipo Randon Walk (camino aleatorio) del modelo Holt-Winters.

El análisis de la predicción fue hasta el año 2025, donde la estimación se mantuvo constante, lo que cambio son los intervalos de confianza, donde fueron aumentando su longitud y se fueron alejando de la línea de tendencia, esto quiere decir que la confianza es menor. Mientras más cerca estén los intervalos a la línea azul de predicción, más confiable serán los datos. Es por ello que en el gráfico N°19, los datos se me mueven dentro del intervalo de color plomo, y la predicción de los años 2015 a 2025, puede llegar a ser tan confiable como inciertos.

Forecasts from HoltWinters

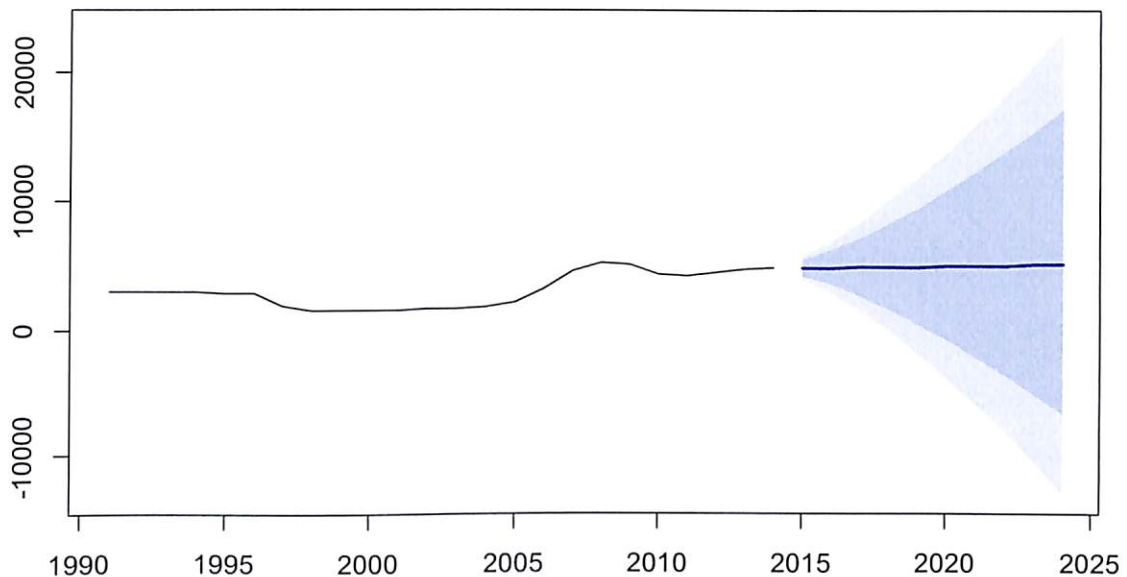


Grafico N° 19. Predicción con Modelo de Holt-Winters.

Luego del análisis anterior, se utilizará la función ETS⁹ de la librería Forecast del Software R, esta incluye un caso especial del modelo Holt-Winters y provee una rica clase de modelos a seleccionar, el mejor para este caso. Entonces el modelo a usar del paquete forecast (Hyndman, 2015) con la función ETS, los parámetros identificados son:

⁹ ETS (M,N,N): Método de suavizamiento exponencial cuyos tres componentes considerados son el valor medio, la tendencia y la estacionalidad.



```
ETS (M,N,N)

Call:
ets(y = xts)

Smoothing parameters:
  alpha = 0.9999

Initial states:
  l = 2960.0605

sigma: 0.1728

      AIC      AICc      BIC
375.6441 376.2156 378.0002
> |
```

El modelo nuevamente no logra identificar un patrón claro, por esta razón, el modelo es nuevamente del tipo Random Walk. En el gráfico N°20 se aprecia los intervalos de confianza 80 y 95 % con parámetros de suavizado

Forecasts from ETS(M,N,N)

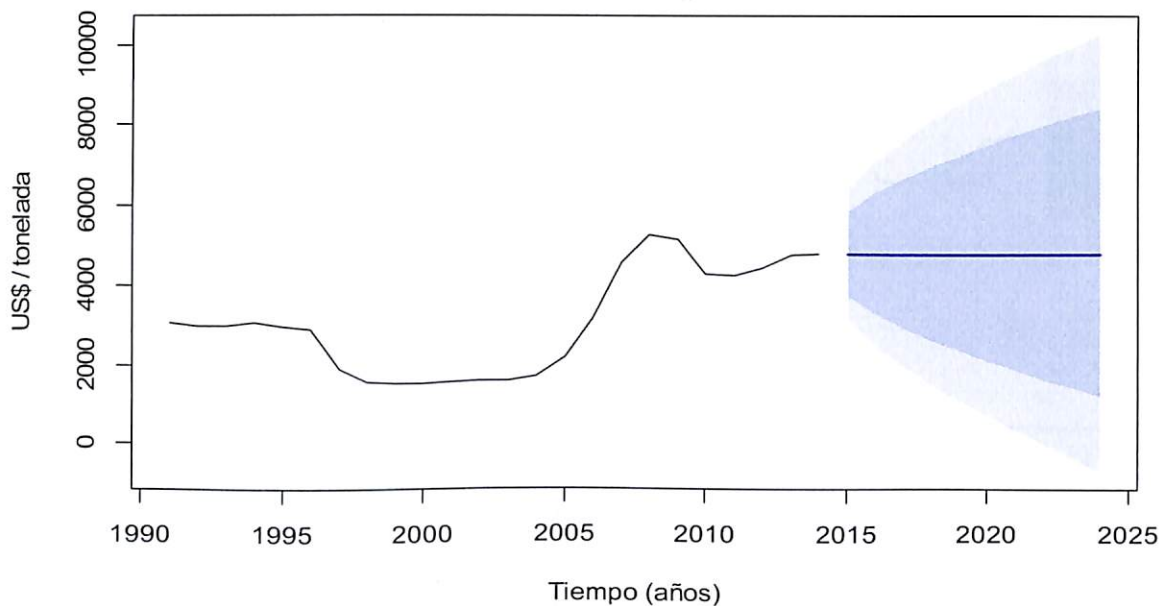


Grafico N° 20. Intervalo de Confianza 80 y 95% con parámetro de suavizamiento (ETS).

Finalmente, se utilizó la herramienta llamada Random Walk Forecast, para series de tiempo de las características que se tienen en esta serie. Entrega una predicción y los intervalos para una serie del tipo Random Walk con un modelo derivado aplicado sobre los valores de x. Lo cual se logró predecir el año 2015 y 2016. En el grafico N°21 se muestra la predicción de dos años utilizando el método random walk.

Forecasts from Random walk

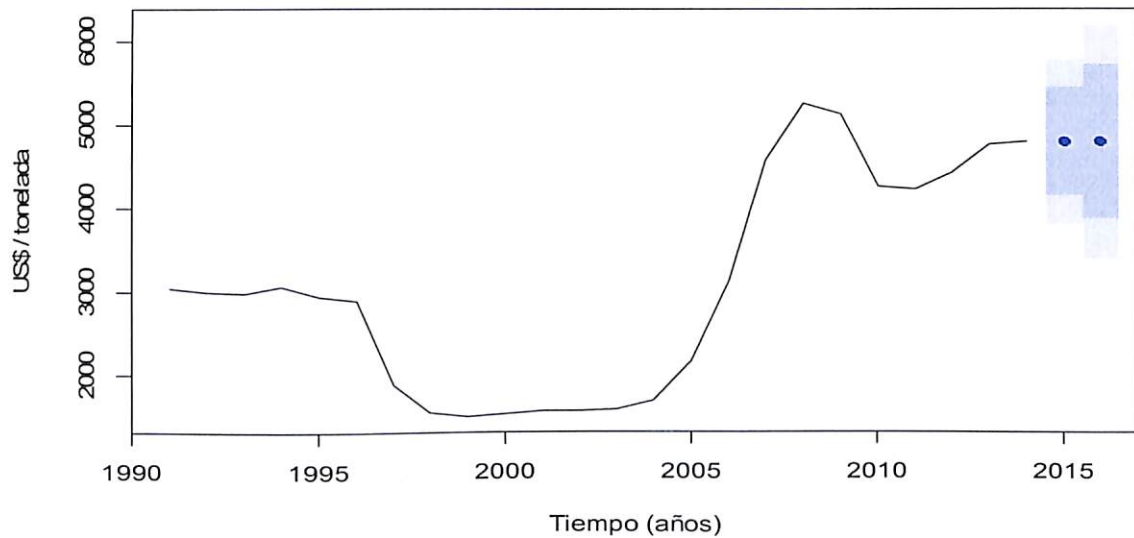


Grafico N° 21. Predicción de dos años desde Random Walk

Es evidente que con este tipo de series temporales, es complejo predecir con mayor seguridad y precisión años futuros. Lo importante es que es posible predecir 1 o 2 años futuros, sin correr riesgos de incertidumbre.

Por lo tanto el modelo está definido por los siguientes parámetros en el modelo Random Walk:



Forecast method: Random walk

Model Information:

\$drift

[1] 0

\$drift.se

[1] 0

\$sd

[1] 506.011

\$call

rwf(x = xts, h = 2)

Error measures:

	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
Training set	75.36	500.5934	306.3948	0.5690865	10.20455	1	0.5812545

Forecasts:

	Point Forecast	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
2015	4790.68	4142.201	5439.159	3798.917	5782.443
2016	4790.68	3873.592	5707.768	3388.115	6193.245

> |

Se indica la predicción, con los intervalos de confianza superiores e inferiores de 80% y 95% respectivamente. El modelo Random Walk es el efectivo, ya que sus primeras diferencias forman un proceso de ruido blanco, puesto que $Z_{[t]}$ es un ruido blanco.

El modelo de la función, está definido por:

$$Y_t = c + Y_{[t-1]} + Z_{[t]}$$

Donde c es un parámetro de suavizamiento, $Z_{[t]}$ es el error con distribución normal idénticamente distribuido e independiente, $Y_{[t-1]}$ es el precio del litio de ayer.



4.5.2.2 Análisis Estadístico en Statgraphic de los precios históricos del Carbonato de litio

La finalidad de este análisis es encontrar el mejor ajuste para las muestras de los precios del litio, para ello se realizaron distintas pruebas en el software estadístico llamado STATGRAPHICS.

Los datos a utilizar en este estudio están en la tabla N°12, que consideran los precios históricos del precio del carbonato de litio desde 1991 hasta el año 2014.

Periodo	Precio
1991	3057
1992	3011
1993	2994
1994	3070
1995	2946
1996	2892
1997	1873
1998	1543
1999	1490
2000	1514
2001	1545
2002	1559
2003	1562
2004	1681
2005	2160
2006	3128
2007	4557
2008	5245
2009	5115
2010	4262
2011	4231
2012	4419
2013	4747
2014	4790

Tabla N°12. Tabla con los precios del litio 1991-2014, fuente Cochilco.



4.5.2.3 Resumen Estadístico para el Precio

En la tabla N° 13 se muestra los estadísticos de resumen para precio de carbonato de litio. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal, al igual que el valor de curtosis estandarizada.

Estadístico	Valor
Recuento	24
Promedio	3057.96
Mediana	3002.5
Varianza	1.73312E6
Desviación Estándar	1316.48
Coefficiente de Variación	43.051%
Mínimo	1490.0
Máximo	5245.0
Rango	3755.0
Sesgo	0.25431
Sesgo Estandarizado	0.50862
Curtosis	-1.38779
Curtosis Estandarizada	-1.38779

Tabla N°13. Resumen de Estadísticos.

4.5.2.4 Tabla e Histograma de Frecuencias para el Precio

Para realizar el análisis de los datos se ordenaron en una tabla de frecuencias dividiendo el rango del Precio en intervalos del mismo ancho y contando el número de datos en cada intervalo en la tabla 14. Las frecuencias muestran el número de datos en cada

intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Para determinar el número de intervalos se utilizó \sqrt{n} , donde n es el número de la muestra, en nuestro caso los 24 precios del litio descartando los otros métodos como la regla de Sturges debido al tamaño de la muestra.

Clase	Límite	Límite	Punto Medio	Frecuencia			Frecuencia Rel. Acum.
	Inferior	Superior		Frecuencia	Relativa	Acumulada	
	menor o igual	1490.0		1	0.0417	1	0.0417
1	1490.0	2241.0	1865.5	8	0.3333	9	0.3750
2	2241.0	2992.0	2616.5	2	0.0833	11	0.4583
3	2992.0	3743.0	3367.5	5	0.2083	16	0.6667
4	3743.0	4494.0	4118.5	3	0.1250	19	0.7917
5	4494.0	5245.0	4869.5	5	0.2083	24	1.0000
	mayor de	5245.0		0	0.0000	24	1.0000

Tabla N°14. Tabla de frecuencia.

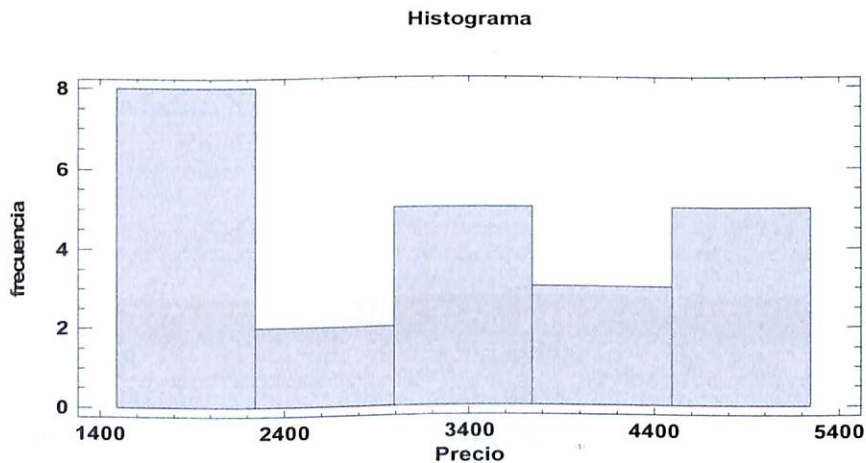


Grafico N° 22. Histograma de Frecuencia.

4.5.2.5 Estudio de Ajuste de distribución al precio histórico del Carbonato de Litio.

Si bien el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada dieron signos de que los datos son provenientes de una probabilidad normal, se deben realizar pruebas más robustas para así confirmar que estos datos realmente se ajustan a una probabilidad normal.



Para realizar el procedimiento de ajuste de una distribución de densidad, ya que los datos obedecen a una variable continua, se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

4.5.2.6 Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov

Para la Prueba de Bondad de Ajuste dentro de las 7 diferentes pruebas, que ofrece el software, para determinar si es razonable que los datos provengan de la distribución ajustada, se utilizó la de Kolmogorov-Smirnov, ya que es una muestra pequeña. Esta prueba comparó la distribución de acumulación de los datos a la distribución de acumulación ajustada.

Una vez calculados los parámetros se muestran en la tabla N°15 el máximo de las distancias de la F.D.A.¹⁰ empírica por encima de la F.D.A. ajustada (DMAS), el máximo de las distancias de la F.D.A. empírica por debajo de la F.D.A. ajustada (DMENOS), La estadística Kolmogorov que es la más grande de las dos distancias (DN) y el Valor-P.

	Normal
DMAS	0.149299
DMENOS	0.146881
DN	0.149299
Valor-P	0.6585

Tabla N°15. Tabla de frecuencia.

¹⁰ F.D.A.: Función de Distribución Acumulada.

Debido a que el Valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que el Precio proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

La mejor forma para ver distribuciones ajustadas es a través del Histograma de Frecuencias, en el grafico N°23 se ve dicho ajuste para los datos.

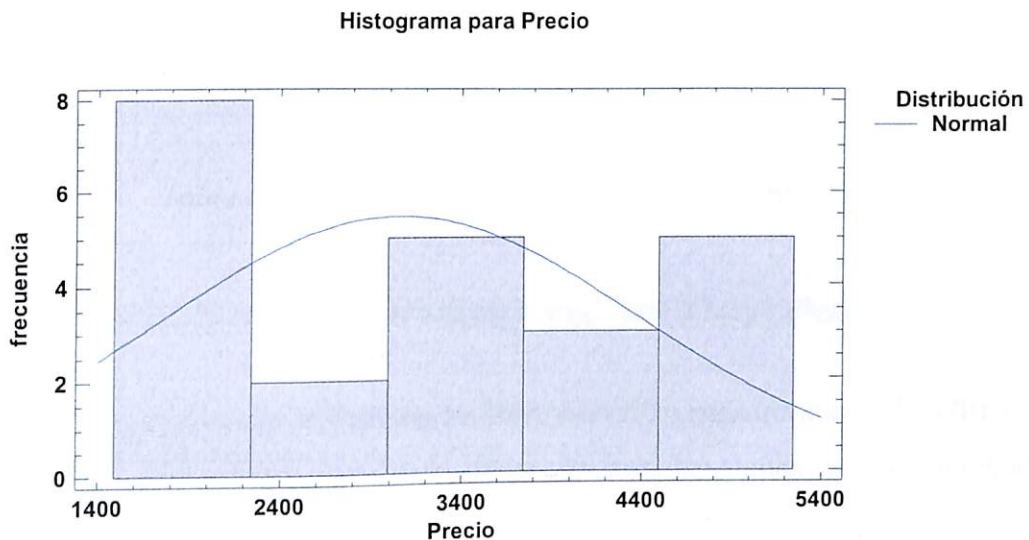


Grafico N° 23. Histograma de Frecuencia.

Entonces así, de la misma forma se realizaron pruebas de ajuste para 8 distribuciones de densidad que se detallan en la tabla N°16, tomando como criterio para seleccionar la distribución que más se ajusta a nuestros datos el Valor-P más alto que sería 0.6585 que corresponde a una distribución Normal.



	Ajustes de Distribución								
	Normal	Lognormal	Exponencial	Weibull	Chi-Cuadrado	Uniforme	T-Student	Triangular	Gamma
Prueba de Normalidad valor-P	0.0090582	0.0090582	0.00905816	0.0090582	Sin Ajuste	0.009058	Sin Ajuste	0.00905816	0.00905816
Pruebas de Bondad de Ajuste Valor-P	0.6585	0.569503	0.00158507	0.644532	-	0.123684	-	0.328515	0.582716
Media	3057.96	3084.08	3057.96		-		-		
Desviación Estandar	1316.48	1488.14			-		-		
Forma				2.61298	-		-		5.36138
Escala				3458.99	-		-		0.00175325
Límite Inferior					-	1490	-	524.922	
Límite Superior					-	5245	-	5916.29	
Escala Log: media		7.92935			-		-		
Escala Log: desv. Est.		0.457506			-		-		
Punto Central					-		-	2946	

Tabla N°16. Tabla resumen de ajuste de distribución.

4.5.3 Simulación Montecarlo para el precio del litio a largo plazo

Debido a que la proyección del precio del litio, se realizó para los años 2015-2016, hubo la necesidad de realizar una simulación del precio para los siguientes años, teniendo en cuenta que la simulación solo genera una tendencia en el futuro, no una predicción del precio en el tiempo, es decir, solo muestra un rango de acercamiento al precio durante esos años, ya que existen muchos factores externos en el precio, donde hace que este cambie en el tiempo.

Luego de realizar un análisis a los datos históricos del precio del carbonato de litio, se determinó que su mejor ajuste fue una distribución normal. Para Simular los datos del precio del litio por año, que son variables aleatorias, la relacionamos con la función de interés, a cada valor, que en este caso es definir suposición con la función de distribución normal.

Para ello utilizamos la simulación de Montecarlo en el software Crystal Ball, que es el ajuste que realizamos anteriormente usando la media y la desviación estándar, que son los parámetros de entrada para el simulador.

En la gráfico N°24 se puede observar que a cada celda por año donde va el precio se le ingresa la función, con su media y desviación estándar.

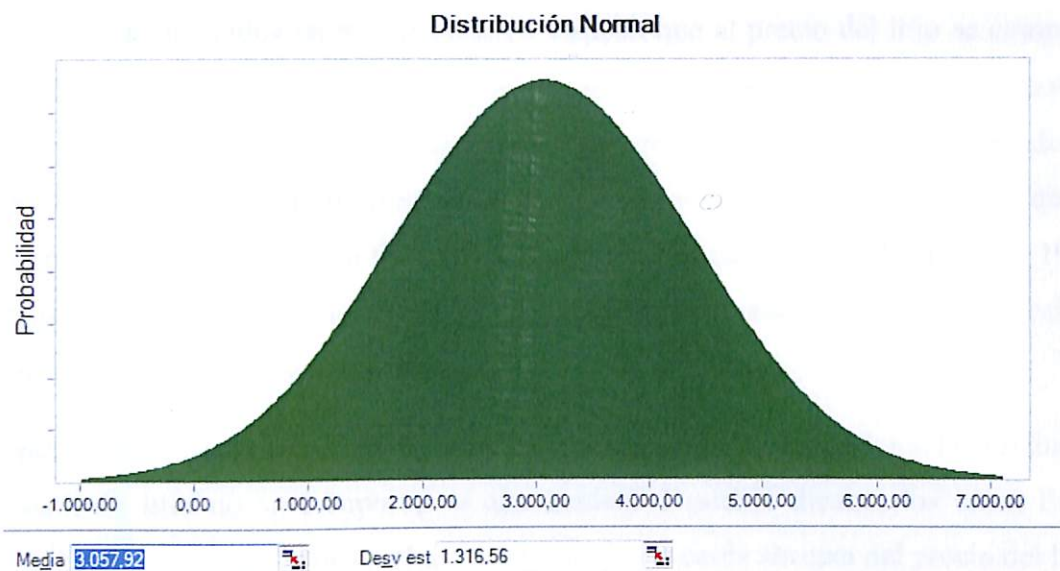


Grafico N° 24. Gráfica de Distribución Normal.

Luego de haber realizado todos estos pasos y hacer correr la simulación en el software Crystal Ball, el ajuste que da se muestra en la Grafico N° 25

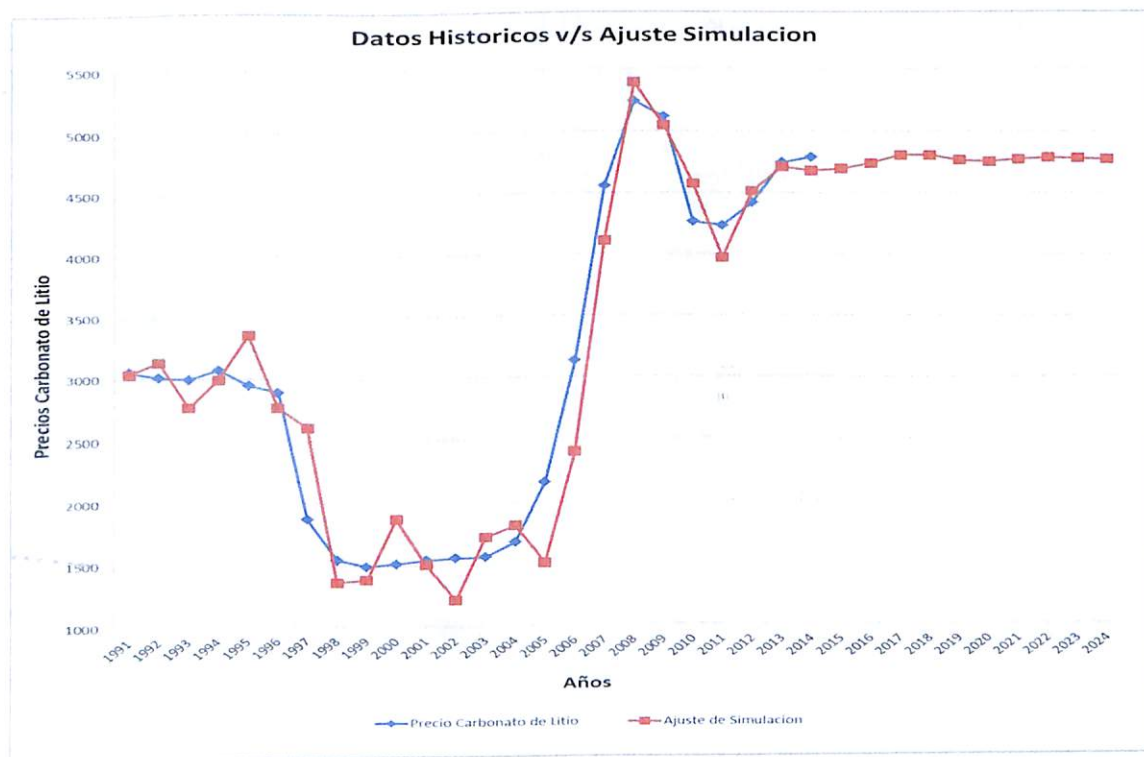


Grafico N° 25. Ajustes del precio del litio usando simulación.



Los resultados obtenidos en esta simulación indican que el precio del litio se comporta constante, con muy pocas variaciones con respecto al tiempo, durante los próximos 10 años. Los datos predichos están dentro de un rango de confianza, dando un promedio de 4770 US\$/ton de carbonato de litio. En base a esta simulación se puede aseverar que la industria del litio no presentará fluctuaciones abruptas como la mostrada en el año 1997, si no que muestra una tendencia estable, lo cual es bastante positivo a la hora de realizar una inversión a largo o mediano plazo.

Esta predicción resulto compleja de realizar, debido a que los pocos datos históricos del carbonato de litio no se comportan a una tendencia estable durante los años. En el gráfico se puede observar que en el año 1996 hubo una caída abrupta del precio del litio, y esto se debió a la entrada de Soquimich al mercado, y recién en el año 2004 logró repuntar, esto es debido al mayor uso de los compuestos del litio y más aún en la generación de autos eléctricos, que será la mayor demanda en los próximos años.

La simulación para predecir el precio del litio se hizo del año 2015 hasta el 2024, obteniendo un promedio anual de 4770.8 US\$/ton, observando poca dispersión entre los datos. La tabla N°17 muestra los resultados de la simulación del precio

Años	Predicción Precio
2015	4698
2016	4743
2017	4810
2018	4809
2019	4770
2020	4758
2021	4775
2022	4788
2023	4783
2024	4774

Tabla N°17. Simulación del precio del carbonato de litio en los años 2015 a 2024.



CAPITULO V “CONCLUSIONES”

Si bien la minería no metálica no alcanza los mismos niveles de exportación que la minería metálica, tiene un gran potencial y espacio para seguir ampliando su presencia en el mundo.

El litio, hasta la fecha, es considerado en nuestro país como un mineral estratégico y no concesible, no se ha realizado ningún tipo de cambio o esfuerzo para tratar de revertir esta situación y la única manera de extraer o explotar el metal en Chile es a través de contratos especiales (CEOL).

La gama de usos para el litio es amplia y variada, además se acerca a pasos agigantados una revolución energética y este metal tendrá una integra participación en ella, esto debido al intensivo uso de sus propiedades físicas y químicas en la acumulación y almacenaje de energía eléctrica. Hoy en día su mayor uso es en baterías recargables de distintos equipos electrónicos, los cuales ocupan un estimado de 12 gr de este metal por celda, claramente esto no es una gran cantidad, todo esto cambiara en el preciso momento en que la producción de autos eléctricos se torne masiva, tecnología que aún está en vías de desarrollo.

El dato más esquivo en la investigación fue el precio, ya que en muchas fuentes como Cochilco, revistas mineras, solo habían datos anuales de los precios del litio, siendo lo ideal que fueran mensuales, es por ello que el uso teórico de series temporales, arrojó una proyección un tanto ambigua, ya que con una mayor cantidad de datos se hubiese podido realizar no solo una más amplia proyección en cuanto al tiempo, sino que también mucho más confiable. Se trabajó con los datos otorgados por Cochilco, los cuales eran datos anuales a partir de 1990 a 2014, y mostrando una clara tendencia hacia la producción del carbonato de litio como materia prima de más exportación.

En este estudio, los precios del carbonato de litio siguen un proceso estocásticos conocidos como camino aleatorio (Randon Walk), en materia de pronósticos, a pesar de la incidencia negativa de factores como el tamaño de la muestra (pequeña), se puede predecir dos años, que son 2015 y 2016. Las tendencias a largo plazo pueden generar



incertidumbres en los precios, ya que el tema de proyección es muy complejo de desarrollar.

Los modelos que mejor coherencia mostraron para ser ajustados fueron el Holt-Winter y el Random Walk. Se estima el filtro Holt-Winters para una serie de tiempo dada.

El Random Walk como modelo derivado que se adecuo a los datos es:

$$Y_{[t]} = c + Y_{[t-1]} + Z_{[t]}$$

Donde $Z_{[t]}$ es una distribución normal con errores distribuidos aleatoriamente independientes e idénticamente distribuidos.

Dando una proyección en el año 2015 y 2016 de 4790,68 US\$/ton, con un precio optimista de 5987,84 US\$/ton.

Con el análisis de la simulación Montecarlo se logró una tendencia de 10 años, donde indica el comportamiento del precio estable, con muy poca variación durante los años, con un promedio de 4770,65 US\$ la tonelada de carbonato de litio.



BIBLIOGRAFÍA

Libro: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Séptima edición, autor Devore, Jay L.

Libro: Estadística por Marco Antonio Alfaro Sironvalle, página web

www.malfaro.com/assets/estadistica---marco-alfaro.pdf

Libro: Econometría, quinta edición, autor Damodar N. Gujarati y Dawn C. Porter.

Pdf. Aplicación de La Simulación Monte Carlo en El Cálculo Del Riesgo usando excell.

Pdf. Ajustando Distribución (Datos No Censurados) de STATGRAPHICS

Pdf. Método de Simulación Montecarlo. Area de Estadística e Investigación Operativa - Licesio J. Rodríguez-Aragón - Marzo 2011.

Pd. El desarrollo del litio en Chile: 1984-2012 Gustavo Lagos C.C. Centro de Minería Pontificia Universidad Católica de Chile.

Pdf. Informe de la Comisión del Litio.

<http://www.lithiumsite.com/market.html>

<http://www.sqm.com/es-es/acercadesqm/recursosnaturales/salmuera.aspx>

<http://www.sqm.com/es-es/productos/litio/aplicacionesdelitio.aspx>

<http://www.cochilco.cl/estadisticas/esta-nometal.asp>

<http://www.sqmc.cl/asp/es/Default.aspx>

<http://comision.minmineria.cl/download/estudios/Mercado%20Internacional>

Revista: La industria del litio en Chile, por el Ingeniero Pedro Pavlovic Zuvic

Pdf. LITHIUM By Joyce A. Ober

Pdf. Time series analysis forecasting and control (Box, Jenkins, Reinsel, 1994)



ANEXOS

Anexo - 1

Demás modelos probabilísticos del precio del carbonato de litio

Ajuste de Datos a Distribución Lognormal

Datos/Variable: Precio

24 valores con rango desde 1490.0 a 5245.0

Distribuciones Ajustadas

<i>Lognormal</i>
media = 3084.08
desviación estándar = 1488.14
Escala log: media = 7.92935
Escala log: desv. est. = 0.457506

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para el precio

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Lognormal</i>
DMAS	0.155502
DMENOS	0.160142
DN	0.160142
Valor-P	0.569503

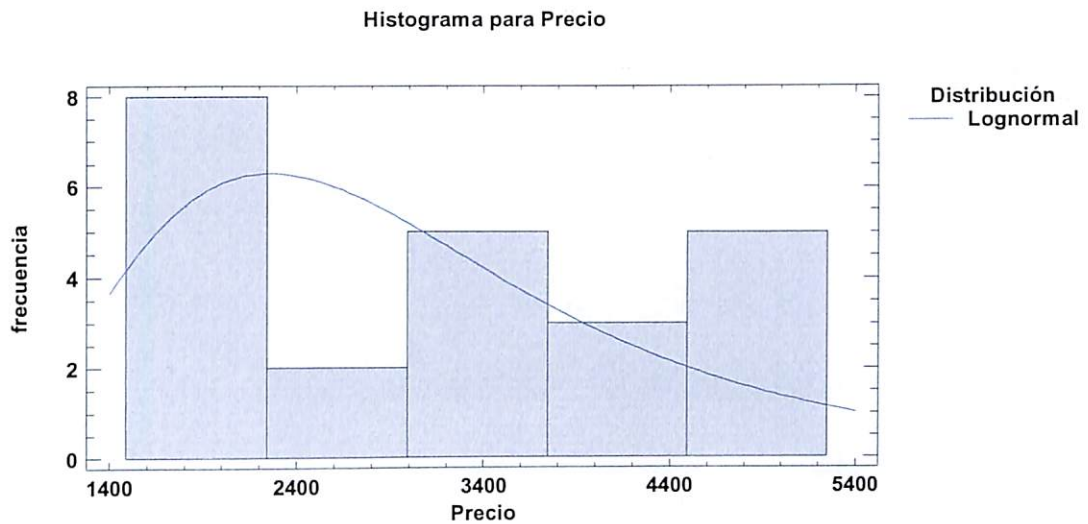


Grafico N° 26. Histograma de frecuencia distribución Lognormal.

Ajuste de Datos a Distribucion Exponencial

Datos/Variable: Precio

24 valores con rango desde 1490.0 a 5245.0

Distribuciones Ajustadas

<i>Exponencial</i>
media = 3057.96

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Precio

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Exponencial</i>
DMAS	0.179928
DMENOS	0.385689
DN	0.385689
Valor-P	0.00158507

Histograma para Precio

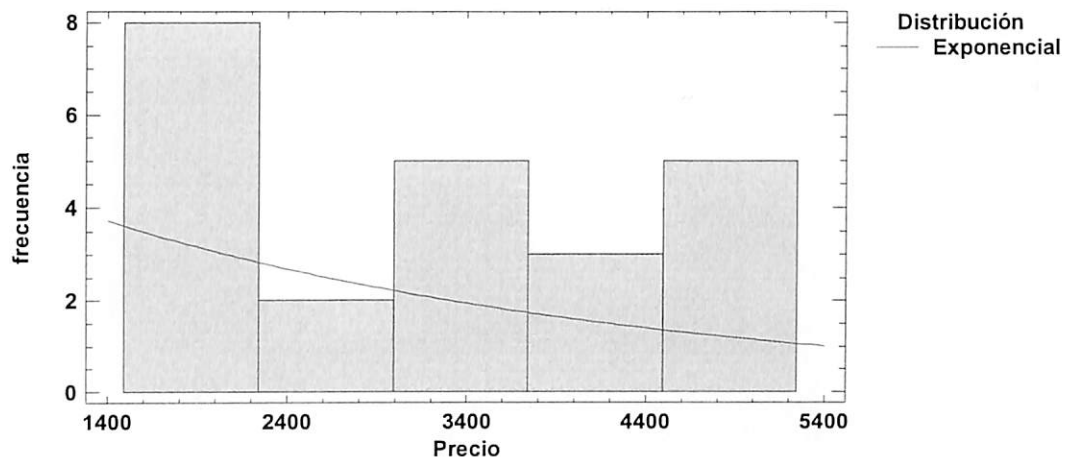


Grafico N° 27. Histograma de frecuencia distribución Exponencial..

Ajuste de Datos a Distribucion Weibull

Datos/Variable: Precio

24 valores con rango desde 1490.0 a 5245.0

Distribuciones Ajustadas

<i>Weibull</i>
forma = 2.61298
escala = 3458.99

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Precio

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Weibull</i>
DMAS	0.15099
DMENOS	0.14934
DN	0.15099
Valor-P	0.644532

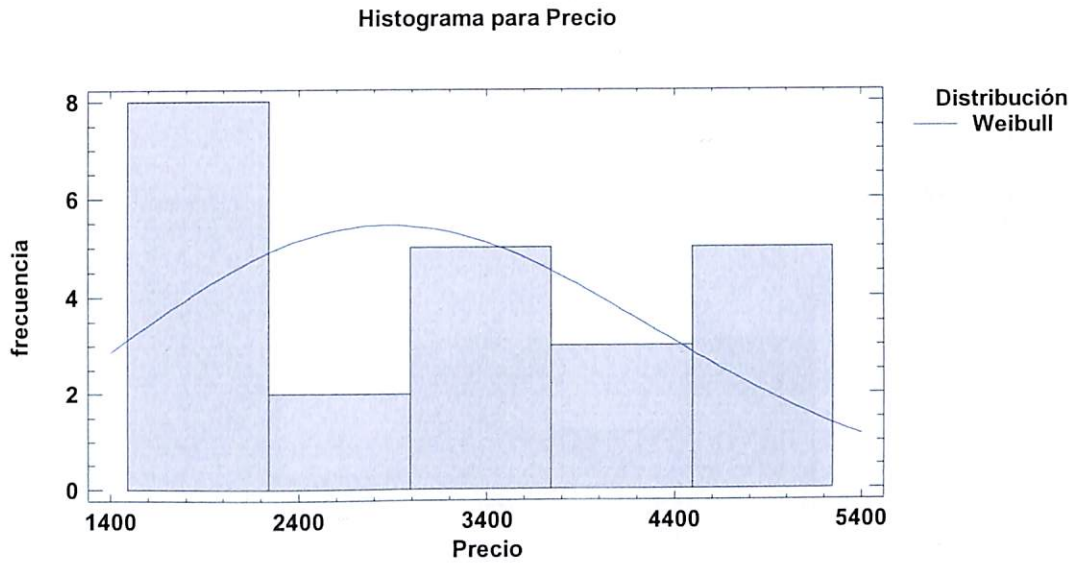


Grafico N° 28. Histograma de frecuencia distribución Weibull.

Ajuste de Datos a Distribución Uniforme

Datos/Variable: Precio

24 valores con rango desde 1490.0 a 5245.0

Distribuciones Ajustadas

<i>Uniforme</i>
límite inferior = 1490.0
límite superior = 5245.0

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Precio

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Uniforme</i>
DMAS	0.240801
DMENOS	0.0632934
DN	0.240801



Valor-P	0.123684
---------	----------

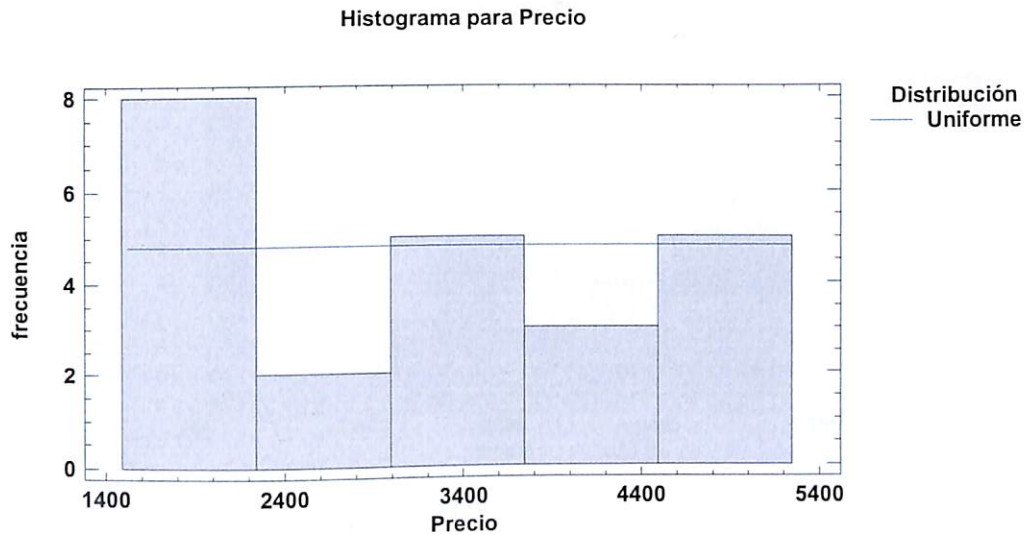


Grafico N° 29. Histograma de frecuencia distribución Uniforme.

Ajuste de Datos a Distribución Triangular

Datos/Variable: Precio

24 valores con rango desde 1490.0 a 5245.0

Distribuciones Ajustadas

<i>Triangular</i>
límite inferior = 524.922
punto central = 2946.0
límite superior = 5916.29

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Precio

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Triangular</i>
DMAS	0.194107
DMENOS	0.155975
DN	0.194107



Valor-P	0.328515
---------	----------

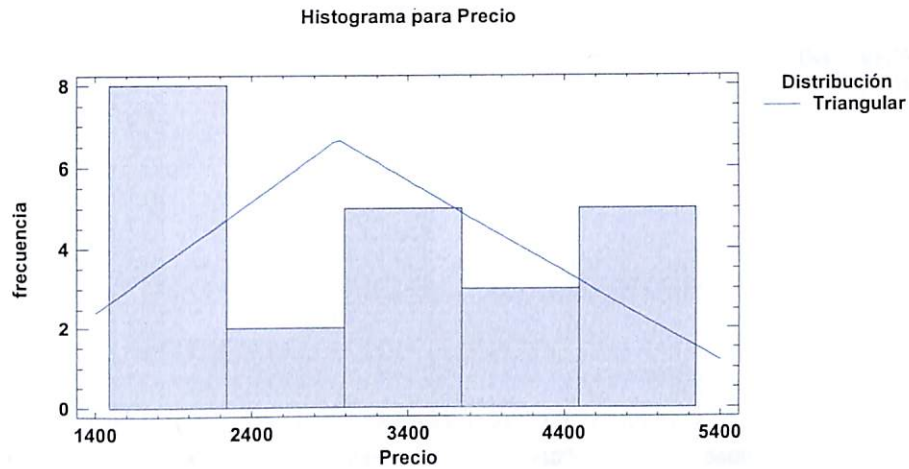


Grafico N° 30. Histograma de frecuencia distribución Triangular.

Ajuste de Datos a Distribución Gamma

Datos/Variable: Precio

24 valores con rango desde 1490.0 a 5245.0

Distribuciones Ajustadas

<i>Gamma</i>
forma = 5.36138
escala = 0.00175325

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Precio

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Gamma</i>
DMAS	0.158022
DMENOS	0.158513
DN	0.158513
Valor-P	0.582716

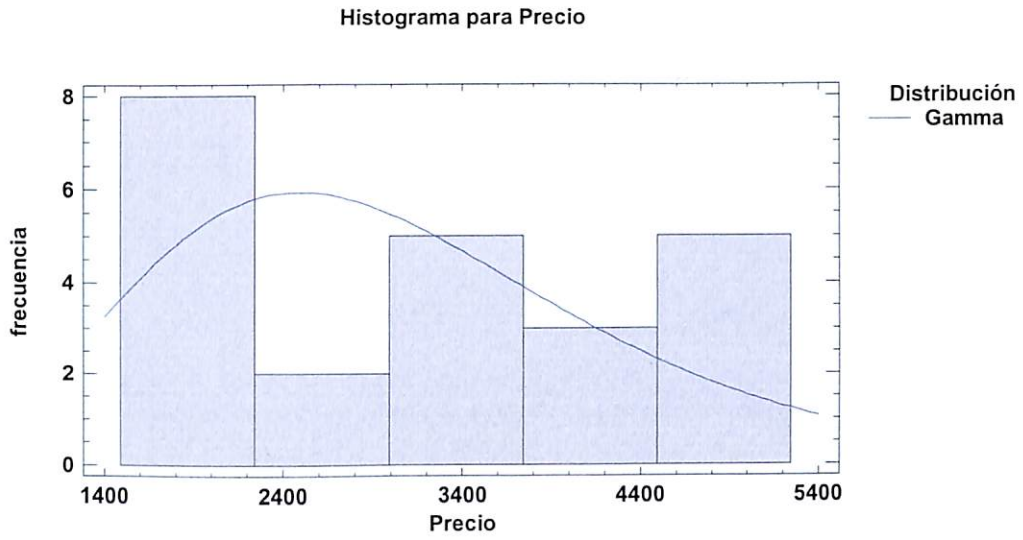


Grafico N° 31. Histograma de frecuencia distribución Gamma.