



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**DETERMINACIÓN ESTRATÉGICA DE
CAPACIDADES Y CUOTAS DE
PRODUCCIÓN DE DERIVADOS DE LITIO Y
POTASIO EN EL SALAR DE ATACAMA**

ARIEL IGNACIO MIÑO GUAJARDO

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN IGNACIO GUZMÁN B.
ÁLVARO VIDELA L.

Santiago de Chile, julio, 2018

© 2018, Ariel Miño



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

DETERMINACIÓN ESTRATÉGICA DE CAPACIDADES Y CUOTAS DE PRODUCCIÓN DE DERIVADOS DE LITIO Y POTASIO EN EL SALAR DE ATACAMA

ARIEL IGNACIO MIÑO GUAJARDO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN IGNACIO GUZMÁN B.

ÁLVARO VIDELA L.

GUSTAVO LAGOS C.

ROLANDO LAY

DIEGO LÓPEZ G.

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, julio, 2018

*A mi madre y abuelos, porque sus
sueños son también mis sueños*

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar formalmente mi recorrido educacional, se hace difícil reducir en tan solo unas líneas el inmenso agradecimiento que le debo a tanta gente que se ha hecho partícipe de este proceso. Por ello, le agradezco a todos aquellos que me acompañaron en este camino, a quienes se dieron el tiempo de transmitirme desinteresadamente su experiencia y conocimiento, y a quienes simplemente confiaron día a día en mí durante este largo transitar.

Quiero agradecerle especialmente a mi madre, hermano, abuelos, tíos y primos, quienes me han entregado mucho más de lo que les he pedido. Por su compañía, confianza, paciencia y cariño. Agradecer también a los profesores de la Comisión: Juan Ignacio, Álvaro, Gustavo, Rolando y Diego, quienes siempre se han mostrado dispuestos a discutir y colaborar tanto en el desarrollo de este trabajo como en otros realizados durante mi etapa formativa en la UC. En forma especial le agradezco a mi profesor guía, Juan Ignacio Guzmán, por su constante disposición y devoción académica, su confianza y su continua guía profesional. Como no agradecer también a mis amigos de Postgrado, Minería e Ingeniería, con quienes he compartido, reído, vivido y sufrido innumerables experiencias, las que sin duda recordaremos por muchos años más. Finalmente, agradecer a mis compañeros de GEM, con quienes he vivido la última etapa de este proceso y a los cuales le agradezco su apoyo y motivación para terminar este trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
1. Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos e hipótesis de trabajo	4
1.2.1 Hipótesis.....	4
1.2.2 Objetivo general.....	4
1.2.3 Objetivos específicos	4
1.3 Estructura de la Tesis	4
2. Marco Teórico	6
2.1 Explotación minera en salares	6
2.2 Planificación minera estratégica.....	8
2.3 Evaluación social.....	10
3. Descripción de la producción minera del Salar de Atacama	13
3.1 Antecedentes	13
3.2 Recursos y Reservas	16
3.3 Producción minera en el Salar de Atacama.....	18
3.3.1 Producción de derivados de litio	18
3.3.2 Producción de derivados de potasio.....	20
3.3.3 Producción de derivados de boro	20
4. Descripción del modelo	22
4.1 Parámetros y variables del modelo.....	23
4.1.1 Producción minera	23
4.1.2 Precio	27
4.1.3 Costo de producción.....	32
4.1.4 Impuestos	32
4.1.5 Inversiones	35
4.1.6 Efecto multiplicador de la minería.....	37

4.1.7	Emisiones atmosféricas.....	39
4.1.8	Otros parámetros relevantes en el análisis	40
4.2	Definición de modelos de evaluación	40
5.	Análisis de resultados	45
5.1	Resultados de Evaluación de Escenarios Base.....	45
5.2	Análisis de sensibilidad	55
6.	Conclusiones.....	64
6.1	Conclusiones generales	64
6.2	Futuras líneas de investigación	65
	Bibliografía.....	67
	Anexo A. Distribuciones históricas de concentración en salar de atacama	73
	Anexo B. Proyecciones de demanda mundial de KCl y restricción de oferta para el salar de atacama	80
	Anexo C. Proyecciones de oferta y demanda mundial de LCE	81
	Anexo D. Base de datos de inversión en proyectos	83
	Anexo E. Metodología de cálculo de multiplicadores de producto tipo i y ii.....	85
	Anexo F. Estimación de emisiones de CO ₂ eq. según capacidad instalada	87
	Anexo G. Metodología de cálculo de flujo de caja privado y social	94
	Anexo H. Resultados de evaluación económica óptima desde el punto de vista privado y social.....	97
	Anexo I. Resultados de evaluación de escenarios de sensibilidad	101
I.1	VAN privado y VAN social v/s cuota adicional de extracción de litio	101
I.2	Cuota óptima de extracción de litio desde la perspectiva del planificador privado y planificador social	107

I.3 Capacidad óptima de producción de LCE y KCl desde la perspectiva del planificador privado y planificador social	108
---	-----

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-1: Cuotas otorgadas en el Salar de Atacama	16
Tabla 4-1: Concentraciones de litio y potasio en salmuera del Salar de Atacama.....	24
Tabla 4-2 Parámetros de operación de producción en Salar de Atacama.	25
Tabla 4-3: Tasas efectivas IEM según Ley 20.049	33
Tabla 4-4: Primeras tasas de arrendamiento asignadas por CORFO	34
Tabla 4-5: Nuevas tasas de arrendamiento asignadas por CORFO	35
Tabla 4-6: Multiplicadores de producto del sector de Explotación de otras minas y servicios de apoyo minero	38
Tabla 5-1: Valor marginal agregado ante aumentos de cuota entre 2023-2043.....	50
Tabla 5-2: Capacidad e inversión agregada ante aumentos de cuota entre 2023-2043	51
Tabla A-1: Estimación de recursos de litio en 1987, 1996 y 2008	75
Tabla A-2: Estimación de recursos de potasio en 1996 y 2008	78
Tabla B-1: Estimación de demanda de KCl entre 2017-2043.....	80
Tabla C-1: Estimación de demanda de LCE entre 2017-2043.....	81
Tabla C-2: Estimación de demanda de LCE para 2017-2027.....	82
Tabla D-1: Inversión (MUS\$2017) Infraestructura y Planta: Carbonato de litio	83
Tabla D-2: Inversión (MUS\$2017) Infraestructura y Planta: Cloruro de potasio.....	84
Tabla F-1: Emisiones Planta carbonato de litio	89
Tabla F-2: Emisiones Planta cloruro de potasio granulado (seco y compactado)	89
Tabla F-3: Emisiones Planta cloruro de potasio húmedo.....	90
Tabla F-4: Factores de CO ₂ eq a partir de Potencial de calentamiento global para horizontes de tiempo de 20 años	91
Tabla G-1: Construcción de flujo de caja para evaluación privada	94
Tabla G-2: Construcción de flujo de caja para evaluación social	95
Tabla H-1: Resultados de evaluación económica óptima desde el punto de vista del planificador privado	97
Tabla H-2: Resultados de evaluación económica óptima desde el punto de	

vista del planificador privado	99
Tabla I-1: Cuota óptima de extracción de litio y VAN privado o social generado según escenario analizado	107
Tabla I-2: Capacidad de producción óptima de LCE y KCl desde el punto de vista del planificador privado y social según escenario analizado	108

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3-1: Localización geográfica del Salar de Atacama	13
Figura 3-2: Modelo conceptual de aguas subterráneas en Salar de Atacama	14
Figura 3-3 Áreas en arrendamiento del Salar de Atacama	15
Figura 3-4 Recursos de litio en el Salar de Atacama	17
Figura 3-5 Producción histórica de derivados de litio en el Salar de Atacama.....	18
Figura 3-6 Producción histórica de LCE en el Salar de Atacama por empresa	19
Figura 3-7 Curva de costos de producción de producción 2016 de LCE.....	19
Figura 3-8 Producción histórica de derivados de potasio en Salar de Atacama	20
Figura 3-9 Producción histórica de Ácido Bórico en el Salar de Atacama.....	21
Figura 4-1: Diagrama productivo simplificado de producción en SQM.....	24
Figura 4-2: Estimación de distribución de reservas de carbonato de litio en Salar de Atacama.....	25
Figura 4-3: Estimación de distribución de reservas de cloruro de potasio en Salar de Atacama.....	25
Figura 4-4: Precio histórico carbonato de litio 1984-2017	29
Figura 4-5: Demanda global proyectada carbonato de litio a 2027	29
Figura 4-6: Potencial crecimiento de oferta y demanda de LCE	30
Figura 4-7: Precio proyectado del cloruro de potasio	32
Figura 4-8: Inversión planta carbonato de litio en función de capacidad productiva	36
Figura 4-9: Inversión planta cloruro de potasio húmedo en función de capacidad....	36
Figura 4-10: Inversión planta cloruro de potasio granulado en función de capacidad	37
Figura 5-1: Producción histórica y proyectada de LCE en el Salar de Atacama	45
Figura 5-2: Producción histórica y proyectada de LCE en el Salar de Atacama para cuota de litio asignada por CORFO (Cuota Base)	46
Figura 5-3: VAN privado y social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico otorgada en el Salar de Atacama entre 2023-2043.....	47
Figura 5-4: Recaudación fiscal, VAN privado y social (MUS\$ 2017) v/s nueva	

cuota de litio metálico otorgada en el Salar de Atacama entre 2023-2043	48
Figura 5-5: Valor agregado de evaluación privada óptima (cuota de 422.297 ton de litio a ser consumida entre 2023-2043 en el Salar de Atacama)	49
Figura 5-6: Valor agregado de evaluación social óptima (cuota de 784.667 ton de litio -metálico a ser consumida entre 2023-2043 en el Salar de Atacama)	49
Figura 5-7: Capacidad óptima de producción de LCE y producción estimada de LCE bajo modelo de evaluación privada	52
Figura 5-8: Capacidad óptima de producción de LCE y producción estimada de LCE bajo modelo de evaluación social	52
Figura 5-9: Capacidad óptima de producción de KCl y producción estimada de KCl bajo modelo de evaluación privada	53
Figura 5-10: Capacidad óptima de producción de KCl y producción estimada de KCl bajo modelo de evaluación social	53
Figura 5-11: Utilización de capacidad de planta de KCl histórica y proyectada para evaluación óptima privada y social	54
Figura 5-12: Utilización de capacidad de planta de LCE histórica y proyectada para evaluación óptima privada y social	55
Figura 5-13: Análisis de sensibilidad de VAN privado	59
Figura 5-14: Análisis de sensibilidad de VAN social	60
Figura 5-15: Análisis de sensibilidad de cuota adicional a otorgar, desde una perspectiva de evaluación privada óptima	60
Figura 5-16: Análisis de sensibilidad de cuota adicional a otorgar, desde una perspectiva de evaluación social óptima	61
Figura 5-17: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s caudal bombeado	62
Figura 5-18: VAN social (MUS\$ 2017) v/s caudal bombeado	62
Figura A-1: Distribución espacial de litio en 1989	73
Figura A-2: Distribución espacial de litio en 1996	74
Figura A-3: Distribución espacial de litio en 2008	74
Figura A-4: Distribución de recursos de litio según concentración en 1989	76

Figura A-5: Distribución de recursos de litio según concentración en 1996	76
Figura A-6: Distribución de recursos de litio según concentración en 2008	77
Figura A-7: Distribución espacial de potasio en 1996	77
Figura A-8: Distribución espacial de potasio en 2008	78
Figura A-9: Distribución de recursos de potasio según concentración en 1996	79
Figura A-10: Distribución de recursos de potasio según concentración en 2008	79
Figura F-1: Emisiones fase de construcción y abandono planta carbonato litio	91
Figura F-2: Emisiones fase de operación planta carbonato litio	91
Figura F-3: Emisiones fase de construcción y abandono planta cloruro de potasio granulado	92
Figura F-4: Emisiones fase de operación planta cloruro de potasio granulado	92
Figura F-5: Emisiones fase de construcción y abandono planta cloruro de potasio húmedo	93
Figura F-6: Emisiones fase de operación planta cloruro de potasio húmedo	93
Figura I-1: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de crecimiento anual de la demanda de 12%, 14% y 16%	101
Figura I-2: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de crecimiento anual de la demanda de 12%, 14% y 16%	102
Figura I-3: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de mayor o menor oferta internacional de LCE de 25 kton/año	102
Figura I-4: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de mayor o menor oferta internacional de LCE de 25 kton/año	102
Figura I-5: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de variación de 20% en el precio de LCE de 2017	103
Figura I-6: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de variación de 20% en el precio de LCE de 2017	103
Figura I-7: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con costo operacional de 1.700 US\$/Ton y 2.200 US\$/Ton	103
Figura I-8: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para	

escenarios con costo operacional de 1.700 US\$/Ton y 2.200 US\$/Ton	104
Figura I-9: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con variación de 10% en <i>royalty</i> de arrendamiento del Salar	104
Figura I-10: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con variación de 10% en <i>royalty</i> de arrendamiento del Salar	104
Figura I-11: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de aumento de reservas en 10% y 50%	105
Figura I-12: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de aumento de reservas en 10% y 50%	105
Figura I-13: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con participación de mercado KCl de 2,4% y 3,5%	105
Figura I-14: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con participación de mercado KCl de 2,4% y 3,5%	106
Figura I-15: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con 1, 2 y 3 aumentos de capacidad de KCl.....	106
Figura I-16: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con 1, 2 y 3 aumentos de capacidad de KCl.....	106
Figura I-17: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de tasa de descuento social de 5%, 6% y 7%	107

RESUMEN

La determinación de cuotas de explotación minera por parte de una entidad gubernamental debiese buscar la maximización del valor social percibido directa e indirectamente por la sociedad. Sin embargo, la ausencia de una metodología clara de evaluación que permita determinar las cuotas a asignar en un contexto de largo plazo ha reducido y delegado típicamente el análisis de la fijación de cuotas de explotación minera a técnicas sub óptimas, desde el punto de vista económico capturado por la sociedad.

En esta línea, la definición de una nueva cuota de explotación de litio en el Salar de Atacama debida al término anticipado de la cuota que le asignó el Estado de Chile a SQM en 1995, supone una oportunidad interesante de análisis en relación a las cuotas de extracción y capacidades de producción que debiesen establecerse en el Salar de Atacama.

Considerando una perspectiva de evaluación integrada de la explotación minera del Salar de Atacama, el presente estudio analiza las cuotas de litio y las capacidades de producción de derivados de litio y potasio que el Estado de Chile debiese otorgarles a privados a fin de obtener la mayor renta social posible. Asimismo, propone una metodología de evaluación social de las cuotas de explotación a partir de las utilidades que generen las compañías, la tributación que reciba el Estado, los pagos realizados a comunidades vecinas, y los efectos indirectos e inducidos que genere la explotación de los recursos del Salar.

En base a la evaluación desarrollada se concluye que, en el caso específico de análisis, una nueva cuota de extracción en el rango de 420.000 y 600.000 toneladas de litio metálico debiese ser asignada entre 2023 y 2043. De este modo, por medio de las cuotas de extracción ya otorgadas en este período y la nueva cuota propuesta, podría obtenerse un VAN social en torno a los 10.000 MUS\$2017.

Palabras Claves: Litio; Potasio; Salar de Atacama; Cuotas de extracción; Capacidades de producción; Políticas públicas.

ABSTRACT

The determination of mining exploitation quotas by a government entity should seek the maximization of social value perceived directly and indirectly by society. However, the absence of a clear evaluation methodology to determine the quotas to be allocated in long-term contexts has typically reduced the analysis of the fixing of mining exploitation quotas to sub-optimal techniques, from an economic point of view.

In this line, the definition of a new lithium exploitation quota in the Salar de Atacama due to the anticipated end of the quota assigned by the State of Chile to SQM in 1995, it is an interesting opportunity to analyze the quotas of extraction and production capacities that should be established in the Salar de Atacama.

Considering an integrated perspective of evaluation of the mining exploitation of the Salar de Atacama, this study analyzes the lithium quotas and production capacities of lithium and potassium that the State of Chile should grant to private companies to obtain the largest possible social income. For this objective, this study proposes a methodology for the social evaluation of exploitation quotas based on the profits generated by the companies, the taxation received by the State, payments made to neighboring communities, and the indirect and induced effects generated by the exploitation of resources of the Salar.

Based on the evaluation developed, it is concluded that, in the specific case of analysis, a new extraction quota that would be in the range of 420,000 and 600,000 tons of metallic lithium should be assigned between 2023 and 2043. In this way, through of the quotas of extraction already granted in this period and the proposed new quota, a social NPV of around 10.000 MUS \$ 2017 could be obtained.

Keywords: Lithium; Potassium; Salar de Atacama; Quotas of extraction; Production capacity; Public policy issues

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las favorables perspectivas de la demanda y precios que el mercado del litio ha enfrentado desde 2006, debidas al auge en la demanda proveniente de China y su creciente aplicación en tecnologías de almacenamiento de energía, han reabierto el interés de privados, entidades estatales, medios de comunicación y público general acerca de las posibilidades de aprovechamiento económico que puedan obtenerse de esta industria.

El litio es el metal más liviano existente, característico por su alto potencial electroquímico, bajo coeficiente de expansión térmica y alto calor específico (Maxwell, 2015). Debido a sus excepcionales propiedades ha sido usado ampliamente durante las últimas décadas en aplicaciones tan diversas como baterías para el almacenamiento de energía, vidrios, cerámicas, grasas lubricantes, productos farmacéuticos e incluso en la producción de aluminio (Evans, 2014). Por sus características, en muchas aplicaciones el litio es insustituible, y por éstas se espera un crecimiento compuesto anual en la demanda en torno al 12%-16% para el próximo decenio (Martin *et al.*, 2017; SQM, 2017^a).

A pesar de los importantes crecimientos que se esperan en la demanda, varios estudios han señalado que en el largo plazo los recursos de litio son suficientes para abastecer la demanda al menos hasta 2100 (Kesler *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2016). Sin embargo, los mismos estudios han señalado que el litio es un metal escaso desde el punto de vista geográfico (Grosjean *et al.*, 2012; Miedema y Moll, 2013). De hecho, del total de reservas mundiales el 52% se encuentran en Chile, 22% en China, 14% en Argentina y 11% en Australia (USGS, 2017). Similarmente, la producción minera en 2016 provino fundamentalmente de Australia (41%), Chile (34%), Argentina (16%) y China (6%) (USGS, 2017).

Como respuesta al incremento esperado de la demanda de litio, las actuales faenas en operación han incrementado sus niveles de producción y han anunciado planes para expandir su capacidad productiva. Asimismo, nuevas operaciones se encuentran en desarrollo en Australia, Argentina, Bolivia, Canadá, Chile, China, Finlandia, México, Serbia y Estados

Unidos (USGS, 2017). Pese a lo anterior, los recientes incrementos productivos en Sudamérica no han estado ajenos a importantes conflictos políticos y medioambientales, particularmente en Chile (Martin *et al.*, 2017).

La legislación chilena actual establece, según Decreto de Ley N°2.886 de 1979, que el litio es un mineral de interés nacional dado su carácter estratégico para uso en aplicaciones nucleares. Por tal motivo, únicamente el Estado de Chile puede, a través de compañías propias o por medio de contratos especiales de operación¹, minar, procesar y comercializar compuestos derivados de litio. A fines de 2017, el Estado de Chile mantenía 6 contratos² vigentes de operación para la explotación de litio (CCHEN, 2017). Sin embargo, de estos 6 contratos solo 3 se habían traducido en una explotación efectiva de litio.

El primero de los contratos fue llevado a cabo entre el Estado de Chile (vía CORFO³) y la Sociedad Chilena del Litio (actualmente Albermarle) en 1980. En este se estipuló que el consumo máximo permitido a realizar por contrato sería de 200.000 toneladas de litio metálico, en un plazo no definido, en 3.344 pertenencias mineras del Salar de Atacama. Si bien hasta 2016 se habían consumido aproximadamente 90.000 toneladas de litio metálico de la cuota permitida (CORFO, 2016), las prometedoras perspectivas de mercado llevaron a Albermarle a solicitar un aumento de cuota. Así, en 2016 CORFO le otorgó a Albermarle una cuota adicional a la ya otorgada, correspondiente a 212.132 toneladas de litio metálico, la cual podría extraerse hasta 2043 en las mismas pertenencias mineras del Salar de Atacama.

Por su parte, el tercer contrato especial de operación que se ha traducido en una explotación efectiva de litio, corresponde al contrato realizado en 1995 entre CORFO y la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Por medio de este contrato se estableció que el consumo máximo a realizar sería de 180.100 toneladas de litio metálico, hasta no más allá de 2030, en 16.384 pertenencias mineras del Salar de Atacama. Dado que hasta 2016 se habían consumido

¹ Los Contratos Especiales de Operación del Litio (CEOL) le conceden a privados la opción de extraer litio, según las cantidades y plazos límites que en el contrato se estipulen, a cambio de tarifas impositivas particulares.

² Los contratos incluyen a dos de Albermarle en el Salar de Atacama, uno de SQM en Atacama, uno de Simbalik Group en el Salar de Maricunga, uno de Cominor en Maricunga y otro de Codelco en Maricunga.

³ Institución representante del Estado de Chile y dueña de los derechos de explotación en el Salar de Atacama.

aproximadamente 110.000 toneladas de litio metálico de la cuota permitida, se esperaba a fines de 2017 que, bajo los ritmos de consumo informados, la cuota de explotación expirara entre 2022 y 2023 (CORFO, 2016). A pesar de esta situación, conflictos políticos y una mayor conciencia medioambiental dificultaron largamente el establecimiento de una nueva cuota⁴.

Desde la perspectiva económica neoclásica, la determinación de cuotas de explotación por parte de una entidad gubernamental debiese buscar la maximización del valor social percibido directa e indirectamente por la sociedad. Sin embargo, las dificultades asociadas a la determinación del valor social de largo plazo obtenido por la explotación de los recursos de litio han reducido típicamente su análisis a una evaluación privada del valor capturado por la explotación de litio. Incluso cuando se reconoce que la explotación de estos recursos trae consigo la explotación de otros recursos minerales como el potasio y el boro, así como también mayor rentabilidad social y valor agregado (Comisión Nacional del Litio, 2015).

Por los motivos anteriormente señalados, se hace necesario a la hora de establecer los límites máximos productivos permitidos, una planificación de largo plazo que tome en cuenta las nuevas perspectivas de mercado imperantes, las características geológicas asociadas a la explotación de los recursos, y el valor social agregado generado. En base a ello, un modelo que sea capaz de integrar los puntos anteriormente señalados puede servir como herramienta de apoyo y optimización en la decisión de establecer cuotas y capacidades de producción de compuestos minerales. Dada la situación en que se encuentra y su relevancia a nivel mundial,

⁴ En 2015 el Estado de Chile, por medio de la entidad gubernamental CORFO, solicitó el término anticipado del contrato de arrendamiento y explotación con SQM debido a incumplimientos en el pago de rentas, graves faltas medioambientales y de derechos de agua. Desde entonces CORFO y SQM estuvieron en litigio y generaron una alta incertidumbre respecto a la continuidad operacional de SQM en el Salar de Atacama. Sin embargo, en enero de 2018 SQM y CORFO llegaron a un acuerdo mediante el cual daban por superadas sus diferencias y le concedían a SQM una nueva cuota de explotación de 349.553 toneladas de litio metálico hasta 2030. No obstante lo anterior, cabe señalar que como fue ratificado en este contrato, el aumento de solicitud de cuota se basó netamente en la perspectiva de SQM y no en una perspectiva de asignación de cuotas de explotación promovida y gestionada por el Estado. En consecuencia, a partir del presente estudio se pretende establecer las bases para el desarrollo de una evaluación social de asignación de cuotas de explotación, en base a la perspectiva de un planificador social.

un punto de partida interesante para este análisis se encuentra en el análisis de las cuotas a asignar en el Salar de Atacama.

1.2 Objetivos e hipótesis de trabajo

1.2.1 Hipótesis

La hipótesis de trabajo es que, a partir del desarrollo de una metodología de planificación estratégica de largo plazo, pueden determinarse niveles de explotación (cuotas) y capacidades productivas para el Salar de Atacama que maximicen el valor social capturado por el Estado de Chile.

1.2.2 Objetivo general

Desarrollar una metodología de evaluación de las cuotas de explotación de litio del Salar de Atacama y de las capacidades de producción de los compuestos minerales ahí producidos.

1.2.3 Objetivos específicos

- a) Generación de modelos de evaluación social integrada y privada de cuotas de explotación.
- b) Estimación de efectos directos, indirectos e inducidos debidos a la explotación minera del Salar de Atacama.
- c) Determinación de curvas de valor económico de explotación del salar según nivel de producción.
- d) Análisis comparativo de resultados y validación de uso de herramientas de apoyo.

1.3 Estructura de la Tesis

Esta tesis está compuesta por seis capítulos. El Capítulo 1, recién expuesto, presenta una introducción a la temática que se analizará a lo largo del estudio. El Capítulo 2 presenta una revisión bibliográfica del marco teórico al cual se circunscribe el análisis, mientras que el Capítulo 3 describe las principales características de la producción minera del Salar de Atacama. El Capítulo 4 detalla los principales criterios y supuestos considerados para la construcción del modelo de cuotas. El Capítulo 5 muestra los principales resultados de la

evaluación, así como la sensibilidad que presentan los resultados ante cambios en variables de interés. Finalmente, el Capítulo 6 desarrolla las principales conclusiones que es posible derivar de este trabajo, así como también extensiones futuras a esta línea de investigación.

2. MARCO TEÓRICO

A lo largo de este capítulo se expone una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos que sustentan el desarrollo metodológico de un modelo de planificación de largo plazo para la determinación de cuotas y capacidades productivas del Salar de Atacama. Previo a ello, la primera sección de este capítulo expone las particularidades asociadas a la explotación de los recursos en salares que deberán ser consideradas en el modelo de extracción de recursos mineros. A continuación, la segunda sección profundiza las principales características asociadas a la planificación minera estratégica de largo plazo y su relevancia en la asignación de capacidades productivas. Finalmente, la tercera sección recoge los elementos primordiales de la evaluación social de proyectos a ser considerados en este modelo.

2.1 Explotación minera en salares

Existen diversas fuentes de litio en el mundo. Entre estas se encuentran fuentes minerales tan diversas como enriquecimientos minerales pegmatíticos y rocas sedimentarias, salares, campos petroleros, campos geotermales y océanos (COCHILCO, 2013). Sin embargo, hasta la fecha, la oferta económica de litio en el mundo se ha dado solo a partir de pegmatitas y salares.

En el caso de los salares, la recuperación de minerales de interés se realiza a partir de la extracción y bombeo de una solución salina (salmuera), y no de un sólido como ocurre en la minería metálica y no metálica tradicional. En consecuencia, a diferencia de los sistemas mineros tradicionales, los salares son un sistema hidrodinámico complejo en el cual la extracción de un determinado punto del salar afecta el comportamiento de la salmuera en su conjunto (Comisión Nacional del Litio, 2015).

Bajo esta condición, la estimación de recursos minerales y de producción en salares es desarrollada típicamente a partir de modelos hidrogeológicos, a fin de tomar en consideración la componente dinámica de los salares. De este modo, mediante el uso de modelos hidrogeológicos se puede medir no solo la sensibilidad de los salares ante actividades humanas de extracción o inyección de recursos (hídricos o minerales), sino que también ante fenómenos naturales de pluviometría, fluvimetría y de evaporación. Asimismo, el uso de

estos modelos permite eventualmente predecir los impactos ambientales que el bombeo de los recursos provenientes del Salar generaría en los ecosistemas lagunares que rodean al Salar de Atacama (Comisión Nacional del Litio, 2015).

Sin embargo, una adecuada caracterización del perfil de extracción y de producción del Salar de Atacama por medio de un modelo hidrogeológico requiere conocer públicamente información que, para las compañías actualmente en producción, se considera estratégica⁵.

Dada esta dificultad, una alternativa de evaluación consiste en analizar en forma espacialmente estática los recursos remanentes mediante balance de masas (SQM, 2017b), aun cuando bajo esta metodología se obtiene un escenario referencial respecto a una evaluación dinámica (por medio de modelos hidrogeológicos). Así, considerando esta metodología los recursos remanentes se calculan en cada período a partir de la diferencia entre el recurso inicial y el valor extraído.

Luego, para calcular el valor que se extrae del recurso en cada período de tiempo, puede considerarse el uso de un modelo de distribución de recursos lognormal que considere que la explotación de los recursos del salar en el tiempo se realiza de mayores a menores concentraciones (Guzmán, 2017). Como sustento al uso de este modelo de distribución lognormal, en el Anexo A se desarrolla una breve revisión del cambio en la distribución histórica de reservas del Salar de Atacama debidas a la producción efectuada.

De esta manera, tomando en cuenta este modelo se considera en primer lugar que las concentraciones del *commodity* de interés distribuyen en el Salar de Atacama según una distribución lognormal, a partir de la expresión:

$$f(t) = \frac{e^{-\frac{1(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \quad (2.1)$$

⁵ Las particularidades del mercado en el que se desenvuelven las empresas que explotan el Salar de Atacama y el comportamiento hidrodinámico que exhibe la salmuera determinan que, informaciones tales como la distribución de concentraciones minerales en la salmuera y ubicación de pozos de extracción, sean consideradas como confidenciales. En particular, dichas informaciones podrían permitir dilucidar perfiles de producción futuros que podrían ser aprovechados por la competencia de la industria, debido a que el mercado del litio es clasificado en la actualidad como un mercado oligopólico no cooperativo (Maxwell, 2015).

En el cual los parámetros μ y σ están definidos como:

$$\mu = \ln \left(\frac{m}{\sqrt{1 + \frac{d^2}{m^2}}} \right) \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{d^2}{m^2} \right)} \quad (2.3)$$

Para los cuales m representa la concentración media del Salar de Atacama y d la desviación del mineral en estudio.

Así, dada la distribución de concentraciones antes señalada y la información de los recursos iniciales con los que se contaba al inicio del período de estudio, se determina en segundo lugar una distribución de tonelajes para el Salar según concentraciones de corte. Finalmente, con esta curva se determinan los recursos a extraer en cada instante de tiempo a partir del producto que se genera⁶ en cada instante de tiempo, bajo el supuesto de que la extracción es realizada desde mayores a menores concentraciones.

2.2 Planificación minera estratégica

El objetivo fundamental de la planificación minera radica en generar un plan de negocio que capture el mejor valor económico de un proyecto minero, estando sujeto a limitaciones tales como el conocimiento que se tiene del recurso minero, las posibilidades técnico-operacionales de explotación, los efectos ambientales máximos permitidos, entre otros. Bajo esta premisa, el plan minero que se genere prácticamente determinará el valor del negocio minero. Esto es, se determinarán los ingresos, gastos e inversiones asociadas a la extracción del recurso minero.

⁶ Para el cálculo del producto obtenido deben tomarse en cuenta las características del proceso productivo, desde que se realiza el bombeo de un volumen de salmuera hasta que se obtiene el producto comercial final. Los detalles de este cálculo se indican en más detalle en la sección 4.1.1 de producción minera.

Desde un punto de vista temporal, la planificación minera de largo plazo permite estructurar un análisis en el cual existen mayores grados de libertad, en el cual la mayor parte de las variables están abiertas. Tomando en cuenta este tipo de planificación, la planificación minera puede categorizarse como estratégica o táctica (Hinrichsen, 2015).

Cuando se presentan cambios significativos en las visiones futuras de mercado, operación, recursos, tecnología, u otro, la planificación minera estratégica emerge a fin de identificar, capturar y medir el máximo valor posible para la operación. Sujeto a menores niveles de detalle que la planificación táctica, la planificación estratégica genera opciones de desarrollo futuro (como expansiones de capacidad o modificaciones de la vida de la mina) que reaccionen frente a la materialización de algunas incertidumbres. En cambio, cuando debe definirse una ruta de desarrollo factible de la operación en el largo plazo sujeto a restricciones y consideraciones estratégicas, la planificación táctica emerge con el objetivo de maximizar el valor del negocio (usando para ello un mayor nivel de detalle) (Hinrichsen, 2015).

Si bien la planificación minera estratégica ha sido amplia y profundamente aplicada a algunas industrias de la minería metálica (Davis y Graham, 2008; Deck *et al.*, 2013), en la industria no metálica su aplicación ha sido reducida. De esta manera, el uso de la planificación estratégica en la industria del litio presenta aún amplias oportunidades, como por ejemplo en el caso de estudio de asignación de cuotas y capacidades de explotación en salares.

En efecto, el problema de asignación de cuotas de explotación (o equivalentemente de determinación de las capacidades productivas en ausencia de limitaciones a la propiedad del recurso) es un problema de planificación minera estratégica. Por su parte, el problema de determinación de la producción una vez asignada la cuota de explotación es un problema de carácter táctico. Por tanto, para la obtención de una solución adecuada al primer problema se concluye que se hace fundamental comprender en profundidad las perspectivas de negocio que se vislumbran y las opciones de desarrollo futuro que se posean⁷. En cambio, para la

⁷ Para el caso de estudio de asignación de cuotas de explotación, algunas alternativas de desarrollo que se manejan son el aumento de capacidades y cuotas de producción, así como también extensiones al plazo máximo de explotación.

obtención de una adecuada solución al segundo problema, se aprecia que posiblemente sea necesario un mayor nivel de detalle operacional.

2.3 Evaluación social

La evaluación socioeconómica de proyectos pretende medir el impacto que la ejecución de un proyecto (versus no realizarlo) tiene sobre el bienestar socioeconómico del país tras comparar los niveles de ingreso que el país logra con el proyecto versus los niveles que hubiera logrado sin la realización del proyecto (Fontaine, 2008).

Típicamente, la realización de una evaluación social se inicia por medio de la evaluación de los beneficios privados que conlleva la realización de un proyecto. En esta evaluación, la decisión de ejecución de un proyecto será favorable cuando la rentabilidad del proyecto exceda a la de la alternativa de inversión. Luego, sobre la evaluación privada se incorporan a continuación correcciones a los valores privados de evaluación, en lo que constituye la evaluación directa de los efectos sociales. Mediante el uso de precios sociales o *efficiency prices* para la corrección, se mide el valor real que tiene para la sociedad de un país la ejecución del proyecto.

Sin embargo, el inversionista privado puede no considerar en su toma de decisiones los efectos positivos o negativos que tiene para la sociedad su inversión. Por tal razón, no basta solamente con medir los efectos directos generados por un proyecto, sino que deben incorporarse y considerarse en la evaluación social los efectos indirectos e intangibles generados.

Para la evaluación específica en estudio, la metodología de evaluación social a desarrollar considera una base de evaluación privada sobre la cual se aplicarán correcciones de evaluación social directa e indirectas. En cuanto a los efectos intangibles generados por la definición de cuotas y capacidades productivas del Salar de Atacama, aun cuando se toman en consideración, se desestima su medición. La razón se encuentra en las dificultades subyacentes que existen en la identificación y cuantificación de efectos económicos tales como el posicionamiento competitivo de Chile en el mercado del litio, el potencial desarrollo

de una industria en torno al litio, o los impactos generados en los ecosistemas que rodean al Salar de Atacama⁸.

Así, en el caso de la evaluación social directa se consideraron los precios sociales 2017 desarrollados por el Sistema Nacional de Inversiones de Chile (Ministerio de Desarrollo Social, 2017), particularmente en lo referido al precio social que se le da a las emisiones de carbono y a la tasa de descuento social⁹.

Pese a ello, el uso de estos precios sociales sobre la evaluación privada que optimiza las cuotas y capacidades de producción sobre el Salar de Atacama no abarca la totalidad de efectos subyacentes a la explotación. Específicamente, debido a que no considera los impactos de encadenamiento productivo generados por la producción minera en el Salar.

Debido a que la generación de producto de un sector de la economía requiere de insumos del mismo u otros sectores de la economía, un cambio en la cantidad demandada o generada por un sector de la economía debe reconocer el valor agregado generado en los demás sectores económicos.

Un camino para observar el efecto indirecto debido a encadenamientos productivos es el que ofrece el uso de las matrices de insumo-producto (MIP). Publicadas por el Banco Central de Chile en los años 1962, 1977, 1986, 1996, 2003 y 2013, las matrices insumo-producto ofrecen una versión simplificada de las transacciones intersectoriales de la economía, a partir del balance de los flujos de oferta y demanda para un período de tiempo particular (Lagos y Blanco, 2010).

⁸ Si bien se realizaron estudios a nivel teórico de los eventuales descensos generados en las lagunas que rodean el Salar de Atacama, la aplicación de fórmulas teóricas de descenso hidráulico de Neumann o Theis pierden aplicabilidad en el Salar debido a la existencia de una interfaz salina que desconecta hidráulicamente los acuíferos del núcleo y lagunas circundantes del Salar (SGA, 2014; CPH Consultores, 2016). Por otra parte, el uso de modelos hidrogeológicos para la predicción de descensos en el Salar, aunque válido técnicamente en su aplicación, ha sido durante los últimos años un constante foco de discusión (Gravel, 2015). Debido a la inexistencia de un modelo hidrogeológico unificado y validado que mida los efectos de la explotación del Salar, se descartó entonces medir en este estudio los impactos intangibles de esta variable.

⁹ A pesar de que el Sistema Nacional de Inversiones de Chile cuantifica los precios sociales asociados al valor de la mano de obra, divisas, tiempos de viaje, combustibles, costos de operación y emisiones de carbono, debido a la información disponible para la modelación, en esta oportunidad solo se considerará el uso del precio social de las emisiones de carbono para la modelación.

Mediante el uso de la MIP se obtienen multiplicadores con los cuales pueden interpretarse los efectos indirectos e inducidos que genera un sector de la economía (Schuschny, 2005). Específicamente, a partir del cálculo de multiplicadores de producto que consideran las transacciones intersectoriales de la economía (los denominados multiplicadores tipo I o de modelo abierto de la economía), y de multiplicadores que consideran además el efecto de aumento en la demanda total de la economía por el pago de salarios a mano de obra (los denominados multiplicadores tipo II o de modelo cerrado de la economía). En consecuencia, la cuantificación de multiplicadores tipo I permite medir el efecto directo e indirecto generado por un sector de la economía, mientras que el cálculo de los multiplicadores tipo II permite distinguir los efectos directos, indirectos e inducidos generados (Aroca, 2001).

Luego, con estos coeficientes y los resultados económicos derivados de la producción minera en el Salar de Atacama¹⁰ se puede estimar el valor agregado generado por la explotación minera en el Salar. En donde el valor social agregado está determinado por las utilidades que genera la empresa, la recaudación fiscal, los efectos indirectos e inducidos generados y el costo social creado debido a emisiones atmosféricas.

¹⁰ Remuneraciones de empleados, costos, beneficios antes de impuestos, impuestos de ingreso de primera categoría, impuestos de repatriación de beneficios y otras regalías.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PRODUCCIÓN MINERA DEL SALAR DE ATACAMA

3.1 Antecedentes

El Salar de Atacama se encuentra localizado en la Región de Antofagasta en el norte de Chile, aproximadamente a 150 kilómetros al sureste de Calama, entre los 22°57' y 23°47' latitud sur, y es por su extensión el salar más grande de Chile (Fig. 1). Emplazada su parte central a una altura de 2.300 m.s.n.m., el Salar de Atacama cuenta con una superficie de 3.000 km² que está encerrada en la cuenca del mismo nombre, limitando al este con la Cordillera de los Andes y al oeste con la Cordillera de Domeyko (Muñoz *et al.*, 2004).

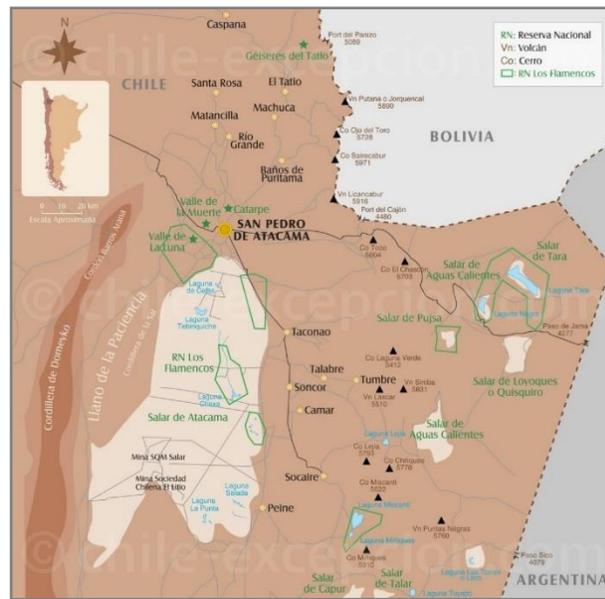


Figura 3-1: Localización geográfica del Salar de Atacama

El clima de la región en la que se emplaza el Salar es árido e hiper-árido. Con escasas precipitaciones promedio (10-25 mm/año) e intensas tasas de evaporación que se estiman en 2000 mm/año para la porción central del Salar, la evapotranspiración de la zona excede a la precipitación. Además, debido al flujo de aguas subterráneas proveniente de las áreas elevadas de los Andes, de este a oeste existen cuatro zonas hidrogeológicas bien definidas en el Salar de Atacama: zona de recarga, zona aluvial, zona marginal y el núcleo (Fig. 3-2) (Vásquez *et al.*, 2013; Tejeda *et al.*, 2003).

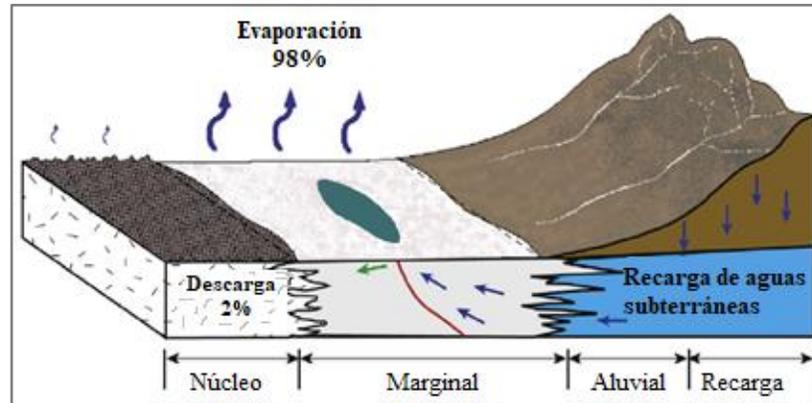


Figura 3-2 Modelo conceptual de aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Vásquez *et al.*, 2013.

En las zonas marginales y el núcleo del Salar de Atacama se han identificado acuíferos que ofrecen valiosos y variados recursos: agua fresca, ecosistemas de flora y fauna en las áreas circundantes al Salar, e importantes reservas minerales de litio, potasio y otros compuestos presentes en la salmuera (Vásquez *et al.*, 2013).

Entre los salares a nivel mundial, el Salar de Atacama presenta las más altas concentraciones de litio, favorables condiciones climáticas y de operación (por las altas tasas de evaporación de la región), y altas concentraciones de coproductos para ser explotados (principalmente potasio). En consecuencia, el Salar de Atacama es uno de los salares más relevantes para la explotación minera de litio en el mundo (COCHILCO, 2013).

Desde 1984 hasta la fecha en el Salar de Atacama se ha desarrollado la explotación, producción y comercialización de derivados de litio (carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio), potasio (cloruro de potasio y sulfato de potasio), y boro (ácido bórico)¹¹. A la fecha de este estudio, únicamente las empresas Albermarle y SQM han operado en el Salar de Atacama y poseen permisos para la explotación de productos provenientes de salmuera.

¹¹ Debe notarse, sin embargo, que el inicio y continuidad productiva de cada uno de estos derivados comerciales ha estado sujeta a las condiciones imperantes del mercado. Tomando como ejemplo el caso del litio, la producción ha estado fundamentalmente asociada al carbonato de litio. Mientras, otras formas de producción como el cloruro de litio se han comercializado discontinuamente a contar de 1998.

La producción en el Salar de Atacama se inició en 1984 a partir de la producción de la primera tonelada de carbonato de litio por parte de la Sociedad Chilena del Litio (SCL, hoy en día Albermarle), empresa que fue formada en 1980 como un *joint venture* entre CORFO y Foote Mineral Company¹² (FMC). Como parte de la formación de la sociedad, CORFO aportó 3.344 pertenencias mineras en el sector sur del núcleo del Salar (Figura 3-3) y el derecho a explotar una cuota de 200.000 toneladas de Litio Metálico Equivalente (CORFO, 2016).

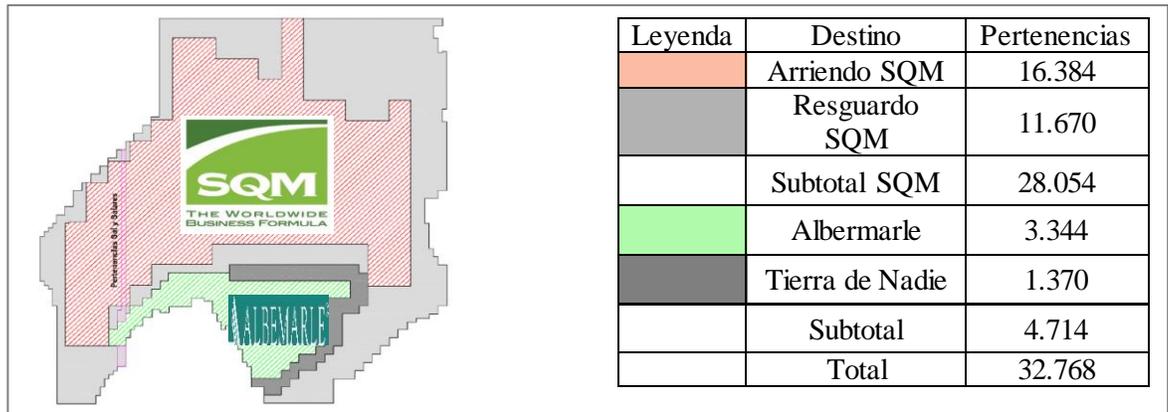


Figura 3-3 Áreas en arrendamiento del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a CORFO, 2016.

En la actualidad Albermarle ha diversificado su cartera de productos y comercializa, además del carbonato de litio, cloruro de litio y cloruro de potasio. Además, de la cuota original de 200.000 toneladas libres a ser explotadas, había extraído hasta 2016 aproximadamente 90.000 toneladas de Litio Metálico Equivalente y en dicha fecha se esperaba que, bajo los ritmos de producción proyectados, terminara de consumir su cuota inicial entre 2029 y 2030 (CORFO, 2016). En tal escenario, Corfo decidió modificar en 2016 su contrato con Albermarle de modo tal que, entre otros, se acordó una cuota adicional de 262.132 toneladas de litio metálico equivalente a ser explotada por un plazo máximo de 27 años (Tabla 3-1).

¹² Empresa norteamericana que en 1980 era uno de los dos grandes productores de litio en el mundo. Evaluó inicialmente la explotación de los recursos de este salar y adaptó los procesos de extracción de litio de su mina en Silver Peak, Nevada, al Salar de Atacama.

Tabla 3-1: Cuotas otorgadas en el Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a CORFO 2016; CCHEN, 2017.

Año de otorgamiento	Empresa	Cuota (Tons Li)	Consumo 2016 (Tons Li)	Año límite de Cuota	Plazo (Años)	Término de Cuota
1980	Albermarle	200.000	~90.000	-	-	2029-2030
1995	SQM	180.100	~110.000	2030	35	2023
2016	Albermarle	262.132	-	2043	27	2043
2018	SQM	349.553	-	2030	12	2030

Por su parte, SQM inició sus operaciones en el Salar de Atacama en 1995 a partir de la producción de sales de cloruro de potasio, las cuales diversificó en 1997 por medio del inicio de producción de sales de carbonato de litio, sulfato de potasio y ácido bórico. En 2003, SQM extendió su cartera de productos de litio al incluir entre estos al hidróxido de litio.

Para el desarrollo de las operaciones en el Salar de Atacama, CORFO le otorgó a SQM 16.384 pertenencias mineras en arriendo¹³ y estableció un límite productivo de 181.100 toneladas de Litio Metálico Equivalentes a ser explotadas no más allá de 2030. Sin embargo, en el caso de SQM, el consumo de la cuota hasta 2016 ha sido de aproximadamente 110.000 toneladas de litio metálico equivalente y, dados los ritmos productivos que esperados para SQM a fines de 2017, la cuota asignada terminaría de consumirse entre 2022 y 2023. Por este motivo, SQM y CORFO llegaron a un acuerdo en enero de 2018 mediante el cual le otorgaban a SQM el derecho de explotar 349.553 toneladas hasta 2030.

3.2 Recursos y Reservas

Desde que Anaconda descubrió altas concentraciones de litio y potasio en las salmueras del Salar de Atacama en 1962, diferentes empresas y entidades del Estado de Chile han desarrollado estudios tendientes a determinar el potencial de los recursos y reservas existentes en el Salar de Atacama.

Entre estos estudios han existido diferencias en cuanto a los minerales considerados, la extensión de la medición (áreas de estudio en superficie y profundidad), uso de criterios

¹³ Además de las 16.384 pertenencias mineras que fueron otorgadas en arrendamiento exclusivo a SQM se otorgaron 11.670 pertenencias mineras como área de resguardo (Figura 3-3).

(aplicación de leyes o concentraciones de corte, porosidad, entre otros) y metodologías empleadas (uso de *software*, modelos hidrogeológicos, uso de *kriking* y transformación de coordenadas para cuerpo curvilíneos). No obstante, como muestra la Figura 3-4 para el caso del litio, aun cuando se ha explotado por más de 30 años, los resultados muestran un sostenido aumento de los recursos medidos e indicados en el tiempo (SQM, 2017b).

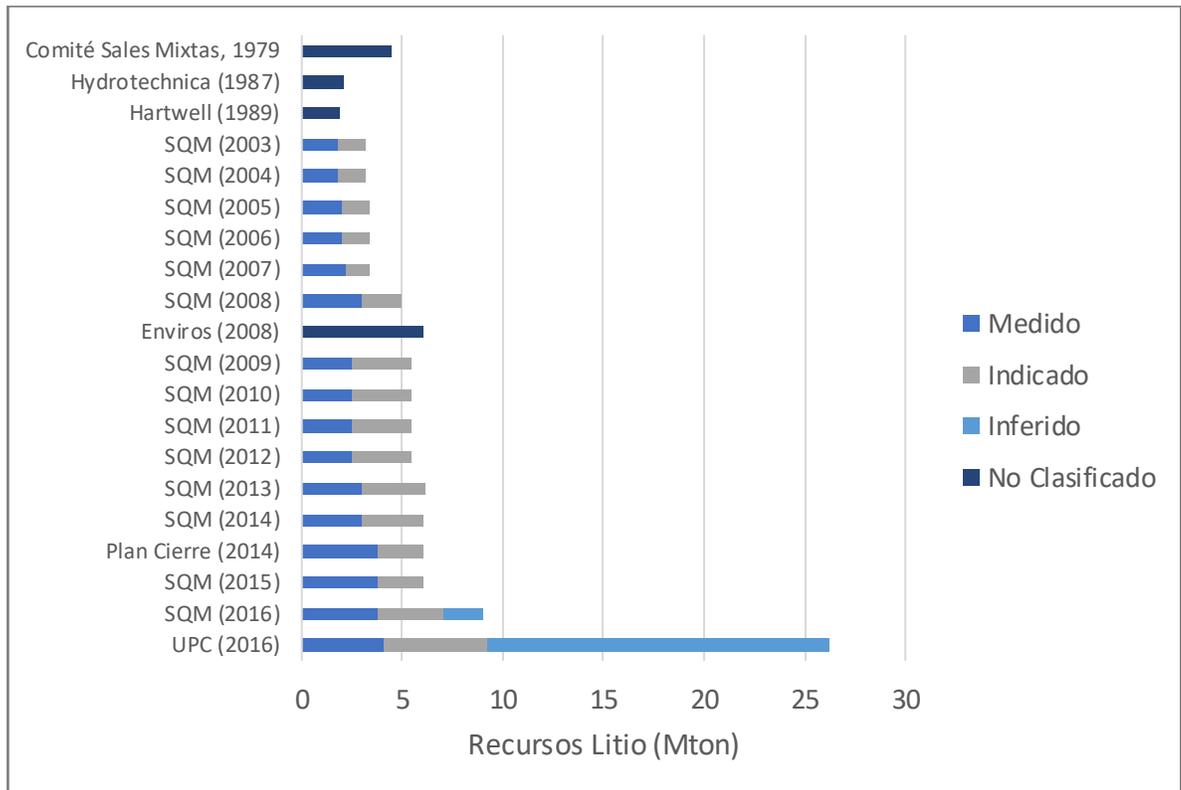


Figura 3-4 Estimaciones de recursos de litio en el Salar de Atacama. Fuente: SQM, 2017b.

En base a las últimas estimaciones realizadas (UPC, 2016), en el Salar de Atacama existe una reserva base total de 122,95 Mton de potasio y de 9,18 Mton de litio. Además, en las capas más profundas del acuífero que contienen salmuera existe un importante recurso inferido de 270,17 Mton de potasio metálico y de 17,02 Mton de litio metálico.

3.3 Producción minera en el Salar de Atacama

3.3.1 Producción de derivados de litio

La producción histórica de derivados de litio en el Salar de Atacama se ha dado fundamentalmente como carbonato de litio (Figura 3-5). Al considerar la producción de derivados de litio como carbonato de litio equivalente (LCE, en su sigla en inglés), la producción de LCE en el Salar de Atacama ha experimentado un crecimiento compuesto anual del 11,7% en el período 1984-2016. Además, la entrada en operación de SQM ha reducido sistemáticamente la participación productiva de Albermarle, de un modo tal que desde la crisis *subprime* de 2008 esta no ha superado el 33% (Figura 3-6).

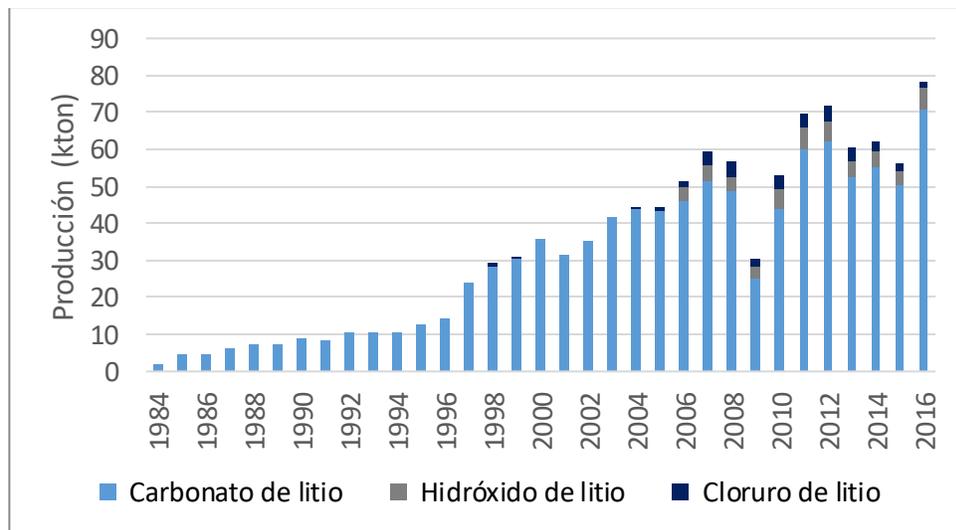


Figura 3-5 Producción histórica de derivados de litio en el Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin, 2016.

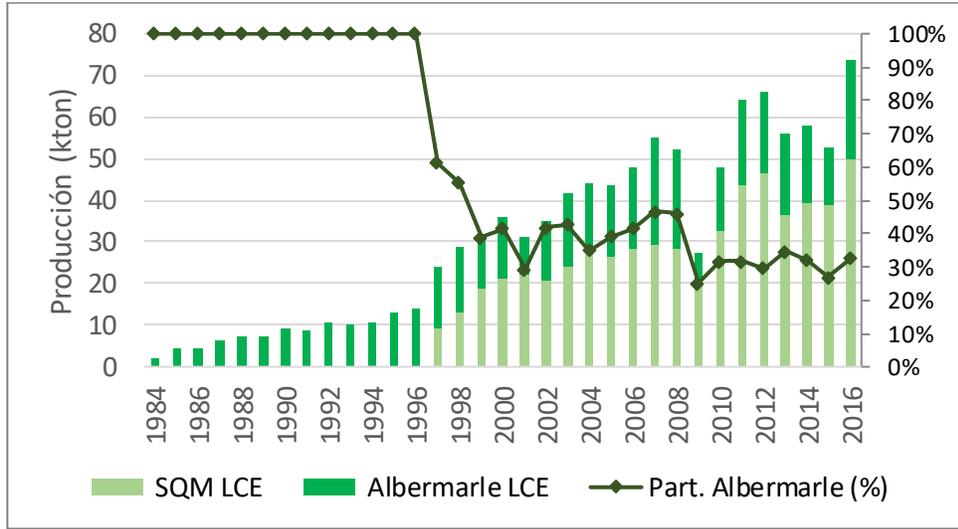


Figura 3-6 Producción histórica de LCE en el Salar de Atacama por empresa. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin, 2016; SQM, 2017^a.

Las ventajas productivas de SQM por sobre Albermarle radican no solo en las mayores capacidades productivas debidas a la propiedad minera en arrendamiento asignada a cada una, sino que también por la geología (concentraciones de soluto disueltos en pertenencias mineras) y costos de los procesos productivos. De hecho, los costos de producción de carbonato de litio de SQM en el Salar de Atacama son los más bajos a nivel mundial, incluso si se considera si la producción de carbonato de litio se realiza a partir de salmueras o bien a partir de otros orígenes como las pegmatitas (Figura 3-7).

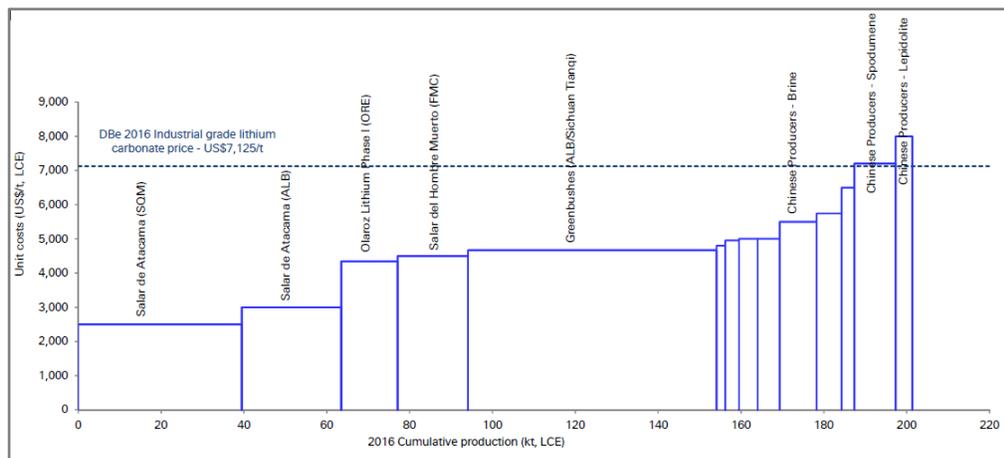


Figura 3-7 Curva de costos de producción 2016 de LCE. Fuente: Deutsche Bank, 2016.

3.3.2 Producción de derivados de potasio

La estrategia de negocio de SQM en el Salar de Atacama considera la explotación y comercialización conjunta tanto de compuestos de litio como de potasio. Con una participación en la oferta mundial de cloruro de potasio que va entre el 2% y el 4%, SQM ha aumentado sostenidamente sus niveles de producción a casi 2.000 kton/año para 2016. No obstante, el crecimiento histórico observado en los niveles de producción de cloruro de potasio no se ha visto replicado en el caso del sulfato de potasio. En la práctica, la producción histórica de sulfato de potasio no ha superado las 190 kton/año y en 2016 fue de 124 kton. En cuanto a Albermarle, la capacidad productiva de cloruro de potasio es reducida y no supera las 136 kton/año.

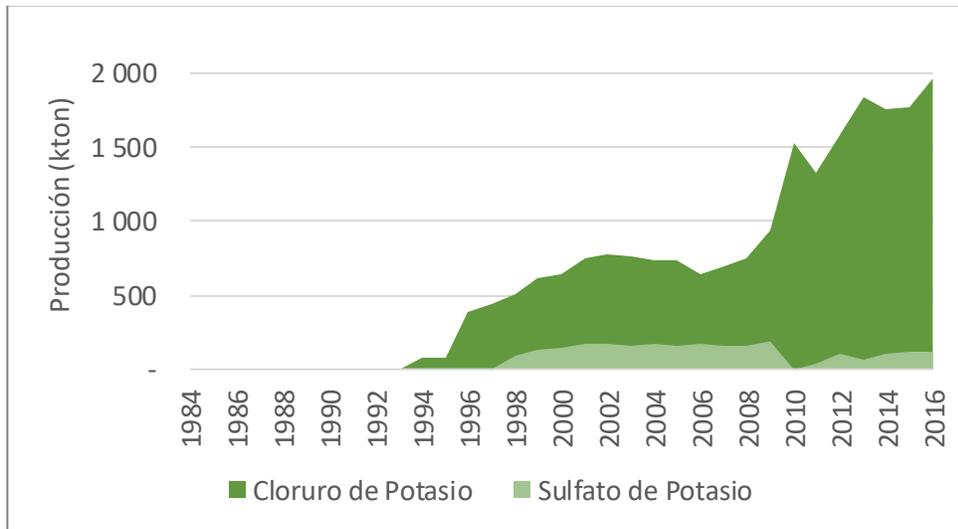


Figura 3-8 Producción histórica de derivados de potasio en Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin, 2016.

3.3.3 Producción de derivados de boro

Si bien SQM llegó a producir casi 10 kton de ácido bórico en el año 2000 en el Salar de Atacama, desde 2014 la producción en Chile de este compuesto ha sido reemplazada por las mejores perspectivas económicas que se han dado en la región de Arica y Parinacota a partir de compuestos de boro provenientes de mineral de ulexita (Sernageomin, 2016).

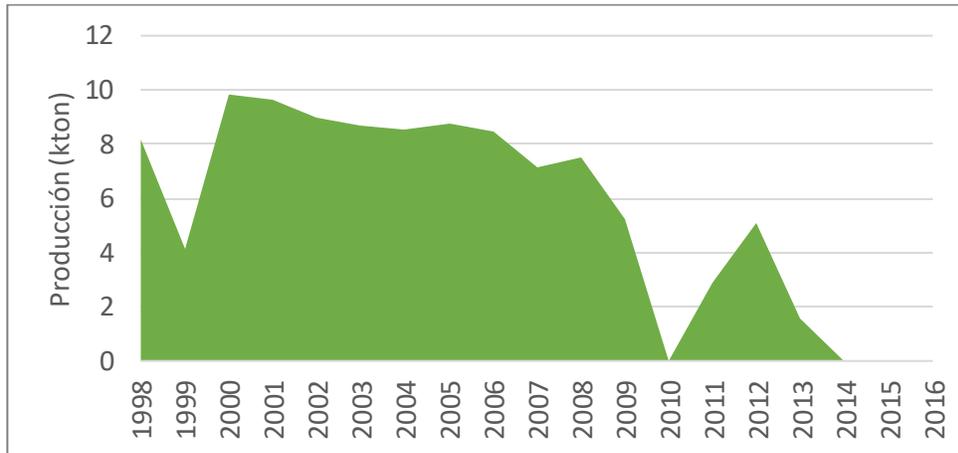


Figura 3-9 Producción histórica de Ácido Bórico en el Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin, 2016.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo desarrollado permite determinar las cuotas de explotación de litio a asignar en el Salar de Atacama y de las capacidades de producción para compuestos de litio y potasio. Para ello se analizan las cuotas y capacidades óptimas de producción a solicitar o establecer, tanto desde la perspectiva del explotador privado como también desde la perspectiva del planificador social, considerando para ello un modelo de explotación integrado del Salar de Atacama¹⁴. Dada la coyuntura que se dio entre CORFO y SQM en 2017, el caso base de análisis considera analizar las cuotas y capacidades óptimas a asignar entre 2023 y 2043 (sin considerar la última cuota asignada a SQM), evaluando los beneficios generados desde 2017¹⁵.

Para la generación de los modelos de evaluación privado y social se considera la metodología de evaluación de proyectos por medio de flujos de caja descontados. Se considera en la evaluación que, debido a que las producciones históricas de derivados de litio y potasio se han realizado respectivamente como carbonato de litio y cloruro de potasio, la comercialización se efectuará exclusivamente por medio de los mismos compuestos. Se excluye del análisis la comercialización de derivados de boro debido a que, en el último tiempo, la producción de ácido bórico en el Salar de Atacama se ha interrumpido por los bajos márgenes económicos que genera. Asimismo, para efectos de análisis de cambio en capacidad productiva, el sulfato de potasio tampoco es considerado. En efecto, si bien desde 1997 se ha comercializado una parte no despreciable como sulfato de potasio, la verdad es que la capacidad productiva del sulfato de potasio (a diferencia del cloruro de potasio) no ha exhibido aumentos de capacidad desde su inauguración. Por tanto, cambios en la capacidad productiva del sulfato de potasio no son reconocidos en la modelación¹⁶.

¹⁴ Si bien las decisiones de explotación en el Salar son realizadas independientemente por las empresas que están en operación, desde el punto de vista del planificador social el análisis de asignación de cuotas es posterior a la cuantificación de las cuotas a explotar.

¹⁵ Tomando en consideración que el contrato establecido a Albermarle en el Salar de Atacama otorgó un derecho de explotación de 2017 a 2043, el análisis comparativo de resultados es más consistente bajo esta modalidad.

¹⁶ Sin embargo, con objeto de medir los cambios en la capacidad productiva del cloruro de potasio, sí se reconocerá la existencia de capacidad productiva de sulfato de potasio dado que ambos compuestos provienen

4.1 Parámetros y variables del modelo

Para una correcta optimización y análisis, la metodología de evaluación propuesta requiere que previamente se realice una adecuada selección y caracterización de los parámetros y variables que influyen en el modelo.

En el caso de la evaluación privada, típicamente el flujo de caja que mide la rentabilidad privada de operación requiere conocer de los niveles futuros de producción, precios, gastos, cargas impositivas e inversiones. Por su parte, para la evaluación social se agregan a los tópicos ya señalados: los beneficios indirectos e inducidos generados por la explotación minera y los costos sociales asociados a emisiones atmosféricas producidas por la construcción, operación y cierre de la explotación. Con objeto de incluir cada uno de los tópicos mencionados en los modelos de evaluación privada y social según corresponda, en las siguientes subsecciones de este capítulo se caracteriza y modela independientemente cada uno de estos ítems.

4.1.1 Producción minera

La producción de los compuestos de litio y potasio proviene del bombeo y posterior procesamiento de las reservas existentes en el núcleo del Salar de Atacama. En términos generales, el proceso de producción de sales en el Salar se inicia con el bombeo de salmuera desde el núcleo, la cual es a continuación concentrada y cosechada¹⁷ naturalmente en pozas de evaporación destinadas a este fin. Una vez cosechada la salmuera enriquecida, esta es llevada a las respectivas plantas de tratamiento de las que se obtienen los respectivos compuestos a ser comercializados (Figura 4-1).

del mismo origen. En particular, se considerará un nivel de producción constante equivalente a su nivel promedio histórico de producción (129 kton/año).

¹⁷ En el caso del litio, debido al carácter estratégico que presenta, parte de la salmuera debe ser reinyectada al acuífero del Salar de Atacama.

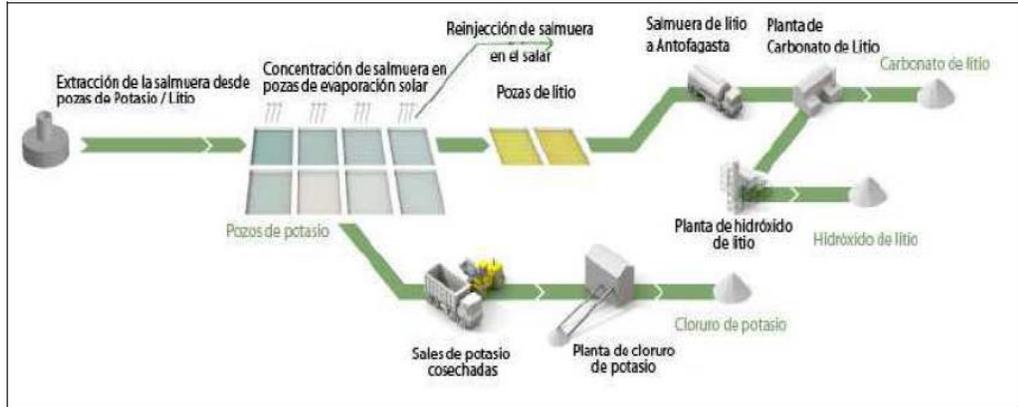


Figura 4-1: Diagrama productivo simplificado de producción en SQM. Fuente: Web de SQM (www.sqm.com)

A efecto de cuantificar la producción futura de los derivados de salmuera, se considera el uso del modelo de balance de masas que considera una explotación en el tiempo de las reservas del salar desde mayores a menores concentraciones. Con este fin, se consideraron las últimas estimaciones de reservas del Salar de Atacama, las que señalan la existencia de 122,95 Mton de potasio y 9,18 Mton de litio (UPC, 2016), y las últimas estimaciones *krigeadas* de media y varianza para las concentraciones de litio y potasio que se mencionan (Tabla 4-1). A partir de estas se estimó la distribución de las reservas del Salar de Atacama como una distribución lognormal¹⁸. Luego, tomando en cuenta esta distribución lognormal, se estimaron las curvas tonelaje-ley de los recursos de litio y potasio existente en el Salar de Atacama (Figura 4-2 y Figura 4-3).

Tabla 4-1: Concentraciones de litio y potasio en salmuera del Salar de Atacama. Fuente: SQM, 2017b

Fuente	Datos		Krigado	
	Promedio	Varianza	Promedio	Varianza
Litio	0,15%	1,19%	0,15%	1,04%
Potasio	2,09%	1,14%	2,04%	1,03%

¹⁸ Considerando un factor de conversión estequiométrico de litio a carbonato de litio de 5,323 y de potasio a cloruro de potasio de 1,907.

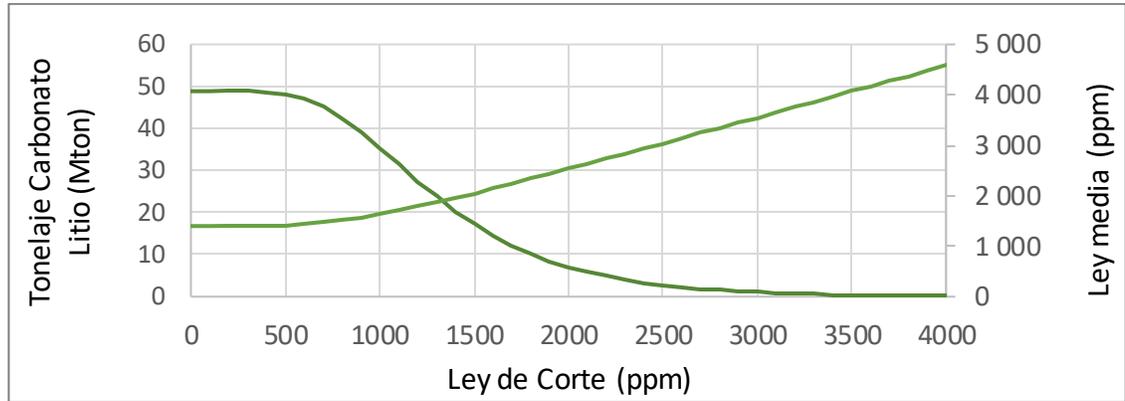


Figura 4-2: Estimación de distribución de reservas de carbonato de litio en Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

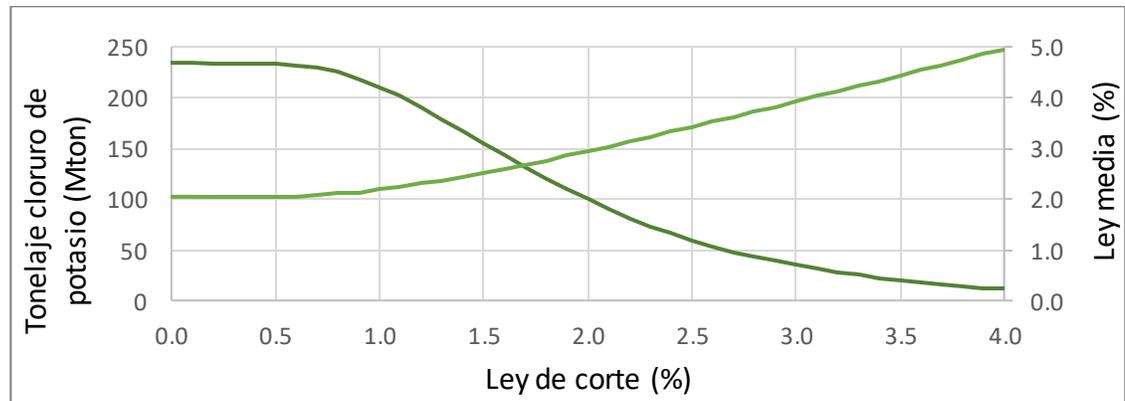


Figura 4-3: Estimación de distribución de reservas de cloruro de potasio en Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-2: Parámetros de operación considerados para producción en Salar de Atacama. Fuente: GEM, 2017; SQM, 2017b; Sernageomin, 2016.

Parámetro operacional	Valor	Unidad
Densidad	1,225	M3/ton
Rendimiento pozas litio	57	%
Reinyección	70	%
Recuperación de litio en planta carbonato de litio	88	%
Recuperación potasio	70	%
Producción Sulfato de Potasio	129	kton/año

Así, a partir del modelo de consumo de reservas generado y los parámetros de operación indicados en la Tabla 4-2, se establecieron los perfiles de producción de carbonato de litio y de cloruro de potasio para el Salar de Atacama según:

$$Q_{LCE,t} \left(\frac{\text{ton LCE}}{\text{año}} \right) = F_t \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) * \text{densidad} \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) * \text{ConcLi}_t(\%) * \text{Rend.pozas}(\%) * (1 - \text{Reinyección}(\%)) * \text{RecLi}(\%) * 5,323^{19} \quad (4.1)$$

$$Q_{KCl,t} \left(\frac{\text{ton KCl}}{\text{año}} \right) = F_t \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) * \text{densidad} \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) * \text{ConcK}_t(\%) * \text{Rec}_K(\%) * 1,907^{20} - Q_{SOP,t} \left(\frac{\text{ton KCl}}{\text{año}} \right) \quad (4.2)$$

Esto, considerando que el nivel de producción de cada período Q_{it} (i =carbonato de litio, cloruro de potasio) depende del nivel de bombeo F_t y de las concentraciones extraídas en cada período (las cuales son extraídas según el modelo presentado de mayores a menores concentraciones).

No obstante lo señalado, para estimar la producción minera en el caso del cloruro de potasio, hay que considerar además que debido a las condiciones en las que opera el mercado (mercado competitivo), la producción de cloruro de potasio del Salar está sujeta a restricciones comerciales de venta de producto. Por este motivo es que, para estimar la producción de cloruro de potasio, se consideró que la producción minera de este compuesto está limitada por la participación histórica de mercado (de 3%²¹) que las empresas productoras del Salar de Atacama han alcanzado en este mercado. De esta manera se considera que la producción de cloruro de potasio quedará definida como:

¹⁹ Factor de conversión estequiométrico de litio a carbonato de litio.

²⁰ Factor de conversión estequiométrico de potasio a cloruro de potasio.

²¹ Calculado en base a la producción reportada para SQM y Albermarle de cloruro de potasio (Sernageomin,2016) y producción mundial de cloruro de potasio (PotashCorp, 2017) entre 2009 y 2016.

$$Q_{KCl,t} \left(\frac{\text{ton KCl}}{\text{año}} \right) = \min \left\{ F_t \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) * \text{densidad} \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) * \text{Conc}K_t(\%) * \text{Rec}_K(\%) * 1,907^{22} - Q_{SOPt} \left(\frac{\text{ton KCl}}{\text{año}} \right), \right. \\ \left. \text{Demanda Mundial}_{KCl} * \text{Part. Mercado}_{\text{Salar Atacama},KCl} \right\} \quad (4.3)$$

En donde la demanda mundial de cloruro de potasio considera las perspectivas futuras esperadas para el mercado del cloruro de potasio, las cuales se detallan en el Anexo B.

En el caso del carbonato de litio, no se consideran restricciones comerciales de venta de producto debido a las perspectivas de mercado que se esperan para este compuesto, las cuales se explican en mayor detalle en la siguiente subsección.

4.1.2 Precio

a) Precio del carbonato de litio

El precio del carbonato de litio ha estado determinado históricamente por la oferta existente en un mercado oligopólico²³ (Lagos, 2012; Tilton y Guzmán, 2016), en donde los precios son establecidos y negociados directamente entre productores y consumidores por contratos bilaterales (Maxwell, 2015). Dado el rol fundamental de la producción del Salar de Atacama en la oferta mundial de carbonato de litio²⁴, los niveles productivos que se establecen para el Salar afectan directamente el precio del carbonato de litio y por tanto deberán ser considerados a la hora de estimar su precio futuro. Sin embargo, no es el único factor que debe ser incluido en su modelación. También deben considerarse las perspectivas de oferta y demanda del resto del mundo.

²² Factor de conversión estequiométrico de potasio a cloruro de potasio.

²³ En 2015 Albermarle, SQM, FMC y Sichuan Tianqi concentraron el 83% de la producción mundial (Deutsche Bank, 2016).

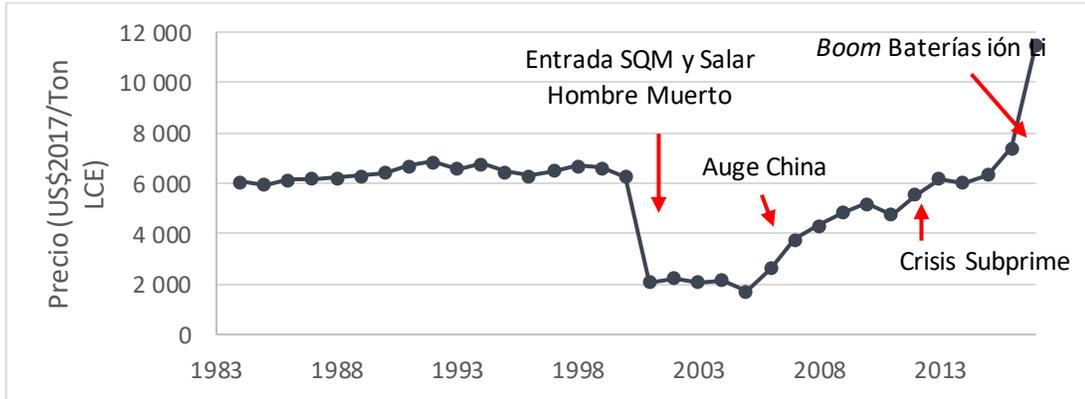
²⁴ En 2016 la producción de LCE del Salar de Atacama representó el 36% de la oferta mundial.

Entre 1984 y 1997 el precio del carbonato de litio sufrió variaciones insignificantes y se estabilizó en niveles cercanos a los 6.000 US\$₂₀₁₆²⁵/Ton (Figura 4-2). Sin embargo, la crisis asiática que comenzó en 1997 y la entrada en producción de SQM en Chile y Salar de Hombre Muerto en Argentina desplomaron el precio hasta los 1.720 US\$₂₀₁₆/Ton en 2005, por la reducción forzosa del precio por parte de SQM para sacar del mercado a los productores que tenían mayores costos de producción (Lagos, 2012).

Como muchos otros minerales, después de 2006 hubo una reversión de la tendencia a la baja del precio por efecto del auge de China, de modo tal que en 2010 el precio ya había regresado a los niveles observados a mediados de 1990 (Maxwell, 2015). Más aún, por políticas más estrictas de control de emisiones implementadas desde 2015 en China y otros países en el mundo, el precio alcanzó niveles nunca antes vistos. Esto, particularmente por el crecimiento de la demanda de vehículos eléctricos con alternativas de almacenamiento energético basadas en baterías de ion litio²⁶, los que han incrementado tanto la demanda como el precio del carbonato de litio (Hao *et al.*, 2017).

²⁵ A objeto de comparar los niveles de precio en el tiempo se deflactó el precio nominal reportado por USGS (2017) a 2017 usando como base comparativa el Índice de Precios del Consumidor (CPI, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. Además, para 2017 se consideró un precio de 13.720 US\$₂₀₁₇/ton LCE.

²⁶ Entre las alternativas de almacenamiento de energía las baterías de ion litio se caracterizan por ser las de mayor densidad energética en comparación a otras configuraciones químicas comunes de baterías (Grosjean *et al.*, 2012; Miedema y Moll, 2013). Si bien existen amenazas de sustitución tecnológica en el largo plazo, la sostenida baja en el costo de las baterías permite preveer que en el mediano plazo la demanda por este tipo de baterías debiera crecer (SQM, 2017a).



Figura

4-4: Precio histórico carbonato de litio 1984-2017. Fuente: USGS, 2017.

Si bien entre los usos industriales de los compuestos de litio las baterías para almacenamiento de energía destinadas a vehículos eléctricos determinarían en 2017 un consumo de solo 50 kton LCE de las 208 kton LCE totales consumidas (SQM, 2017^a), fuentes asociadas a la producción de carbonato de litio esperan que el rápido crecimiento de este sector duplique cada 5 años la demanda total de compuestos de litio (Figura 4-5).

Con expectativas de crecimiento para las baterías de ion litio destinadas a vehículos eléctricos cercanas al 24%-28% compuesto anual y para la demanda total de un 12%-16% compuesto anual (SQM, 2017^a), se espera no solo que el panorama de demanda mundial cambie, sino que también de la oferta.

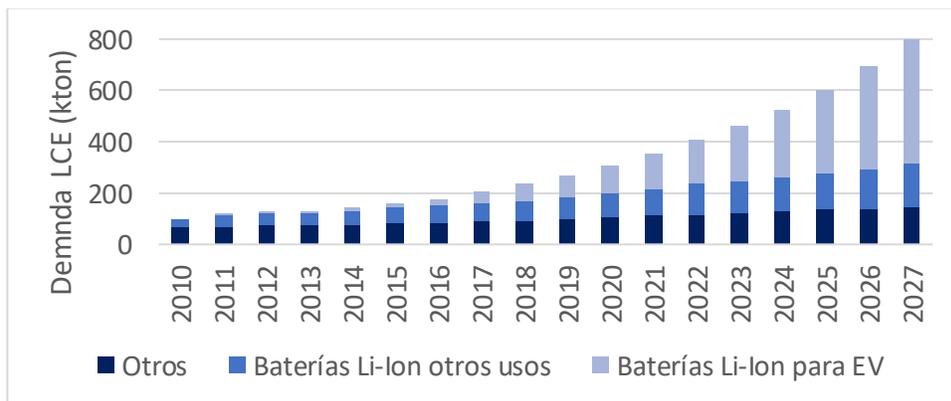


Figura 4-5: Demanda global proyectada carbonato de litio a 2027. Fuente: SQM, 2017^a.

La producción mundial de compuestos de litio provendría en 2017 fundamentalmente de Australia (40%), Chile (36%), Argentina (14%), China (8%) y EEUU-Canadá (2%) (SQM, 2017^a). Sin embargo, las nuevas perspectivas de precio observadas durante los últimos años y los mayores requerimientos de litio que se esperan, han fomentado el estudio y entrada en operación de nuevos proyectos en el mundo que potencialmente incrementarían la oferta en 2027 a 800 kton LCE (SQM, 2017^a).

En consecuencia, como muestra la Figura 4-6, se espera que por la incorporación de nueva oferta aumente la volatilidad en el precio, debido al desbalance que existiría entre la oferta y demanda mundial. Además, se espera que la participación de Chile en el mercado mundial disminuya bajo los escenarios pronosticados, y que poco a poco el esquema de fijación de precios que tuvieron hasta ahora las compañías líderes del mundo sea desbaratado (Lagos, 2012).

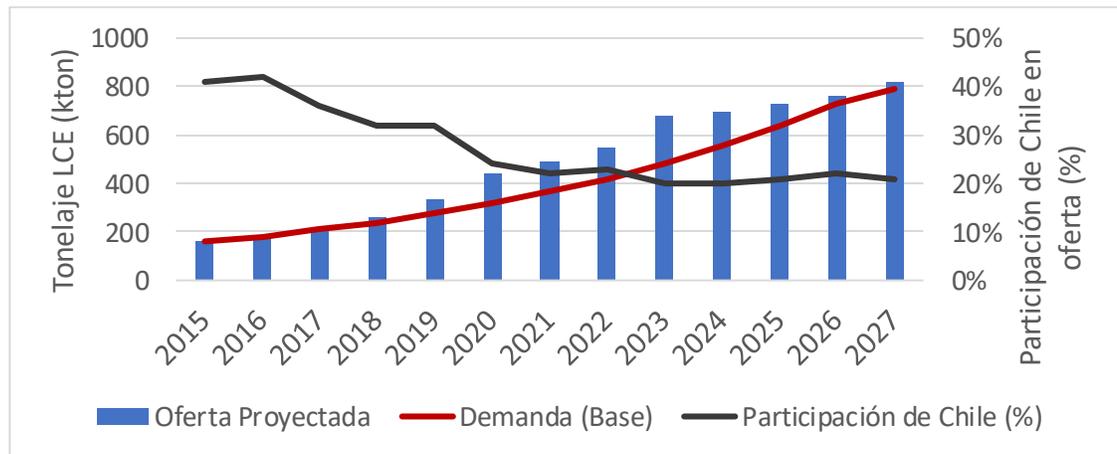


Figura 4-6: Potencial crecimiento de oferta y demanda de LCE. Fuente: SQM, 2017^a.

Por los motivos anteriormente señalados es que a efecto de modelar el precio futuro del carbonato de litio deberá considerarse el efecto, no solo de la oferta del Salar de Atacama, sino que de la oferta y demanda mundial en el precio.

Para la modelación del precio se considera el uso de un modelo econométrico, desarrollado por el doctor en economía de minerales Juan Ignacio Guzmán en 2017, que toma en cuenta

tanto la oferta del Salar de Atacama, la oferta mundial esperada y la demanda total esperada, el cual está dado por:

$$P_{LCE,t} = -2680 + 0.81P_{LCE,t-1} + 4629 U_t \quad (4.4)$$

Donde, $P_{LCE,t}$ corresponde al precio del carbonato de litio en el período t y U_t a la utilización de capacidad mundial del período t . Esta última considerada en el modelo como la fracción existente en el período t entre la demanda mundial y la oferta mundial (la cual consiste en la oferta directa proveniente del Salar de Atacama y la oferta del resto del mundo). Para efectos de evaluación del modelo, se considera a la oferta del Salar de Atacama como variable y al resto de la oferta mundial y a la demanda esperada como parámetros exógenos y fijos a la evaluación²⁷. Sin embargo, dada la incertidumbre existente más allá de 2027, en la evaluación se asumirá a contar de 2028 un precio de largo plazo dado por el precio promedio observado entre 2023 y 2027.

b) Precio del cloruro de potasio

Dado que la participación de mercado del Salar de Atacama en la producción mundial se encuentra entre el 2%-4% (CORFO, 2016), el precio del cloruro de potasio se considera exógeno a la evaluación. De hecho, el precio de largo plazo considerado en la evaluación es $P_{KCl}=264$ US\$2017/ton (Banco Mundial, 2017).

²⁷ Para este estudio se usaron particularmente las estimaciones de oferta y demanda mundial desarrolladas por SQM (SQM, 2017a) y que se encuentran en el Anexo C.

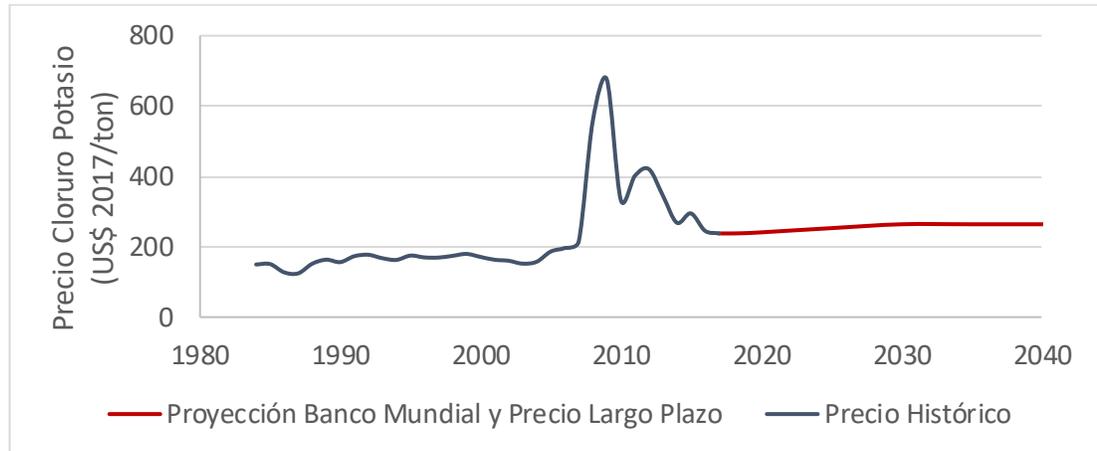


Figura 4-7: Precio proyectado del cloruro de potasio. Fuente: Banco Mundial, 2017.

4.1.3 Costo de producción

Los costos de producción de carbonato de litio en el Salar de Atacama son los más bajos a nivel mundial. Debido a los distintos niveles productivos, geología, procesos y tecnologías de operación que manejan las empresas que actúan en el Salar, existen diferencias entre los costos de operación. Como una forma de incorporar estas diferencias se consideró un costo de producción de 1.700 US\$2017/ton y de 2.200 US\$2017/ton como representativo para SQM y Albermarle (GEM, 2017). Por otro lado, para el costo de producción del cloruro de potasio en el Salar de Atacama se consideró un costo de 150 US\$2017/ton (GEM, 2017). De este modo, para el Salar de Atacama se considera en el tiempo un costo de producción C_{it} (i =carbonato de litio, cloruro de potasio), ponderado según la producción esperada para estas empresas ²⁸.

4.1.4 Impuestos

Las empresas que operan en el Salar de Atacama en Chile están sujetos a un régimen impositivo sobre las utilidades, un *royalty* específico de operación minera, un *royalty* de

²⁸ Se consideran entre 2017 y 2022 una distribución del costo ponderando los perfiles productivos declarados hasta esa fecha. Luego, a contar de 2023 se considera una ponderación del costo considerando que existirá una distribución de la producción de largo plazo como la existente en 2022.

arrendamiento por la explotación en el Salar, y otros pagos (hacia comunidades y de fomento al desarrollo tecnológico).

El primer impuesto considerado consiste en el impuesto de primera categoría que se aplica a los ingresos de las empresas. La tasa global impositiva aplicada es de 27,5%.

El segundo impuesto consiste en el impuesto específico a la minería (IEM), que se aplica desde 2010 a las empresas mineras productoras del Salar de Atacama según la Ley 20.049. Por medio de esta ley, las empresas que se acojan a esta ley después de 2010 (como Albermarle) estarán afectas a un IEM con tasa ajustable que va entre 5% y 14% según el margen operacional minero (MOM)²⁹ de la empresa (Tabla 4-3). Por su parte, bajo la misma ley se considera que las empresas que estaban sujetas a invariabilidad tributaria previo a 2010 (como SQM) pueden acogerse a un IEM entre 2018 y 2023 con tasa ajustable que va entre 4% y 9% según el margen operacional minero (MOM) de la empresa (Tabla 4-3). Por lo tanto, para efectos del modelo se considera que entre 2017 y 2022 rigen los IEM propios de cada compañía según los perfiles de producción declarados y que a contar de 2023 se aplicará el régimen de IEM original de la Ley 20.049 (dado que no existe certeza respecto a quien explotará la totalidad del Salar).

Tabla 4-3: Tasas efectivas IEM según Ley 20.049.

MOM	Sin invariabilidad tributaria	Con invariabilidad tributaria
0% -35%	5,00%	4,00%
35% -40%	5,31%	4,00%
40% -45%	5,78%	4,50%
45% -50%	6,40%	5,25%
50% -55%	7,09%	6,00%
55% -60%	7,83%	6,75%
60% -65%	8,69%	7,50%
65% -70%	9,71%	8,25%
70% -75%	10,93%	9,00%
75% -80%	12,34%	9,00%
80% -85%	13,97%	9,00%
85% -100%	14,00%	9,00%

²⁹ El MOM estima el porcentaje que representa la utilidad del giro del negocio sobre sus ingresos. Se calcula al dividir la Renta Imponible Minera sobre las Ventas Mineras, donde la Renta Imponible Minera corresponde a los ingresos menos los costos mineros.

El tercer impuesto aplicado a los productores del Salar consiste en un *royalty* por arrendamiento de pertenencias mineras. Originalmente este *royalty* de arrendamiento se aplicó en forma diferenciada entre las empresas productoras del Salar de Atacama mediante un *royalty ad valorem*³⁰ según producto comercializado, al cual se le pueden (en el caso de SQM) descontar costos y gastos deducibles (Tabla 4-4). Bajo esta modalidad operaron los primeros contratos celebrados entre CORFO y las empresas en operación. Sin embargo, las recientes perspectivas de precio llevaron a CORFO a establecer, en el nuevo contrato con Albermarle, tarifas de arrendamiento basadas en el precio observado del año comercial (Tabla 4-5). Luego, para la presente evaluación se consideraron las tarifas de arrendamiento aplicables según los contratos establecidos, para los niveles de producción de empresas esperados hasta 2022, y a contar de 2023 se consideró que las tarifas a aplicar serían equivalentes a las recientemente establecidas por el Estado. Sin embargo, dado que debe medirse el descuento de costos y gastos deducibles, se aplican realmente en la evaluación tasas efectivas de recaudación que espera recibir el Estado de Chile vía CORFO (CORFO, 2016).

Finalmente, otros pagos tomados en cuenta en la evaluación consideran el pago anual a comunidades de 3,5% de las ventas y al Instituto Solar Minero de 2 MUS\$2017, que fueron establecidos por Albermarle para la obtención de su nueva cuota. Estos pagos serán considerados en la evaluación para la producción de Albermarle hasta 2022 y se considera que son extensibles al Salar desde 2023.

Tabla 4-4: Primeras tasas de arrendamiento asignadas por CORFO

Empresa	Tasa Nominal Litio	Tasa Efectiva Litio	Tasa Nominal Potasio	Tasa efectiva Potasio
SQM	6,8%	5,8%	1,8%	1,53%
Albermarle	-		3%	3%

³⁰ *Royalty ad valorem* o basado en el valor o ingreso del mineral (Guzmán, 2017).

Tabla 4-5: Nuevas tasas de arrendamiento asignadas por CORFO

Carbonato de litio			Cloruro de potasio		
Precio (US\$2017/Ton)	Tasa Marginal	Tasa Efectiva	Precio (US\$2017/Ton)	Tasa Marginal	Tasa Efectiva
0-4.000	6,8%	6,8%	0-300	3,0%	3,0%
4.000-5.000	8,0%	7,0%	300-400	7,0%	4,0%
5.000-6.000	10,0%	7,5%	400-500	10,0%	5,2%
6.000-7.000	17,0%	8,9%	500-600	15,0%	6,8%
7.000-10.000	25,0%	13,7%	Sobre 600	20,0%	12,1%
Sobre 10.000	40,0%	19,8%			

4.1.5 Inversiones

Aumentar las capacidades extractivas y productivas en el Salar de Atacama requiere que se realicen inversiones a lo largo de la cadena productiva: pozos de extracción, pozas de evaporación y concentración, plantas e infraestructura.

Para cuantificar los requerimientos de inversión ante aumentos de capacidad productiva, se revisaron las inversiones declaradas entre 1984 y 2016 para 32 proyectos de desarrollo de nuevas minas o expansiones de capacidad de salares ubicados en Chile y Argentina. De los 32 proyectos considerados, se incluyen 18 proyectos de litio y 14 de potasio. Entre estos últimos, 9 consideran trabajos para el levantamiento de plantas de producción de cloruro de potasio húmedo y 5 para plantas de cloruro de potasio granulado (seco y compactado)³¹.

La base de datos que reúne los proyectos, productos a comercializar, inversiones, aumentos de capacidad productiva, y año de inicio de producción se muestra en el Anexo D. A objeto de comparar inversiones, todas las cantidades en dólares fueron deflactadas a 2017 usando como base comparativa el Índice de Precios del Consumidor (CPI, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos.

Como muestran la Figura-8, Figura-9 y Figura-10, las inversiones en capacidad de carbonato de litio y cloruro de potasio parecen adecuarse bastante bien a estimaciones de primer orden. Más aún, los resultados obtenidos evidencian el hecho de que las economías de escala en las

³¹ Aunque el cloruro de potasio puede comercializarse ya sea húmedo o granulado, se considera en el estudio que la comercialización se realiza como granulado. Debido a esto, y dado que la base de datos distingue entre las inversiones realizadas según producto comercial, el análisis se realiza agregando ambos tipos de inversión.

inversiones realizadas sobre estos derivados minerales no son efectivas, tal como lo han reportado también otros estudios sobre diferentes *commodities* (Auger y Guzmán, 2010; Riesgo *et al.*, 2017; Suárez *et al.*, 2015).

De esta manera, se considera que crecimientos en capacidad productiva determinan inversiones de crecimiento de capacidades planta de carbonato de litio y cloruro de potasio³² dadas respectivamente según las siguientes regresiones lineales:

$$CAPEX Li_2CO_3 (MUS\$) = 0,0169 \left(\frac{MUS\$}{Tpa Li_2CO_3} \right) * \Delta Capacidad (Tpa Li_2CO_3) - 112,22 (MUS\$) \quad (4.5)$$

$$CAPEX KCl (MUS\$) = 0,00044 \left(\frac{MUS\$}{Tpa KCl} \right) * \Delta Capacidad (Tpa KCl) + 39,746 (MUS\$) \quad (4.6)$$

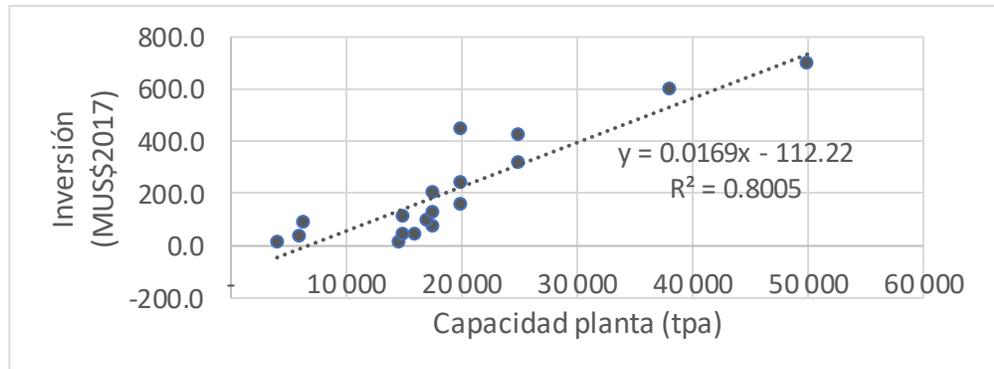


Figura 4-8: Inversión planta carbonato de litio en función de capacidad productiva

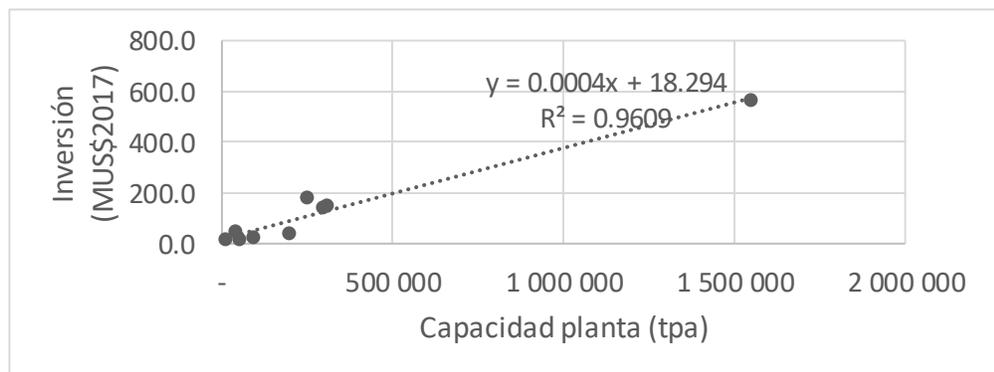


Figura 4-9: Inversión en planta cloruro de potasio húmedo en función de capacidad

³² Expresión considera capex agregado de construcción de plantas de cloruro de potasio húmedo y granulado

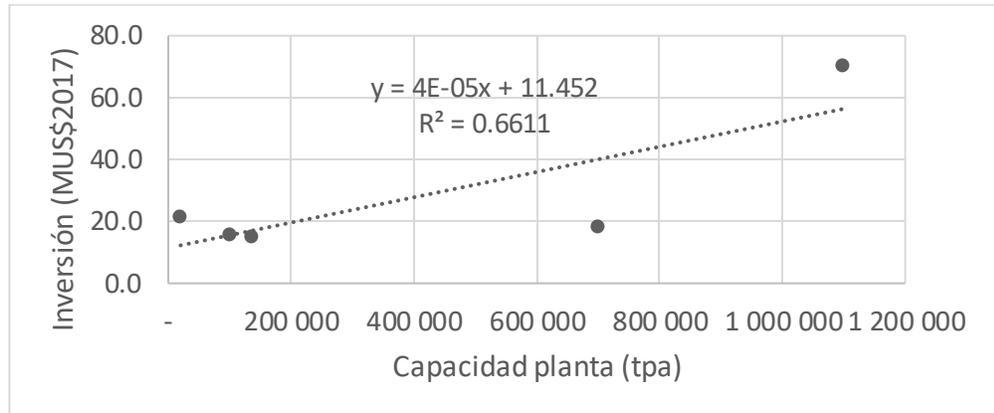


Figura 4-10: Inversión en planta cloruro de potasio granulado en función de capacidad

Tomando en cuenta este nivel de inversiones, se consideró que distribuían en el caso del carbonato de litio un 25% tres años antes del aumento productivos, un 55% dos años antes y un 20% en el año previo. Mientras, en el caso del cloruro de potasio se asumió que este era aplicado íntegramente en el año previo al aumento productivo. Lo anterior, en base como ha distribuido históricamente la inversión en el tiempo de estos compuestos según la data disponible.

Además, dado que en cada período deben considerarse inversiones de mantenimiento planta se asume un costo anual de 300 US\$2017/ton LCE.

4.1.6 Efecto multiplicador de la minería

La cuantificación de los efectos indirectos generados por la producción minera del Salar de Atacama fue determinada mediante multiplicadores de producto, a partir del uso de la MIP 2013 desarrollada por el Banco Central de Chile. Para efectos de la cuantificación, se consideró como sector representativo de la industria al sector denominado por el Banco Central como “Explotación de otras minas y servicios de apoyo minero” (el cual incluye a todas las minas del sector no metálico y a cualquier otra mina que no explote ni cobre, oro, plata o hierro).

Como se muestra y detalla en el Anexo E, la explotación minera realizada en el Salar de Atacama genera un efecto adicional indirecto de 0,53 y un efecto adicional indirecto e

inducido de 1,19. Es decir, por cada dólar generado se crean 0,53 dólares adicionales en el resto de los sectores de la economía y 1,19 dólares adicionales en el resto de la economía y en los salarios de los trabajadores.

Además, mediante el uso de estos multiplicadores se distingue bajo un modelo abierto de la economía que los sectores que más se expanden ante un incremento de la producción son los de actividades de ingeniería, transporte de carga por carretera, comercio mayorista y eléctrico. Similarmente, bajo un modelo de la economía cerrado se aprecia que, como es de esperar, los mismos sectores son los más beneficiados con un aumento de la actividad minera no metálica junto a las remuneraciones de los trabajadores (Tabla 4-6). Así, para la evaluación social se consideró el uso de multiplicadores cerrados. Con ello, el valor social queda determinado por las utilidades de la empresa, los efectos indirectos e inducidos, la recaudación fiscal y el costo social debido a emisiones atmosféricas.

Tabla 4-6: Multiplicadores de producto del sector de Explotación de otras minas y servicios de apoyo minero. Fuente: Elaboración propia en base a Banco Central de Chile, 2013.

Modelo económico abierto		Modelo económico cerrado	
Sector	Participación	Sector	Participación
Explotación de otras minas y servicios de apoyo minero	100.0%	Explotación de otras minas y servicios de apoyo minero	100.0%
Actividades de ingeniería	11.6%	Remuneraciones	24.9%
Transporte de carga	11.2%	Transporte de carga	12.1%
Comercio mayorista	3.3%	Actividades de ingeniería	12.0%
Generación de electricidad	2.8%	Comercio mayorista	5.2%
Intermediación financiera	2.1%	Comercio minorista	4.1%
Elaboración de combustibles	2.1%	Intermediación financiera	4.0%
Actividades administrativas	1.9%	Generación de electricidad	3.4%
Alquiler y arrendamiento	1.7%	Servicios de vivienda	3.3%
Actividades de apoyo transporte	1.3%	Actividades administrativas	3.1%
Otras actividades profesionales, científicas y técnicas	1.2%	Elaboración de combustibles	3.0%
Otros	13.4%	Otros	43.5%
Total	152.7%	Total	218.5%

4.1.7 Emisiones atmosféricas

La apertura, operación y cierre de una faena minera trae consigo un costo social o externalidad relacionada a la emisión de gases contaminantes por el movimiento de tierras, tránsito de maquinaria, transporte de recursos, operación de plantas y el manejo de material, insumos y residuos. En consecuencia, a mayor nivel productivo se espera que exista un mayor nivel de emisiones.

Como una forma de modelar esta relación, se propuso relacionar los niveles de emisiones que se han proyectado históricamente ante aumentos de capacidad productiva, usando para ello regresiones lineales. Con tal objetivo, se estimaron curvas de ajuste de emisiones para apertura y operación³³ ante aumentos de capacidad productiva de plantas de carbonato de litio y cloruro de potasio (húmedo y granulado). Para ello, los datos de emisiones necesarios para la modelación se obtuvieron de los Estudios o Declaraciones de Impacto Ambiental (EIA o DIA) que históricamente han sido reportados en el Salar de Atacama³⁴.

Los principales resultados obtenidos bajo esta formulación para el caso de estudio se muestran en el Anexo F. Mediante la misma, se indican estimaciones de emisión de CO₂ equivalente en el tiempo ϵ_{it} (i =carbonato de litio y cloruro de potasio) en función de la capacidad instalada de LCE y cloruro de potasio (húmedo y granulado). Así, con estos resultados y el precio social dado para el CO₂ (P_{CO_2}) se cuantifica la externalidad debida a emisiones de gases E_{it} como:

$$E_{it} = P_{CO_2} * \epsilon_{it} \quad (4.7)$$

³³ Se considera que las emisiones en la fase de construcción son prácticamente equivalentes a las de cierre (SGA, 2016).

³⁴ Desde 1997 a 2017 se han presentado en el Salar de Atacama un total de 17 EIA o DIA por aumentos de capacidad productiva. Sin embargo, por el progresivo aumento de la exigencia medioambiental, existen diferencias metodológicas relevantes que hacen que de los 17 estudios solo sean considerados 11 en el análisis.

4.1.8 Otros parámetros relevantes en el análisis

Para el desarrollo de este estudio se consideró una tasa de descuento r de 8% para la evaluación privada y ρ de 6% para la evaluación social (Ministerio de Desarrollo Social, 2017).

Además, de los precios sociales disponibles solo se incluyó el uso del precio social de las emisiones, dado que la consideración de un costo de operación fijo en el tiempo (debido a que no existen datos públicos que permitan parametrizar el costo de operación) impide usar bajo este modelo otros precios sociales.

Además, se consideró en la evaluación un tiempo de depreciación de los activos de 10 años el cual es aplicado linealmente a lo largo de la vida de los activos.

4.2 Definición de modelos de evaluación

Una vez caracterizados cada uno de los ítems a ser incluidos en los modelos de evaluación privada y social, a continuación se detalla la interacción de estos elementos en los modelos de evaluación.

Para el uso de estos modelos de evaluación se considera que la variable de control consiste en el nivel de salmuera F_t bombeada en el año t que, como ya se planteó en las ecuaciones 4.1 y 4.2, determina el nivel de producción mineral de carbonato de litio y cloruro de potasio a generar en dicho año en el Salar. Para el caso específico de análisis se considera además que una sola variación en el tiempo de los niveles de salmuera bombeada es posible de efectuar en el Salar de Atacama, y que esta se realiza específicamente en el año 2023 debido a que en dicho año debiese empezar a regir una nueva cuota de extracción de litio.

Dicho esto, bajo la metodología de flujo de cajas descontados, los modelos de evaluación consideran que a partir de un cambio único del perfil de bombeo del Salar de Atacama en el período 2023-2043 se determinan perfiles de producción y el Valor Actualizado Neto (VAN) tanto para el privado que lleva a cabo la explotación (VAN privado) como para la sociedad que percibe los réditos de la explotación (VAN social).

No obstante, debido a que en el período 2023-2043 no solo la nueva cuota de extracción de litio (generada por el cambio en el perfil de bombeo de salmuera) rige, sino que también las anteriores cuotas que fueron establecidas por CORFO en el Salar de Atacama; para aislar el efecto en el VAN privado y social de la nueva cuota deben distinguirse los siguientes Escenarios de Evaluación:

- Escenario de Evaluación de Cuota Base: El cual evalúa el VAN privado y social generado entre 2017 y 2043 por los niveles de bombeo, producción y cuotas que hasta diciembre de 2017 han sido autorizados para ser extraídos. Particularmente, en base a las cuotas de extracción de litio que CORFO asignó a SQM en 1997 (que se agotarían en 2022) y a Albermarle en 1984 y 2016 (que se agotarían en 2043).
- Escenario de Evaluación de Cuota Base y Cuota Nueva: El cual evalúa el VAN privado y social generado entre 2017 y 2043 por los niveles de bombeo, producción y cuotas que han sido asignadas hasta diciembre de 2017 y los niveles de bombeo, producción y cuota que serían agregados por una nueva cuota de extracción de litio. Es decir, considera un Escenario de Evaluación que le adiciona a la cuota base asignada una nueva cuota que se extraería entre 2023 y 2043.
- Escenario de Evaluación Diferencial de Cuota Nueva: Evalúa el impacto exclusivo generado por los nuevos niveles de bombeo, producción y cuota agregados por la nueva cuota de extracción de litio. Corresponde a la Evaluación Diferencial entre el Escenario de Evaluación de Cuota Base y Cuota Nueva y el Escenario de Evaluación de Cuota Base.

Luego, a efecto de medir exclusivamente el efecto generado por la nueva cuota de extracción de litio en el VAN privado y VAN social, se considerará en los modelos de evaluación su aplicación sobre el Escenario de Evaluación Diferencial de Cuota Nueva.

Ahora bien, a pesar de que la evaluación de las capacidades productivas y cuotas a asignar se realiza desde un tiempo $T_1 = 2023$ a un tiempo $T_2 = 2043$, cabe señalar que la evaluación económica se realiza a partir de la fecha de evaluación del estudio $T_0 = 2017$.

Lo anterior debido a que, aunque la evaluación de cuota y la variación de los niveles de producción se realice entre 2023 y 2043, algunas estimaciones de variables de estado como el precio del carbonato de litio consideran cambios anteriores a 2023 que se espera afecten las tendencias de mercado actuales. Asimismo, a efecto de considerar en los años precedentes a 2023 las inversiones que deban realizarse para aumentar la capacidad productiva de carbonato de litio y cloruro de potasio.

Dicho esto, bajo el método de flujos de caja descontados la función objetivo a maximizar para la evaluación privada y social corresponderá respectivamente a la maximización del VAN privado y VAN social. Esto es:

$$VAN_{privado} = \sum_{t=T_0}^{t=T_2} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{(1+r)^{t-T_0}} (Q_{it}P_{it} - C_{it} - \sum_{j=1}^{j=J} \tau_{ijt} - I_{it}) \quad (4.8)$$

$$VAN_{social} = \sum_{t=T_0}^{t=T_2} \sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{(1+\varphi)}{(1+\rho)^{t-T_0}} (Q_{it}P_{it} - C_{it} - \sum_{j=1}^{j=J} \tau_{ijt} - I_{it}) - E_{it} \right] \quad (4.9)$$

En donde, para cada i -ésimo producto mineral (carbonato de litio y cloruro de potasio), $Q_{it}P_{it}$ representa los ingresos obtenidos en un año t debido a la nueva cuota asignada; C_{it} los gastos anuales de producción en dicho año; τ_{ijt} los egresos asociados a cada uno de los $j = \{1, \dots, J\}$ impuestos establecidos; I_{it} las inversiones requeridas para el aumento de capacidad de cada derivado mineral; E_{it} los costos sociales (externalidades) debidos a emisiones de gases contaminantes; φ al efecto multiplicador de la explotación del Salar de Atacama; r la tasa de descuento privada y ρ a la tasa de descuento para la evaluación social. Los anteriores, según como fueron definidos en la sección 4.1.

Cabe señalar que, debido a su formulación, además de la producción Q_{it} de derivados minerales se tendrá que tanto el precio del carbonato de litio, como los egresos por producción, impuestos, inversiones y costos sociales por emisiones de gases contaminantes

dependerán también de la variable de control que es el bombeo de nivel de salmuera³⁵ (debido a que dependen del nivel productivo Q_{it}). Por consiguiente, se tendrá que los modelos de evaluación generados serán fundamentalmente no lineales y que, como es de esperar, la obtención de una solución óptima será no trivial.

No obstante esto último, debe notarse que por medio de esta formulación es posible obtener los principales resultados requeridos en el análisis. Esto es, la cuota de extracción de litio a asignar y las capacidades productivas de derivados de litio y potasio. Lo anterior, debido a que estos quedan determinados a partir de los niveles productivos Q_{it} que se esperan extraer en el período de estudio.

De esta manera, para cada uno de los análisis realizados se considera que la nueva cuota de extracción de litio metálico a asignar queda definida a partir del nivel de productivo de LCE $Q_{LCE,t}$ y el factor de conversión que lleva de carbonato de litio a litio metálico:

$$Cuota\ Litio\ Metálico_{2023-2043} = \sum_{t=2023}^{t=2043} \frac{Q_{LCE,t}}{FC_{LCE \rightarrow Li}} = \sum_{t=2023}^{t=2043} \frac{Q_{LCE,t}}{5,323} \quad (4.10)$$

Mientras, para la capacidad de producción de LCE (debida al aumento de los niveles de bombeo de salmuera y consecuente aumento productivo), se considera que existe un único aumento de capacidad productiva para todo el horizonte de evaluación. Para esto se considera que:

$$Capacidad\ Producción\ LCE_{2023-2043} = \max\{Q_{LCE,t}\}, \quad \forall t \in (2023,2043) \quad (4.11)$$

Debido a que el modelo considera un único aumento en el bombeo del nivel de salmuera en 2023 y a que la extracción se realice desde mayores a menores leyes, se espera que el perfil productivo sea decreciente en el tiempo y que, en consecuencia, la capacidad productiva seleccionada sea equivalente a la producción estimada para 2023.

³⁵ Para el período de análisis que no considera variable a los niveles de bombeo, debido a que no se analiza en dicho período la cuota ($T_0 = 2017$ y $T_1 - 1 = 2022$), se consideró para el análisis los niveles de producción que se esperan para el Salar de Atacama según lo reportado por SQM y Albermarle (SQM, 2017a).

En cuanto a la capacidad de producción de KCl, debido a que la producción de KCl considera aumentos de producción por bombeo de salmuera limitados por la participación de mercado de la oferta del Salar de Atacama respecto a la oferta mundial, se considera que existe más de un aumento de capacidad productiva posible en el horizonte de evaluación. Para el caso de estudio, se considera específicamente que dos aumentos de capacidad de producción de KCl son realizados en 2023 y 2033, de modo tal que:

$$\textit{Capacidad Producción KCl}_{2023-2032} = \max \{Q_{KCl,t}\}, \quad \forall t \in (2023,2032) \quad (4.12)$$

$$\textit{Capacidad Producción KCl}_{2033-2042} = \max \{Q_{KCl,t}\}, \quad \forall t \in (2033,2043) \quad (4.13)$$

Lo anterior, a fin de evitar aumentos de capacidad productiva de cloruro de potasio innecesarios desde el punto de vista de su utilización en el mediano plazo.

De esta manera, en base a lo señalado se muestra cómo es que a partir de una metodología como la presentada se puede determinar, desde un aumento del nivel de salmuera bombeado y consecuente aumento de producción de LCE y KCl (ecuaciones 4.1 y 4.3), los respectivos aumentos de capacidad productiva (ecuaciones 4.12, 4.13 y 4.14), cuotas de extracción de litio metálico (ecuación 4.10) y resultados económicos (ecuaciones 4.8 y 4.9) que estratégicamente se generan a contar de este aumento productivo. Dicho de otro modo, se desprende como es que a partir de la presente metodología pueden evaluarse los resultados económicos subyacentes al establecimiento de nuevas capacidades de producción y/o cuotas de extracción.

Para ello destaca el hecho de que, a partir de la metodología presentada, pueden evidenciarse las diferencias que resultan de determinar las cuotas de extracción y/o capacidades de producción según si se evalúa el VAN privado y/o social³⁶ generado.

³⁶ En caso de requerir una revisión más detallada de la metodología de construcción del VAN privado y social presentado en esta sección, en el Anexo G puede revisarse la interacción secuencial de cada uno de los elementos que conforman el VAN privado y social.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos con la evaluación realizada, se discuten sus resultados y las implicancias prácticas de estos. Con estos resultados, se termina por avalar el modelo propuesto y demostrar algunos alcances del mismo.

5.1 Resultados de Evaluación de Escenarios Base

En el contexto de que la cuota entregada a SQM dejaría de consumirse en 2022, se analizaron los resultados productivos y económicos generados por el modelo de evaluación de nuevas capacidades productivas y de asignación de cuotas del Salar de Atacama en el período 2023-2043.

Debido a que en el período 2023-2043 regirían no solo las nuevas cuotas de extracción de litio en evaluación, sino que también las cuotas establecidas por CORFO para el Salar de Atacama antes de diciembre de 2017; se estimaron en primer lugar los perfiles productivos asociados a la explotación de derivados de litio para las cuotas ya establecidas.

Para este fin, se consideró que entre 2017 y 2022 la producción de LCE proveniente del Salar de Atacama correspondería a la proyección productiva declarada en diciembre de 2017 por las empresas productoras del Salar de Atacama (Figura 5-1).

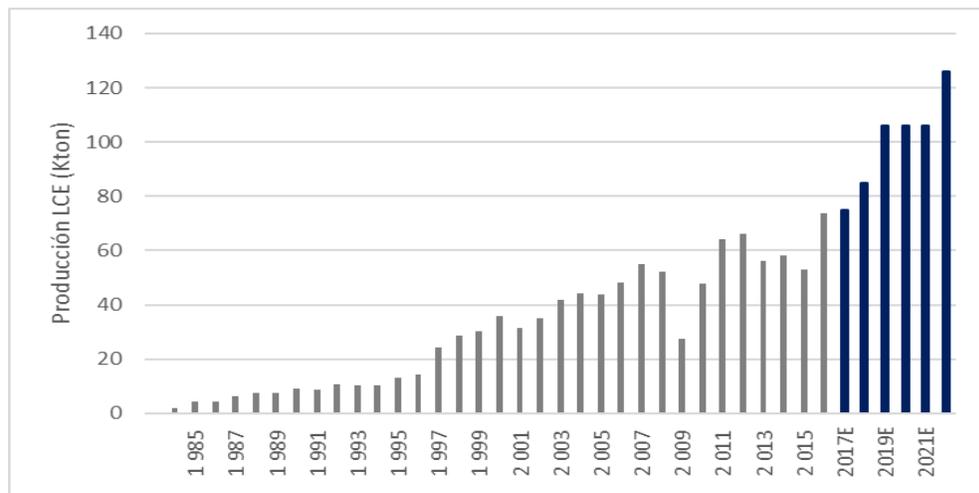


Figura 5-1: Producción histórica y proyectada de LCE en el Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin, 2016 y SQM, 2017^a.

Por otro lado, a contar de 2022, se consideró un perfil de producción decreciente de LCE para las cuotas ya asignadas (a Albermarle), según el modelo presentado a partir de los niveles de bombeo y producción que han sido autorizados por CORFO (CORFO, 2016; SGA, 2014).

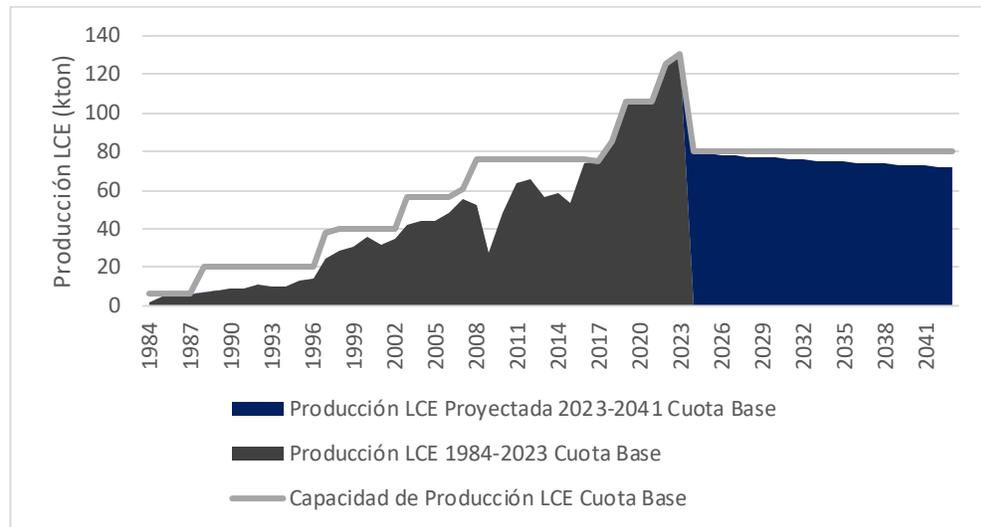


Figura 5-2: Producción histórica y proyectada de LCE en el Salar de Atacama para cuota de litio asignada por CORFO (Cuota Base). Fuente: Elaboración propia.

De este modo, considerando los niveles productivos proyectados para Albermarle se estimó que aproximadamente 1.587 kton de LCE, equivalentes a una cuota de aproximadamente 298.000 ton de litio serían consumidas entre 2023 y 2043.

Luego, tomando como base entre 2023-2043 el escenario productivo de LCE descrito y un escenario de producción base de KCl de 136.000 ton³⁷, se evaluaron económicamente diferentes escenarios de aumento productivo (en base a un aumento del nivel de salmuera bombeada), a partir del otorgamiento de una nueva cuota de extracción.

Como se muestra en la Figura 5-3, los resultados económicos de esta evaluación muestran que, considerando que toda la cuota es consumida en el período de estudio, entre la cuota otorgada y el valor económico de VAN privado y social obtenido de su extracción existe una

³⁷ Correspondientes a la capacidad productiva de KCl de Albermarle. Esto debido a que aun cuando SQM tuviese capacidad productiva, en la práctica el hecho de que no se le asignase una nueva cuota de extracción de litio en 2023 impediría la extracción y producción de cloruro de potasio.

relación no lineal cóncava. En ésta, mayores niveles de cuota se ven traducidos en mayores beneficios económicos hasta el punto en el que mayores niveles de cuota significan niveles de inversión por sobre el beneficio marginal obtenido.

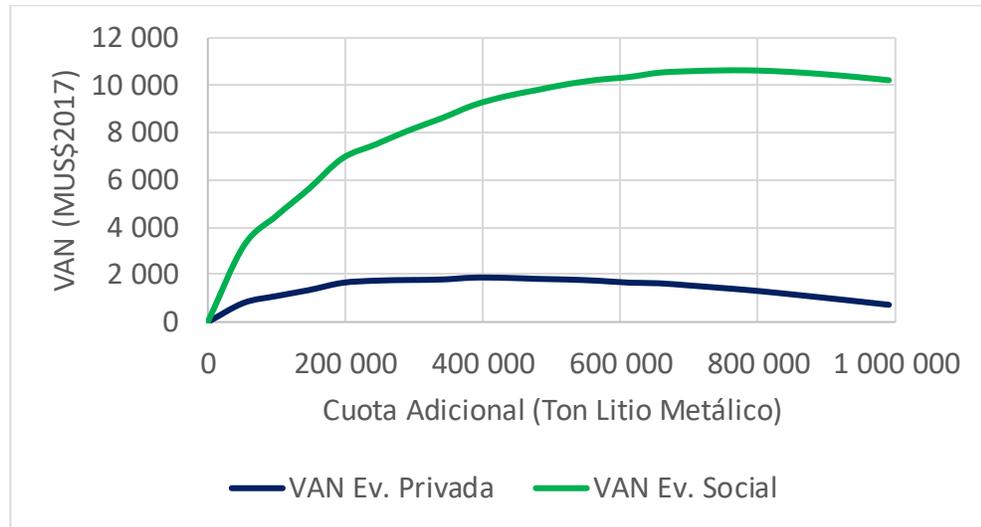


Figura 5-3: VAN privado y social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico otorgada en el Salar de Atacama entre 2023-2043. Fuente: Elaboración propia.

Además, los resultados económicos demuestran que existe una condición de optimalidad asociada al establecimiento de cuotas de extracción de litio, tanto desde la perspectiva del planificador privado como del planificador social. De hecho, la comercialización de compuestos de litio y potasio determinan, en el caso de estudio, que bajo una evaluación privada exista una cuota óptima de litio a extraer entre 2023 y 2043 de 422.497 ton de litio y de 784.667 ton de litio bajo una evaluación social. Estos resultados obtenidos señalan, en primera instancia, que desde el punto de vista privado y social existen diferencias importantes en el momento de establecer cuotas óptimas de extracción.

De hecho, un análisis más profundo del valor agregado generado por estas cuotas óptima revela que, debido a las diferencias de niveles de cuota, la ganancia en valor agregado pudiese ser importante. En efecto, si se consideran niveles de cuota de litio de 422.297 ton y 784.667 ton, entonces el valor social generado es de aproximadamente 9.500 MUS\$2017 y 10.600 MUS\$2017 respectivamente, lo cual significa una diferencia en torno al 11,6%.

Las razones detrás de estas diferencias se deben a que ante aumentos de cuota existe una mayor recaudación social por concepto de *royalties*, pagos sociales, e impuesto de primera categoría por la mayor producción realizada, aun cuando la recaudación privada sea menor debido a las mayores inversiones que son requeridas para alcanzar dichos niveles productivos. En efecto, como muestra la Figura 5-4, la recaudación fiscal (correspondiente a la recaudación vía *royalties* e impuestos) muestra un comportamiento asintótico ante mayores niveles de cuota.

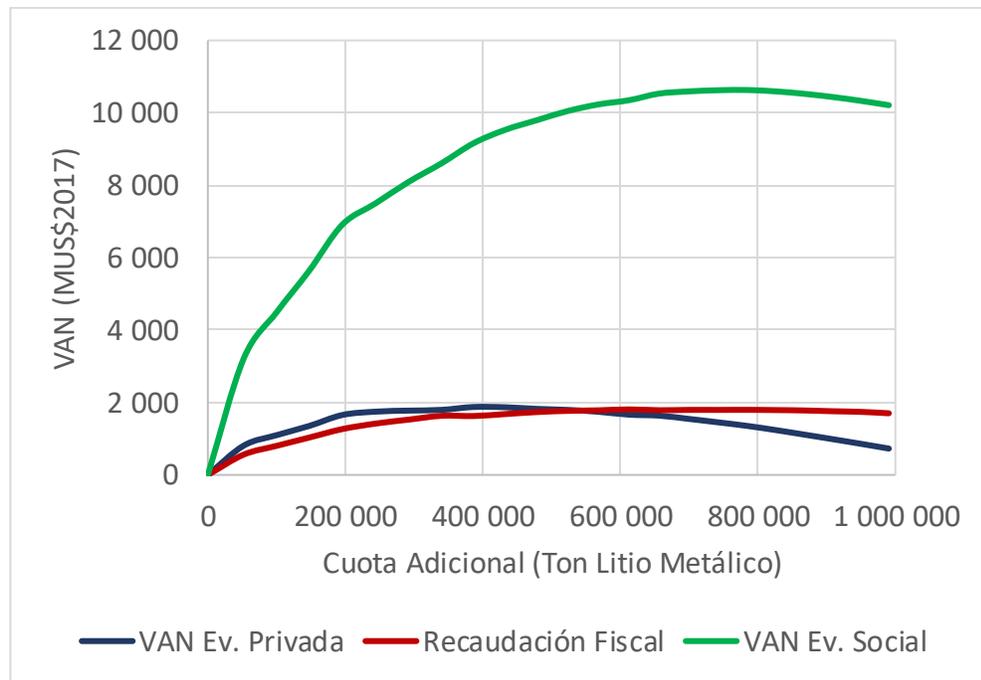


Figura 5-4: Recaudación fiscal, VAN privado y social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico otorgada en el Salar de Atacama entre 2023-2043. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, como muestran las Figuras 5-5 y 5-6, bajo los escenarios de cuota óptimos señalados, el impuesto de primera categoría aumenta en un 4% y el *royalty* de litio, potasio y los pagos sociales aumentan un 26%, 2% y 29% respectivamente, mientras que las utilidades de privados disminuyen un 16%.

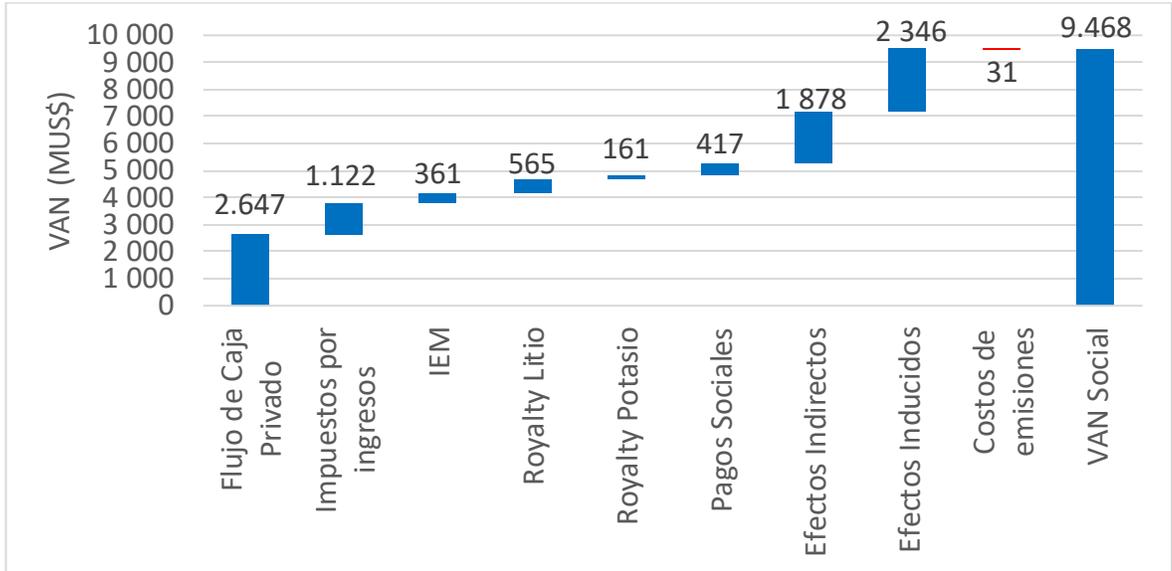


Figura 5-5: Valor agregado de evaluación privada óptima (cuota de 422.297 ton de litio a ser consumida entre 2023-2043 en el Salar de Atacama). Fuente: Elaboración propia.

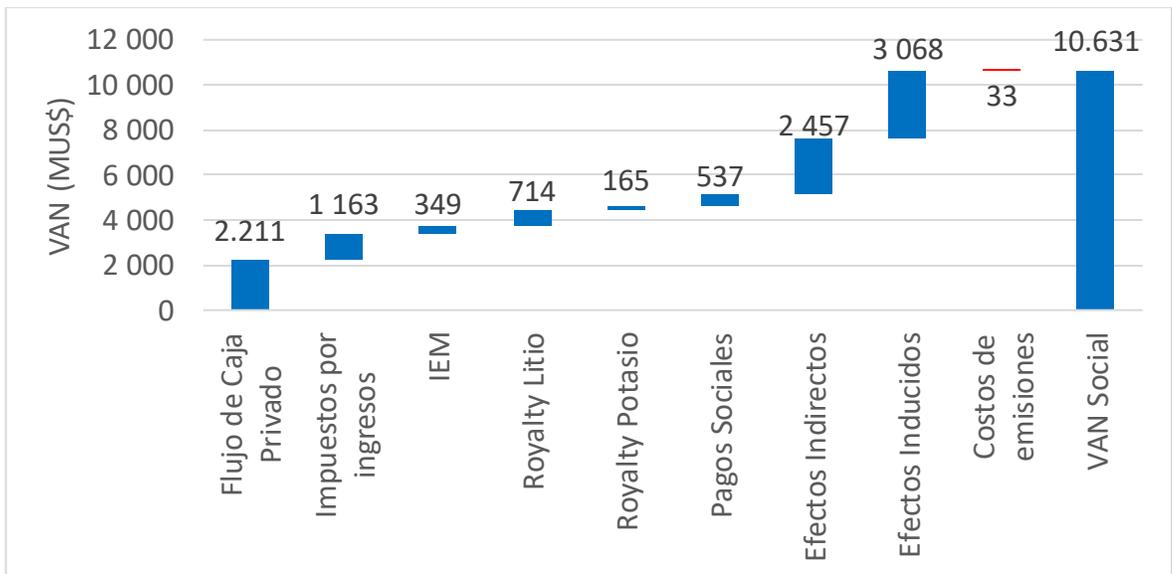


Figura 5-6: Valor agregado de evaluación social óptima (cuota de 784.667 ton de litio – metálico a ser consumida entre 2023-2043 en el Salar de Atacama). Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, dado que desde el punto de vista de la evaluación social las diferencias en valor agregado entre el óptimo privado y social son importantes, una métrica interesante para analizar consiste en la diferencia de valor respecto al óptimo para diferentes asignaciones de

cuota. Tomando como referencia la cuota de LCE que se estima va a consumir Albermarle entre 2023 y 2043, se observa que si se aumenta en un 200% la cuota de extracción de litio de este período entonces el valor percibido por los privados y la sociedad se diferenciaría respecto al óptimo en un 10% y un 3% (Tabla 5-1). De esta manera, se observa que si se establece una cuota en torno a las 420.000-600.000 toneladas de litio, entonces podrían alinearse de mejor manera tanto los objetivos del planificador social como el privado. Fundamentalmente dado que aun cuando el planificador social intentase aumentar la cuota a niveles cercanos al óptimo, en la práctica el planificador encontraría una resistencia privada a la inversión de mayores niveles productivos, pues desde el punto de vista privado la rentabilidad se ve reducida.

Tabla 5-1: Valor marginal agregado ante aumentos de cuota entre 2023-2043. Fuente: Elaboración propia.

Mult. Cuota asignada 2023-2043	Cuota Salar Atacama (Ton Li)	Cuota adicional (Ton Li)	VAN Ev. Privada		VAN Ev. Social	
			VAN Marginal (MUS\$)	Diferencia Óptimo (%)	VAN Marginal (MUS\$)	Diferencia Óptimo (%)
1	298.062	-	-	-	-	-
1,5	447.094	149.031	1.358	-28%	5.675	-47%
2	596.125	298.062	1.785	-5%	8.166	-23%
2,5	745.156	447.094	1.861	-1%	9.626	-9%
3	894.187	596.125	1.697	-10%	10.311	-3%
3,5	1.043.218	745.156	1.444	-23%	10.625	0%
4	1.192.249	894.187	1.041	-45%	10.483	-1%

De hecho, para alcanzar las capacidades de producción óptimas desde el punto de vista privado y social (Figuras 5-7, 5-8, 5-9 y 5-10) se estima que es necesario realizar inversiones en torno a 1.130 MUS\$₂₀₁₇ y 2.810 MUS\$₂₀₁₇, respectivamente. Dadas estas diferencias, aun cuando parece deseable alcanzar desde el punto de vista social mayores niveles productivos, en la práctica debe tomarse en cuenta que existen limitaciones financieras y de rentabilidad sobre la inversión privada que reducen las posibilidades reales de aumento de capacidad.

Por tanto, al momento de establecer y negociar la asignación de cuotas productivas los tomadores de decisión deberán tomar en cuenta no solo el valor social adicional generado, sino que las restricciones de inversión existentes para alcanzar este valor. Tomando como ejemplo el caso de estudio y los niveles de inversión señalados en la Tabla 5-2, parecería razonable asignar una nueva cuota de extracción entre las 420.000 ton de litio y 600.000 toneladas de litio, considerando que respecto al valor social marginal óptimo hay una diferencia porcentual de solo un 3%-9%.

Tabla 5-2: Capacidad e inversión agregada ante aumentos de cuota entre 2023-2043.

Fuente: Elaboración propia.

Mult. Cuota asignada 2023-2043	Cuota Salar Atacama (Ton Li)	Cuota adicional (Ton Li)	Capacidad de producción LCE (kton/año)		Capacidad de producción KCl (kton/año)		Inversión (MUS\$ 2017)
			Total Salar de Atacama	Nueva capacidad	Total Salar de Atacama	Nueva capacidad	
1	298.062	-	-	-	-	-	-
1,5	447.094	149.031	147	67	2.388	2.252	89
2	596.125	298.062	171	91	2.823	2.687	564
2,5	745.156	447.094	218	138	3.235	3.099	1.249
3	894.187	596.125	267	187	3.571	3.435	1.952
3,5	1.043.218	745.156	318	238	3.571	3.435	2.638
4	1.192.249	894.187	370	290	3.571	3.435	3.338

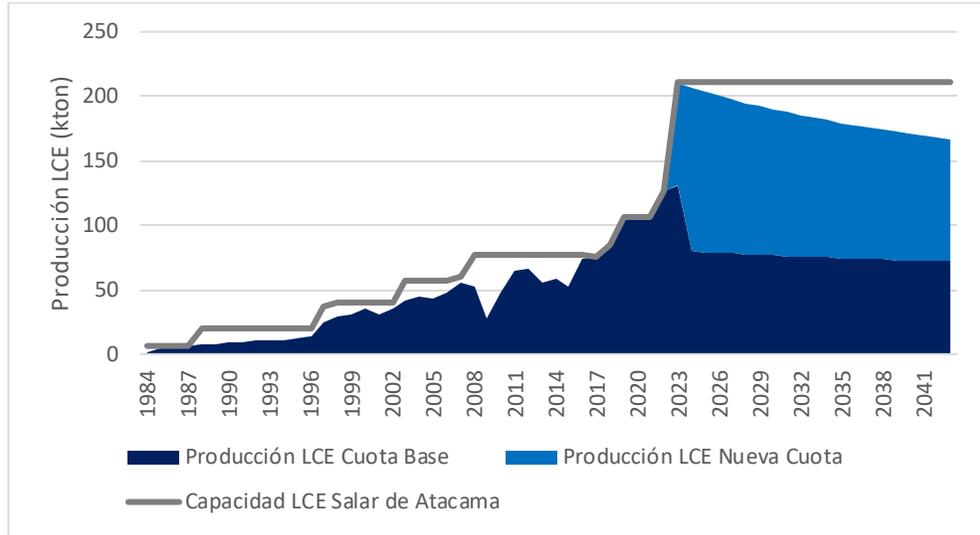


Figura 5-7: Capacidad óptima de producción de LCE y producción estimada de LCE bajo modelo de evaluación privada. Fuente: Elaboración propia.

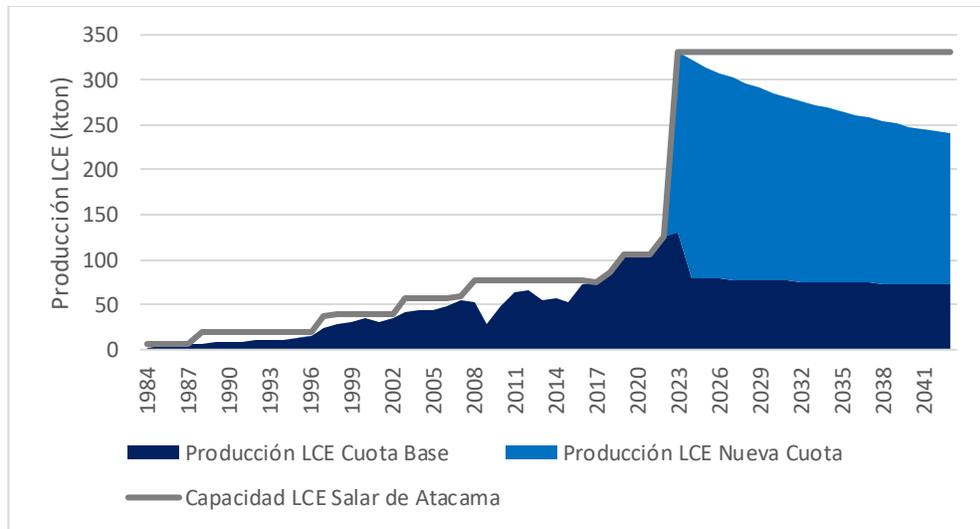


Figura 5-8: Capacidad óptima de producción de LCE y producción estimada de LCE bajo modelo de evaluación social. Fuente: Elaboración propia.

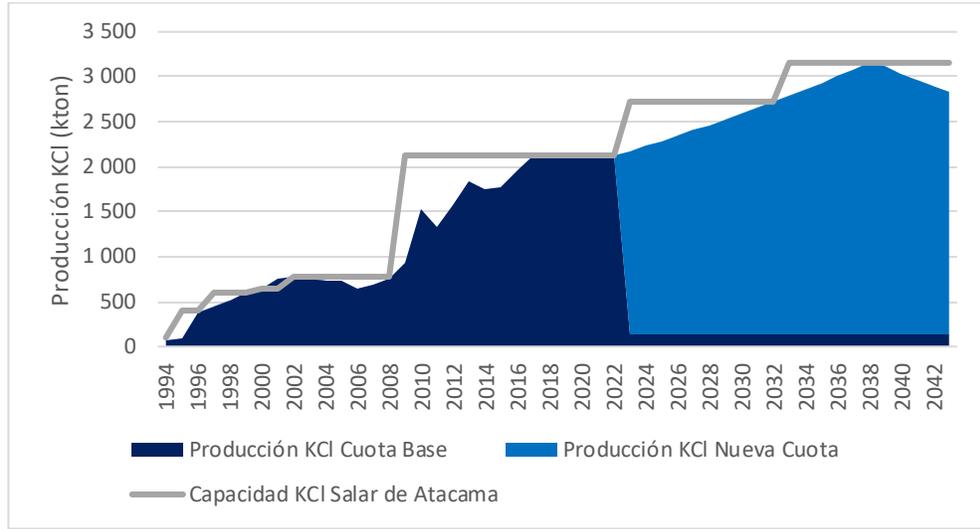


Figura 5-9: Capacidad óptima de producción de KCl y producción estimada de KCl bajo modelo de evaluación privada. Fuente: Elaboración propia.

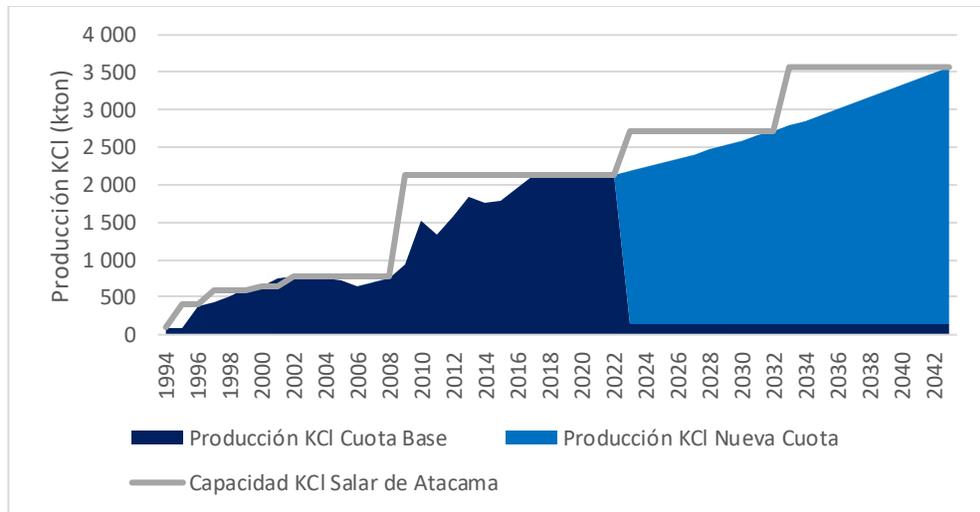


Figura 5-10: Capacidad óptima de producción de KCl y producción estimada de KCl bajo modelo de evaluación social. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las capacidades de producción obtenidas, cabe señalar que como bien fue señalado en la sección 4.2, al considerar dos aumentos de capacidad productiva de la planta de cloruro de potasio se alcanza una mayor utilización efectiva de la planta. En efecto como muestra la

Figura 5-11, en base a las producciones y capacidades de producción óptimas desde el punto de vista privado y social, la utilización estimada de capacidad supera el 80%.

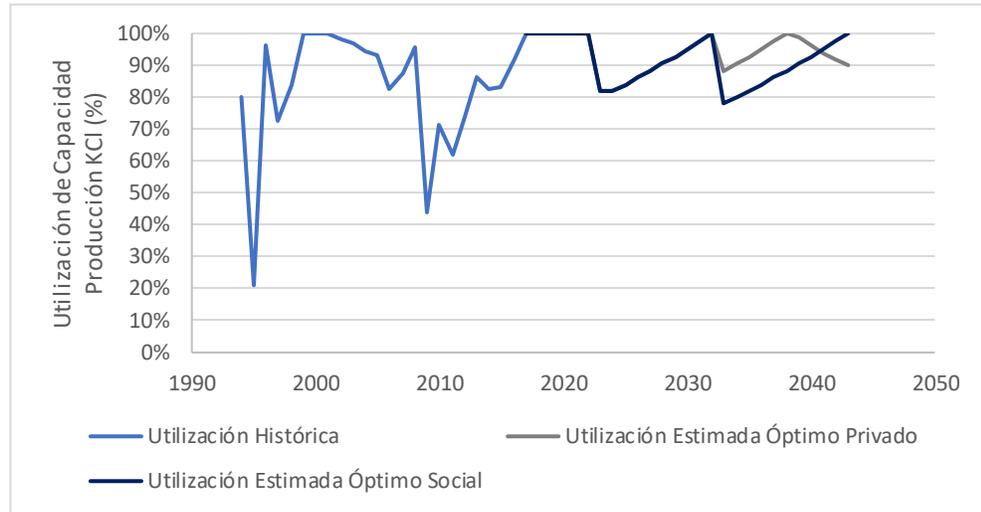


Figura 5-11: Utilización de capacidad de planta de KCl histórica y proyectada para evaluación óptima privada y social. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior, considerando el hecho de que a diferencia de la producción de LCE, la producción de KCl fue restringida por las posibilidades de venta de KCl (de 3% de participación de mercado). De hecho, como se muestra en las Figuras 5-9 y 5-10 se aprecia que a mayores niveles de bombeo predomina la limitante de mercado por sobre la limitante productiva, la cual sí determina en cambio el perfil de producción de LCE y su utilización de capacidad (Figura 5-12).

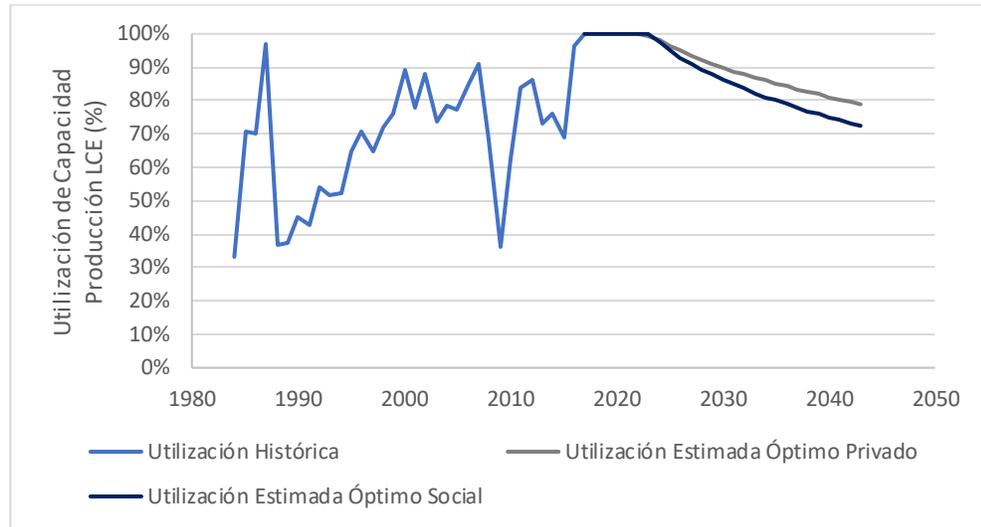


Figura 5-12: Utilización de capacidad de planta de LCE histórica y proyectada para evaluación óptima privada y social. Fuente: Elaboración propia.

Otros resultados obtenidos en los resultados de la evaluación óptima privada y social pueden observarse en el Anexo H.

5.2 Análisis de sensibilidad

La evaluación base desarrollada asume como determinísticos algunos parámetros sobre los cuales existe, en la práctica, un alto grado de incertidumbre. A objeto de evaluar el potencial impacto de estas incertidumbres, en las decisiones estratégicas que se derivan desde el modelo desarrollado, se sensibilizó:

- La expectativa de crecimiento de la demanda de LCE: Debido a la incertidumbre que existe en las expectativas de demanda de litio por efecto del *boom* de la electromovilidad, se sensibilizó la tasa de crecimiento esperado de la demanda para el LCE hasta 2027 entre un 12% y 16% de crecimiento compuesto anual³⁸.
- La oferta internacional de LCE: Debido al riesgo de materialización de la cartera de proyectos de LCE a nivel internacional, se evaluó el impacto de que un proyecto

³⁸ Recordando que la evaluación considera que hasta 2027 se tomaron en cuenta crecimientos esperados de la demanda del 14% compuesto anual y desde 2028 en adelante del 8% compuesto anual. Para mayor información, revisar Anexo C.

estándar de 25 kton/año de LCE no fuese concretado, o bien de que otro proyecto estándar de 25 kton/año de LCE fuese agregado a la cartera de proyectos. Es decir, se evaluó el impacto del aumento o disminución de la oferta internacional en 25 kton/año.³⁹

- El precio inicial de LCE considerado en el modelo para el año 2017: Debido a las significativas variaciones que ha evidenciado desde 2015 el precio del LCE para ciclos de un año (COCHILCO, 2017), se evaluó el impacto de considerar un precio del LCE para 2017 que sea 20% menor (10.980 US\$/Ton LCE) o 20% mayor (16.465 US\$/Ton LCE).
- El costo de producción de carbonato de litio en el Salar de Atacama: Debido a que para la evaluación se consideró un costo unitario de 1.956 US\$/Ton LCE (costo unitario promedio ponderado para la producción estimada de SQM y Albermarle en 2023), se evaluó el efecto de considerar en la evaluación un costo unitario de 1.700 US\$/Ton LCE (costo unitario representativo de la producción de SQM (GEM, 2017)) y un costo unitario de 2.200 US\$/Ton LCE (costo unitario representativo de la producción de Albermarle (GEM, 2017)).
- El *royalty* de arrendamiento por explotar mineral en el Salar de Atacama: A efecto de evaluar el impacto de un cambio de $\pm 10\%$ en las tasas de *royalty* de arrendamiento que CORFO cobra por la extracción de LCE y KCl.
- El nivel de reservas en el Salar: Debido a que las estimaciones de reservas existentes en el Salar de Atacama son consideradas como conservadoras, se consideró evaluar aumentos de reserva del 10% y 50%⁴⁰.
- La participación de mercado de las empresas que explotan recursos minerales en el Salar de Atacama en el mercado del cloruro de potasio: La participación de mercado del Salar de Atacama en el mercado del cloruro de potasio fue restringida al valor que

³⁹ Para mayor información sobre la oferta internacional de LCE considerada, revisar Anexo C.

⁴⁰ Las estimaciones de reservas existentes en el Salar de Atacama son consideradas como conservadoras. En efecto, dado que los métodos actuales de valorización de porosidad subestiman las porosidades reales (mientras valores bajos de porosidad son medidos con gran precisión, valores altos son difíciles de medir), se estima que los errores en la evaluación media de la porosidad van entre un 10% a 50% (SQM, 2017b).

históricamente ha presentado, de 3% en promedio. Debido a esto, se evaluó el cambio que manifestarían los resultados al considerar una participación de mercado de 2,4% y 3,5%, las cuales han sido históricamente las participaciones mínimas y máximas que ha alcanzado el Salar de Atacama en el mercado del cloruro de potasio⁴¹.

- El número de aumentos de capacidad productiva de cloruro de potasio en el horizonte de evaluación: A efecto de demostrar el cambio en la utilización de la capacidad planta de cloruro de potasio y demás resultados económicos-productivos, se evaluó el uso de un solo aumento de capacidad productiva en 2023 y el uso de tres aumentos de capacidad en 2023, 2030 y 2037.
- La tasa social de descuento: A objeto de evaluar el potencial impacto de este parámetro, se evaluó considerar una tasa social de descuento de 5% y 7%, en vez del 6% considerado en el modelo base de evaluación.

Tomando como caso base la evaluación desarrollada, los resultados de la evaluación económica bajo una perspectiva de evaluación privada y social se presentan en el Anexo I.

A partir de estos resultados, se destaca fundamentalmente que:

- Como es de esperar, al asumir que toda la cuota es consumida, se observa una relación cóncava de la misma forma entre cuota y beneficio económico por los mayores niveles de inversión requeridos para consumir una mayor cuota.
- Ante cambios en la demanda esperada de LCE, oferta internacional de LCE, precio 2017 de LCE y costo de operación, se observan cambios significativos en el valor económico percibido tanto para el privado como para la sociedad. Lo anterior debido a que, para los mismos niveles de producción e inversión, se percibe un cambio en el margen operacional. Esto, ya sea por el efecto generado en el precio de evaluación del LCE (ante cambios en la demanda esperada de LCE, oferta internacional de LCE y precio de LCE) o bien por el costo de operación.

⁴¹ Calculado en base a la producción reportada para SQM y Albermarle de cloruro de potasio (Sernageomin,2016) y producción mundial de cloruro de potasio (PotashCorp, 2017) entre 2009 y 2016.

- Debido a que el *royalty* por arrendamiento que CORFO le cobra a las empresas que explotan recursos en el Salar de Atacama se basa en una escala de tasas de cobro dependiente del nivel de precios de LCE y KCl, una modificación que se realice sobre estas tasas de un 10% tiene un escaso impacto en el valor económico percibido y la cuota de extracción de litio a asignar.
- Asimismo, se aprecia que aunque existan mayores reservas de litio y potasio para ser extraídas, éstas no impactan significativamente en el valor económico capturado y la cuota de extracción de litio a establecer. Los fundamentos de estos resultados radican en el hecho de que, aunque exista una mayor disponibilidad de recurso a extraer de mayores concentraciones (según el modelo de distribución lognormal considerado para las reservas), la inversión asociada a un aumento de capacidad productiva y la consecuente disminución de precio siguen siendo más significativos al momento de establecer capacidades productivas y cuotas de extracción.
- En cuanto a los parámetros relacionados a la producción de KCl, se aprecia también un efecto acotado desde un punto de vista económico, en comparación a las demás incertidumbres señaladas. Lo anterior, debido al hecho de que mayores capacidades productivas de KCl requieren significativos desembolsos económicos en inversión.
- Además, variaciones en torno a la tasa social de descuento considerada, significan un cambio en el valor económico social percibido en torno a los 1.500 MUS\$2017 y 2.000 MUS\$2017. No obstante, como se verá más adelante, esta variación significa impactos acotados en la cuota de extracción de litio a asignar, en comparación a las demás incertidumbres que se han listado.

De este modo se aprecia que, al reevaluar por ejemplo los óptimos económicos (Figura 5-13 y Figura 5-14), el mayor impacto económico se da ante cambios en la demanda de LCE. En efecto, bajo este cambio el VAN privado óptimo podría llegar a ser de 1.500 MUS\$2017 o 2.350 MUS\$2017, mientras que el VAN social óptimo podría llegar a ser de 7.400 MUS\$2017 o 15.160 MUS\$2017. Asimismo, se aprecia que al considerar el impacto económico de posibles cambios en la oferta internacional de LCE y el precio del LCE de 2017, el VAN

privado óptimo podría llegar a ser de 1.670 MUS\$2017 o 2.1100 MUS\$2017, y el VAN social óptimo 9.000 MUS\$2017 o 12.650 MUS\$2017.

Por otro lado, al reevaluar la cuota adicional a otorgar desde una perspectiva de evaluación óptima (Figura 5-15 y Figura 5-16), se aprecia también que las incertidumbres más relevantes son aquellas que están asociadas al establecimiento del precio del LCE. En particular, se aprecia que si se considera el efecto de la demanda de LCE, la cuota óptima a asignar desde la perspectiva del planificador privado sería de 250.000 toneladas de litio o 500.000 toneladas de litio, mientras que desde la perspectiva del planificador social esta podría llegar a ser de 670.00 toneladas de litio o de 990.000 toneladas de litio. Sin embargo, sin considerar esta incertidumbre, la cuota óptima a asignar desde la perspectiva del planificador privado sería de 340.000 toneladas de litio o 550.000 toneladas de litio, mientras que desde la perspectiva del planificador social esta podría llegar a ser de 650.00 toneladas de litio o de 890.000 toneladas de litio.

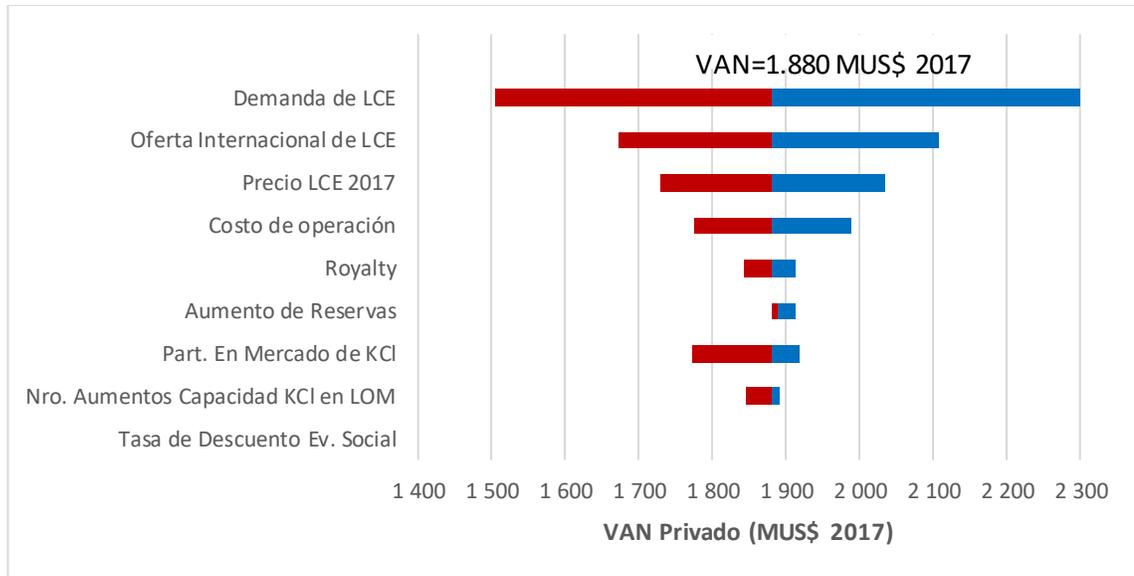


Figura 5-13: Análisis de sensibilidad de VAN privado. Fuente: Elaboración propia.

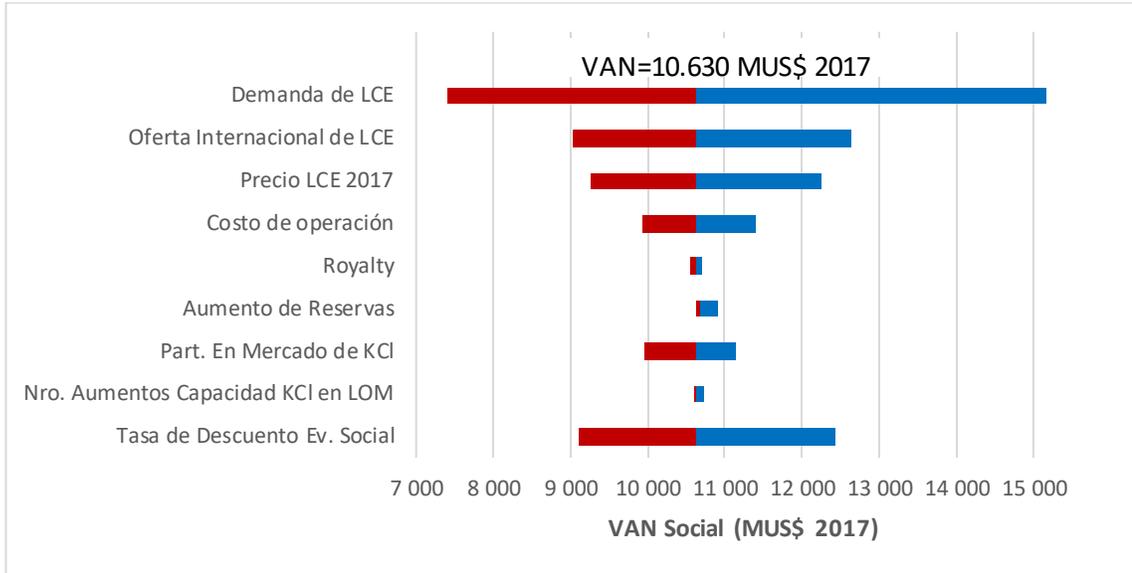


Figura 5-14: Análisis de sensibilidad de VAN social. Fuente: Elaboración propia.

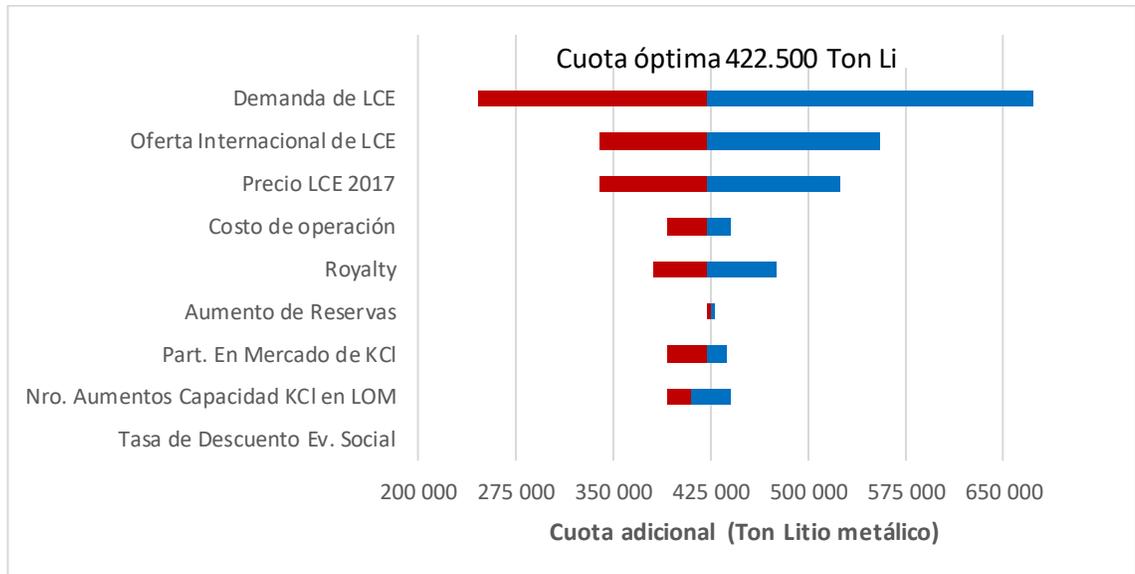


Figura 5-15: Análisis de sensibilidad de cuota adicional a otorgar, desde una perspectiva de evaluación privada óptima. Fuente: Elaboración propia.

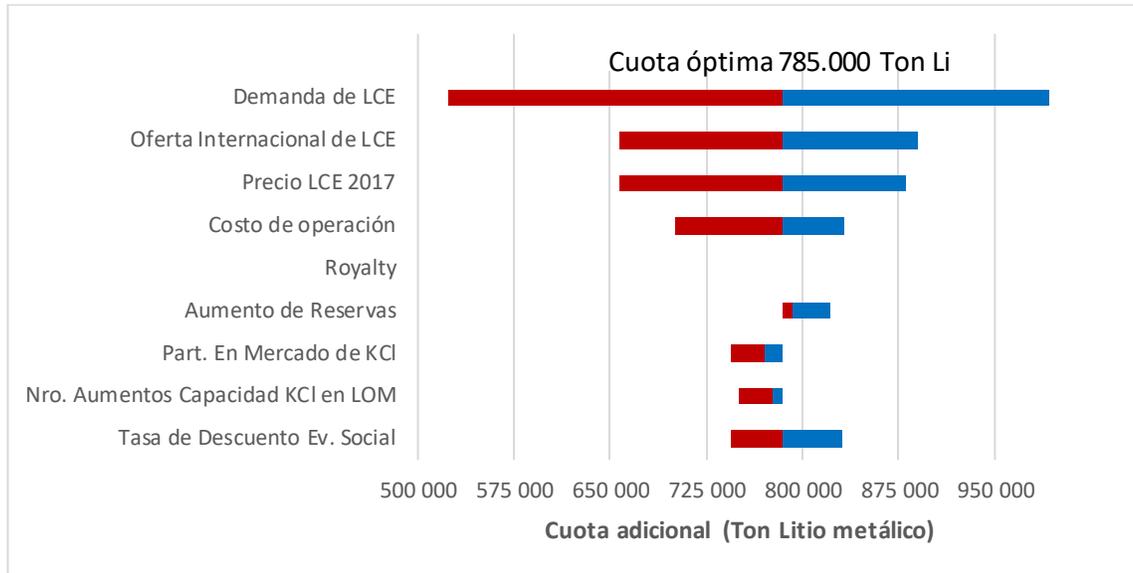


Figura 5-16: Análisis de sensibilidad de cuota adicional a otorgar, desde una perspectiva de evaluación social óptima. Fuente: Elaboración propia.

No obstante lo anterior, hay que señalar además que en la evaluación de la explotación de salmueras, la importancia de considerar mayores estimaciones de reserva disponible (y en general de cualquier otro parámetro operacional que incida en los niveles de producción) se basa desde un punto de vista estratégico no en el resultado económico, sino que en las posibilidades de extracción que genera. Específicamente, por las mayores posibilidades productivas que determina a idénticos niveles de bombeo, lo cuales determinan que no se requieran mayores consumos de salmuera por bombeo ni solicitudes de aumento del caudal a extraer.

Así, como muestran las Figuras 5-17 y 5-18, se aprecia que un aumento de reservas se traduce en un adelanto del valor económico obtenido debido a los menores niveles de bombeo requeridos. No obstante esto, considerando de que no existen restricciones en el nivel de bombeo para la asignación de cuotas, los resultados económicos observados indican que los análisis desarrollados anteriormente se mantienen en gran medida⁴².

⁴² El modelo planteado asume que no hay restricciones de bombeo en el momento en que se realiza la asignación de cuotas. Esto debido principalmente a que si se consideraran los permisos máximos de bombeo

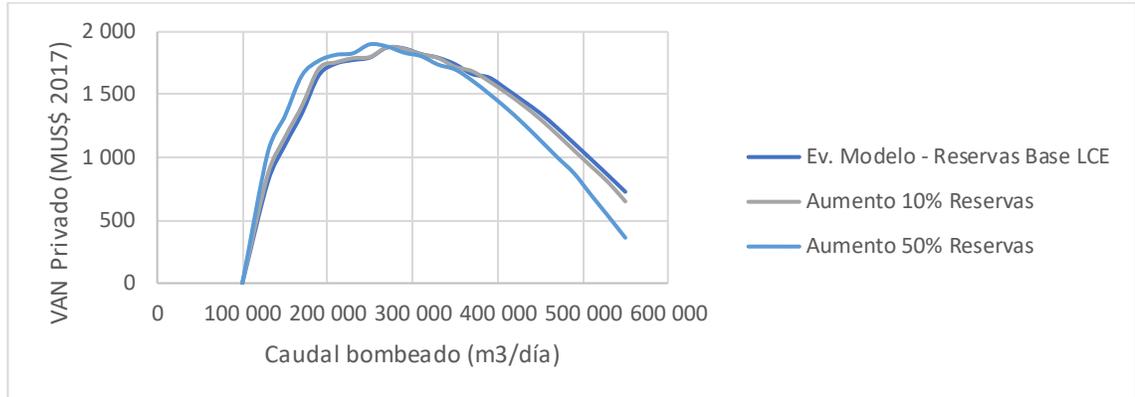


Figura 5-17: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s caudal bombeado

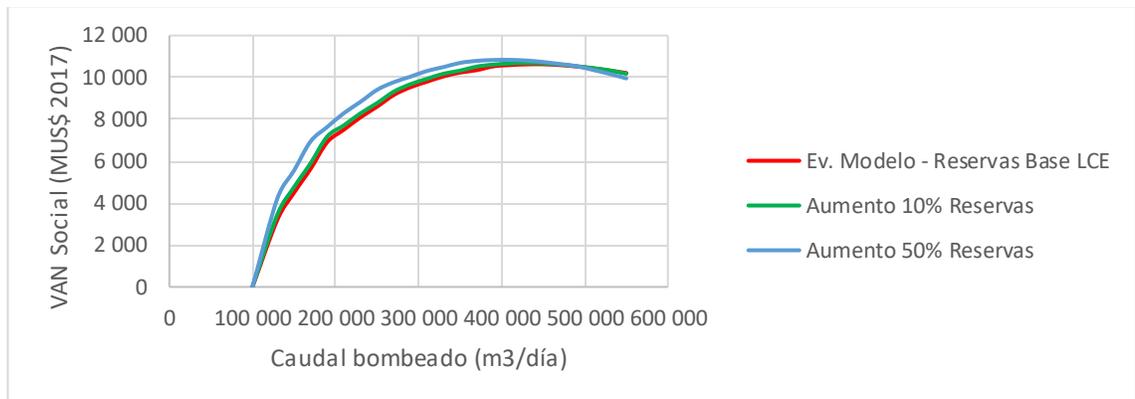


Figura 5-18: VAN social (MUS\$ 2017) v/s caudal bombeado

Finalmente, se concluye bajo el análisis desarrollado que la asignación de una nueva cuota de extracción para el Salar de Atacama entre las 420.000 y 600.000 toneladas de litio metálico consiste en una asignación razonable desde el punto de vista del planificador privado y social. En efecto, se aprecia en las Figuras del Anexo I que debido a la forma de la concavidad que existe entre las cuotas a asignar y el valor económico percibido, una asignación de este tipo sería muy cercana al óptimo de los escenarios de sensibilidad analizados. De hecho, únicamente en el caso de que se materialicen escenarios más pesimistas respecto al precio del

hasta la fecha, no se estaría considerando entonces la posibilidad de solicitar aumentos en el caudal de extracción o de efectuar cambios tecnológicos que mejoren la extracción.

LCE en el horizonte de evaluación (por menores expectativas de crecimiento de la demanda de LCE o una mayor oferta internacional del LCE), los óptimos productivos podrían llegar a ser más distantes de los señalados en este rango. Sin embargo, como una medida de mitigación, estudios más robustos podrían llevarse a cabo en la estimación del precio del LCE, a objeto de reducir esta incertidumbre.

De este modo, bajo la asignación de una nueva cuota de extracción de litio en el Salar de Atacama entre 2023-2043 de 420.000 y 600.000 toneladas de litio metálico podría generarse, según el caso base de explotación desarrollado, un VAN privado de 1.700 MUS\$2017 y 1.880 MUS\$2017, y un VAN social de 9.600 MUS\$2017 y 10.300 MUS\$2017. Lo anterior, siempre y cuando se realicen aumentos de capacidad productiva en el Salar de Atacama que lleven la producción de LCE del Salar a 218 o 267 ton anuales y de KCl a 3.235 o 3.570 ton anuales para el Salar de Atacama.

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones generales

El trabajo desarrollado buscó definir un marco metodológico que permitiese determinar la asignación óptima de cuotas de explotación del Salar de Atacama frente a la eventualidad de que se establezcan nuevos contratos de operación. Con este fin, fueron planteados como objetivos específicos: (i) generación de modelos de evaluación social integrada y privada de cuotas de explotación; (ii) estimación de efectos directos, indirectos e inducidos debidos a la explotación minera del Salar; (iii) determinación de curvas de valor económico de explotación del salar según nivel de producción y (iv) análisis comparativo de resultados y validación de uso de herramientas de apoyo.

Durante el desarrollo del marco metodológico de evaluación se evidenció la importancia de considerar los diferentes elementos que conforman el valor social de un proyecto y sus interrelaciones. Fundamentalmente para el desarrollo de proyectos de determinación de niveles y cuotas de producción de litio en Chile, en donde las particularidades a nivel tributario de recaudación de impuestos hacen que los resultados para la evaluación privada y social disten de manera significativa. Por tanto, al momento de tomar decisiones estratégicas como la de asignación de cuotas por parte del Estado y de capacidades de producción por parte de las empresas, se evidenció que los elementos que conforman el valor social del proyecto deben ser considerados.

Bajo la evaluación base desarrollada, se encontraron las curvas de valor económico social y privado generado por los diferentes niveles de cuota establecido para el período de análisis considerado. En base a estos resultados se obtuvo que, bajo criterios de maximización de utilidades, tanto desde el punto de vista privado como social existe la oportunidad de agregar una cuota de extracción adicional a la asignada que mejore el valor económico obtenido por la extracción minera del Salar de Atacama.

Específicamente, se encontró que la asignación de una nueva cuota de extracción para el Salar de Atacama entre las 420.000 y 600.000 toneladas de litio metálico debiese ser asignada entre 2023 y 2043. En esta línea, la explotación de los recursos existentes en el Salar de Atacama

(a partir de la nueva cuota) significarían para la sociedad la obtención de un VAN total en torno a los 10.000 MUS\$2017.

Considerando lo anterior, se observó a partir del caso de análisis que la definición de una nueva cuota en el rango anteriormente mencionado podría llegar a significar una diferencia del valor social capturado en el momento de negociación de la cuota entre tomadores de decisión públicos y privados en torno al 11,6%.

Además, se observó que de las diferentes incertidumbres presentes en la evaluación, las más significativas son las relacionadas al precio del LCE. Particularmente en lo referido a las expectativas de crecimiento de demanda de LCE, la oferta internacional de LCE y el precio inicialmente considerado en la estimación de LCE. En base a estas incertidumbres, el VAN total capturado por la sociedad podría estar en torno a los 7.500 MUS\$ 2017 o 15.000 MUS\$.

De este modo, por medio del análisis desarrollado se espera que, por la solidez de los fundamentos que sustentan el modelo planteados y la consistencia de los resultados obtenidos, se logre poner de manifiesto los potenciales beneficios de complementar la toma de decisiones estratégicas, como las de definición de cuotas de extracción y capacidades de producción, con herramientas analíticas como la que se presenta en este trabajo.

6.2 Futuras líneas de investigación

El modelo propuesto logra determinar satisfactoriamente decisiones estratégicas como la cuota a extraer y las capacidades óptimas de producción a establecer en el Salar de Atacama en un horizonte temporal de largo plazo (2023-2043). Sin embargo, una caracterización más robusta de estas decisiones debiese tomar en cuenta un análisis más profundo de algunas variables de interés.

Desde el punto de vista técnico, la extracción fue caracterizada según una metodología de evaluación por medio de balances de masa (estática) aun cuando se reconoce que esta metodología es, respecto a la desarrollada por medio de modelos hidrogeológicos (dinámica), conservadora. De este modo, si se llegara a considerar una caracterización dinámica de la extracción mediante modelos hidrogeológicos, podrían reconocerse las particularidades

asociadas a la extracción minera proveniente de las salmueras y la interrelación que existe entre esta y el medio. Más aún, el considerar una caracterización de este tipo permitiría medir el eventual efecto ambiental producido por la extracción minera en los ecosistemas lagunares que típicamente rodean a estas fuentes de extracción y que pudiesen ser una restricción relevante para el problema descrito.

Otra extensión que podría introducirse al modelo consiste en la incorporación de modelos de teoría de juegos que tomen en cuenta las decisiones estratégicas que toman los diferentes operadores del mercado del litio de forma independiente (y no conjunta como se asume en esta tesis). Particularmente debido al hecho que, bajo la metodología presentada, las decisiones de producción minera de un salar son caracterizadas como un todo, en forma independiente a las motivaciones de producción de las compañías que explotan un salar.

Finalmente, se propone agregar a la metodología de estudio planteada la incorporación de un análisis de riesgo que permita introducir estocasticidad a las variables de mayor incertidumbre del modelo. Con esta mejora, se permitiría apoyar con mayor robustez la toma de decisiones del planificador social y privado cuando deban establecerse cuotas y capacidades de producción minera.

BIBLIOGRAFÍA

Aroca, P. (2001). Impacts and development in local economies based on mining: the case of the Chilean II region. *Resources Policy*, 27(2), 119–134.

Auger, F. y Guzmán, J.I. (2010). How rational are investment decisions in the copper industry? *Resources Policy*, 35(4), 292–300.

Banco Central de Chile, 2013. Estadísticas económicas, serie de indicadores, Santiago, Chile. Recuperado de:
<https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principa11/Excel/CCNN/cdr/excel.html>

Banco Mundial (2017). *Commodity Markets Outlook Q2 2017*. World Bank Group, Washington.

CCHEN (2017). Comisión Chilena de Energía Nuclear, Santiago, Chile. Recuperado de:
http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2017/RespuestasSolicitudes/2017/Acto%22Adm.%20AU0003T0000079.pdf

COCHILCO (2013). *Compilación de informes sobre: Mercado del Litio, El Potencial del Litio en Salares del Norte de Chile*. Comisión Chilena del Cobre, Subsecretaría de Minería, Santiago, Chile.

COCHILCO (2017). *Mercado Internacional del Litio y su potencial en Chile*. Comisión Chilena del Cobre, Subsecretaría de Minería, Santiago, Chile.

Comisión Nacional del Litio. (2015). *Informe Final Litio: Una Fuente de Energía, una Oportunidad para Chile*. Ministerio de Minería, Santiago, Chile. pp. 1-100.

CORFO (2016). *Presentación comisión investigadora litio*. Corporación de fomento de la producción, Santiago, Chile. Recuperado de:
<https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=63026&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>

CORFO (2017). *Estrategia litio de CORFO*. Foro del Litio, Santiago, Chile.

CPH Consultores (2016). *Modelo conceptual y modelación numérica. Estudio de Impacto Ambiental Planta de producción de sales de potasio, SLM NX Uno de Peine, Anexo 3 de Adenda 2*. Santiago, Chile. pp. 105-109.

Davis, G. A. y Newman, A. M. (2008). *Modern Strategic Mine Planning*. Proceedings of the 2008 Australian Mining Technology Conference. pp. 129-139.

- Deck, C., Guzmán, J.I., Hinrichsen, C., Lichtin, C., Redemacher, M., Cancino, R. y Vila-Echague, E. Flexible stochastic planning: the ultimate frontier. Mine Planning 2013 Conference. Pp 1-8.
- Deutsche Bank (2016). Lithium Market Research-Welcome to the Lithium-ion Age. Sidney, Australia. Recuperado de:
<http://www.belmontresources.com/LithiumReport.pdf>
- Enviros (2008). Presentación CORFO: Evaluación de reservas de Litio y Potasio en pertenencias OMA de CORFO en el Salar de Atacama. Santiago, Chile.
- Evans, R.K. (2014). Lithium. En G. Gunn (Ed). *Critical Metals Handbook* (pp. 230-266). Oxford.
- Fontaine, E.R. (2008). Evaluación Social de Proyectos. Décimo tercera Ed. Pearson Hall Ediciones.
- GEM (2017). Comunicación personal. Santiago, Chile.
- Gravel, L.F. (2015). Litio y las dificultades para la obtención de una calificación ambiental favorable en el Salar de Atacama. Análisis de causas. Tesis (Magíster en Gestión y Dirección de Empresas), Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial, 56-57.
- Grosjean, C., Miranda, P.H., Perrin, M. y Poggi, P., (2012). Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (3), 1735–1744.
- Guzmán, J.I. (2017). Fundamentos de Economía de Minera. Capítulo 1. *Departamento de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile*, Santiago, Chile.
- Ide, F. y Kunasz, I.A. (1989). Origin of lithium in Salar de Atacama, Northern Chile. Ericksen, G.E., Cañas Pinochet, M.T., y Reinemund, J.A. (Ed). *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources* (pp. 165-172). Houston, Texas.
- Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., Geng, Y., y Sarkis, J. (2017). Material flow analysis of lithium in China. *Resources Policy*, 51, 100–106.
- Hinrichsen, C. (2015). Planificación Minera de Largo Plazo ¿Táctica o Estratégica? *Gestión Economía Minera*, Santiago, Chile. pp. 1-8.
- Kesler, S. E., Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Everson, M.P. y Wallington, T.J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55-69.

Lagos, G. (2012). El Desarrollo del Litio en Chile: 1984-2012. *Pontificia Universidad Católica de Chile*. Recuperado de:
http://www.gustavolagos.cl/uploads/1/2/4/2/12428079/el_desarrollo_del_litio_en_chile_g_lagos_21-8-12_a.pdf

Lagos, G. y Blanco, E. (2010). Mining and development in the region of Antofagasta. *Resources Policy*, 35(4), 265–275.

Lu, B., Liu, J. y Yang, J. (2017). Substance flow analysis of lithium for sustainable management in mainland China: 2007–2014. *Resources, Conservation and Recycling*, 119, 109-116.

Martin, G., Rentsch, L., Höck, M. y Bertau, M. (2017). Lithium market research–global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials*, 6 (2017), 171–179.

Maxwell, P. (2015). Transparent and opaque pricing: The interesting case of lithium. *Resources Policy*, 45, 92–97.

Miedema, J.H. y Moll, H.C. (2013). Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: the impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050. *Resources Policy*, 38 (2), 92–97.

Ministerio de Desarrollo Social (2017). Precios Sociales 2017. Ministerio de Desarrollo Social, División de Evaluación Social de Inversiones, Santiago, Chile.

Muñoz, J.F., Ortiz, C., Mardones, L. y De Vidts P. (2004) Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Rev Ingen Hidrául México* 9 (3),69–81.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

PotashCorp (2017). Market Overview May 2017. Conferencia anual de IFA.

Riesgo, M.V., Krzemien, A., Manzanedo, M.A., Menéndez, M. y Richard, M. (2017). Rare earth elements mining investment: It is not all about China. *Resources Policy*, 53, 66–76.

Schuschny, R. (2005). Tópicos sobre el Modelo de Insumo-Producto: teoría y aplicaciones. Serie de Estudios Estadísticos y Prospectivos, CEPAL, División de Estadística y Proyecciones Económicas: Santiago, Chile.

Sernageomin (2016). Anuario de la minería de Chile 2015. Ministerio de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.

SGA (2014). Estudio hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama, Rockwood Lithium, Anexo 3 de Adenda 5. Santiago, Chile. pp. 238-261.

SQM (1997). Estudio de Impacto Ambiental. Producción de 17.700 toneladas anuales de carbonato de litio. Santiago, Chile.

SQM (2017a). La realidad y los desafíos de la industria del litio: El cruce entre oferta y demanda. Foro del Litio, Santiago, Chile. pp. 48-72. Recuperado de: http://s1.q4cdn.com/793210788/files/doc_presentations/2017/08/Lithium-Forum-Santiago-Chile_August-8-2017.pdf

SQM (2017b). Metodología y resultados para cálculo de reservas de litio y potasio en las pertenencias OMA en arriendo a SQM. Foro del Litio, Santiago, Chile. pp. 22-47. Recuperado de: http://s1.q4cdn.com/793210788/files/doc_presentations/2017/08/Lithium-Forum-Santiago-Chile_August-8-2017.pdf

Suárez, A., Krzemien, A., Riesgo, P., Iglesias, F.J., Sánchez, F. y de Cos F.J. (2015). Investment in new tungsten mining projects. *Resources Policy*, 46(2), 177–190.

Tejeda, I., Cienfuegos, R. y Muñoz, J. (2003). Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama. *Journal of Hydrological Engineering*, 8(1), 25–34.

Tilton J.E. y Guzman J.I. (2016). Mineral economics and policy. *Resources for the Future*, New York.

UPC (2016). Santiago, Chile. pp. 28-42. Recuperado de: http://s1.q4cdn.com/793210788/files/doc_presentations/2017/08/Lithium-Forum-Santiago-Chile_August-8-2017.pdf

US EPA (2002). Greenhouse gases and global warming potential values. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, EPA.

USGS (2017). Mineral Commodity Summaries 2017. United States Geological Survey. Recuperado de: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/>.

Vásquez, C., Ortiz, C., Suarez, F. y Muñoz, J.F. (2013). Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile. *Journal of Hydrology*, 140, 114-125.

ANEXOS

ANEXO A. DISTRIBUCIONES HISTÓRICAS DE CONCENTRACIÓN EN SALAR DE ATACAMA

Desde el descubrimiento en 1962 de altas concentraciones de litio y potasio en el Salar de Atacama, se han realizado diferentes campañas de muestreo y estimaciones de los recursos existentes en el Salar. Mediante modelos hidrogeológicos, se ha caracterizado la distribución espacial de las concentraciones de los minerales del Salar.

Para el caso del litio, la información pública disponible muestra que más allá de su variación espacial, en general la distribución de concentraciones sigue una distribución lognormal.

En efecto, al considerar la información pública disponible de los estudios de Comité de Sales Mixtas de 1989, Water Management de 1996 y Enviros de 2008 (Ide y Kunasz, 1989; SQM, 1997; Enviros, 2008), la distribución espacial de concentraciones sigue el patrón mostrado en las Figura A-1, A-2 y A-3:

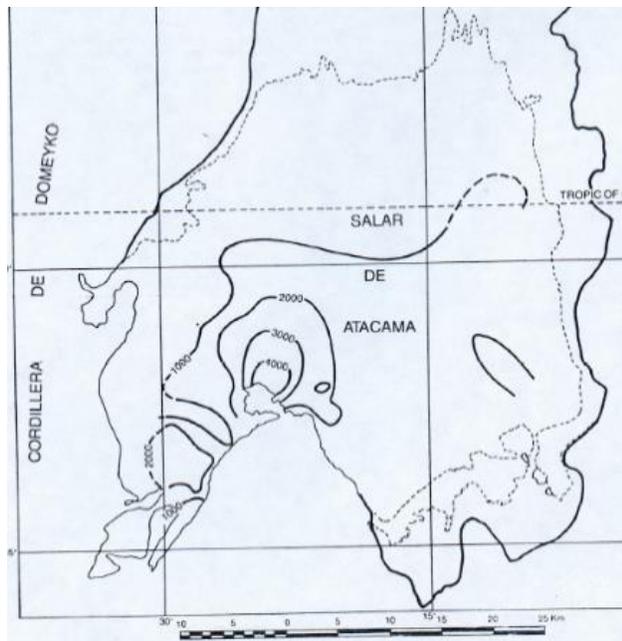


Figura A-1: Distribución espacial de litio en 1989. Fuente: Ide y Kunasz, 1989.

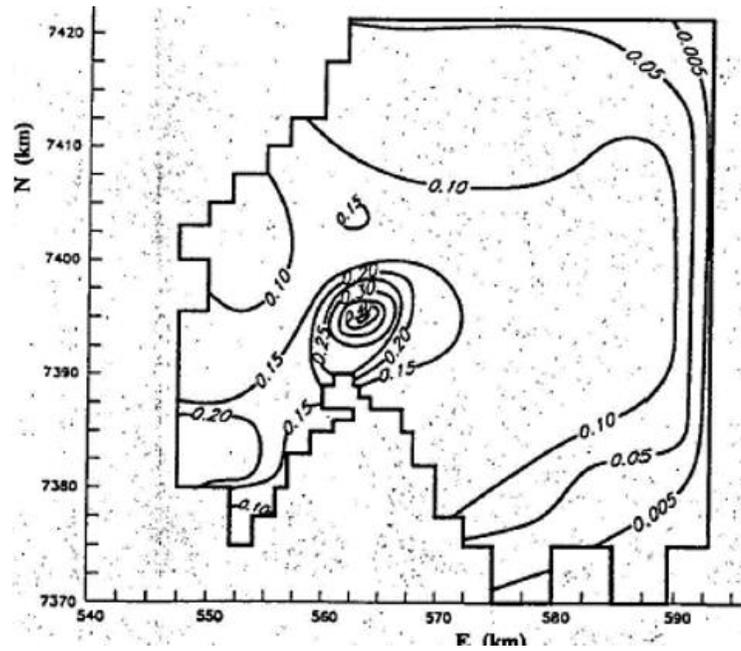


Figura A-2: Distribución espacial de litio en 1996. Fuente: SQM, 1997.

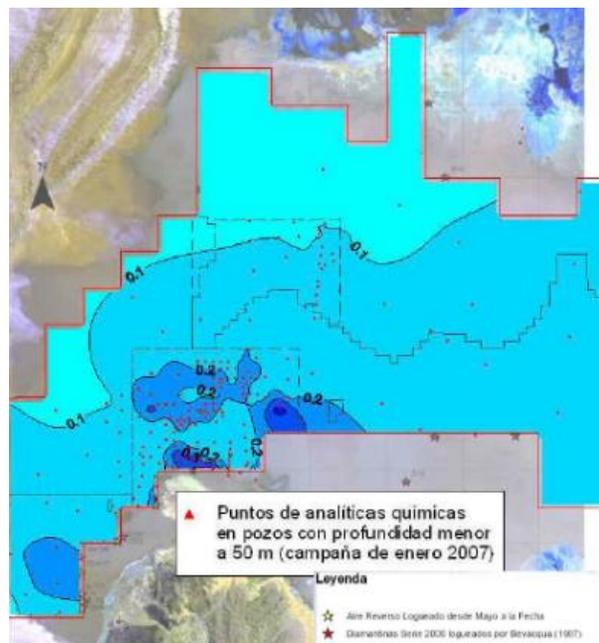


Figura A-3: Distribución espacial de litio en 2008. Fuente: Enviros, 2008.

Con el fin de estudiar y cuantificar la variación de la distribución de los recursos existentes, en primer lugar se procesaron estas imágenes con el *software* ImageJ midiendo las áreas abarcadas por cada uno de los rangos de concentraciones. Con esta información y los datos de profundidad, densidad y porosidad que se establecieron en cada estudio (Tabla A-1), a continuación se estimaron los recursos de litio existentes a la fecha de realización de cada estudio como:

$$Recursos_t = \sum_{i=1}^n \text{Área}_{it} (m^2) * \text{Profundidad}_{it} (m) * \text{Densidad}_{it} \left(\frac{ton}{m^3}\right) * \text{Porosidad}_{it} (\%) \quad (A.1)$$

En donde i representa uno de los n rangos de concentraciones establecidos para el estudio del período $t = \{1989, 1996, 2008\}$. De este modo, considerando una densidad de 1,23 para el Salar de Atacama, se obtuvieron las estimaciones de distribución de recursos de litio indicadas en la Tabla A-1 y en las Figuras A-4, A-5 y A-6.

Tabla A-1: Estimación de recursos de litio en 1987, 1996 y 2008. Fuente: Elaboración propia en base a Ide y Kunasz, 1989; SQM, 1997; Enviros, 2008.

Concentración Litio		Área (km2)			Profundidad (m)		Porosidad (%)		Recursos (Mton)		
Mínimo (%)	Máximo (%)	1989	1996	2008	1989	1996-2008	1989-1996	2008	1989	1996	2008
0,4	1	7,8	3,0	4,6	30	40	8,5	10,0	0,10	0,05	0,08
0,35	0,4	18,5			30	40	8,5	10,0	0,20		
0,3	0,35				30	40	8,5	10,0			
0,25	0,3	104,0	6,4	40,7	30	40	8,5	10,0	0,81	0,07	0,50
0,2	0,25		34,9		30	40	8,5	10,0		0,33	
0,15	0,2	672,0	60,2	528,6	30	40	8,5	10,0	3,15	0,44	3,90
0,1	0,15		693,4		30	40	8,5	10,0		3,61	
0,05	0,1	691,9	468,3	205,6	30	40	8,5	10,0	1,08	1,46	0,51
0	0,05		185,2		30	40	8,5	10,0		0,19	
Total		1.494	1.451	779	30	40	8,5	10,0	5,34	6,15	4,99

Como muestran las Figuras A-4, A-5 y A-6, los recursos de litio del Salar de Atacama según concentración evidencian una distribución lognormal. Bajo esta metodología, los recursos existentes en el Salar de Atacama en 1989, 1996 y 2008 se ajustan particularmente a una

distribución lognormal de parámetros (0,1471; 0,0638), (0,0604; 0,0275), (0,148; 0,0492) con RMSE de 0,176; 0,452 y 0,075 respectivamente.

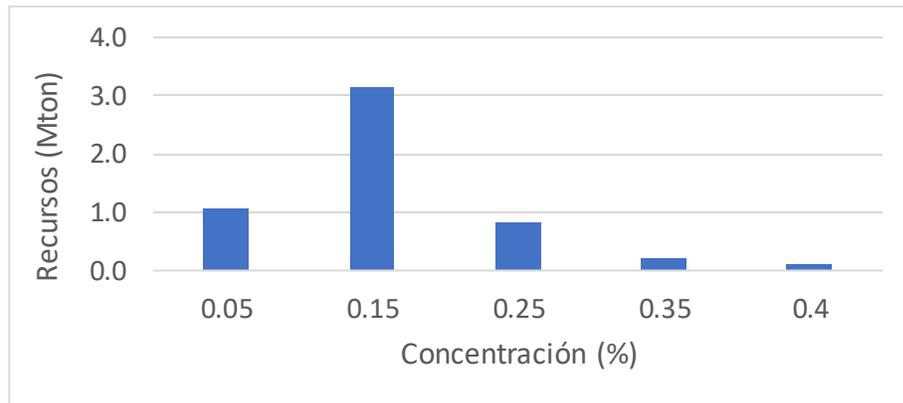


Figura A-4: Distribución de recursos de litio según concentración en 1989. Fuente: Elaboración propia.

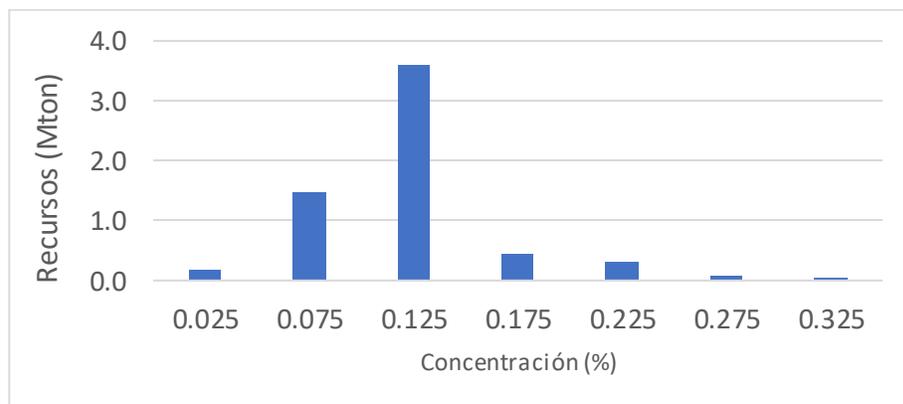


Figura A-5: Distribución de recursos de litio según concentración en 1996. Fuente: Elaboración propia.

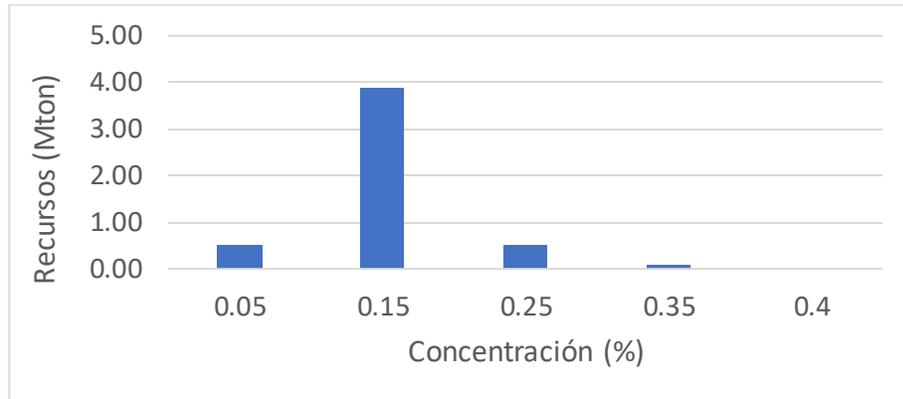


Figura A-6: Distribución de recursos de litio según concentración en 2008. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al potasio, un proceso análogo fue desarrollado. De este modo, se encontró que los recursos existentes en el Salar de Atacama en 1996 y 2008 se ajustaban a una distribución lognormal de parámetros (1,48; 0,45), (1,88; 0,644) con RMSE de 0,070 y 0,066 respectivamente.

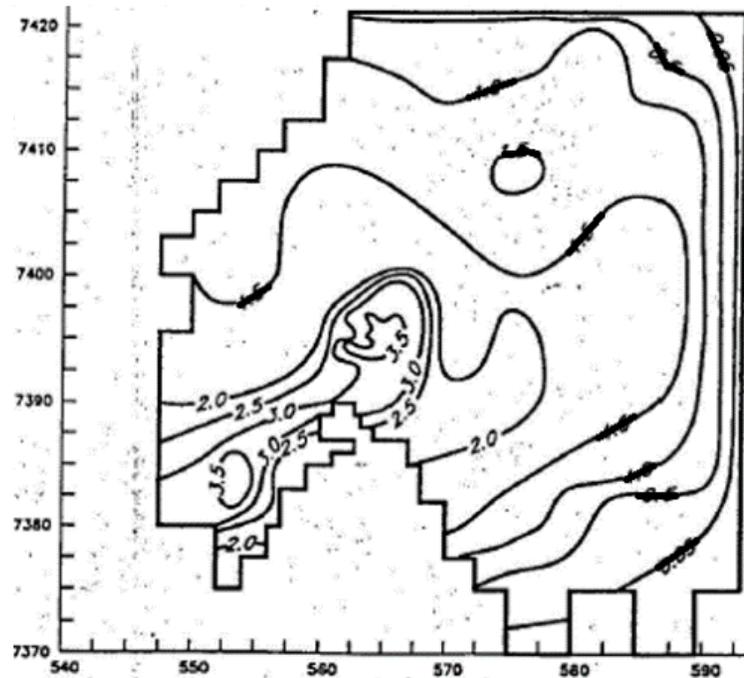


Figura A-7: Distribución espacial de potasio en 1996. Fuente: SQM, 1997.

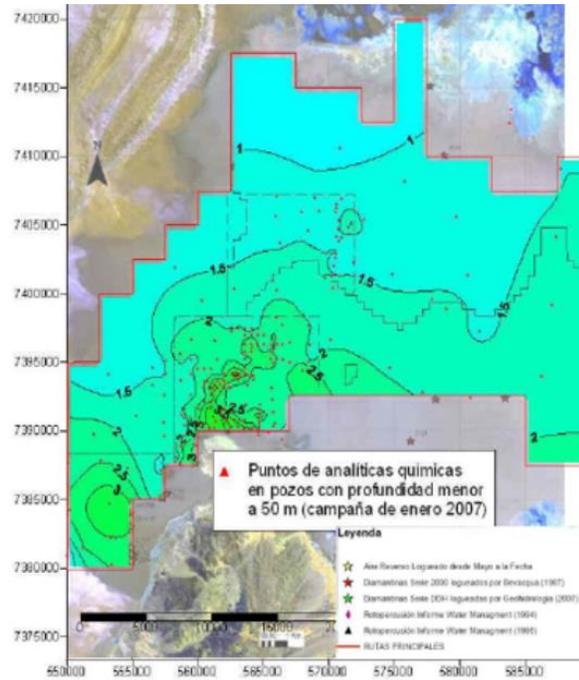


Figura A-8: Distribución espacial de potasio en 2008. Fuente: Enviros, 2008.

Tabla A-2: Estimación de recursos de potasio en 1996 y 2008. Fuente: Elaboración propia en base a SQM, 1997 y Enviros, 2008.

Concentración Litio		Área (km ²)		Profundidad (m)		Densidad	Porosidad (%)		Recursos (Mton)	
Mínimo (%)	Máximo (%)	1996	2008	1996	2008	Media	1996	2008	1996	2008
3,5	4	8,6	12,5	40	40	1,23	8,5	10,0	1,34	2,47
3	3,5	48,5		40	40	1,23	8,5	10,0	6,56	
2,5	3	25,5	24,6	40	40	1,23	8,5	10,0	2,91	3,33
2	2,5	89,6	86,8	40	40	1,23	8,5	10,0	8,39	9,61
1,5	2	454,7	285,1	40	40	1,23	8,5	10,0	33,12	24,55
1	1,5	471,1	274,9	40	40	1,23	8,5	10,0	24,51	16,90
0,5	1	160,2	92,3	40	40	1,23	8,5	10,0	5,00	4,54
0,05	0,5	116,0		40	40	1,23	8,5	10,0	1,33	
0	0,05	64,5		40	40	1,23	8,5	10,0	0,07	
Total		1.439	776	40	40	1,23	8,5	10,0	83,23	61,40

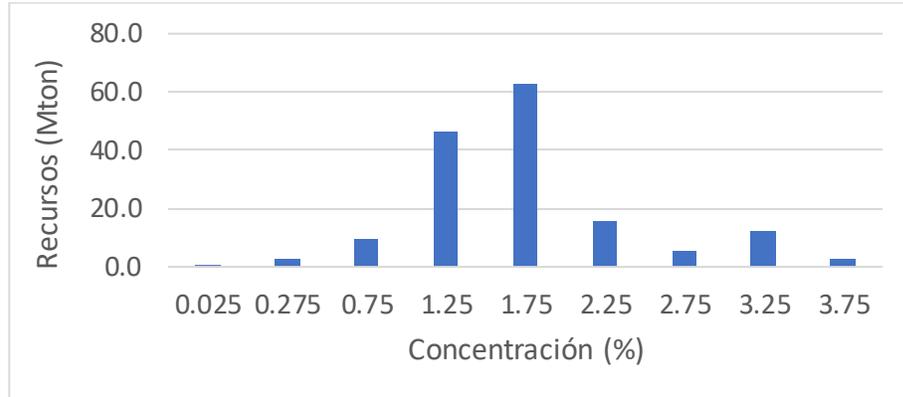


Figura A-9: Distribución de recursos de potasio según concentración en 1996. Fuente: Elaboración propia en base a SQM, 1997.

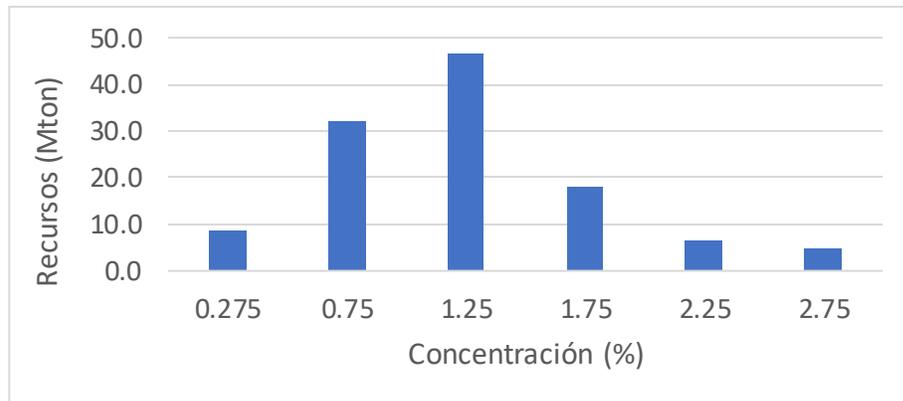


Figura A-10: Distribución de recursos de potasio según concentración en 2008. Fuente: Elaboración propia en base a Enviro, 2008.

**ANEXO B. PROYECCIONES DE DEMANDA MUNDIAL DE KCL Y
RESTRICCIÓN DE OFERTA PARA EL SALAR DE ATACAMA**

La Tabla B-1 muestra las proyecciones de demanda mundial 2017-2043 desarrolladas por Potash Corp (que consideran crecimiento compuesto anual de la demanda de 2,5%) y la restricción de oferta de cloruro de potasio para el Salar de Atacama al considerar una participación de mercado de 3% de la demanda mundial.

Tabla B-1: Estimación de demanda de KCl entre 2017-2043. Fuente: Potash Corp, 2017

Año	Demanda Mundial (kton)	Tasa de crecimiento (%)	Restricción Oferta Salar Atacama (kton)	Participación de mercado (%)
2016	60,3	-	-	-
2017	61,8	2,5%	1,9	3,0%
2018	63,4	2,5%	1,9	3,0%
2019	64,9	2,5%	2,0	3,0%
2020	66,6	2,5%	2,0	3,0%
2021	68,2	2,5%	2,1	3,0%
2022	69,9	2,5%	2,1	3,0%
2023	71,7	2,5%	2,2	3,0%
2024	73,5	2,5%	2,2	3,0%
2025	75,3	2,5%	2,3	3,0%
2026	77,2	2,5%	2,3	3,0%
2027	79,1	2,5%	2,4	3,0%
2028	81,1	2,5%	2,5	3,0%
2029	83,1	2,5%	2,5	3,0%
2030	85,2	2,5%	2,6	3,0%
2031	87,3	2,5%	2,7	3,0%
2032	89,5	2,5%	2,7	3,0%
2033	91,8	2,5%	2,8	3,0%
2034	94,0	2,5%	2,9	3,0%
2035	96,4	2,5%	2,9	3,0%
2036	98,8	2,5%	3,0	3,0%
2037	101,3	2,5%	3,1	3,0%
2038	103,8	2,5%	3,2	3,0%
2039	106,4	2,5%	3,2	3,0%
2040	109,1	2,5%	3,3	3,0%
2041	111,8	2,5%	3,4	3,0%
2042	114,6	2,5%	3,5	3,0%
2043	117,5	2,5%	3,6	3,0%

ANEXO C. PROYECCIONES DE OFERTA Y DEMANDA MUNDIAL DE LCE

Para el desarrollo del Escenario de Análisis de este trabajo se consideraron las proyecciones de oferta y demanda mundial 2017-2027 desarrolladas por SQM (Tablas C-1 y C-2). Además, se consideraron entre 2028 y 2043 las proyecciones de crecimiento de la demanda de CORFO que indican que en el largo plazo el crecimiento promedio de la demanda estará en torno a un 8%. Misma tasa de crecimiento fue aplicada para la oferta en dicho período (CORFO, 2017).

Tabla C-1: Estimación de demanda de LCE entre 2017-2043. Fuente: SQM, 2017 y CORFO, 2017

Año	Demanda Mundial (kton)	Tasa de crecimiento (%)
2017	208	14%
2018	237	14%
2019	270	14%
2020	308	14%
2021	351	14%
2022	400	14%
2023	457	14%
2024	520	14%
2025	593	14%
2026	676	14%
2027	771	14%
2028	833	8%
2029	899	8%
2030	971	8%
2031	1.049	8%
2032	1.133	8%
2033	1.224	8%
2034	1.322	8%
2035	1.427	8%
2036	1.541	8%
2037	1.665	8%
2038	1.798	8%
2039	1.942	8%
2040	2.097	8%
2041	2.265	8%
2042	2.446	8%
2043	2.642	8%

Tabla C-2: Estimación de oferta de LCE para 2017-2027. Fuente: SQM, 2017.

Oferta (kton)	Chile	Argentina	China	Australia	US-Canadá	Otros	Total sin Chile	Total	Participación de Chile (%)
2017	75	29	17	82	5	1	134	209	35.9%
2018	85	33	29	107	5	4	178	263	32.3%
2019	106	33	29	154	5	8	229	335	31.6%
2020	106	58	31	219	15	11	334	440	24.1%
2021	106	58	35	249	25	19	386	492	21.5%
2022	126	93	35	249	25	19	421	547	23.0%
2023	135	103	45	269	25	19	461	596	22.7%
2024	143	118	45	269	25	19	476	619	23.1%
2025	151	128	45	269	25	19	486	637	23.7%
2026	171	143	45	269	25	19	501	672	25.4%
2027	171	143	46	314	30	19	552	723	23.7%

ANEXO D. BASE DE DATOS DE INVERSIÓN EN PROYECTOS

Tabla D-1: Inversión (MUS\$2017) Infraestructura y Planta: Carbonato de litio

País	Proyecto	Estado	Inversión (MUS\$ 2017)	Aumento Capacidad (Tpa)	Año de inicio operación
Chile	SQM Salar	Operación	78,7	17.500	1996
	SQM Salar (Exp.I)	Operación	14,8	14.500	2003
	SQM Salar (Exp.II)	Operación	50,8	16.000	2008
	SQM Salar (Exp.III)	Evaluación	50,0	15.000	2018
	La Negra	Operación	96,5	6.350	1984
	La Negra (Exp. Fase I)	Operación	13,9	4.000	2009
	La Negra (Exp. Fase II)	Operación	450,0	20.000	2017
	La Negra (Exp. Fase III)	Evaluación	600,0	38.000	2020
Argentina	Hombre Muerto	Operación	104,6	17.000	1997
	Hombre Muerto (Exp)	Operación	40,6	6.000	2014
	Olaroz Fase I	Operación	211,1	17.500	2015
	Olaroz Fase II	Evaluación	129,1	17.500	2020
	Cauchari-Olaroz 1	Evaluación	246,6	20.000	2016
	Cauchari-Olaroz 2	Evaluación	161,4	20.000	-
	Cauchari-Olaroz	Evaluación	425,0	25.000	2020
	Rincón	Evaluación	700,0	50.000	-
	Sal de Vida	Evaluación	319,9	25.000	-
Diablillos	Evaluación	117,1	15.000	-	

Tabla D-2: Inversión (MUS\$2017) Infraestructura y Planta: Cloruro de potasio

País	Proyecto	Estado	Producto	Inversión (US\$ 2017 Millones)	Capacidad (tpa)	Año de inicio operación
Chile	SQM Salar 1998	Operación	CPG*	15,9	100.000	1998
	SQM Salar 2009	Operación	CPG*	21,4	20.000	2009
	SQM Salar 2010	Operación	CPG*	70,3	1.100.000	2010
	SQM Salar 2013	Operación	CPG*	18,2	700.000	2013
	Albermarle 2014	Operación	CPG*	15,4	136.000	2014
	SQM Salar 1995	Operación	CPH**	136,7	300.000	1995
	SQM Salar 1997	Operación	CPH**	180,2	250.000	1997
	SQM Salar 2009	Operación	CPH**	565,5	1.550.000	2009
	SQM Salar 2010	Operación	CPH**	145,7	306.500	2010
	SLM NX Uno de Peine	Evaluación	CPH**	39,6	200.000	-
Argentina	Sal de Vida	Evaluación	CPH**	25,0	95.000	-
	Cauchari-Olaroz 1	Evaluación	CPH**	45,0	40.000	2016
	Olaroz Fase I	Evaluación	CPH**	15,0	10.000	2015
	Diablillos	Evaluación	CPH**	17,0	51.000	-

*Cloruro de potasio granulado (seco y compactado) **Cloruro de potasio húmedo

ANEXO E. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE MULTIPLICADORES DE PRODUCTO TIPO I Y II

La Matriz Insumo Producto (MIP) permite observar la condición de equilibrio de oferta y demanda de una economía en un año determinado a partir de la medición de las demandas intersectoriales y de la interacción de la economía nacional con el resto de la economía mundial.

Como formula Aroca (2001), si las ventas totales x_i equivalen a la suma de las ventas entre industrias z_{ij} y de ventas a demanda total (consumo c_i y otra demanda final ofd_i), y si los gastos totales x_j consideran las compras que se dan entre industrias z_{ij} , importaciones m_j , salarios w_j y otros valores agregados ov_j , entonces:

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} + c_i + ofd_i = x_i \quad (\text{E.1})$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ij} + w_j + ov_j + m_j = x_j \quad (\text{E.2})$$

Luego, agrupando estas expresiones en su forma matricial, se encuentra que la MIP queda representada como:

$$A = \left[a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \right] = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{E.3})$$

Sea la Matriz Inversa de Leontief:

$$(I - A)^{-1} = [b_{ij}] = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{E.4})$$

Entonces el multiplicador de producto tipo I, que mide los efectos directos e indirectos de producción de un sector de la economía, está dado por:

$$\text{Mult.Tipo I} = \sum_{i=1}^n b_{ij} \quad (\text{E.5})$$

Ahora bien, si para tomar en cuenta el efecto de las remuneraciones en la economía (efectos inducidos) se agrega a la formulación anterior un sector $n + 1$ que representa a las remuneraciones, entonces:

$$A' = \left[a'_{ij} = \frac{z_{ij}'}{x_j} \right] = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n+1,1} & \cdots & a_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \quad (\text{E.6})$$

$$(I - A')^{-1} = [b'_{ij}] = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1,n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n+1,1} & \cdots & b_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \quad (\text{E.7})$$

Con lo cual se obtiene que el multiplicador de producto tipo II, que mide los efectos directos, indirectos e inducidos de producción de un sector de la economía, queda determinado por:

$$\text{Mult.Tipo II} = \sum_{i=1}^n b'_{ij} \quad (\text{E.8})$$

De este modo, a fin de estimar los efectos indirectos e inducidos generados por la explotación del Salar de Atacama se consideró bajo esta metodología la MIP 2013 elaborada por el Banco Central de Chile. Así, de los 111 sectores económicos que incluye la MIP 2013, se consideró como representativo de la explotación del Salar de Atacama al sector de “Explotación de otras minas y servicios de apoyo a la minería”. Esto, dado que en este sector se incluye al sector minero que realiza la explotación del Salar de Atacama.

En consecuencia, considerando este sector, se obtuvieron los multiplicadores de producto tipo I y II que fueron mostrados en la Tabla 4-6.

ANEXO F. ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CO₂ EQ. SEGÚN CAPACIDAD INSTALADA

Para medir el costo social debido a las emisiones generadas por las plantas de producción de carbonato de litio y cloruro de potasio (húmedo o granulado), se analizaron y consideraron 11 de los 17 EIA o DIA que se han presentado en el Salar de Atacama para aumentar la capacidad productiva.

La base de datos considerada en el análisis es la que se muestra en las Tablas F-1, F-2 y F-3. Cabe señalar, no obstante que, de los 11 proyectos considerados solo algunos se incluyeron en la estimación de emisiones en la fase de construcción y operación (recordando que para la fase de cierre se consideraron las mismas emisiones que para la fase de construcción).

Por otro lado, debe mencionarse que si bien la construcción, operación y cierre de las plantas significa emisiones de PM₁₀, PM_{2,5}, SO_x, CO, NO_x y HC/COV, solo los últimos tres fueron considerados en la evaluación. Particularmente debido al hecho que gases de corta vida como el material particulado y SO₂ tienden a ser inestables y variables espacialmente en la atmósfera y, en consecuencia, difíciles de cuantificar en su impacto en la radiación global (US EPA, 2002). De este modo, tomando en cuenta las emisiones de dichos gases y los factores de conversión mostrados en la Tabla F-4, se cuantificaron las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la emisión de cada proyecto (Tablas F-1, F-2 y F-3).

Finalmente, con esta información se ajustaron las emisiones de CO₂ equivalente generadas para las fases de construcción, operación y cierre de plantas de carbonato de litio, cloruro de potasio granulado y cloruro de potasio húmedo según su capacidad (Figuras F-1, F-2, F-3, F-4, F-5 y F-6). Así, se consideró que las regresiones lineales que describen tal ajuste son:

$$\begin{aligned}
 &CO_{2eq} \text{ Ap. o Cierre Planta Carb. Litio} (\text{ton } CO_2) \\
 &= 0,024 \left(\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton } LCE} \right) * Cap. LCE (\text{ton } LCE) - 153,32 (\text{ton } CO_2)
 \end{aligned}
 \tag{F.1}$$

$$\begin{aligned}
 &CO_{2eq} \text{ Operación Planta Carb. Litio}(\text{ton } CO_2) \\
 &= 0,0462 \left(\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton } LCE} \right) * Cap. LCE(\text{ton } LCE) - 419,1(\text{ton } CO_2) \quad (F.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &CO_{2eq} \text{ Ap.o Cierre Planta KCl Granulado}(\text{ton } CO_2) \\
 &= 0,0003 \left(\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton } KCl} \right) * Cap. KCl Gr. (\text{ton } KCl) - 51,293(\text{ton } CO_2) \quad (F.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &CO_{2eq} \text{ Operación Planta KCl Granulado}(\text{ton } CO_2) \\
 &= 0,0021 \left(\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton } KCl} \right) * Cap. KCl Gr. (\text{ton } KCl) + 150,43(\text{ton } CO_2) \quad (F.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &CO_{2eq} \text{ Ap.o Cierre Planta KCl Húmedo}(\text{ton } CO_2) \\
 &= 0,0003 \left(\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton } KCl} \right) * Cap. KCl Hum(\text{ton } KCl) + 6E - 14(\text{ton } CO_2) \quad (F.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &CO_{2eq} \text{ Operación Planta KCl Húmedo}(\text{ton } CO_2) \\
 &= 0,0404 \left(\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton } KCl} \right) * Cap. KCl Hum(\text{ton } KCl) - 526,13(\text{ton } CO_2) \quad (F.6)
 \end{aligned}$$

Respecto a la obtención de estas regresiones, no obstante, un último aspecto debe mencionarse. Como se aprecia de las regresiones anteriores, un ajuste lineal entre las emisiones y la capacidad productiva instalada fue considerado. Particularmente, debido a que el R^2 obtenido para los datos disponibles indicados en las Figuras F-1, F-2, F-3, F-4 y F-6 fue de al menos un 76%. En consecuencia, y dado que existían dos datos disponibles, se consideró prudente también considerar un ajuste lineal para las emisiones en la fase de construcción y abandono de la planta de cloruro de potasio húmedo, aun cuando los datos disponibles eran escasos. De este modo, se construyeron y obtuvieron las regresiones antes señaladas y detalladas en las Figuras F-1, F-2, F-3, F-4, F-5 y F-6.

Tabla F-1: Emisiones Planta carbonato de litio. Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

Empresa	Nombre Proyecto	Tpa	Etapa de Construcción				Etapa de Producción				Incorporación			
			Emisiones totales (ton)				Emisiones (t/año)				Const./Aband.		Producción	
			CO	NOx	HC/COV	Total	CO	NOx	HC/COV	Total	SI/NO	Motivo	SI/NO	Motivo
SQM	SQM Salar	17.500	0	0	0	0	0	242	0	242	NO	*	NO	**
	SQM Salar (Exp.I)	32.000	0	0	0	0	0	154	0	154	NO	*	NO	**
	SQM Salar (Exp.II)	48.000	0	0	0	0	118	823	0	941	NO	*	SI	
	SQM Salar (Exp.III)	48.000	136	1.424	113	1.673	364	3.221	0	3.584	SI		SI	
Albermarle	La Negra (Exp. Fase I)	4.000	0	0	0	0	0	0	0	0	NO	*	NO	*
	La Negra (Exp. Fase II)	24.000	15	178	0	193	33	480	1	513	SI		SI	
	La Negra (Exp. Fase III)	62.000	114	1.214	8	1.337	288	2.067	167	2.522	SI		SI	

Tabla F-2: Emisiones Planta cloruro de potasio granulado (seco y compactado). Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

Empresa	Nombre Proyecto	Tpa	Emisiones Etapa de Construcción				Emisiones Etapa de Producción				Incorporación			
			Emisiones totales (ton)				Emisiones (t/año)				Const./Aband.		Producción	
			CO	NOx	HC/COV	Total	CO	NOx	HC/COV	Total	SI/NO	Motivo	SI/NO	Motivo
SQM	SQM (1998)	120.000	0	0	0	0	10	100	0	110	NO	*	SI	
	SQM (2009)	920.000	0	0	0	0	176	1.849	27	2.052	NO	*	SI	
	SQM (2010)	1.100.000	7	72	7	86	259	3.332	50	3.641	SI		SI	
	SQM (2013)	1.800.000	40	571	18	629	239	2.946	88	3.273	SI		SI	
Albermarle	Albermarle (2013)	136.000	2	18	1	21	32	371	22	425	SI		SI	

Tabla F-3: Emisiones Planta cloruro de potasio húmedo. Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

Empresa	Nombre Proyecto	Tpa	Emisiones Etapa de Construcción				Emisiones Etapa de Producción				Incorporación			
			Emisiones totales (ton)				Emisiones (t/año)				Const. y Aband.		Producción	
			CO	NOx	HC/COV	Total	CO	NOx	HC/COV	Total	SI/NO	Motivo	SI/NO	Motivo
SQM	SQM (1995)	300.000	0	0	0	0	1.416	12.949	338	14.703	NO	*	SI	
	SQM (1997)	250.000	0	0	0	0	633	4.487	324	5.444	NO	*	SI	
	SQM (2009)	1.550.000	0	0	0	0	0	0	0	0	NO	*	NO	*
	SQM (2010)	2.000.000	335	226	0	560	30	12	0	42	SI		NO	***
NX1	SLM NX Uno de Peine	200.000	581	5.396	0	5.977	796	7.239	0	8.035	NO	****	SI	

* Emisiones CO, Nox y HC no consideradas en estudio.

** Emisiones CO y HC no consideradas en estudio.

*** Emisiones reportadas solo involucran operación de cargador frontal en movimiento de material.

**** Emisiones fuera de rango.

Tabla F-4: Factores de CO₂eq a partir de Potencial de calentamiento global para horizontes de tiempo de 20 años. Fuente: US EPA, 2002.

Factores Conversión CO ₂ eq	
Nox	19
CO	7,7
HC/COV	14

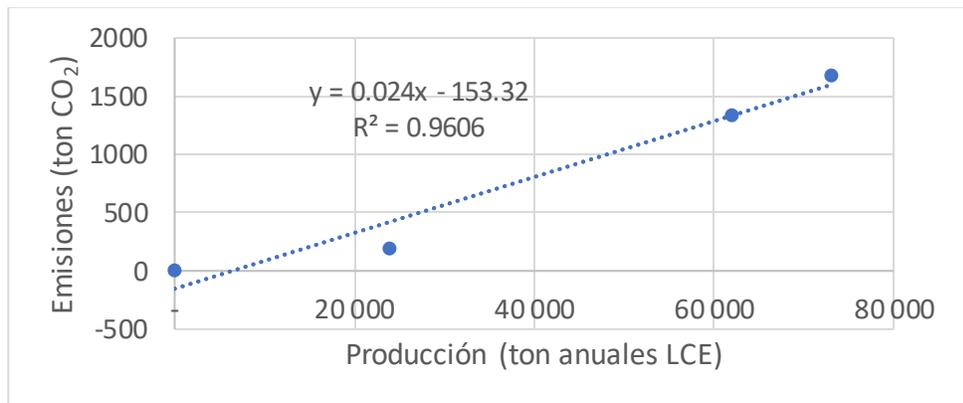


Figura F-1: Emisiones fase de construcción y abandono planta carbonato litio. Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

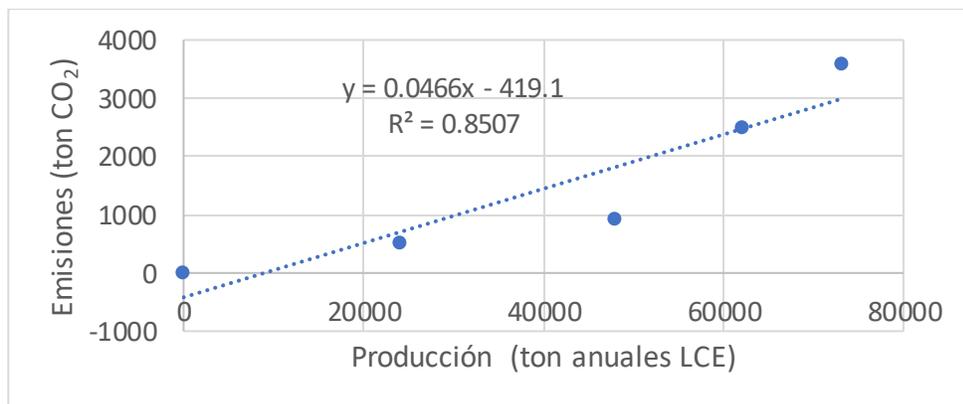


Figura F-2: Emisiones fase de operación planta carbonato litio. Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

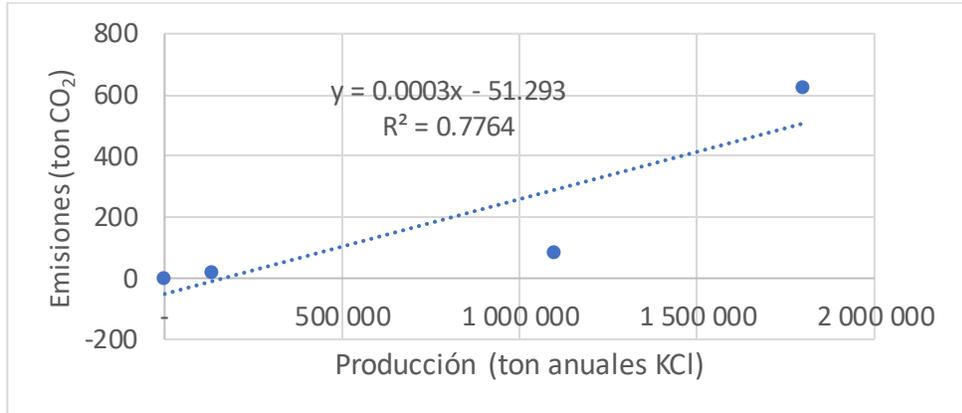


Figura F-3: Emisiones fase de construcción y abandono planta cloruro de potasio granulado.

Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

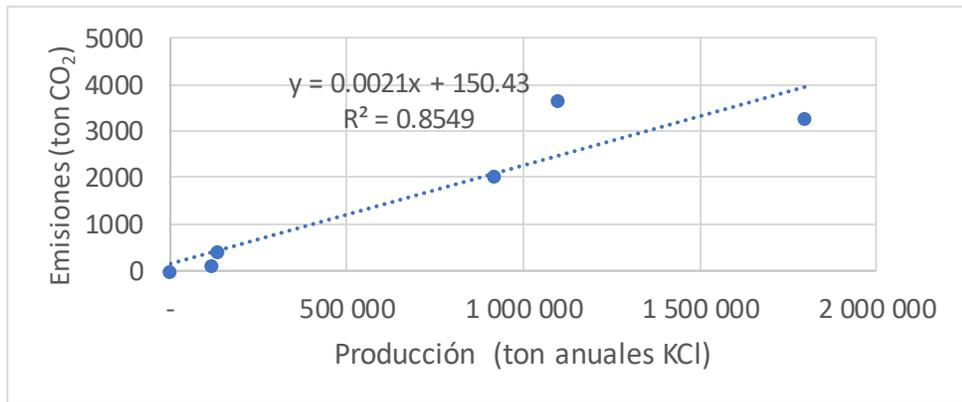


Figura F-4: Emisiones fase de operación planta cloruro de potasio granulado. Fuente:

Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

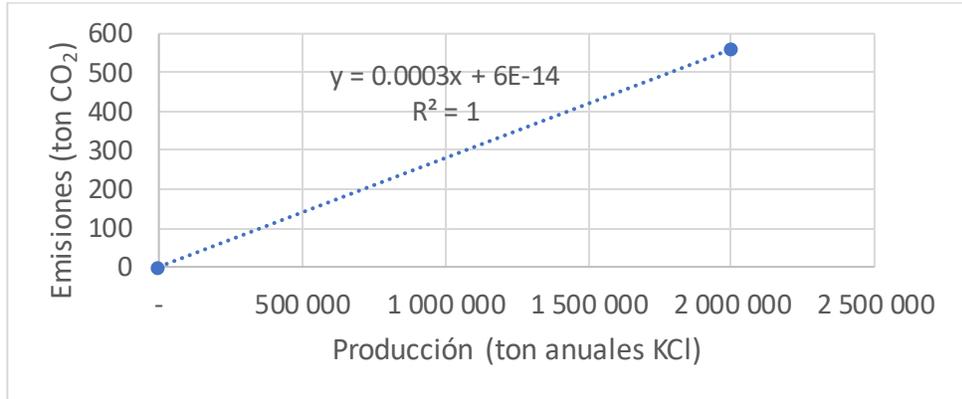


Figura F-5: Emisiones fase de construcción y abandono planta cloruro de potasio húmedo. Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

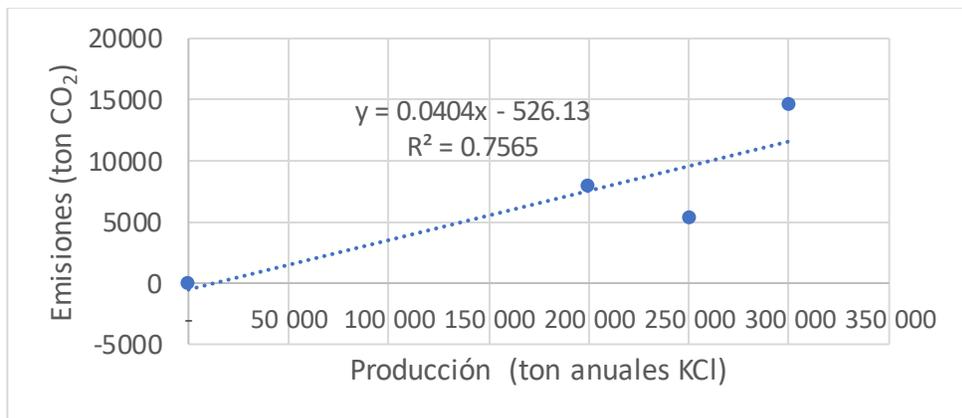


Figura F-6: Emisiones fase de operación planta cloruro de potasio húmedo. Fuente: Elaboración propia en base a EIA-DIA en Salar Atacama.

ANEXO G. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE FLUJO DE CAJA PRIVADO Y SOCIAL

Para la construcción del flujo de caja de evaluación privada y social, se consideró la estructura de flujo de caja presentada en la Tabla G-1 y Tabla G-2.

Tabla G-1: Construcción de flujo de caja para evaluación privada. Fuente: Elaboración propia.

(+) Ingresos por producción de LCE
(+) Ingresos por producción de KCI
(+) Ingresos totales
(-) Costo operacional LCE
(-) Costo operacional KCI
(-) Costo operacional total
(=) EBITDA
(-) Depreciación
(=) EBIT
(-) <i>Royalty</i> por arrendamiento para LCE
(-) <i>Royalty</i> por arrendamiento para KCI
(-) IEM
(-) Pagos sociales
(-) Impuesto de 1° categoría
(=) Flujo de caja operacional
(-) Inversión planta LCE
(-) Inversión planta MOP Húmedo y Granulado
(-) <i>Sustaining capex</i>
(=) Flujo de caja privado

Tabla G-2: Construcción de flujo de caja para evaluación social. Fuente: Elaboración propia.

(+) Flujo de caja privado
(+) <i>Royalty</i> por arrendamiento para LCE
(+) <i>Royalty</i> por arrendamiento para KCl
(+) IEM
(+) Pagos sociales
(+) Impuesto de 1° categoría
(+) Efectos indirectos para sociedad
(+) Efectos inducidos para sociedad
(-) Externalidades por emisiones atmosféricas
(=) Flujo de caja social

En esta estructura, los ingresos de producción de LCE se obtienen a partir de la estimación de producción de LCE generada por un cierto nivel de bombeo de salmuera (ecuación 4.1) y el precio estimado para el LCE considerando este nivel de producción (ecuación 4.4). Análogamente, los ingresos de producción de KCl se obtienen a partir de la estimación de producción de KCl (ecuación 4.3) y el precio de mercado estimado para el KCl (Figura 4-7). Por su parte, para el cálculo de los costos de producción se consideran los mismos niveles de producción de LCE y KCl (ecuaciones 4.1 y 4.3) y los costos unitarios indicados en la subsección 4.1.3.

Respecto a las inversiones, éstas se determinan en base a las estimaciones de inversión por aumento de capacidad productiva de LCE y KCl (ecuaciones 4.5 y 4.6), y el *sustaining capex* derivado a partir del aumento de capacidad productiva y la inversión unitaria descrita en la subsección 4.1.5. Esto, tomando en cuenta aumentos de capacidad productiva según lo descrito en la sección 4.2 (ecuaciones 4.11, 4.12 y 4.13). Considerando estas estimaciones de inversión, se calcula la depreciación de los activos y el EBIT.

En cuanto a los *royalties* por arrendamiento y pagos sociales a comunidades, su cálculo se desprende a partir de las tasas efectivas de *royalty* (Tabla 4-5) y tasas de pago social (subsección 4.1.4) que se aplican, separadamente, a los ingresos de producción de LCE y KCl. Así también, el IEM y el impuesto de 1° categoría se calcula según como fue definido en la subsección 4.1.4.

En base a lo anteriormente señalado, se determina el flujo de caja de evaluación privada según como se indica en la Tabla G-1.

Luego, considerando los efectos indirectos e inducidos generados por la explotación del salar (los cuales se calculan al aplicar los multiplicadores de producto definidos en la sección 4.1.6 sobre el flujo de caja privado), y los costos sociales debidos a las externalidades por emisiones atmosféricas (calculadas en base a lo señalado en la sección 4.1.7), se determina el flujo de caja de evaluación social, según como se indica en la Tabla G-2.

ANEXO H. RESULTADOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA ÓPTIMA DESDE EL PUNTO DE VISTA PRIVADO Y SOCIAL

Tabla H-1: Resultados de evaluación económica óptima desde el punto de vista del planificador privado. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Unidad	Sum/ Prom	VAN 2017 (8%)	VAN 2017 (6%)	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Salmuera Extraída	Km ³ / Día	6.792	2.402	3.010	97	110	139	140	141	170	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286	286
Producción LCE Cuota Nueva	kton	2.249	692	905	0	0	0	0	0	0	79	127	124	122	119	117	115	113	111	110	108	106	105	103	102	101	99	98	97	96	95
Producción LCE Salar	kton	4.490	1.661	2.060	75	85	106	106	106	126	210	207	203	200	197	195	192	190	188	185	183	181	179	178	176	174	173	171	169	168	166
Capacidad producción LCE Cuota Nueva	kton	2.663	782	1.034	0	0	0	0	0	0	63	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Capacidad producción LCE Salar Atacama	kton	5.051	1.807	2.257	75	85	106	121	121	132	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
Precio LCE	US\$/ Ton LCE	7.590			13.720	12.607	11.267	9.688	8.473	7.572	6.603	6.198	6.325	6.909	7.679	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743	6.743
Ingresos LCE	MUS\$	15.165	4.652	6.090	0	0	0	0	0	0	525	788	786	841	917	790	776	763	751	739	728	717	707	697	688	679	670	662	654	646	639
Producción KCl Cuota Nueva	kton	54.240	15.481	20.599	0	0	0	0	0	0	2.043	2.097	2.153	2.211	2.269	2.329	2.391	2.454	2.519	2.585	2.653	2.723	2.795	2.868	2.943	3.020	2.985	2.907	2.834	2.764	2.697
Producción KCl Salar	kton	69.912	26.214	32.230	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.179	2.233	2.289	2.347	2.405	2.465	2.527	2.590	2.655	2.721	2.789	2.859	2.931	3.004	3.079	3.156	3.121	3.043	2.970	2.900	2.833
Capacidad producción KCl Salar Atacama	kton	74.752	27.961	34.425	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156	3.156
Precio KCl	US\$/Ton KCl	257			238	238	239	241	243	246	248	251	253	255	257	260	262	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264
Ingresos KCl	MUS\$	14.185	4.020	5.359	0	0	0	0	0	0	507	526	545	564	584	605	626	648	665	683	700	719	738	757	777	797	788	767	748	730	712
Costo LCE Cuota Nueva	MUS\$	-4.400	-1.354	-1.770	0	0	0	0	0	0	-155	-249	-243	-238	-234	-229	-225	-221	-218	-214	-211	-208	-205	-202	-200	-197	-194	-192	-190	-187	-185
Costo KCl Cuota Nueva	MUS\$	-8.136	-2.322	-3.090	0	0	0	0	0	0	-306	-315	-323	-332	-340	-349	-359	-368	-378	-388	-398	-408	-419	-430	-441	-453	-448	-436	-425	-415	-405
EBITDA Cuota Nueva	MUS\$	16.814	4.996	6.588	0	0	0	0	0	0	570	750	765	836	927	816	819	822	820	819	819	820	820	822	824	826	816	801	787	774	761
Depreciación Cuota Nueva	MUS\$	-2.045	-739	-932	0	0	0	0	-24	-76	-124	-126	-130	-134	-138	-141	-145	-149	-129	-81	-59	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-39
EBIT para Cuota Nueva	MUS\$	14.769	4.257	5.657	0	0	0	0	-24	-76	446	624	635	702	790	675	673	672	691	738	760	758	759	761	763	765	755	740	726	713	722

Ítem	Unidad	Sum/ Prom	VAN 2017 (8%)	VAN 2017 (6%)	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Royalty por LCE	MUS\$	-1.394	-433	-565	0	0	0	0	0	0	-47	-70	-70	-75	-126	-70	-69	-68	-67	-66	-65	-64	-63	-62	-61	-60	-60	-59	-58	-58	-57
Royalty por KCI	MUS\$	-426	-121	-161	0	0	0	0	0	0	-15	-16	-16	-17	-18	-18	-19	-19	-20	-20	-21	-22	-22	-23	-23	-24	-24	-23	-22	-22	-21
Total Royalty por LCE y KCI	MUS\$	-1.819	-554	-726	0	0	0	0	0	0	-62	-86	-86	-92	-143	-88	-88	-87	-87	-86	-86	-85	-85	-85	-85	-84	-83	-82	-81	-79	-78
IEM	MUS\$	-951	-271	-361	0	0	0	0	0	0	-24	-38	-38	-42	-52	-41	-40	-40	-42	-49	-50	-50	-50	-50	-50	-51	-50	-49	-48	-47	-48
Pagos sociales	MUS\$	-1.069	-316	-417	0	0	0	0	0	0	-38	-48	-49	-51	-55	-51	-51	-51	-52	-52	-52	-52	-53	-53	-53	-54	-53	-52	-51	-50	-49
Impuesto de 1ª Categoría	MUS\$	-2.951	-843	-1.122	0	0	0	0	0	0	-60	-122	-125	-140	-146	-134	-133	-133	-138	-149	-154	-154	-154	-155	-155	-156	-154	-150	-148	-145	-148
Flujo de caja operacional	MUS\$	10.024	3.013	3.961	0	0	0	0	0	0	386	456	467	511	532	503	506	509	502	484	477	478	478	479	480	482	476	468	460	452	438
Inversión Planta LCE	MUS\$	-952	-652	-714	0	0	0	-238	-524	-190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Planta MOP Húmedo	MUS\$	-445	-215	-254	0	0	0	0	0	-253	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-192	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Planta MOP Granulado	MUS\$	-64	-30	-36	0	0	0	0	0	-35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sustaining Capex	MUS\$	-799	-234	-310	0	0	0	0	0	0	-19	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39
Inversión Total	MUS\$	-2.260	-1.132	-1.314	0	0	0	-238	-524	-478	-19	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-260	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39
Flujo de caja Privado	MUS\$	7.764	1.881	2.647	0	0	0	-238	-524	-478	367	417	428	472	493	464	467	470	463	224	438	439	439	440	441	443	437	429	421	413	399
Efecto Indirecto	MUS\$	4.745	1.430	1.878	0	0	0	0	0	0	193	220	226	249	260	244	246	248	244	118	231	231	231	232	233	233	230	226	222	218	210
Efecto Inducido	MUS\$	5.927	1.786	2.346	0	0	0	0	0	0	241	275	282	311	324	305	307	310	305	147	288	289	289	290	291	292	288	282	277	272	263
Costo social de emisiones	MUS\$	-80	-23	-31	0	0	0	0	0	0	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
Flujo de Caja Social	MUS\$	25.145	7.058	9.468	0	0	0	-238	-524	-478	982	1.203	1.230	1.353	1.468	1.324	1.329	1.336	1.327	821	1.295	1.296	1.298	1.300	1.304	1.308	1.291	1.266	1.243	1.221	1.191

Tabla H-2: Resultados de evaluación económica óptima desde el punto de vista del planificador social. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Unidad	Sum/ Prom	VAN 2017 (8%)	VAN 2017 (6%)	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	
Salmuera Extraída	Km 3/Día	10.247	3.441	4.374	97	110	139	140	141	170	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	
Producción LCE Cuota Nueva	hton	4.177	1.311	1.706	0	0	0	0	0	0	200	243	236	230	224	218	214	209	205	201	197	193	190	187	184	181	178	176	173	171	168	
Producción LCE Salar	hton	6.418	2.281	2.861	75	85	106	106	106	126	331	322	315	308	302	296	291	286	281	277	272	268	265	261	258	254	251	248	245	243	240	
Capacidad producción LCE Cuota Nueva	hton	5.204	1.545	2.037	0	0	0	0	0	0	184	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	251	
Capacidad producción LCE Salar Atacama	hton	7.592	2.571	3.260	75	85	106	121	121	132	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	
Precio LCE	US\$/Ton LCE	6.623			13.720	12.607	11.267	9.688	8.473	7.572	6.122	5.296	5.039	5.272	5.771	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	
Ingresos LCE	MUS\$	22.949	7.205	9.374	0	0	0	0	0	0	1.227	1.287	1.189	1.210	1.291	1.201	1.174	1.149	1.126	1.104	1.084	1.064	1.046	1.028	1.012	996	980	966	951	938	925	
Producción KCl Cuota Nueva	hton	56.376	15.778	21.077	0	0	0	0	0	0	2.043	2.097	2.153	2.211	2.269	2.329	2.391	2.454	2.519	2.585	2.653	2.723	2.795	2.868	2.943	3.020	3.099	3.180	3.263	3.347	3.435	
Producción KCl Salar	hton	72.048	26.510	32.709	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.179	2.233	2.289	2.347	2.405	2.465	2.527	2.590	2.655	2.721	2.789	2.859	2.931	3.004	3.079	3.156	3.235	3.316	3.399	3.483	3.571	
Capacidad producción KCl Salar Atacama	hton	79.317	28.826	35.713	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.136	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	2.722	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571	3.571
Precio KCl	US\$/Ton KCl	257			238	238	239	241	243	246	248	251	253	255	257	260	262	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	
Ingresos KCl	MUS\$	14.749	4.098	5.485	0	0	0	0	0	0	507	526	545	564	584	605	626	648	665	683	700	719	738	757	777	797	818	839	861	884	907	
Costo LCE Cuota Nueva	MUS\$	-8.172	-2.565	-3.338	0	0	0	0	0	0	-392	-475	-462	-449	-438	-427	-418	-409	-401	-393	-385	-379	-372	-366	-360	-354	-349	-343	-338	-334	-329	
Costo KCl Cuota Nueva	MUS\$	-8.456	-2.367	-3.162	0	0	0	0	0	0	-306	-315	-323	-332	-340	-349	-359	-368	-378	-388	-398	-408	-419	-430	-441	-453	-465	-477	-489	-502	-515	
EBITDA Cuota Nueva	MUS\$	21.070	6.371	8.359	0	0	0	0	0	0	1.035	1.023	949	994	1.097	1.029	1.024	1.020	1.013	1.006	1.001	996	992	989	987	986	985	985	985	986	987	
Depreciación Cuota Nueva	MUS\$	-4.835	-1.849	-2.302	0	0	0	0	-75	-240	-328	-334	-342	-349	-357	-364	-372	-379	-312	-154	-114	-116	-116	-116	-116	-116	-116	-116	-116	-116	-75	
EBIT para Cuota Nueva	MUS\$	16.234	4.522	6.058	0	0	0	0	-75	-240	707	689	608	645	741	665	652	641	701	852	887	880	877	874	872	870	869	869	869	870	912	

Ítem	Unidad	Sum/ Prom	VAN 2017 (8%)	VAN 2017 (6%)	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Royalty por LCE	MUS\$	-1.738	-550	-714	0	0	0	0	0	0	-109	-97	-89	-91	-97	-90	-88	-86	-84	-83	-81	-80	-78	-77	-76	-75	-74	-72	-71	-70	-69
Royalty por KCI	MUS\$	-442	-123	-165	0	0	0	0	0	0	-15	-16	-16	-17	-18	-18	-19	-19	-20	-20	-21	-22	-22	-23	-23	-24	-25	-25	-26	-27	-27
Total Royalty por LCE y KCI	MUS\$	-2.181	-673	-879	0	0	0	0	0	0	-124	-112	-106	-108	-114	-108	-107	-106	-104	-103	-102	-101	-101	-100	-99	-99	-98	-98	-97	-97	
IEM	MUS\$	-940	-260	-349	0	0	0	0	0	0	-39	-35	-31	-33	-37	-34	-33	-32	-35	-51	-53	-53	-53	-53	-52	-52	-52	-52	-52	-52	
Pagos sociales	MUS\$	-1.361	-408	-537	0	0	0	0	0	0	-63	-65	-63	-64	-68	-65	-65	-65	-65	-65	-64	-64	-64	-64	-65	-65	-65	-65	-65	-66	-66
Impuesto de 1ª Categoría	MUS\$	-3.173	-864	-1.163	0	0	0	0	0	0	-45	-129	-110	-119	-141	-124	-121	-118	-134	-171	-180	-179	-178	-177	-177	-177	-177	-177	-177	-188	
Flujo de caja operacional	MUS\$	13.415	4.166	5.432	0	0	0	0	0	0	765	682	640	670	737	699	698	699	674	616	601	599	597	595	594	593	593	593	594	582	
Inversión Planta LCE	MUS\$	-2.997	-2.051	-2.248	0	0	0	-749	-1.649	-599	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Planta MOP Húmedo	MUS\$	-611	-264	-319	0	0	0	0	0	-253	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Planta MOP Granulado	MUS\$	-80	-35	-42	0	0	0	0	0	-35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Sustaining Capex</i>	MUS\$	-1.561	-464	-611	0	0	0	0	0	0	-55	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
Inversión Total	MUS\$	-5.249	-2.813	-3.221	0	0	0	-749	-1.649	-887	-55	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-479	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
Flujo de caja Privado	MUS\$	8.165	1.353	2.211	0	0	0	-749	-1.649	-887	710	606	565	595	662	623	623	624	599	138	525	523	521	520	519	518	518	518	518	519	507
Efecto Indirecto	MUS\$	6.034	1.889	2.457	0	0	0	0	0	0	374	319	298	314	349	328	328	329	316	73	277	276	275	274	273	273	273	273	273	267	
Efecto Inducido	MUS\$	7.536	2.359	3.068	0	0	0	0	0	0	467	399	372	392	436	410	410	411	394	91	346	344	343	342	341	341	341	341	341	341	
Costo social de emisiones	MUS\$	-88	-25	-33	0	0	0	0	0	0	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
Flujo de Caja Social	MUS\$	29.302	7.781	10.631	0	0	0	-749	-1.649	-887	1.818	1.662	1.539	1.620	1.803	1.689	1.683	1.681	1.643	687	1.544	1.537	1.531	1.526	1.522	1.520	1.518	1.518	1.519	1.520	

ANEXO I. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE SENSIBILIDAD

En el presente anexo se detallan los resultados obtenidos para la sensibilización del escenario base en lo que respecta a las expectativas de crecimiento de la demanda de LCE; la oferta internacional de LCE; el precio inicial de LCE considerado en el modelo de evaluación para el año 2017; el costo de producción de carbonato de litio; el *royalty* de arrendamiento por explotar mineral en el Salar de Atacama; el nivel de reservas presentes en el Salar; la participación de mercado de las empresas del Salar de Atacama que explotan cloruro de potasio; el número de aumentos de capacidad productiva de cloruro de potasio en el horizonte de evaluación; y la tasa social de descuento. Respecto a estas, se presentan las curvas de VAN privado y social obtenido ante aumentos en la cuota de extracción de litio; la variación de la cuota y el valor económico bajo una evaluación óptima desde la perspectiva del planificador privado y social; y la variación de las capacidades productivas de LCE y KCL bajo una evaluación óptima privada y social.

I.1 VAN privado y VAN social v/s cuota adicional de extracción de litio

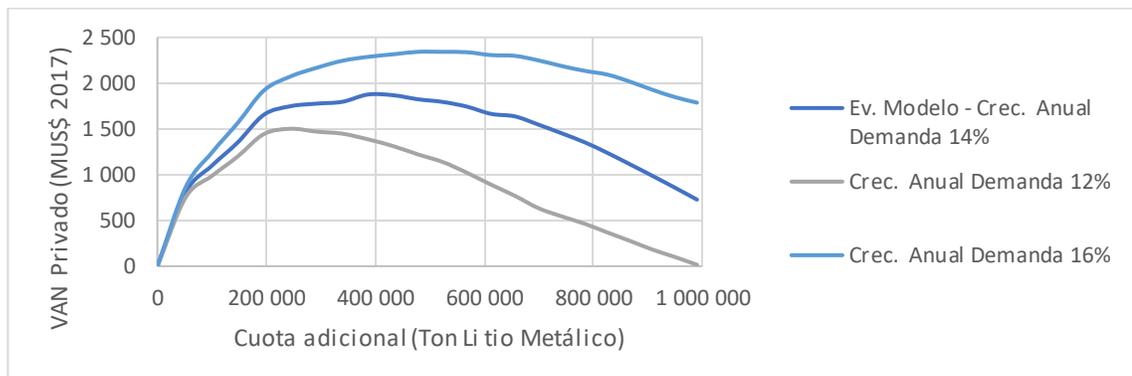


Figura I-1: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de crecimiento anual de la demanda de 12%, 14% y 16%. Fuente: Elaboración propia.

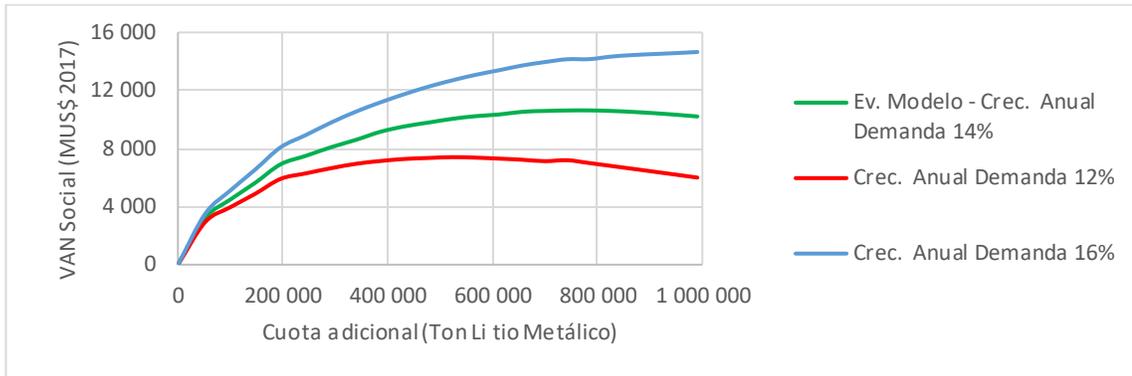


Figura I-2: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de crecimiento anual de la demanda de 12%, 14% y 16%. Fuente: Elaboración propia.

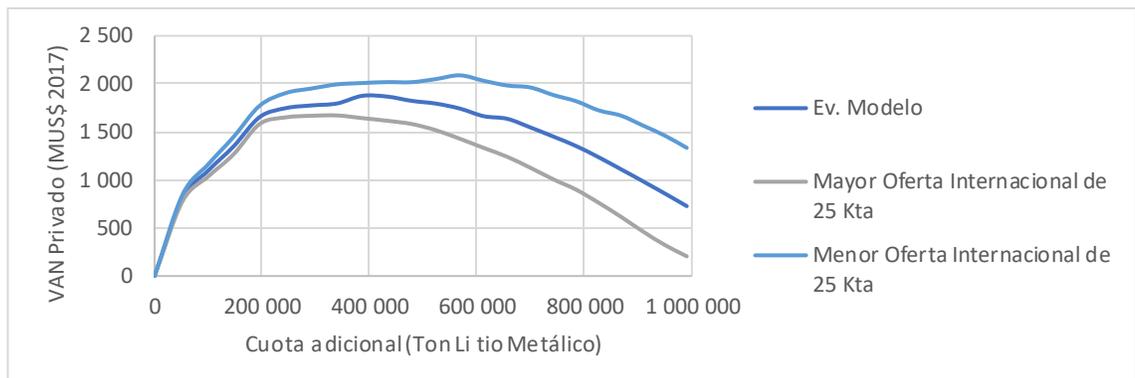


Figura I-3: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de mayor o menor oferta internacional de LCE de 25 kton/año. Fuente: Elaboración propia.

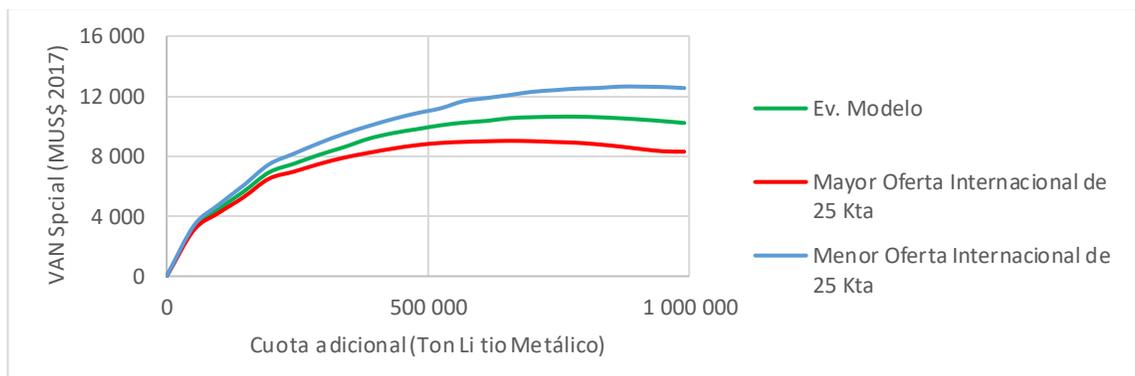


Figura I-4: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de mayor o menor oferta internacional de LCE de 25 kton/año. Fuente: Elaboración propia.

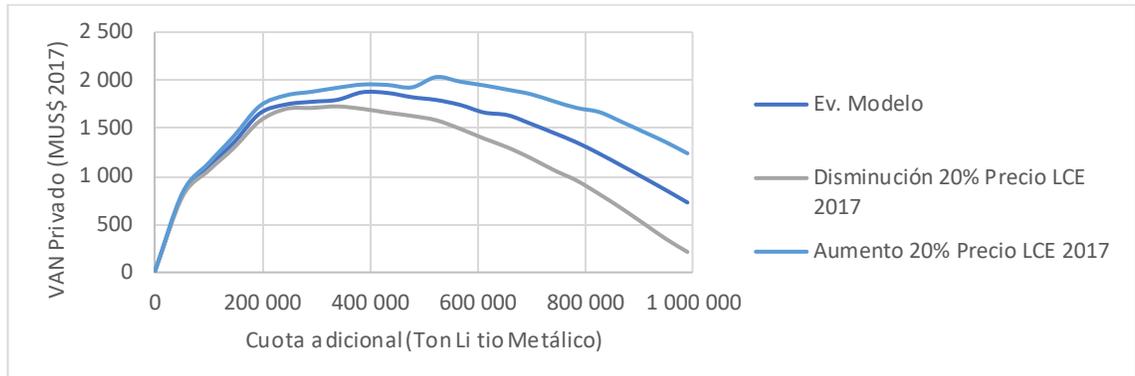


Figura I-5: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de variación de 20% en el precio de LCE de 2017. Fuente: Elaboración propia.

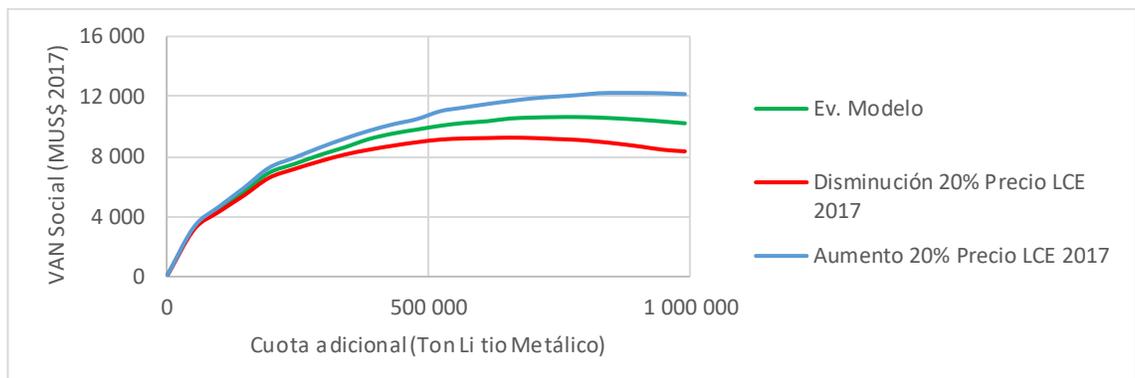


Figura I-6: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de variación de 20% en el precio de LCE de 2017. Fuente: Elaboración propia.

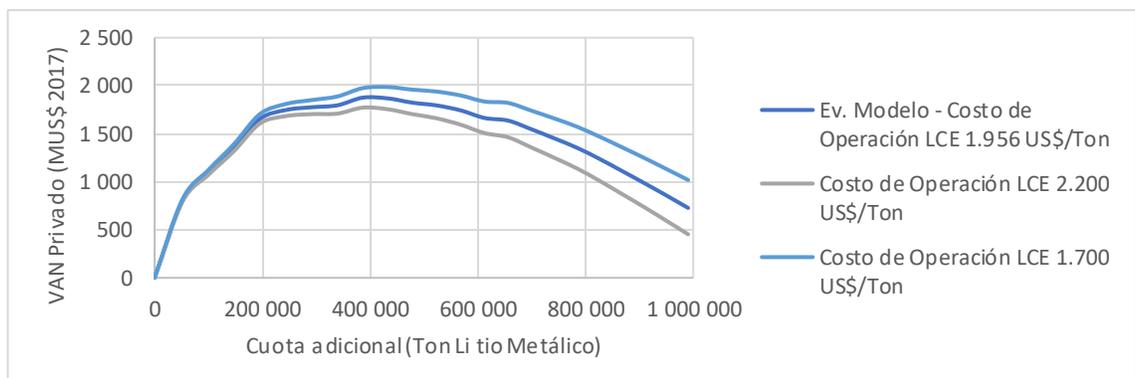


Figura I-7: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con costo operacional de 1.700 US\$/Ton y 2.200 US\$/Ton. Fuente: Elaboración propia.

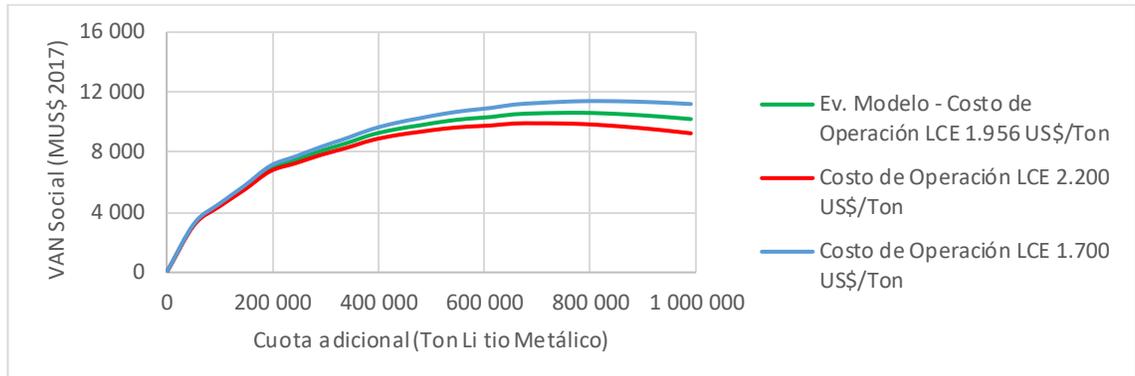


Figura I-8: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con costo operacional de 1.700 US\$/Ton y 2.200 US\$/Ton. Fuente: Elaboración propia.

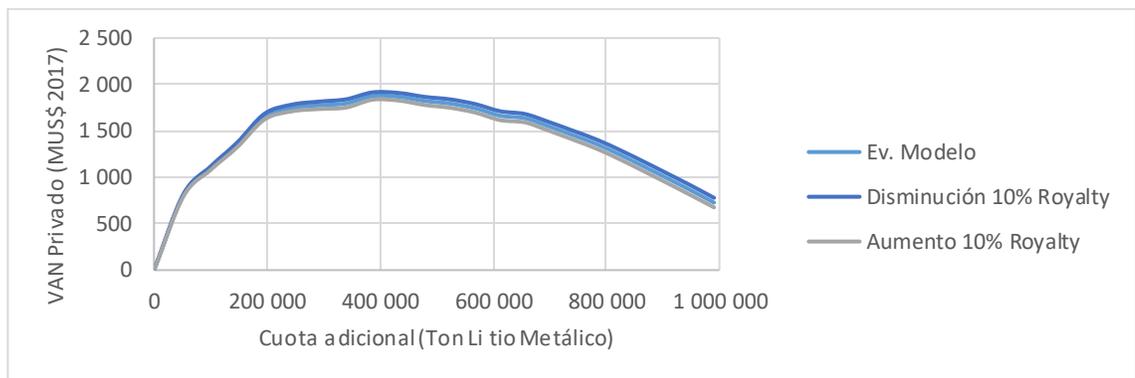


Figura I-9: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con variación de 10% en royalty de arrendamiento del Salar. Fuente: Elaboración propia.

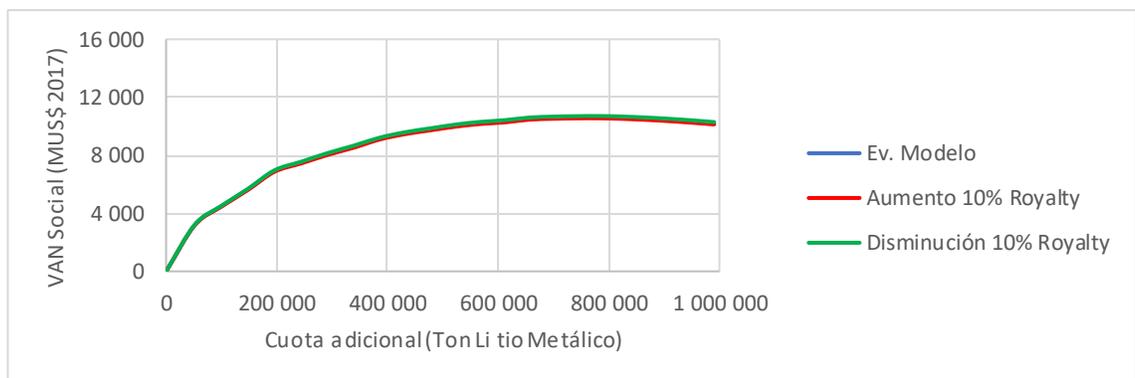


Figura I-10: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con variación de 10% en royalty de arrendamiento del Salar. Fuente: Elaboración propia.

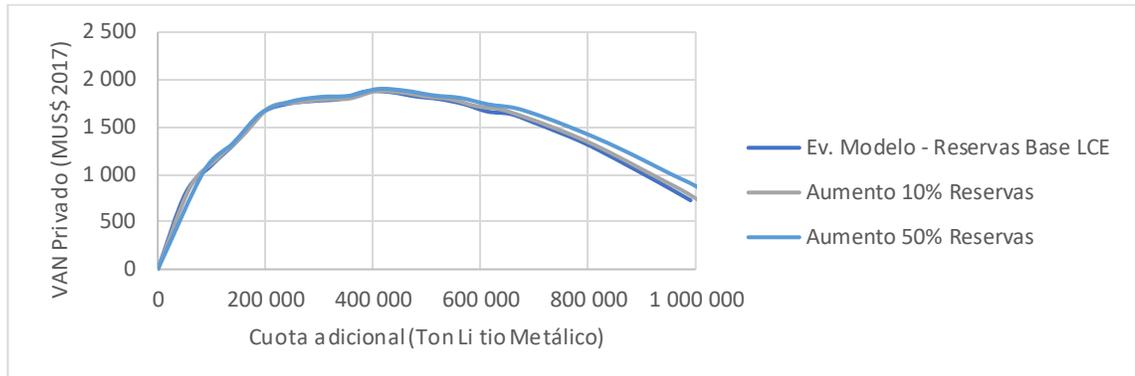


Figura I-11: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de aumento de reservas en 10% y 50%. Fuente: Elaboración propia.

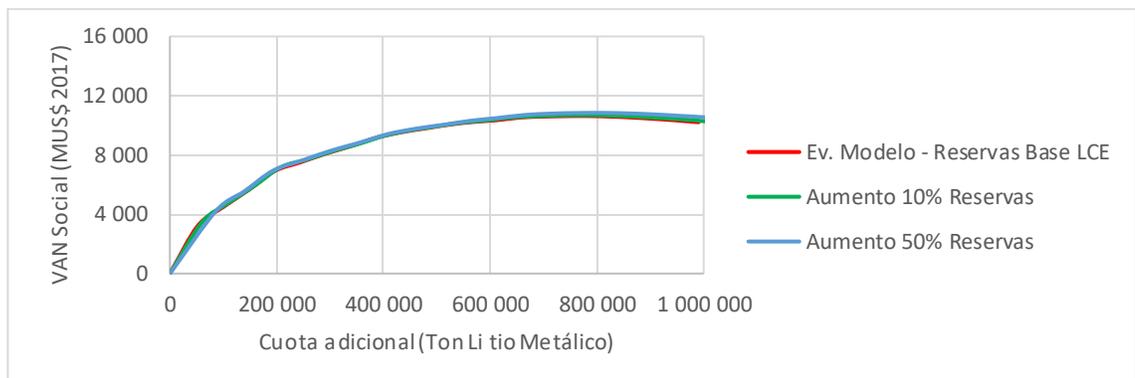


Figura I-12: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de aumento de reservas en 10% y 50%. Fuente: Elaboración propia.

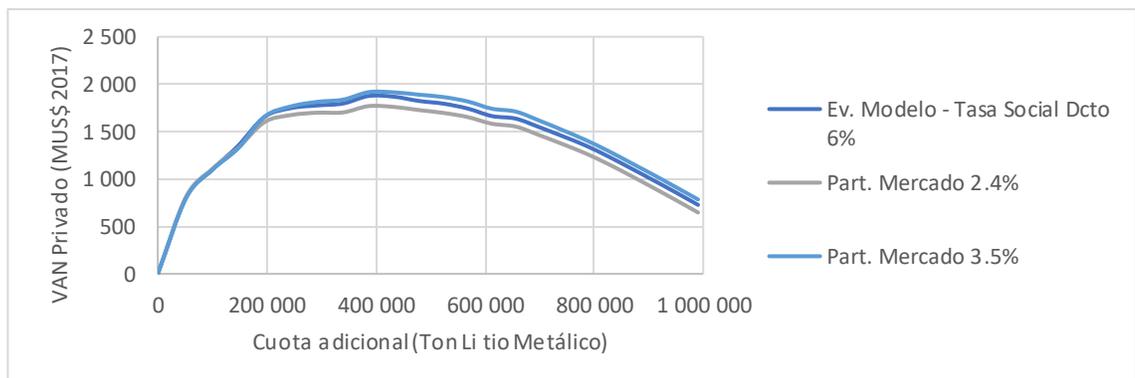


Figura I-13: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con participación de mercado KCl de 2,4% y 3,5%. Fuente: Elaboración propia.

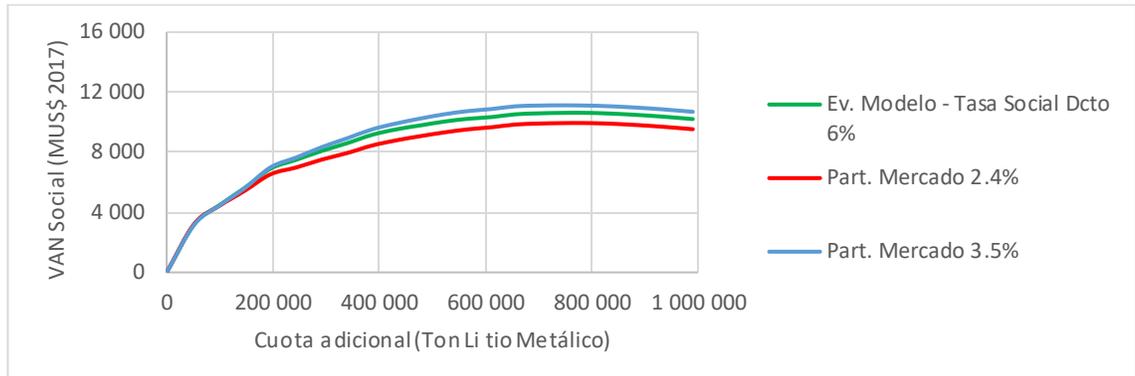


Figura I-14: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con participación de mercado KCl de 2,4% y 3,5%. Fuente: Elaboración propia.

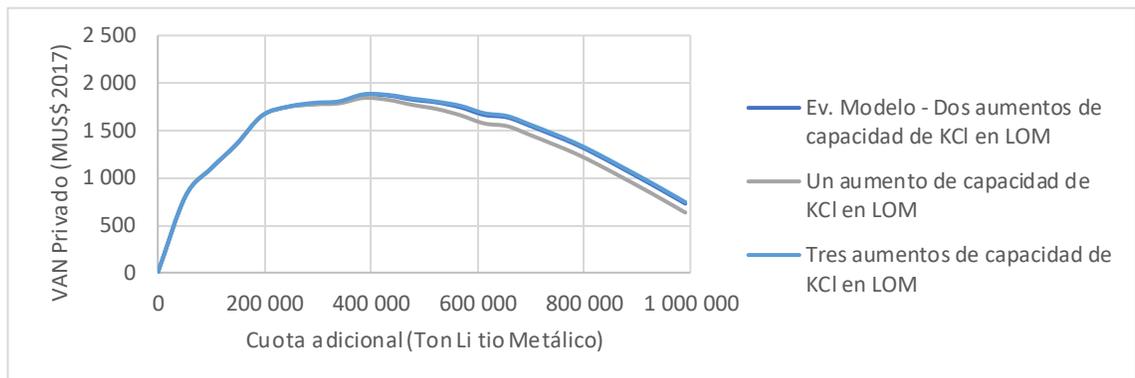


Figura I-15: VAN privado (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con 1, 2 y 3 aumentos de capacidad de KCl. Fuente: Elaboración propia.

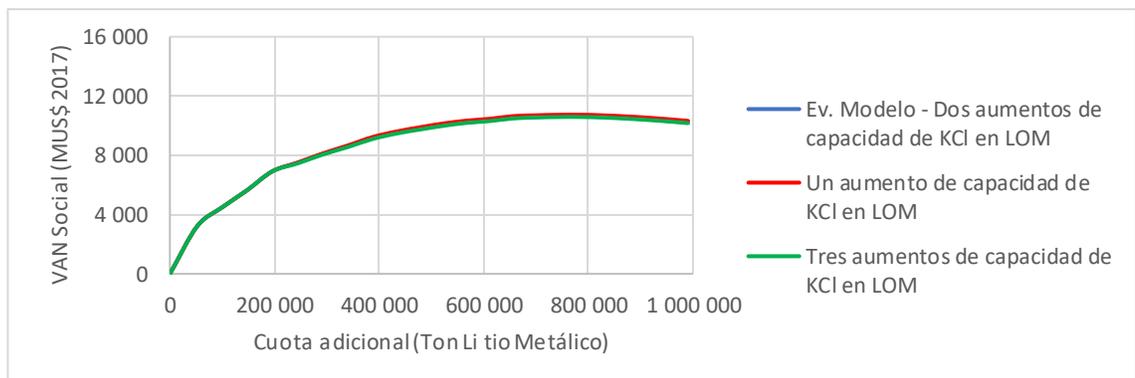


Figura I-16: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios con 1, 2 y 3 aumentos de capacidad de KCl. Fuente: Elaboración propia.

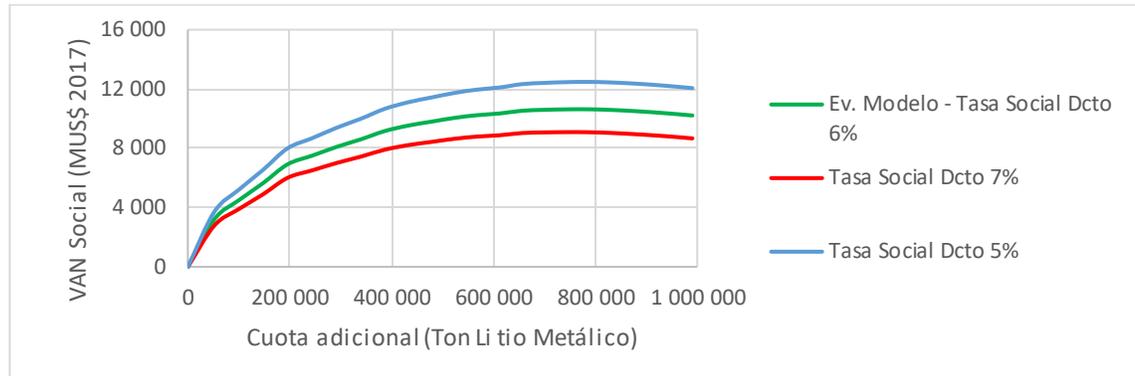


Figura I-17: VAN social (MUS\$ 2017) v/s nueva cuota de litio metálico, para escenarios de tasa de descuento social de 5%, 6% y 7%. Fuente: Elaboración propia.

I.2 Cuota óptima de extracción de litio desde la perspectiva del planificador privado y planificador social

Tabla I-1: Cuota óptima de extracción de litio y VAN privado o social generado según escenario analizado. Fuente: Elaboración propia

Escenario de sensibilización	Planificación privada		Planificación social	
	Cuota óptima	VAN privado	Cuota óptima	VAN social
Escenario Base	422.497	1.881	784.667	10.631
Crecimiento anual de demanda 12%	246.170	1.506	523.687	7.408
Crecimiento anual de demanda 16%	496.958	2.353	991.714	15.159
Mayor oferta internacional de 25 kton/año	340.177	1.672	656.637	9.021
Menor oferta internacional de 25 kton/año	554.928	2.109	889.424	12.653
Disminución 20% Precio LCE 2017	340.177	1.729	656.637	9.258
Aumento 20% Precio LCE 2017	524.522	2.036	881.024	12.244
Costo de Operación LCE 2.200 US\$/Ton	391.045	1.775	700.724	9.937
Costo de Operación LCE 1.700 US\$/Ton	441.246	1.988	833.115	11.412
Aumento 10% royalty arrendamiento	381.559	1.842	784.667	10.555
Disminución 10% royalty arrendamiento	435.006	1.914	784.667	10.707
Aumento 10% Reservas	425.571	1.889	776.915	10.693
Aumento 50% Reservas	427.734	1.913	813.256	10.848
Part. Mercado de KCl de 2,4%	391.045	1.772	770.312	9.957
Part. Mercado de KCl de 3,5%	438.127	1.918	744.350	11.136
Un aumento de capacidad de KCl en LOM	391.045	1.846	758.793	10.739
Tres aumentos de capacidad KCl en LOM	409.912	1.891	750.133	10.594
Tasa social de descuento 7%	422.497	1.881	744.350	9.097
Tasa social de descuento 5%	422.497	1.881	830.280	12.447

I.3 Capacidad óptima de producción de LCE y KCl desde la perspectiva del planificador privado y planificador social

Tabla I-2: Capacidad de producción óptima de LCE y KCl desde el punto de vista del planificador privado y social según escenario analizado. Fuente: Elaboración propia.

Escenario	Planificación privada óptima		Planificación social óptima	
	Capacidad LCE para Salar Atacama (kton/año)	Capacidad final de KCl para Salar Atacama (kton/año)	Capacidad LCE para Salar Atacama (kton/año)	Capacidad final de KCl para Salar Atacama (kton/año)
Escenario Base	210	3.156	331	3.571
Crecimiento anual demanda 12%	155	2.662	243	3.399
Crecimiento anual demanda 16%	234	3.334	405	3.571
Mayor oferta internacional de 25 kton/año	184	2.931	287	3.571
Menor oferta internacional de 25 kton/año	253	3.484	368	3.571
Disminución 20% Precio LCE 2017	184	2.931	287	3.571
Aumento 20% Precio LCE 2017	243	3.399	365	3.571
Costo de Operación LCE 2.200 US\$/Ton	200	3.079	302	3.571
Costo de Operación LCE 1.700 US\$/Ton	216	3.219	348	3.571
Aumento 10% royalty arrendamiento	197	3.062	331	3.571
Disminución 10% royalty arrendamiento	214	3.186	331	3.571
Aumento 10% Reservas	210	3.201	326	3.571
Aumento 50% Reservas	208	3.316	332	3.571
Part. Mercado de KCl de 2,4%	200	2.819	326	2.819
Part. Mercado de KCl de 3,5%	215	3.374	317	4.070
Un aumento de capacidad de KCl en LOM	200	3.079	322	3.571
Tres aumentos de capacidad de KCl en LOM	206	3.004	319	3.571
Tasa social de descuento 7%	210	3.156	317	3.571
Tasa social de descuento 5%	210	3.156	347	3.571

