



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTRUCTURACIÓN, IDENTIFICACIÓN, MEDICIÓN Y ANÁLISIS  
MICROECONÓMICO PARA EL PROYECTO DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
DESALADA EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN ECONOMÍA APLICADA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

TOMÁS ANTONIO LOZANO FONFACH

PROFESOR GUÍA:  
JOSÉ MIGUEL CRUZ GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
GUILLERMO SÁEZ SÁEZ  
SOFÍA CORREA DEISLER

SANTIAGO DE CHILE  
2023

# Resumen

El propósito de esta tesis es realizar un análisis económico a la estructura de costos para el proyecto de una planta desaladora, la que busca ser la más grande de América Latina ubicada en el norte del país.

El problema de la escasez hídrica en el norte del país es una problemática que está tomando fuerza y su magnitud crecerá a futuro para las personas y el desarrollo de la actividad económica de la zona.

Por esto, se realizará un estudio económico del proyecto desde una mirada teórica como punto de referencia y llevarlo al desarrollo empírico de la estructura de sus costos, buscar que factores componen las economías de escala y mostrar bajo que condiciones el servicio de CRAMSA generan los incentivos correctos y un mayor valor para las mineras de la zona.

Para esto se realiza una serie de ejercicios empíricos y teóricos los que determinan la composición y estructura de los costos en base a los múltiples escenarios de distribución posible.

En base al análisis realizado se determinó cual es la sección menos costos de la red, que las economías de escala se encuentra principalmente en el CAPEX del proyecto, presentando los diferentes costos por sección en la red de distribución. Se determina cual es la forma de distribuir los costos entre los clientes de manera que todos paguen lo que corresponde, evitando posibles casos de subvenciones entre nodos.

En base a los resultados obtenidos de todos los costos que integran el proyecto, las tuberías son la pieza de infraestructura que genera la mayor cantidad de economías de escala, le sigue las estaciones de bombeo y la desalación, generando una estructura de costos atractiva para todas las mineras del caso de estudio. Así resulta, en que todos los clientes mineros se ven beneficiados con un incremento de la utilidad al contratar el servicio de CRAMSA, incluyendo a los cliente más caros debido a la entrada temprana como único distribuidor en la zona.

*Dedicarle este trabajo como agradecimiento a mi padre Martín y mi madre Paola por siempre creer en mi. A mis hermanas Aranza y Josefa por darle sentido del humor a la vida y a los que partieron.*

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivo del Trabajo</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>El Mercado del Agua Desalada</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Marco Conceptual</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Modelo Económico</b>	<b>22</b>
5.1	Lineamiento General . . . . .	22
5.2	Proyecto Conjunto Cooperativo . . . . .	23
5.3	Supuestos del Modelo . . . . .	25
5.3.1	Tamaño de Clientes Mineros . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Modelo de las Firmas</b>	<b>28</b>
6.1	Precio del Mineral . . . . .	28
6.2	Función de Producción . . . . .	29
6.3	Función de Costos Mineras . . . . .	33
6.4	¿Cómo Influye CRAMSA en las Firmas? . . . . .	40
6.5	Adaptación a CRAMSA . . . . .	42
6.5.1	Función de Producción . . . . .	42
6.5.2	Función de Costos CRAMSA . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Estimación Empírica Utilizando el Modelo de CRAMSA</b>	<b>47</b>
7.1	Datos a Utilizar . . . . .	47
7.2	Estructura de Costos Empírica . . . . .	48
7.3	Forma Analítica Estructura de Costos Modelo Empírico . . . . .	50
7.4	Red de Distribución y Clientes . . . . .	56
7.5	Costos por Ramas . . . . .	58
7.5.1	Estructura de Costos red demanda fija . . . . .	58
7.5.2	Estructura de Costos por Ramas . . . . .	64
7.6	Optimización Escenario Base . . . . .	67
7.7	Curvas de Costos Clientes . . . . .	73
<b>8</b>	<b>Discusión y Resultados</b>	<b>80</b>
8.1	Resultados . . . . .	80
8.2	Limitaciones del Modelo . . . . .	91

9 Conclusiones	94
Bibliografía	97
Anexo	98

# Capítulo 1

## Introducción

En décadas pasadas la mirada de las naciones se encontraba orientada exclusivamente en producir, explotar recursos naturales para generar consumo. Los primeros acuerdos de relevancia medio ambiental tuvieron sus primeras ediciones en el año 1949, en la conferencia científica de las naciones unidas, que involucraba temáticas acerca la conservación y gestión de los recursos naturales, si bien esta comisión se centraba en el manejo de recursos, el foco en la conservación del medio ambiente era mínimo. Fue hasta el año 1972 donde se enunció la declaración sobre los principios para la conservación y mejora del medio ambiente junto a un plan de acción que contenía recomendaciones de acción medioambiental internacional.

La historia deja en evidencia que el plan de acción no fue suficiente, y actualmente se está presenciando las consecuencias del constante daño ambiental que se generó durante siglos, donde muchas de las acciones cometidas generaron daños de caracter irreversibles al ecosistema.

El calentamiento global ha provocado un incremento en las temperaturas, esto ha llevado al derretimiento de los polos, la alteración de los ecosistemas, cambios en el ciclo del agua y sequía en todo el mundo. En Chile los efectos han quedado al descubierto con la escasez de lluvias, la sequía de lagos y la reducción de cauces en los ríos.

Chile es un país productor exportador, la base de la economía chilena se centra en la exportación de materias primas, siendo la minería la actividad que brinda gran parte del ingreso para el país. La zona con la mayor actividad,es la región norte del país, una zona árida la que históricamente se ha caracterizado por la escasez de agua y en las condiciones actuales se acentúa esta característica.

Profundizando en la minería, se trata de una actividad que demanda de mucha agua dulce esto se explica porque el utilizar agua salada, las sales del agua dañarían el procesamiento de los minerales y la maquinaria. Este proceso extractivo genera externalidades negativas, con sus desechos y la gran magnitud de agua dulce extraída, generando perjuicios mediambientales.

Existen dos formas de obtener agua para el proceso minero; Obtenerla desde el continente, ya sea, subsuelo, ríos, lagos u otros cuerpos de agua, las denominadas como aguas continentales y la otra alternativa es obtenerla desde el mar y someter el agua a un proceso de desalinización, esta se denomina como agua desalinizada.

En Chile actualmente hay investigaciones en curso por las autoridades gubernamentales hacia algunas mineras de la zona, con miras a medir el impacto que generan en función de resguardar el medio ambiente, controlando que las firmas se atengan a lo estipulado en la ley.

Esto ocurre en un contexto en el que la humanidad se ve enfrentada a un nuevo paradigma donde será necesario la adaptación e innovación con miras a una producción sustentable.

Estas son las principales motivaciones que existen en el proyecto CRAMSA, equipo que busca llevar a cabo el mega - proyecto de crear la planta desalinizadora más grande de latinoamérica en la región de Antofagasta. Es un proyecto con miras a futuro y aboga por una producción sustentable, creando soluciones para la problemática actual de sequía. El proyecto se centra en las personas, buscando entregar servicios sanitarios (clientes regulados) y los clientes mineros (clientes no regulados). Su misión es abastecerlos de agua y proveerlos del caudal necesario, generando una externalidad positiva, ya que disponibiliza agua para las personas, mineras y los cuerpos de agua continentales se conservan para el consumo humano.

El trabajo considerará ambos tipos de clientes, clientes sanitarios como clientes no regulados, la razón para considerar este tipo de clientes en el estudio, es porque los clientes sanitarios disminuyen el riesgo del proyecto y los clientes no regulados son los que más demandan del agua debido a su uso imperativo en el proceso productivo del cobre.

El trabajo abordará principalmente a los clientes mineros de cobre porque estos presentan una gran necesidad por considerar una fuente de agua para la producción, añadiendo a esto gran parte de las mineras que se encuentran en la zona pertenecen a mineras de cobre.

Los más relevantes son los clientes mineros y los sanitarios, los que se analizarán en este trabajo. Los primeros, se dividen en dos grandes productores, los de cobre y los de litio. Los primeros consumen una mayor cantidad de agua en su cadena productiva, principalmente en las etapas de flotación, electrorefinación y la lixiviación.

Por otro lado, en la producción de litio es la etapa de conversión, donde existe una pérdida de agua debido a que no se trabaja en la recirculación de esta, el uso de agua en este proceso productivo es considerado como un efecto colateral a diferencia que la producción del cobre que es esencial para la extracción y purificación.

Si bien, la producción de litio demanda de una menor cantidad de recurso hídrico que el cobre, la ubicación de la salmuera se encuentra en los salares, los que se encuentran resguardados por las autoridades, ya que la intervención industrial afecta a la flora y fauna de este ecosistema, por esto existen restricciones y limitantes para la extracción de agua y salmuera.

El litio, ha tomado fuerza en los últimos años como mineral clave para la creación de baterías, autos eléctricos, entre otros productos. Siendo el mineral estrella para esta transición global a una industria más sustentable. Las potencias mundiales están en la mira de este recurso por lo que se espera un incremento de la demanda en el futuro en un mediano y largo plazo.

Según el contexto anterior, se consideran estas firmas como potenciales clientes a los que proveer y garantizar suministro de agua fresca, facilitando la disponibilidad del recurso y

evitando que las firmas se vean enfrentadas a nuevos problemas con las autoridades que perjudican a la firma, la producción y el crecimiento económico.

Los proyectos aledaños actualmente cuentan con una vida estimada de 40 años o superior, lo que va en línea con la esperanza de vida de CRAMSA que considera su funcionamiento operativo hasta el año 2050 (sujeto a extensión). Se refleja la demanda y sincronidad de los plazos lo que da para pensar a futuro en la búsqueda de sinergias y oportunidades para crear un ambiente de cooperación sustentable entre las firmas, el ecosistema y los pueblos aledaños.

Este mega proyecto tiene un costo de construcción y desarrollo aproximado de unos 5.500 millones de dólares, aún se encuentra en etapa de 'greenfield'. El estudio de impacto ambiental ya ha sido realizado y fue enviado al servicio de evaluación ambiental para su revisión. El primer veredicto envió a realizar algunas correcciones, estas fueron realizadas y el proyecto se encuentra aprobado.

Contará con una gran planta con cuatro torres de captación ubicadas en el mar, las que tienen una capacidad diaria de 175.000 m<sup>3</sup>/día. Se tomará el agua de mar en el sector de caleta Bolfin a 15 Km al sur de límite urbano de Antofagasta y provisionará agua a las comunas de Antofagasta, Sierra Gorda y Calama, integrando un área total de 8025 hectáreas de infraestructura, donde sus tuberías bombearán agua hasta una altura superior a los 4.000 metros de altura.

El proyecto de CRAMSA se desarrollará en 2 etapas, los trazados y la construcción de infraestructura tendrán sus inicio en el año 2023 y con inicio de operaciones para el año 2027, esta es la primera etapa del proyecto. La segunda comienza el año 2029 con la construcción y remodelación de infraestructura.

El proyecto considera una capacidad total de 8000 l/s, los que serán distribuidos entre distintos clientes. En la primera etapa se abastecerá la demanda de 4000 l/s y el resto de su capacidad comenzará su funcionamiento en la segunda fase (año 2029).

Así como CRAMSA algunos clientes mineros han construido sus propias plantas desaladoras, este trabajo considera y busca realizar una comparación de la estructura de costos existentes de CRAMSA y de la planta por si sola. La metodología a utilizar se generará a través de la creación de un modelo teórico el que será utilizado como punto de referencia para el desarrollo de los ejercicios empíricos. Cabe destacar la cantidad de múltiples escenarios posibles por lo que establecer escenarios en base a un pronóstico de demanda es esencial. Para la comparación se revisará el comportamiento de los costos dinámicamente con ejercicios que entreguen información relevante que permita generar la discusión y resultados respectiva.

Los resultados de este trabajo muestra que la estructura de costos es de carácter no lineal, donde existen economías de escala por el uso eficiente de estructuras de gran tamaño, para todos los casos CRAMSA es la mejor alternativa para la generación de agua, existe una falla en el modelo donde se presenta el caso de secuencialidad en el modelo generando incentivos a perjudicar a otros clientes pertenecientes a la red de CRAMSA.

# Capítulo 2

## Objetivo del Trabajo

El objetivo de este trabajo es evaluar la presencia de economías de escala en el proyecto de desalinización y realizar una evaluación de proyecto para entender como las empresas pueden compartir o aprovechar estos factores. Esto mediante la metodología que considera una aproximación teórica que describa el comportamiento de las empresas mineras y CRAMSA. Utilizar la información y desarrollar el modelo empírico para analizar el comportamiento de los clientes mineros y CRAMSA, este análisis se centrará en la estructura de costos que tiene el proyecto. Señalando donde se encuentran las economías de escala y los riesgos existentes actualmente sobre la escasez hídrica.

Se profundizará en la estructura de costos y como afecta a cada cliente, definiendo un modelo teórico que sirva como puente al análisis de los ejercicios con el modelo empírico. Se realizarán ejercicios con los datos empíricos para establecer un análisis completo, revisando las condiciones de borde y las precauciones que se deben tener para que exista consistencia en el modelo.

Con la construcción del modelo teórico y el análisis empírico, el objetivo principal de este trabajo es dilucidar el tipo de efecto que genera el servicio de CRAMSA para los clientes mineros y mostrar bajo que supuestos la hipótesis definida a continuación se cumple:

$$V_{Cramsa} \geq V_{pminera}$$

Siendo  $V_{Cramsa}$  el flujo de ingreso traído a valor presente para la empresa minera con el servicio de CRAMSA y  $V_{pminera}$  el ingreso traído a valor presente de la minera por si sola.

Con este análisis se busca señalar detalladamente la estructura de costos que tiene CRAMSA, los múltiples factores externos que le afectan generando una mirada del comportamiento de los costos en el mediano y largo plazo.

Por último, en el análisis realizado se espera señalar si existen las economías de escalas del proyecto y de ser así definir donde se encuentran. El análisis del proyecto con una mirada teórica se realiza con miras de tener una mirada esencial antes de realizar los ejercicio empíricos para la estructuración de los costos y los ingresos para en la posterioridad ser de utilidad para CRAMSA y como responden a los estudios en el área, ya que es un mercado que aún se encuentra originación.

Se establecerá un modelo económico teórico utilizando la teoría microeconómica y posteriormente un desarrollo con la información empírica de las firmas. Se consultará a la literatura para la contextualización de los procesos productivos de las firmas, el mercado del agua, los riesgos existentes, el análisis financiero del proyecto y cuales son los avances hasta la fecha del proyecto.

Se determinará si existe algún escenario límite para CRAMSA haciendo uso de las ambas herramientas el modelo teórico y los ejercicios empíricos.

# Capítulo 3

## El Mercado del Agua Desalada

### Red e Infraestructura del Proyecto

La figura a continuación es una representación de lo que sería el proyecto de CRAMSA una vez establecido:



Figura 3.1: Mapa infraestructura CRAMSA, puntos estratégicos y posibles clientes

El trazado en azul representa la infraestructura de distribución construida por CRAMSA, las tuberías. El proyecto cuenta con tres ramas principales, las que se notan después de la primera bifurcación.

Los recuadros en naranja son los clientes de cobre activos en la actualidad y los de color verde los de minería no metálica como es el caso de SQM y Albemarle, productores de litio.

## Escenario Global del Agua

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se espera que para el año 2025, la mitad de la población mundial viva en áreas con estrés hídrico, lo que significa que tendrán dificultades para acceder a suficiente agua limpia y segura. Además, se estima que en la actualidad aproximadamente 2.200 millones de personas en todo el mundo no cuentan con acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento. Este recurso es escaso el que con el tiempo y la sequía se espera que las autoridades tomen medidas al respecto en función del cuidado y protección de esta.[31]

Profundizando en las características económicas, este es un recurso el que se podría comparar con el petróleo y gas, ya que ambos son recursos naturales esenciales para la economía global y la vida cotidiana de las personas. Además, el precio de ambos productos puede fluctuar significativamente debido a factores como la oferta y la demanda, el clima y la política. Al igual que el petróleo, el agua es un recurso no renovable, y su disponibilidad y calidad pueden verse afectadas por el cambio climático y el crecimiento de la población. Como resultado, el agua se ha convertido en un activo cada vez más valioso y una inversión atractiva para los inversores. [43]

Estos recursos son similares entre sí, existe un mercado donde son transados, tienen su proceso de producción de materia prima, son altamente cotizados y requieren de almacenamiento. Al final todo el proyecto de CRAMSA se reduce a un problema de transporte y distribución. Como estos commodities se parecen entre sí, en cuanto a su forma de ser distribuidos, se realiza una breve comparación.

- Agua: La dificultad en su transporte se debe a su peso y volumen, por lo que tiene un elevado costo de transporte, es necesario construir infraestructura para su distribución y también es necesario construir para el almacenamiento, de manera que se mantenga en buen estado y esta no se dañe al ser transportada a larga distancia.
- Petróleo: El costo del transporte de petróleo se debe a su alta demanda, se necesita de la construcción de infraestructura especializada, como buques petroleros y oleoductos. La problemática que presenta este recurso es que al tratarse de un recurso no renovable y altamente contaminante hay regulaciones estrictas y se espera con el tiempo que transportar el recurso se vuelva más complejo, debido a regulaciones ambientales más severas.[23]
- Gas natural: En la mayoría de los casos, el transporte de gas natural es el menos costoso de los tres debido a su peso y la posibilidad de transportarlo por tuberías. Sin embargo, el transporte y almacenamiento de gas natural puede ser peligroso si no se maneja adecuadamente.[32]

En resumen, el recurso con el que está trabajando CRAMSA es inocuo en comparación a las externalidades negativas que puede generar los otros recursos. El desafío se presenta en buscar una distribución de agua eficiente por su peso, donde el principal costo se encuentra en la construcción de infraestructura especializada para su transporte. Otro desafío que se presenta, es la conservación de su calidad y que no se deteriore durante el proceso, tema que se relaciona con el trabajo que tendrá que realizar para el servicio de concesiones sanitarias.

## La Situación del Agua en Chile para el Sector Minero

El ministerio de minería ha realizado pronósticos sobre el futuro de la demanda de agua en el sector minero. Se espera para el año 2033 que el consumo de agua para producción minera a nivel nacional sea de un  $21,4 \frac{m^3}{s}$  con una tasa de crecimiento anual del 2%. Este pronóstico estima que la demanda por agua continental será de  $6,15 \frac{m^3}{s}$  y la de agua de mar será de un  $15,28 \frac{m^3}{s}$ , lo que implica como un aumento del 167% respecto al 2021. [19]

La proyección realizada considera cambios en la matriz de producción, que actualmente se vuelve a los mineral de sulfuros y que son procesados a través de la flotación y la caída de las leyes de los minerales. [19]

A continuación se puede ver el pronóstico de demanda de agua:

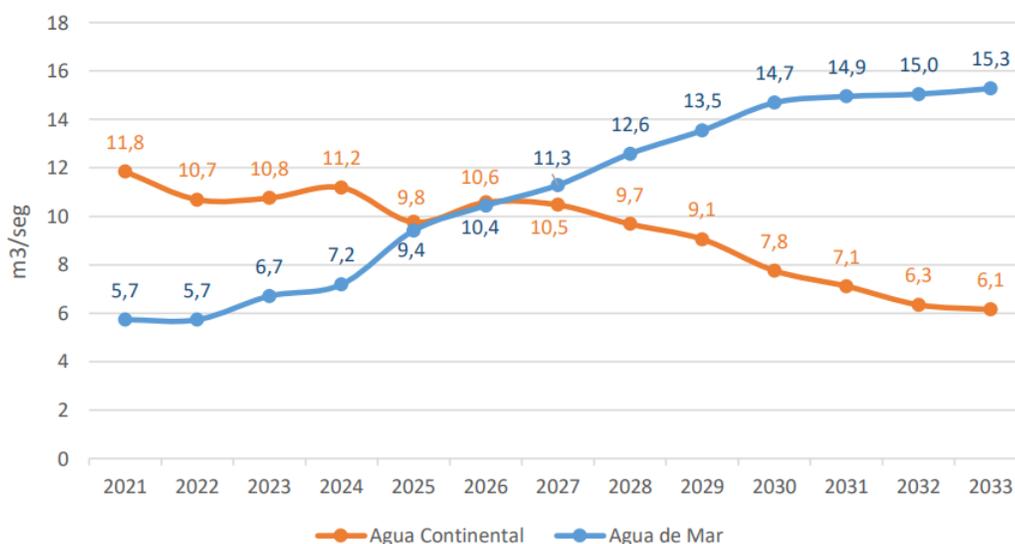


Fuente: Cochilco, 2022.

Figura 3.2: Proyecciones Demanda de Agua en la Minería del Cobre para 2033. Fuente: COCHILCO

Según lo estipulado en la literatura la evolución de la demanda de agua desalada tendrá un comportamiento lineal, positivo y continuamente creciente, estabilizándose la pendiente en los últimos tres años, como se aprecia en la imagen a continuación:

Proyección esperada demanda de agua en la minería del cobre según origen 2022-2033



Fuente: Cochilco, 2022.

Figura 3.3: Proyección Demanda de Agua Según su Fuente

De las figuras, se puede ver un crecimiento constante en la producción anual y una reducción considerable en el uso de aguas continentales. Lo que refleja justamente que las firmas presentarán una conversión al agua desalada. Para seguir produciendo lo mismo y aún así presentar un crecimiento en producción anual, significa que la disminución de caudal continental debe compensarse en caudal de agua desalada.

### Situación actual y Competidores

El sondeo de la zona con clientes evidencia la presencia de plantas desaladoras propias por clientes, existen de todos los tamaños y también se presentan clientes que no tienen plantas desaladoras. La capacidad de la planta está directamente relacionado con la capacidad de producción. La mayor productora de cobre de Chile se encuentra en esta zona, minera Escondida, así como posee una gran producción, actualmente posee la planta desaladora de mayor tamaño, con miras a expansión.

Las firmas están al tanto de los escenarios a futuro y las problemáticas respecto al recurso hídrico, ahora bien la pregunta que se devela acá es sobre los incentivos que presentan las mineras. Si existen tanto clientes en la zona ¿Por qué estos no cooperan y desarrollan una planta en conjunto? o bien el cliente mayor de la zona, en este caso Escondida. ¿Por qué no subvenciona a los clientes cercanos para disminuir los costos, como lo espera hacer CRAMSA?. Las respuestas a estas preguntas se encontrarán en la sección de resultados de este trabajo debido que se desarrollará la investigación y los ejercicios para entregar una respuesta justificada de que ocurre realmente con los incentivos en esta situación.

CRAMSA será la desaladora más grande de la región y está orientada a múltiples servicios como es el tratamiento de aguas servidas, sanitarios, pero su centro se encuentra en el abastecimiento y distribución a clientes mineros, entonces se podría considerar a CRAMSA como un Monopolista en la zona en un mercado incipiente, un mercado donde la barrera de entrada es bastante elevada por el elevado nivel de inversión y obtener la autorización legal necesaria.

## **Factores que Incentiven el Cuidado del Agua**

Los informes de cambio climático entregados por el IPCC con los años ha entregado resultados cada vez más desalentadores, donde hay claras evidencias empíricas del daño que se ha generado al planeta tierra, gran parte de este es de carácter irreversible y el resto puede ser solucionado pero en un largo plazo (para el 2065), considerando que las emisiones y externalidades negativas se reducen a los límites definidos por los expertos lo que en la práctica es irreal.[21]

Elegir el camino sustentable es la única vía para el desarrollo económico y la producción a futuro. Los países están al tanto de esta realidad, en el caso de Chile, las autoridades son estrictas con la regulación del impacto ambiental que producen las empresas. Debido a la escasez hídrica se espera que los planes de las autoridades en resguardo del medio ambiente será en exigir a las empresas, invertir en investigación y desarrollo para contar con procesos más eficientes, por ejemplo, reducir la cantidad de agua que se utiliza en el proceso.

Las empresas deben actuar de manera estratégica y anticiparse a este nuevo escenario, de lo contrario verán limitada su capacidad de producción siendo cada vez más difícil competir con las mineras que sí están siendo sustentables. Este es el motivo por el que las empresas han invertido en innovación y contratan el servicio de instituciones expertas en el rubro para volverse más sustentables.

Hay organizaciones como es el caso de WWF que asesora a diferentes empresas, como ha ocurrido en el caso de algunas mineras, las que generan informes sobre los daños que pueden generar las mineras al ecosistema, cuencas con agua y como el no hacerse cargo de las externalidades negativas afectará directamente en la reputación y directamente en la demanda afectando la producción de la firma. Es tan relevante este informe para las empresas, que buscan la asesoría de expertos, como es el caso de la WWF, ya que el pasar por alto esto podría incluso poner en peligro la existencia del negocio.

Se considera este informe para ejemplificar cuáles son los factores y porque son considerados en el caso de las empresas mineras, ya que es el que mejor se adapta al contexto de estudio. La institución encargada de este reporte realizó una asesoría sobre el recurso hídrico a un cliente minero de la zona de estudio, el que es un cliente de interés para CRAMSA, por su gran capacidad de producción. Más adelante se determinará en función a como influyen estos en el contexto chileno y asignarle un nivel de importancia, según lo esperado por la opinión pública y estar en regla con todas las normativas medioambientales que exija la autoridad pertinente.

Entre los principales factores que influyen en los riesgos reputacionales por extracción de agua

que enfrenta la imagen de la empresa según el informe de los riesgos estudiado son cuatro principalmente:

- La importancia cultural del agua: Este indicador responde en base a la cantidad de distintos grupos étnicos que existen los países, donde se presenta una relación directa en una mayor concentración de culturas, viviendo en una región, en este caso la región de Antofagasta, entonces existe una mayor probabilidad que el agua sea visto como un bien social y cultural generando resistencia y un riesgo para la empresa. Esto se relaciona directamente con las externalidades que se generan a las personas, específicamente a los pueblos originarios.[6] En el caso de estudio la mayoría de las mineras se encuentra fuera de las urbanizaciones y resulta ocurrir el caso que los pobladores cercanos a estas son cercanos a la tierra y viven de ella.
- La importancia de la biodiversidad: Si el proyecto se encuentra ubicado en un sector con una biodiversidad importante, es decir, si la cuenca de donde se extrae el agua se encuentra en un ecosistema diverso y saludable entonces incrementa el riesgo para la empresa. Esto se mide en base a dos indicadores, el de endemismo de agua dulce y la riqueza en la biodiversidad en el agua dulce.[6]

El primero se basa en que si la empresa va a operar en una cuenca donde existe un mayor número de peces y fauna marina propias de la zona, entonces se encuentran expuestos a un mayor riesgo. El otro indicador se similar en la intuición del incremento a mayor especies propias de la zona, pero se encuentra orientado a la cantidad de especies de peces distintas que existe.[6]

- La cobertura de la prensa y el escrutinio público: Este factor se mide en base a la cobertura y libertad de prensa que tienen los países, donde el riesgo para la empresa incrementa cuando la cobertura de prensa es mayor. Las dos variables en las que se desenvuelve este riesgo es en la cobertura nacional de la prensa y la cobertura global.

Un ejemplo de la segunda pueda tratarse de una empresa que se vea involucrada la generación de un desastre ambiental tan dañino para el ecosistema que sea conocido globalmente. Como el caso del desastre petrolero ocasionado por British Petroleum en el golfo de México.

Este tipo de problemas considera que en un futuro podría a la empresa en causante dejarla sin proveedores, distribuidores, inversores y clientes debido a la mala imagen que representan.[6]

Respecto a la libertad de prensa, Chile se encuentra en el puesto número 83 de un ranking de 180 países en el ranking de libertad de prensa donde los criterios de evaluación son la cantidad de noticias falsas y el contenido creado por IA. La baja de Chile de este ranking se debe a la inestabilidad política y polarización de los últimos años.[28]

- Políticas gubernamentales: Este indicador cubre la gestión institucional del agua de los países, esto puede ser cambios en la regulación, nuevos proyectos de ley, entre otros. Mientras más conflictos sobre el agua existan existe un mayor riesgo en cambios que afectarían a la empresa.[6]

Casualmente en la región que busca establecerse CRAMSA se presentan todos estos factores de riesgos reputacionales transversalmente, en las zonas conflictivas ya existen problemas con la autoridad por excederse en los límites permitidos de extracción, dañar la zona y perjudicar a los nativos de las zonas dejándolos sin recursos.[2][11][26]

## Conflicto Salar de Atacama

El salar ubicado en la región de Antofagasta es uno de los salares más icónicos del mundo, un lugar especial y de tradiciones para los pobladores cercanos a este, un sector con condiciones particulares con una fauna especial, por lo que su belleza también lo convierte en un atractivo sitio turístico.

En el mes de abril del año 2022 se dio inicio a una demanda a 3 mineras, siendo demandadas cada una por hacer uso indebido de los acuíferos del salar, excediendo la extracción permitida por la autoridad lo que provocó con el paso del tiempo la sequía y disminución del nivel del agua.

Dentro de los actores involucrados en el conflicto del salar, se encuentran mineras de cobre y de litio, ambas generan externalidades negativas en este por la extracción de agua. Al extraer el agua del salar se producen cambios en el PH del salar, alterando la flora y fauna.

Ambas mineras generan externalidades negativas, ambas extraen el agua para el proceso y posterior a esto esas aguas no pueden ser reutilizadas por lo contaminadas que quedan. En el caso del litio es diferente al evaporar el agua esta sube a la atmósfera, lo que genera un efecto negativo porque el agua no vuelve al salar, lugar que ya es extremadamente escaso de agua.

En esta zona de conflicto hay antecedentes de cuatro mineras que se han visto involucradas en problemas ambientales. SQM, Albemarle en la minería del litio, Escondida y Zaldívar en la minería del cobre, sobre la demanda realizada en abril del año 2022 involucra a Albemarle, Escondida y Zaldívar.

Escondida está siendo demandada por haber hecho uso indebido de los acuíferos del sector de Monturaqui, donde extrajo alrededor de  $1400 \frac{L}{S}$  hasta el año 2019, Zaldívar hizo uso del acuífero de Negrillar donde extrajo alrededor de  $212,75 \frac{L}{S}$  proyectado la fecha a la actual. Por último se tiene a Albermarle que extrajo un total de  $23 \frac{L}{S}$  de agua y  $422 \frac{L}{S}$  de salmuera.[2][11][26].

Los daños generados según el tribunal son considerados como daños irreparables al ecosistema.

Aún se está trabajando en la resolución de la demanda, algunos de los terminos que solicitan los demandantes son:

- Medidas de diálogo y gestión ambiental: La conformación de una mesa de trabajo con los afectados.

- Medidas de diagnóstico territorial: Elaboración de estudios, forénsica ambiental, catastro ambiental del territorio y levantamiento de línea de base físico-biótico.
- Estudios técnicos.
- Medidas de mitigación, recuperación y compensación de los componentes afectados.

De todas estas medidas, dentro de las medidas de mitigación, se encuentra la recuperación de los niveles de agua de los acuíferos a los niveles originales, realizando esto mediante la infiltración de agua de mar. Esto genera un atractivo implícito en CRAMSA para estas firmas, las que tendrán que cumplir con el dictamen de la autoridad por esto la cooperación entre CRAMSA y los clientes mineros se ve factible.

Estos conflictos no son recientes, ya se han presentado previamente antecedentes que evidencian que el año 2019 SQM había sido llevado al tribunal ambiental por las comunidades indígenas, las que iniciaron una demanda por no respetar el límite en el nivel de extracción de agua en el acuífero. Con el objetivo de evitar una sanción del tribunal, SQM el año 2020 logró un acuerdo extrajudicial con las comunidades indígenas, donde tenían que gastar la suma de 1.700 millones de pesos en fines de compensatorios, de reparación y en la búsqueda de alternativas para la recuperación de los niveles de agua del salar.[2][11][26]

El año 2019 Escondida también fue llevada al tribunal ambiental por las comunidades indígenas de la zona por no respetar los límites de extracción estipulados. De esta audiencia se llegó a un acuerdo donde BHP deberá trabajar en conjunto con las autoridades de la región e invertir en trabajo, creación de políticas de convivencia e indemnización las que inicialmente se encuentran valuadas en \$81.192.184 de dólares y podrían alcanzar un valor de \$93.000.000 de dólares. Como muestra de buena fé BHP dio un alto al uso del agua de este salar desde el año 2019.[2][11][26]

La resolución del caso resolvió en base a un acuerdo entre las partes por lo que es necesario que BHP se haga cargo en un plazo de 4 años donde deberá trabajar en conjunto a las comunidades indígenas de la zona y realizar estudios en terreno buscando soluciones que mejoren la problemática.[2][11][26]

## **Actores Relevantes**

En la zona se encuentran alrededor de quince clientes activos, con posibles nuevas firmas entrando al negocio. Se muestran las cifras de los clientes para que el lector vea los distintos órdenes de magnitud en la producción y el tiempo de funcionamiento para cada proyecto, se destacan estos clientes también porque han sido más expuestos al escrutinio público.

- Escondida: Pertenece en un 57,5% a BHP, Río Tinto PLC 30% y JECO 10% y JECO2 2,5%. La mina tuvo su inauguración el año 1991, es una mina que extrae cobre, es la mayor productora de cobre en Chile de BHP.
- Sociedad Química y Minera (SQM): Cuenta con cinco líneas de negocios, Nutrición Vegetal, Yodo, Litio, Potasio y Sales Solares. Cuentan con una faena en el salar de Atacama donde se produce cloruro de potasio, sulfato de potasio y concentración de salmuera.

- Zaldívar: El yacimiento se encuentra a 3.200 metros sobre el nivel del mar y a 175 km del sudeste de Antofagasta.<sup>1</sup>
- Albemarle: En la planta del salar de Atacama se producen únicamente potasio y potasa. Para la producción de litio el mineral es trasladado en camiones algibes hasta la planta la negra.
- Spence: se ubica sobre 1750 metros sobre el nivel del mar en la comuna de Sierra Gorda en la Provincia de Antofagasta, tuvo su inicio de operaciones el año 2006.

<b>Minera</b>	<b>Prod.(ton)</b>	<b>Agua.(ml)</b>	<b>Ingresos(musd)</b>	<b>Término</b>
Escondida	1.155.854	221.041	\$9.470	2050
Spence	146.630	6.925	\$1.225	2039
Albermarle	140.000	N/D	331,6	2043
SQM	120.000	3.617.430	\$1.303	2030
Zaldivar	44.000	7.015	\$68.5	2035

Tabla 3.1: Firmas Relevantes en la Zona

La tabla refleja la gran cantidad de toneladas que produce la minera Escondida en el año. Siendo el mayor productor de la zona, el que se ubica en uno de los extremos de la red de CRAMSA. Los otros clientes producen cantidades similares con SQM y Albemarle ubicados también en uno de los extremos de la red de CRAMSA.

## Estructura De Financiamiento

Se está en búsqueda de alternativas para el financiamiento del proyecto, se creó un modelo financiero que determina la valorización del proyecto, con el objetivo de esto es llevar la idea a números y darle un orden de magnitud tangible y así buscar socios de inversión. También se evaluará nuevas alternativas de expansión del proyecto y evaluar sinergias con miras a considerar proyectos de inversión complementarios que puedan generar valor al original.

El proyecto busca financiar parte a través de deuda y otra parte mediante equity, a través de patrimonio, entregándole acciones a los inversores.

Un proyecto tan grande es complejo financiarlo únicamente con equity dado que mientras más propietarios en el proyecto existe más problemas para llegar a acuerdos en el futuro.[8]

Se está en la búsqueda de inversores interesados en el proyecto por lo que también se debe buscar en líneas fuera de la inversión habitual

Como se trata de un proyecto con la sustentabilidad como objetivo principal, se está en búsqueda de financiamiento a través de bonos verdes. Estos tienen una lista de requisitos que se deben cumplir, por esto se investiga en que tipo de instituciones trabajan con estos

<sup>1</sup>La cifra del consumo de agua para Zaldivar es únicamente operacional por lo que se calcula un estimado respecto a la producción total de Antofagasta minerales.

instrumentos financieros y cuales entregan de una magnitud superior a los 100 millones de dólares.

El proyecto coincide con los criterios de para se considerado como un proyecto verde por esto se apunta hacia la postulación de bonos verdes.

Se realizó un benchmark donde se encontraron algunas instituciones a las que podría aplicar el proyecto:

<b>Entidad</b>	<b>Detalles</b>	<b>Inversiones pasadas</b>
IFC	Emite bonos ESG.	Planta de tratamiento de aguas en China y Brasil
IDB	Financia LAs y el caribe	Planta desaladora Tomic y Rosarito
GFC	Financia proyectos verdes	Planta desaladora en Kiribati y Proyecto en Chile
COFIDES	Inversión largo plazo	GULF OMAN y SAOC desaladora

Tabla 3.2: Fondo de financiamiento verde. Fuente: CLGroup

Además de las alternativas de financiamiento explicadas previamente, también existe la posibilidad de comprar infraestructura de alguna empresa sanitaria de la zona y realizar una remodelación del equipo o bien buscar un cliente minero y realizar una alianza de cooperación revisando de que manera se pueden generar sinergias.

Generar un acuerdo con BHP, sería un gran avance para el desarrollo del proyecto porque de conseguir infraestructura ya desarrollada, reduciría considerablemente el riesgo inherente que existe en el levantamiento de la infraestructura, entregando credibilidad del proyecto a los potenciales clientes aldeanos.

Para la primera etapa construcción el costo es mayormente la construcción de la infraestructura, mientras que en la segunda fase se considera, en infraestructura la renovación de los equipos, el mantenimiento, el costo es operacional y la mantención de las plantas.

# Capítulo 4

## Marco Conceptual

Esta sección incorpora los conceptos teóricos necesarios que serán utilizados para el desarrollo del trabajo, esto incorpora explicaciones resumidas de procesos productivos y conceptos microeconómicos.

### Ecuación de Darcy Weisbach

La ecuación de Darcy Weisbach será utilizada para determinar la energía necesaria para una distancia y altura específica.

Esta ecuación, calcula la pérdida de carga generada por la fricción de la tubería con el fluido, esta fricción produce una caída de presión en la tubería. Entregando el resultado en metros, que representa la altura/distancia equivalente al fluido que tendría la misma caída de presión.

En otras palabras es una representación no directa de la energía que se pierde en el sistema. Así se calculará la altura y distancia a recorrer y con la pérdida de carga resultante se puede realizar el cálculo de la energía necesaria para llegar al punto de destino.[20]

Con su ecuación de pérdida de carga como:

$$h_l = \frac{\Delta P_L}{\rho g}$$

$$\Delta P_L = f_e \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2}$$

Donde el factor de fricción, que para una tubería circular se determina como:  $f_e = \frac{16}{R_e}$

Con  $R_e$  siendo el número de Reynolds el que determina una unidad adimensional que determina el factor de fricción basándose en la densidad, velocidad, diámetros y viscosidad dinámica de un fluido.[20]

Se utilizará esta ecuación para tener una estimación de la pérdida energética que implica el transporte de agua a cierta distancia y altura. Y así poder calcular el consumo de energía necesario.

Se utiliza esta ecuación a que es la que se acerca más a una representación fiable sobre el consumo energético para el transporte de agua.

## **Proceso de Desalación**

En la actualidad existen dos procesos de desalación. La desalación a través de procesos térmicos, los que imitan el ciclo natural del agua y los procesos a través de desalación por membranas que separan los componentes.

CRAMSA y las plantas desaladoras de la zona utilizan el proceso de desalación por membranas, específicamente el proceso llamado de osmosis inversa.

Esta se basa en el fenómeno físico de la osmosis, la que ocurre cuando dos líquidos de distinta concentración entran en contacto, al entrar en contacto ocurre la difusión donde se iguala la concentración de ambas soluciones. Cuando hay una membrana el líquido de menor concentración se mueve hacia el líquido de mayor concentración de igual forma como ocurre en las paredes de las células.

Para invertir el proceso, es decir, que el líquido se mueva desde la mayor concentración al de menor concentración se aplica presión sobre el líquido de mayor concentración, así el líquido traspasará la membrana. El agua de mar se somete una gran cantidad de presión donde finalmente los componentes quedan segregados.

Posterior a esto, se deben realizar otros tratamientos y filtraciones en el agua pero a grandes rasgos este proceso tiene como resultado agua dulce para consumo y salmuera.[30]

## **Proceso Producción Litio**

El proceso de producción de litio se separa en tres etapas:

- **Extracción:** Se extrae la salmuera desde las profundidades de los pozos productivos los que se encuentran al interior de la tierra. Su extracción se realiza a través de bombas, al realizar la extracción junto con la salmuera se extrae agua, la que no es apta para el consumo humano, sin embargo, esta es esencial para la conservación del ecosistema.[36]
- **Evaporación y Purificación:** La salmuera extraída es llevada a las piscinas donde es colocada y se utiliza de energía solar para realizar la evaporación de la salmuera separando el agua del mineral. El resultado de esta etapa, es el concentrado de litio purificado.[36]

Es necesario añadir que esta es la parte del proceso que genera polémica y será discutida más adelante. El motivo es porque al realizar la evaporación el agua sigue con su ciclo natural y se desvanece de la zona sin ser utilizada. Esto es dañino porque es agua de una zona que naturalmente no debiese evaporarse, lo que disminuye el nivel de agua,

secando la zona, una zona árida que por su naturaleza ya presenta escasez, siendo perjudicial para el ecosistema.[9]. Añadir a esto que lo consultado en la literatura, la razón de agua evaporada para producir 1 tonelada de litio es de 2 millones de litros de agua.[36]

- Conversión a carbonato de litio: Para finalizar el proceso, el concentrado de litio es transportado a la planta procesadora donde se somete el concentrado a una reacción química, esta se hace reaccionar con el carbonato de sodio obteniendo finalmente carbonato de litio, producto que es envasado y empaquetado para su distribución.[36]

## Proceso Producción Cobre

El proceso productivo del cobre a grandes rasgos sigue la siguiente estructura:

- Etapa de extracción: Se extraen los macizos de roca, los que son llevados a la planta para ser procesados y filtrados para obtener el cátodo de cobre puro.
- Chancado: Las rocas obtenidas en la extracción son irregulares y en estas pueden existir distintas concentraciones del mineral. El proceso de chancado busca disminuir el tamaño de las rocas hasta llegar a un diámetro de media pulgada.[18]

La roca es sometida a tres niveles de chancado, en el primer chancado, la roca es reducida a 8 pulgadas, un segundo proceso se machaca hasta llegar a un diámetro de 3 pulgadas, entrando una vez más a la moladora para llegar al diámetro esperado de media pulgada.[18]

Hasta este punto el proceso es similar para todas las rocas que entran pero existen variaciones con los pasos siguientes del proceso, el proceso varía según el componente químico del mineral, según el tipo de composición, el proceso cambia si es sulfuro de cobre u óxido de cobre.

Para el óxido de cobre se sigue con el proceso de Lixiviación.

- Lixiviación: Esta es la primera etapa del proceso donde ocurre la separación del mineral de otras sustancias, esto se realiza a mediante soluciones líquidas de agua y ácido sulfúrico. Estos se realiza únicamente con los óxidos debido que los sulfuros no pueden ser sometidos a flotación debido a su composición química que presenta una baja afinidad por los colectores de sulfuro.[18]
- Electroobtención: Esta es la última etapa del proceso para obtener el cátodo de cobre con 99,99 % de pureza. La solución de sulfato de cobre proveniente de la lixiviación tiene sulfato de cobre, está sometida a electrólisis donde la solución de sulfato de cobre es atraída depositándose en las placas. Resultando en cobre preparado para su venta.[18]

Retomando la cadena productiva de los sulfuros de cobre:

Los sulfatos de cobre después de el proceso de chancado son cometidos a otro proceso. Existe el proceso de sulfatos 1 y sulfatos 2. La principal diferencia es que el proceso de sulfatos 2 utiliza de bacterias para realizar el proceso de lixiviación denominado como

biolixiviación, el que utiliza estas bacterias que se comen el azufre y el fierro dejando únicamente el cobre. Para posteriormente finalizar con el proceso de Electroobtención. Este proceso es una variación del proceso de los sulfatos y es un proceso relativamente nuevo, las etapas a continuación son las que describen el proceso tradicional para los sulfatos.[18]

- Molienda: Esta tarea reduce aún más el tamaño de las rocas llegando a un tamaño de 0,18 milímetros de diámetro.[18]
- Flotación: El material es sumergido en las piscinas con el objetivo de separar el cobre de otras sustancias, esto se realiza bombeando aire, se generan burbujas que separan los minerales provocando que el concentrado de cobre suba y el residuo quede abajo, este proceso se hace reiteradas veces para obtener una mayor pureza posible. El concentrado resultante es secado y se lleva a la fundición.[18]
- Fundición: El concentrado de cobre es fundido a altas temperaturas pasando a líquido para realizar una separación de minerales por su peso, el cobre queda por debajo porque es más pesado, alcanzando una pureza de 99,7 %.[18]
- Electrorefinación: Los ánodos de cobres son transformados en cátodos de cobre, mediante electrólisis, resultando en cátodos con 99,99 % de concentración. [18]

Gran parte de las etapas por las que pasa el mineral se requiere de agua, el proceso de flotación, lixiviación, electrorefinación y electroobtención, convirtiéndose en un recurso clave para la industria. La relación entre agua necesaria para la producción de una tonelada de cobre es de 215 metros cúbicos de agua aproximadamente.[38]

El proceso minero utiliza de agua continental(agua dulce), lo que que genera espacio para la consulta, ¿por qué no se utiliza derechamente agua de mar(sin procesar)?. La respuesta a la pregunta, es que entorpece el proceso debido a la cantidad de sales que contiene el agua.

Alguno de los efectos adversos que puede generar el agua salada en el proceso:

- Corrosión: Por la alta cantidad de sales del agua salada, esta es corrosiva, dañando la infraestructura y equipos utilizados para la producción del cobre. Además, los materiales de construcción habituales no son los propicios para resistir esto, desgastando más rápido la infraestructura e incrementando los costos de mantención.[40]
- Contenido de impurezas: El agua salada puede contener otro tipo de elementos en concentraciones más elevadas que el agua dulce. Estos son magnesio, calcio y sulfatos. Los que pueden entorpecer los procesos de refinamiento y electroobtención del cobre, afectando directamente a la eficiencia del proceso, calidad y pureza del producto resultante.[40]
- Conductividad eléctrica: El agua salada con la cantidad de sales que tiene la convierten en un buen conductor de corriente por los iones presentes en esta. Como existen procesos donde ese aplica corriente eléctrica esto puede traer problemas en el control del flujo de corriente, como por ejemplo en el proceso de electroobtención.[40]

## MakeUp Proceso Minero

El Makeup del proceso es fundamental en minería, este es un indicador que permite estimar que tan eficiente son los recursos hídricos, mientras más pequeño sea el make up significa que el uso del agua es más eficiente. Se trata de un ponderador que indica cuanta agua debe entrar al proceso para generar una tonelada de mineral procesado, esta es independiente del origen de la fuentes, ya sea agua continental o agua de mar. Es una razón que empezó a tomar mayor relevancia el año 2018, donde empezaron a internalizarse los desafíos sobre la escasez hídrica que se avecinan.[17]

El ratio del makeup se define como:

$$MakeUp = \frac{\text{Cantidad de agua}}{\text{Tonelada de mineral procesado}} \quad (4.1)$$

Se supone un MakeUp para el proceso de 0,52, obtenido del informe de COCHILCO del año 2019.[17]

## De Amenaza No Creíble a Creíble

Una amenaza no creíble se define como una estrategia con la que un jugador amenaza con llevar a cabo pero esta no es tomada en consideración por el resto de los jugadores. No son creíbles debido a que no son decisiones eficientes, lo que va rompe el supuesto de racionalidad de los jugadores, que buscan maximizar sus beneficios y toman decisiones basadas en la información y las expectativas sobre las acciones de los demás jugadores.

Para el caso de estudio, se considera la amenaza de la escasez de agua y prohibición del uso de agua continental en la producción del mineral. Actualmente, podría considerarse como una amenaza no creíble para las firmas. Sin embargo, se busca crear un modelo tal que ajuste su curva de costos a futuro y logre describir esta disminución en el tiempo de un recurso limitado, en un mercado altamente competitivo.

Esta amenaza externa, es esencial para el estudio, ya que condicionará la forma en como las firmas se enfrentarán al escenario a futuro.

## Los Rendimientos a Escala en la Función de Producción

Los rendimientos a escala describen cómo cambia la producción según el tipo de función que la describe. Para la función de producción de una firma: Sea  $f : \mathbb{R}_+^n \rightarrow \mathbb{R}_+$ . La función es continua, estrictamente creciente y estrictamente cuasicóncava en  $\mathbb{R}_+^n$  y cumple que  $0 = f(0)$  Los tipos de rendimientos a escala son:

- Rendimientos constantes a escala: Se considera cuando hay un aumento proporcional en base a la cantidad de recursos utilizados, la producción aumenta de forma proporcional. Por ejemplo, si una firma triplica sus insumos entonces su producción también se triplicará. Es importante destacar que la implicancia de esto es que no se presentan economías de escala.[42]

Se dice que es de rendimientos constantes si se cumple que  $f(tx) = tf(x)$  se mantiene la relación.[42]

- Rendimientos crecientes a escala: Ocurre cuando los insumos utilizados incrementan la producción de una manera más que proporcional, lo que implica que a medida que aumenta la producción, se puede obtener economías de escala, disminuyendo los costos e incrementando la eficiencia.[42]

Se dice que es de rendimientos crecientes a escala si se cumple que  $f(tx) > tf(x)$  dado que al incrementar parte de la tecnología(insumos), esta incrementa su resultado de producción cumpliéndose la desigualdad previamente escrita. [42]

Esto podría traducirse en el incremento tecnológico como una mayor poder de bombeo, lo que aumenta el caudal, lo que es esencial para la producción del mineral y que permite el desarrollo de economía de escalas.[42]

- Rendimientos decrecientes a escala: En este caso, significa que a medida que la firma incrementa su escala de producción, enfrenta diseconomías de escala, lo que significa que los costos unitarios de producción aumentan, siendo menos eficiente.[42]

Análogo del caso anterior, se dice que es de rendimientos decrecientes a escala si se cumple que  $f(tx) < tf(x)$ . [42]

Los tipos de rendimientos a escala son importantes para entender cómo varía la producción y los costos en función de los niveles de producción de la firma, se tendrá esta definición en consideración al momento de crear el modelo teórico para las firmas y CRAMSA.

# Capítulo 5

## Modelo Económico

### 5.1. Lineamiento General

El proyecto es una realidad, se ha desarrollado un estudio de mercado, demanda, evaluación de rentabilidad y búsqueda de fuentes de financiamiento. Tendrá puesta en marcha el año 2027 con una proyección de funcionamiento hasta el año 2052.

La distinción entre etapas ocurre principalmente porque no toda la infraestructura se encontrará disponible en un comienzo. Se comenzará distribuyendo  $4000 \frac{l}{s}$ , después se alcanzará un caudal de  $8000 \frac{l}{s}$

El proyecto evaluado se ve en un tiempo continuo con múltiples actores de distintos tamaños. Al modelar este proyecto como un modelo microeconómico se someterá a supuestos justificados con miras a realizar un análisis pertinente y relevante pero que a la vez entregue la simplicidad para que se pueda realizar un análisis y discutir los hallazgos encontrados.

Se formulará y evaluarán tres casos: La alternativa que exista cooperación entre firmas, es decir, las empresas mineras logran ponerse de acuerdo para desarrollar una planta desaladora en conjunto. El caso de CRAMSA como único productor, es decir, como monopolio, estableciendo un modelo teórico y evaluar las situaciones como se modelan las firmas. El último caso se considera a CRAMSA como único distribuidor pero adaptando el modelo teórico al modelo empírico construido.

Se realizará un análisis de la estructura de costos, revisando condiciones de borde, equilibrios y tipos de riesgos que respalden una alternativa por sobre las demás. Se mostrará empíricamente, que alternativa es mejor y la más eficiente económicamente para CRAMSA y el cliente minero.

## 5.2. Proyecto Conjunto Cooperativo

Algunas de las mineras presentes en la zona cuentan con sus propias plantas desaladoras, esto es una clara señal de la necesidad de reinventarse y experimentar con la tecnología de desalación, lo que trae costos operacionales y se encuentran sujetos a limitantes de capacidad.

Ahora bien, la pregunta que figura es ¿por qué las mineras no colaboran entre sí y desarrollan el proyecto en conjunto? La construcción de una planta desaladora entre todos sería atractivo para las firmas dado que en la alternativa de cooperación se distribuyen los costos operacionales reduciéndolos considerablemente.

El primer acercamiento se hace el símil al funcionamiento de un oligopolio que se encuentra coludido, asumiendo que todas las mineras son homogéneas, a continuación se explica como más firmas en el periodo dificultan la coordinación.

Para que exista cooperación entre las firmas la condición necesaria es que:

$$V^{cooperar} \geq V^{desvio}$$

Considerando un horizonte de tiempo  $T = \infty$ , asumiendo que las firmas construyen una planta de administración compartida, con la misma producción, coordinan los costos.

En el infinito la utilidad que genera la producción según un arreglo la utilidad del agua sería:

$$\frac{\pi^m}{N(1-\gamma)} \geq \pi^m$$

Con  $\pi$  como la utilidad del oligopolio,  $N$  el número de firmas y  $\gamma$  el factor de desvío.

Entonces:

$$\frac{\pi^m}{N(1-\gamma)} \geq \pi^m \Leftrightarrow \gamma \geq 1 - \frac{1}{N}$$

Esto reafirma la idea de los riesgos implícitos que existen en la gestión de un proyecto conjunto. Si bien esta demostración es para el caso oligopólico busca mostrar que únicamente por ser un número mayor de firmas, entonces será más difícil su organización, que el desvío tienda a 1 en el infinito quiere decir que siempre habrá un miembro que le será mejor no cooperar.

Ahora bien, este caso tiene dos supuestos muy fuertes, que las firmas son homogéneas y se ve el caso estacionario. Este ejemplo sirve como primera aproximación sin embargo establecer estos dos supuestos es poco realista.

Por esto se revisarán los incentivos que están presentes y como podría afectar a la cooperación. El realizar un proyecto conjunto es todo un desafío en cuanto a la administración

del proyecto, más aún si este está pensado realizarse con tu competencia directa, donde se presenta incertidumbre y riesgos de manera intrínseca.

Considerando que todas las firmas deseen cooperar, son de diferentes tamaños y desean construir infraestructura proporcional a los costos según su uso y la ubicación, se consideran los siguientes factores principales que atentan contra la cooperación:

- Esperanza de vida del proyecto: Las firmas involucradas comenzaron sus operaciones en tiempos distintos, llevan distintas etapas en el desarrollo de los estudios de la mina y en la explotación de recursos. Lo que propicia las condiciones para que los jugadores perciban distintas preferencias respecto a las utilidades sobre la idea de la creación de una planta colaborativa.

Este factor incrementa el riesgo y los costos operacionales asociados, habría que realizar fiscalizaciones periódicas de cumplimiento de metas. Por ejemplo que las firmas realicen turnos para la gestión de los mantenimientos correspondientes de la planta puede llevar a discrepancias ya que al buscar financiar entre todos los actores el mantenimiento de alguna sección de la planta puede generar diferencias dado que ellos como jugadores racionales velarán por su propio interés.

Esto requerirá del desarrollo de infraestructura común, la que podría distribuir los costos pero podrían presentar conflictos a futuro por la gestión en su mantención y utilización de las cañerías. Como a la vez existirán secciones que no son comunes, debería acordarse como se realiza el mantenimiento de estas, nada garantizaría que a la hora del mantenimiento de mi sección sea el de la misma calidad del otro.

- La capacidad de reserva (Backup) ante una eventualidad: Las firmas poseen estanques de reserva donde su objetivo es ser utilizado en caso de emergencia, en caso que el proceso de captura de agua se vea interrumpido los que dependen directamente del tamaño de la mina, existe una capacidad límite en la que en un proyecto común las firmas al tener participación en el proyecto eventualmente presentaría problemas de coordinación y jerarquía operacional.

Esto específicamente por la administración y la prioridad de acceso al agua, es decir, al tratarse de una planta que es administrada por todas las firmas aún así ellos tienen una administración interna de su backup el que es distinto entre los actores donde eventos inesperados que requieran el uso del backup pueden ocurrir y el rellenar los estanques toma tiempo, esto podría ordenarse mediante un reglamento, sin embargo, la pertenencia de la planta que le compete a cada firma genera un conflicto de interés e incentivo a no respetar las normativas.

- Términos legales: En la regulación Chilena el agua es considerada como un bien nacional de uso público, es decir, que pertenecen a la nación entera y no pueden ser adquiridas libremente es necesario seguir las regulaciones establecidas, en el caso de las aguas marítimas, su uso está sujeto bajo la ley de concesiones marítimas, esta permite el aprovechamiento de porciones de agua para cualquier fin.[10]

Cuando el agua pasa por ese proceso de desalinización, está sujeto a interpretaciones debido a que se considera como un resultado de un proceso natural que se obtuvo por la acción de la naturaleza por lo que estas siguen siendo bienes de uso público con un

valor agregado. De manera que en la propiedad del fruto del proceso de desalación aún presenta varias zonas grises, las que generan incerteza sobre la propiedad del agua y la inexistente claridad de la ley.[10]

Si se busca tener un proyecto multiusuario, se necesita de una administración conjunta por la poca claridad legal en la propiedad del agua y responsabilidad legal en el proceso de distribución. La administración conjunta significaría una institución compuesta entre competidores directos. Legalmente al desalinizar agua la empresa encargada obtiene derechos de agua que pertenecen a la empresa afiliada al servicio, esto significaría que si se busca crear un proyecto conjunto, tendrían que generar una institución administrada por todos los involucrados en el proyecto para contar legalmente con el permiso de agua. Generar una administración compartida con competidores directos no es atractivo para las mineras debido a la sensibilidad de información que se someterán y la complejidad para llegar a acuerdos para la toma de decisiones en una administración conjunta. A esto añadir que las firmas no son homogéneas por lo que la información que se revelaría en una eventual administración conjunta tendría diferente valoración según el tamaño de la firma, lo que es un riesgo muy grande y un incentivo a no generar esta cooperación.[10]

- Problemas de coordinación al momento de construir: El proceso de construcción ocurre en varias direcciones, este requiere de maquinaria y mano de obra para la construcción y debido a la distancia entre las mineras, se convierte en difícil de coordinar.

El riesgo que se presenta en una colaboración conjunta de una gran planta desaladora entre todos es complejo dado a las razones mencionadas, el crear una planta desaladora se debe repartir el agua entre más miembros para que sea atractivo para la firma, que únicamente se centra en la extracción y producción de mineral si o sí deberá distribuir los costos en un proyecto con otras firmas. El problema con esto es que mientras mayor es el número de tomadores de decisiones en la gestión y las firmas en un proyecto conjunto, se vuelve más complejo el mantener la cooperación entre las partes.

### 5.3. Supuestos del Modelo

Consideraciones que se tendrán para el modelo :

- Producción: El rubro de la minería cuenta con una función de producción con rendimientos crecientes y el negocio de distribución de agua desalada también. Todas las firmas poseen la misma función de producción, la diferencia entre sí es la capacidad de material que esta puede producir en base a la cantidad de agua desalada y continental, lo que se especificará en el dominio de la función como capacidad para categorizarlas. La producción de la minera tendrá influencia en el tipo de tubería que se necesitará, la que en este caso para la estructuración del modelo teóricos se considera la velocidad variable y el área constante.
- Ubicación: La región donde se planea desarrollar el proyecto posee considerables accidentes geográficos, siendo la distancia y altura los principales costos tanto en el gasto de capital (CAPEX) y en el funcionamiento diario de la operación (OPEX), a medida

que incrementa la distancia o altura automáticamente se condiciona la construcción de estaciones de bombeo con más potencia.

Por simplicidad en el modelo teórico, se considerará la ubicación de los clientes como una línea recta donde las firmas se encuentran ubicadas una tras otra con diferentes alturas entre sí.

- Vida útil proyecto: Se toma como supuesto que todos los proyectos mineros en la zona poseen un mismo horizonte de término dejando de lado los incentivos de la vida útil.
- Tiempo: CRAMSA considera su operación hasta el año 2052, los costos operacionales y gasto de capital se distribuyen durante todo este período. Asumiendo que los clientes también se encuentran operativos durante ese período.
- Estacionalidad en el tiempo: Una vez que la firma hace uso del servicio de CRAMSA esta continúa en con el servicio hasta el final del período de manera que los cupos de agua son limitados.
- Impuestos: No se considerará el impuesto establecido en la ley del mineral de Chile, es decir, las firmas perciben todo el ingreso de su producción, no hay descuento en impuestos y royalties.
- Greenfield: Se supone que el proyecto se está construyendo desde cero por lo que se asume todo el costo de infraestructura.
- Tipo de fuente: Se considera que toda firma cuenta con acceso a una alternativa continental y marítima de agua, considerando el agua continental como un parámetro que se mantiene constante con el pasar del tiempo.
- Capacidad: El proyecto cuenta con una capacidad máxima de abastecimiento de  $8000 \frac{L}{S}$ .
- Relación de producción: Se define una relación entre la producción de agua y la cantidad de cobre producido, esta relación no es del todo exacta pero es de utilidad para realizar las comparaciones de los casos, esta aproximación se realiza porque el proceso minero del cobre requiere en mucha de sus etapas el uso de agua, sin saber su nivel de recirculación, entre otros factores.

### 5.3.1. Tamaño de Clientes Mineros

La función de producción y costos se consideran para cualquier empresa minera, ahora bien, el tamaño es un factor fundamental en la producción y el costo de inversión para el desarrollo de una planta desaladora propia. Los clientes que actualmente poseen de una planta desaladora vigente cuentan con plantas con capacidad superior a los  $500 \frac{L}{S}$ . Basándose en las demanda de agua desalada de clientes en la zona se establecen 3 tamaños de firmas según su demanda de agua.

<b>Tipo de Cliente</b>	<b>Demanda <math>\frac{L}{S}</math></b>
Grandes	$< 1200$
Medios	$[500, 1200]$
Pequeños	$[0, 500)$

Tabla 5.1: Segmentación según caudal de agua producido. Adaptado de [14]

# Capítulo 6

## Modelo de las Firmas

Se revisará el comportamiento de las firmas, con CRAMSA como único distribuidor en el mercado con el objetivo de determinar los riesgos que surgen en este mercado analizando los casos límites, con la entrada e interacción de más competidores. Se modelarán la función de costos, producción y utilidad de la firma. Estableciendo la estructura de los costos y tarifas basándose en el contexto y lo revisado en la literatura. En paralelo se define el problema de minimización para CRAMSA y realizar un análisis sobre el punto de equilibrio, según la información empírica que se maneja.

Para que los jugadores entren al juego y soliciten los servicios de CRAMSA, es necesario que la escasez de agua se presente como una amenaza creíble. A esto añadir que lo investigado en la literatura sobre la administración minera, su dificultad en la colaboración entre competidores y la generación de acuerdos, esto podría considerarse como un problema endógeno de la gestión minera, el que afecta y su evidencia se encuentra respaldada por las variables y riesgos existentes que se mencionaron previamente ante el estudio de la idea de cooperar.

### 6.1. Precio del Mineral

En este modelo se considerará el precio del mineral como la evolución del precio del cobre, debido a dos razones fundamentales. Más del 90% de los clientes de la zona son mineras de cobre y este mineral lleva décadas transándose por lo que existen más investigación y respaldo de los ciclos económicos del commodity, en comparación del litio, que es un mineral que presenta un futuro prometedor con un incremento en la demanda de este y la oferta, aunque sobre estas cifras existe una mayor volatilidad e incertidumbre en la actualidad.

Este precio del cobre depende de diferentes variables, siendo el riesgo país, el tipo de cambio y el PIB las principales.[27]. Se utilizarán las cifras históricas del precio del cobre como tarifa, registradas por consejo minero y COCHILCO.[29]

En la gráfica se presenta el precio nominal y real del cobre en centavos de dólar la libra, basándose en esta, el modelo se utilizará el precio para el año 2022.

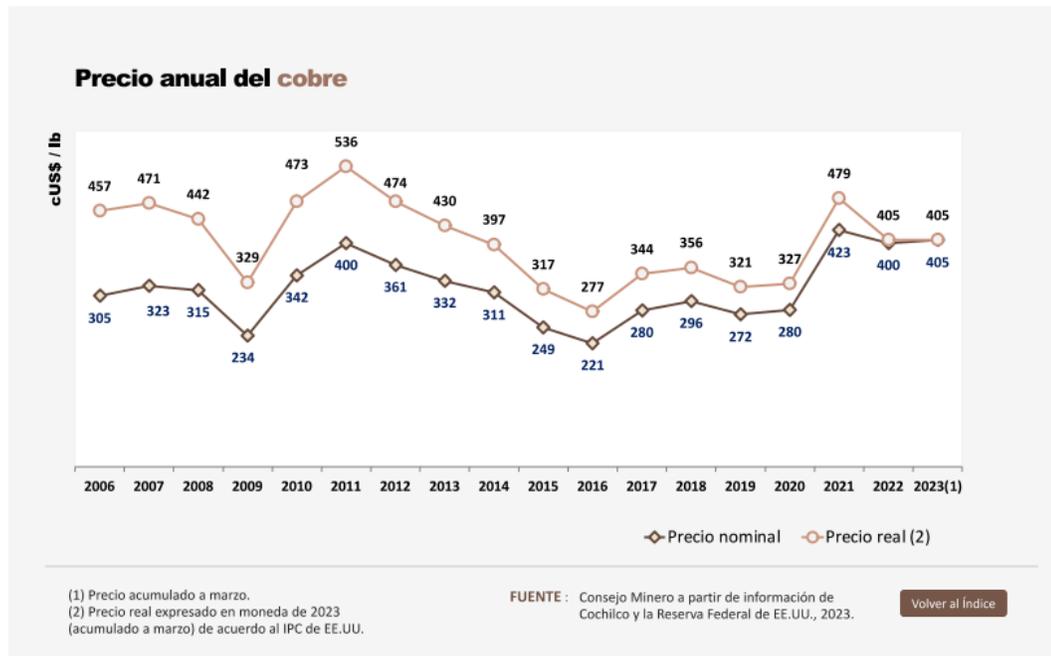


Figura 6.1: Precio Anual del Cobre. Recopilado de [29]

Como el resultado de la producción de cobre se encuentra en toneladas el precio de cobre por libra es convertido a toneladas.

$$\frac{(405 * 2,2046 * 1000)}{100} = 8928,63 \frac{usd}{ton} \quad \text{Entonces } P_{Cu} = 8928,63 \frac{usd}{ton}$$

## 6.2. Función de Producción

La producción de las mineras dependen principalmente de dos factores, la ley del mineral y el recurso hídrico. Este último puede venir de agua continental o desalada, según la información revisada se establece una ley del mineral fija de  $L_{Cu}$  para todas las firmas, la razón entre el recurso hídrico y la producción del mineral es la siguiente. Así con ambas consideraciones se puede aseverar que se necesitan aproximadamente de 215 metros cúbicos de agua para producir una tonelada de concentrado de cobre al 99,99%. [38][17].

En el caso de la minería del Litio la razón es de 2000 metros cúbicos para la producción de 1 tonelada. Como se vio anteriormente en el caso del litio es diferente porque no es consumo directo del agua para el proceso. La mayoría de los clientes que se encuentran presente en la región son clientes de cobre así que por estos motivos el modelo se basará principalmente considerando las firmas mineras de cobre.

La mayor parte de las mineras de la zona son de cobre por lo que el modelo teórico se encuentra orientado a ellas. Se utiliza esto para determinar la estructura económica de las mineras. Donde más adelante se revisará por agua establecidas, analizando las condiciones

del costo de distribución e infraestructura y si este servicio es atractivo para la firma o bien es mejor alternativa construir por su propia cuenta.

La función de producción de las firmas depende exclusivamente del capital invertido, variable que incorpora las mejoras tecnológicas, eficiencia de proceso e innovación. En el otro lado se encuentra la cantidad de agua que abastece. En el abastecimiento de la firma se consideran los dos tipos de agua, la que descompone la función de producción en 2 términos.

La producción de la firma depende de las siguientes variables, el caudal de agua continental, el caudal de agua desalada de la planta propia, el capital invertido y el trabajo.

Las firmas producen sus máximas cantidades en base al agua desalada y su cantidad de agua continental por lo que su capital  $K$  y trabajo  $L$  están sujetos al dominio de las aguas, entonces la función de producción se compondrá por dos funciones Cobb Douglas.

### **Función de Producción Mineras:**

$$f(K, L, X_C, X_D, t)_{prod.} = (tL_{Cu}(\frac{X_C^\gamma}{215}L^\beta K^\alpha + \frac{X_D^\gamma}{215^\gamma}L^\beta K^\alpha)) \quad (6.1)$$

Con  $X_D \in [0, capacidadPlanta) \wedge X_C \in [0, maxRegulación)$

Siendo:

$X_D$  las toneladas de agua desaladas en 1 hora  $X_C$  las toneladas de agua continental en 1 hora  $t$  tiempo en horas

El dominio se establece según la capacidad de la planta desaladora que presenta cada cliente, en caso de que no tenga este término se vuelve 0.

Las unidades de agua se encuentran en metros cúbicos y el resultado de producción de cobre concentrado se encuentra en toneladas, esto por la equivalencia calculada de en la producción, el número adicional hace referencia al coeficiente de conversión de unidad.

Esta función también entrega el resultado considerando la unidad de tiempo, la firma entrega en unidades de mineral producido, en toneladas por hora por lo que sus costos de capital y trabajo también dependerán del tiempo y sus producción se encuentra en la misma unidad. Por último, para medir el ingreso basta multiplicar el precio de la tonelada de mineral por lo producido según el período de tiempo a revisar.

Donde los exponentes de elasticidad cumplen:  $\alpha + \beta + \gamma > 1$ . Por esta propiedad se garantiza rendimientos crecientes. Dado que se cumple la condición necesaria, lo que también queda en evidencia con el signo de la segunda derivada.

La función de producción está integrada por una Cobb Douglas de rendimientos crecientes, esto para las distintas cantidades de agua. Que incorpora el trabajo y capital, asumiendo que las operaciones se trabajan en unidades separadas y por simplicidad lo invertido y trabajado en cada proceso es el mismo.

Alfa, Beta y Gamma son los coeficientes de elasticidad, cuando este es grande para una de las variables, indica que la producción es sensible a las variaciones en la cantidad de esta, lo que se traduce en que el insumo es importante para la producción y que una pequeña variación en su cantidad puede generar una variación significativa en la producción total.

Para el caso contrario, si su exponente de elasticidad es bajo, indica que a la producción no influye las variaciones en la cantidad de ese insumo.

Se sabe que la condición para que muestra la existencia de retornos crecientes es que:  $f(tx) > tf(x)$  Para  $t > 1$ , entonces:

$$f(\lambda X_C, \lambda X_D, \lambda K, \lambda L, t) > \lambda f(X_C, X_D, K, L, t)$$

$$\left( \left( \lambda \frac{X_C}{215} \right)^\gamma (\lambda K)^\alpha (\lambda L)^\beta \lambda t + \left( \lambda \frac{X_D}{215} \right)^\gamma (\lambda K)^\alpha (\lambda L)^\beta \lambda t \right) > \lambda \left( K^\alpha L^\beta \left( \frac{X_C}{215} \right)^\gamma t + \left( \frac{X_D}{215} \right)^\gamma K^\alpha L^\beta t \right)$$

Se toma para el primer término:

$$(\lambda K_D)^\alpha (\lambda L_D)^\beta (\lambda \frac{X_D}{215})^\gamma \lambda t > \lambda K_D^\alpha \lambda L_D^\beta \lambda (\frac{X_D}{215})^\gamma \lambda t$$

Con  $\alpha + \beta + \gamma > 1$

Se utiliza propiedad potencias:

$$\lambda^{(\alpha+\beta+\gamma+1)} (K_D)^\alpha (L_D)^\beta X_D^\gamma t > \lambda K_D^\alpha \lambda L_D^\beta \lambda X_D^\gamma t$$

Ahora es sencillo ver que:

$$\lambda^{(\alpha+\beta+\gamma+1)} > \lambda \quad \forall \lambda > 1$$

Por último por teorema de suma de funciones crecientes, la suma de ambas funciones análogas resulta en una función creciente, cumpliéndose los rendimientos crecientes.

El caudal del agua desalada obtenido por la planta propia tiene una capacidad específica y se asume que se encuentra funcionando al máximo por lo que puede ser considerada como un parámetro.

Las plantas desaladoras propias poseen costos de mantención y operación con una eventual limitante de capacidad. La planta de CRAMSA corre con los mismos desafíos, sin embargo, la diferencia se encuentra en que la capacidad de captación y la infraestructura de CRAMSA es considerablemente mayor lo que le permite abastecer a más de un cliente en la zona, haciendo uso de esta ventaja competitiva, sus costos se distribuirían al llegar a más clientes, reduciéndolos. A diferencia de lo que sería el flujo de cualquier planta desaladora para un único cliente en la actualidad.

El ejercicio que se realiza es bajo el supuesto que las firmas al contratar el servicio de CRAMSA es para incrementar su producción, en la realidad por normativas y regulaciones podría contratarse el servicio como una transición para mantener el nivel de producción, mientras se buscan alternativas permanentes. Las firmas con una producción considerable, ya se han visto enfrentadas a la problemática y se encuentran o ya han construido sus propias plantas desaladora. Esto explica porqué ya existe un caudal de agua desalada en la función de producción de las firmas. Ahora, con los pronósticos de COCHILCO muchas mineras se encuentran con planes de expandir su capacidad o comenzar a construir su infraestructura propia desde 0, en búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento. El construir infraestructura en muchos de los casos para efecto de las firmas no sería la mejor estrategia, punto que será analizado más adelante.

Entonces la producción de la firma por si sola se ve limitada por lo que se produce en su planta. Así que el contratar el servicio de CRAMSA incrementará  $x_D$  generando un incremento en la capacidad, expandiendo el dominio de una producción al único recurso que eventualmente es capaz de estancarla y limitarla. Esta última aseveración es considerando únicamente las variables de producción, en el ejercicio se considera una ley del mineral fija.

La función de producción con el servicio de CRAMSA incrementa el dominio de la cantidad de agua desalada para la producción, el costo mínimo a pagar por minera se estructurará en base a la función de costos que se verá más adelante.

Las mineras con el servicio de CRAMSA ven influenciada su función de producción, específicamente en el dominio de su cantidad de agua desalada que al contratar el servicio de CRAMSA por lo que se expande el dominio de la función.

Con  $X_D \in [0, \text{capacidadPlanta} + X_{Cramsa}] \wedge X_C \in [0, \text{maxRegulación})$

Esto considera el caso que las mineras cierren sus plantas y consideren producir únicamente desde CRAMSA.

Esto afecta directamente a la disponibilidad de agua desalada, donde se incrementa la capacidad máxima, expandiendo el dominio de la función de producción según la cantidad de caudal que se haya solicitado a CRAMSA.

### 6.3. Función de Costos Mineras

Los costos que presentan las firmas corresponden al gasto de capital para inversión (CAPEX) y el costo operacional(OPEX). Estos dos costos se segmentarán según la producción que utiliza del agua desalada y del agua continental, se profundizará en el término de agua desalada que es el que hace la diferencia con el servicio de CRAMSA y a la vez el objeto de estudio para responder la hipótesis de este trabajo.

En el costo operacional se incorpora el costo de mantención de la planta, el que se debe realizar periódicamente y el costo de transporte. Donde este último considera el costo en electricidad que se requiere para el transporte del agua, ya que desde su captación en el mar se requiere de estaciones de bombeo, las que dependen exclusivamente de la altura y la distancia.

Al igual que la producción, los costos dependerán de la unidad de tiempo que estos se estén produciendo. En general, las operaciones mineras de la zona, tienen una vida útil de aproximadamente 25 años en promedio y CRAMSA en sus inicios tiene planificado un funcionamiento por 25 años igualmente, se utilizará de la misma ventana temporal para simplificar el análisis. Las firmas diluirán todo el gasto de capital durante el periodo de funcionamiento para así recuperar la inversión de manera anual.

Para la producción de cobre utilizando agua continental se considerará unicamente el costo operacional como un parámetro del que dependerá exclusivamente de la producción de agua  $X_C$ . El ejercicio se centra en como afecta en el costo para el agua desalada por lo que se definirá un costo general para la producción en base al uso de agua continental.

#### Función de Costos de las Mineras:

$$C(x_D, k, l, t) = C_{X_D} + C_{Inv} + C_{Cu} \quad (6.2)$$

Con  $C_{X_D} = C_{mantencion} + C_{Transporte} + C_{Desalacion}$

$$C(x, t, k, l) = C_{mantencion} + C_{Transporte} + C_{desalacion} + C_{Inv} + C_{Cu} \quad (6.3)$$

La función entrega el costo por unidad y tiempo en horas, el capital y el trabajo se explican directamente por el costo operacional debido que dependen directamente de la producción de agua desalada, ambos son una fracción en porcentaje de cada uno de los costos por hora, entonces la dependencia general de la función de costos se remite a la cantidad de agua desalada producida, la altura y la distancia de la faena.

El costo  $C_{Cu}$  representa a todos los otros costos asociados con los procesos productivos extras en la producción de cobre, en este ejercicio se profundizará en los costos que influyen en la planta desaladora.

El costo operacional para la producción de mineral en base al agua desalada  $X_D$  se desglosa en tres costos principales: el costo de mantención, el costo de desalación  $C_{Desalación}$ , y el costo de transporte. Se dará énfasis en este último debido a que es el área donde CRAMSA tiene ventaja competitiva. Al igual que en el gasto de infraestructura, toda la inversión en infraestructura necesaria se distribuye en lo que se relaciona con el transporte y el costo operacional.

Lo que tiene en común CRAMSA con la estructura de costos de las mineras son la estructura de costos de desalación. Desde ahora se profundizará en estos costos para el desarrollo del trabajo. El resto de costos en la producción del mineral pueden resumirse en un parámetro que se defina como  $C_{Cu}$

CRAMSA viene a resolver el problema de transporte e infraestructura, donde el principal costo operacional se presenta en la potencia necesaria para la distribución del agua. Por lo consultado en la literatura se estima que el costo energético de transporte es de un 45 % del costo operacional de una planta desaladora, el resto se distribuye en la mantención y otros ítems. [34]

Respecto al costo de desalinización, lo que muestra la evidencia empírica es que la razón que existe es de  $3 \frac{KW}{H}$  para la desalación de  $1m^3$ , se tendrá en consideración esta relación, sin embargo, se buscará por alternativas que logren medir de mejor manera el costo según la longitud y la variación de altura.[34]

Es claro de ver dado que un mayor flujo implicará un incremento del costo, sin embargo, este por las economías de escala irá disminuyendo para la unidad siguiente en producirse. En el caso del costo de mantención, no es tan claro ver el comportamiento por lo que este se modelará según lo consultado en la literatura.

La estructura de costos de una planta desaladora se descompone como la imagen a continuación:

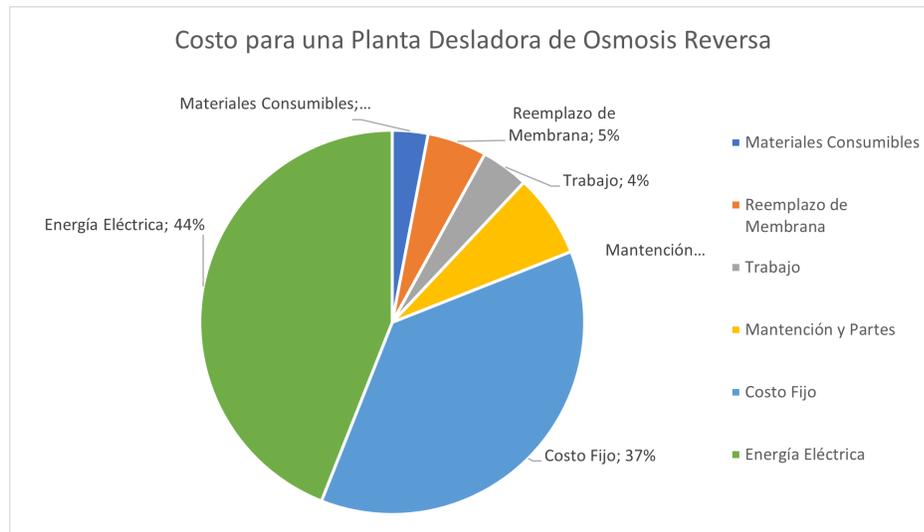


Figura 6.2: Distribución de los principales costos operacionales de una planta desaladora. Fuente [33]

Con esta información, se evidencia que el mayor costo de la planta viene al consumo eléctrico de esta siendo alrededor del 44 % cercano a las estimaciones de expertos en el área, anunciadas previamente. Este costo considera el gasto energético en transporte y en desalación. Al costo de mantención se le incorpora el resto de los costos, resultando en un 19% del costo de la planta, el costo fijo restante hace referencia al capital invertido para la construcción de la planta, el que también es considerado en la función de las firmas.

**Costo de Desalación:** El costo de desalar se utilizará lo consultado en la literatura[33], con un costo de desalación calculado como:

$$C_{Desalacion} = (3X_D)T_e \quad (6.4)$$

Siendo  $3\frac{KWH}{m^3}$  el consumo promedio kilo watt hora de una planta desaladora para procesar 1 metro cúbico de agua desalada. Por conservación del flujo, se cumple que la cantidad de agua desalada producida  $X_D = Q$  es igual al caudal que entra al procesamiento de desalación.

**Costo de Transporte:** Es el costo por distribución por tonelada de agua, los factores que influyen son la altura y la distancia. Esto se condensa en una función para el cálculo de caudal que dependerá de la altura y la distancia. Se hace uso de la ecuación de continuidad de fluidos. Para el caso del transporte en altura se considerará una pérdida de carga debido a la fricción por lo que se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach. Para la distancia se considera altura al nivel del mar y se calcula la energía necesaria para transportar.

Una vez calculada la energía se revisa la tarifa por kilo vatio y se calcula el costo por unidad. Para el agua desalada se define como el costo que viene directamente de la producción de una

unidad de mineral, el que se encuentra relacionado con la producción de mineral utilizando agua continental.

Para el cálculo, se utiliza la ec. de continuidad. Donde V es la velocidad media y A es el área de la tubería.

$$Q = A * V \quad (6.5)$$

$$Q = \pi\left(\frac{r}{2}\right)^2 V$$

Se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach para considerar la pérdida de carga de la tubería.

$$h_f = \left(f \frac{L}{D}\right) \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad (6.6)$$

Siendo L la longitud de la tubería en metros, D el diametro de la tubería en metros, V la velocidad del agua en  $\frac{m}{s}$ , g la aceleración de gravedad y f el coeficiente según el tipo de tubería, en este caso se asume un flujo laminado dado que se trata de transporte de agua, asumiendo que no existe mayor perturbación en el flujo por el material de las tuberías, por lo que se toma  $f = 0,014$ .

Se utiliza la diferencia de alturas, entre el punto inicial y final y se suma a la pérdida de carga obtenida para calcular la altura total que debe superar la bomba para transportar el agua:

$$\Delta h = h_{fin} - h_{ini}$$

$$h_t = h_f + \Delta h$$

Finalmente la potencia necesaria:

$$P = \frac{Q h_t \rho g}{\eta 1000} \quad (6.7)$$

Esta ecuación considera la potencia necesaria en una tubería que no se desliza exclusivamente recta por lo que incorpora la distancia de la tubería como la altura.

Con  $\rho$  como la densidad del agua en  $\frac{kg}{m^3}$ , Q el caudal, g la aceleración de gravedad y  $\eta$  la eficiencia de la estación de bombeo en este caso se trabajará con un  $\eta = 95\%$ . Las unidades

resultantes son KW por segundo, a la que se realiza una equivalencia a del costo de  $\frac{KW}{H}$ , se multiplica y se obtiene el costo.

Ahora bien en el caso que se trate de distancia necesaria con una altura despreciable, entonces se utiliza la misma ecuación simplificada, es decir, sin considerar la diferencia de altura dado que esta es 0, dado que no hay diferencia de altura estando a nivel del mar.

$$P = \frac{Qh_f\rho}{\eta 1000} \quad (6.8)$$

La cantidad de energía obtenida es necesario multiplicarla por la tarifa eléctrica. Las fórmulas para el cálculo de tarifas son establecidas por el decreto N° 276 de 2004, de manera que existen distintas opciones tarifarias que puede escoger el usuario según su tipo de consumo, una vez seleccionada después del transcurso de un año tiene la libertad de escoger otra o mantener la actual. Para las firmas se considerará como alta tensión debido a que todas las plantas de las firmas poseen un consumo superior a los 440V. Por simplicidad, se asume una tarifa de alta tensión de  $T_e$ . [39]

Recordar supuesto todas las tuberías de las firmas poseen la misma área y lo que varía en el caudal es la velocidad de este para cada firma. Así expandiendo el término:

$$C_{Transporte}(Q, t) = \frac{\left(\frac{\rho g Q (f_e \frac{L}{Diam.} \frac{V^2}{2g} + \Delta h)}{\eta 1000}\right) t T_e}{N_{eb}}$$

La red de CRAMSA cuenta con alrededor de 31 estaciones de bombeo que se distribuyen uniformemente en la red. En el caso teórico se comenzó considerando una sola estación de bombeo, donde los resultados obtenidos en el transporte con la ecuación de Darcy-Weisbach, los costos se elevaban demasiado, lo que es poco realista, por esto se decidió ponderarlos por la cantidad de estaciones de bombeo presentes hasta el destino del cliente  $i$ .

$N_{eb}$  es el número de estaciones de bombeo que se necesitan. Se sabe que  $Q = V * A$  Con  $A$  como el área de la tubería constante para todas las firmas. Entonces:

$$\left(\frac{\rho g V A (f_e \frac{L}{Diam.} \frac{V^2}{2g} + \Delta h)}{\eta 1000}\right) t T_e$$

$$\frac{\left(\frac{\rho g (f_e \frac{L A}{Diam.} \frac{V^3}{2g} + \Delta h V A)}{\eta 1000}\right) t T_e}{N_{eb}}$$

Se considera la densidad del agua como  $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ , la expresión se encontraba dividida por 1000 debido a que el resultado estaba en vatios y se estaba pasando a kilo vatios. Entonces:

$$\frac{\left(\frac{g V A (f_e \frac{L A}{Diam.} \frac{V^3}{2g} + \Delta h V A)}{\eta}\right) t T_e}{N_{eb}}$$

Por último con un número de Reynolds  $f_e = 1,4\%$  y una eficiencia de la bomba  $\eta = 95\%$ . Simplificando, la expresión final se representa como:

$$\frac{\left(\frac{(1,4\% \frac{LA}{Diam.} \frac{v^3}{2} + gVA\Delta h)}{95\%}\right)tT_e}{N_{eb}} \quad (6.9)$$

Resultando en un valor resultante de potencia en usd Kilo Watts/ hora, el que debe ser ajustado a sus unidades de usd MegaWatt/Hora.

**Costo de Mantenición:** Las firmas deben someter a mantención periódica las plantas desaladoras. Las mantenciones se realizan por secciones de forma que siempre se sigue produciendo desde la planta, por esto las plantas no suelen utilizar el 100% de su capacidad.

$$C_{mantencion} = \ln(0,1K_D) \quad (6.10)$$

La mantención de la planta se modela como una función logarítmica que dependerá del capital siendo una fracción del costo operacional que corresponde al 10%. El costo se establece como el 10% del capital invertido debido a que el capital invertido se distribuye en los diferentes procesos que componen la producción de Cu, el 19% previamente señalado corresponde únicamente al costo total de la planta desaladora de manera que hace sentido disminuir el porcentaje.

En este caso, el costo se modela como un logaritmo natural ya que su crecimiento en los costos presenta estacionalidad en el largo plazo, lo que busca describir correctamente lo que ocurre en realidad al tener una mayor producción del costo de mantención se estabilizará para un K muy grande. A un mayor flujo implica un mayor deterioro y desgaste de la planta, pero la cantidad de mantenciones a realizar serán las mismas, con la automatización del proceso y el transcurso del tiempo este se hace eficiente y sus costos se logra mantener constantes en el largo plazo.

Si bien estos costos de mantención se realizan de manera periódica, semestralmente durante todos los períodos. La función considera el costo durante todos sus períodos. La magnitud de este costo es similar al resto de los costos que comparten el costo operacional.

**Costo de Inversión:** Incorpora el costo de la construcción de toda la infraestructura, las plantas de captación, las tuberías y la planta. El costo de la construcción de una planta desaladora se estiman:

Se asume un costo de tubería promedio por metro de  $1375 \frac{usd}{m}$ , considerando por simplicidad que todas las tuberías de las firmas son similares. Este es el único costo de infraestructura que dependerá de la distancia. El resto de los costos se mantiene fijo, se asumen los costos para una planta promedio de  $800 \frac{l}{s}$ , el que se ponderará según la capacidad real de desalación

de cada planta, estos se presentan en la tabla a continuación. La función teórica cuenta con menos data que el modelo empírico por lo que la aproximación de los costos de inversión busca hacerse en base a una relación simple de los costos de una planta desaladora promedio.

Infraestructura	Costo (MUSD)
Estación de bombeo	20
Sistema de desalación	120
Sistema eléctrico y de descarga	10

Tabla 6.1: Costo infraestructura planta desaladora. Adaptado de [15]

La tabla anterior considera el costo para un cliente promedio de la zona, esto refiriéndose al costo del sistema de desalación que puede tener leves variaciones según el tamaño del cliente. Respecto a las estaciones de bombeo y el sistema eléctrico son lo más cercano al costo unitario fijo para cada planta independiente del tamaño.

El costo de la infraestructura se distribuye en un plazo de 25 años en lo que corresponde a CRAMSA, el plazo de distribución es fundamental para la inversión. Para el caso de las firmas se toma la información obtenida del reporte de Inversión en la minería chilena 2020-2029[15] donde se estima un promedio de vida útil de 25 años. Se utilizarán 25 años para estar en las mismas condiciones que CRAMSA. Entonces, el gasto de capital se traduce en:

En el transcurso de 25 años se debe recuperar lo invertido, se calcula el costo anual de la inversión,  $\frac{150\phi}{25*1000}$ . La planta tiene una capacidad de  $\phi\frac{L}{S}$ , se obtiene el costo de infraestructura en razón al costo de la planta base, se convierten las unidades:

$$\frac{150\phi}{25*1000} \frac{MUSD}{A} \frac{1A}{365D} \frac{1D}{24H} = \frac{150\phi}{25(24*365*3600)*1000} \frac{USD}{s}$$

Hay que considerar el costo de las tuberías en unidad de tiempo:

$$\frac{1375D}{25} \frac{1}{365*24} = \frac{55D}{8760} \frac{USDm}{H}$$

Finalmente el costo de inversión sería:

$$C_{Inv} = 0,00627D + \frac{150\phi}{25(24 * 365) * 1000} \quad (6.11)$$

Para el costo de infraestructura se utiliza esta métrica como referencia el costo de infraestructura para una planta de  $800\frac{L}{s}$

**En Resumen el Costo de los Clientes Mineros está dado por:**

$$C(x_D, X_c, L, K, h, D, t) = t \left( \frac{Qh_t \rho g}{\eta 1000} T_e + (3X_D) T_e + \ln(0, 1K_D) + 0, 3L_D + 0, 00627D + \frac{150M \text{usd} \phi}{219000000} + C_{Cu} \right) \quad (6.12)$$

Todos los costos de la función está por el costo en horas, por lo que al multiplicar por t es los costos en t horas transcurridas.

El gasto de capital incorpora toda la inversión realizada, desde construcción de estaciones de bombeo, tuberías, entre otras. Este costo de inversión se tomará como un parámetro fijo, el que varía según la cantidad demandada por el cliente.

Para el caso del costo de producción de mineral mediante el uso de agua continental, se considerará como parámetro, por simplicidad para profundizar el análisis sobre los costos tras la producción de agua desalada.

El costo de producción en base al uso agua continental, al tener una capacidad específica, se integrará todos los costos existentes en la producción de Cu, separando los de la desalación como  $C_{Cu}$ . Se supone que no hay oportunidad de incremento de productividad debido a que esta ya produce su máxima capacidad permitida, el costo operacional será un porcentaje de la producción, generalizando al contexto se asume que la firma produce lo máximo posible, con las variables  $K$  y  $L$  sujetas al máximo de agua que se puede producir.

De esta forma se establece que el costo de producir de  $C_{Cu}$  es :

$$C_{X_c} \rightarrow \max(X_c) \quad (6.13)$$

Costo que se encuentre incorporado dentro de  $C_{Cu}$

## 6.4. ¿Cómo Influye CRAMSA en las Firmas?

- **El Tamaño de los Clientes:** En la zona hay múltiple variedad de clientes mineros de diferentes tamaños los que se encuentran cercanos entre sí, también se encuentran firmas que no poseen plantas desaladoras propias. Lo que muestra la evidencia es que los clientes de menor tamaño no presenta de una planta propia por ser costoso para la firma.

Un servicio como el que entrega CRAMSA tendría un efecto transversal para todos los clientes, entregaría la posibilidad incrementar su producción mediante un suministro externo de agua desalada. Siendo mayormente valorado por los clientes que no les es posible contar con esta alternativa por su cuenta.

- **Una Zona de Muchos Accidentes Geográficos:** Toda la construcción de infraestructura desde la captación de agua de mar y la distribución para cada firma, significa un desafío de logística e inversión considerable por la gran cantidad de irregularidades de la zona.

Es fácil notar que la cooperación entre dos firmas vecinas entre sí sería menos costos para ellos ya que distribuirían el costo en partes iguales, siendo más para todos, sin embargo, como se vio anteriormente hay múltiples factores que imposibilitan la cooperación por los riesgos morales implícitos de cada firma. CRAMSA soluciona esta problemática al ser un tercero encargado de la distribución que vela por su propio interés el que responde a generar el mejor servicio y una distribución eficiente para los clientes, lo que está en línea con los intereses de sus futuros clientes mineros.

- **Costo de Mantenimiento y Posible Eventualidad:** La planta desaladora requiere de mantenimiento periódico y también existe la probabilidad que ocurra algún evento que afecte la planta y detenga la producción. CRAMSA garantiza al cliente disponer del suministro y también de BackUP (suministro de respaldo) en caso que exista cualquier adversidad. Además de correr con aquel riesgo, CRAMSA corre con los costos de mantenimiento del extra de la planta.
- **Vida Útil del Proyecto:** Los horizontes temporales de las firmas, están sujeto a permisos de operación, los que tienen diferentes tiempos, por esto la alternativa de incrementar la producción a través de una fuente externa es una alternativa atractiva dado que brinda libertad para el aumento de la producción a las firmas con término de operaciones en el corto y mediano plazo.
- **Compensación Externa:** La región posee conflictos ambientales activos, en el salar de Atacama se hizo mención a medidas de compensación y reposición del salar. Uno de los dictámenes que mencionó la autoridad hace referencia a infiltrar con agua el salar con fines de restituir el ecosistema en un largo plazo. Las mineras involucradas deberán destinar parte de su desalinización en rellenar distribuir al salar, así contratar el servicio de CRAMSA es una alternativa para no disminuir la producción de la firma y aún así cumplir por lo dictado por la autoridad.
- **Una planta desaladora requiere de economías de escala:** Muy relacionado con los distintos tamaños de las firmas, se destaca que muchos de estos clientes de menor tamaño que no poseen planta de desalinización, es decir  $X_D = 0$ , porque una planta requiere de economías de escala para su funcionamiento. Esto se corrobora con las declaraciones entregadas por el grupo CAP en la comisión de minería y energía en la cámara de diputados[33]. *”El CAPEX de un proyecto de desalinización es altamente dependiente de la economía de escala, siendo rentable si supera los  $500 \frac{l}{s}$  de producción, disminuyendo el costo unitario de inversión y producción.”* (Grupo CAP.2017)

Para tener una noción de la magnitud de las plantas desaladoras vigentes, la de mayor procesamiento es la que posee minera Escondida que procesa alrededor de  $2500 \frac{l}{s}$ . Siendo la minera más grande de la zona.[13]

Se hará énfasis en como cambian los costos y evaluar cuanto cuesta construir una planta desde 0 o contratar el servicio de CRAMSA.

## 6.5. Adaptación a CRAMSA

De la construcción teórica para las mineras, se tomará la estructura de costos de la desalación de agua y se incorporará a la construcción de una función de producción y costos para CRAMSA, empresa que está centrada en la producción y distribución de agua desalada.

### 6.5.1. Función de Producción

Las variables presentes en la función de producción, varían en como se representa para las firmas, debido a que son industrias distintas que se centran en la producción de insumos diferentes.

El agua de mar es un insumo que hay en exceso en el planeta por lo que no existe un límite de capacidad. El mercado del agua desalada es incipiente en Chile, por lo que aún no existe un valor a mercado de este insumo. La única regulación de este insumo es la regulación medioambiental, que las torres de captación no afecten negativamente al ecosistema marino, una vez ya aprobada por las autoridades el límite de extracción es la capacidad de la infraestructura disponible, en este caso, sus cuatro torres de captación.

Por esto, el la producción de agua desalada depende directamente del agua de mar que entra y como la relación entre ellas es de 1 : 1, entonces se dice que el  $A = \sum_{i=1}^k Q_i$

Este insumo se encuentra directamente relacionado con la cantidad de energía utilizada para el proceso de desalinización, a más energía la producción incrementa. Esta dependencia se ve reflejada en la función de costos.

El capital utilizado, se destina para el costo operacional, específicamente el costo de mantenimiento de la planta para la producción del agua. Este gasto de capital se denomina como I, lo que cubre parte de los costos operacionales.

En aspectos generales, las variables con las que se representa la producción para la parte desalada son las mismas, lo único que cambia son las capacidades máxima de producción. En los costos existen las principales diferencias, los que será enunciados y explicados a continuación.

Con estas dos variables se puede construir la producción de CRAMSA:

$$f(A, M, t)_{prod.} = t(A^\alpha M^\beta) \quad (6.14)$$

Con  $\alpha + \beta > 1$ , cuenta con rendimientos crecientes.

En este caso no se considera el costo del trabajo en la función de producción debido a que este es mínimo en comparación al caso de las mineras.

## 6.5.2. Función de Costos CRAMSA

$$C = C_{Transporte} + C_{Inv} + C_{Mantencion} + C_{Desalación} \quad (6.15)$$

El gasto de capital (**CAPEX**) y el gasto operacional (**OPEX**), se encuentran presentes en los distintos costos. Con fin de esclarecer la situación, los costos operacionales, se encuentran compuestos por el costo de transporte, el costo de desalación y el costo de mantención.

El gasto de capital se ve reflejado en el monto invertido. Relaciónandolo con la función de producción el gasto de capital se ve reflejado en el caudal de agua de mar producida.

La función de costos para CRAMSA se debe pensar como el costo por hora para  $i$  clientes. Debido a los estudios de la zona, ya se tiene claro los cuales son los potenciales clientes, también son conocidas sus distancias y alturas por lo que estas variables en el costo de transporte pasan a convertirse en parámetros. Por simplicidad, se asume que la red de CRAMSA se define como una línea recta entre todos clientes por lo que la incorporar los costos, considera el costo para una construcción general de infraestructura, construcción de estaciones de bombeo y abastecimiento para capacidad completa, es decir para unos  $8000 \frac{t}{s}$ .

**Costo de Transporte:** Se calcula de la misma manera que para la firma en sí, esto debido a que el mecanismo de transporte será el mismo, por lo que el costo energético del transporte será el mismo.

Ahora bien, se considera que todos los clientes se encuentran en línea recta con respecto a CRAMSA. Entonces el costo energético de transporte será la máxima altura y la distancia máxima de los clientes que se encuentren en el servicio en el período  $t$ .

La distancia más lejana y también la firma de mayor altura. (No necesariamente el cliente más lejano es el que se encuentra a mayor altura), esto debido a que se trata de una zona de accidentes geográficos por lo que es un terreno irregular.

En este caso el costo de transporte se dividirá por la cantidad de estaciones de bombeo, esto porque en el cálculo previo para los clientes mineros se asume que construyendo con una planta se llega hasta el punto final.

Entonces:

$$C_{Transporte}(Q, t) = \frac{\left( \frac{\rho g \sum_{i=1}^k Q_i \left( f_e \frac{\max(L)}{Diam.} \frac{V^2}{2g} + \max(\Delta h) \right)}{\eta 1000} \right) t T_e}{N_{eb}} \quad (6.16)$$

Con  $N_{eb}$  como la cantidad de estaciones de bombeo activas.

La función de costos de transporte considera la suma de todos los caudales, la distancia máxima y altura máxima. Realizando las simplificaciones correspondientes y adaptándolas al caso de todos los clientes de CRAMSA resultaría como:<sup>1</sup>

$$C_{Transporte}(V, t) = \frac{\left( \frac{(1,4\% \frac{\max(L)A}{Diam.} \sum_{i=1}^k V^3 + g\max(\Delta h) \sum_{i=1}^k VA)}{95\%} \right) t T_e}{N_{eb}} \quad (6.17)$$

**Costo de Desalar:** Es el mismo costo energético para la planta de desalación de las firmas, se debe añadir la suma de los flujos totales de las firmas con el servicio de CRAMSA.

$$C_{Desalar}(Q, t) = \left( 3 \sum_i^k Q_i \right) t T_e \quad (6.18)$$

**Costo Mantenición:** El costo de mantención, se considera como el 19% del capital M. En este caso la mantención de la planta sí representa el porcentaje declarado en la literatura. Esto quiere decir que por cada unidad de capital de mantenimiento se descuenta este costo. Sin embargo, es importante tener consideración que el costo de mantención mantiene una estacionalidad al igual que para la función de costos de la minera.

Esta estacionalidad se representa con el logaritmo natural, el que representa la periodicidad de la mantención. Se modela de esta manera porque al ya tener que hacerse las mantenciones de manera reiterativa, se podrían considerar costos fijos por período que no deberían incrementar bruscamente en el tiempo. La función logaritmo tiene un crecimiento lento de manera tal que el aumento que existe el leve incremento en el costo de mantención se justifica con el desgaste del material.<sup>2</sup>

Se puede notar que se cumple que:  $C_{MCramsa} > C_{MfirmaXD}$ .

$$C_{Mantencion}(M) = \ln(0,19M)t \quad (6.19)$$

**Costo Inversión:** Este costo tiene variaciones respecto al calculado para las firmas, el costo de inversión incrementa debido a que la cantidad de infraestructura que se necesita es mayor. Para los parámetros de distancia y altura se considera el maximo de clientes activos.

Para el costo estimado por la planta, específicamente el costo del sistema de desalación y el sistema eléctrico será multiplicado x10 dado que la estimación para el costo de la planta es basándose en la planta de  $800 \frac{L}{S}$ .

<sup>1</sup>El costo depende exclusivamente de V ya que el área es cte.

<sup>2</sup>El costo de mantención se expresa en tarifa de dinero por hora.

El proyecto en la realidad tiene como objetivo establecer 31 estaciones de bombeo, dependen de la distancia y altura. Se creó una tabla con los distintos niveles de altura y como se encuentran ubicados según la red como referencia (ver anexo).

En este caso las estaciones de bombeo deberán multiplicarse según la distancia máxima. Para estimar la cantidad necesaria de estaciones de bombeo dividiremos el largo total por el trabajo máximo que puede realizar la estación de bombeo, según estimaciones realizadas por CRAMSA las estaciones de bombeo tienen una capacidad de 400 m de altura y 20km de distancia. Por esto para determinar el número de estaciones de bombeo necesarias se calcula como:

$$N_{Eb} = \frac{\max(h)}{400} + \frac{\max(L)}{20000}$$

Este número se redondea al entero mayor y entrega la cantidad de estaciones de bombeo totales. Este cálculo no considera los accidente geográficos que llevan a disminuciones considerables en la altura. Se considera como una distancia recta, para tener un estimativo en el modelo, ya que de la otra manera, se necesitaría de los datos empíricos para hacer una estimación acertada.

Entre los otros elementos que restan de infraestructura, el sistema de desalación y el sistema eléctrico se consideran con costos de 120 M y 10 M respectivamente. Como se trata de una planta con 10 veces la capacidad de la planta con sus costos estimados estos dos costos son multiplicados por 10.

$$120 * 10 + 10 * 10 = 1300M_{usd}$$

La vida útil del proyecto de CRAMSA es el mismo que el de las firmas mineras, es decir, un período de 25 años.

El costo restante corresponde a la construcción de tuberías construidas que se consideran como tuberías de tamaño universal que tienen un valor de 1375 dólares el metro.

Entonces el costo de inversión sería:

$$1300M + 20MN_{eb} + 1375\max(L) = C_{inv} \quad (6.20)$$

Este es el costo total de CRAMSA, este costo hay que distribuirlo en un plazo de 25 años, como el resto de las variables de la función de costos y producción se encuentran en horas, entonces hay que realizar la transformación pertinente.

$$\frac{(1300M+20MN_{eb}+0,00628\max(L))}{25} = C_{Inv} \text{ costo en años.}$$

Ajustamos los costos anuales a horas:

$$C_{Inv}(t) = (5936 + 0,00628max(L) + 91N_{eb})t \quad (6.21)$$

Se asume que la planta de CRAMSA es construida de inmediato de manera que se considera a  $\phi$  como la capacidad máxima  $8.000 \frac{L}{s}$ , es decir,  $28800 \frac{m^3}{H}$ .

Entonces la función de costos para CRAMSA, se representa como:

$$C_{total}(A, M, t) = (5936 + 0,00628max(L) + 91N_{eb})t + (3 \sum_{i=1}^k Q)tT_e + ln(0, 19M)t + \frac{\rho g \sum_{i=1}^k Q (f_e \frac{max(L)}{Diam.} \frac{V_{2g}^2 + max(\Delta h)}{\eta 1000}) t T_e}{N_{eb}} \quad (6.22)$$

# Capítulo 7

## Estimación Empírica Utilizando el Modelo de CRAMSA

### 7.1. Datos a Utilizar

De la construcción teórica se realizará una adaptación a la forma empírica de CRAMSA. La ventaja que tiene CRAMSA por sobre las firmas es en la construcción de infraestructura a la mayor unidad, es decir, construir un sistema de desalación, tuberías, estaciones de bombeo y sistema eléctrico pensado en la distribución de  $8000\frac{L}{S}$  abasteciendo todos los nodos de la red.

Se evaluarán los diferentes escenarios posibles de distribución de agua, apuntando a ver como estas perturbaciones constituyen los costos para posteriormente realizar una interpretación económica basándose el comportamiento de los costos en el mundo real para CRAMSA y para cada uno de sus clientes.

Los ejercicios empíricos a realizar toman como punto de inicio parámetros previamente a valor de mercado para posteriormente generar una estimación de los costos. Los datos más relevantes son el comportamiento de los costos en base a la distancia, flujo y altura. Variables con las que se realizarán los ejercicios empíricos. Los puntos iniciales de demanda para el posterior desarrollo del trabajo son los que se presentan en la tabla a continuación:

Se define un primer escenario únicamente integrado por clientes mineros:

<b>Escenario Clientes Mineros</b>		
Cliente	Demanda $\frac{L}{S}$	Rama
Mantos Blancos	300	Base
Spence	250	Norte
Codelco Norte	700	Norte
Lomas Bayas	300	Este
Zaldívar	300	Sur
Escondida	4050	Sur
Gabriela Mistral	300	Este
SQM y Albemarle	500	Este
EB08 Spot	900	Norte
Sierra Gorda	400	Norte

Tabla 7.1: Clientes Relevantes CRAMSA

<b>Escenario Clientes Mineros con Concesiones</b>		
Cliente	Demanda $\frac{L}{S}$	Rama
La Negra 1	300	CS
La Negra 2	300	CS
Antofagasta Norte	250	CS
Calama	150	CS
EB08 Spot	900	Norte
Spence	250	Norte
Codelco Norte	700	Norte
Gaby	300	Este
Zaldívar	300	Sur
Escondida	4050	Sur
SQM y Albemarle	500	Este

Tabla 7.2: Clientes Mineros Relevantes y Concesiones Sanitarias CRAMSA

## 7.2. Estructura de Costos Empírica

El gasto de capital por operación de planta (**OPEX**), incorpora los siguientes costos:

- Costo de transporte: Este costo es que en el modelo teórico fue modelado a través de la ecuación de Darcy-Weisbach. La dependencia de este costo se encuentra en la energía necesaria para transportar un caudal  $Q$  hasta cierta distancia  $L$  y altura  $h$ . En el modelo empírico es considerado según el costo de la energía, la que depende de la tarifa eléctrica y únicamente de la diferencia de altura.

- Costo de desalación: Es el costo energético que le toma a la planta desalar un volumen  $V$  de agua en una unidad de tiempo, lo que se refiere al caudal  $Q$ . Así obteniendo la unidad exacta de energía que se utiliza. En el modelo empírico, el sistema de desalación sigue la misma estructura de costos definida en el teórico.
- Mantenimiento: A diferencia del modelo teórico, la mantención de equipos se considera en una sección apartada, esta se encuentra incorporada pero como flujos de costos en períodos específicos.

En relación al modelo teórico, el costo de distribución es de los costos más complejos de modelar matemáticamente, esto principalmente por la irregularidad del terreno, la heterogeneidad de los clientes y el no contar con el trazado inicial de las secciones con la cantidad de infraestructura necesaria para cada unidad de la red, lo que complejiza el obtener una aproximación matemática como forma funcional.

Así como el caudal tiene una dependencia del OPEX y CAPEX dado que este depende de las variables del volumen y área de la tubería, lo que está relacionado con el tipo de infraestructura a construir. En el caso empírico un aumento de caudal requerirá de un aumento de la velocidad debido a que el área de las tuberías se encuentran definidas por sección.

El gasto de capital (**CAPEX**) incorpora todo lo que es infraestructura para el desarrollo del proyecto. El ejercicio empírico incorpora los siguientes costos:

- Tuberías: Estas se compran por piezas, el precio de cada una es por metro. La demanda del cliente es esencial para el tipo de tubería que se necesita, debido a que estas cambian de valor según la sección específica, en cada sección estos mantienen su mismo diámetro, sin importar el incremento del caudal.

Se busca distribuir la capacidad máxima de la planta, los primeros tramos serán comunes, sin embargo al momento de distribuirse en las ramas y posteriormente llegar a cada cliente estos variarán según el cliente. Se adjuntan los diámetros de las tuberías en anexo, por temas de confidencialidad no se añaden los costos.

- Estaciones de bombeo: La red está construida pensando en puntos estratégicos donde establecer las estaciones de bombeo, en todo el sistema son en total de treinta y un estaciones de bombeo. El costo de infraestructura de la estación está ligado a la capacidad eléctrica máxima que la estación puede bombear.
- Construcción del sistema desalación: El sistema de desalación es construido por etapas en total son cuatro módulos los dos primeros con una capacidad de desalación de  $4000 \frac{L}{S}$  y los restantes tendrán un plazo mayor de construcción llegando a los  $8000 \frac{L}{S}$  en total.

Este costo de infraestructura se relaciona con el caudal de agua que se busca desalar. Para cada modulo en construcción el costo promedio de infraestructura es aproximadamente del 35% , lo que quiere decir que al construir en una segunda etapa existe una disminución de los costos debido que ya existe parte de la infraestructura que ya se encuentra construida.

- **Concesiones:** Las concesiones sanitarias tienen costos aparte a diferencia de los clientes mineros, los costos que presentan son estanques de producción, estanques de recepción, plantas de tratamiento de agua, plantas de tratamiento de aguas residuales, derechos de aguas y el uso de la red pública. Estos costos se encuentran incorporados en las secciones de los clientes sanitarios.
- **Tierras:** Este costo hace referencia a toda la zona por la que se ubicará infraestructura, depende exclusivamente de las hectáreas de tierra necesarias según toda la infraestructura construida para llegar a un cliente.
- **Sistema de captación:** El sistema de captación refiere a toda la infraestructura necesaria para la captación del agua de mar, este es el único costo fijo que comparten los i clientes de la red por igual.

El gasto de capital del modelo empírico añade el costo de las concesiones, las tierras y sistema de captación. Se trata de tres nuevos factores en los costos, el resto ya se encontraban incluidos en el modelo teórico.

**Gasto en Equipo e Infraestructura:** La planilla empírica considera en un apartado un costo más que se le suma al CAPEX y OPEX, este es el costo de reemplazo de pieza de equipo y de infraestructura. Este costo está construido bajo el supuesto que hay gastos durante el año 2029, 2030 donde se ingresa el equipo nuevo y posteriormente en 2045 y 2050 donde será necesario realizar un recambio por el uso. Este costo corresponde al costo de mantención del modelo teórico.

La ventana de tiempo es un factor relevante en esto, la separación de las fases cuentan con una ventana de tiempo de dos años de construcción.

Para el cálculo de los costos en el ejercicio empírico se consideran un tiempo de 25 años de funcionamiento por lo que el costo total se divide por año y se trabaja con el costo en las unidades  $\frac{usd}{3}$ .

$$CAPEX + OPEX + EQ.INFRA = C_{TOTAL} \frac{usd}{3}$$

Ya definido claramente los costos que incluye el modelo empírico, se profundizará más adelante como los costos cambian en diferentes escenarios y como afectan a cada cliente.

Un resumen el costo de implementación total del proyecto se presenta en la tabla a continuación.

### **7.3. Forma Analítica Estructura de Costos Modelo Empírico**

Para el cálculo de los costos estimados se define la red estructural de CRAMSA por secciones, las que se dividen hasta un nodo de llegada, el que puede ser una estación de bombeo o cliente,

Costos de construcción y Desarrollo	MM USD
Intake	100
Planta Desaladora	900
Tuberías	3,200
Estaciones de Bombeo	600
Sistema Eléctrico	300
Terreno	100
Costos de Desarrollo	300
<b>Total</b>	<b>5,500</b>

Figura 7.1: Resumen de Costos CRAMSA. Fuente [33]

la matriz se encuentra ordenada desde el inicio de la red tomando los puntos de ubicación y altura para cada sección desde la captación hasta hasta el final. Se utiliza esta matriz base para la creación de otras matrices para los calculos más adelante, la forma funcional viene desde acá pero este procedimiento se puede explicar con los parámetros directamente de altura, distancia y energía.

Existe otra matriz que define las secciones activas que son necesarias para cada cliente, esta asociación es necesaria para la estimación de los costos debido a que una sección puede pertenecer a varios clientes a la vez. Las secciones se activan directamente desde los inputs ingresados en el año de inicio, asumiendo que los clientes se encontrarán activos durante todo el periodo. Este proceso puede ser descrito como una función indicatriz.

$$\mathbb{1}_{j,i} = \begin{cases} 1, & \text{si la sección } j \text{ se encuentra activa para el cliente } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

Esto resulta en una matriz de 0s y 1s, teniendo en sus filas toda la red estructural con sus secciones  $j$  (ordenadas) y las columnas con todos los nodos posibles que pueden activarse, al referirse a los nodos por lo general se habla de estaciones de bombeo, puntos estratégicos o bien clientes.

Se tiene una matriz llamada caudales, que contiene la demanda del cliente  $i$  en el tiempo  $t$ . Se define como:

$$D_{i,t} \tag{7.1}$$

Con estas dos matrices se obtiene el flujo por sección con la multiplicación de estas:

$$FS_{j,t} = \mathbb{1}_{j,i} * D_{i,t} \tag{7.2}$$

Siendo FS el flujo por cada sección  $j$  de la red  $i$  en el tiempo  $t$ . Esta matriz será fundamental para el cálculo de los costos para los clientes.

La tuberías son la sección más costosa del proyecto, en el modelo se consideran los diámetros de las tuberías fijos para ciertas secciones específicas, estos están definidos como parámetros.

Este cálculo depende directamente del caudal  $Q$ , influyendo en la cantidad de tuberías, ya que al aumentar  $Q$  y el diámetro de tubería para cada sección viene ya definido entonces la única manera de hacer lleno a un incremento de demanda es incrementar la infraestructura de la tubería de la sección definida en un principio.

El cálculo de costos de infraestructura por tuberías está dado por:

$$Q_{TubD} L_j C_{TubD,c} \quad (7.3)$$

Ocurre lo siguiente, si el caudal de la demanda que exige el cliente  $i$  es mayor a la capacidad máxima de la tubería en  $\frac{L}{S}$  entonces la cantidad de tuberías necesarias  $Q_{TubD}$  incrementará hasta que el  $Q_i$  exigido por el cliente logre ser contenido en las tuberías construidas.

$C_{TubD,C}$  corresponde al parámetro de los  $C$  costos que se tienen las tuberías de diámetro  $D$ , este parámetro es el costo en usd por metro.  $L_j$  es un vector de parámetros de distancias para las  $j$  secciones.

El resultado de este costo se encuentra en  $M$  de usd por sección, el que está ajustado dividido por  $1 M$ .

El calculo de infraestructura para las estaciones de bombeo se desarrolla de la siguiente manera.

Se cuenta con los parámetros de las estaciones de bombeo con sus capacidades energéticas definidas en  $MW$  y el caudal máximo que puede pasar por esa planta (también fijo).

$\frac{\text{Caudal}}{\text{Cap. Planta}} = \frac{L}{S}$ , así se divide el resultado por el caudal efectivo que se demanda en cada estación de bombeo resulta en  $\frac{\text{Demanda}}{MW}$  entrega el  $Mw$  por estación de bombeo.

Se cuenta con el parámetro de los costos de las estaciones de bombeo en  $\frac{usd}{MW}$ , para terminar el cálculo se multiplica este costo por la cantidad de  $MW$  obtenidos en la estación de bombeo, obteniendo el costo por cada estación de bombeo de forma anual. El que es dividido por  $1M$  para ajuste de unidades.

En resumen, el costo de infraestructura para las estaciones de bombeos se vería descrito como:

$$Eb_p \frac{Q_{p,t}}{MW_{p,t}} \quad (7.4)$$

Siendo  $Eb$  un vector de parámetros que tiene los costos predefinidos de cada estación de bombeo en dólares por mega vatios. Con  $p$  como cada estación de bombeo presente en la infraestructura  $j$ , por lo que se puede decir que  $p$  se encuentra contenido en  $j$ .

La división son cada elemento de los arreglos contenidos en la planilla, es decir, es un producto escalar que va recorriendo por estación de bombeo  $p$  y por año  $t$  para multiplicarla por el vector de parámetros.

Este resultado entrega una Matriz de dimensión  $p \times t$ .

La medición del sistema eléctrico que usan las estaciones de bombeo también se consideran en el costo de infraestructura. Entre los parámetros se encuentran los costos totales de los sistemas eléctricos por estación de bombeo en miles de dólares. El resultado de sistema eléctrico se define entonces como:

$$Se_{p,t} \tag{7.5}$$

El parámetro para las estaciones de bombeo se mantiene constante durante el tiempo por lo que se puede pensar en su resultante como una matriz donde en sus filas se presenten los costos de las estaciones de bombeo en el año y las columnas sean para los siguientes años, algo similar a lo que sucede con las matrices resultantes de los costos de tuberías y estaciones de bombeo.

Con las concesiones sanitarias, este costo incorporará una indicatriz, debido a que no todos los tramos son concesiones sanitarias y que únicamente el costo de concesión sanitaria se aplica directamente al tramo en el que se encuentra el cliente. De manera que se puede utilizar el conjunto de los tramos originales para la red original.

$$\mathbb{I}_{j,t} = \begin{cases} 1, & \text{si la sección } j \text{ es concesión en el tiempo } t \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

Esto se multiplica por el costo de la concesión directo de la concesión  $C_{j,t}$ .

$$\mathbb{I}_{j,t}C_{j,t} \tag{7.6}$$

Esto resultaría en un costo por año en millones de usd.

El costo de las tierras corresponde a la cantidad de tierras que utiliza cada sección en hectareas. Se define directamente como el costo por cliente  $i$  en el tiempo  $t$ , entonces se define como:

$$Tierras_{i,t} \tag{7.7}$$

Se define directamente el costo por cliente en el tiempo  $t$ , entonces este costo se suma directamente cuando el CAPEX se define para cada cliente.

Todos los costos correspondientes al CAPEX que fueron calculados previamente su resultado entrega un arreglo por sección en las filas y por año en las columnas

En resumen el CAPEX se podría plantear como la suma de estos costos descritos previamente.

$$CAPEX_{j,t} = Q_{Tubj,t} L_j C_{Tubj,t} + Eb_p \frac{Q_{p,t}}{MW_{p,t}} + Se_{p,t} + \mathbb{I}_{j,t} C_{j,t} \quad (7.8)$$

Se suman los costos de cada matriz, esta resulta en una matriz de dimensión j,t. El CAPEX resultante se presenta en una matriz con todas las secciones j en millones de dolares por t año. Para determinar cuanto le cuesta a cada cliente se multiplica de la siguiente forma:

$$\text{CAPEX por Cliente}_{i,t} = D_{i,t} \frac{CAPEX_{j,t}}{FS_{j,t}} + Tierras_{i,t} \quad (7.9)$$

Con t y j de magnitudes tal que son operables entre sí. La matriz de demanda al multiplicarse por las secciones contenidas entrega la demanda de cada flujo por último esta se multiplica por la matriz de CAPEX total, debido a la matriz de secciones activas los costos de cada cliente reciben el costo de la sección que está utilizando. Resultando en una matriz con los costos por clientes i y en el tiempo j.

La matriz del  $CAPEX_{j,t}$  es dividida escalarmente por los valores contenidos en  $FS_{j,t}$ , distribuyendo los costos según la cantidad de la red utilizada.

En el costo operacional se consideran las tuberías, la captación y la energía que se requiere en la operación.

El OPEX de las tuberías proviene de una tabla de costos fijos para cada cliente i, estos vienen dados como parámetros y son calculados en proporción a la distancia total del cliente más lejano de la red. Este parámetro se define como  $C_{FixT}_i$ , los parámetros son divididos por la distancia total que es la distancia total de la red, resultando en  $\frac{C_{FixT}_i}{D}$ , con D como la distancia total hasta el último cliente de la red, el vector resultante se multiplica por la distancia ( $L_j$ ) de la sección j, es decir, toda sección j llega a un cliente i y una sección j puede llegar a más de un cliente, por esto alguno de los parámetros de los costos fijos se repiten, existiendo un parámetro de costo fijo para cada sección j. El vector resultante se multiplica por la matriz de flujos por sección  $FS_{j,t}$ . El cálculo del costo operacional por tuberías se describiría como:

$$\frac{C_{FixT}_i}{D} Largo_j FS_{j,t} \quad (7.10)$$

El costo operacional por bombeo se determina en base a las constantes, la primera es el costo fijo que tiene la operación eléctrica  $C_e$  y la tarifa eléctrica que es una constante que se define como  $T_e$ . Estas constantes se multiplican a la matriz de parámetros que contiene la diferencia de altura que existe entre una estación de bombeo y otra, porque el costo del bombeo está relacionado con la cantidad de energía que requiere para subir cierta altura, la que se define como  $Eh_p$ , con p como todas las diferencias de alturas para cada estación de bombeo, finalmente se multiplica todo este término por el caudal de agua que se desea subir por esa estación de bombeo. Esta última matriz es una matriz con las p estaciones de bombeo presentes en la red y su caudal por estación en el tiempo t.

$$C_e E h_p T_e E b_{p,t} \quad (7.11)$$

La concesión también presenta costos operacionales, estos están definidos por parámetros de costos que se ingresan en una matriz de costo de concesión por tramo definida como  $CC_{j,t}$ , la que se multiplica por la matriz de filtro para concesiones  $\mathbb{I}_{j,i}$ . El costo de concesiones se presenta como:

$$\mathbb{I}_{j,t} = \begin{cases} 1, & \text{si la sección } j \text{ es concesión en el tiempo } t \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$CC_{j,t} \mathbb{I}_{j,i} \quad (7.12)$$

La el costo de captación considera el costo de la planta desaladora y también el costo operacional de la captación de las torres. Este costo lo comparten todos los clientes por lo que se define en la primera sección de la red y se establece en el OPEX. El costo se define como:

$$Captación_{j,t} \quad (7.13)$$

El OPEX se por sección en el tiempo se define como:

$$OPEX_{j,t} = \frac{CFixT_i}{D} Largo_j FS_{j,t} + C_e E h_p T_e E b_{p,t} R_{j,t} + CC_{j,t} \mathbb{I}_{j,i} + Captación_{j,t} \quad (7.14)$$

El término  $C_e E h_p T_e E b_{p,t}$  contiene todos las estaciones de bombeo de la red, en el cálculo de la planilla se busca el valor, en este caso se construye la matriz  $R_{j,t}$  como matriz de transición para estructurar las matrices de la misma magnitud para su suma. El resultado final, entrega un OPEX por sección  $j$  en el tiempo  $t$ .

Para traspasar al costo por cliente, se realiza el mismo procedimiento que el utilizado en el CAPEX

$$OPEX \text{ por Cliente}_{i,t} = D_{i,t} \frac{OPEX_{j,t}}{FS_{j,t}} \quad (7.15)$$

El costo de reemplazo de equipo e infraestructura está calculado, considera como parámetro el vector de tasas de retornos para cada cliente activo. Posteriormente se calcula la tasa retorno promedio entre los clientes que es de 0,076 y se trae a valor presente, distribuyendo el costo en los períodos de años.  $\frac{\sum Tasa}{i_{ctes}} = 0,076$

$$\frac{\sum Flujos}{(1+r)^t} \text{ con } r = 7,6\% \quad (7.16)$$

Con el valor de la inversión traído a valor presente se distribuyen los flujos en base a los períodos totales y se determina el monto a pagar por año.

Este mismo proceso de distribución de flujos utilizando la función pago, se realiza con el CAPEX por cliente y el OPEX por cliente y se realiza el ajuste respectivo según la ventana temporal que se busca estudiar, en este caso  $\frac{usd}{m^3S}$  quedando todos en la misma unidad de costos.

## 7.4. Red de Distribución y Clientes

La red comienza con la torre de captación y la planta desaladora desde caleta bolfín, pasando por el cliente minero Mantos Blancos y desde ese punto se hace una diferenciación según la dirección que siguen las ramas.

Para entender mejor como los costos de los clientes influyen en la red, se realizará una separación por ramas. Se clasificarán en rama norte, sur y este.

La rama que toma dirección al norte, está compuesta por cuatro clientes mineros. La segunda, la rama con dirección al este, considera un total de cinco clientes. Por último, la tercera rama, es la rama sur, la que considera un total de cuatro clientes. La estructura de esta red que consideran un ejercicio donde todos los clientes son mineros es representada a continuación:

Rama	Clientes
Norte	Mantos Blancos, Sierra Gorda, Spence y Codelco Norte
Este	Mantos Blancos, Lomas Bayas, Gabriela Mistral, SQM y Albemarle
Sur	Mantos Blancos, Lomas Bayas, Zaldívar y Escondida

Tabla 7.3: Clientes Relevantes para CRAMSA por Sección

La fundamental ventaja competitiva para CRAMSA es generar una red que pasa por múltiples clientes, distribuyendo grandes cantidades de caudal de agua utilizando la misma infraestructura común, lo que le permite generar economías de escalas. Principalmente por como distribuye los costos entre sus clientes.

En la zona existen alrededor de 18 potenciales clientes que demandarán distintas cantidades de agua, por esto para el análisis de costos se trabajará con ciertos escenarios que serán escogido en base a las investigaciones realizadas.

Se crea un primer escenario, utilizando las mineras más cercanas y relevantes para las ramas, todos los clientes son de diferentes tamaños, por esto se recopilará información sobre cada

cliente, buscando si este ya posee plantas desaladoras construidas o en vias de construcción. Si poseen una planta ya construida se asumirá el doble de demanda de la capacidad máxima de la planta. Los clientes que no cuenten con una planta serán estimados con una relación simple entre la producción anual y la capacidad de la planta.

Acto seguido se reajustarán los números de demanda para tener un orden de magnitud realista que se condiga a una eventual demanda de los clientes. Realizando la consulta a la literatura se obtuvo lo siguiente:<sup>123</sup>

<b>Clientes</b>	<b>¿Planta?<math>\frac{L}{S}</math></b>	<b>Prod.<math>\frac{Ton}{Y}</math></b>	<b>Dda.<math>\frac{L}{S}</math></b>
Mantos Blancos	39	56.600	100
Sierra Gorda	103	172.181	210
Spence	1000	245.495	2.000
Codelco Norte	840	721.551	2.000

Tabla 7.4: Clientes Primer Escenario Rama Norte CRAMSA

<b>Clientes</b>	<b>¿Planta?<math>\frac{L}{S}</math></b>	<b>Prod.<math>\frac{Ton}{Y}</math></b>	<b>Dda.<math>\frac{L}{S}</math></b>
Mantos Blancos	39	56.600	100
Lomas Bayas	No	72.510	175
Gabriela Mistral	No	109.482	300
SQM	No	N/D	2.500
Albemarle	No	N/D	500

Tabla 7.5: Clientes Primer Escenario Rama Este CRAMSA

<b>Clientes</b>	<b>¿Planta?<math>\frac{L}{S}</math></b>	<b>Prod.<math>\frac{Ton}{Y}</math></b>	<b>Dda.<math>\frac{L}{S}</math></b>
Mantos Blancos	39	56.600	100
Lomas Bayas	No	72.510	175
Zaldívar	No	88.888	215
Escondida	2500	1.054.248	2.600

Tabla 7.6: Clientes Primer Escenario Rama Sur CRAMSA

De lo consultado, se determina que los clientes ubicados en los extremos son clientes estratégicos, estos son Escondida, SQM, Albemarle y CODELCO Norte. Estos se destacan

<sup>1</sup>La distribución de agua total rama norte es de  $4310\frac{L}{S}$ .

<sup>2</sup>La distribución de agua total rama este  $3575\frac{L}{S}$ .

<sup>3</sup>La distribución de agua total rama sur  $3090\frac{L}{S}$ .

principalmente por su gran producción y la demanda de agua desalada que necesitan. Por otro lado, el resto de los clientes mencionados tienen una ubicación privilegiada como es el caso de Mantos blancos y Lomas Bayas, donde el trazado de la tubería está estipulado para pasar justamente por su ubicación por lo que estos se ven beneficiados con el servicio de CRAMSA con una estructura de costos más baja.

Otro factor relevante sobre la ubicación de estos últimos clientes es que al encontrarse más cerca de la costa existe mayor competencia y alternativas para el transporte de agua.

Todos los clientes de la rama norte poseen planta desaladora ya construida, en la rama sur existen clientes que sí poseen plantas desaladoras a diferencia de los clientes de la rama este donde ninguna de las mineras posee planta desaladora construida.

De los clientes que pertenecen a la red, hay varios que se encuentran involucrados en reposición medioambiental, como es el caso de Albemarle y SQM en la rama Este, lo que le da más relevancia al cliente porque necesitará de un extra de agua para las medidas de reposición del salar establecidas por la autoridad, de hecho, Albermarle ya ha firmado un acuerdo para reservar la producción de  $500 \frac{L}{S}$ . [22]

En la rama sur se tiene a Escondida, que es la firma minera que genera la mayor producción a nivel nacional, también se encuentra involucrada en las políticas de restitución de agua para el salar junto con Zaldívar.

Se define una demanda para cada rama basándose en la posible demanda del cliente. Ahora es necesario redefinir las demandas debido a que la capacidad de distribución de CRAMSA es de  $8.000 \frac{L}{S}$  y ver que calce la demanda estimada con la que se trabajará.

## 7.5. Costos por Ramas

### 7.5.1. Estructura de Costos red demanda fija

Se redistribuyen los flujos de agua según lo investigado en la literatura y cumpliendo con la restricción de capacidad. Se incorpora un nuevo cliente llamado EB08 spot, un punto de venta estratégico. Realizando ejercicios empíricos mediante ensayo y error, se determinó realizar el ejercicio entregándole mayor importancia a los clientes más grandes que se encuentran en conflicto por la limitante del uso de agua continental. Una vez definido la demanda de cada nodo se verán sus costos por ramas.

Se define un primer escenario únicamente integrado por clientes mineros:

<b>Escenario Clientes Mineros</b>		
Cliente	Demanda $\frac{L}{S}$	Rama
Mantos Blancos	300	Base
Spence	250	Norte
Codelco Norte	700	Norte
Lomas Bayas	300	Este
Zaldívar	300	Sur
Escondida	4050	Sur
Gabriela Mistral	300	Este
SQM y Albemarle	500	Este
EB08 Spot	900	Norte
Sierra Gorda	400	Norte

Tabla 7.7: Clientes Relevantes CRAMSA

El siguiente ejercicio busca reflejar gráficamente como van variando la distribución de costos en el modelo con la activación de nuevos clientes por ramas, según el escenario predefinido.

Como CRAMSA cuenta con tres direcciones de ramas en su red, existe un total de  $3! = 1*2*3$  formas posibles de revisar la sinergias que se generan entre las ramas, considerando que la red debe ser continua, es decir, si existen 3 puntos A, B y C donde A es el más cercano y C es el más lejano, debo pasar por B necesariamente para llegar a C.

Se realizó el ejercicio y se tomaron todas las combinaciones posibles:  $\{Norte - Sur - Este, Norte - Este - sur, Este - Norte - Sur, Este - Sur - Norte, Sur - Este - Norte, Sur - Norte - Este.\}$

Los resultados se presentan en la gráfica a continuación (tabla con detalles en anexo):

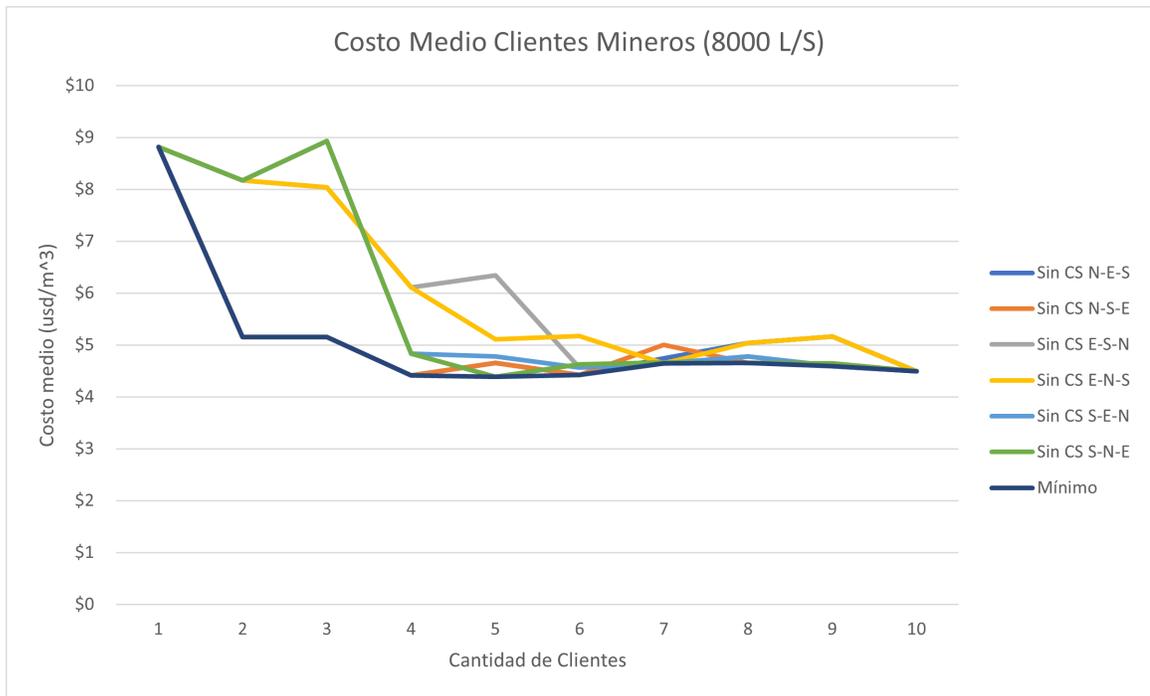


Figura 7.2: Curvas Costo Medio Clientes Mineros

Este ejercicio, considera las demandas como constantes, por lo que es una foto a como cada cliente, basándose en su ubicación aporta a reducir el costo medio. Se comienza con un costo elevado que es el mismo para todos debido a que la red comienza desde ese mismo punto, esto mismo ocurre con el último punto que es el costo medio cuando todos los clientes se encuentran activos.

La suma de las demandas por rama son las siguientes:

Demanda por Rama	
Demanda Rama Norte $\frac{L}{S}$	2550
Demanda Rama Este	1300
Demanda Rama Sur	4950

Tabla 7.8: Demanda Clientes por Rama CRAMSA

De las curvas, la curva de color naranja (N-S-E) es la que representa la reducción de costos más cercana a la curva de mínimos. Esto se explica por el tipo de geografía que tiene la rama norte y la cercanía de los clientes, acá los costos se distribuyen de forma más homogénea los costos de los primeros clientes que demandan poco en comparación a los clientes de los extremos.

Este supuesto de baja demanda se justifica por dos motivos, el primero se refiere a que la gran mayoría de los proyectos mineros en la región se encuentran presentes en la zona

montañosa en la cordillera de los andes y en especial a la región Atacama.[33] El otro motivo se relaciona con la competitividad que se genera en aquella zona, los clientes más cercanos a la costa cuentan con mayor disponibilidad al recurso, se presentan diferentes alternativas para el transporte de agua de los que se encuentran cercano a la urbanización, en estos casos las firmas pueden evaluar transportar el agua utilizando otros métodos como por ejemplo, el utilizar camiones aljibes. Siendo menos atractivo para CRAMSA.

El resultado obtenido llama la atención debido a que la intuición dice que a mayor demanda existe una mayor reducción de costos, en este caso no se cumple, las demandas son las enunciadas en la tabla anterior y el menor costo por rama se presenta en la rama norte.

Recordar que el costo puede ser distribuido entre varios clientes o bien todo a un gran cliente. La distancia de los clientes extremos es la misma para la rama norte y sur, entonces surge la pregunta ¿A qué se debe esta disminución en los costos?. Esta disminución en los costos se debe principalmente a la diferencia de altura y la cantidad de infraestructura a construir para la rama norte y la ubicación estratégica de la red. Esto se traduce como una diferencia de tres estaciones de bombeo y energía que consume la minera del extremo sur en comparación a la del norte.

La rama este presenta un menor costo que la rama sur y mayor que la rama norte, esta diferencia se debe a que la rama este presenta 14 estaciones de bombeo ubicándose a una distancia similar y una altura menor. La rama norte en comparación con la rama este presenta un costo menor debido a la menor altura.

Es relevante destacar esto porque señala la importancia del costo de infraestructura y a su vez en el caso de un escenario en que no todos los clientes se encuentren activos muestra que los costos de una rama son menores que otra en base a la infraestructura necesaria para transportar a la rama.

Bajo estas condiciones el costo para la rama norte es menor que la rama sur, esto se debe al parámetro fijo de la cantidad de estaciones de bombeo para sus secciones correspondientes. Por esto se podría decir que los costos de la rama norte son menores aún así demandando una menor cantidad que la rama sur por sí sola.(Esto según la composición del escenario previamente descrito).

Tener en cuenta esta diferencia de costos es relevante para el caso que no se distribuyan exactamente los 8000 litros por segundo, escenario bastante probable en la realidad, así se tiene en consideración cuales son las mejores ramas para priorizar en base a los parámetros definido por los clientes ante una menor demanda de los clientes.

Con motivo de determinar el escenario de los costos para los clientes más alejados, se replicará el ejercicio esta vez quitando los clientes cercanos y menores y se incorporarán las concesiones sanitarias. Los clientes mineros eran un total diez, estos serán cambiado por las ccesiones sanitarias que son clientes regulados, llegando a una cantidad de 11 clientes.

El nuevo escenario de los clientes mineros con las concesiones se muestra a continuación:

Escenario Clientes Mineros con Concesiones		
Cliente	Demanda $\frac{L}{S}$	Rama
La Negra 1	300	CS
La Negra 2	300	CS
Antofagasta Norte	250	CS
Calama	150	CS
EB08 Spot	900	Norte
Spence	250	Norte
Codelco Norte	700	Norte
Gaby	300	Este
Zaldívar	300	Sur
Escondida	4050	Sur
SQM y Albemarle	500	Este

Tabla 7.9: Clientes Mineros Relevantes y Concesiones Sanitarias CRAMSA

Los clientes definidos como CS son las concesiones sanitarias, estas están ubicadas cercanas a las urbanizaciones por lo que al desarrollar el ejercicio con las concesiones estas se consideran como lo primero que se construye, exceptuando la concesión de calama que se encuentra ubicada cercano a codelco norte (en la rama norte).

La evolución de los costos medio por ramas está dada por:

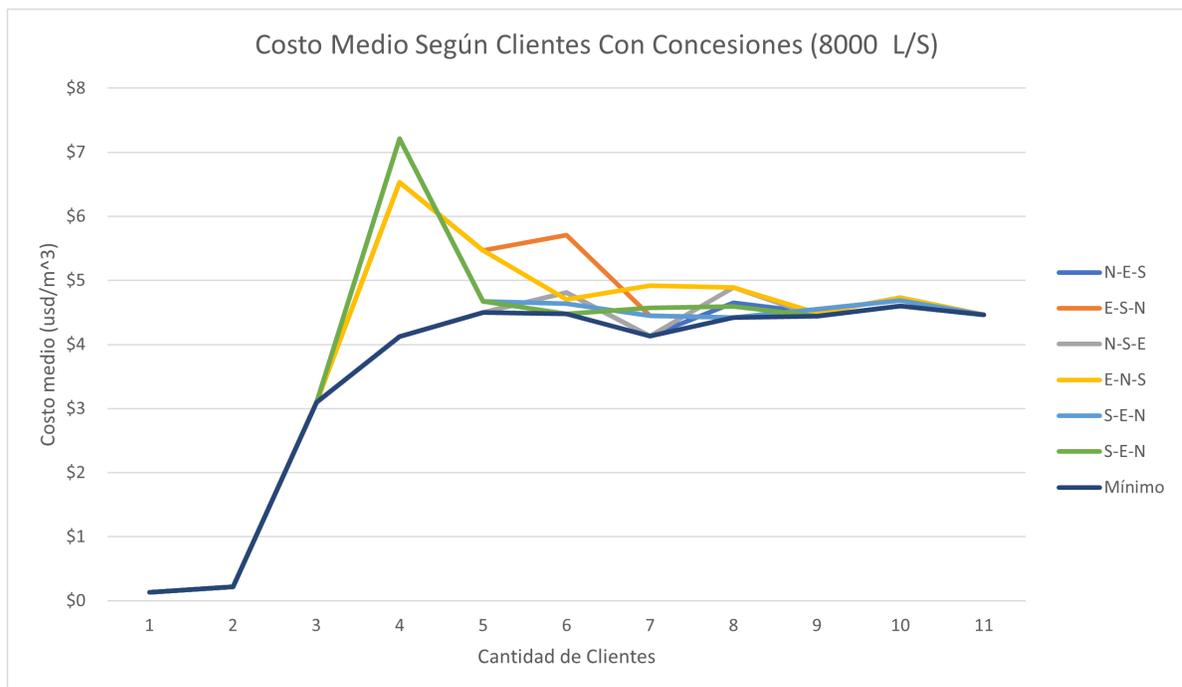


Figura 7.3: Curvas Costo Medio Clientes con Concesiones

La curva difiere en sus inicios de la curva anterior, de clientes mineros, esto ocurre porque los tres primeros clientes son concesiones sanitarias, estas se encuentran reguladas por una entidad fiscal por lo que sus tarifas de costos y su precio de venta también lo están.

En general, la curva de costos medios disminuye en comparación con la de clientes mineros, al añadir las concesiones sanitarias el costo medio disminuye, se estabiliza y toma un comportamiento similar al de los clientes mineros posterior al quinto cliente con un costo medio promedio menor.

Añadir las concesiones sanitarias es bueno, debido a que las concesiones se consideran como flujos seguros, lo que brinda certeza al proyecto, además como las concesiones sanitarias se ubican en sectores especiales y sus demandas son pequeñas en comparación a las mineras, tenerlos en el mapa para cumplir la meta de la cuota de distribución es un beneficio porque es un pago seguro, el que un jugador racional y averso al riesgo siempre preferirá.

Por último la combinación con costos menores es la misma que para los clientes mineros, N-E-S. Esto se vería respaldado por la justificación de costos de infraestructura del ejercicio realizado previamente por rama de la red.

La utilidad de este ejercicio es mostrar a CRAMSA como sería poder transicionar por la curva mínima de costos al momento de seleccionar como distribuir a los clientes, en base a escenarios de demanda pronosticados. Lo que se debe destacar de este análisis es la diferencia de costos de cada rama lo que se estudiará más adelante y la dualidad de opciones que se presentan para la distribución a clientes, un cliente que se encuentra en un extremo podría demandar todo el flujo y correr con todos los gastos o bien distribuir menores cantidades entre varios clientes. Se realizó el ejercicio considerando todos los clientes intermedios. Siendo estos nodos claves, como lo es Spence en la rama norte para llegar a CA-NR, Gaby en la rama este para llegar a SQM y Zaldívar para llegar a Escondida. Más adelante se realizará el análisis de la curvas de costos para cada cliente y cuánto le cuesta generar su propia infraestructura según distintos volúmenes. Esto despejará la duda sobre el construir directamente para los clientes más extremos.

El contar con un contrato de concesión sanitaria, entrega estabilidad para un proyecto que se encuentra en estado de greenfield que integra tanta incertidumbre, siendo una buena alternativa para la reducción del riesgo inherente que conlleva el proyecto y como señal para las mineras. Por lo que es sencillo notar que para CRAMSA como jugador racional, le es más atractivo el escenario con las concesiones.

Se seguirá desarrollando el trabajo en base a este último escenario descrito porque el objetivo de este trabajo es realizar mediante una aproximación empírica una interpretación económica de los costos para los clientes y para CRAMSA. Mostrando cual es mejor y en el caso de las concesiones se disminuye el riesgo y el costo medio final.

Profundizando en este escenario, la tabla de costos para la distribución y construcción en la primera fase del proyecto de  $4,000 \frac{L}{S}$ .

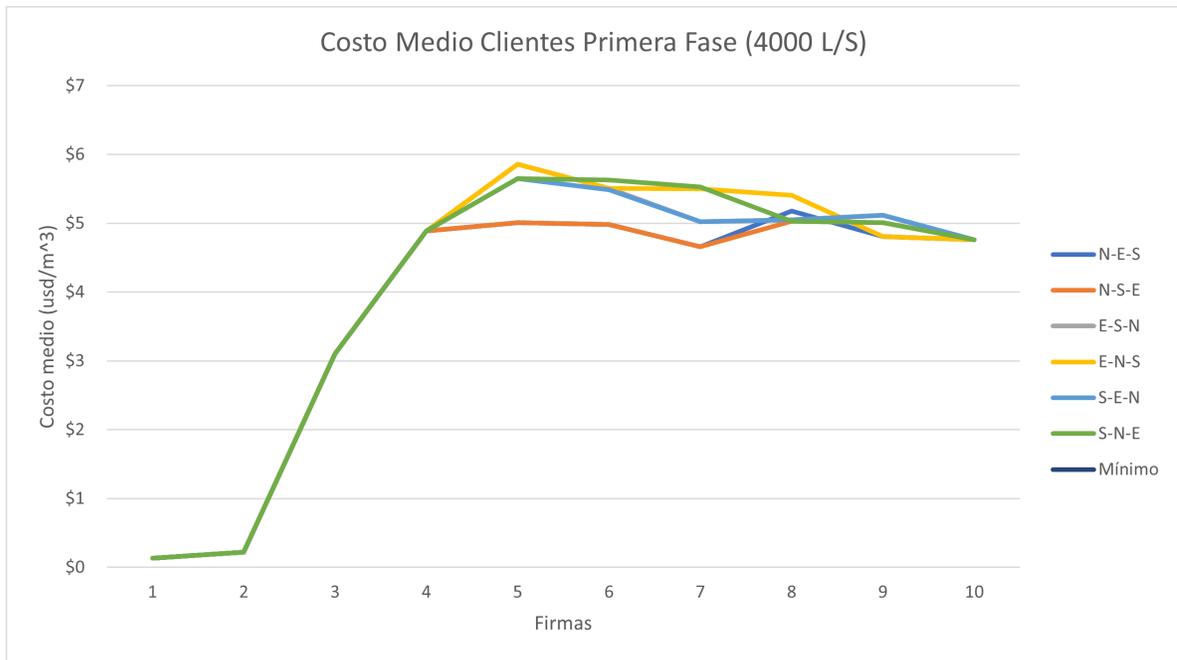


Figura 7.4: Curvas Costo Medio Clientes con Concesiones Fase 1

En la primera fase hay un aumento en los costos, lo que se encuentra dentro de lo esperado porque la capacidad límite de distribución es menor. Por ejemplo, no se tiene contemplado que para la primera etapa Zaldívar reciba agua por lo que para el escenario base en primera instancia son solo 10 clientes, las demandas fueron ajustadas al escenario base de la primera etapa, una distribución total de  $4000 \frac{L}{s}$ .

Este ejercicio es estático, muestra como se comportan los costos para CRAMSA, donde el factor de economías de escala se encuentra directamente relacionado entre la demanda de cada cliente y su ubicación. Mientras mayor sea la demanda que transcurre por secciones compartidas más disminuyen los costos, debido que al encontrarse en una ubicación con vecinos cercanos este se distribuye el costo de infraestructura y transporte entre todos los clientes activos para la sección.

### 7.5.2. Estructura de Costos por Ramas

En este ejercicio se evidencia la estructura de costos pensando en escenarios donde no necesariamente de los caudales da  $8,000 \frac{L}{s}$ . Se separa por ramas donde se consideran escenarios con las concesiones que pertenecen a su rama respectiva.

Se evalúa la evolución del costo para cada rama, se toma el escenario con concesiones y se distribuyen diferentes caudales para los clientes de esta rama, el objetivo de este ejercicio es complementar y entregar una visión general sobre el comportamiento de los costos de infraestructura en magnitudes de M usd.

Este ejercicio podría considerarse como una mirada transversal y primera aproximación a los costos de infraestructura y su estructura.

Para este ejercicio se consideran los mismos clientes mineros establecidos para el escenario de concesiones en las ramas anteriores. El análisis consistió en comenzar con cierto escenario base para ambos clientes, donde primero se le entrega un caudal inicial al primer cliente y se evalúan los costos principales de infraestructura, estaciones de bombeo, desalación y tuberías, posterior a esto se entregó caudal al cliente aledaño y se registró sus costos, por lo que se podría decir que en las gráficas donde sale el último cliente en la red considera los costos con todos los clientes previos activos y demandando cierta cantidad, se repitió este ejercicio varias veces duplicando el caudal inicial para cada cliente, la idea es que la demanda por rama resuelva todos los casos, sin embargo, no se espera llegar a los 8.000 exactos, esto para darle una gota de realismo a los costos.

Las gráficas resultantes a continuación y tablas en Anexo:

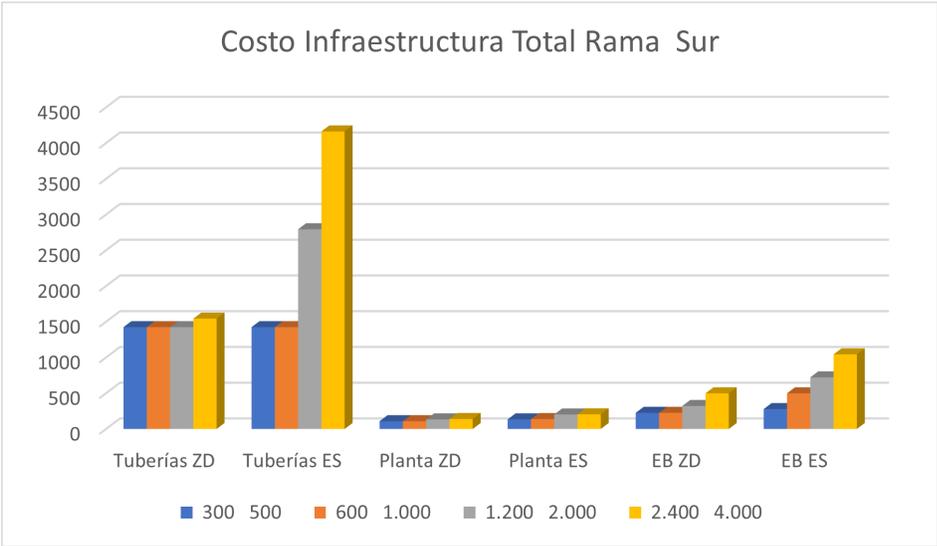


Figura 7.5: Costo Total Infra. Rama Sur

En esta rama se evidencia que el costo más elevado se encuentra en las tuberías, para todos los casos este costo es mayor, existe una subida considerable en estos cuando el flujo total pasa a 6.400, esto se explica porque al principio ZD cuenta con 2.400 y se le suma una cantidad muy grande de caudal por lo que se dispara. El costo de las estaciones de bombeo al incorporar a los dos clientes este tiene una tendencia de incremento lineal, comenzando con un valor aproximado de 300 y triplicándose cuando el caudal está por alcanzar su máxima capacidad. Cuando se menciona este costo de infraestructura se consideran el costo de los modulos necesarios para construir en cada sección para cumplir con la demanda.

En cuanto al costo de planta se mantiene sin cambios importantes en el tiempo, el incrementar un cliente más se eleva el costo pero se mantiene mayormente constante en comparación a sus volúmenes.

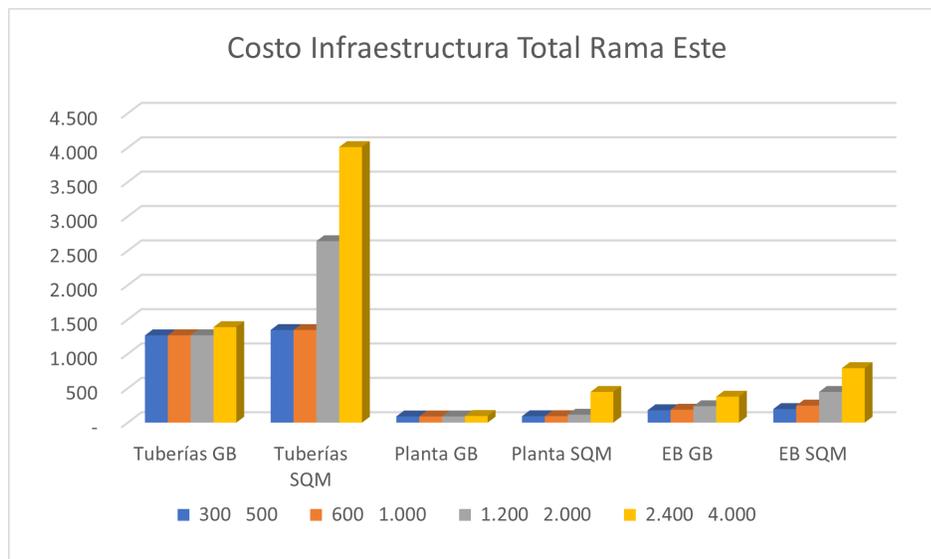


Figura 7.6: Costo Total Infra. Rama Este

Para la rama este como se contaba con el mismo número de nodos se realizó el mismo ejercicio en base a la misma demanda de caudales previos, se puede revisar que su comportamiento de los costos es similar. La razón de incremento es similar a la de la rama sur, en este caso los costos son menores, existe un menor costo en tuberías bordeando los 4.000 en el escenario máximo en comparación a la rama sur que se encuentra por sobre los 4.000.

En las estaciones de bombeo, la diferencia es más notoria, en el caso de la rama sur en el escenario máximo llega a un costo de 1.500, en cambio la rama este solamente llega a un costo máximo de bombeo no superior a los 1.250, siendo la rama este menos costo que la sur.

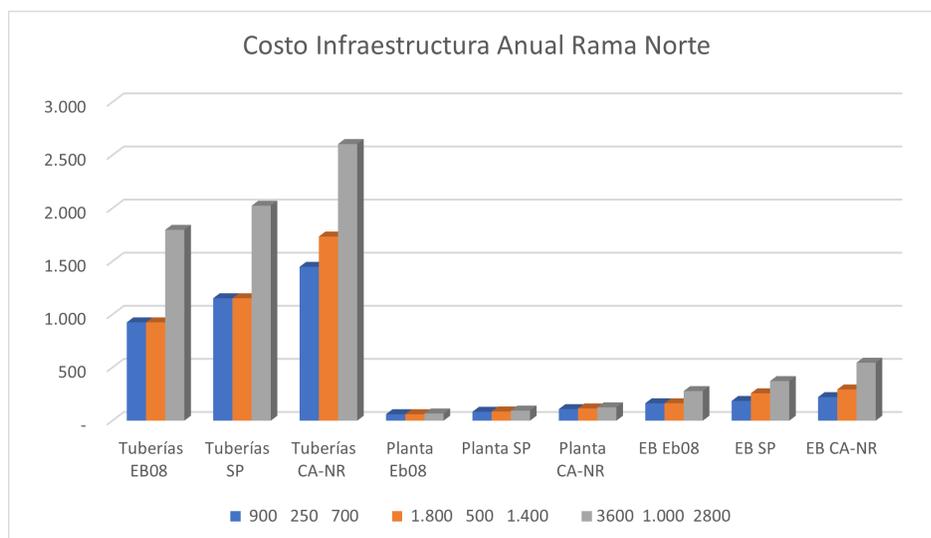


Figura 7.7: Costo Total Infra. Rama Norte

La distribución de las demandas para esta rama fue diferente porque se presentan tres nodos. Respondiendo al mismo comportamiento de las otras ramas, siendo la más económica de todas, se pueden comparar los puntos con flujos similares y los costos son menores a grandes rasgos para esta rama.

En general esta gráfica es de utilidad para mostrar un panorama general de la estructura de costos para un primer acercamiento. Tablas con información en anexo.

## 7.6. Optimización Escenario Base

Se define el escenario base al escenario con las concesiones utilizado en el ejercicio previo. Ahora se resolverá un problema de optimización para determinar cuál es la mejor distribución de los caudales de agua por cliente que minimiza el costo medio para CRAMSA.

El problema incorpora a las concesiones para el cálculo del costo medio, sin embargo, las quita como variables de decisión, señalándolas como demanda constante, esto porque su estructura de contrato es distinta a la de los clientes mineros y se considera que su demanda no variará de los caudales ya definidos, además lo relevante de este ejercicio es ver la distribución de los mineros.

Así el problema de optimización se define de la siguiente manera:

**Función objetivo:**

$$\min D_i \alpha_i$$

**Restricciones:**

$$\sum_{i=1}^7 \alpha_i D_i \leq 3,000 \frac{L}{S}$$
$$0 \leq \alpha$$
$$\alpha \geq 1$$

Al considerar este escenario la solución para la primera etapa, era que CRAMSA distribuyera todo su caudal a la EB08 spot y Escondida principalmente, siendo el primero un punto de venta estratégico establecido por CRAMSA. El motivo por el que ocurre esto es por la ubicación de la planta se trata de ubicación cercana siendo un cliente con una alta demanda. No se considera esta solución esquina debido a que al tratarse de un punto de venta no es un escenario realista que aporte a los hallazgos del trabajo. Por este motivo, se decidió considerar este punto como una concesión más debido a que no permite experimentar otras soluciones en el mapa de distribución actual por eso se decide quitarlo de las variables de decisión, asignándole un valor de demanda constante.

Se relajó la restricción de los pesos mayores a 1, porque los escenarios bases definidos no son absolutos, debido a que son demandas que para CRAMSA hacen sentido pero podrían surgir otros escenarios interesantes para el estudio.

Ahora cambia la restricción debido a que el caudal total ya no es de 3.000 ahora la cantidad de caudal a distribuir son 2100.

**Función objetivo:**

$$\min D_i \alpha_i$$

**Restricciones:**

$$\sum_{i=1}^6 \alpha_i D_i \leq 2,100 \frac{L}{S}$$

$$0 \leq \alpha$$

$$\alpha \geq 1$$

Para la resolución de este problema se utilizó el solver de Excel, el algoritmo presentó dificultades para la determinación del valor mínimo. El costo medio mínimo varía según el peso inicial, esto se debe a la cantidad de variables que se encuentran vinculadas a los costos, por lo que el punto de partida en esta herramienta es fundamental.

Se realizó la prueba con distintos pesos iniciales, comenzando desde el 0 hasta el 1. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas a continuación:

Pesos Iniciales 0			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,10	51
Spence	250	0,09	22
Gaby	300	0,09	27
Calama North	700	0,11	78
Zaldívar	300	0,09	27
Escondida	4050	0,47	1895
Costo 4,72 usd/m <sup>3</sup>			

Figura 7.8: Pesos Iniciales de 0

Pesos Iniciales 0,25			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,10	49
Spence	250	0,08	20
Gaby	300	0,08	25
Calama North	700	0,11	80
Zaldívar	300	0,08	25
Escondida	4050	0,47	1901
Costo 4,72 usd/m <sup>3</sup>			

Figura 7.9: Pesos Iniciales de 0,25

Pesos Iniciales 0,5			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,10	51
Spence	250	0,09	22
Gaby	300	0,09	27
Calama North	700	0,11	78
Zaldívar	300	0,09	27
Escondida	4050	0,47	1895
Costo 4,72 usd/m <sup>3</sup>			

Figura 7.10: Pesos Iniciales de 0,5

Pesos Iniciales 0,75			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,65	323
Spence	250	0,68	170
Gaby	300	0,67	202
Calama North	700	0,62	434
Zaldívar	300	0,67	202
Escondida	4050	0,19	768
Costo 4,73 usd/m <sup>3</sup>			

Figura 7.11: Pesos Iniciales de 0,75

Pesos Iniciales 1			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,71	356
Spence	250	0,75	188
Gaby	300	0,74	223
Calama North	700	0,68	475
Zaldívar	300	0,74	223
Escondida	4050	0,16	635
Costo 4,72 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 7.10: Resultado Pesos Iniciales de 1

En la tabla con los pesos iniciales 0, 0,25 y 0,5 entregan resultados similares entre las tres, existe una leve variación entre los flujos, entregando el mismo costo medio final de  $4,72 \frac{usd}{m^3}$ .

El resultado en estos tres primeros ejercicios, distribuye la mayor parte del flujo a Escondida, esto se refleja con el peso, que es 0,47, aproximadamente la mitad del flujo entre todos los clientes disponibles.

La situación cambia al iniciar con un peso de 0,75, existe un cambio en el costo medio, este se eleva en  $0,01 \frac{usd}{m^3}$ , resultando en un costo medio de  $4,73 \frac{usd}{m^3}$ . Se presenta un cambio en la distribución de los flujos, Escondida reduce considerablemente su peso de 0,47 a 0,19. El resto de los clientes toman más peso, resultando en una distribución de flujos más homogénea que la anterior.

Esto puede considerarse como un hallazgo importante debido a que si bien existe un incremento en el costo medio, este es marginal, existe otra alternativa de distribuir los costos. Lo relevante de este resultado es que CRAMSA cuenta con otra alternativa estratégica que le entrega mayor libertad y así no depender exclusivamente del cliente extremo Escondida.

El último recuadro con los pesos iniciales en 1, entrega una mejora para el resultado del escenario con pesos en 0,75. Realiza otra distribución de flujos similar a la del ejercicio anterior, sin embargo acá se llega al costo medio entregado en la mayoría de los escenarios. Por lo que este escenario es otra forma de distribución de flujos y a la vez minimiza el costo. Los tres escenarios con peso inicial 0, 0,25 y 0,5 la distribución es similar entre sí con una

notoria carga al cliente extremo por el otro lado con los otros pesos existe una distribución más homogénea de los flujos.

Finalmente para determinar que el costo obtenido se trata de un mínimo local, se realizó variaciones de flujos entre los clientes tomando de a pares todas las posibles combinaciones. Se fue variando quitándole flujos a uno y añadiendo al otro, en todos estos ejercicios el resultado entregaba un costo medio mayor que los entregados por lo que se puede concluir que se trata de un mínimo local. Así el costo medio mínimo para la primera etapa del proyecto con el escenario base establecido es de  $4,72 \frac{usd}{m^3}$ .

Generando dos posibles escenarios para CRAMSA, uno donde se depende exclusivamente del cliente más grande y otro escenario donde se distribuye entre más clientes cantidades similares entre sí restándole el peso al cliente más grande. Esto refleja la dicotomía que existe en el escenario base, distribuir todo al cliente más grande o bien distribuir menos cantidad al cliente extremo. Tener en consideración que en la primera fase la diferencia entre el cliente extremo y el resto de los clientes es pequeña en comparación a la fase 2, por esto se realizó la optimización para analizar el comportamiento de las mineras en la segunda etapa.

Se repite el ejercicio para determinar el costo medio en la segunda etapa, con los  $8000 \frac{L}{S}$ , realizando la prueba con los mismos pesos iniciales para la nueva etapa. Se modifica la restricción del problema a la cantidad de flujos a distribuir entre los clientes mineros, en este caso para la segunda etapa se distribuyen un total de  $6100 \frac{L}{S}$ .

La nueva restricción:  $\sum_{i=1}^6 \alpha_i D_i \leq 6,100 \frac{L}{S}$ . Al realizar este ejercicio con la restricción de los pesos menor o igual a 1, entregó un único resultado que cumplía con las condiciones. Donde su costo mínimo es un mínimo local de  $4,47 \frac{usd}{m^3}$ , esto muestra que la distribución de flujos para el escenario base de los  $8,000 \frac{L}{S}$  es la óptima, la que minimiza el costo medio para CRAMSA.

Para estudiar el comportamiento de los flujos a diferentes pesos iniciales se relajó la restricción en la que el peso no podía ser superior a 1. Los resultados se encuentran en las tablas a continuación:

Pesos Iniciales 0			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,18	88
Spence	250	0,09	22
Gaby	300	0,11	32
Calama North	700	0,25	172
Zaldívar	300	0,11	32
Escondida	4050	1,42	5755
Costo $4,47 \text{ usd}/m^3$			

Figura 7.12: Pesos Iniciales de 0

Pesos Iniciales 0,25			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,38	191
Spence	250	0,32	79
Gaby	300	0,33	99
Calama North	700	0,43	304
Zaldívar	300	0,33	99
Escondida	4050	1,32	5329
Costo $4,49 \text{ usd}/m^3$			

Figura 7.13: Pesos Iniciales de 0,25

Pesos Iniciales 0,5			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,63	314
Spence	250	0,60	151
Gaby	300	0,61	183
Calama North	700	0,65	452
Zaldívar	300	0,61	183
Escondida	4050	1,19	4817
Costo 4,46 usd/m <sup>3</sup>			

Figura 7.14: Pesos Iniciales de 0,5

Pesos Iniciales 0,75			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	0,79	397
Spence	250	0,77	193
Gaby	300	0,78	233
Calama North	700	0,81	568
Zaldívar	300	0,78	233
Escondida	4476	1,11	768
Costo 4,47 usd/m <sup>3</sup>			

Figura 7.15: Pesos Iniciales de 0,75

Pesos Iniciales 1			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	500	1,00	500
Spence	250	1,00	250
Gaby	300	1,00	300
Calama North	700	1,00	700
Zaldívar	300	1,00	300
Escondida	4050	1,00	4050
Costo 4,47 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 7.11: Resultado Pesos Iniciales de 1

De estos resultados se muestra la importancia de Escondida en la segunda fase, siendo el único cliente que aumenta su peso superior en la mayoría de los casos para los distintos pesos de partida. De todos los escenarios sin la restricción de los pesos, no existe una disminución significativa en el costo medio. Para el escenario de pesos iniciales 0,5 disminuye el costo medio en 0,01 lo que es una cantidad marginal.

El problema del peso inicial en este caso queda reflejado claramente que para el ejercicio de la primera fase, por ejemplo iniciando con los pesos de 0,25, el costo medio aumenta en 0,01. Se observa la misma relación en la distribución que la fase 1, esto se explica por el punto de partida del algoritmo de optimización y muestra las diferentes alternativas de flujos que tiene el mismo escenario para la minimización de los costos.

Pesos Iniciales 0,5			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	915	0,91	1.000
Spence	1.017	1,02	1.000
Gaby	1.017	1,02	1.000
Calama North	1.068	1,07	1.000
Zaldívar	1.017	1,02	1.000
Escondida	1.068	1,07	1.000
Costo 3,48 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 7.12: Resultado Pesos Iniciales de 0,5

Pesos Iniciales 1			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	953	0,3	3.178
Spence	906	0,91	1.000
Gaby	906	0,91	1.000
Calama North	1.214	0,38	3.178
Zaldívar	906	0,91	1.000
Escondida	1.382	0,44	3.178
Costo 4,22 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 7.13: Resultado Pesos Iniciales de 1

Se probaron otros casos en los que se quitó la restricción de demanda con objetivo de buscar indicios sobre como distribuye los flujos. Para el primer caso los inputs iniciales eran de 1.000, lo que resultó en una distribución similar entre los flujos para diferentes pesos iniciales, siendo el escenario que minimiza, con un costo medio de  $3,48 \frac{usd}{m^3}$ . (tablas en el anexo)

Se resuelve el mismo problema de optimización con otros inputs, asignándole a los clientes más pequeños 1.000 de entrada inicial y a los extremos 3.178. Se probaron diferentes pesos iniciales como en los casos anteriores, los resultados difieren entre sí, en la mayoría de los casos se llegó a un costo medio de  $4,3 \frac{usd}{m^3}$  (tablas en el anexo). Cuando el peso inicial es de 1, el costo medio es de  $4,22 \frac{usd}{m^3}$ .

Estos cambios en los resultados ocurren porque la entrada inicial de demanda incide considerablemente debido a que la estructura de costos no es lineal y los costos de cada cliente dependen entre sí, de manera que el algoritmo al comenzar desde un punto de partida diferente, encuentran puntos silla para un dominio de puntos extremadamente grande. De forma, a diferencia del primer escenario con demandas no se podría garantizar a simple vista que estos puntos son mínimos locales para el problema de optimización del costo medio.

## 7.7. Curvas de Costos Clientes

Se buscó graficar esta relación de los costos según la dependencia, distancia y caudal, dejando constante la altura. El resultado obtenido a continuación:

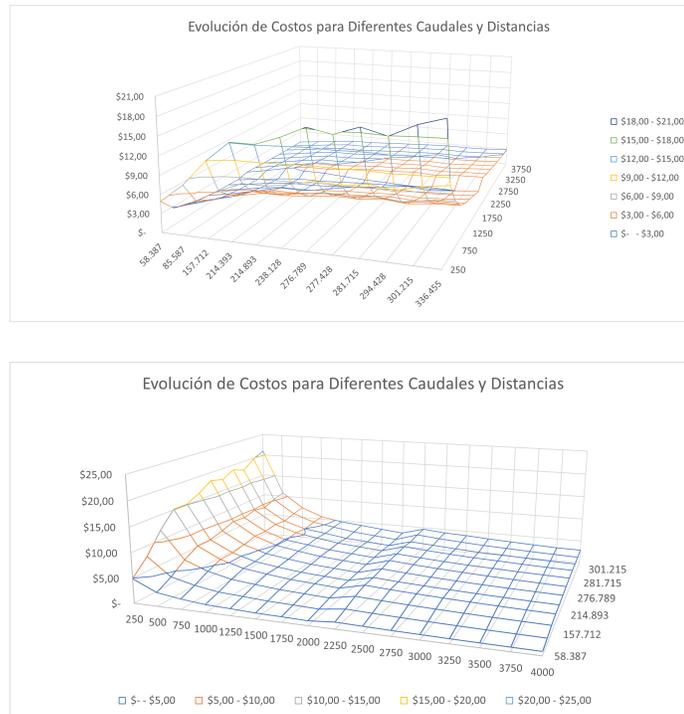


Figura 7.16: Evolución de Costos variando Caudal y Distancia

Esta gráfica considera todos los nodos activos con su costo y demanda individual hasta los 4.000 litros.

Esta gráfica señala el comportamiento de los costos respecto a todas las distancias relevantes de la red, incluso los clientes que no se encontraban en los otros escenarios. El costo incrementa a mayor distancia y disminuye a mayor caudal, se presentan pliegues entre medio, la superficie de costos se estabiliza a los  $2,250 \frac{L}{S}$  en adelante.

Esta curva sirve como aproximación general de los costos, a continuación se realizará el análisis según el escenario base escogido analizando en profundidad cada punto con el fin de determinar puntos relevantes en la función de costos.

Retomando el escenario base se estudió el comportamiento de los clientes ante la variación de sus flujos, este ejercicio se realiza para determinar como afecta el flujo en los costos de cada cliente, similar a lo conversado más arriba sobre, ¿cuál es el elemento que permite generar, economías de escala para el proyecto?.

Se revisará la variación de los costos totales, el costo operacional, el costo de capital y el costo de infraestructura. Para lograr una justificación empírica sobre como CRAMSA beneficia a los clientes mineros. Se tiene una intuición de como afectan los costos al modelo, sin embargo, ahora se profundizará y se entregará una explicación en base a la evidencia empírica.

En este ejercicio se reduce el parámetro de sobre inversión de un 50 % a un 15 %, esto con el argumento que ya existen clientes que cuentan con infraestructura previamente construida, por lo que se asume que les debe salir menos costoso construir nueva infraestructura en comparación con CRAMSA. Este supuesto se realiza con todos los clientes mineros para así determinar que alternativa es mejor.

Este ejercicio se realiza para cada cliente activo en el escenario base. El cliente minero está buscando crear su propia planta desaladora osea, no existe el resto de los clientes, así es posible determinar de manera empírica el costo de cuanto le cuesta al cliente minero construir su propia infraestructura de planta desaladora, se tomará una demanda máxima de  $4000 \frac{L}{S}$ , debido a que es la máxima cantidad que se estima que uno de los clientes en la cartera posiblemente demandará.

El OPEX obtenido por cada cliente con varios caudales resultó en el gráfico a continuación:

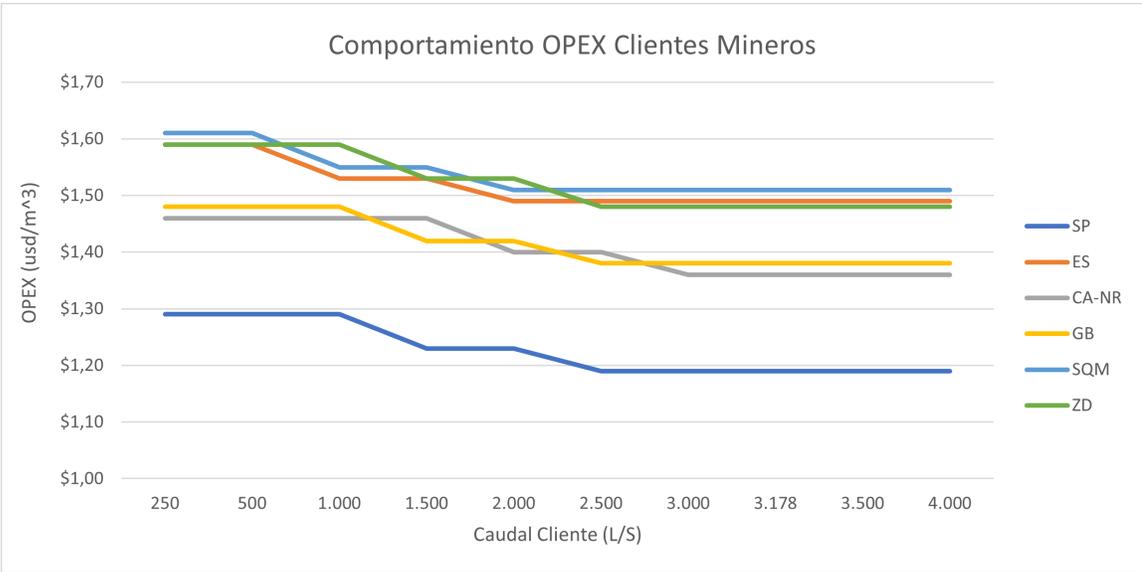


Figura 7.17: Gráfico OPEX por Cliente Minero

De esta gráfica se devela el comportamiento del OPEX para los clientes mineros. Se puede ver una relación negativa entre el costo y el caudal, presentando disminuciones abruptas al incrementar el caudal, mientras existe un mayor caudal entonces el OPEX será menor. Su comportamiento visualmente es similar al de una función parte entera debido a su comportamiento escalonado y los costos constantes durante ciertos volúmenes de agua.

Como mencionamos previamente el OPEX depende de las concesiones, las estaciones de bombeo y las tuberías. Como son todos clientes mineros en este análisis, no hay costo de

concesión. El costo de operacional de las tuberías depende del costo directo ponderado por el tramo total de la red que corresponde, el costo de desalación y se tiene el costo de bombeo, este costo depende de la diferencia de altura entre puntos, para este caso esto no influye debido a que se trata del mismo punto para distintos flujos y el costo energético por hora, esto no presenta fluctuaciones en los costos debido a que son costos que se encuentran intrínsecos a la operación de transportar agua desde un punto a otro.

Lo que genera la disminución de los costos, es el caudal. Debido a que a un mayor caudal se utilizan las infraestructuras al máximo, de la manera más eficiente posible, generando economías de escalas. El costo se mantiene constante y posee dos bajadas relevantes para los clientes, las que se debe a la maximización del uso de la infraestructura en la operación.

Ahora bien, también existe un tema debido a la conversión de unidades en las variables. Se trabaja con costos operacionales que son del orden de  $10^{-2}$  en  $\frac{usd}{m^3}$  y se necesita calcular el costo anual en millones de dólares, al realizar esto, el cambio de unidad donde parte de los decimales son ignorados por la planilla, resultando diferencias de costos de millones de dólares redondeados, teniendo como consecuencia que el costo final da resultados cerrados que no muestran variaciones pero para efectos del cálculo y la noción es despreciable.

Por último el OPEX posee un comportamiento similar para la mayoría de los clientes, mostrando en la gráfica que una mayor cantidad de flujo en el sistema reduce el coste de operación. Esta reducción no es tan importante como ocurre con el CAPEX, esto se debe a que los costos de operar la planta son menores en comparación a la gran inversión en infraestructura que se realizó.

El costo de infraestructura y reemplazo de equipos incrementa con el flujo, esto se explica debido a que al tener un mayor caudal se produce un mayor gasto en infraestructura y en piezas, incrementando el costo. Se trabaja con el supuesto de realizar una reposición y reemplazo de equipo el año 2048 y 2050. El costo para cada cliente con diferentes flujos a continuación:

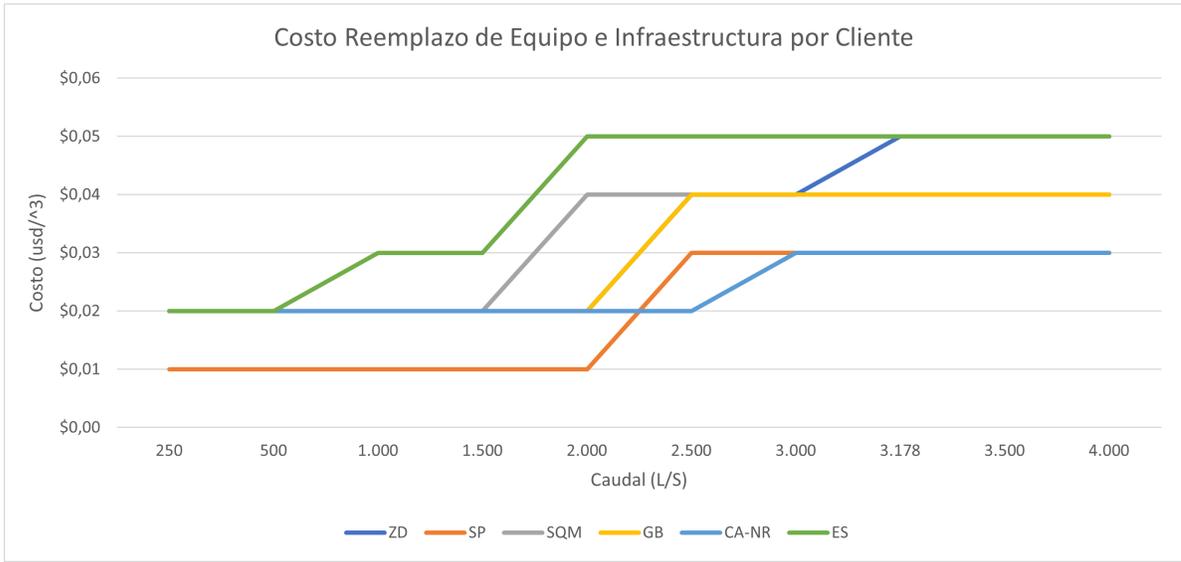


Figura 7.18: Gráfico Equipamiento e Infraestructura

La gráfica refleja una relación positiva entre el caudal y el incremento del costo mencionado anteriormente. En aspectos generales, posterior a los  $3000 \frac{L}{S}$  aproximadamente, estos costos se vuelven constantes para un valor límite de  $4000 \frac{L}{S}$ .

Este es el menor costo de los tres y por como está estructurado no presenta economías de escala.

En la gráfica del CAPEX se logra apreciar las economías de escala para su estructura de costos. Este es el costo que más se reduce al incrementar el caudal lo que queda en evidencia en las curvas de costos. La estructura de costos sigue el comportamiento esperado comenzando con un costo inicial elevado para ZD y ES lo que es lógico debido a que estos dos clientes comparten la misma distancia entre ellos e infraestructura. Le sigue SQM que es el segundo cliente más extremo a la red seguido por Gaby, CA-NR y Spence. Siendo este último el cliente con la estructura de costos menos costos entre todos.

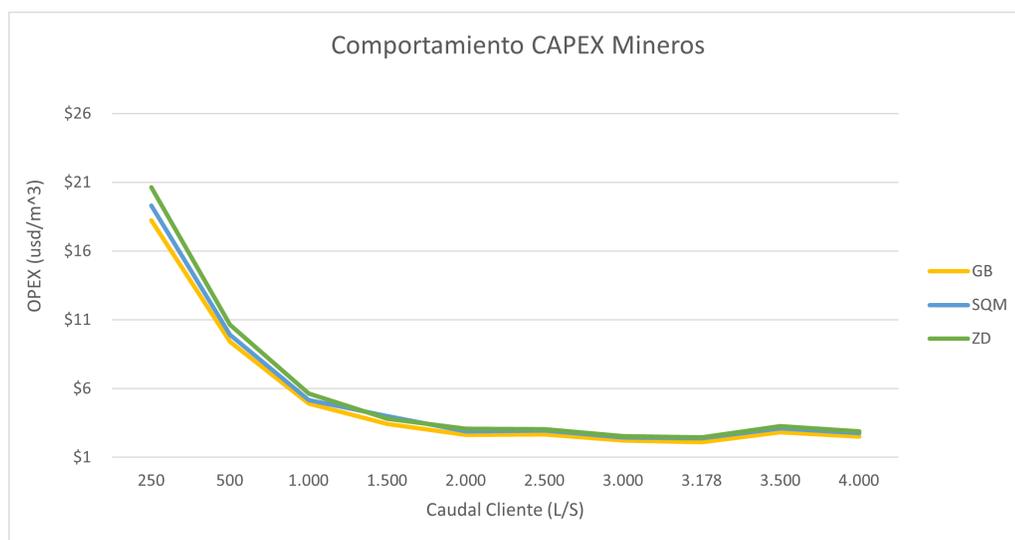


Figura 7.19: Gráfico CAPEX mineros

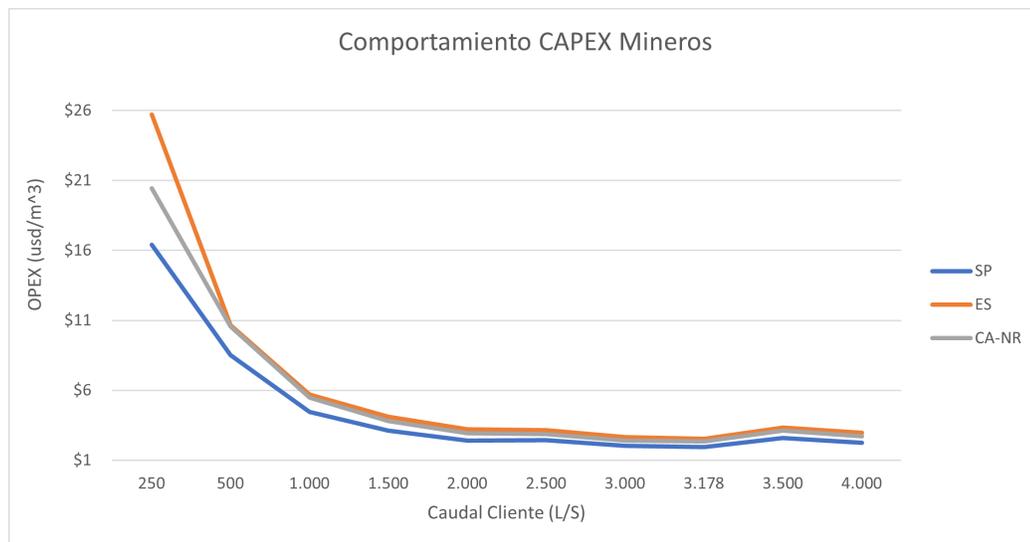


Figura 7.20: Gráfico CAPEX mineros

Por último se revisará la curva de costos totales, es decir,  $CAPEX + Equip.infra + OPEX$  de cada cliente. Como se vio anteriormente los costos ya revisados son de una variación pequeña. La mayor parte del costo total se debe al CAPEX, se puede decir que la principal ventaja que entrega CRAMSA a sus clientes es en la reducción de este costo.

Los resultados obtenidos se presentan en las gráficas a continuación, para mayor información consultar tabla de datos en anexo.

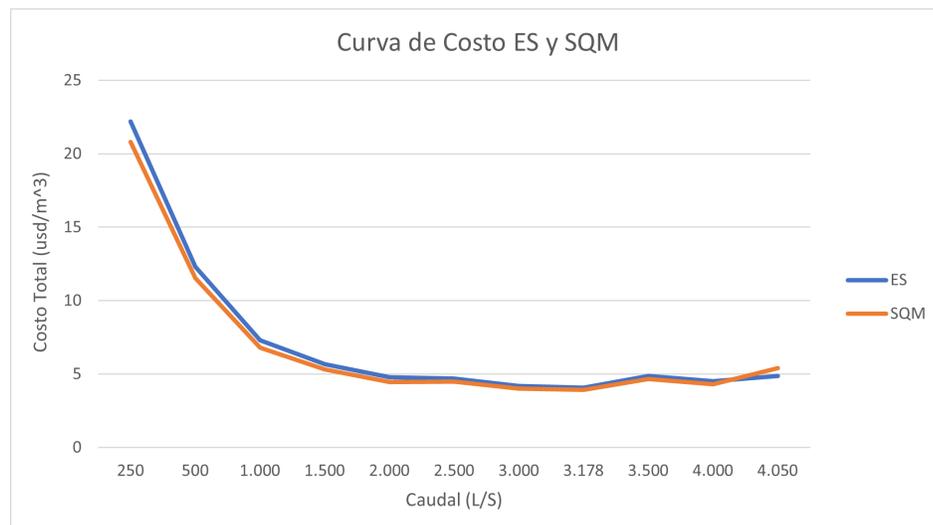


Figura 7.21: Curva de Costos Escondida y SQM

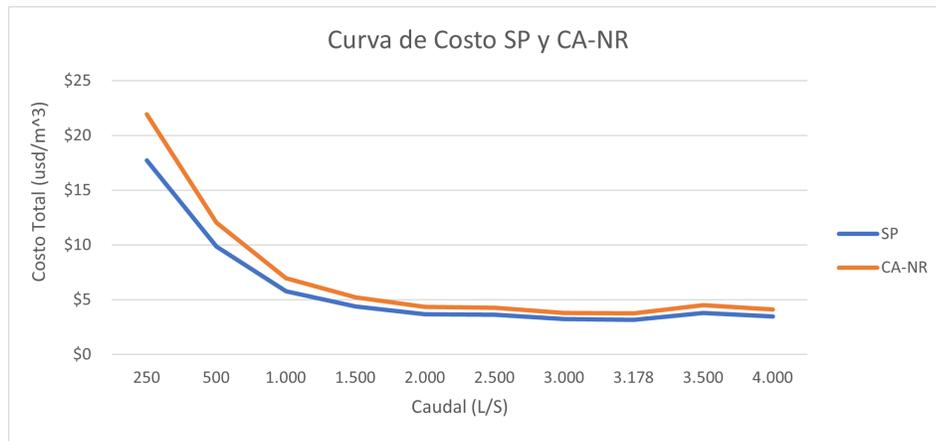


Figura 7.22: Curva de Costo Spence y Codelco Norte

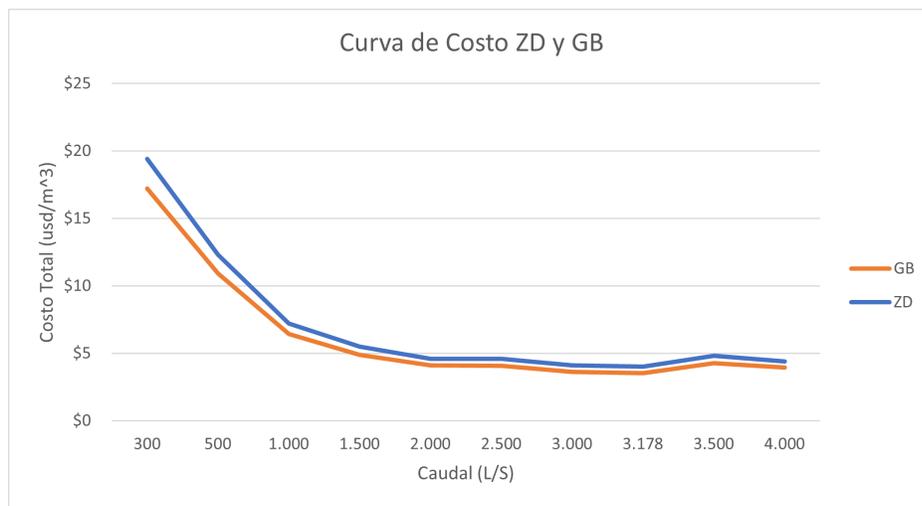


Figura 7.23: Curva de Costo Zaldívar y Gaby

Con fines de una mejor lectura de datos se graficaron las curvas resultantes tomando dos clientes. (Tablas con los costos en anexo)

La curva de costos de los clientes se estabiliza llegando a los  $2,000 \frac{L}{S}$ , mismo punto donde se consiguen los costos competitivos. Superior a un caudal de  $3,000 \frac{L}{S}$ , vuelve a verse una leve perturbación, las curvas de Zaldívar, Gaby, Spence y Codelco norte poseen un incremento menor en los costos, posterior a los  $3,500 \frac{L}{S}$ . Por otro lado revisando la curva de Escondida y SQM, el incremento es más pronunciado, esto se justifica porque el costo de construcción de tuberías es mayor que para los clientes más cercanos, es decir, el incremento del costo para los clientes lejanos es mayor porque es más costoso construir toda la red hacia el cliente que se encuentra en el extremo.

Esta subida en los costos sobre los  $3,000 \frac{L}{S}$  dio indicios de la existencia de un punto de inflexión que minimiza el costo, un mínimo local, el que se encontró empíricamente, este punto mínimo es para todos los clientes cuando el flujo es de  $3,178 \frac{L}{S}$ .

El costo por demandar más de lo que pide el punto mínimo se muestra en la tabla a continuación, la diferencia de estos costos se encuentra directamente relacionada con la distancia en la que se ubica cada cliente, en el mínimo local ocurre la situación en la que el cliente i maximiza el uso del diámetro de su tubería, si se excede en una unidad, el costo incrementa debido a que es necesario construir un nuevo módulo completo para satisfacer la demanda extra, contando con parte de esta nueva tubería que estará inutilizada, no siendo un resultado eficiente. Por esto, el diámetro y la cantidad de tuberías a construir son un factor fundamental en los costos y en la generación de economías de escala.

A esta curva se incluyen todos los tipos de costos, como se puede ver en el costo de CA-NR para la curva del CAPEX era inicialmente más barato que para el caso de GB, CA-NR supera el costo de GB en los costos totales.

Cliente	Incremento
ZD	\$0,79
SP	\$0,64
SQM	\$0,72
GB	\$0,73
CA-NR	\$0,76
ES	\$0,80

Tabla 7.14: Incremento del Costo Después del Punto Mínimo

De la tabla resultante se puede ver que el incremento de asignar una nueva red de tuberías para la distribución va en el orden de magnitud de un 0,74 en promedio.

La curva de CAPEX muestra un comportamiento similar al de los costos totales, reiterando la relevancia de las economías de escala para este costo, también en la curva del CAPEX se logra ver que se suaviza más rápido que la de los costos totales casi a la mitad, presentando menores costos y una estabilización de la curva a un menor caudal.

# Capítulo 8

## Discusión y Resultados

### 8.1. Resultados

El modelo teórico es de utilidad para generar una primera aproximación a una forma funcional. Eso sí hay detalles que no se logran captar derechamente en el modelo teórico referido como es el caso de los tramos de cada cliente de la red y los diferentes parámetros que componen esos tramos.

El costo de transporte considera la altura y la distancia utilizando una ecuación de pérdida de carga, algo distinto a como esto se calcula en la realidad, donde el costo energético de las estaciones de bombeo depende únicamente de la diferencia de altura por esto se podría creer que el cálculo teórico del costo de transporte puede estar sobreestimado. A esto se le suma la dificultad para medir la energía utilizada en el modelo teórico debido a que las estaciones de bombeo son de distintas magnitudes entre sí. En el caso empírico la red ya tiene definida que estación de bombeo se usará en que tramo. Por esto teóricamente se estableció una cantidad de estaciones de bombeo a considerar en base a una condición de distancia y altura, esto fue ponderado a la ecuación de Darcy-Weisbach buscando realizar una aproximación del costo de transporte y ponderar los costos energéticos por la cantidad de estaciones de bombeos activas hasta la ubicación del cliente.

La función de costos teórica deja en evidencia la cantidad de inputs externos que existen. Se realizó la búsqueda del óptimo para CRAMSA pero justamente la problemática es que no se trata de una solución cerrada, esto dependerá de las condiciones externas y los parámetros con los clientes que se trabaje, la cantidad demandada y su curva de costos. Lo que se aclara con el trabajo en el modelo empírico.

El modelo teórico busca encontrar la estructura de costos que más se aproxima al modelo empírico, dentro de las aproximaciones resultantes la función de costos teórica incorporó la gran mayoría de los costos que incorpora el modelo empírico pero con sus consideraciones respectivas por la falta de entradas. La diferencia en los costos no considerados por el modelo empírico está relacionado con el costo de las torres de captación, el costo de las tierras y

la adición de un costo operacional a la infraestructura de las tuberías costo adicional al establecido por transporte.

El modelo teórico fue fundamental para tener una noción del panorama completo de costos que involucra a CRAMSA, acá salieron a la luz todas las complejidades las que deben ser consideradas y resueltas en el desarrollo de una estructura empírica. Después de los ejercicios realizado y obtenido los resultados, se puede dar cuenta que el modelo teórico le dio mayor importancia al costo de transporte cuando el costo de infraestructura y los parámetros que definen esa infraestructura son los costos que generan la mayor parte de las economías de escala y se buscan minimizar.

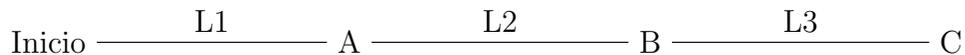
Una de las observaciones que entregó el trabajo en el modelo teórico se ve reflejada en el modelo empírico. Esto se refiere al factor del cliente extremo, el que siempre será el más afectado por los costos. Los costos se distribuyen según la cantidad de caudal que demanda cada cliente, para los ejercicios realizados el cliente minero ubicado al extremo si o si consumirá más que el cliente anterior, esta es la forma más justa en la que se distribuyan los costos.

Se hace énfasis a esto porque el cliente que no se encuentra a un extremo tiene todo el incentivo de demandar la mayor cantidad de agua posible ya que de esta forma se incrementará la magnitud de la infraestructura y el cliente extremo deberá costear un costo mayor en infraestructura de lo que el está demandando, siendo injusto para el cliente extremo que estaría realizando una subvención de los costos a los clientes anteriores.

Este incremento en la magnitud de la infraestructura afecta negativamente a todos los clientes que se encuentran en la rama afectada sin embargo, mientras más al extremo la firma más le perjudica, por esto, las mineras cuando uno de los clientes demanda una mayor cantidad que supera el umbral total de la infraestructura en la rama, entonces los clientes tendrían incentivos a demandar una mayor cantidad, asumiendo que la necesitan.

Esto se puede ejemplificar de la siguiente manera:

Se tienen los nodos A,B y C, clientes mineros en una misma rama.



Se supone una estación de bombeo ubicada en el nodo de inicio y las tuberías que van desde acá hasta C. Las demandas de los clientes son  $Q_a, Q_b, Q_c$ , teniendo una rama con un costo de infraestructura en estaciones de bombeo y tuberías inicial de  $C_E$  y  $C_t$ .

En un comienzo, las demandas se definen a través de un acuerdo justificando la infraestructura. Siempre el cliente extremo deberá costear más infraestructura para llegar a él, por la poca disponibilidad que tiene del recurso lo que hace suponer que este jugador posee una mayor disposición a pagar el resto.

Bajo ese supuesto inicialmente se asume que:

$$Q_a < Q_b < Q_c \quad \wedge \quad Q_a + Q_b + Q_c \leq Q_{total}$$

Siendo  $Q_{total}$  la demanda total entre los tres clientes y la capacidad máxima del equipo que se está utilizando.

$$L_1 + L_2 + L_3 = L$$

$L$  es el costo por distancia total recorrida por las tuberías.

El costo por tuberías está dado por:

- A paga por tubería  $L_1 \frac{Q_A}{Q_{total}}$
- B paga por tubería  $L_1 + L_2 \frac{Q_b}{Q_{total}}$
- C paga por tubería  $L \frac{Q_c}{Q_{total}}$

Con esto se evidencia que el cliente C deberá pagar más debido a que es más costoso transportarle a él.

En esta primera etapa no se presenta problemas, acto seguido para el período que viene, el cliente A comienza a demandar más agua, una cantidad  $K$  tal que se rompe la desigualdad establecida para el primer momento, el añadir esa cantidad de agua provoca que se necesite de una expansión de la estación de bombeo ubicada en inicio y también un incremento en el diámetro de las tuberías o bien construir otro módulo de tubería completo en la sección de inicio hasta el punto A.

Ahora el costo total de la infraestructura se eleva, ahora se necesita de tuberías más grandes o bien otro módulo por lo que el costo incrementa. Al costo por distancia del tramo  $L_1$  incrementa su valor. Ahora cuesta  $L'_1$  con  $L'_1 > L_1$ , entonces:

$$L'_1 + L_2 + L_3 = L'$$

Provocando que el cliente C y B deban pagar más:

$$\text{B pagaría } (L'_1 + L_2) \frac{Q_b}{Q_{total}} > (L_1 + L_2) \frac{Q_b}{Q_{total}}$$

$$\text{C pagaría } L' \frac{Q_c}{Q_{total}} > L \frac{Q_c}{Q_{total}}$$

Lo mismo ocurre con las estaciones de bombeo. Al momento de superar la capacidad estipulada, se necesita de otro módulo de manera que el costo pasaría a  $B'$  con  $B' > B$ . Los nodos B y C estarían costeano infraestructura más cara por A. En este caso habría una subvención de los clientes externos respecto al resto.

Por esto el cliente que se encuentra en la posición anterior tendrá todo el incentivo a demandar más, por esto los otros nodos no deben quedarse estáticos mientras la cantidad a demandar cumpla con las expectativas realistas, de manera que demanden una cantidad tal para no subvencionar al cliente anterior a este.

Los escenarios donde existe una expansión de infraestructura perjudica a todos los clientes posteriores siendo el cliente extremo el más afectado de todos.

Por esto un escenario de costos justo sería en el que se mantengan las demandas iniciales en el caso que no existiese requerimiento de expandir la infraestructura en las ramas con más de un cliente y en el caso de que así fuese demandar a la misma razón del escenario inicial.

De manera que no habría un incremento de costos sorpresivos. Cada cliente es diferente y se debe realizar el respectivo análisis de costos revisando cuanto más le cuesta al cliente un incremento en la sección en comparación a demandar más, cual es la estrategia que maximiza la utilidad.

Este costo presenta una reducción según el incremento del caudal el que llega a un punto máximo de caudal, antes que tener que volver a construir tuberías. La curva de costos permite mostrar que la existencia de economías de escala se encuentra principalmente por las tuberías y la utilización máxima de estas, siendo el mayor costo de infraestructura.

Los ejercicios realizados, son de utilidad para comprender la estructura empírica de los costos, tanto como para los clientes mineros y CRAMSA.

En el ejercicio de estimación de los costos por ramas, tiene como objetivo observar el comportamiento de los costos en el escenario base. La rama norte es la rama que reduce los costos de comienzo, lo que se explica por un menor costo de infraestructura respecto al resto.

Como se vio para el caso de las concesiones, este análisis por rama refleja cuales son las combinaciones de clientes a los que hay que distribuir para un escenario fijo, lo que puede adaptarse a un caso en que no se cumpla la demanda total de los  $8,000\frac{L}{S}$ . Entonces por la estructura de sus costos se tendría que distribuir a los clientes en la rama norte.

Esto se reafirma con un ejercicio que apuntaba a destacar el mismo comportamiento, profundizando en la estructura pero esta vez variando los caudales y desglosando por los montos de inversión en infraestructura.

Se definieron diferentes escenarios por ramas y se fueron duplicando los caudales, activando los clientes uno a uno según su posición, esto reveló que la rama norte es la que presenta menores costos debido a que posee una menor cantidad de estaciones de bombeos que las otras ramas. Al comparar los nodos extremos ES y CA-NR, se ubican a una misma distancia pero presentan diferencias de alturas, siendo más caro para Escondida la que necesita de 15 estaciones de bombeo para superar la altura necesaria a diferencia del otro cliente que requiere de 13. Si bien se ubican a una misma distancia, el cliente extremo de la rama sur presenta un mayor costo en tuberías lo que se explica principalmente por construir una mayor cantidad de secciones para llegar a este. Respecto al cliente extremo ubicado en la rama este su estructura de costos es similar a la de la rama sur aún así es menos costosa.

En las gráficas se pudo ver que las tres ramas poseían un comportamiento similar, las tuberías presentaban la mayor cantidad de costos, seguido de las estaciones de bombeo y el sistema de desalación. La estación de bombeo presentaba una tendencia al alza lineal y la desalación se mantuvo sin mayores cambios para los diferentes caudales.

Este ejercicio fue de utilidad para rectificar y comprobar el orden de importancia en las economías de escala que genera el proyecto de CRAMSA, esta se reflejan en la máxima

eficiencia del uso de la infraestructura, siguiendo el mismo orden que el nivel de costos de infraestructura mencionado previamente.

Del ejercicio de las ramas se obtuvo otro hallazgo relevante sobre el comportamiento de los clientes.

La importancia de los clientes extremos, son los que se llevan la mayor parte del costo de la rama y los que poseen una mayor disposición a pagar y a su vez por un tema de disponibilidad del recurso son los que más se pronostica que vayan a demandar por lo que es relevante tomar las decisiones estratégicas con miras a captar un gran cliente que cubra gran parte de la demanda y que idealmente sea en la rama menos costosa.

Por otro lado existe la restricción de lo que demandarán realmente los clientes extremos por lo que realizar una distribución entre más vecinos con menores demandas también es una opción factible.

Se realiza la minimización del escenario con concesiones, esto entrega la mejor distribución de demanda basándose en un escenario realista, es decir, con inputs límites de demanda que son los máximos estimados según el estudio realizado por CRAMSA. Esto refleja el comportamiento de los costos y señala las combinaciones posibles de distribución existentes.

Al resolver el problema que minimiza el costo medio en la primera fase hay dos escenarios que destacan. Uno donde los pesos se distribuyen entre los clientes más pequeños y otro donde el cliente más grande se lleva casi toda la demanda con un peso cercano a la mitad.

Este escenario entrega una composición de demanda óptima para CRAMSA, entregando diferentes escenarios que muestran esta dualidad, la que es relevante porque entrega alternativas de escenarios óptimos para CRAMSA, dándole flexibilidad en caso que alguno de sus clientes busque variar la cantidad demandada.

En la segunda etapa existe una reducción del costo porque se distribuye más agua haciendo uso de las economías de escala.

El escenario que minimiza el costo medio, resulta ser el mismo escenario inicial. Este fue el único que cumplía con todas las restricciones del problema de minimización. Sin embargo, resultaron otros dos escenarios que merecen ser destacados. Se llega al mismo valor del costo medio con distribuciones distintas, nuevamente uno de los escenarios entregaba una mayor cantidad al cliente mayor y el otro era una distribución más equilibrada entre los clientes.

Finalmente en este ejercicio, el óptimo es la distribución del escenario base. Siendo el caso en que el cliente que más demanda se lleva una cantidad considerablemente mayor que el resto de los clientes unidos.

A diferencia de los otros resultados para la primera fase, acá no existe otra distribución que cumpla con las restricciones y minimice el costo, por lo que existen otras alternativas como en el caso de la primera fase. En un comienzo este puede tratarse de un buen punto de partida ya que aún no se revelan las preferencias de los clientes. En un futuro al tener más información podrían existir variaciones en el número de clientes o bien que alguno demande más de su

peso total inicialmente establecido, lo que abre a nuevas alternativas para la búsqueda de un nuevo mínimo local.

De este ejercicio de optimización se puede concluir que Escondida condiciona el escenario por su gran cantidad de peso en la optimización pero esto se basa directamente en la realidad de la demanda y no únicamente en los costos.

Como se trata de un problema de optimización de carácter no lineal los inputs y los pesos iniciales inciden relevantemente. Para el escenario en que se quita la restricción de pesos las minimizaciones entregan resultados diferentes según su punto de inicio. Esto se debe a que el algoritmo comienza a buscar la solución que minimiza el problema y como la estructura de los costos no es convexa en todo el dominio, se traduce en la presencia de puntos silla y mínimos locales por lo que al evaluar para el escenario con los inputs iniciales 1.000 y 3.178 entrega resultados diferentes. Por esto la aproximación más cercana es utilizar un pronóstico estimado de demanda como es el caso del escenario ya realizado, con su verificación de mínimo local.

Se realiza el análisis de la curva de costos para los clientes en el escenario base porque explica cuanto le cuesta a un cliente generar su propia infraestructura y operación, así se posibilita comparar la estructura de costos con la de la red del cliente i con el servicio de CRAMSA y establecer bajo a que condiciones CRAMSA es la mejor alternativa para el cliente minero.

Las distribución de caudal para un solo cliente cuenta con economías de escala, sin embargo, estas llegan a tener costos atractivos para los clientes (costos competitivos) cuando el caudal es superior a los  $2,000 \frac{L}{S}$ , lo que es un caso poco realista basándose en la demanda de los clientes del escenario con concesiones. En este escenario, los clientes pequeños y medianos jamás demandarán por sobre el límite previamente mencionado, por lo que ellos por si solos no podrán construir su propia planta de desalación y no podrán sacar provecho del beneficio que entregan las economías de escalas en esta situación.

Por otro lado se encuentra la alternativa de CRAMSA, que ofrece el servicio de agua a los clientes mineros transfiriendo la propiedad de conseguir un costo competitivo, utilizando las economías de escala que no podrían lograr por si solo, por lo que para el cliente pequeño y mediano, se trata de una propuesta atractiva.

Entre los resultados obtenidos empíricamente, para este escenario, la mayoría de los clientes mineros como clientes racionales que son, tienen incentivo a tomar el servicio de CRAMSA. El motivo responde a la relación del caudal que demandan.

No es casualidad que los clientes con mayor demanda se encuentren ubicados en la zona más alejada de la urbanización, justamente, su disposición a pagar por el servicio es más alta dado a la dificultad del acceso de agua continental.

Los ejercicios realizados en la estimación de la curva de costos se realizaron considerando una sobre inversión menor que el cálculo de costos establecido para CRAMSA, una sobre inversión del 15 % vs una sobreinversión del 50 %, esto con el fin de asemejar el supuesto que algunos clientes de la zona ya cuentan infraestructura de desalación.

El desarrollo de este ejercicio basándose en las demandas enunciadas entregó que únicamente tres clientes mineros cuentan con puntos en los que se podrían evaluar construir su propia infraestructura, en relación a la demanda de caudal que tienen, superior a los mil litros.

Este es el caso de SQM, albemarle y Escondida, tres clientes que se encuentran en los extremos. Se tiene estimado que escondida demandará de  $850 \frac{L}{S}$  para la primera fase y de  $3200 \frac{L}{S}$  en la segunda fase. En este caso el costo que le toca a Escondida en la creación de su propia infraestructura, es menor que el costo del escenario base. En el primer caso el costo del mínimo local es de  $4,08 \frac{usd}{m^3}$  y con el escenario base es de  $4,86 \frac{usd}{m^3}$ . Lo que significa que bajo estas condiciones ES podría construir su propia planta y no necesitar de CRAMSA.

Basándose en las estimaciones, regulaciones e información obtenida de la literatura se espera que Escondida requiera expandir su capacidad de desalación por esto se realiza este ejercicio comparativo con el escenario de CRAMSA. Esto también busca dar respuesta la pregunta de un inicio busca responder la pregunta. ¿Por qué ES no ha generado su propia red de distribución a clientes más pequeños que demandan de agua?

La respuesta a esta problemática se reduce a un tema de incentivos, que Escondida construya toda una infraestructura y se encargue del transporte del agua tiene dificultades, la principal es que el cliente distribuidor es responsable legalmente de toda la red de distribución y de cualquier eventualidad, teniendo que distribuir a su competidor directo. A esto se le debe agregar los problemas ambientales en lo que la minera está involucrada y lo que por ley debe reparar, indemnizaciones que pueden llegar a los 6.660 millones de pesos [35], el costo de entrar en un problema ambiental para la minera es muy elevado, lo que desincentiva a jugar un rol como proveedor y distribuidor. Además como no se trata de su negocio principal el ingreso que le genera esta actividad es despreciable respecto a utilizarlo únicamente para su producción de mineral. Incluso en alguno de estos casos la construcción de infraestructura propia y de transporte se subcontrata empresas externas como ocurre por ejemplo con el caso de SPENCE con tedagua cliente externo que realizó el servicio.

Así como no se encuentran los incentivos suficientes para que Escondida tome el rol de distribuidor, tampoco es factible el desarrollo una planta desaladora multiusuario por todas las complicaciones de gestión y problemas de incentivos que esta tendría.

Además, hay que tener ciertos factores en consideración, esta minera está sujeto a la reposición de agua del salar, es decir, tendrá que utilizar recurso hídrico de su proceso de producción de mineral, lo que impactaría en su línea productiva directamente debido a la importancia del agua dulce en el proceso, recordar que la relación de producción aproximada es de  $215m^3$  para la producción de una tonelada de cobre más la ley de mineral por proceso vigente.

Otro factor relevante a considerar es el tiempo, CRAMSA ya lleva la delantera de establecer su infraestructura antes que Escondida. El tiempo de construcción de la red completa tiene un tiempo estimado alrededor de cinco años por lo que se trataría de una ventana de cinco años desde que comienzan a construir donde no podrá hacer uso de este recurso.

¿Cuánto le cuesta a Escondida no producir por un año? Para responder esta pregunta basta con calcular en base a la curva de costos, se utilizará el caudal que minimiza para el costo para el cliente,  $3,178 \frac{L}{S}$ .

El costo por año es de:

$$0,0099035349 \frac{m^3}{Ston} \frac{3600S}{1H} \frac{24H}{1D} \frac{365D}{1Y} = 312317,88 \frac{m^3}{tonY}$$

Utilizando el precio del cobre por tonelada de  $8122 \frac{usd}{ton}$

$$8122 \frac{usd}{ton} 312317,88 = \$2536645821$$

El costo total es de  $4,08 \frac{usd}{m^3}$ , lo que entrega un costo anual total de \$408903345

Su diferencia resulta en:

$$\$2536645821 - \$408903345 = \$2127742476$$

Esto es lo que aproximadamente le costaría en utilidad a Escondida el no disponer de esa cantidad de agua por un año completo, el período de construcción sería de cinco años por lo que estarían al menos cinco años sin percibir esta utilidad, con el flujo que minimiza sus costos. (Esto es un aproximado)

Existe el caso en que ES, únicamente demande  $850 \frac{L}{s}$  y solo requiera el servicio en primera fase. En ese caso ocurre lo que pasa para los clientes que presentan menos demanda, CRAMSA es la mejor alternativa que reduce sus costos. Acá es sencillo ver la ventaja de CRAMSA, lo que le cuesta a Escondida producir por si sola es de  $8,1 \frac{usd}{m^3}$  y contratando el servicio de CRAMSA es de  $6 \frac{usd}{m^3}$  (con ES con una menor sobre inversión).

Con este caudal se producen 0,00265 toneladas por segundo, lo equivalente a 83534 toneladas en un año. Lo que genera un ingreso total de

$$8122 \frac{usd}{ton} * 83534 = \$678463148$$

$$\text{Con un costo anual de } 6 \frac{usd}{m^3} * 0,85m^3 = 160833600$$

Resultando en una utilidad para ES:

$$\$678463148 - \$160833600 = \$517629548$$

En ambos casos de demanda Escondida sigue generando utilidad.

Ahora bien, se está considerando a Escondida con una sobre inversión del 15 %, si se considera con el mismo factor que se define para CRAMSA, de un 50 % este toma el mismo valor que para el escenario base de CRAMSA, un valor de costos  $4,8 \frac{usd}{m^3}$ . Por lo que haría la principal diferencia serían los factores extra que tiene CRAMSA y que entregan valor a las firmas mineras.

El tiempo inicial del proyecto es fundamental, en el momento que Escondida decida construir la infraestructura, CRAMSA ya se encontraría completo funcionamiento y consolidándose

entre los clientes. Se encontraría en operación con capacidad de distribución tres años antes en que la infraestructura propia de la minera pueda comenzar a operar.

Asumiendo la racionalidad de los clientes, la decisión que maximiza su utilidad es contratar el servicio de CRAMSA durante el período en que la infraestructura de Escondida no esté operativa, este sea por un caudal de  $850\frac{L}{S}$  o bien  $3178\frac{L}{S}$ . Se considera el caso en que Escondida de igual manera construye en este mismo período de 25 años. Asumiendo que comienza la construcción el año 2026, esta se encontrará operativa para el 2031.

Por lo que surge la idea que durante aquel período, ES se vería incentivada en hacer uso del servicio de CRAMSA por ese período. Sería utilizar el servicio durante tres años hasta que se termine su infraestructura.

Se evalúa el caso en que Escondida construya su propia infraestructura y además contrate el servicio de CRAMSA. Para este ejercicio se asume el doble de costos para la minera durante los tres primeros años. Desde el año 2031 comienza a operar la planta de ES, a una capacidad de  $3178\frac{L}{S}$ . Por una limitante de capacidad CRAMSA distribuye de  $850\frac{L}{S}$  hasta el año 2029 y  $3178\frac{L}{S}$  hasta el año 2030.

Se realiza el cálculo de los flujos y son traídos a valor presente, sumando los flujos totales para el período de 25 años resulta en que (tabla con desarrollo en anexo):

Comparación (M usd)	
C CRAMSA	\$ 11.386
C ES	\$ 12.509
Ingreso	\$ 59.700
$\pi$ CRAMSA	\$ 48.314
$\pi$ ES	\$ 47.191
VP CRAMSA	\$ 17.486
VP ES	\$ 16.515

Tabla 8.1: Tabla Comparativa CRAMSA ES

De la tabla se puede concluir que se cumple que:  $VP_{CRAMSA} \geq VP_{ES}$

El valor presente de utilizando el servicio de CRAMSA es mayor que utilizar el servicio de CRAMSA por un tiempo determinado y construir infraestructura propia.

De todas las estrategias posibles en las que se ve enfrascado el jugador, esta última es la que más utilidad entrega. Se revisó que Escondida no entre al negocio del agua a durante ese período de tiempo significa que están perdiendo dinero, se mostró que no ingresar a tiempo durante esos años genera menos utilidad que si estarlo, resultando el servicio de CRAMSA como el que entrega mayor utilidad. Este ejercicio considera un plazo de tiempo de veinticinco años por lo que un plazo distinto podría cambiar la situación.

Ahora bien, cuestionándose la holgura de la tarifa que se puede cobrar, teniendo este ejercicio estimado, es posible sacar la holgura de tarifas que se tendría para ES.

La diferencia de los valores deja un  $\Delta = 970M$ , el que se distribuye en el período de los años con un valor de  $38,82M$ , estimando la tarifa máxima que puede cobrar CRAMSA para que Escondida le siga siendo atractiva la alternativa de CRAMSA.

El incremento máximo de tarifa que puede realizar CRAMSA al cliente es de  $+1,23 \frac{usd}{m^3}$ , es decir, al incrementar la tarifa en esa cantidad, el cliente se vería incentivado a construir por su cuenta. Para esto se asume que durante el período de los 25 años el costo es constante, lo que en la realidad no es cierto.

Como se mencionaba anteriormente este cálculo es relevante porque entrega las directrices del incremento de tarifa máximo que se puede realizar, esto porque el resto de los clientes cuenta con una demanda inicial inferior. (Ver tabla en el anexo).

A esto hay que agregar que el cliente se encuentra involucrado con las medidas de reposición por las externalidades negativas que ha generado en los sectores aledaños con la extracción de agua. Tenían una autorización para extraer hasta  $10 \frac{l}{s}$  pero habían extraído alrededor de  $1400 \frac{l}{s}$  para el año 2019.

En el capítulo de medidas de reposición, el punto seis llamado "*medidas de mitigación, recuperación y compensación*" (Primer tribunal ambiental. 2022), específicamente en el apartado D, se enuncian medidas de aceleración para la recuperación natural del nivel de agua del acuífero, entre las que se destaca, *Elaborar un plan de suministro hídrico artificial del acuífero del salar de Atacama. Para tales efectos, se deberá considerar como fuente de recarga, agua de mar debidamente acondicionada, con la calidad suficiente y en condiciones equivalentes a la de la cuenca objeto de compensación, garantizando que no se producirá la contaminación de las aguas ni la colmatación de los acuíferos, hasta alcanzar los niveles freáticos existentes previo al inicio de la extracción hídrica*" (Primer tribunal ambiental. 2022)

Este factor es fundamental tenerlo en consideración, por el momento no se define de cuanto será la reposición de agua que tendrá que generar Escondida y el periodo de tiempo en el que tendrá que completar tal acción. Sin embargo, con este detalle hay un mayor incentivo a generar una alianza estratégica con CRAMSA, genera valor intrínsecamente con miras en el mediano y largo plazo, para mantener sus niveles productivos y a la vez cumplir con las medidas de reposición establecidas por la autoridad, en pos de una producción más sustentable.

Asumiendo que debe reponer todo lo utilizado esto sería un total de  $1,400 \frac{l}{s}$ , lo que se traduce en costos para ES en un costo anual de  $4,8 \frac{usd}{m^3}$  \$211921920, bajo la suposición que se debe reponer todo en un solo año.

Ya se mostró que la ventaja de ser el primero en el mercado, le entrega un beneficio único a CRAMSA el que el ninguno de los clientes ya establecidos no pueden generar por si mismo, desde esa base, el tener que destinar agua para otros fines que no sean el proceso productivo no es eficiente y el hacerlo con la construcción de tu propia infraestructura evidentemente no es la decisión que maximiza la utilidad.

Otro de los clientes extremos relevantes que se encuentra en la rama este es SQM y Albemarle, clientes mineros que extraen litio, los que para efectos del cálculo su ubicación es la misma. Este último ya acordó con CRAMSA la reserva de  $500 \frac{l}{s}$ . Esta solicitud por parte de Albemarle

convierte CRAMSA en algo real y atractivo para su competidor directo de la zona SQM. La ubicación de ambos clientes, es beneficiosa para CRAMSA, debido a que al encontrarse tan cercano entre ellos, el construir una infraestructura propia para conseguir agua desalada es altamente ineficiente.

Cada uno de estos clientes requeriría de al menos  $2000 \frac{l}{s}$  para que se encuentre atractivo construir la infraestructura propia y así aprovechar las economías de escala. Por otro lado, utilizando el servicio de CRAMSA el costo se ve reducido debido a que se distribuye entre ambos clientes, es decir, si cliente Alb demanda  $1000 \frac{l}{s}$  y cliente SQM también demanda otros  $1000 \frac{l}{s}$ , entonces el costo de satisfacer esta demanda por si solos será de  $6,79 \frac{usd}{m^3}$ , en cambio ahora el costo para ambos se reduce a  $4,46 \frac{usd}{m^3}$ , debido a que comparte la demanda total del nodo. Lo mismo ocurre con el punto que minimiza los costos para los clientes mineros, sin embargo, el llegar a esa cantidad demandada de los clientes por ellos solos es poco realista.

Bajo las condiciones establecidas en el escenario base ocurre que para todos los clientes le es más atractivo el servicio de CRAMSA que construir su propia infraestructura. Esto porque al desarrollar la estructura de los costos quedó en evidencia que por sobre los  $2000 \frac{l}{s}$  la demanda conseguía un costo competitivo, lo que lograrlo por cuenta propia para los clientes pequeños es difícil dado que nunca demandarán por si solos un flujo de tal magnitud. Así CRAMSA se presenta como una alternativa atractiva que aprovecha las economías de escala que genera la infraestructura a través de la gestión propia entregando la oportunidad de dar el servicio de agua desalada a clientes mineros que antes por su demanda no les era posible.

En resumen, según los ejercicios realizados, existen dos alternativas. Basándose únicamente en la reducción de costos la rama norte es la mejor alternativa de distribución, presenta la menor estructura de costos, esto considerando variaciones en el escenario inicial. Cuando se consideran las demandas pronosticadas el escenario cambia y la mejor alternativa se centra en la mayor distribución del caudal hacia Escondida.

Las economías de escala se encuentra en la máxima utilización de la infraestructura, siendo las tuberías el instrumento que genera más costos y a su vez el que permite generar economías de escala con su utilización al máximo. Seguido por la infraestructura de las estaciones de bombeo más que el costo de operación de estas, la construcción en general posee un mayor costo que su operación.

Por último, los clientes mineros deben adquirir el servicio de CRAMSA y enfocar sus esfuerzos en desarrollar procesos productivos más eficiente, como por ejemplo invertir en investigación y desarrollo para mejorar el makeup de su proceso.

Con una única entidad presente en el mercado del agua desalada, puede incentivar la entrada de otros competidores aunque su elevado costo de inversión inicial en infraestructura y el obtener el permiso de las autoridades para construir en ciertas zona complejizan la entrada.

En relación a los factores endógenos como se trata de la especificidad del negocio, se podría suponer que una empresa que se desempeña en su rubro tiene una mejor gestión que una empresa que desempeña una actividad que no es su núcleo de negocio. Esto se puede ver empíricamente con las empresas que brindan el servicio de construir las plantas desaladoras a las mineras y posterior a su construcción la gestión queda al mando de la minera. En cambio

CRAMSA genera valor por el hecho de ser especialistas los distintos procesos y tratamientos de agua por lo que se espera que la logística de distribución de agua sea mejor que la de una empresa de un rubro distinto.

## 8.2. Limitaciones del Modelo

Este análisis presenta sus limitaciones por la incertidumbre que existe en un período de veinticinco años. El análisis de este modelo se realizó pensando en las condiciones iniciales y extrapolándolas a los períodos más avanzados.

Se analizó el comportamiento de la curva de costos para los clientes, estas a cierto nivel de caudal convergían a un costo. La pregunta que surge es si ¿existirá de una disminución de la estructura de costos a futuro?. En caso que exista una reducción de costos a futuro podría generar una fuga de clientes con una tarifa constante durante todo este período de tiempo, solo bastaría que no se cumpla:  $Vp_{CRAMSA} \geq Vp_{Minera}$ .

Son múltiples los factores que influyen en los costos, sin embargo, los que son más relevantes es el desarrollo tecnológico y el precio de la energía. Se estima que el incremento del desarrollo tecnológico produzca una disminución el costo de obtención y funcionamiento de infraestructura de agua desalada, también se espera una mayor eficiencia en la tecnología de membranas, volviendo el proceso más eficiente.

Basándose en lo publicado por IWA(International Water Association), se precisa una reducción en promedio de los costos en la captación de agua de  $0,6 \frac{USD}{m^3}$ , en el costo de construcción de 1 M de USD, en cuanto a su membrana se estima que incremente en una capacidad de filtración de  $37,5 \frac{m^3}{membrana}$  a una filtración de  $107,5 \frac{m^3}{membrana}$ , un incremento de  $70 \frac{m^3}{membrana}$  y una reducción en la energía necesaria en el proceso operacional con una disminución promedio de  $1,55 \frac{kWh}{m^3}$ . [33]

Queda a la vista que los procesos se podrán mejorar y ser más eficientes por lo que es necesario tener esto como consideración como lo haría CRAMSA para no sobrepasar el umbral límite en la tarifa a cobrar.

Por otro lado se encuentra el precio de la energía eléctrica, del que se podría esperar una tendencia alcista para un futuro, por el ajuste inflacionario y una mayor demanda de suministro eléctrico por la transición al uso de vehículos eléctricos y la conversión a proceso sustentables como es el caso del H2 verde. En el último año el costo marginal diario ha presentado un aumento del 122 % (Gráfica con fuente en anexo).

La demanda por agua desalada en el sector miero incrementará a futuro. Para el año 2028 (cuando entra en operación CRAMSA), la demanda total de agua de mar en el sector minero será de  $12600 \frac{L}{S}$  según las estimaciones de COCHILCO, alcanzando una demanda de la industria de  $15300 \frac{L}{S}$  para el año 2033. Estas estimaciones consideran factores relevantes en la capacidad de extracción como por ejemplo cambios en la ley del mineral.

Realizando una interpretación a futuro, es complejo estimar el comportamiento de la curva de los costos de los clientes mineros, por un lado se espera un incremento de tecnología eficientando los procesos pero por otro un incremento de la demanda a un mercado del agua desalada al que por el momento CRAMSA no posee competidores. De lo que sí hay certeza es que es un mercado incipiente y tiene un gran potencial en el mediano y largo plazo. Por lo que es altamente probable que entren competidores del rubro en la zona.

CRAMSA presentando una posición ventajosa para ese caso por estar en funcionamiento desde antes. Esto muestra la importancia de ser el primero en entrar al mercado en este mercado con barreras de entrada tan elevadas. Entonces por todo el análisis realizado y literatura consultada se podría esperar una reducción de los costos para los clientes pero esta disminución será menor a la estimada por IWA. A grandes rasgos se espera un desplazamiento de la curva de costos de los clientes levemente hacia abajo. Esto justificado porque el mayor costo que se presenta se encuentra en el CAPEX y gran parte de las mejoras en tecnología afectan directamente al OPEX.

Se considera una capacidad máxima de caudal para ambas fases, lo que sería de utilidad para un análisis posterior ver el comportamiento de la función de costos ante un aumento de la capacidad de la planta desaladora. Este aumento de caudal total podría dar un indicio si es que existe convergencia de la función de costos en el infinito y explicar el de manera clara la relación entre los costos de infraestructura que incrementan el caudal en sus puntos críticos, donde se necesita construir nueva infraestructura y la reducción de costos mientras más demandan los clientes.

Relacionado con la variación de los precios y el comportamiento de la curva de costos a futuro, la estructuración de los contratos para definir las tarifas y el tiempo en que se mantendrán vigente, es relevante y se encuentra directamente relacionado con mantener un precio atractivo donde no exista incentivo al desvío de los clientes mineros ni tampoco subvenciones. Este análisis es importante realizarlo realizando simulaciones revisando la volatilidad histórica de los costos de energía y operacionales para después determinar el tiempo de vigencia de las tarifas a esto también se le puede realizar un análisis de riesgo realizando un VaR al 95 %, es decir, estimar la pérdida inesperada con un 5 % de probabilidad de ocurrencia y determinar los límites tarifarios necesarios.

Otro factor a considerar es el detalle encontrado en el perjuicio al cliente extremo en el caso que el cliente anterior a este en la rama demande de un mayor caudal cambiando la infraestructura, elevando su costo, factor que se debe tener en consideración para análisis futuros en la estructuración del tiempo de los contratos y la fijación de tarifas.

También el considerar realizar cambios en la red, debido a que en el modelo la mayor parte de los costos se encuentra en las tuberías, las que tienen un área definida según el tramo y varía la cantidad de tuberías a construir al incrementar el caudal, esto mismo ocurre con las estaciones de bombeo, se encuentran definidas por tramo y al incrementar el caudal incrementan los módulos de igual manera que las tuberías, se tendría que realizar el ejercicio para determinar cual de las dos maneras reduce los costos o bien programar el modelo en otra plataforma que considere de manera eficiente procese ambos casos y considere este costo como variable.

En resumen, los dos factores más importantes para CRAMSA son el ser los primeros en el entrar al mercado debido al elevado costo de infraestructura, sus economías de escalas que genera con la mega infraestructura que se construirá distribuyendo los costos entre ellos y entregando oportunidades asequibles a los clientes medianos y pequeños.

# Capítulo 9

## Conclusiones

Se puede concluir que la estructura de costos empírica no es lineal y se trataría de un polinomio lo que dificulta encontrar una forma funcional por la forma en la que se presentan los inputs.

Se comprueba que CRAMSA es la mejor alternativa para los clientes mineros en el escenario de estudio, basándose en las condiciones de demanda que se especifica.

La estructura de costos de la rama norte es la de menor costo de infraestructura, sin embargo, en sus estimaciones de demanda el cliente extremo de esta rama demandaría una cantidad considerablemente menor. Por lo que los escenarios estudiados Escondida es el cliente esencial que se busca ofrecer sus servicios.

De la optimización de este escenario se mostró las distintas distribuciones del caudal del escenario no teniendo que depender exclusivamente de los clientes extremos, también existe la alternativa de distribuir entre varios clientes.

Las economías de escala se encuentran en el CAPEX, específicamente en el costo de tuberías, estaciones de bombeo y desalación. Para encontrar los puntos que minimizan la estructura de costos se debe buscar utilizar la infraestructura al máximo de capacidad.

Con el desarrollo del ejercicio teórico se descubre la secuencialidad que existe en los costos donde el cliente más extremo es el que siempre deberá pagar más, es necesario tener en consideración esto al momento de tarifificar, en que secciones la capacidad de la infraestructura cambia para así cobrar de manera justa a cada cliente de la red.

# Bibliografía

- [1] *El Agua y el Litio*. InduAmbiente, 2020.
- [2] *Crisis latente: Los graves impactos de la explotación del litio en el norte de Chile*. OLCA, 2021.
- [3] *Developing mining for a better future*. Antofagasta minerals, 2022.
- [4] *The future is clear BHP annual report 2021*. BHP Billiton, 2022.
- [5] *Informe de sostenibilidad 2021 SQM*. Sociedad Química y Minera, 2022.
- [6] *Water Risk Filter Methodology Documentation*. WWF, 2022.
- [7] Tribunal Ambiental. *Tribunal Ambiental acogió reclamación en contra de la SMA asociada a procedimiento sancionatorio llevado contra SQM Salar*. Tribunal Ambiental, 2018.
- [8] Agustín Arévalo. *Desarrollo de una estructura de financiamiento para la construcción de un megaproyecto: Planta Desaladora*. Universidad de Chile, 2022.
- [9] Sophia Boddenberg. *Extracción de litio en Chile ¿bendición o maldición?* DW, 2018.
- [10] Diego Antonio Riveros Bravo. *EVALUACIÓN DE SISTEMAS MULTIUSUARIOS DE DESALINIZACIÓN E IMPULSIÓN DE AGUA EN MINERÍA Y PROPUESTAS DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA SU IMPLEMENTACIÓN*. Universidad de Chile, 2021.
- [11] Michelle Carrere. *Chile: ¿Qué está en juego en el Salar de Atacama?* Mongabay, 2020.
- [12] Pierre Collin-Dufresne Bryan R. Routledge Casassus, Jaime. *Equilibrium Commodity Prices with Irreversible Investment and Non-Linear Technologies*. Pontificia Universidad Católica, 2009.
- [13] Minería Chilena. *Escondida inauguró la mayor desaladora de Sudamérica*. Revista de Minería Chilena, 2018.
- [14] CLGroup. *Informe Valorización Proyecto CRAMSA*. CLGroup financial consulting, 2020.
- [15] CLGroup. *CRAMSA WATER SUPPLY PROJECT*. CLGroup, 2022.
- [16] COCHILCO. *Análisis de Variables Claves para la Sustentabilidad de la Minería en Chile*. Ministerio de Minería, 2014.

- [17] COCHILCO. *Consumo de agua en la minería del cobre al 2019*. Ministerio de minería, 2019.
- [18] CODELCO. *Compilado etapas proceso productivo del cobre*. CODELCO EDUCA, 2018.
- [19] Gobierno de Chile. *Proyección de Demanda de Agua en la minería del cobre*. Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería, 2022.
- [20] Luis E. Pérez Farrás. *Breve Historia de la Ecuación de DARCY- WEISBACH (FANNING) y Consideraciones de Interés sobre la Misma*. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2013.
- [21] M. Tignor E.S. Poloczanska K. Mintenbeck A. Alegría M. Craig S. Langsdorf S. Löschke V. Möller A. Okem B. Rama H.-O. Pörtner, D.C. Roberts. *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, UK, 1st edition, 2022.
- [22] Valeria Ibarra. *Albemarle renuncia a derechos de agua, apuesta por desalación y reformula métodos de extracción de litio*. Diario Financiero, 2022.
- [23] IGU. *Global Gas Report 2022*. International Gas Union, 2022.
- [24] Jaime Illanes. *Informe de evaluación ambiental*. Servicio de evaluación ambiental, ministerio de medio ambiente, 2010.
- [25] Peter Jackson. *De Estocolmo a Kyoto: Breve historia del cambio climático*. ONU, 2020.
- [26] CARLOS BONILLA LANAS. *Demanda de reparación por daño ambiental*. Consejo de defensa del estado, 2022.
- [27] Xenia Menacho Leguia. *Análisis y relación del Precio de cobre con el Riesgo País: Caso peruano 2002-2019*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2020.
- [28] El Mercurio. *Ranking mundial de libertad de prensa: Chile aparece 83° y Argentina es el sudamericano mejor ubicado*. El Mercurio, 2023.
- [29] Consejo Minero. *Cifras Actualizadas de la Minería*. Consejo Minero, 2023.
- [30] David Nuevo. *Como funciona una planta desaladora*. TECPA, 2022.
- [31] ONU. *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2019: No dejar a nadie atrás*. Organización de las Naciones Unidas, 2019.
- [32] OPEC. *Annual Report 2021*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, 2021.
- [33] ASESORÍA TÉCNICA PARLAMENTARIA. *ANÁLISIS ECONÓMICO DE ASPECTOS ASOCIADOS A LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA EN LA MINERÍA*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017.
- [34] Ignacio Rodríguez. *Agua desalada: Bajemos el costo de producción*. Diario Financiero, 2021.
- [35] SMA. *SMA sancionó a Minera Escondida por 6,600 millones de dólares de daño ambiental*. Superintendencia de Medio Ambiente, Gobierno de Chile, 2022.

- [36] Fundación Terram. *Cada tonelada de litio requiere la evaporación de 2 millones de litros de agua*. Fundación Terram, 2019.
- [37] Primer tribunal ambiental. *Reparación de daño ambiental*. Consejo de defensa del estado, 2022.
- [38] Mauricio Vegara. *Una Tonelada de Cobre se produce con 215 mil litros de Agua*. Gran Valparaíso, 2017.
- [39] Sebastián Villagrán. *FACTIBILIDAD DE DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES DEL NORTE DE CHILE*. Universidad de Chile, 2017.
- [40] LINA MARCELA URIBE VÉLEZ. *EFECTO DEL AGUA DE MAR EN LA RECUPERACIÓN DE MINERALES DE COBRE-MOLIBDENO POR PROCESOS DE FLOTACIÓN*. Universidad de Concepción, 2017.
- [41] Nueva Minería y Energía. *Reservas de cobre de Chile caen 45* Nueva Minería y Energía, 2021.
- [42] Jehle G. y P.J. Reny. *Advanced Microeconomic Theory*. Prentice Hall, 2000.
- [43] C. Peter Richardson y Robert J. Kingsford. *Comparing the Commodity Market for Water and Oil*. *Journal of Environmental Law and Litigation*, 2012.

# Anexo

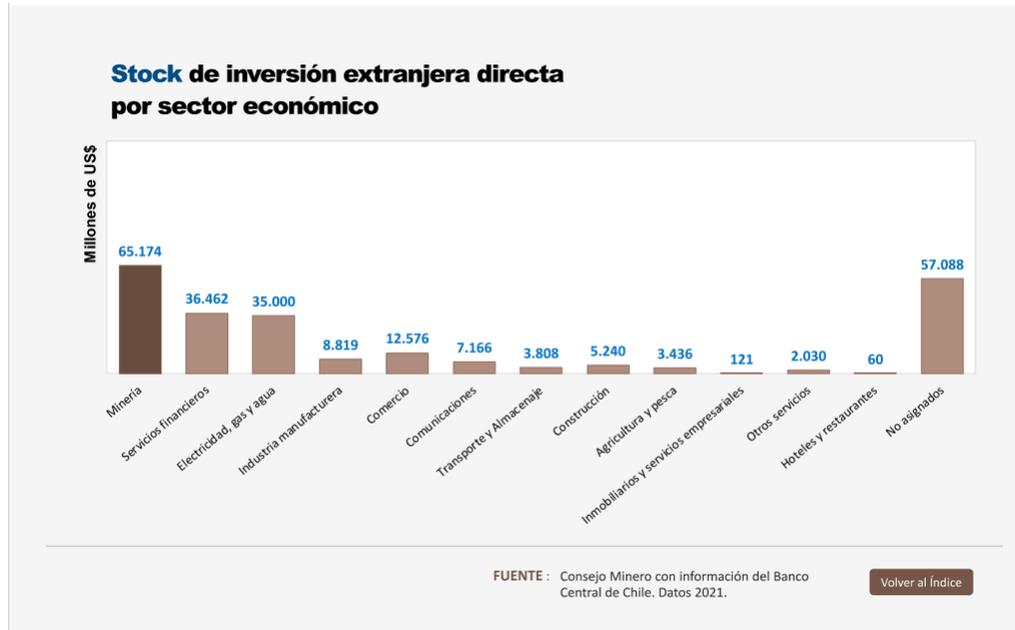


Figura 9.1: Inversión Extranjera por Sector Económico

Estación de Bombeo	Altura h
EB0	[0 - 80]
EB1	(80 - 372]
EB2	(372 - 760]
EB3	(760 - 1128]
EB4	(1128 - 1430]
EB5	(1430 - 1648]
EB6	(1648 - 1916]
EB7	(1916 - 2210]
EB8	(2210 - 2385]
EB9	(2385 - 2735]
EB10	(2735 - 3015]
EB11	(3015 - 3385]

Tabla 9.1: Altura Bombeo por estaciones. Fuente: Adaptado de [14].

Sección Transversal	Caudal (L/s)	Área (cm <sup>2</sup> )
25,4	101	507
30,48	146	730
35,56	199	993
40,64	259	1297
45,72	328	1642
50,8	405	2027
60,96	584	2919
71,12	795	3973
76,2	912	4560
81,28	1038	5189
91,44	1313	6567
101,6	1621	8107
106,68	1788	8938
142,24	3178	15890
121,92	2101	11675

Tabla 9.2: Tipos de Tuberías, Fuente: Modelo CRAMSA

N Clientes	N-E-S	N-S-E	E-S-N	E-N-S	S-E-N	S-N-E	Mín
1	\$8,81	\$8,81	\$8,81	\$8,81	\$8,81	\$8,81	\$8,81
2	\$5,15	\$5,15	\$8,17	\$8,17	\$8,17	\$8,17	\$5,15
3	\$5,15	\$5,15	\$8,04	\$8,04	\$8,93	\$8,93	\$5,15
4	\$4,41	\$4,41	\$6,11	\$6,11	\$4,83	\$4,83	\$4,41
5	\$4,65	\$4,65	\$6,34	\$5,11	\$4,78	\$4,39	\$4,39
6	\$4,42	\$4,42	\$4,56	\$5,17	\$4,56	\$4,63	\$4,42
7	\$4,74	\$5,00	\$4,64	\$4,64	\$4,64	\$4,66	\$4,64
8	\$5,04	\$4,65	\$4,78	\$5,04	\$4,78	\$4,65	\$4,65
9	\$5,16	\$4,64	\$4,60	\$5,16	\$4,59	\$4,64	\$4,59
10	\$4,49	\$4,49	\$4,49	\$4,49	\$4,49	\$4,49	\$4,49

Tabla 9.3: Costo Ejercicio Clientes Mineros

REGIÓN	CORDILLERA DE LA COSTA			VALLE CENTRAL			CORDILLERA DE LOS ANDES		
	Activo	Paralizado	Desistido	Activo	Paralizado	Desistido	Activo	Paralizado	Desistido
Arica y Parinacota	-	-	-	1	1	-	2	2	-
Tarapacá	1	-	-	2	1	-	7	-	1
Antofagasta	5	1	1	12	5	1	15	2	-
Atacama	8	3	-	31	7	5	37	14	1
Coquimbo	13	6	2	17	2	4	11	1	-
Valparaíso	2	-	-	1	-	1	4	2	-
Metropolitana	5	-	-	-	-	-	2	1	-
O'Higgins	-	-	-	2	-	-	-	2	-
Maule	-	2	-	3	1	-	-	-	-
Biobío	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Araucanía	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Los Ríos	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Los Lagos	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aysén	1	-	-	-	-	-	1	-	-
Magallanes	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>70</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>79</b>	<b>24</b>	<b>2</b>

Figura 9.2: Cantidad de Proyectos mineros en Exploración, según ubicación geográfica 2014.[16]

Escenario Base Con Concesiones (8.000 L/S)							
Clientes	N-E-S	N-S-E	E-S-N	E-N-S	S-E-N	S-E-N	Mínimo
1	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13
2	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22
3	\$3,1	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10
4	\$4,12	\$4,12	\$6,53	\$6,53	\$7,21	\$7,21	\$4,12
5	\$4,5	\$4,50	\$5,47	\$5,47	\$4,67	\$4,67	\$4,50
6	\$4,81	\$4,81	\$5,71	\$4,70	\$4,64	\$4,48	\$4,48
7	\$4,13	\$4,13	\$4,45	\$4,92	\$4,45	\$4,57	\$4,13
8	\$4,65	\$4,89	\$4,42	\$4,89	\$4,42	\$4,59	\$4,42
9	\$4,49	\$4,44	\$4,55	\$4,49	\$4,55	\$4,44	\$4,44
10	\$4,73	\$4,60	\$4,69	\$4,73	\$4,69	\$4,60	\$4,60
11	\$4,46	\$4,46	\$4,46	\$4,46	\$4,46	\$4,46	\$4,46

Tabla 9.4: Costo Ejercicio Con Concesiones

Escenario Con Concesiones (4.000 L/S)							
	N-E-S	N-S-E	E-S-N	E-N-S	S-E-N	S-N-E	Mínimo
1	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13
2	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22	\$0,22
3	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10	\$3,10
4	\$4,89	\$4,89	\$4,89	\$4,89	\$4,89	\$4,89	\$4,89
5	\$5,01	\$5,01	\$5,86	\$5,86	\$5,65	\$5,65	\$5,01
6	\$4,98	\$4,98	\$5,51	\$5,51	\$5,49	\$5,63	\$4,98
7	\$4,66	\$4,66	\$5,02	\$5,50	\$5,02	\$5,53	\$4,66
8	\$5,18	\$5,03	\$5,05	\$5,41	\$5,05	\$5,03	\$5,03
9	\$4,81	\$5,01	\$5,12	\$4,81	\$5,12	\$5,01	\$4,81
10	\$4,76	\$4,76	\$4,76	\$4,76	\$4,76	\$4,76	\$4,76

Tabla 9.5: Costo Ejercicio con Concesiones

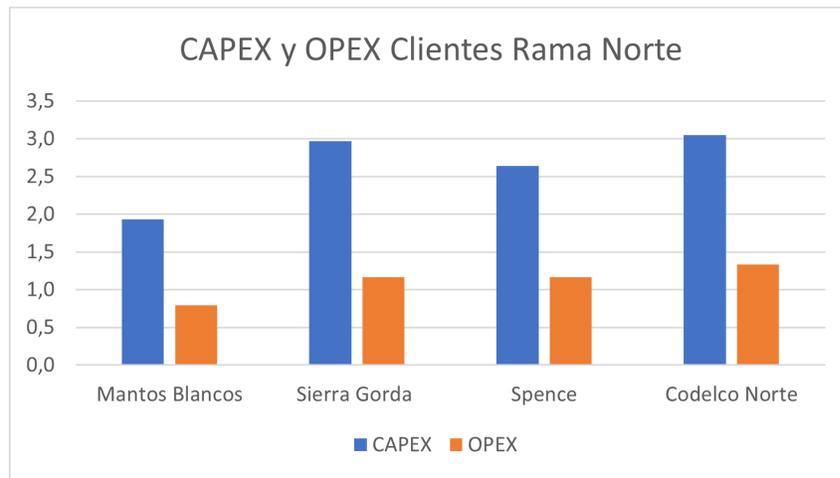


Figura 9.3: Gráfico CAPEX y OPEX Rama Norte Escenario Base

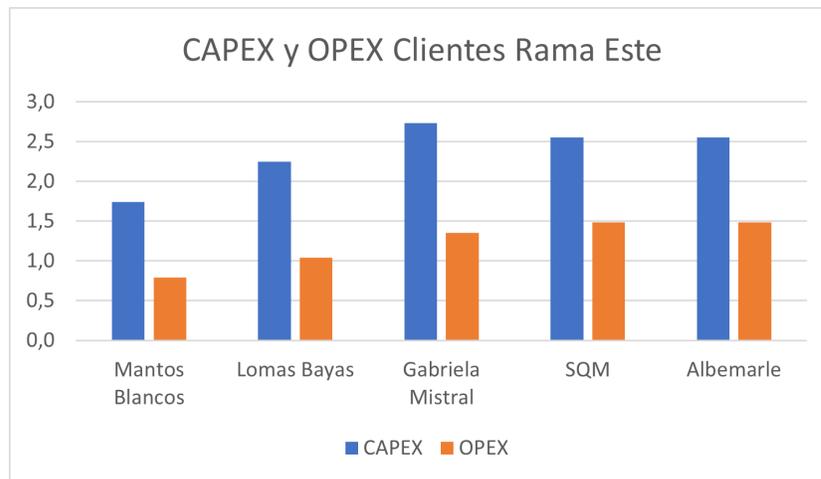


Figura 9.4: Gráfico CAPEX y OPEX Rama Este Escenario Base

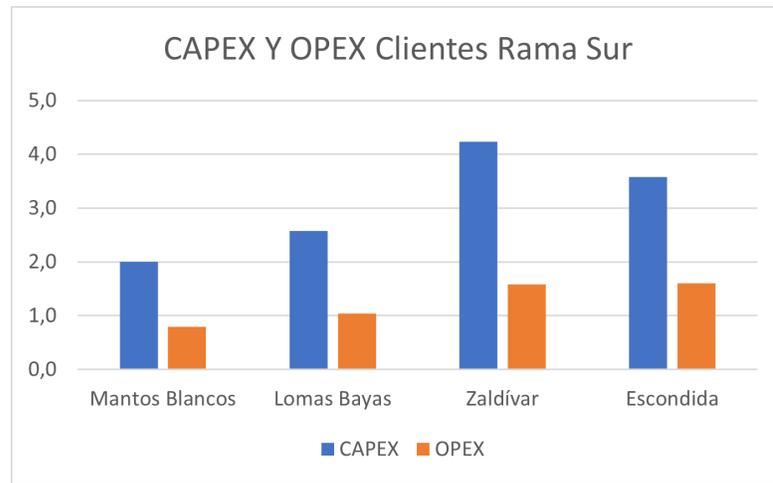


Figura 9.5: Gráfico CAPEX y OPEX Rama Sur Escenario Base

Rama ESTE		
	GB	SQM
Caudal (m/s)	300	500
Distancia (m)	237.128	267.428
Altura (m)	1.680	1.916
Diff h		236
Diff L		30.300
Diff Q		200
Tuberías MM	1.269	1.347
Planta MM	90	93
EB MM	180	197
Diff Tub		78
Diff Planta		3
Diff Eb		17
Costo Total	\$ 8,14	\$ 8,74
CAPEX	\$ 6,69	\$ 7,16
OPEX	\$ 1,42	\$ 1,55
Equip+Infra.	\$ 0,03	\$ 0,03
Costo medio	\$5,47	

Tabla 9.6: Evolución Costos Rama Este

Rama ESTE		
	GB	SQM
Caudal (m/s)	600	1000
Distancia (m)	237.128	267.428
Altura (m)	1.680	1.916
Diff h		236
Diff L		30.300
Diff Q		400
Tuberías MM	1.270	1.347
Planta MM	90	94
EB MM	188	248
Diff Tub		77
Diff Planta		4
Diff Eb		60
Costo Total	\$ 5,56	\$ 5,93
CAPEX	\$ 4,15	\$ 4,39
OPEX	\$ 1,38	\$ 1,51
Equip+Infra.	\$ 0,03	\$ 0,03
Costo medio	\$4,67	

Tabla 9.7: Evolución Costos Rama Este

Rama ESTE		
	GB	SQM
Caudal (m/s)	1200	2000
Distancia (m)	237.128	267.428
Altura (m)	1.680	1.916
Diff h		236
Diff L		30.300
Diff Q		800
Tuberías MM	1.270	2.639
Planta MM	90	115
EB MM	238	446
Diff Tub		1.369
Diff Planta		25
Diff Eb		208
Costo Total	\$ 5,36	\$ 5,75
CAPEX	\$ 3,93	\$ 4,19
OPEX	\$ 1,38	\$ 1,51
Equip+Infra.	\$ 0,06	\$ 0,06
Costo medio	\$4,96	

Tabla 9.8: Evolución Costos Rama Este

Rama ESTE		
	GB	SQM
Caudal (m/s)	2.400	4.000
Distancia (m)	237.128	267.428
Altura (m)	1.680	1.916
Diff h		236
Diff L		30.300
Diff Q		1.600
Tuberías MM	1.389	4.008
Planta MM	96	160
EB MM	377	792
Diff Tub		2.619
Diff Planta		64
Diff Eb		415
Costo Total	\$ 4,47	\$ 4,87
CAPEX	\$ 2,99	\$ 3,26
OPEX	\$ 1,38	\$ 1,51
Equip+Infra.	\$ 0,10	\$ 0,10
Costo medio	\$4,44	

Tabla 9.9: Evolución Costos Rama Este

Rama SUR		
	ZD	ES
Caudal (m/s)	300	500
Distancia (m)	267.415	267.415
Altura (m)	1.930	1.930
Diff h		0
Diff L		0
Diff Q		200
Tuberías MM	1.425	1.425
Planta MM	109	134
EB MM	226	279
Diff Tub		0
Diff Planta		25
Diff Eb		53
Costo Total	\$ 9,05	\$ 9,17
CAPEX	\$ 7,49	\$ 7,61
OPEX	\$ 1,53	\$ 1,53
Equip+Infra.	\$ 0,03	\$ 0,03
Costo medio	\$5,76	

Tabla 9.10: Evolución Costos Rama Sur

Rama SUR		
	ZD	ES
Caudal (m/s)	600	1000
Distancia (m)	267.415	267.415
Altura (m)	1.930	1.930
Diff h		0
Diff L		0
Diff Q		400
Tuberías MM	1.425	1.425
Planta MM	109	139
EB MM	226	499
Diff Tub		0
Diff Planta		30
Diff Eb		273
Costo Total	\$ 6,30	\$ 5,24
CAPEX	\$ 4,77	\$ 4,71
OPEX	\$ 1,48	\$ 1,48
Equip+Infra.	\$ 0,04	\$ 0,04
Costo medio	\$4,99	

Tabla 9.11: Evolución Costos Rama Sur

Rama SUR		
	ZD	ES
Caudal (m/s)	1200	2000
Distancia (m)	267.415	267.415
Altura (m)	1.930	1.930
Diff h		0
Diff L		0
Diff Q		800
Tuberías MM	1.425	2.794
Planta MM	134	203
EB MM	322	772
Diff Tub		1.369
Diff Planta		69
Diff Eb		450
Costo Total	\$ 6,03	\$ 6,00
CAPEX	\$ 4,47	\$ 4,44
OPEX	\$ 1,48	\$ 1,48
Equip+Infra.	\$ 0,08	\$ 0,08
Costo medio	\$4,29	

Tabla 9.12: Evolución Costos Rama Sur

Rama SUR		
	ZD	ES
Caudal (m/s)	2400	4000
Distancia (m)	267.415	267.415
Altura (m)	1.930	1.930
Diff h		0
Diff L		0
Diff Q		1600
Tuberías MM	1.544	4.163
Planta MM	140	205
EB MM	499	1044
Diff Tub		2.619
Diff Planta		65
Diff Eb		545
Costo Total	\$ 5,03	\$ 5,02
CAPEX	\$ 3,42	\$ 3,40
OPEX	\$ 1,48	\$ 1,48
Equip+Infra.	\$ 0,14	\$ 0,14
Costo medio	\$4,71	

Tabla 9.13: Evolución Costos Rama Sur

Rama Norte			
	EB08	SP	CA-NR
Caudal (m/s)	900	250	700
Distancia (m)	170.031	214.393	272.188
Altura (m)	1.680	1.916	2.325
Diff h		236	409
Diff L		44.362	57.795
Diff Q		650	450
Tuberías MM	926	1.153	1.449
Planta MM	61	84	109
EB MM	164	186	222
Diff Tub		227	296
Diff Planta		23	25
Diff Eb		22	36
Costo Total	\$ 3,76	\$ 4,84	\$ 6,24
CAPEX	\$ 2,66	\$ 3,62	\$ 4,86
OPEX	\$ 1,08	\$ 1,19	\$ 1,36
Equip+Infra.	\$ 0,03	\$ 0,03	\$ 0,03
Costo medio	\$ 4,09		

Tabla 9.14: Evolución Costos Rama Norte

	Rama Norte		
	EB08	SP	CA-NR
Caudal (m/s)	1800	500	1400
Distancia (m)	170.031	214.393	272.188
Altura (m)	1.680	1.916	2.325
Diff h		236	409
Diff L		44.362	57.795
Diff Q		650	450
Tuberías MM	926	1.153	1.734
Planta MM	61	87	116
EB MM	164	258	294
Diff Tub		227	581
Diff Planta		26	29
Diff Eb		94	36
Costo Total	\$ 4,09	\$ 3,98	\$ 5,61
CAPEX	\$ 2,87	\$ 2,59	\$ 4,22
OPEX	\$ 1,19	\$ 1,36	\$ 1,36
Equip+Infra.	\$ 0,04	\$ 0,04	\$ 0,04
Costo medio		\$ 3,06	

Tabla 9.15: Evolución Costos Rama Norte

	Rama Norte		
	EB08	SP	CA-NR
Caudal (m/s)	3600	1000	2800
Distancia (m)	170.031	214.393	272.188
Altura (m)	1.680	1.916	2.325
Diff h		236	409
Diff L		44.362	57.795
Diff Q		650	450
Tuberías MM	1.797	2.024	2.605
Planta MM	68	95	126
EB MM	279	373	546
Diff Tub		227	581
Diff Planta		27	31
Diff Eb		94	173
Costo Total	\$ 3,19	\$ 3,72	\$ 4,62
CAPEX	\$ 2,04	\$ 2,46	\$ 3,20
OPEX	\$ 1,08	\$ 1,19	\$ 1,36
Equip+Infra.	\$ 0,07	\$ 0,07	\$ 0,07
Costo medio		\$ 3,06	

Tabla 9.16: Evolución Costos Rama Norte

Pesos Iniciales 0			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	915	0,91	1.000
Spence	1.017	1,02	1.000
Gaby	1.017	1,02	1.000
Calama North	1.068	1,07	1.000
Zaldívar	1.017	1,02	1.000
Escondida	1.068	1,07	1.000
Costo 3,48 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.17: Resultado Pesos Iniciales de 0

Pesos Iniciales 0,25			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	915	0,91	1.000
Spence	1.017	1,02	1.000
Gaby	1.017	1,02	1.000
Calama North	1.068	1,07	1.000
Zaldívar	1.017	1,02	1.000
Escondida	1.068	1,07	1.000
Costo 3,48 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.18: Resultado Pesos Iniciales de 0,25

Pesos Iniciales 0,75			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	915	0,91	1.000
Spence	1.017	1,02	1.000
Gaby	1.017	1,02	1.000
Calama North	1.068	1,07	1.000
Zaldívar	1.017	1,02	1.000
Escondida	1.068	1,07	1.000
Costo 3,48 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.19: Resultado Pesos Iniciales de 0,75

Pesos Iniciales 1			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	915	0,91	1.000
Spence	1.017	1,02	1.000
Gaby	1.017	1,02	1.000
Calama North	1.068	1,07	1.000
Zaldívar	1.017	1,02	1.000
Escondida	1.068	1,07	1.000
Costo 3,48 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.20: Resultado Pesos Iniciales de 1

Pesos Iniciales 0			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	1.624	0,51	3.178
Spence	300	0,3	1.000
Gaby	300	0,3	1.000
Calama North	1.540	0,47	3.178
Zaldívar	372	0,37	1.000
Escondida	2.000	0,63	3.178
Costo 4,30 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.21: Resultado Pesos Iniciales de 0

Pesos Iniciales 0,25			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	1.544	0,49	3.178
Spence	389	0,39	1.000
Gaby	389	0,39	1.000
Calama North	1.694	0,53	3.178
Zaldívar	389	0,39	1.000
Escondida	1.694	0,53	3.178
Costo 4,31 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.22: Resultado Pesos Iniciales de 0,25

Pesos Iniciales 0,5			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	1.388	0,44	3.178
Spence	545	0,54	1.000
Gaby	545	0,54	1.000
Calama North	1.538	0,48	3.178
Zaldívar	545	0,54	1.000
Escondida	1.538	0,48	3.178
Costo 4,31 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.23: Resultado Pesos Iniciales de 0,5

Pesos Iniciales 0,75			
Cliente	Inputs	Alfas	Flujos
SQM&ALB	1.232	0,39	3.178
Spence	701	0,7	1.000
Gaby	701	0,7	1.000
Calama North	1.382	0,44	3.178
Zaldívar	701	0,70	1.000
Escondida	1.382	0,44	3.178
Costo 4,31 usd/m <sup>3</sup>			

Tabla 9.24: Resultado Pesos Iniciales de 0,75

Caudal L/S	SP	ES	CA-NR	GB	SQM	ZD
250	\$1,29	\$1,59	\$1,46	\$1,48	\$1,61	\$1,59
500	\$1,29	\$1,59	\$1,46	\$1,48	\$1,61	\$1,59
1.000	\$1,29	\$1,53	\$1,46	\$1,48	\$1,55	\$1,59
1.500	\$1,23	\$1,53	\$1,46	\$1,42	\$1,55	\$1,53
2.000	\$1,23	\$1,49	\$1,40	\$1,42	\$1,51	\$1,53
2.500	\$1,19	\$1,49	\$1,40	\$1,38	\$1,51	\$1,48
3.000	\$1,19	\$1,49	\$1,36	\$1,38	\$1,51	\$1,48
3.178	\$1,19	\$1,49	\$1,36	\$1,38	\$1,51	\$1,48
3.500	\$1,19	\$1,49	\$1,36	\$1,38	\$1,51	\$1,48
4.000	\$1,19	\$1,49	\$1,36	\$1,38	\$1,51	\$1,48

Tabla 9.25: Tabla OPEX clientes

Caudal L/S	ZD	SP	SQM	GB	CA-NR	ES
250	\$0,02	\$0,01	\$0,02	\$0,02	\$0,02	\$0,02
500	\$0,02	\$0,01	\$0,02	\$0,02	\$0,02	\$0,02
1.000	\$0,02	\$0,01	\$0,02	\$0,02	\$0,02	\$0,03
1.500	\$0,02	\$0,01	\$0,02	\$0,02	\$0,02	\$0,03
2.000	\$0,02	\$0,01	\$0,04	\$0,02	\$0,02	\$0,05
2.500	\$0,04	\$0,03	\$0,04	\$0,04	\$0,02	\$0,05
3.000	\$0,04	\$0,03	\$0,04	\$0,04	\$0,03	\$0,05
3.178	\$0,05	\$0,03	\$0,04	\$0,04	\$0,03	\$0,05
3.500	\$0,05	\$0,03	\$0,04	\$0,04	\$0,03	\$0,05
4.000	\$0,05	\$0,03	\$0,04	\$0,04	\$0,03	\$0,05

Tabla 9.26: Costo Reemplazo de Equipo

Zaldívar	
Caudal(L/S)	Costo (usd/m <sup>3</sup> )
300	\$18,51
500	\$11,75
1.000	\$6,98
1.500	\$5,35
2.000	\$4,49
2.500	\$4,42
3.000	\$3,94
3.178	\$3,85
3.500	\$4,64
4.000	\$4,29

Tabla 9.27: Costos Zaldívar

Spence	
Caudal(L/S)	Costo (usd/m <sup>3</sup> )
250	\$17,70
500	\$9,84
700	\$9,30
1.000	\$5,78
1.500	\$4,37
2.000	\$3,66
2.500	\$3,64
3.000	\$3,25
3.178	\$3,15
3.500	\$3,79
4.000	\$3,47

Tabla 9.28: Costos Spence

SQM	
Caudal(L/S)	Costo (usd/m <sup>3</sup> )
500	\$11,53
1.000	\$6,79
1.500	\$5,32
2.000	\$4,46
2.500	\$4,49
3.000	\$4,00
3.113	\$3,93
3.178	\$3,93
3.500	\$4,65
4.000	\$4,31

Tabla 9.29: Costos SQM

Gaby	
Caudal(L/S)	Costo (usd/m <sup>3</sup> )
300	\$17,20
500	\$17,20
1.000	\$6,41
1.500	\$4,87
2.000	\$4,09
2.500	\$4,08
3.000	\$3,64
3.176	\$3,52
3.500	\$4,25
4.000	\$3,94

Tabla 9.30: Costos Gaby

Codelco Norte	
Caudal(L/S)	Costo (usd/m <sup>3</sup> )
250	\$21,93
500	\$12,04
700	\$9,32
1.000	\$6,96
1.500	\$5,21
2.000	\$4,34
2.500	\$4,26
3.000	\$3,80
3.178	\$3,75
3.500	\$4,51
4.000	\$4,12

Tabla 9.31: Costo Codelco Norte

Escondida	
Caudal(L/S)	Costo (usd/m <sup>3</sup> )
500	\$12,26
1.000	\$7,31
1500	\$5,67
2.000	\$4,77
2.500	\$4,69
3.000	\$4,17
3.178	\$4,08
3.500	\$4,88
4.000	\$4,51
4.050	\$4,86

Tabla 9.32: osto Escondida

C/CRAMSA	Mes	4000 L/S												8000 L/S																	
		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052			
CRAMSA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
TES																															
PERIODO CONSTRUCCIONES																															
CRAMSA	\$	100,00	\$ 100,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	\$ 481,00	
TES	\$	641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	\$ 641,90	
VP/CRAMSA	\$	1.013	\$ 1.013	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	\$ 3.786	
TES	\$	852,79	\$ 852,79	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	\$ 3.304,98	
VP/CRAMSA	\$	370,73	\$ 370,73	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	\$ 3.144,14	
TES	\$	781,46	\$ 781,46	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	\$ 2.552,05	
VP/ES	\$	390,12	\$ 323,04	\$ 2.427,85	\$ 2.341,33	\$ 2.148,01	\$ 1.970,05	\$ 1.807,89	\$ 1.658,64	\$ 1.521,30	\$ 1.396,06	\$ 1.280,79	\$ 1.175,03	\$ 1.078,01	\$ 989,00	\$ 907,34	\$ 832,42	\$ 763,69	\$ 700,03	\$ 642,78	\$ 589,71	\$ 541,02	\$ 496,35	\$ 455,36	\$ 417,77	\$ 383,27	\$ 352,77	\$ 324,27	\$ 297,77	\$ 273,27	\$ 250,77

Figura 9.6: Desarrollo Ejercicio VP ES

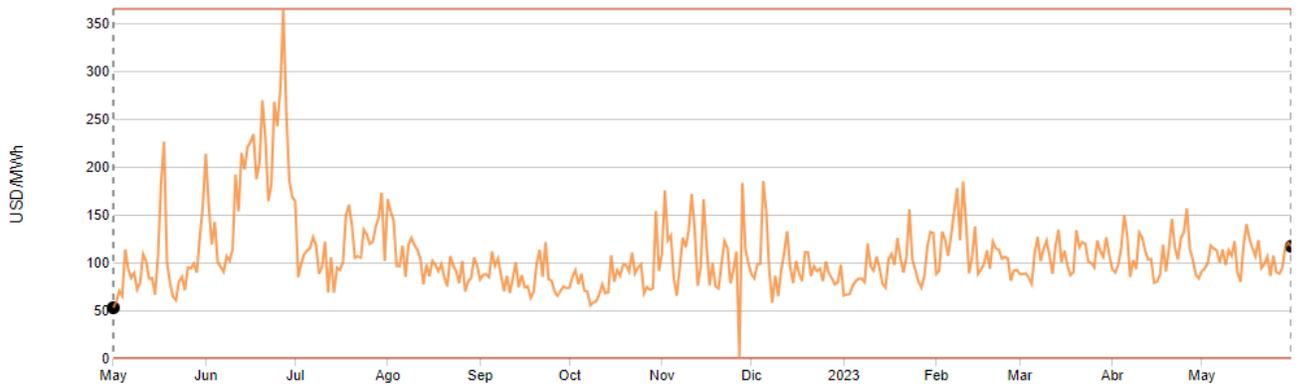


Figura 9.7: Evolución Costo Marginal. Fuente: Coordinador Nacional Eléctrico