



**Estudio de Interconexión Hídrica:  
Oportunidades y Desafíos para Chile**



**Informe de Final**

**Febrero de 2019**

|                                                                                     |            |                 |                  |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|------------------|-------------------------|
|                                                                                     |            |                 |                  |                         |
|                                                                                     |            |                 |                  |                         |
| C                                                                                   | 28/02/2019 | Consejo Minero  | Javier Balbontín |                         |
| B                                                                                   | 14/02/2019 | Consejo Minero  | Javier Balbontín |                         |
| A                                                                                   | 10/12/2018 | Consejo Minero  | Javier Balbontín | Jacques Wiertz          |
| REV N°                                                                              | FECHA      | EMITIDO PARA    | PREPARADO POR    | REVISADO Y APROBADO POR |
|                                                                                     |            |                 | SMI-ICE Chile    |                         |
|                                                                                     |            |                 |                  |                         |
|  |            | N° DE PROYECTO: |                  |                         |
|                                                                                     |            |                 |                  | REV. C                  |

## Tabla de Contenido

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen ejecutivo                                                                                         | 1  |
| 1 Introducción                                                                                            | 8  |
| 1.1 Motivación                                                                                            | 8  |
| 1.2 Objetivos del Estudio                                                                                 | 9  |
| 1.2.1 Objetivo General                                                                                    | 9  |
| 1.2.2 Objetivos Específicos                                                                               | 9  |
| 1.3 Alcances del Estudio                                                                                  | 9  |
| 1.4 Metodología                                                                                           | 10 |
| 2 Revisión de Antecedentes                                                                                | 13 |
| 2.1 Recopilación y análisis de ejemplos internacionales de sistemas de interconexión o suministro hídrico | 13 |
| 2.1.1 Israel                                                                                              | 13 |
| 2.1.1.1 Geografía y Clima                                                                                 | 13 |
| 2.1.1.2 Fuentes de suministro y disponibilidad hídrica                                                    | 13 |
| 2.1.1.3 Usuarios del agua                                                                                 | 14 |
| 2.1.1.4 Infraestructura Hídrica                                                                           | 14 |
| 2.1.1.5 Manejo de los recursos hídricos                                                                   | 15 |
| 2.1.2 Australia – Queensland                                                                              | 15 |
| 2.1.2.1 Seqwater                                                                                          | 15 |
| 2.1.2.2 Red de interconexión hídrica                                                                      | 16 |
| 2.1.2.3 Planta de desalinización                                                                          | 17 |
| 2.1.2.4 Sistema de tratamiento de aguas servidas                                                          | 17 |
| 2.2 Revisión y análisis del sistema de interconexión eléctrica                                            | 18 |
| 2.3 Disponibilidad y uso de recursos hídricos en la zona norte de Chile                                   | 19 |
| 3 Zona de estudio                                                                                         | 24 |
| 3.1 Definición de la zona estudio                                                                         | 24 |
| 3.2 Características de la zona de estudio                                                                 | 24 |
| 3.2.1 Información sobre plantas desaladoras                                                               | 24 |
| 3.2.2 Demandas actuales y proyección de las demandas de agua                                              | 26 |
| 3.2.2.1 Faenas Mineras                                                                                    | 26 |
| 3.2.2.2 Agua potable                                                                                      | 27 |
| 3.2.3 Infraestructura de transporte de agua                                                               | 28 |

|         |                                                                   |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.4   | Costos de inversión, operación y obras del sistema hídrico        | 31 |
| 4       | Modelo Conceptual de Recursos Hídricos                            | 32 |
| 4.1     | Definición de los elementos del modelo                            | 32 |
| 4.1.1   | Nodos fuentes                                                     | 33 |
| 4.1.2   | Nodos de demanda                                                  | 34 |
| 4.1.3   | Nodos de Almacenamiento                                           | 35 |
| 4.1.4   | Nodos de Balance                                                  | 35 |
| 4.1.5   | Arcos: Cauces naturales y obras de transporte hídrico             | 35 |
| 4.2     | Definición de escenarios y Topología del modelo operacional       | 36 |
| 4.2.1   | Escenarios de simulación                                          | 36 |
| 4.2.2   | Topología del modelo                                              | 37 |
| 4.3     | Operación del sistema                                             | 42 |
| 4.3.1   | Características Generales                                         | 42 |
| 4.3.2   | Escala Temporal del balance hídrico                               | 42 |
| 4.3.3   | Prioridad de los sitios de demanda                                | 42 |
| 4.3.4   | Prioridad de las fuentes de abastecimiento                        | 43 |
| 4.3.5   | Aguas disponibles en la interconexión                             | 43 |
| 4.4     | Indicadores de evaluación del sistema hídrico                     | 43 |
| 4.4.1   | Volumen suministrado por cada escenario                           | 43 |
| 4.4.2   | Costos de cada alternativa                                        | 44 |
| 4.4.2.1 | Costos de inversión                                               | 44 |
| 4.4.2.2 | Costos de operación                                               | 45 |
| 4.4.3   | Costo medio mensual del agua desalinizada                         | 47 |
| 4.4.4   | Costo medio mensual incremental del agua desalinizada             | 47 |
| 5       | Construcción del Modelo Operacional Hídrico de la Zona de Estudio | 48 |
| 5.1     | Plataforma de modelación                                          | 48 |
| 5.2     | Descripción de los elementos del modelo operacional               | 48 |
| 5.2.1   | Fuentes de abastecimiento                                         | 48 |
| 5.2.2   | Obras de transporte hídrico                                       | 48 |
| 5.2.3   | Sitios de demanda                                                 | 49 |
| 5.3     | Datos de entrada                                                  | 49 |
| 5.3.1   | Demandas Hídricas                                                 | 49 |
| 5.3.2   | Fuentes de Abastecimiento                                         | 50 |

|         |                                                                                                          |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.3.3   | Parámetros                                                                                               | 51 |
| 6       | Resultados del modelo                                                                                    | 52 |
| 6.1     | Volumen entregado y caudal medio no suministrado                                                         | 52 |
| 6.2     | Costos de funcionamiento del sistema hídrico                                                             | 53 |
| 6.2.1   | Inversión                                                                                                | 53 |
| 6.2.2   | Costos de operación mensuales                                                                            | 54 |
| 6.2.3   | Costos netos mensuales                                                                                   | 55 |
| 6.2.4   | Valor presente del costo total                                                                           | 56 |
| 6.3     | Costo del agua                                                                                           | 57 |
| 6.3.1   | Costo mensual del agua desalinizada                                                                      | 57 |
| 6.3.2   | Costo medio mensual incremental de la interconexión                                                      | 58 |
| 6.4     | Análisis de sensibilidad                                                                                 | 58 |
| 6.4.1   | Demandas hídricas                                                                                        | 58 |
| 6.4.1.1 | Aumento en un 20 % de las demandas al año 2042                                                           | 58 |
| 6.4.1.2 | Aumento en un 40% de las demandas hídricas al año 2042                                                   | 61 |
| 6.4.2   | Disponibilidad Hídrica de aguas continentales                                                            | 65 |
| 6.4.2.1 | Descenso en un 20% de los recursos totales y un aumento en un 20 % de la demanda al año 2042             | 65 |
| 6.4.2.2 | Descenso en un 50% de los recursos hídricos continentales y un aumento del 20% de la demanda al año 2042 | 68 |
| 6.4.3   | Nuevos escenarios                                                                                        | 73 |
| 6.4.3.1 | Caudal medio mensual no suministrado y volumen entregado                                                 | 74 |
| 6.4.3.2 | Valor presente del costo total                                                                           | 75 |
| 6.4.3.3 | Costo medio mensual del agua desalinizada                                                                | 76 |
| 6.4.3.4 | Costo medio mensual incremental agua desalinizada                                                        | 77 |
| 6.5     | Análisis de los resultados                                                                               | 78 |
| 6.5.1   | Suministro hídrico de los sitios de demanda                                                              | 78 |
| 6.5.2   | Valor presente de los costos                                                                             | 79 |
| 6.5.3   | Costo medio del agua desalinizada                                                                        | 80 |
| 6.5.4   | Costo medio incremental del agua desalinizada                                                            | 80 |
| 7       | Gobernanza del sistema de interconexión                                                                  | 82 |
| 7.1     | Definiciones y alcance                                                                                   | 82 |
| 7.2     | Responsabilidad compartida                                                                               | 83 |
| 7.3     | Concesión privada o pública                                                                              | 84 |

|       |                                                                                        |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4   | Operador externo                                                                       | 84  |
| 7.5   | Institucionalización                                                                   | 85  |
| 7.6   | Desafíos para la gobernanza de un sistema de interconexión hídrica                     | 85  |
| 7.6.1 | Objetivos y prioridades de la interconexión                                            | 85  |
| 7.6.2 | Prioridades                                                                            | 86  |
| 7.6.3 | Financiamiento y costos                                                                | 86  |
| 8     | Aspectos legales y regulatorios                                                        | 87  |
| 8.1   | Código de agua y propuestas de modificación                                            | 87  |
| 8.2   | Condicionamiento de los derechos de aprovechamiento de agua                            | 88  |
| 8.3   | Uso obligado de agua de mar                                                            | 88  |
| 8.4   | Proceso de evaluación ambiental                                                        | 90  |
| 8.5   | Zonificación del borde costero y concesiones marítimas                                 | 93  |
| 8.5.1 | Limitaciones en el desarrollo de plantas desalinizadoras                               | 93  |
| 8.5.2 | Política nacional de uso del borde costero                                             | 94  |
| 8.5.3 | Comisión Nacional de Uso del Borde Costero (CNUBC)                                     | 95  |
| 8.5.4 | Zonificación del borde costero                                                         | 96  |
| 8.5.5 | Concesión marítima                                                                     | 97  |
| 9     | Análisis FODA                                                                          | 99  |
| 9.1   | Fortalezas                                                                             | 99  |
| 9.1.1 | Infraestructura existente                                                              | 99  |
| 9.1.2 | Interés y disposición de los actores                                                   | 99  |
| 9.1.3 | Sistema interconectado eléctrico                                                       | 99  |
| 9.2   | Oportunidades                                                                          | 100 |
| 9.2.1 | Resiliencia a la reducción de disponibilidad de agua continental y al cambio climático | 100 |
| 9.2.2 | Minimiza requerimientos de nuevas infraestructuras                                     | 100 |
| 9.2.3 | Incorporación de nuevos usuarios – Aumento de la demanda                               | 100 |
| 9.2.4 | Gestión integrada de los recursos hídricos                                             | 101 |
| 9.3   | Debilidades                                                                            | 101 |
| 9.3.1 | Calidad del agua                                                                       | 101 |
| 9.3.2 | Gobernanza                                                                             | 101 |
| 9.3.3 | Marco regulatorio e institucionalidad                                                  | 102 |
| 9.4   | Amenazas                                                                               | 102 |

|        |                                                        |     |
|--------|--------------------------------------------------------|-----|
| 9.4.1  | Factores políticos y sociales                          | 102 |
| 9.4.2  | Factores ambientales                                   | 103 |
| 9.4.3  | Precios de los minerales y de la energía               | 103 |
| 10     | Conclusiones y recomendaciones                         | 105 |
| 10.1   | Contexto y desarrollo del estudio                      | 105 |
| 10.2   | Conclusiones                                           | 105 |
| 10.3   | Recomendaciones                                        | 107 |
| 10.3.1 | Consolidación de la información sobre oferta y demanda | 107 |
| 10.3.2 | Mejoras en la estimación de costos y beneficios        | 108 |
| 10.3.3 | Estimación y caracterización de fallas                 | 108 |
| 10.3.4 | Calidad del agua                                       | 108 |
| 10.3.5 | Administración y operación del sistema                 | 109 |
| 10.3.6 | Evaluación social del proyecto                         | 109 |
| 10.3.7 | Sociabilización del proyecto                           | 109 |
| 11     | Referencias                                            | 110 |

## Resumen ejecutivo

La actual incertidumbre en el suministro de agua ligada a una creciente demanda, a los posibles efectos del cambio climático, a la sobreexplotación en algunas cuencas de Chile, a regulaciones ambientales cada vez más exigentes y a la fuerte presión social, ha puesto el tema al centro de la atención de los diferentes actores económicos, políticos y sociales. La solución adoptada por las industrias minera y sanitaria en el norte de Chile ha sido, estos últimos años, la incorporación del agua de mar a sus fuentes de suministro hídrico. Estas soluciones son usualmente individuales y han dado como resultado un sistema fraccionado de infraestructuras de baja escala, las cuales recorren actualmente distancias de hasta 180 km y llegan a cotas por sobre los 3.000 metros sobre el nivel del mar.

La interconexión hídrica entre los sistemas de abastecimiento existentes y futuros y el uso compartido de infraestructuras aparecen como una alternativa que permitiría un mejor uso de las infraestructuras, un eventual ahorro en los costos de inversión y operación, una menor vulnerabilidad en el abastecimiento de agua. Sin embargo, la interconexión hídrica presenta importantes desafíos. El objetivo general de este estudio es identificar las oportunidades, las amenazas y los desafíos que representa un sistema de interconexión hídrica, para el sector minero y para todos los actores sociales y económicos.

La metodología adoptada en este estudio considera primero una revisión de antecedentes enfocada en la recopilación de información sobre sistemas de interconexión existentes en Chile y en otros países. Se revisaron sistemas de interconexión hídrica en el extranjero (Israel y Queensland, Australia) y el sistema eléctrico nacional. Los sistemas interconectados de Israel y Queensland son iniciativas públicas cuyo principal objetivo es asegurar una gestión integrada y eficiente en un contexto de escasez o de potencial escasez, reduciendo la vulnerabilidad del abastecimiento y asegurando un suministro continuo bajo distintos escenarios. En ambos casos, el sistema se financia a través del costo del agua transferido a los usuarios. El sistema interconectado eléctrico tiene 3 componentes principales: la generación de electricidad, la transmisión y la distribución. Junto con asegurar un suministro continuo, el sistema busca optimizar los costos, priorizando en lo posible la entrada de los generadores de menor costo de producción. La mayor diferencia entre interconexión hídrica y eléctrica es que en el caso de la interconexión eléctrica, los costos de transmisión son proporcionalmente mucho menores. Se realizó también una revisión de algunas características hídricas de Chile, con especial énfasis en las zonas norte y centro-norte, donde existe una mayor escasez de recursos hídricos, pero donde también subsiste una alta incertidumbre sobre la disponibilidad futura de los recursos.

Se eligió, como zona piloto para el desarrollo del estudio, la región de Antofagasta, entre Tocopilla al Norte, y Coloso al Sur. En esta zona, existen actualmente un total de 10 plantas desaladoras, de las cuales solamente 3 presentan una capacidad de producción superior a 100 l/s (Minera Escondida, La Chimba Agua de Antofagasta -ADASA-, Minera Centinela). Existen 8 plantas en proyecto, de las cuales 3 presentan una producción significativa (Minera Spence, Proyecto Sulfuros Radomiro Tomic y Antofagasta ADASA). Además, existe actualmente un solo sistema de impulsión de aguas desaladas (SIAD) (minera Escondida) pero se incorporarían próximamente dos sistemas más (minera Spence y Radomiro Tomic). La disponibilidad de recursos continentales se estimó a partir de los datos de abastecimiento del año 2017 de los diferentes proyectos y usuarios

considerados en este estudio. No se desarrolló en el marco del estudio ningún análisis detallado de la disponibilidad actual y proyectada de agua en las diferentes cuencas y subcuencas de la zona de estudio.

Por el lado de la demanda, para aquellas faenas mineras que no tienen proyectos de expansión declarados, se consideran iguales a los consumos hídricos del año 2017. En el caso de las faenas que tienen proyectos de expansión, se estiman los consumos en un horizonte de 20 años a partir del cálculo del agua necesaria para materializar la producción estimada de cada proyecto, según los procesos que consideran. Adicionalmente, se estima e incorpora el efecto de las variaciones estacionales de los consumos hídricos. Las demandas de agua potable actuales y proyectadas se incorporan a partir de la información entregada por ADASA.

Los costos de inversión, operación y obras de los sistemas hídricos fueron estimados a partir de la información entregada por algunos miembros del Consejo Minero o a partir de datos de acceso público.

Para analizar y evaluar las alternativas de interconexión hídrica, se diseñó un modelo conceptual que incorpora las demandas de agua, las fuentes de abastecimiento, las obras de almacenamiento del sistema hídrico, los cauces naturales y las obras de transporte que existen o se proyectan. Este diseño es la base de la construcción del modelo operacional de recursos hídricos, con el cual se evalúa en términos hídricos y económicos la operación del sistema en su situación actual o frente a cualquier modificación planteada. Cada elemento del sistema hídrico se representa en el modelo conceptual como un arco o como un nodo. Los elementos considerados pueden ser de abastecimiento, de consumo, de almacenamiento y de transporte. El modelo operacional permite distribuir el agua en función de la cantidad disponible y requerida en cada instante, en un contexto de permanentes variaciones. Para tal efecto, se incorporan en el modelo los nodos de balance, que no modifican la cantidad del agua disponible y tampoco la almacenan, pero cuya función es realizar la operación del agua en un punto determinado del sistema acorde a los objetivos y reglas planteadas, por ejemplo: lograr una gestión integrada del sistema, respetar los derechos de aguas, evaluar alguna política hídrica, etc. Finalmente, se evalúan los costos económicos de cada alternativa analizada en el estudio. Los costos calculados son costos de inversión y de operación. La parte variable de estos últimos depende principalmente de la energía requerida para desalinizar y transportar el agua a las faenas mineras.

Todos los elementos del modelo tienen como principio básico la continuidad de masa, que se aplica de manera particular en cada nodo del sistema. Sólo en los nodos de almacenamiento puede existir una variación de volumen. Los cauces y las obras de transporte se representan mediante arcos, a los cuales se asigna una capacidad máxima de transporte.

En la aplicación del modelo de interconexión en la zona de estudio, se simula una alternativa de interconexión entre las faenas mineras Escondida y Radomiro Tomic y sus respectivos SIAD, con una trayectoria cercana a las minas Zaldívar y Gabriela Mistral. Además, se proyectan trazados para conectar la tubería de interconexión con los sitios de demanda y también con el SIAD de minera Spence. Los escenarios modelados en el estudio son los siguientes:

- Situación sin interconexión: escenario base con los 3 SIAD (Escondida, Spence y RT) operando y sin interconexión.

- Situación con interconexión: misma infraestructura que la situación base más interconexión entre los 3 SIAD y conexiones hacia los sitios de demanda.
- Situación con interconexión e intercambio hídrico (swap): misma infraestructura que en la situación con interconexión, considerando además un intercambio hídrico entre la planta desalinizadora de Coloso (SIAD Escondida) y aguas continentales de la empresa sanitaria ADASA, ingresadas a la interconexión donde se cruzan ambas tuberías. Se considera también una tubería desde la planta desalinizadora de Coloso hasta la ciudad de Antofagasta para materializar el intercambio hídrico.

Se optó por simular el sistema hídrico a escala mensual para poder representar y analizar el efecto de las variaciones estacionales de la demanda en los distintos meses del año. En primera instancia se simulan fallas de 1 mes de duración, manteniendo una frecuencia de fallas sobre el periodo total de simulación (20 años) similar a las frecuencias de fallas reportadas por los operadores. La prioridad de los usuarios se materializa en los momentos donde dos o más sitios requieren suministro de una misma fuente. En caso de darse esta situación, los recursos se reparten según las prioridades y en el caso de existir dos o más sitios con la misma prioridad, los recursos se reparten proporcionalmente según las demandas de los usuarios. Del mismo modo, el modelo establece un orden de prioridad de las fuentes para cada sitio de demanda, sujeto a la disponibilidad. La primera prioridad, la tiene el agua continental, seguida por el agua del SIAD propio y finalmente el agua de la interconexión. El agua disponible para la interconexión es el excedente de agua una vez cubierta la demanda propia asociada a cada sistema de impulsión. Los indicadores utilizados en el estudio para evaluar los distintos escenarios son:

- Volumen total de agua suministrado: se calcula para cada intervalo de tiempo y a partir de este se puede calcular también el déficit de suministro o volumen de agua no suministrado.
- Costo total de cada alternativa: es la suma de los costos de inversión y de los costos de operación; los costos de inversión corresponden principalmente a los costos de las tuberías instaladas y de las instalaciones de bombeo; los costos de operación corresponden a costos fijos y costos variables de las desalinizadoras y del sistema de impulsión.
- Costo medio mensual del agua desalinizada: se calcula dividiendo el costo total mensual por los volúmenes de agua desalinizada suministrada.
- Costo incremental mensual del agua desalinizada: es el costo asociado a cada metro cúbico adicional entregado por la nueva infraestructura.

La plataforma escogida para llevar a cabo este estudio es WEAP (Water Evaluation and Planning) del Stockholm Environment Institute. En el caso específico de este estudio de interconexión hídrica los principales componentes del sistema representados en el WEAP son las fuentes de abastecimientos, las obras de transporte hídrico y los sitios de demanda. Las fuentes de abastecimiento corresponden a las aguas continentales y las plantas desalinizadoras que se caracterizan por el caudal disponible en cada momento. Las demandas hídricas del sistema se representan a través de los elementos llamados 'Sitios de demanda', que se caracterizan por una demanda específica de agua para cada instante.

En todo el periodo de modelación, la información base levantada muestra que, desde abril del año 2020 hasta marzo del año 2042, se tendría una demanda total de agua 5.424 millones de  $m^3$ . A su vez, la disponibilidad total de agua en todo el periodo de modelación, desde abril del año 2020

hasta marzo del año 2042, sería 7.846 millones de  $m^3$ . En ausencia de interconexión, cada falla en las plantas de desalinización y/o en los SIAD se traduce en un desabastecimiento en las faenas directamente abastecidas por estos. La interconexión permite suplir parte o el total del déficit de abastecimiento en caso de fallas, dependiendo del caso. Sin embargo, el costo unitario asociado a la construcción y operación del sistema de interconexión solo para suplir fallas es alto, dada la baja utilización de la infraestructura. El costo marginal del agua entregada en situación de fallas es del orden de 70  $US\$/m^3$ . Si se implementa el intercambio de agua (SWAP), que requiere la construcción de una conexión adicional entre Coloso y Antofagasta. A pesar de la mayor inversión, el costo marginal se reduce levemente a  $US\$62/m^3$  por la mayor utilización de la infraestructura de interconexión. Lo anterior considera 4 fallas en 20 años de cada una de las plantas de desalinización del modelo. El valor presente del costo total, que incluye inversión y operación, se estima en 2.358 millones de  $US\$$  en el escenario sin interconexión (no hay inversión) y de 3.079 millones de  $US\$$  en el caso con interconexión sin intercambio hídrico. Además, el volumen no abastecido de la alternativa sin interconexión se estima en 33,6 millones de  $m^3$  y en el caso de interconexión sin intercambio hídrico en 13,6 millones de  $m^3$  en el periodo de simulación.

Si se considera un aumento de la demanda (20% y 40% sobre el periodo de 20 años) y/o una disminución de la disponibilidad de agua continental (entre 20% y 50% sobre el periodo de 20 años), se observa un aumento en el uso de la infraestructura de interconexión y una disminución en los costos marginales, aunque aumentaría costo total en el abastecimiento hídrico del sistema, debido principalmente al costo de las inversiones.

En el caso de un aumento gradual de la demanda hasta en un 20% y una disminución escalonada de la disponibilidad de agua continental hasta un 50% sobre 20 años, el costo marginal del agua de interconexión bajaría a valores del orden de 9  $US\$/m^3$  (en promedio), incluso llegando a valores bajo los 6  $US\$/m^3$  en los momentos de mayor utilización. En este caso, en la alternativa sin interconexión, existe un mayor desabastecimiento de agua, que sería del orden de 287 millones de  $m^3$  y que sería mayormente en aquellos proyectos que no cuentan con su propio SIAD. En la alternativa con interconexión, el desabastecimiento hídrico se estima en 83 millones de  $m^3$ . Además, se estima que el valor presente del costo total de suministro en este caso aumentaría aproximadamente en 672 millones de  $US\$$  en la alternativa sin interconexión y en 820 millones de  $US\$$  con interconexión en comparación al caso con información base. Por otra parte, la interconexión ya no es capaz de cubrir un porcentaje tan alto del déficit de agua en caso de fallas, debido a que parte de su capacidad se está utilizando en abastecer permanentemente a otros usuarios.

Al analizar los flujos de agua que transitan por el sistema de interconexión, se observan importantes diferencias en los distintos tramos, siendo el tramo Sur, entre el SIAD de Escondida y los proyectos más cercanos, el que cuenta con el mayor flujo de agua. Estos resultados sugieren que se podría invertir en la interconexión de manera fraccionada y construir solamente una interconexión entre los SIAD de Escondida y de Spence o una simple extensión del SIAD de Escondida hacia los proyectos mineros cercanos, para disminuir la inversión y así obtener costos incrementales menores. El análisis de estos casos muestra que presentarían un menor costo marginal, aunque sólo se justificarían en caso tener un uso permanente de la infraestructura, es decir, tiene que existir disponibilidad y demandas hídricas cercanas a la capacidad de la nueva infraestructura.

El modelo de gobernanza de un sistema de interconexión hídrica que involucra distintos “productores” o proveedores de agua y distintos “consumidores” o usuarios de agua representa un gran desafío. El modelo de gobernanza tiene directa relación con los objetivos de la interconexión, con el modelo de negocio y con el financiamiento. La interconexión puede contribuir a reducir la vulnerabilidad y los riesgos de desabastecimiento en caso de fallas en las plantas de desalinización o en los sistemas de impulsión, responder a una disminución de la disponibilidad de recursos hídricos continentales o a un incremento de la demanda de usuarios existentes o por incorporación de nuevos usuarios, o permitir la implementación de SAWP entre agua desalinizada entregada en la zona costera y agua continental en la zona cordillerana. Las principales opciones de gobernanza son un organismo administrador donde participarían representantes de las empresas que se comprometen a cofinanciar el sistema (responsabilidad compartida), un concesionario encargado de construir y operar el sistema durante un periodo previamente determinado bajo el mandato privado o público, modelo muy similar también a un BOOT (Build, Own, Operate and Transfer), o un modelo administrado y operado por un tercero, independiente de los usuarios. Existe también la posibilidad de que el sistema esté impulsado y operado a través de una iniciativa pública, en el marco de una política de gestión integrada de los recursos hídricos. Los principales desafíos de la gobernanza radican en una clara definición de los objetivos de la interconexión, de las prioridades en la operación y en el suministro de agua, y en el financiamiento del sistema. El modelo de costos y la forma como se van a distribuir los costos de inversión y operación del sistema entre los diferentes operadores es sin duda otro importante desafío.

El marco legal y regulatorio se encuentra hoy en el centro del debate. Desde hace algunos años, se ha impulsado una serie de propuestas de cambios al Código de Agua que apuntan principalmente a modificar el carácter indefinido de los derechos de aprovechamiento de agua. En la práctica, hoy a través del sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) se han introducido de facto un condicionamiento de los derechos de aprovechamiento de agua cuyo ejercicio puede verse limitado a través de la activación de un Plan de Alerta Temprana (PAT) o por mecanismos que restringen el periodo de operación incluidos en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA). Han surgido por otra parte algunas iniciativas parlamentarias que buscan obligar a los proyectos mineros de mayor capacidad de producción a abastecerse a partir de agua de mar. Si bien estas iniciativas tienen poca posibilidad de prosperar, traducen una tendencia clara que apunta a forzar el reemplazo de los recursos continentales por agua de mar, desalinizada o no. Esta voluntad se basa en la convicción de muchos de que, si algunas empresas mineras han demostrado que es técnica y económicamente factible, todas deberían ser capaces de replicar este modelo. Sin embargo, esta opinión no toma en cuenta las grandes diferencias que existen entre los proyectos mineros, en particular en cuanto a su ubicación, vida útil y ley mineral, por nombrar algunos factores que determinan la viabilidad de usar agua de mar.

Cualquier proyecto de interconexión, al igual que las plantas de desalinización, por su naturaleza y características deberán ingresar al SEIA, con un tiempo de tramitación del orden de un año. La construcción de nuevas plantas de desalinización puede verse limitada por la zonificación del borde costero que establece limitaciones en las actividades que se pueden desarrollar en algunos sectores de la costa. La necesidad de contar con una concesión marítima puede a su vez frenar la instalación de nuevos proyectos de desalinización.

A través de un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) aplicado al concepto o proyecto de interconexión hídrica, se identificaron algunos factores internos y externos que habilitan o ponen en riesgo su viabilidad y su carácter oportuno. Entre las principales fortalezas se pueden destacar la existencia de una infraestructura ya desarrollada, el interés y la buena disposición de los actores y la experiencia exitosa del sistema interconectado eléctrico que ha contribuido a no solamente aumentar el suministro sino también a reducir los costos. La interconexión hídrica presenta también grandes oportunidades. Frente a los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos, ofrece una mayor resiliencia. Permite también incorporar nuevos usuarios, con un desarrollo optimizado de nuevas infraestructuras. Pero, sobre todo, facilita la implementación de una verdadera gestión integrada de los recursos hídricos. Las principales dificultades serían el desarrollo e implementación de un modelo adecuado de gobernanza, las limitaciones impuestas por el actual marco regulatorio y la institucionalidad vigente. En particular, la forma como hoy se establecen y se manejan los derechos de aprovechamiento de agua es difícilmente compatible con la gestión integrada de los recursos que supone entre otros aspectos, un uso intermitente de los recursos subterráneos que deberían poder utilizarse de manera intensiva, pero por periodos limitados para enfrentar fallas o situaciones puntuales de desabastecimiento. La diversidad en la calidad del agua y la consiguiente limitación del sistema de interconexión para entregar agua de una calidad constante es otra dificultad. Finalmente, por el lado de las amenazas, se debe reconocer la existencia de factores políticos y sociales, que apunten a definir una prioridad de uso de los recursos hídricos que tiende a limitar el acceso de la minería a los recursos, y de factores ambientales. Además, a partir de las nuevas facultades de ordenamiento territorial en manos de los futuros Gobernadores Regionales, pueden surgir restricciones al emplazamiento de infraestructuras de desalación y/o transporte de agua, necesarias para la interconexión. Por último, eventuales variaciones en el precio de los minerales y de la energía pueden poner en riesgo la viabilidad económica de la interconexión.

En conclusión, el estudio desarrollado muestra que la interconexión presenta interesantes perspectivas y oportunidades, pero también grandes desafíos. El agua asociada a la interconexión tendría un alto costo si está solamente orientada a cubrir eventuales fallas en las plantas de desalinización o en los sistemas de impulsión. Cobra mayor interés si puede utilizarse en un intercambio hídrico (SWAP). También en caso de un aumento de la demanda de agua y/o una disminución en la disponibilidad de recursos continentales, debido al mayor uso de la infraestructura, sin perder de vista que en estos últimos escenarios el costo total del abastecimiento de agua subiría, lo que puede hacer inviable las actividades económicas que sostienen la interconexión. La interconexión podría ser un instrumento esencial en la gestión integrada que permitiría un uso intermitente de los recursos hídricos continentales en función de su real disponibilidad y sin poner en riesgo el abastecimiento en agua de los diferentes usuarios, asemejándose a los modelos internacionales que ya existen en Israel o en Australia (Queensland).

Entre las principales recomendaciones, se puede mencionar la necesidad de consolidar la información sobre oferta y demanda. La interconexión sólo se justifica en caso de que existan excedentes permanentes de agua que puedan ser entregados en otros lugares donde existe una demanda constante. Una estimación más precisa de las demandas y ofertas de todos los usuarios es por lo tanto indispensable para poder diseñar y evaluar adecuadamente los proyectos de interconexión. Una mejor estimación y caracterización de eventuales fallas son también necesarias para ver en qué medida la interconexión constituye una respuesta adecuada. La calidad del agua de la interconexión es otro tema mencionado en el estudio que debe ser analizado con atención.

La gobernanza, administración y operación del sistema justifican por si solas un estudio más profundo para analizar diferentes alternativas y definir posibles reglas de operación y cálculos de los costos del sistema. Finalmente, se recomienda una difusión de los resultados del estudio para dar inicio a una discusión abierta entre los diferentes actores y partes interesadas en la interconexión hídrica y de manera más general en la gestión integrada de los recursos hídricos.

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

En un contexto de creciente demanda por el agua y de gran incertidumbre en cuanto a la futura disponibilidad de los recursos hídricos debido a los posibles efectos del cambio climático, a la sobreexplotación en algunas cuencas de Chile, a regulaciones ambientales cada vez más exigentes y a la fuerte presión social, el suministro y la gestión de los recursos hídricos se ha vuelto un tema prioritario, de gran importancia y sensibilidad en el país.

La principal solución adoptada por las industrias minera y sanitaria en el norte de Chile ha sido, estos últimos años, la incorporación del agua de mar a sus fuentes de suministro hídrico para asegurar un abastecimiento constante y reducir la presión sobre los recursos hídricos continentales cuyo acceso se encuentra cada vez más limitado. Estas soluciones de abastecimiento a partir de agua de mar son generalmente individuales y han dado como resultado un sistema fraccionado de infraestructuras de baja escala, las cuales recorren actualmente distancias de hasta 180 km y llegan a cotas por sobre los 3.000 metros sobre el nivel del mar.

La interconexión hídrica entre los sistemas de abastecimiento existentes y futuros y el uso compartido de infraestructuras aparecen como una alternativa que permitiría un mejor uso de las infraestructuras, un eventual ahorro en los costos de inversión y operación, una menor vulnerabilidad en el abastecimiento de agua y la potencial incorporación de nuevos usuarios en la red de abastecimiento así constituida a través de un sistema de interconexión.

Sin embargo, un sistema de interconexión presenta importantes desafíos. En primera instancia, es necesario verificar las hipótesis mencionadas en relación con estos potenciales beneficios operacionales, económicos y sociales que podría representar esta interconexión. Existen también importantes desafíos desde punto de vista de la gobernanza, la administración y la operación del sistema. Los cálculos y la distribución de los costos asociados a la construcción y operación del sistema son otro tema complejo que plantea el sistema. Finalmente, los aspectos relacionados con los permisos ambientales y otros representan también un gran desafío.

Con el objeto de poder identificar y analizar las oportunidades y desafíos que representa la interconexión hídrica, se acordó desarrollar un caso piloto en una zona de estudio claramente definida. La zona de estudio elegida en esta primera etapa se ubica en la Región de Antofagasta y se extiende desde Mejillones al norte hasta Coloso, al sur de Antofagasta, a nivel de la costa, y se extiende hasta la Cordillera de los Andes al este. Esta zona de estudio comprende diferentes plantas de desalinización, algunas ya en operación y otras en proyecto. Existe también numerosos proyectos mineros abastecidos en agua por recursos continentales, superficiales y subterráneos o por agua desalinizada. Algunos proyectos se abastecen también directamente con agua de mar sin desalinizar. Esta zona presenta características que resultan muy interesantes para desarrollar el estudio piloto.

El presente informe resume los resultados del estudio, partiendo con una breve presentación de los objetivos, alcance y metodología seguido de una revisión de antecedentes sobre algunos sistemas de interconexión hídrica existentes en Israel, Australia y del sistema de interconexión

eléctrica actualmente en uso en Chile. Luego, se presentan las características de la zona de estudio, incluyendo las infraestructuras existentes, las demandas de agua actuales y futuras y algunos datos de costos. Sigue la presentación del diseño del modelo conceptual, sus principales características y su implementación en la zona de estudio. A partir del modelo de interconexión ya implementado, se simularon diferentes escenarios, incluyendo disminución de la disponibilidad de agua continental, fallas en instalaciones de desalinización y de impulsión de agua, swap e incremento de la demanda de agua, analizando cómo el sistema de interconexión contribuye en asegurar un abastecimiento más seguro y evaluando los costos asociados a su operación. Finalmente, se abordan los aspectos relacionados con la gobernanza del sistema y con los aspectos legales y regulatorios antes de presentar las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

## 1.2 Objetivos del Estudio

### 1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de este estudio es identificar las oportunidades, las amenazas y los desafíos que representa un sistema de interconexión hídrica, principalmente para el sector minero y para todos los actores sociales y económicos.

Para ello, se desarrolla un modelo conceptual para representar la interconexión hídrica, considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y legales propios de la realidad local, regional y nacional de Chile.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que se consideran son:

- Identificar y analizar experiencias internacionales de interconexión hídrica.
- Revisar la información disponible sobre fuentes de suministro de agua y redes de transporte de agua existentes en Chile.
- Analizar las principales variables técnicas, económicas, ambientales y legales que se relacionan con el suministro de agua.
- Establecer un modelo de costos de infraestructura y de operación para extracción, tratamiento y transporte de recursos hídricos.
- Calibrar y aplicar el modelo en la Región de Antofagasta para evaluar la potencialidad y factibilidad técnica, económica y ambiental de la interconexión hídrica.

## 1.3 Alcances del Estudio

Este estudio constituye un análisis preliminar de las principales oportunidades y desafíos de un sistema de interconexión hídrica. El modelo desarrollado se basa esencialmente en resolver balances de masa, ajustando la oferta de agua a la demanda. Se busca resolver para cada punto de consumo el balance entre la demanda de agua y el suministro. Se trabaja en base a suministro promedio mensual expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo. El modelo considera

entonces eventuales variaciones estacionales de la demanda reflejada en una variación de los valores promedio mensuales en cada punto de consumo. El análisis de costos, basado en una estimación de los costos de inversión y de operación del sistema, no pretende calcular el costo instantáneo del agua suministrada en cada punto sino calcular el costo total de suministro del sistema, el cual permite a su vez establecer un costo promedio y determinar el beneficio total que podría aportar una solución de interconexión hídrica bajo diferentes escenarios. La forma como se distribuyen los costos entre los diferentes usuarios de la red y consumidores de agua queda fuera del alcance de esta primera etapa de análisis y depende en parte del modelo de gobernanza del sistema.

Otro tema importante identificado en el contexto del estudio es aquel que tiene relación con la calidad del agua. Las diferentes fuentes de abastecimiento pueden presentar diferentes calidades del agua. En el marco de este estudio, se considera que todas las fuentes presentan una calidad de agua suficiente para abastecer los diferentes centros de consumo.

Finalmente, el estudio no pretende resolver los aspectos legales y regulatorios. Estos aspectos son analizados y discutidos para identificar los principales desafíos que representan en la posible implementación de una solución de interconexión.

El modelo desarrollado en la Región de Antofagasta está enfocado principalmente al abastecimiento en agua de los proyectos mineros existentes en la zona, partiendo de los consumos actuales y analizando las demandas futuras en un horizonte de 20 años. Las demandas actuales y proyecciones de demandas se basan en información pública y estimaciones realizadas en base a los proyectos declarados por las empresas. En relación con las plantas desalinizadoras, a las redes de transporte y a los sistemas de impulso de agua, sólo se consideran aquellos existentes y aquellos ya comprometidos.

## 1.4 Metodología

La metodología del estudio considera las siguientes etapas:

- **Revisión de antecedentes**

La revisión bibliográfica está enfocada en la recopilación de información sobre sistemas de interconexión existentes en Chile y en otros países y que podrían permitir aclarar conceptos y entregar experiencias de interés para este estudio de sistema de interconexión hídrica. Se revisan sistemas de interconexión hídrica en el extranjero (Israel y Queensland, Australia) y el sistema eléctrico nacional. Por otro lado, se realiza una revisión de algunas características hídricas de Chile, con especial énfasis en las zonas norte y centro-norte donde la interconexión hídrica cobra mayor interés, con el fin de entregar mayores antecedentes que respaldan la elección de la zona de estudio en la cual se aplica el modelo operacional y de costos.

- **Definición de la zona de estudio y de sus principales características**

La elección y definición de la zona de estudio se realiza en función de la cantidad de información disponible, de la existencia de importantes infraestructuras ya construidas (plantas desalinizadoras y sistemas de impulsión de agua) y del interés de los actores locales, y considerando la opinión de la comisión técnica que llevó el seguimiento del avance del estudio, junto con analizar temas

técnicos y decisiones que se toman en el transcurso del presente trabajo. A partir de ello, se presentan las principales características de la zona escogida que tengan relación con los objetivos del estudio.

- **Diseño del modelo conceptual**

Se presentan las principales características y los supuestos adoptados en el diseño del modelo operacional de balance hídrico y modelo de costos, ambos necesarios para analizar los efectos producidos por las distintas alternativas de interconexión analizadas. Adicionalmente, se presentan las ecuaciones que caracterizan a los distintos elementos que componen el modelo operacional y la topología del modelo construido para cada alternativa que se analiza.

- **Construcción e implementación del modelo operacional de balance hídrico**

Se construye el modelo operacional de balance hídrico en WEAP, el cual está basado en las características que se presentaron en el diseño del modelo conceptual.

- **Análisis de los resultados de las simulaciones**

Se presentan y analizan los principales resultados obtenidos del modelo de simulación operacional junto con el modelo de costos. El análisis consiste en identificar y cuantificar los principales beneficios y costos que tiene cada alternativa analizada, en términos hídricos y económicos.

- **Análisis de modelos de gobernanza**

A partir de la revisión de los modelos de gobernanza y financiamiento de otros sistemas hídricos y de la situación particular del sistema en estudio, se analizan los principales requerimientos y desafíos que plantean los modelos de administración (distribución de los costos de inversión y operación del sistema entre los usuarios de la red) y de gobernanza aplicables en los sistemas de interconexión hídrica. A partir de ello se propone a nivel conceptual y preliminar algunas alternativas de cómo podría operar el sistema de interconexión hídrica.

- **Análisis del marco legal y regulatorio**

Se revisan las regulaciones y normativas actuales junto con proyectos y modificaciones legislativas actualmente en estudio o en discusión y se analiza su impacto en los potenciales proyectos de interconexión hídrica. Este análisis no pretende ser un análisis exhaustivo y especializado sino más bien una reflexión sobre los desafíos, amenazas y oportunidades que surgen del marco legal y regulatorio actualmente vigente y de las discusiones que han surgido últimamente en torno a la modificación del Código de Agua y a algunas propuestas legislativas.

- **Análisis FODA**

A través de un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) aplicado al concepto o proyecto de interconexión hídrica, se identifican algunos factores internos y externos que habilitan o ponen en riesgo su viabilidad y su carácter oportuno.

- **Conclusiones y recomendaciones**

A partir del desarrollo y los resultados del Estudio de Interconexión Hídrica, se presentan comentarios y conclusiones que abarcan todos los temas que se ejecutaron durante la realización del trabajo, donde existen antecedentes suficientes como para generar discusiones principalmente relacionadas con las oportunidades, amenazas y desafíos detectados.

Adicionalmente, se define una propuesta de trabajo que incluye las principales líneas de trabajo complementarias que se deberían desarrollar para abordar con mayor profundidad el análisis de la interconexión y para mejorar en cantidad y precisión la información disponible para guiar la toma de decisiones al respecto.

## 1.5 Acerca de las instituciones participantes del estudio

El Sustainable Minerals Institute (SMI) de la Universidad de Queensland es un instituto líder mundial en investigación comprometido con desarrollar soluciones basadas en el conocimiento para los desafíos de sustentabilidad de la industria de los minerales. El trabajo del instituto es interdisciplinario, independiente, imparcial y riguroso. Sus investigaciones integran la experiencia de sus especialistas en producción, ciencias medio ambientales y sociales para lograr un desarrollo responsable de los recursos. El SMI se compone de seis centros de investigación y un centro de excelencia internacional localizado en Chile. Tiene un fuerte historial en todas las áreas de la minería como: exploración, minería, procesamiento de minerales, salud y seguridad laboral, rehabilitación de minas, agua y energía, responsabilidad social y administración de recursos.

En Chile, el Sustainable Minerals Institute International Centre of Excellence Chile (SMI-ICE-Chile) es una asociación entre la Universidad de Queensland y el Gobierno de Chile a través de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y tiene como objetivo producir un beneficio demostrable a la gente y a la economía de Chile a través de sus actividades. El centro está desarrollando un nuevo grupo de conocimiento colaborativo de la minería global del país para generar capital humano, producir resultados innovadores en sus investigaciones y realizar una transferencia de tecnología efectiva a la industria.

El presente estudio nace de una colaboración entre el Consejo Minero y el SMI-ICE-Chile con el fin de dar un primer paso en el estudio y evaluación de sistemas hídricos interconectados, definidos en este estudio como la articulación de dos o más sistemas hídricos mediante la infraestructura de transporte adecuada para este propósito. La necesidad de estudiar este tipo de proyectos radica en la búsqueda de alternativas que permitan un mejor uso de las infraestructuras, un eventual ahorro en los costos de inversión y operación, una menor vulnerabilidad en el abastecimiento de agua y la potencial incorporación de nuevos usuarios a una red de suministro, en el contexto actual de escasez de recursos hídricos de la gran mayoría de los sistemas hídricos del norte, de los cuales, se sustentan distintas actividades económicas y sociales.

## 2 Revisión de Antecedentes

### 2.1 Recopilación y análisis de ejemplos internacionales de sistemas de interconexión o suministro hídrico

La revisión de antecedentes de casos internacionales de interconexión hídrica se realiza para conocer el contexto y las necesidades que llevaron a que estos sistemas hídricos se construyeran, junto con investigar cual es la manera en que son administrados. Por lo tanto, los principales temas que se analizan en este subcapítulo tienen relación con:

- Fuentes de suministro y disponibilidad hídrica
- Usuarios del agua
- Geografía y clima
- Infraestructura hídrica
- Manejo de los recursos hídricos.

#### 2.1.1 Israel

##### 2.1.1.1 Geografía y Clima

Israel posee una superficie de  $20.770 \text{ km}^2$ , de los cuales  $20.330 \text{ km}^2$  son de tierra y  $440 \text{ km}^2$  son de agua [1]. Su punto más alto se encuentra en el Monte Meron, a una altitud de  $1.208 \text{ m s.n.m.}$

En el norte, los cerros y las montañas en la zona alta y baja Galilea reciben una gran lluvia, con valores de aproximadamente  $800 \text{ mm}$  de promedio anual [2], lo que convierte a este sector en una zona rica en términos agrícolas. Hacia el este, está el valle del Jordán, que está influenciado principalmente por el río Jordán, el cual fluye desde el Mar de Galilea hacia el Mar Muerto (Norte a Sur), con una precipitación media anual de unos  $350 \text{ mm}$  [2]. Por el oeste están las llanuras costeras del Mediterráneo, que se extienden entre  $5 \text{ km}$  hasta los  $40 \text{ km}$  hacia el interior, más de la mitad del país vive en esta zona, principalmente en las cercanías de Tel Aviv y Haifa, zona que tiene una precipitación media anual de unos  $550 \text{ mm}$  [7]. Finalmente, en el sur, está el desierto del Neguev, lugar más árido del país cubriendo cerca de la mitad de la superficie del país y que tiene una precipitación media anual menor a  $100 \text{ mm}$  [7].

##### 2.1.1.2 Fuentes de suministro y disponibilidad hídrica

Israel es un país que posee tres fuentes de abastecimiento hídrico para satisfacer las distintas necesidades hídricas: aguas superficiales, aguas subterráneas y fuentes alternativas. Las fuentes alternativas son la reutilización de aguas residuales, mientras que la desalinización de aguas incluye aguas salobres y de mar.

El agua reciclada comenzó a utilizarse en la década de 1960, pero su uso comenzó a realizarse a mayor escala desde la década de 1980 [1]. Por otro lado, la primera planta de desalación se instaló en 1965, la cual trataba agua salobre, aumentando su producción a una escala mayor en la década de 1990. Además, la primera planta desalinizadora de agua de mar es la del proyecto Ashkelon en

el año 2005, teniendo una capacidad de  $119 \text{ Mm}^3/\text{año}$  (Millones de metros cúbicos al año), es decir, unos  $3,77 \text{ m}^3/\text{s}$  en promedio.

En la Figura 2.1 se puede observar la evolución que ha tenido la distribución de las fuentes de agua utilizadas en el país.

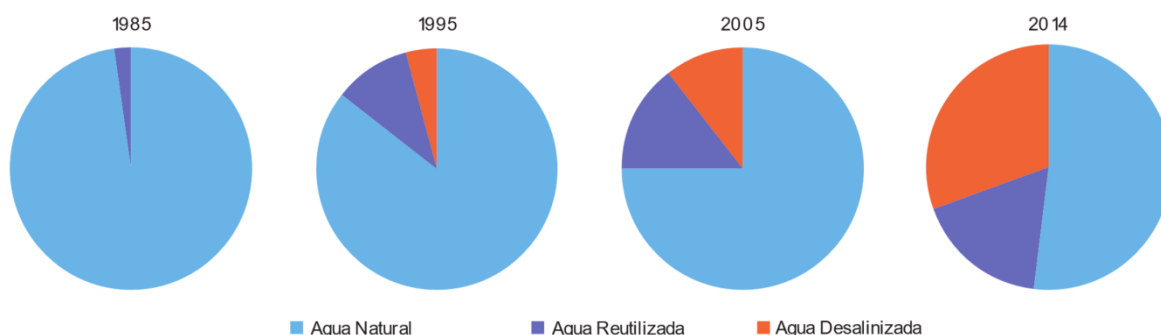


Figura 2.1. Evolución de la distribución de fuentes de suministro hídrico en Israel [1].

Se estima que al año 2014, la capacidad de producción de agua de mar desalinizada fue de unos  $600 \text{ Mm}^3$  [2]. En el caso del agua reutilizada, en el año 2014, de un total de  $507 \text{ Mm}^3$ , se trataron  $468 \text{ Mm}^3$  de los cuales  $400 \text{ Mm}^3$  se utilizaron para riego [3]. En el caso de las fuentes de agua natural, se estima que su aporte medio ha sido de  $1.170 \text{ Mm}^3/\text{año}$  [4]

#### 2.1.1.3 Usuarios del agua

Los usuarios del agua en Israel pueden clasificarse en tres grupos: Riego, Sanitario o Doméstico e Industrial. Además, se incluye el suplemento que realiza Israel a Jordania y Palestina como parte de acuerdos bilaterales de suplemento hídrico.

En la Tabla 2.1, se presentan los valores totales del consumo de cada grupo en el año 2013 [5].

Tabla 2.1. Uso del agua en Israel [ $\text{Mm}^3$ ] y su distribución porcentual en el año 2013 [7].

| Riego  | Doméstico | Industrial | Suplemento a Palestina | Suplemento a Jordania | Total  |
|--------|-----------|------------|------------------------|-----------------------|--------|
| 1204,6 | 733,2     | 138,3      | 57,8                   | 53,2                  | 2187,1 |
| 55,1%  | 33,5%     | 6,3%       | 2,6%                   | 2,4%                  | 100,0% |

#### 2.1.1.4 Infraestructura Hídrica

La infraestructura del agua en Israel es administrada y desarrollada por la empresa estatal Mekorot. La compañía se convirtió en el proveedor nacional de agua de Israel en la década de 1950 y pronto comenzaron los planes para el National Water Carrier (NWC).

El National Water Carrier es un sistema de tuberías, canales y embalses que entrega agua a la mayor parte de Israel. El sistema es propiedad y está gestionado por Mekorot. El NWC se

estableció en 1964 y es el proyecto de infraestructura más grande de Israel en los últimos 50 años. Los planes de construcción fueron aprobados por el gobierno en 1956, la construcción comenzó en 1959 y el sistema se completó en 1964.

El sistema transporta agua desde el lago Kinneret y otras fuentes de agua del norte hacia la parte sur del país, y tiene aproximadamente 130 km de largo. El NWC también incluye dos estaciones de bombeo, una en el lago Kinneret y la otra en el embalse de Zalmon.

#### *2.1.1.5 Manejo de los recursos hídricos*

El agua es un bien público en Israel y toda el agua pertenece al Estado. Esto incluye las aguas residuales, el alcantarillado y la escorrentía que podrían usarse comercialmente, así como el agua en la propiedad privada.

Sin embargo, el gobierno trabaja con el sector privado para financiar proyectos de desalinización mediante el nombramiento de empresas privadas para construir y operar las plantas de desalinización según los esquemas Build-Operate-Transfer (BOT).

La construcción y operación de las plantas bajo contratos de Alianza Público-Privada son financiadas por la empresa privada propietaria de la planta. El gobierno compra el agua de la planta y realiza pagos cada dos meses que incluyen pagos fijos y variables en función del rendimiento de la planta. El precio fijo es un pago incondicional a la empresa de desalinización basado en la producción de la planta que se acordó en el contrato. Esto asegura un retorno de la inversión de capital independientemente del agua consumida. El precio variable es el pago por cada metro cúbico de agua desalinizada entregada al Estado. Esto permite pagar los costos variables de producción.

Water Authority es la rama ejecutiva del gobierno a cargo de la economía del agua de Israel. Es responsable de la administración, operación y desarrollo, incluida la conservación y restauración, de los recursos hídricos, el desarrollo de nuevos recursos hídricos y la supervisión de los consumidores y productores de agua. La Water Authority trabaja junto con el foro del Consejo de la Autoridad del Agua para regular los recursos hídricos y para determinar los requisitos de agua a largo y corto plazo para el Estado de Israel.

### **2.1.2 Australia – Queensland**

#### *2.1.2.1 Seqwater*

Seqwater es la autoridad legal del gobierno de Queensland responsable de proporcionar un suministro de agua potable seguro para 3,1 millones de personas en el sureste de Queensland [8]. Su función también es:

- Proporcionar servicios esenciales de mitigación de inundaciones
- Gestionar la salud de la cuenca y ofrecer instalaciones recreativas comunitarias
- Proporcionar agua para el riego a unos 1.200 agricultores en siete subsistemas de suministro de agua.

Seqwater es una de las empresas de agua más grandes de Australia con una base muy diversa y geográficamente distribuida. Sus operaciones se extienden desde la frontera de Nueva Gales del Sur a la base de la Cordillera de Toowoomba hasta el área de Gympie al norte.

Gestiona más de A\$ 11 mil millones en activos de suministro de agua, incluida la SEQ Water Grid (red de agua SEQ), y las cuencas naturales de las principales fuentes de suministro de agua de la región. Esto incluye represas, presas, plantas de tratamiento de agua convencionales y fuentes de agua resilientes al clima a través de la Planta de Desalinización de la Gold Coast y el Esquema de Agua Reciclada del Corredor Occidental. Una red de tuberías de flujo inverso de 600 kilómetros permite el transporte de agua potable a través de la región, desde la Sunshine Coast hasta el área de Greater Brisbane, a Redlands y al sur hasta la Gold Coast. Seqwater se formó el 1 de enero de 2013 mediante la fusión de tres empresas estatales de agua, el SEQ Water Grid Manager, LinkWater y la antigua Seqwater. Asumió también algunas responsabilidades de la antigua Comisión del Agua de Queensland, como la planificación a largo plazo de las futuras necesidades hídricas de la región.

Para responder a estos desafíos y para poder enfrentar situaciones de sequías extremas, como aquella ya vivida en Queensland hace algunos años atrás, se construyó una red integrada e interconectada de agua cuyo principal objetivo es reducir la vulnerabilidad del sistema de distribución de agua bajo distintos escenarios de restricciones locales (mantenimiento e indisponibilidad de plantas de tratamiento) o regionales.

#### *2.1.2.2 Red de interconexión hídrica*

La red de agua SEQ permite mover el agua potable tratada en toda la región. Esto es especialmente importante cuando la lluvia irregular deja algunas áreas con presas completas y otras partes de la región con déficit de agua. La red interconectada de suministro de agua es particularmente importante en tiempos de sequía, o cuando los problemas de calidad del agua o trabajos de mantenimiento afectan parte de la red. Permite cambiar las fuentes locales de suministros de agua, maximizando la producción y los suministros de agua en un área para complementar los suministros en otro. La red de agua permite en cada momento cambiar de fuente de suministro de agua y mover el agua por toda la región. La red de agua puede complementar, pero no reemplazar por completo los suministros de agua locales. Con más de 600km de tuberías de agua, la red transporta el agua desde las plantas de tratamiento a las redes de distribución que pertenecen y son operadas por los minoristas y los consejos locales de agua.

La red incluye:

- 94 km del acueducto Regional del Sur que conecta las áreas del Consejo de Brisbane, Gold Coast, Logan, Ipswich y el Borde Escénico
- Una interconexión de acueducto oriental de 8,4 km que une las ciudades de Redland y Logan
- Una interconexión de la tubería del norte de 95 km que une Brisbane y la Sunshine Coast
- Un acueducto de integración de redes de 35 km que conecta la planta desalinizadora de Gold Coast con la red de Molendinar.
- Otros 350 km de tuberías de agua en toda la región.

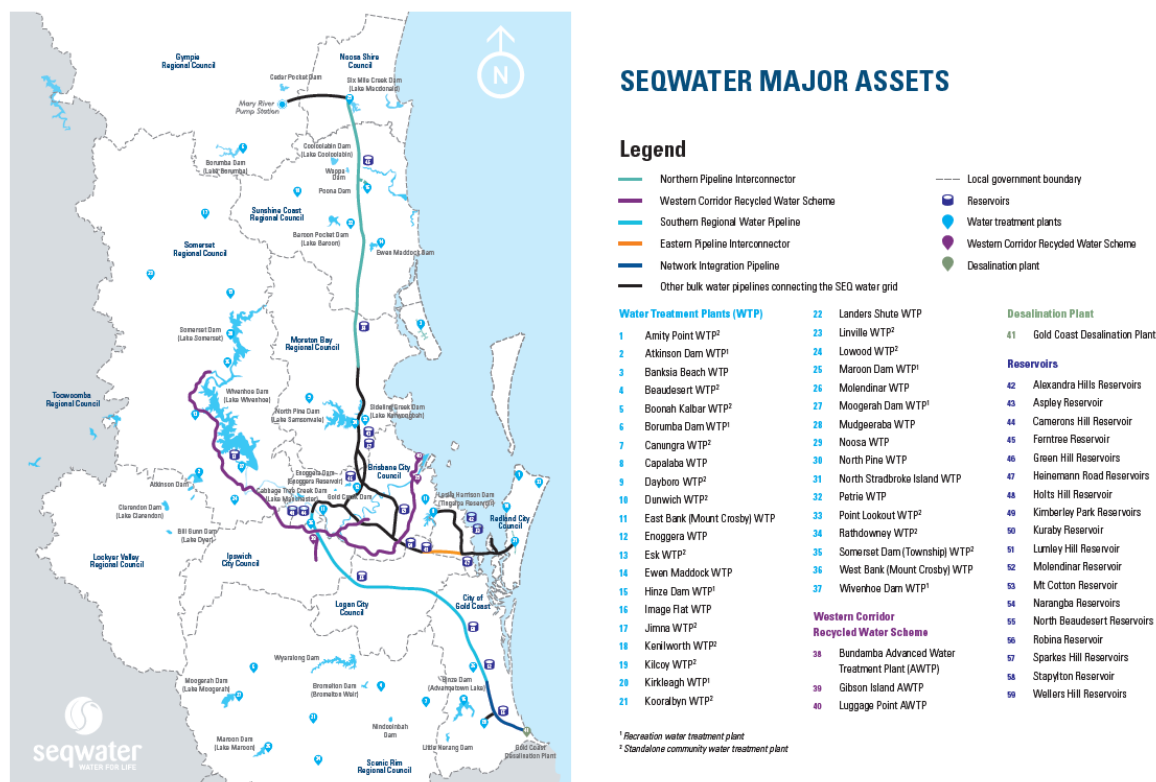


Figura 2.2. Sistema de distribución de agua Seqwater en Queensland, Australia [3].

El agua de cada una de las fuentes y reservorios en la región tiene su propio sabor y olor únicos como resultado de las características de la captación y de los procesos locales de tratamiento del agua. Sin embargo, estas diferencias no afectan la calidad del agua. El sistema cuenta con procesos y controles rigurosos para garantizar el agua potable de alta calidad, que cumple con las Pautas australianas para el agua potable 2011.

### 2.1.2.3 Planta de desalinización

La planta de desalinización de la Gold Coast, ubicada en Tugun, usa ósmosis inversa para producir agua potable para la Gold Coast, Logan y Brisbane. Como fuente de agua resiliente al clima, la planta suministra agua potable a la red de agua y aumenta el suministro en tiempos de inundación o sequía, o cuando las plantas de tratamiento de agua convencionales están fuera de línea. La planta puede suministrar alrededor de 133 megalitros (ML) de agua por día. La planta funciona en modo de 'espera activa'. Suministró agua desalinizada en los años finales de la sequía del Milenio en 2009 y 2010, durante las inundaciones en 2011 y 2013 y durante el evento TC Debbie en 2017. La planta también suministró agua a parte de la Gold Coast durante la actualización de la planta de tratamiento de agua de Mudgeeraba en 2015, durante otros trabajos en 2017 y cuando la planta de tratamiento de agua Molendinar sufrió mantenimiento en 2016.

### 2.1.2.4 Sistema de tratamiento de aguas servidas

El Sistema de Agua Reciclada del Corredor Occidental es una fuente de agua resiliente al clima que ayuda a brindar seguridad hídrica en tiempos de necesidad. El esquema consiste en tres plantas de tratamiento avanzado de agua, ubicadas en Bundamba, Luggage Point y Gibson Island, que pueden purificar aguas residuales tratadas para superar las normas de agua potable, pasándolas a través de múltiples barreras de tratamiento, incluyendo microfiltración, ósmosis inversa y oxidación avanzada por radiación UV.

Actualmente, este sistema no produce agua. En junio de 2013, Seqwater y el Gobierno de Queensland decidieron colocar el Esquema de Agua Reciclada del Corredor Occidental en modo de cuidado y mantenimiento. La decisión beneficia a todos los clientes de agua en SEQ al ayudar a limitar el aumento anual de los cargos de agua como un ahorro directo para los hogares. Sin embargo, el esquema puede reiniciarse cuando sea necesario como una medida de respuesta a la sequía, ayudando con la seguridad del agua a largo plazo para la región.

## 2.2 Revisión y análisis del sistema de interconexión eléctrica

La revisión de antecedentes relacionada con el sistema eléctrico nacional se basa en presentar las principales características de los distintos servicios del mercado, estos son la producción, el transporte y la distribución. En la Tabla 2.2 se presentan sus principales características generales de los participantes del mercado eléctrico.

*Tabla 2.2. Características de los mercados en el sistema eléctrico.*

| Producción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Transporte                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Distribución                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mercado Competitivo con múltiples tecnologías de fuentes renovables y no renovables.</li> <li>• No es servicio público.</li> <li>• Modelos sofisticados para optimizar la expansión y operación.</li> <li>• Dos Funciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Técnica: Generación confiable en cantidad y oportunidad.</li> <li>- Comercial: Suministro al cliente mayor final.</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redes Fijas habitualmente con características de monopolio natural.</li> <li>• Desarrollo sujeto a la ubicación relativa de la demanda y oferta.</li> <li>• Costos de inversión importantes ligados al nivel de tensión.</li> <li>• Sistemas Nacional (ex Troncal) y Zonal (ex subtransmisión) son servicios públicos desde 2004.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redes fijas habitualmente con características de monopolio natural.</li> <li>• Servicio Público.</li> <li>• Menores periodos de maduración.</li> <li>• Costos de inversión adaptados al crecimiento de la demanda.</li> </ul> |

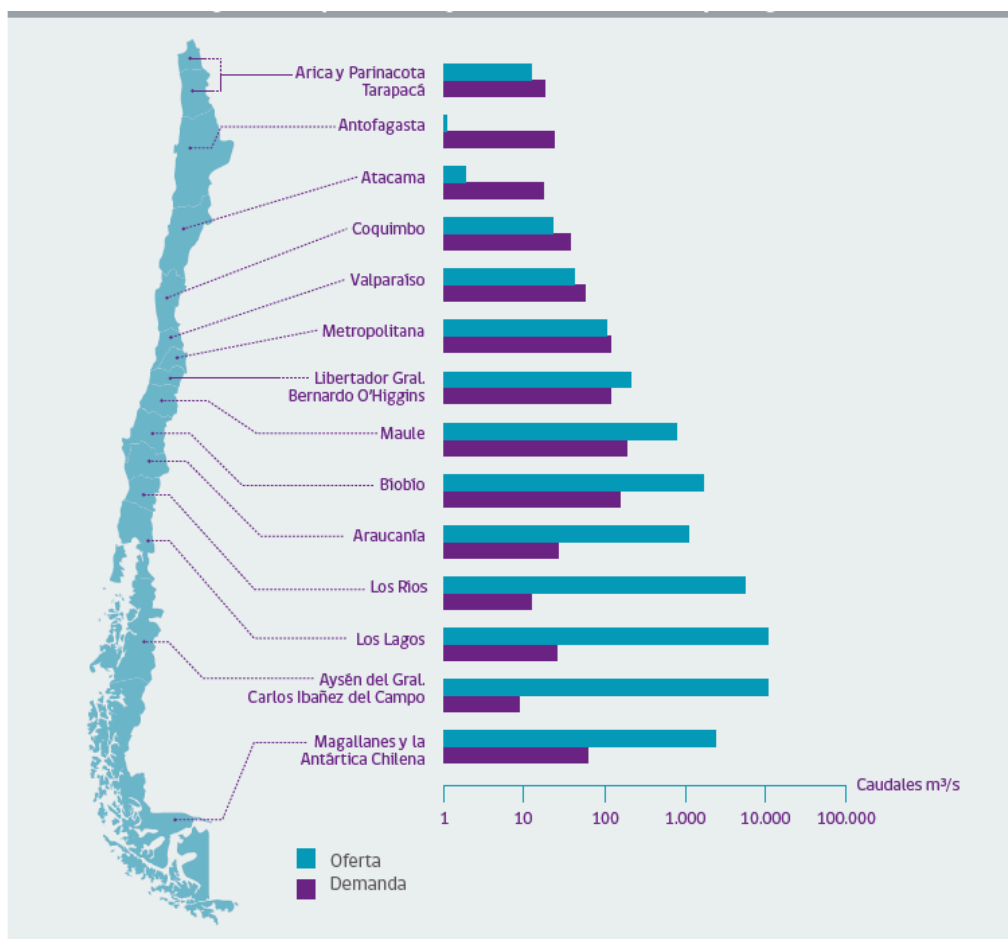
Para efectos del análisis de la interconexión hídrica, las etapas del sistema eléctrico que interesan son producción y transporte. A modo de referencia, a partir de información provista por el Consejo Minero, se puede estimar que para un cliente eléctrico del tamaño de una faena de la gran minería, la proporción entre los costos de producción y transporte es aproximadamente 93% y 7% respectivamente. Además, también a modo referencial, un sistema de transporte de electricidad de 100 km para abastecer una faena de la gran minería tiene un costo de inversión de US\$ 50

millones y en esos 100 km el costo de “operación”, correspondiente a las pérdidas de transmisión de energía, es de US\$ 120 mil por año.

## 2.3 Disponibilidad y uso de recursos hídricos en la zona norte de Chile

Estos últimos años, se han desarrollado numerosos estudios y análisis sobre disponibilidad y usos de recursos hídricos en Chile, con especial atención en la zona Centro-Norte. En enero de 2015, se publicó la “Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015” [4], preparada por la Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos del Ministerio del Interior y Seguridad Pública. En ella, se plantea *“la necesidad de un nuevo paradigma “eco- civilizador”, que articule la finitud de los recursos naturales y las dificultades para recuperarlos cuando se sobre explotan, con un desarrollo sostenible que permita cautelar los recursos disponibles para las actuales y futuras generaciones”*.

El informe parte por un análisis del estado de los recursos hídricos en Chile y de la disponibilidad de agua. La siguiente figura ilustra el diagnóstico en cuanto al desfase entre disponibilidad y demanda en la zona centro-norte.



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2011. Informe del estado del medioambiente.

Figura 2.3. Oferta y demanda de agua por región, 2011 [9].

El mismo informe presenta un cuadro donde se establecen proyecciones de la demanda de agua por región. En este, se aprecia que en todas las regiones centro-norte del país, la situación tiende a agudizarse fuertemente en el horizonte de 15 años.

| Cuadro 10. Balance hídrico regional actual y futuro (m <sup>3</sup> /s) |                |               |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Región                                                                  | Demanda Actual | Oferta Actual | Balance Actual | Demanda 15 años | Oferta 15 Años | Balance 15 Años |
| XV-I                                                                    | 16,7           | 11,9          | -7,4           | 26,3            | 11,9           | -17,0           |
| II                                                                      | 23,0           | 0,9           | -22            | 34,8            | 0,9            | -33,8           |
| III                                                                     | 16,7           | 1,9           | -14,8          | 22,4            | 1,9            | -20,5           |
| IV                                                                      | 35,0           | 22,2          | -12,8          | 41,8            | 21,1           | -20,7           |
| V                                                                       | 55,5           | 40,7          | -27,4          | 64,2            | 36,6           | -38,7           |
| RM                                                                      | 116,3          | 103,0         | -35,6          | 124,9           | 92,7           | -51,4           |
| VI                                                                      | 113,5          | 205,0         | 38,7           | 119,1           | 184,5          | 18,7            |
| VII                                                                     | 177,1          | 767,0         | 442,5          | 184,5           | 690,3          | 383,6           |
| VIII                                                                    | 148,0          | 1.638,0       | 1.249,1        | 246,0           | 1.474,2        | 1.033,3         |
| IX                                                                      | 25,5           | 1.041,0       | 767,3          | 38,3            | 936,9          | 675,4           |
| XIV-X                                                                   | 12,0           | 5.155,0       | 3.905,8        | 17,9            | 4.639,5        | 3.508,1         |
| XI                                                                      | 24,9           | 10.134,0      | 8.284,9        | 27              | 10.134,0       | 8.282,9         |
| XII                                                                     | 8,4            | 10.124,0      | 8.394,6        | 15,7            | 10.124,0       | 8.387,2         |
| Total País                                                              | 772,6          | 29.244,6      | 22.962,7       | 962,8           | 28.348,5       | 22.107,1        |

Fuente: DGA, 2011. Modernización del mercado de aguas en Chile.

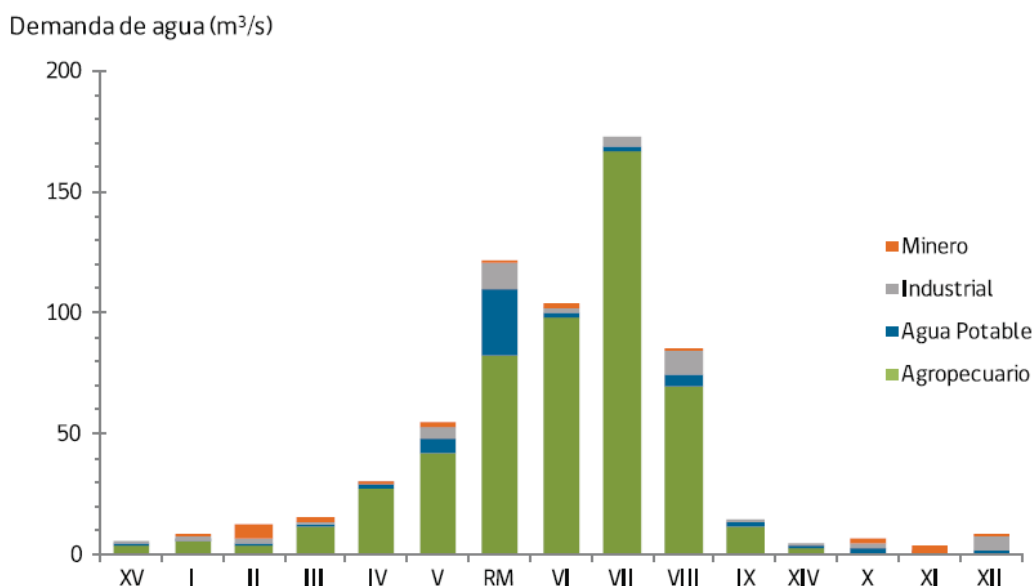
Como consecuencia de lo anterior, el informe propone implementar una política de recursos hídricos articulada en torno a 2 ejes:

- Diseñar, elaborar e implementar distintos programas y acciones que permitan mitigar los efectos de la sequía que afecta recurrentemente gran parte del territorio nacional y preparar al país para enfrentar de mejor manera los eventos futuros.
- Proponer alternativas de reordenamiento institucional y modificaciones al ordenamiento jurídico que permita gestionar de mejor forma los instrumentos y recursos, con la finalidad de lograr una mejor gestión en los recursos hídricos a tono con la magnitud e importancia de los desafíos actuales y futuros.

Entre las líneas de acción propuestas, se plantea como prioridad la gestión integrada de los recursos hídricos y el rol del estado como agente responsable y participativo. Se menciona también la necesidad de reconocer a la cuenca como unidad de ordenamiento territorial. Para enfrentar el déficit hídrico, se propone reorientar los instrumentos públicos, recursos para enfrentar los desequilibrios hídricos, aumento de la oferta y disponibilidad de los recursos hídricos, impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar disponibilidad y ahorro de los recursos hídricos.

En 2016, la Dirección General de Agua (DGA) que depende del Ministerio de Obras Públicas (MOP) publicó el Atlas del Agua [10] que se plantea como un instrumento para “*una gestión más eficiente y equitativa del agua*”. El capítulo 1 explora las diferentes macrozonas de Chile e identifica y caracteriza las principales cuencas hidrográficas. El capítulo 2 describe las diferentes redes de monitoreo existentes a lo largo del país con relación a precipitaciones y datos meteorológicos, ríos y lagos, embalses, niveles de agua subterránea, glaciares y calidad de agua, con una presentación resumida de los principales datos. El capítulo 3 hace referencia a la escasez hídrica y a las medidas adoptadas por la DGA para enfrentar las situaciones de escasez y de protección de los recursos. En su capítulo 4, el informe aborda la gestión de los recursos hídricos y analiza los derechos existentes, la oferta y la demanda de recursos hídricos por región y cuenca.

En este contexto, se presenta una distribución por sector de los usos consuntivos de agua, región por región:



Fuente: Elaboración propia en base a información de Cochilco 2015, SISS 2014, Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras (DGA 2007), noviembre 2015

Figura 2.4. Usos de agua por región y por sector [10]

En su capítulo final, el Atlas del Agua 2016 plantea los principales desafíos futuros de la gestión de los recursos hídricos. Estos son:

- Crear herramientas adecuadas para la heterogeneidad hídrica de Chile y enfrentar los impactos del cambio climático.
- Contar con un marco legal e institucional que considere tanto la diversidad y la escasez hídrica como fenómenos reales.
- Una nueva institucionalidad del agua que permita establecer coordinaciones interinstitucionales para avanzar hacia una gestión integrada del recurso hídrico
- Disponer de una Política Nacional del Agua vinculante.
- Considerar un Plan Nacional de Recursos Hídricos
- Generar una adecuada gobernanza para la gestión del agua por cuencas

- Lograr la implementación de una Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) en todas las cuencas del país
- Mejorar el conocimiento de los sistemas hídricos del país
- Establecer una cultura del agua en la población desde una aproximación ética.

Otro informe de interés en la materia es el Resumen Estratégico Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile publicado en 2018 [6]. Este informe presenta el levantamiento de indicadores en el territorio, que dan cuenta de la situación actual y tendencia en el tiempo del recurso hídrico en Chile. No es un diagnóstico de la situación actual del recurso hídrico en Chile y no pretende ser un balance hídrico nacional. En este análisis, se hace una distinción entre huella hídrica azul, que se refiere al volumen de agua fresca que se extrae de fuentes superficiales y/o subterráneas y que no retorna al ambiente de donde se extrajo y huella hídrica verde, que se refiere al volumen de agua lluvia que queda temporalmente almacenada en la parte superficial del suelo o en la vegetación. Los riesgos hídricos identificados en este informe son el déficit hídrico, el exceso de agua y la calidad del agua. El informe presenta un resumen de las demandas y consumos de agua por cada región.

#### DEMANDA DE AGUA DISTRIBUIDA POR REGIONES

| Región                                  | Derechos de Agua (DDA)(consuntivos permanentes registrados en CPA) |                                              |                               | Captación <sup>4</sup><br>[m <sup>3</sup> /s] | Devolución <sup>5</sup><br>[m <sup>3</sup> /s] | Consumo                                     |                                              |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                         | DDA [m <sup>3</sup> /s] <sup>1</sup>                               | Coficiente <sup>2</sup><br>DAA/<br>captación | Acciones <sup>3</sup><br>[Nº] |                                               |                                                | HH Azul <sup>6</sup><br>[m <sup>3</sup> /s] | HH Verde <sup>7</sup><br>[m <sup>3</sup> /s] |
| Arica y Parinacota                      | 16,73                                                              | 3,90                                         | 35.541                        | 4,29                                          | 1,92                                           | 2,37                                        | 0,06                                         |
| Tarapacá                                | 14,38                                                              | 4,70                                         | 7.926                         | 3,06                                          | 1,14                                           | 1,92                                        | 0,05                                         |
| Antofagasta                             | 26,25                                                              | 3,51                                         | -                             | 7,47                                          | 1,75                                           | 5,72                                        | 0,01                                         |
| Atacama                                 | 35,00                                                              | 4,09                                         | 5.894                         | 8,55                                          | 3,33                                           | 5,23                                        | 0,09                                         |
| Coquimbo                                | 209,52                                                             | 5,71                                         | 21.893                        | 36,68                                         | 14,72                                          | 21,96                                       | 0,95                                         |
| Valparaíso                              | 476,82                                                             | 10,57                                        | 6.480                         | 45,28                                         | 19,34                                          | 25,94                                       | 5,16                                         |
| Metropolitana                           | 528,58                                                             | 5,43                                         | 2.612                         | 102,63                                        | 66,52                                          | 36,11                                       | 4,34                                         |
| Libertador General Bernardo O'Higgins   | 319,71                                                             | 3,21                                         | 54.111                        | 168,54                                        | 122,15                                         | 46,39                                       | 15,76                                        |
| Maule                                   | 318,39                                                             | 2,48                                         | 44.630                        | 549,10                                        | 499,03                                         | 50,07                                       | 99,37                                        |
| Biobío                                  | 330,39                                                             | 8,74                                         | 25.286                        | 579,87                                        | 567,52                                         | 12,35                                       | 143,09                                       |
| Araucanía                               | 457,88                                                             | 39,69                                        | 5.192                         | 265,31                                        | 261,81                                         | 3,50                                        | 103,82                                       |
| Los Ríos                                | 112,77                                                             | 48,62                                        | -                             | 2,32                                          | 1,97                                           | 0,35                                        | 41,74                                        |
| Los Lagos                               | 229,95                                                             | 93,62                                        | -                             | 51,17                                         | 50,03                                          | 1,14                                        | 22,00                                        |
| Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo | 167,27                                                             | 251,57                                       | 349                           | 0,66                                          | 0,51                                           | 0,15                                        | 0,63                                         |
| Magallanes y la Antártica Chilena       | 91,79                                                              | 117,87                                       | -                             | 0,78                                          | 0,24                                           | 0,53                                        | 0,26                                         |
| Total País                              | 3.335,44                                                           | 6,86                                         | 209.914                       | 1.825,71                                      | 1.611,98                                       | 213,73                                      | 437,34                                       |

Figura 2.5. Demanda hídrica por regiones [10].

Los diferentes estudios disponibles apuntan a una creciente brecha entre la demanda de agua y la oferta en toda la zona norte y centro del país. Se requiere por un lado un mejor entendimiento y conocimiento de los recursos disponibles y de la probable evolución en el tiempo. Por otro lado,

surge la necesidad creciente de una gestión más integrada de estos recursos para permitir satisfacer las demandas actuales sin comprometer el futuro.

### 3 Zona de estudio

#### 3.1 Definición de la zona estudio

Luego de analizar la información general sobre los recursos hídricos en términos de fuentes de abastecimiento y demandas de cada zona posible de realizar el estudio de interconexión, se decidió en conjunto con el comité técnico del Consejo Minero enfocar el estudio en la región de Antofagasta. En esta zona actualmente existe solo un sistema de impulsión de aguas desaladas y dos con diseños concluidos, próximos a ser construidos.

#### 3.2 Características de la zona de estudio

##### 3.2.1 Información sobre plantas desaladoras

En la zona de estudio existe un total de 10 plantas desaladoras [12], las cuales se presentan en la Tabla 3.1 junto a sus capacidades de desalación.

*Tabla 3.1. Plantas desalinizadoras de la región de Antofagasta.*

| Nombre                                        | Caudal desalado [ $m^3/s$ ] |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|
| Minera Sierra Gorda - Desaladora              | 0,0631                      |
| Desalinizadora Puerto Coloso Minera Escondida | 3                           |
| Desalinizadora Distrito Minero Centinela      | 0,173                       |
| Desalinizadora Minera Antucoya                | 0,048                       |
| Minera Mantos de la Luna - Desaladora         | 0,009                       |
| Desalinizadora La Chimba                      | 0,850                       |
| Desalinizadora Taltal                         | 0,010                       |
| Desalinizadora Michilla                       | 0,075                       |
| Desalinizadora Angamos                        | 0,060                       |
| Planta Desalinizadora MOLY-COP                | 0,00434                     |
| <b>Total</b>                                  | <b>4,29</b>                 |

Además, existen ocho proyectos de plantas desaladoras, en la Tabla 3.2 se presentan los nombres y las capacidades de las plantas proyectadas.

Tabla 3.2. Proyectos de plantas desalinizadoras en la Región de Antofagasta.

| Nombre                                                   | Caudal Desalado [ $m^3/s$ ] |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Desalinizadora Minera Spence S.A.                        | 1                           |
| Desalinizadora Proyecto Sulfuros Radomiro Tomic          | 1,956                       |
| Minera Centinela - Área mina planta                      | 0,140                       |
| Minera Centinela - Área Muelle Esperanza                 | 0,038                       |
| Desalinizadora Tocopilla                                 | 0,100                       |
| Desalinizadora Antofagasta (ex Sur Antofagasta)          | 0,600                       |
| Ampliación Desalinizadora Central Termoeléctrica Angamos | 0,214                       |
| Ampliación Planta Mejillones                             | 0,00922                     |
| <b>Total</b>                                             | <b>4,05</b>                 |

En el estudio de interconexión se proponen incorporar como fuentes de abastecimiento del sistema, las plantas desalinizadoras de Puerto Coloso – Escondida y La Chimba, junto a las proyectadas de Spence y Radomiro Tomic. En la Figura 3.1 se presentan las ubicaciones geográficas de estas plantas.



Figura 3.1. Plantas desalinizadoras en la región de Antofagasta.

### 3.2.2 Demandas actuales y proyección de las demandas de agua

#### 3.2.2.1 Faenas Mineras

Las demandas de las faenas mineras se consideran iguales a los consumos hídricos del año 2017 [13] para las faenas que no tienen proyectos de expansión considerados. A continuación, se presentan los consumos totales de las faenas mineras en el año 2017.

*Tabla 3.3. Consumos hídricos en m<sup>3</sup>/s de las faenas mineras de la Región de Antofagasta.*

| Faena/Año        | 2016         | 2017         |
|------------------|--------------|--------------|
| Antucoya         | 0,188        | 0,210        |
| El Abra          | 0,220        | 0,228        |
| Radomiro Tomic   | 0,271        | 0,290        |
| Chuquicamata     | 1,351        | 1,535        |
| Ministro Hales   | 0,422        | 0,444        |
| Spence           | 0,204        | 0,219        |
| Sierra Gorda     | 0,748        | 0,748        |
| Centinela        | 0,972        | 0,982        |
| Gabriela Mistral | 0,208        | 0,236        |
| Loma Bayas       | 0,194        | -            |
| Zaldívar         | 0,212        | 0,212        |
| Minera Escondida | 2,257        | 2,351        |
| Alto Norte       | 0,020        | 0,114        |
| Franke           | 0,045        | -            |
| <b>Total</b>     | <b>7,312</b> | <b>7,568</b> |

En el caso de las faenas que tienen proyectos publicados que producirían cambios en los consumos hídricos futuros, se estiman las proyecciones de su consumo en un horizonte de 20 años. Estos cálculos se basan en determinar el agua necesaria para materializar la producción estimada de cada proyecto, según los procesos que consideran. También se consideraron las fechas de inicio estimadas de cada proyecto y el término de los proyectos actuales de estas faenas.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de la proyección de la demanda obtenidos para las faenas con proyectos que utilizan agua desalinizada.

*Tabla 3.4. Proyección de la demanda en las faenas con proyectos en m<sup>3</sup>/s en la Región de Antofagasta.*

| Faena/Año      | 2019 | 2023 | 2028 | 2038 |
|----------------|------|------|------|------|
| Chuquicamata   | 1,13 | 1,19 | 1,19 | 1,19 |
| Radomiro Tomic | 0,29 | 0,92 | 0,88 | 0,95 |
| Spence         | 0,22 | 0,65 | 0,69 | 0,47 |

Además, en la Figura 3.2 se presentan las proyecciones de la demanda de manera gráfica.

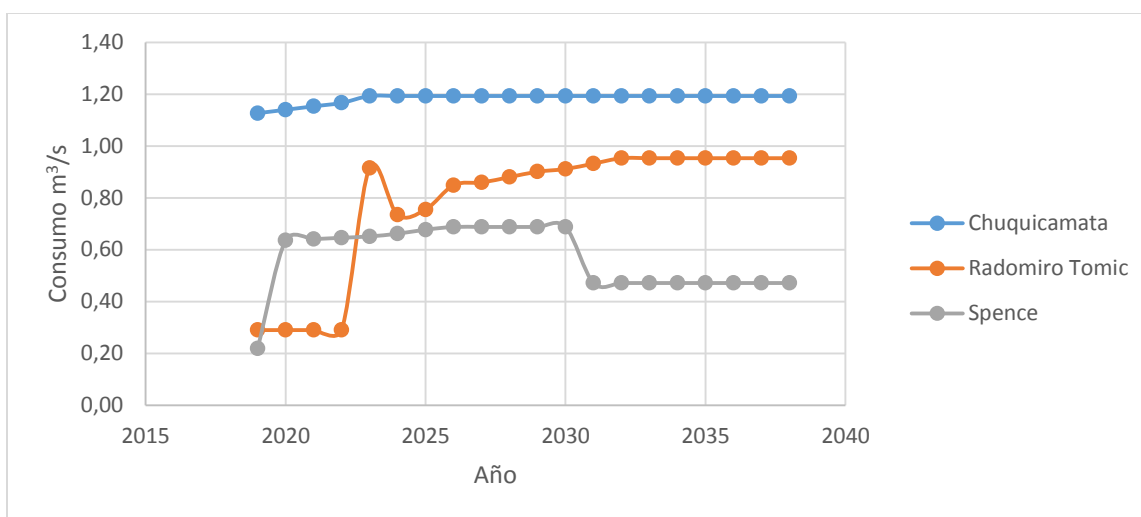


Figura 3.2. Proyección de la demanda en las faenas con proyectos en  $m^3/s$  en la Región de Antofagasta.

Finalmente, se cree importante incorporar el efecto de las variaciones de los consumos hídricos en los diferentes meses de año. Del análisis del consumo hídrico de una de las faenas de la segunda región en el año 2017, se detectaron diferencias de cercanas entre 10% y 20% entre los meses de mayor y menor consumo. De lo anterior, se propone el gráfico de la Figura 3.3 que indica la variabilidad de los consumos hídricos de una faena minera en los meses del año, en el cual se asume una diferencia de un 10% entre el mes de mayor demanda con el de menor demanda.

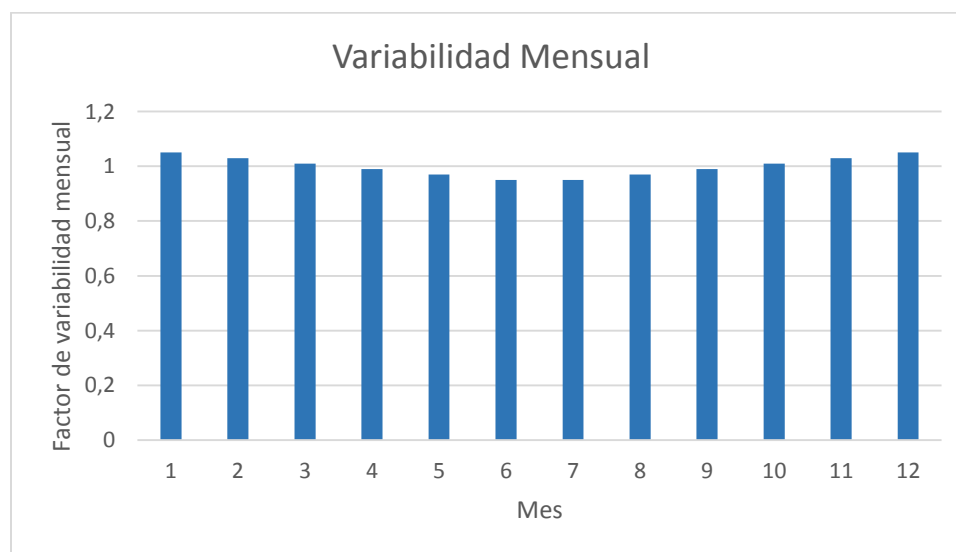


Figura 3.3. Variabilidad de la demanda hídrica en los meses del año

### 3.2.2.2 Agua potable

En el caso de las demandas de agua potable se presenta una proyección realizada por ADASA de las demandas hídricas de las principales ciudades de la zona de estudio.

Tabla 3.5. Proyección de las demandas de agua potable considerando pérdidas en la zona de estudio [ $m^3/s$ ].

| Localidad / Año | 2018  | 2025  | 2032  | 2039  |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Antofagasta     | 1,160 | 1,207 | 1,253 | 1,300 |
| Mejillones      | 0,035 | 0,035 | 0,036 | 0,036 |
| Calama          | 0,414 | 0,454 | 0,505 | 0,556 |
| Tocopilla       | 0,074 | 0,074 | 0,075 | 0,075 |

### 3.2.3 Infraestructura de transporte de agua

La infraestructura de transporte de agua en la zona de estudio se divide en tres categorías: sistemas de impulsión de agua desalinizada (SIAD), sistemas de impulsión de agua de mar (SIAM) y tuberías de agua potable con flujo gravitacional.

En la Tabla 3.6 se presentan los sistemas de impulsión de agua desalinizada y sus principales características.

Tabla 3.6. Sistemas de impulsión de agua desalinizada en la región de Antofagasta.

| Parámetro/Mina               | Radomiro Tomic | Spence         | Escondida                  |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|
| Longitud tubería [ $Km$ ]    | 160            | 154            | 180                        |
| Diámetro [ $mm$ ]            | 1.219          | 762            | 1.000x2 – 525x1            |
| Caudal [ $l/s$ ]             | 1.890          | 1.000          | 2x 1.600 - 1x500 (Antiguo) |
| Cota final [ $m s. n. m$ ]   | 3.000          | 1.700          | 3.100                      |
| Cota inicial [ $m s. n. m$ ] | 0              | 0              | 0                          |
| Disposición                  | Enterrado      | Enterrado      | Enterrado y superficial    |
| Potencia total [ $MW$ ]      | 83,6           | 30             | 70 por tubería             |
| Material                     | Acero          | Acero- carbono | Acero carbono              |
| Número tuberías              | 1              | 1              | 2                          |

En la Tabla 3.7 se presentan las principales características de los sistemas de impulsión de agua de mar de la región de Antofagasta.

Tabla 3.7. Sistemas de impulsión de agua de mar en la región de Antofagasta.

| Parámetro/Mina           | Algorta Norte | Antucoya      | Sierra Gorda  | Pampa Blanca            | Centinela                          |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|------------------------------------|
| Longitud tubería [Km]    | 65            | 12            | 141           | 77                      | 145                                |
| Diámetro tubería [mm]    | 406,4         | -             | 1.066,8       | 600                     | 914,4 - 1.219,2                    |
| Caudal [l/s]             | 400           | 280           | 1.504         | 600                     | 850-1.650                          |
| Cota final [m s. n. m]   | 1.300         | 1.700         | 1.650         | 1.450                   | 2.230                              |
| Cota inicial [m s. n. m] | 0             | 1.450         | 0             | 0                       | 0                                  |
| Disposición              | Semienterrado | Superficial   | Enterrado     | Superficial y enterrada | -                                  |
| Potencia total [MW]      | -             | 45            | 40            | -                       | 60                                 |
| Material                 | Acero y GRP   | Acero-carbono | Acero-carbono | Acero o HDPE/FRP        | Acero-carbono (revestimiento HDPE) |
| Número de tuberías       | 1             | 1             | 1             | 1                       | 2                                  |

La Figura 3.4 presenta la ubicación de las tuberías en la región de Antofagasta.



Figura 3.4. Sistemas de impulsión en la región de Antofagasta.

Por otro lado, las principales características de la infraestructura de agua potable se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Infraestructura de transporte del suministro de Agua Potable.

| Parámetro/Faena              | Aducción Toconce | Aducción Lequena | Aducción Quinchamale | Aducción San Pedro |
|------------------------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| Longitud [Km]                | 91               | 103              | 75                   | 17,3               |
| Diámetro [mm]                | 493-645          | 500-800          | 450-700              | 250-400            |
| Caudal de diseño [ $m^3/s$ ] | 0,5              | 0,6              | 0,4                  | 0,1                |
| Caudal actual [ $m^3/s$ ]    | 0,45             | 0,5              | 0,35                 | 0,09               |
| Cota inicial [m s. n. m.]    | 3.367            | 3.307            | 3.069                | 3.296              |
| Cota final [m s.n.m.]        | 2.365            | 2.367            | 2.366                | 3.027              |

| Parámetro/Faena              | NACA    | NACA T2 | Aducción Tocopilla | Aducción Mejillones |
|------------------------------|---------|---------|--------------------|---------------------|
| Longitud [Km]                | 205     | 6,1     | 151                | 51                  |
| Diámetro [mm]                | 500-700 | 500-700 | 200-500            | 125-400             |
| Caudal de diseño [ $m^3/s$ ] | 0,8     | 0,8     | 0,090              | 0,043               |
| Caudal actual [ $m^3/s$ ]    | 0,73    | 0,73    | 0,070              | 0,041               |
| Cota inicial [m s. n. m.]    | 2.342   | 2.342   | 2.338              | 258                 |
| Cota final [m s.n.m.]        | 584     | 584     | 132                | 57                  |

La ubicación geográfica de estas tuberías se presenta en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Tuberías de suministro para agua potable.

### 3.2.4 Costos de inversión, operación y obras del sistema hídrico

La información de costos que se levanta es la que se considera necesaria para estimar los costos de inversión y operación de los sistemas de impulsión de agua desalinizada y las alternativas de interconexión que se evalúan en el estudio. Además, se incluyen las obras de almacenamiento de las faenas mineras que facilitaron la información.

Esta información se obtuvo principalmente de faenas mineras que poseen sistemas de impulsión construidos o con diseños próximos a ser construidos. En la Tabla 3.9 se presenta la información que se obtuvo para estimar costos o fallas de los sistemas de abastecimiento de agua desalada para ser aplicada en el modelo operacional de recursos hídricos.

*Tabla 3.9. Parámetros levantados para estimar los costos de inversión y operación de los sistemas de desalinización e impulsión de aguas.*

| Tipo de Obra/Tema   | Información                                                     | Valor obtenido                                                                    |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Plantas desaladoras | Rendimiento [ $Kwh/m^3$ ]                                       | Entre 2,8 y 3 $KWh/m^3$ , en las plantas consideradas en el modelo: EWS, SWO y RT |
| Plantas desaladoras | Disponibilidad en el tiempo de los recursos hídricos producidos | Entre 98,5% y un 100% del tiempo                                                  |
| SIAD                | Costos Anual de mantención [ $US$/km/m^3/s$ ]                   | 41.000                                                                            |
| SIAD                | Costo lineal de tubería enterrada e instalada [ $MUS$/km$ ]     | Entre 1,3 y 1,8 $MUS$/km$ para diámetros entre 36" y 40".                         |
| SIAD                | Costo de Estaciones de Bombeo Instalada [ $MUS$/MW$ ]           | 1,19                                                                              |

## 4 Modelo Conceptual de Recursos Hídricos

Para analizar y evaluar las alternativas de interconexión hídrica, se ha diseñado un modelo conceptual del sistema de recursos hídricos aplicado en la zona de estudio. El modelo contiene como elementos básicos las demandas de agua, las fuentes de abastecimiento, las obras de almacenamiento del sistema hídrico, los cauces naturales y las obras de transporte que existen o se proyectan. Este diseño es la base de la construcción del modelo operacional de recursos hídricos, con el cual se evalúa en términos hídricos y económicos el sistema actual y cualquier modificación planteada.

Cada uno de los elementos del sistema hídrico está representado en el modelo conceptual por un arco o nodo. La separación entre nodos y arcos se hace en función de las características hídricas del elemento, que puede ser de abastecimiento, consumo, almacenamiento y transporte.

Como en los sistemas de recursos hídricos es usual que las fuentes de abastecimiento tengan un comportamiento variable, el modelo operacional tiene que incorporar la capacidad de tomar decisiones en cada instante sobre la distribución del agua en función de la cantidad disponible y requerida en cada momento. Para ayudar a cumplir con este objetivo, se crean nodos de balance, los cuales no modifican la cantidad del agua disponible y tampoco la almacenan. Su función es realizar la operación del agua en un punto determinado del sistema acorde a los objetivos y reglas planteadas, por ejemplo: lograr una gestión integrada del sistema, respetar los derechos de aguas, evaluar alguna política hídrica, etc.

Para cada alternativa analizada en este estudio, se calculan los costos de inversión y de operación. La parte variable de estos últimos depende principalmente de la energía requerida para desalinizar y transportar el agua a las faenas mineras.

### 4.1 Definición de los elementos del modelo

Los elementos que se proponen para construir el modelo operacional buscan simular el comportamiento hídrico de los principales componentes del sistema, como fuentes, demandas, almacenamientos, cauces, obras de transporte y obras de distribución.

Todos estos elementos tienen como principio básico la continuidad de masa, que se aplica de manera particular en cada nodo del sistema. En la ecuación 4.1 se presenta el principio de continuidad para un elemento genérico del modelo de operación.

$$\frac{dV_i}{dt} = \sum_{j=1}^n Qe_j - \sum_{k=1}^n Qs_k \quad 4.1$$

Donde  $dV_i$  es la variación del volumen  $V_i$  de agua que almacena el nodo  $i$ , expresada en unidades de volumen en un intervalo de tiempo  $dt$ ,  $\sum_{j=1}^n Qe_j$  es la suma de todos los caudales afluentes al nodo  $i$  y  $\sum_{k=1}^n Qs_k$  es la suma de todos los caudales efluentes del nodo  $i$ .

El término de la variación temporal del volumen (lado derecho de la ecuación 4.1) es distinto a cero solamente para los nodos que tienen capacidad de embalsamiento, en este caso los nodos de almacenamiento. Por lo tanto, para los nodos de abastecimiento, consumo y transporte, donde la variación de volumen es cero, la ecuación 4.1 se simplifica a la ecuación 4.2.

$$\sum_{j=1}^n Qe_j = \sum_{k=1}^n Qs_k \quad 4.2$$

A continuación, se describe la aplicación de este principio para cada elemento considerado en el modelo operacional.

#### 4.1.1 Nodos fuentes

Los nodos fuentes son los que incorporan los recursos hídricos al sistema, en este caso, las principales fuentes de recursos hídricos son las plantas desalinizadoras, que obtienen el agua desde el mar, y las fuentes de agua continentales (superficiales y subterráneas).

La ecuación de continuidad de masa aplicado a una planta desalinizadora se presenta en la ecuación 4.3.

$$\rho_{mar}Q_{mar} = \rho_{sal}Q_{sal} + \rho Q_{des} \quad 4.3$$

Donde  $\rho_{mar}$  es la densidad del agua de mar,  $Q_{mar}$  es el caudal extraído desde la planta desalinizadora al mar,  $\rho_{sal}$  es la densidad de la salmuera,  $Q_{sal}$  es la caudal de salmuera producida en el proceso de desalación,  $\rho$  es la densidad del agua desalada y  $Q_{des}$  es el caudal de agua desalada por la planta. Este último término es el caudal que se bombea a través de los sistemas de impulsión que abastecen a las faenas mineras y a algunas ciudades con agua potable. Además, es el valor que se le asigna a los nodos fuentes asociados a plantas desaladoras.

Para las fuentes de aguas continentales, se considera conservar el valor igual a los consumos del año 2017, obtenidos del reporte anual de consumo hídrico de las faenas pertenecientes al Consejo Minero [12].

En la Tabla 4.1 se presentan las fuentes de suministro consideradas en el modelo operacional de la zona de estudio.

Tabla 4.1. Fuentes de suministro consideradas en el modelo operacional de la zona de estudio.

| Nombre de la fuente de suministro    | Tipo de agua de la fuente |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Desalinizadora Escondida o Coloso    | Desalinizada              |
| Desalinizadora Spence                | Desalinizada              |
| Desalinizadora Radomiro Tomic        | Desalinizada              |
| Desalinizadora La Chimba             | Desalinizada              |
| Aguas continentales Codelco Norte    | Continental               |
| Aguas continentales Spence           | Continental               |
| Aguas continentales Lomas Bayas      | Continental               |
| Aguas continentales Gabriela Mistral | Continental               |
| Aguas continentales Zaldívar         | Continental               |
| Aguas continentales Escondida        | Continental               |
| Aguas continentales ADASA            | Continental               |

#### 4.1.2 Nodos de demanda

Los nodos de demanda son los que requieren de recursos hídricos para cubrir necesidades de abastecimiento de la población, consumos industriales, consumo de riego o caudales ambientales.

En el caso de la demanda hídrica de la minería del cobre, su valor corresponde a la suma de los consumos de cada proceso o servicio existente en la faena. La ecuación 4.4 presenta los flujos considerados en la estimación de la demanda minera.

$$D_{mi} = Q_{pc_i} + Q_{lix_i} + Q_{ser_i} + Q_{mr_i} + Q_{mol_i} + Q_{fun_i} + Q_{ref_i} \quad 4.4$$

Donde  $D_{mi}$  es la demanda minera de la faena  $i$ ,  $Q_{pc}$  es el caudal utilizado por la planta procesadora de minerales sulfurados de cobre,  $Q_{lix}$  es el caudal del proceso de lixiviación de óxidos,  $Q_{ser}$  es el caudal que se utiliza para los servicios existentes en la faena,  $Q_{mr}$  es el agua utilizada en el rajo de la mina,  $Q_{mol}$  el flujo utilizado por la planta de molibdeno,  $Q_{fun}$  es el caudal demandado por la fundición del mineral y  $Q_{ref}$  es el agua utilizada por la refinería.

En el caso de las operaciones mineras que no presenten nuevos proyectos o modificaciones informadas que harían variar el consumo hídrico a futuro, se utiliza el consumo del año 2017 como referencia para las demandas medias anuales futuras.

En el caso de las demandas de agua potable, el valor utilizado en el modelo corresponde al valor informado por la empresa sanitaria, considerando un crecimiento lineal de la demanda.

En la Tabla 4.2 se presentan los sitios de demanda considerados en el modelo operacional aplicado en la zona de estudio.

Tabla 4.2. Sitios de demanda considerados en el modelo operacional de la zona de estudio.

| Nombre del sitio de demanda | Tipo de demanda |
|-----------------------------|-----------------|
| Antofagasta                 | Agua potable    |
| Escondida                   | Minería         |
| Zaldívar                    | Minería         |
| Lomas Bayas                 | Minería         |
| Gabriela Mistral            | Minería         |
| Spence                      | Minería         |
| Ministro Hales              | Minería         |
| Chuquicamata                | Minería         |
| Radomiro Tomic              | Minería         |

#### 4.1.3 Nodos de Almacenamiento

Los nodos de almacenamiento tienen la particularidad de almacenar agua en momentos en que las fuentes de abastecimiento tienen una capacidad mayor a la demanda requerida por un usuario o un sistema, dependiendo del caso. También, tienen como función reducir la vulnerabilidad en caso de problemas de operación en la producción o el transporte del agua.

La ecuación que describe el funcionamiento de estos nodos es la ecuación 4.1, donde el valor del volumen en un instante de tiempo está restringido a la capacidad máxima de la obra de almacenamiento. Usualmente, se considera un solo flujo de entrada y en el caso de los caudales de salida, se tiene el caudal entregado por la casa de maquina (caudal controlado en la operación de la obra) y las pérdidas por evaporación e infiltraciones al acuífero y/o a través del muro.

#### 4.1.4 Nodos de Balance

Los nodos de balance son nodos que se utilizan para gestionar las aguas de un cauce o una obra de transporte y pueden representar extracciones, bifurcaciones, uniones, recuperaciones o pérdidas de agua, etc.

Estos nodos también se describen a modo general por la ecuación 4.2.

#### 4.1.5 Arcos: Cauces naturales y obras de transporte hídrico

Los cauces y las obras de transporte se representan mediante arcos a los cuales se le asigna una capacidad máxima de transporte, según las características físicas del elemento que se representa.

Los arcos se definen por tramos, es decir, si un cauce u obra de transporte tiene alguna singularidad, por ejemplo, variación en el caudal, una bifurcación, un cambio de capacidad, se tendrá que definir un arco para cada tramo. Los tramos vienen siempre unidos por un nodo, cuyo tipo dependerá de cada caso en particular.

La ecuación 4.2 representa la continuidad de masa en este tipo de elementos.

## 4.2 Definición de escenarios y Topología del modelo operacional

### 4.2.1 Escenarios de simulación

Para evaluar la utilidad de la interconexión entre los sistemas de impulsión, se generó una alternativa de interconexión hídrica que conecta las faenas mineras de Escondida y de Radomiro Tomic, con una trayectoria cercana a las minas Zaldívar y Gabriela Mistral. Además, se proyectaron trazados para conectar la tubería de interconexión con los sitios de demanda y también con el sistema de impulsión de minera Spence. En la Figura 4.1 se presenta un mapa que muestra la ubicación de las principales tuberías y de los sitios de demanda considerados en el modelo operacional.

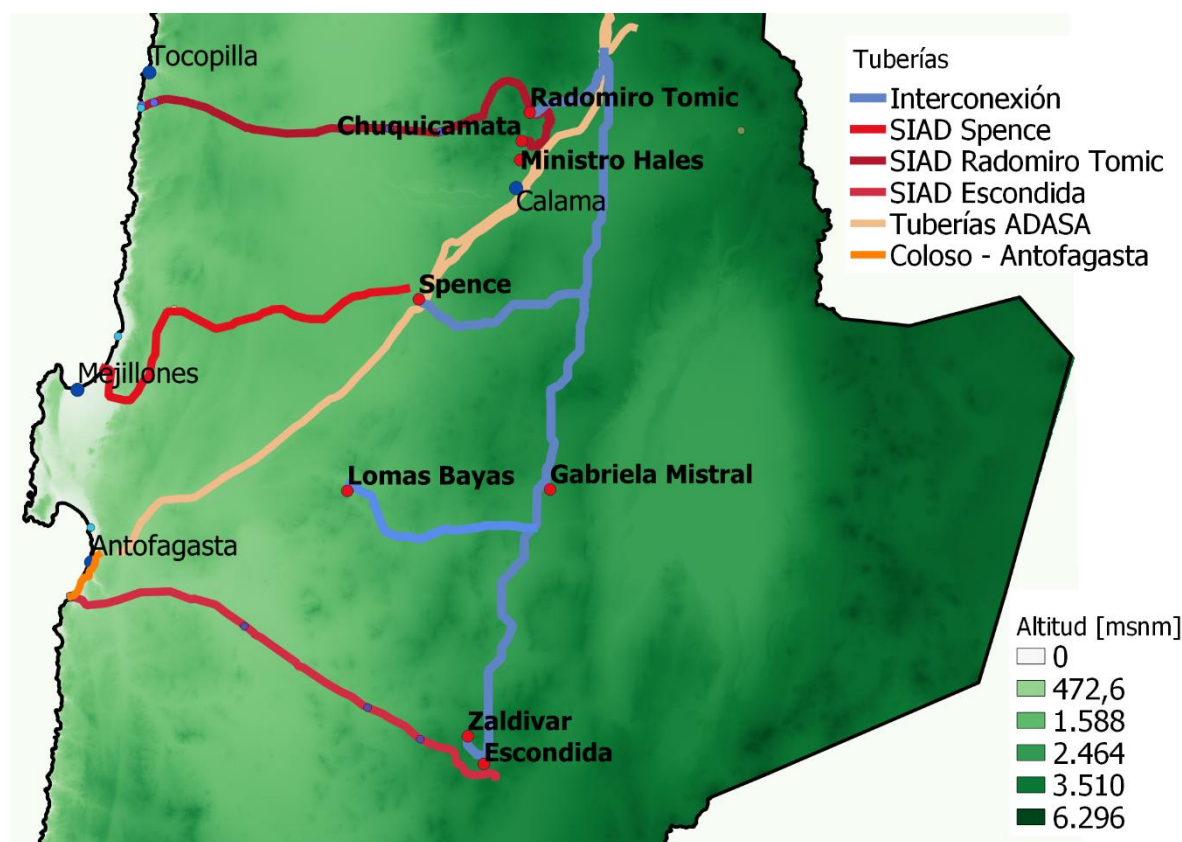


Figura 4.1. Esquema de zona de estudio con las tuberías y sitios de demanda considerados en el modelo operacional.

A partir del trazado proyectado, se decidió evaluar dos escenarios para compararlos con la situación base o sin interconexión. A continuación, se mencionan las principales características de los tres escenarios simulados.

- Situación sin interconexión: es el escenario base con el cual se comparan las otras alternativas en la determinación del costo incremental; considera operando los tres sistemas de impulsión de agua desalinizada (SIAD) de la Figura 4.1 (Escondida, Spence, Radomiro Tomic) sin interconexión.

- Situación con interconexión: misma infraestructura que la situación base más interconexión entre los 3 SIAD y conexiones hacia los sitios de demanda.
- Situación con interconexión e intercambio hídrico (swap): misma infraestructura que en la situación con interconexión considerando, además, un intercambio hídrico entre la planta desalinizadora de Coloso (SIAD Escondida) y aguas continentales de la empresa sanitaria ADASA, ingresadas a la interconexión en la parte alta del sistema hídrico donde se cruzan ambas tuberías; se considera también una tubería desde la planta desalinizadora de Coloso hasta la ciudad de Antofagasta para materializar el intercambio hídrico.

Finalmente, todos los escenarios de evaluación se comparan entre si con los mismos datos de entradas en términos de disponibilidad hídrica y de demandas de agua.

#### 4.2.2 Topología del modelo

La topología del modelo es la representación esquemática del modelo conceptual del sistema hídrico, la cual varía debido a la infraestructura y/o a algún supuesto de intercambio hídrico que se desee evaluar en cada escenario.

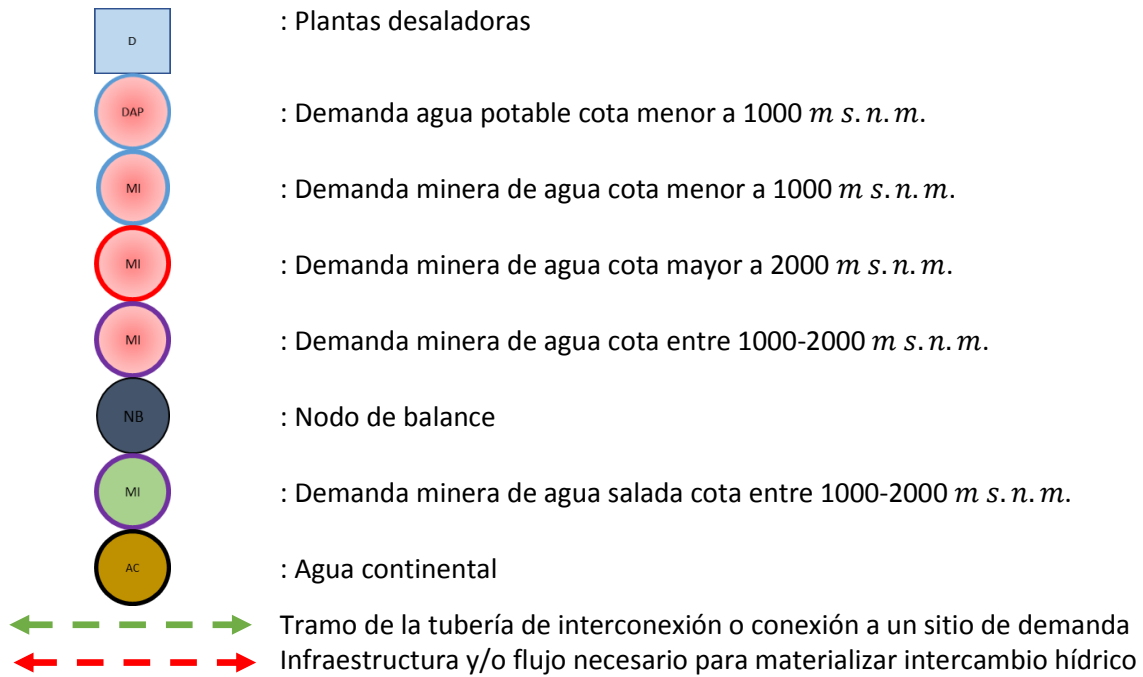
Los escenarios que se presentan a continuación se diferencian en la existencia o no de interconexión hídrica. En la Tabla 4.3 se presenta la simbología de los modelos conceptuales presentados.

*Tabla 4.3. Simbología de las topologías de los escenarios presentados.*

#### Simbología:

|                                                                                     |                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|  | : Plantas desaladoras                                                  |
|  | : Demanda agua potable cota menor a 1000 <i>m s. n. m.</i>             |
|  | : Demanda minera de agua cota menor a 1000 <i>m s. n. m.</i>           |
|  | : Demanda minera de agua cota mayor a 2000 <i>m s. n. m.</i>           |
|  | : Demanda minera de agua cota entre 1000-2000 <i>m s. n. m.</i>        |
|  | : Nodo de balance                                                      |
|  | : Demanda minera de agua salada cota entre 1000-2000 <i>m s. n. m.</i> |
|  | : Agua continental                                                     |
| <b>SIAD</b>                                                                         | : Sistema de impulsión agua desalada.                                  |
| <b>AD</b>                                                                           | : Agua desalinizada                                                    |
| <b>TAP</b>                                                                          | : Tubería agua potable                                                 |
| <b>AC</b>                                                                           | : Agua continental                                                     |

### Simbología:



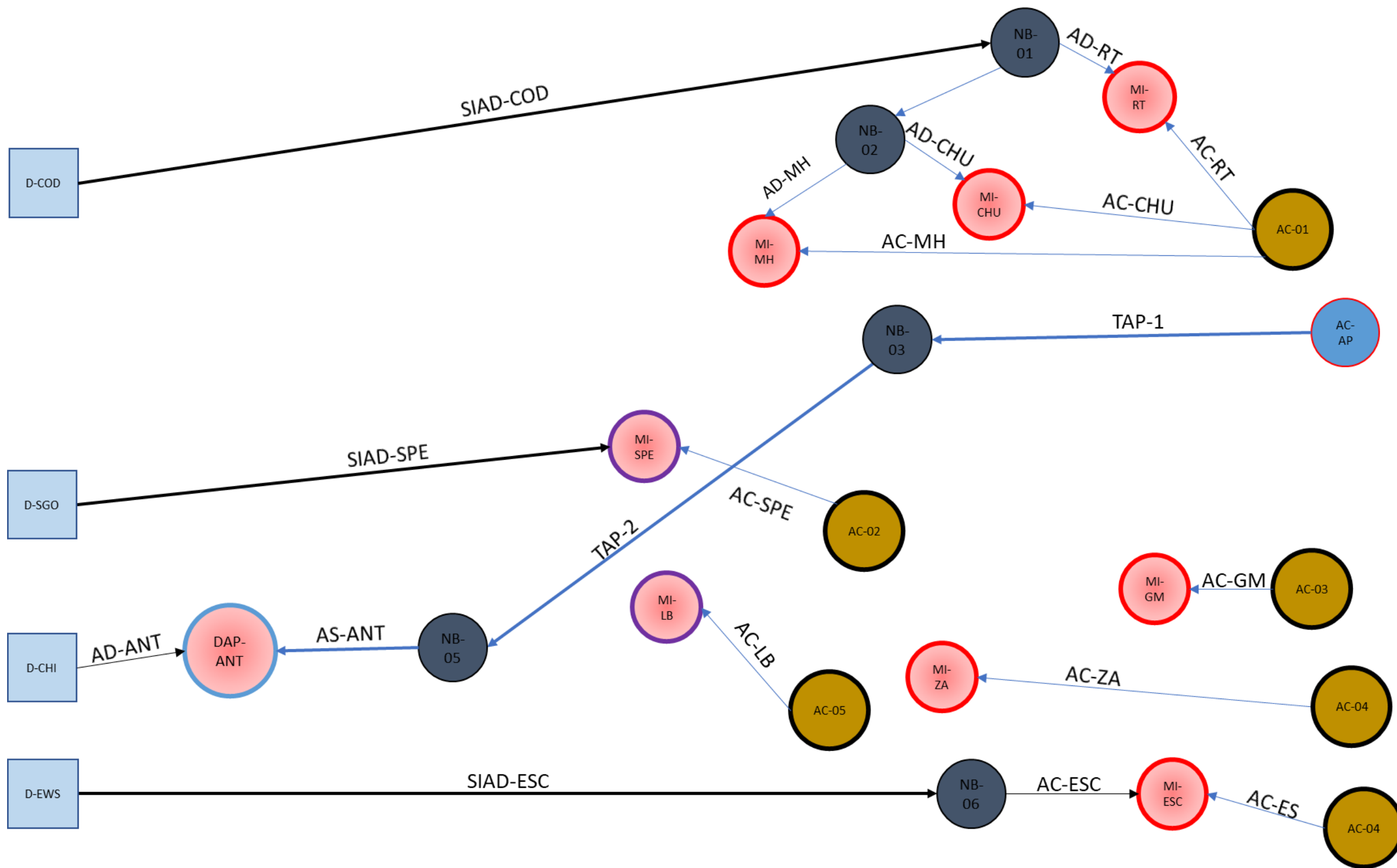


Figura 4.2. Topología escenario sin interconexión.

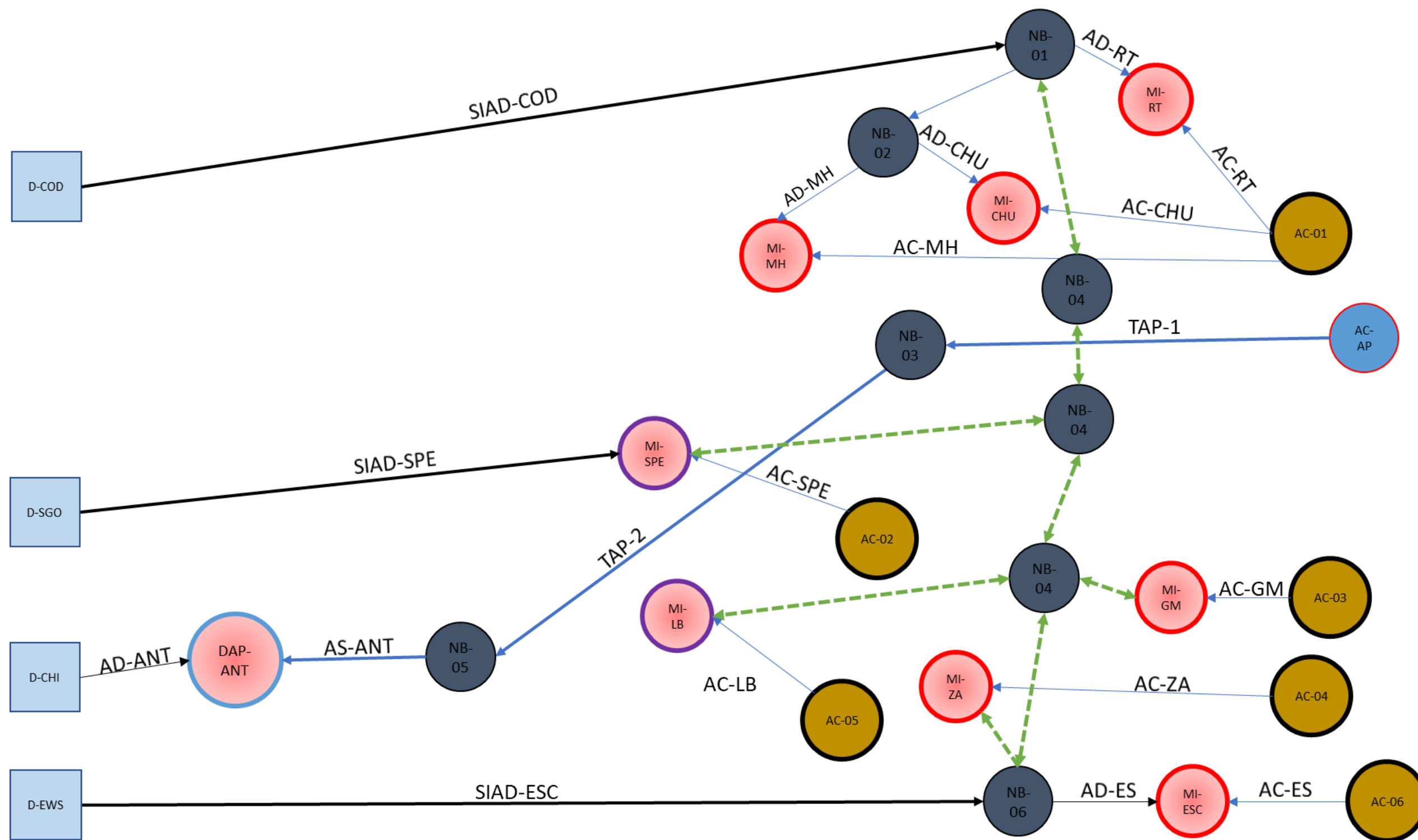


Figura 4.3. Topología escenario con interconexión y sin intercambio hídrico.

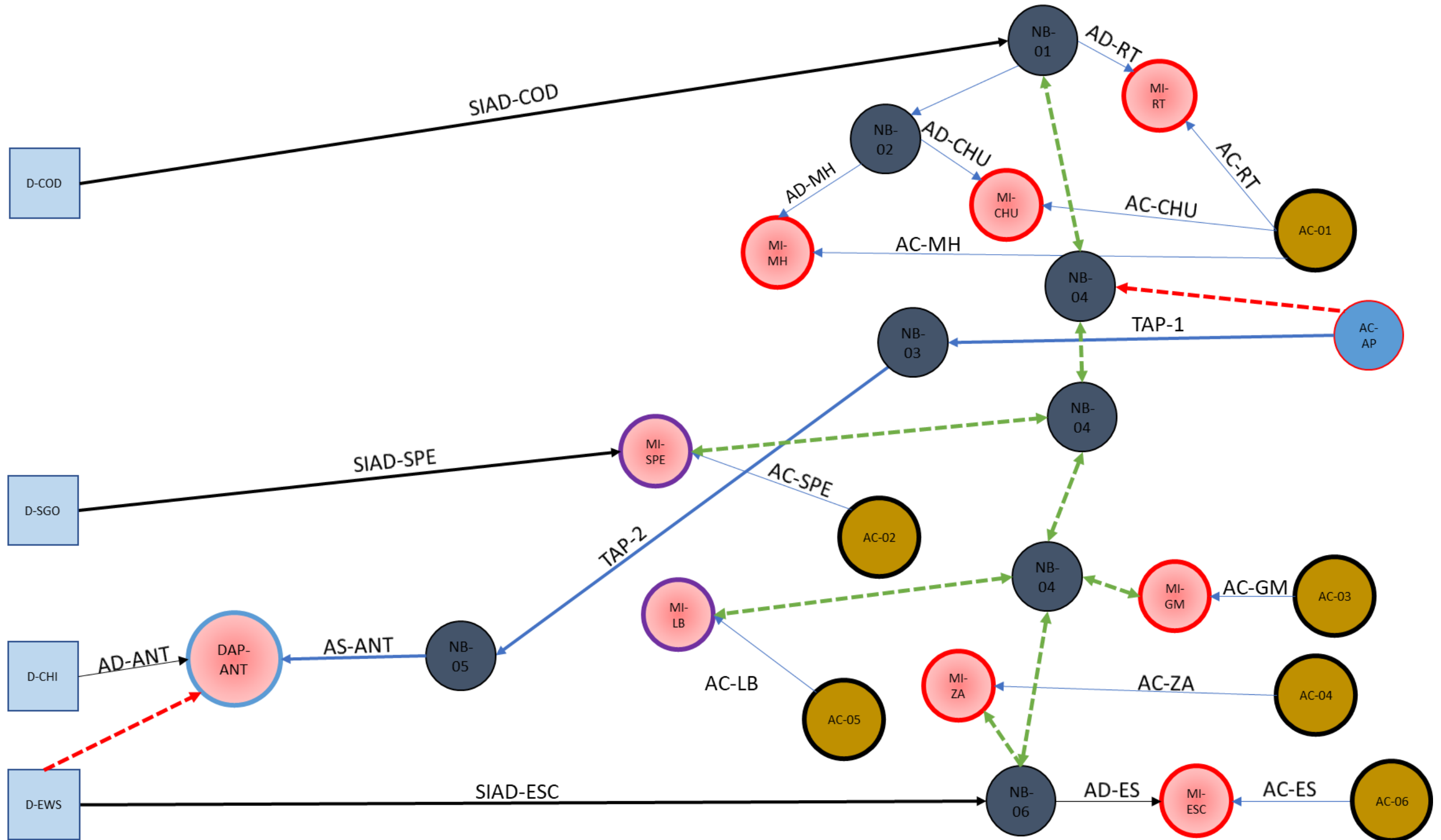


Figura 4.4. Topología escenario con Interconexión y con intercambio hídrico.

## 4.3 Operación del sistema

### 4.3.1 Características Generales

La operación del sistema es la forma de gestionar los recursos en el sistema hídrico definido en función del agua disponible en las fuentes de abastecimiento y de los requerimientos del momento.

Esta característica del modelo tiene directa relación con la complejidad del sistema, debido a que, al existir un mayor número de usuarios que comparten una o más fuentes de abastecimiento, el criterio de operación del agua puede ser distinto y volverse más complejo que en el caso de un solo usuario y/o una sola fuente.

Usualmente, los criterios de gestión de los recursos hídricos tienen relación con la cantidad de agua que cada usuario tiene derecho de usar y con su prioridad de uso en el sistema. Por otro lado, se tiene que considerar que cada usuario tiene acceso a un conjunto de fuentes de abastecimiento y la forma de uso de cada una tiene que ser considerada en la operación del sistema.

Adicionalmente, se deben considerar las restricciones impuestas desde las fuentes de abastecimiento, las cuales pueden estar sujetas a limitaciones de uso o tener una baja disponibilidad en ciertos instantes.

### 4.3.2 Escala Temporal del balance hídrico

La decisión sobre la escala de tiempo en la cual se resuelve el balance hídrico se fundamenta principalmente en los costos y beneficios que se quieren determinar a partir del modelo de operación.

En este caso, se optó por simular el sistema hídrico a escala mensual para poder representar y analizar el efecto de las variaciones estacionales de la demanda en los distintos meses del año. Además, se evaluarían con un mejor detalle posibles fallas en los sistemas de desalinización e impulsión de agua y cómo la interconexión ayudaría a minimizar los riesgos de desabastecimiento.

Otros beneficios que se cuantificarían en el modelo es la resiliencia frente a variaciones en el uso de aguas continentales y la incorporación de nuevos usuarios minimizando los requerimientos de infraestructura. Para analizar estos potenciales beneficios, inicialmente no se ven diferencias sustantivas en la elección de la escala.

Finalmente, considerando que en futuros estudios el modelo podría incorporar la variabilidad de las fuentes continentales, esta escala encajaría adecuadamente con este propósito.

### 4.3.3 Prioridad de los sitios de demanda

La prioridad de los sitios de demanda se materializa en los momentos cuando dos o más sitios de demanda requieren suministro de una misma fuente de suministro hídrico. En esta situación, los

recursos se reparten según las prioridades y si existen dos o más sitios con la misma prioridad, los recursos se reparten proporcionalmente de acuerdo con las demandas de los usuarios.

#### 4.3.4 Prioridad de las fuentes de abastecimiento

Para cada sitio de demanda se tiene que asignar una prioridad a cada fuente de abastecimiento, las cuales abastecen a los sitios de demanda en el orden asignado, sujeto a la disponibilidad de recursos de cada fuente. En caso de fuentes que posean la misma prioridad, las aguas se entregan proporcionalmente a disponibilidad de recursos de cada fuente.

#### 4.3.5 Aguas disponibles en la interconexión

En los escenarios donde se proyectan tuberías que conectan los sistemas de impulsión de agua desalinizada o simplemente se extiende un sistema de impulsión, el agua disponible para suministrar a la tubería está sujeta al balance hídrico de cada faena que posee su propio sistema de impulsión de agua desalinizada y que potencialmente podría suministrar agua a la interconexión. Esto debido a que estas faenas sólo suministran agua a la interconexión a medida que su propia demanda esté totalmente cubierta. La ecuación 4.5 permite implementar esta regla en el modelo operacional.

$$Q_{IH_i} = \text{Max}(Q_{Dis_i} - Q_{Dem_i}, 0) \quad 4.5$$

Donde  $Q_{IH_i}$  es el caudal disponible para ser suministrado a la interconexión por el sistema de impulsión del sitio de demanda  $i$ ,  $Q_{Dis_i}$  es la suma de los caudales de las fuentes hídricas del sitio de demanda  $i$  y  $Q_{Dem_i}$  es la demanda del sitio  $i$ .

Además, en el escenario que considera el intercambio hídrico, el monto de agua intercambiado es igual a la diferencia entre la demanda de agua de Antofagasta y la producción de la planta desalinizadora La Chimba.

### 4.4 Indicadores de evaluación del sistema hídrico

Para evaluar el caso base y los escenarios de interconexión del sistema hídrico, se utilizan los siguientes indicadores:

- Volumen total de agua suministrado.
- Costo total de cada alternativa.
- Costo medio mensual del agua desalinizada
- Costo incremental del agua desalinizada

#### 4.4.1 Volumen suministrado por cada escenario

A partir de la resolución del sistema hídrico planteado en el modelo, se puede determinar el porcentaje de satisfacción de las demandas de los usuarios hídricos del sistema. El volumen

suministro se puede determinar en cada intervalo de tiempo y para cada usuario o para el sistema en su conjunto. Se determina mediante la siguiente definición:

$$V_{Total} = \sum_i V_{sum_i} \quad 4.6$$

Donde  $V_{Total}$  es el volumen total suministrado a los sitios de demanda, calculado como la suma de todos los volúmenes suministrados a cada usuario del sistema  $V_{sum_i}$ .

Este volumen suministro se puede comparar con la demanda total de agua de todos los usuarios y, a partir de ello, se puede calcular el déficit de suministro (volumen de agua no suministrado).

#### 4.4.2 Costos de cada alternativa

El costo total asociado a cada escenario simulado considera las inversiones y los costos operacionales que conlleva el ejecutar cada alternativa. Mediante la ecuación 4.7 se estima el costo total de cada alternativa en el mes  $i$ .

$$C_{t_i} = C_{inv_i} + C_{op_i} \quad 4.7$$

Donde  $C_{t_i}$  es el costo total del mes  $i$ ,  $C_{inv_i}$  es el costo amortizado en el mes  $i$  de la inversión total  $C_{inv}$  y  $C_{op_i}$  es el costo de operación total de cada alternativa en el mes  $i$ .

El costo total  $C_T$  se considera como el valor presente de los costos totales obtenidos en cada año del periodo de simulación. El costo total anual, se obtiene de la suma del costo total mensual de todos los meses de cada año.

##### 4.4.2.1 Costos de inversión

Son los costos asociados a las obras que se proyectan en el estudio de interconexión necesarias para llevar a cabo cada alternativa. Se propone que los principales costos asociados a la inversión son:

- Costos de la tubería instalada
- Costos de estaciones de bombeo

Por lo tanto, el costo de inversión de las alternativas de interconexión se estima a través de la ecuación 4.8:

$$C_{inv} = C_{tub} + C_{eb} \quad 4.8$$

Donde  $C_{tub}$  es el costo de inversión de la tubería instalada y  $C_{eb}$  es el costo de las estaciones de bombeo.

El costo de la tubería se propone estimarlo a partir de los costos unitarios presentados en la Tabla 3.9 mediante la ecuación 4.9.

$$C_{tub} = Cu_{tub} * L_{tub} \quad 4.9$$

Donde  $Cu_{tub}$  es el costo unitario instalado de la tubería en  $US\$/km$  y  $L_{tub}$  es el largo de la tubería en  $km$ .

El costo de las estaciones de bombeo se determina a partir de la potencia estimada que necesitaría la interconexión estimada. A partir de los costos levantados en la Tabla 3.9 se asume un valor de las estaciones de bombeo proporcional a su potencia, por lo tanto, el valor de la estación de bombeo proyectada  $C_{eb}$  se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_{eb} = Cu_{eb} * P_{eb} \quad 4.10$$

Donde  $Cu_{eb}$  es el costo unitario de una estación de bombeo en  $US\$/MW$  y  $P_{eb}$  es la potencia de la estación de bombeo en  $MW$ .

Se propone distribuir el monto de la inversión en el periodo de simulación del proyecto, es decir en 20 años. Además, se estima que la inversión se materialice en dos años, por lo tanto, a partir del tercer año de simulación se aprecian los impactos producidos por la interconexión.

#### 4.4.2.2 Costos de operación

##### 4.4.2.2.1 Plantas desalinizadoras

Los costos de operación que se consideran son los de desalinización de las aguas y los de impulsión, por lo tanto, la ecuación general para determinar los costos anuales de operación es:

$$C_{op_i} = C_{op_{pd_i}} + C_{op_{siad_i}} \quad 4.11$$

Donde  $C_{op_{pd_i}}$  es la suma de los costos de operacionales mensuales de las plantas desaladoras en el mes  $i$  que funcionan en el sistema en  $US\%$  y  $C_{op_{siad_i}}$  es la suma de los costos operacionales de los sistemas de impulsión en  $US\%$  en el mes  $i$ .

Para cada una de estas obras, se propone dividir sus costos operacionales en función de costos fijos y variables.

En el caso de las plantas desaladoras, de la recopilación de antecedentes con las faenas mineras, se propone dejar un 25% de los gastos operacionales como fijos y un 75% como variables. Estos porcentajes se estiman para cuando la planta funciona a capacidad máxima. Se estima que la componente variable de los costos operacionales es un 55% gastos de energía y el 45% es en gasto de insumos y reactivos.

El gasto de energía del mes  $i$  expresado en  $US\%$  se determina mediante la ecuación 4.12

$$C_{ep_{pd_i}} = R * Q_{des_i} * P_e * 86400 * n_{días_i} \quad 4.12$$

Donde  $R$  es el rendimiento de la planta en  $KW/m^3$ ,  $Q_{desi}$  es el caudal medio mensual desalinizado por la planta en  $m^3/s$  en el mes  $i$ ,  $P_e$  es el precio medio mensual de la energía en  $US\$/KWh$  y  $n_{dias_i}$  es el número de días del mes  $i$ . De manera similar, el gasto en insumos y reactivos se asume proporcional al caudal desalinizado.

Entonces, utilizando las proporciones mencionadas en el costo operacional total y del costo operacional fijo, se puede estimar el costo operacional del mes  $i$  en  $US\%$  como:

$$Co_{pd_i} = \frac{10}{5,5} * \frac{1}{3} R * Q_{max} * P_e * 86400 * n_{dias_i} + \frac{10}{5,5} * R * Q_{desi} * P_e * 86400 * n_{dias_i} \quad 4.13$$

Donde  $Q_{max}$  es la capacidad máxima de producción de agua desalada de la planta y del sistema de impulsión en  $m^3/s$ , las cuales se suponen iguales. En la ecuación anterior, el primer término corresponde a la componente fija y el segundo a la componente variable de los costos de operación de la planta desalinizadora.

#### 4.4.2.2.2 Sistemas de Impulsión

Los costos de operación se determinan también mediante la descomposición en una componente fija y otra variable. La componente fija cubriría costos de operación y mantención, mientras que la variable por energía.

Los costos fijos del sistema de impulsión se estiman en unos  $41.000 \frac{US\$}{año}$  por cada  $\frac{m^3}{s}$  en su capacidad máxima y por cada kilómetro de longitud.

El gasto energético se estima a partir de la capacidad de las bombas de los sistemas de impulsión, y su valor corresponde a la energía necesaria para llevar el agua a la bomba siguiente. Además, se asume que la potencia de las bombas varía linealmente con el caudal impulsado, lo cual podría estar subestimando el valor real del costo que podría ser mayor dada la pérdida de eficiencia de las bombas con caudales distintos al óptimo.

Entonces, el costo energético  $Ce_{siadi}$  del mes  $i$  expresado en  $US\%$  para elevar un caudal  $Q_{desi}$  en  $m^3/s$  a un punto determinado del sistema corresponde a la suma de las potencias máximas  $P_{max}$  en  $MW$  de todas las bombas por las que se desplaza el flujo, multiplicada por el tiempo de uso y por el precio de la energía  $P_e$  en  $US\$/Kwh$ .

$$Ce_{siadi} = \frac{1}{3,6} P_{max} * 86400 * n_{dias_i} * P_e * \frac{Q_{desi}}{Q_{max}} \quad 4.14$$

Entonces, los costos operacionales de los sistemas de impulsión en  $US\%$  en el mes  $i$  se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$Co_{siadi} = \frac{41000}{12} * Q_{max} * L_{tub} + \frac{1}{3,6} P_{max} * 86400 * n_{dias_i} * P_e * \frac{Q_{desi}}{Q_{max}} \quad 4.15$$

#### 4.4.3 Costo medio mensual del agua desalinizada

Dado que los costos que aborda el presente estudio corresponden a la inversión de la interconexión, junto con la producción y transporte de agua desalinizada, se determina el costo medio mensual de cada metro cúbico de agua desalinizada en cada alternativa, considerando los costos inicialmente mencionados. A través de la ecuación 4.16 se determina el costo medio mensual del agua desalinizada.

$$Cm_{desi} \left[ \frac{US\$}{m^3} \right] = \frac{Ct_i}{V_{adi}} \quad 4.16$$

Donde  $Ct_i$  corresponde al costo total del sistema para suministrar agua desalinizada en el mes  $i$ , determinado mediante la ecuación 4.7 y  $V_{adi}$  es el volumen de agua total desalinizada en el mes  $i$  suministrado en el sistema.

Si bien en el cálculo de este indicador, no se han considerado los costos de inversión de las plantas de desalinización ni de los sistemas de impulsión existentes o próximos a ser construidos, ya que no se obtuvo dicha información, la finalidad de presentar este indicador radica en observar las variaciones que se tienen a partir de los cambios en las condiciones de cada escenario implementadas en el análisis de sensibilidad.

#### 4.4.4 Costo medio mensual incremental del agua desalinizada

Corresponde al costo por metro cúbico asociado al agua adicional suministrada debido a la instalación de la nueva infraestructura en el mes  $i$ . Se calcula como la diferencia de los costos en el mes  $i$  de desalinizar y transportar agua en el escenario  $j$  que se evalúa, con la situación sin interconexión  $ssi$ , dividido por el diferencial de volumen de agua desalinizada suministrado por cada alternativa en el mes  $i$ . La ecuación 4.17 presenta la forma en cómo se determina este indicador.

$$Cm_{inci} \left[ \frac{US\$}{m^3} \right] = \frac{Ct_i^j - Ct_i^{ssi}}{V_{adi}^j - V_{adi}^{ssi}} \quad 4.17$$

## 5 Construcción del Modelo Operacional Hídrico de la Zona de Estudio

### 5.1 Plataforma de modelación

La plataforma escogida para llevar a cabo este estudio es WEAP (Water Evaluation and Planning) del Stockholm Environment Institute. Esta herramienta fue escogida por su robusta capacidad de resolver balances de sistemas hídricos, amigable interfaz gráfica, integración de un módulo de evaluación económica de proyectos y/o políticas públicas. También ha influenciado en esta elección, el amplio uso de esta plataforma en estudios académicos y en importantes proyectos de consultoría nacionales e internacionales.

Por otro lado, en caso de ser necesario profundizar algunos aspectos del presente estudio, esta plataforma posee la capacidad de determinar la oferta de aguas superficiales a través de modelos hidrológicos incorporados, de determinar las demandas hídricas de distintos tipos de usuarios, de incorporar plantas de tratamiento de aguas y de acoplarse a modelos dinámicos externos que podrían reducir la incertidumbre en distintos aspectos, como lo pueden ser modelos hidrogeológicos, hidrológicos, de optimización, de calidad de aguas o planillas Excel de procesamiento automatizado de datos [14].

### 5.2 Descripción de los elementos del modelo operacional

En WEAP existen diferentes elementos para representar los principales componentes que permiten simular un determinado sistema hídrico. En el caso específico de este estudio de interconexión hídrica, los principales componentes del sistema son las fuentes de abastecimientos, las obras de transporte hídrico y los sitios de demanda.

#### 5.2.1 Fuentes de abastecimiento

Las fuentes de abastecimiento corresponden a las aguas continentales y a las plantas desalinizadoras que utiliza cada faena minera y la ciudad de Antofagasta. Para incorporar estos elementos al modelo, simplemente se incorpora un elemento del tipo 'Otras Fuentes' y se le asigna un nombre.

Estos elementos se caracterizan principalmente porque el usuario ingresa el caudal disponible o afluente al elemento para abastecer a los usuarios que utilicen esta fuente en cada intervalo de tiempo.

#### 5.2.2 Obras de transporte hídrico

Las obras que transportan agua se representan mediante dos tipos de elementos, los ríos o derivaciones de cauces y las conducciones.

Para los ríos y las derivaciones, pese a ser dos tipos de elementos diferentes en WEAP, las principales características son que transportan agua desde las fuentes a través de conducciones y permiten extracciones mediante otros ríos, derivaciones o conducciones según sea el caso.

En el caso de las conducciones, éstas se utilizan principalmente para abastecer un sitio de demanda desde un río, una derivación o una fuente hídrica. Se les pueden asignar prioridades de uso en cada sitio de demanda y no permiten extracciones en su trayecto.

En este caso, se utilizan solamente derivaciones y conducciones, ya que no está incluido ningún cauce natural en el sistema.

### 5.2.3 Sitios de demanda

Las demandas hídricas del sistema se representan a través de los elementos llamados 'Sitios de demanda'. Para incorporarlos al modelo, al igual que para las fuentes de abastecimiento, se tiene que seleccionar este tipo de elemento en WEAP y luego trasladarlo hasta la posición en la cual se desea ubicar en el mapa.

En este caso, los datos ingresados para cada sitio dependen si la demanda es constante o varía en el periodo de modelación. En el caso de las demandas que se mantienen constantes, se opta por determinar la demanda anual y en el caso de las demandas que varían, se ingresan mensualmente. Antes de incorporar los valores, se ingresa en el menú de datos, luego en la casilla 'Avanzado' del Sitio de demanda donde se especifica el tipo de demanda a incorporar, mensual o anual con variación mensual.

En el caso de los sitios de demanda que mantienen su demanda constante a través de los años, en la casilla 'Nivel de Actividad Anual' el volumen anual de agua requerida por el sitio de demanda y en la casilla 'Tasa Anual de Uso del Agua' simplemente se rellenan con 1. Las demandas que varían a través de los años de simulación se incorporaron en la casilla de 'Demanda Mensual', ingresando los datos desde un archivo externo generado en Excel.

## 5.3 Datos de entrada

En esta sección se presentan los datos de entrada utilizados en los tres escenarios simulados. Estos se dividen en tres categorías: las demandas hídricas, las fuentes de abastecimientos y los parámetros utilizados para determinar costos o realizar análisis de sensibilidad. Estos valores representan la información base del estudio, es decir, son los datos obtenidos sin realizar ningún tipo de análisis de sensibilidad.

### 5.3.1 Demandas Hídricas

Las demandas hídricas ingresadas al modelo corresponden a aquellas obtenidas en la recopilación de antecedentes del consumo hídrico 2017 de las faenas pertenecientes al Consejo Minero (Tabla 3.3 y Tabla 3.4) [13] y a la información compartida por ADASA para el caso de la demanda hídrica de Antofagasta (presentada en la Tabla 3.5)

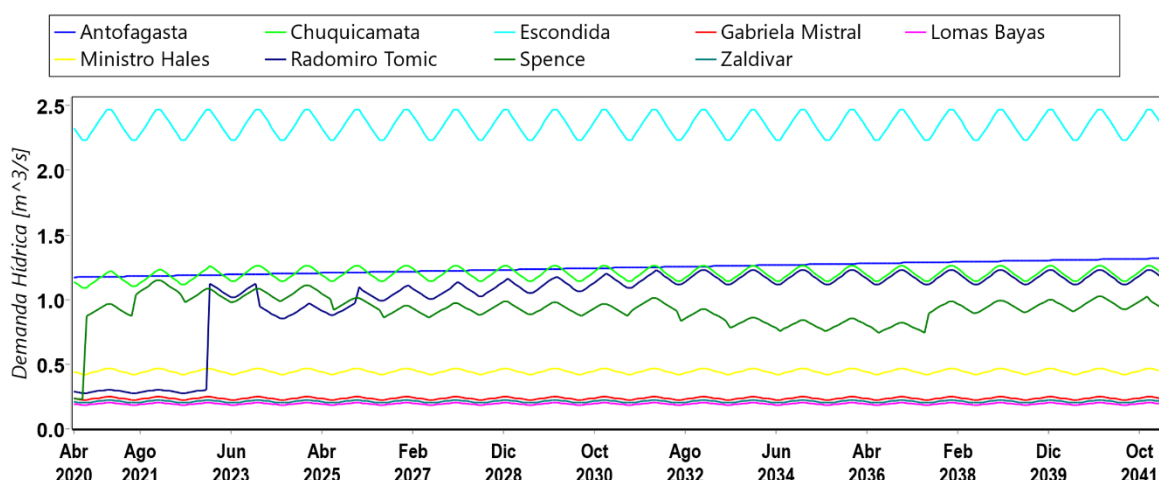


Figura 5.1. Demandas hídricas de la zona de estudio [ $m^3/s$ ].

Para todo el periodo de modelación, desde abril del año 2020 hasta marzo del año 2042, se tiene una demanda total de 5.424 millones de  $m^3$ .

### 5.3.2 Fuentes de Abastecimiento

Los valores utilizados para modelar las fuentes de abastecimiento corresponden a los valores presentados en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 en el caso de las plantas desalinizadoras. Para cada una de las desalinizadoras, se consideraron 4 fallas en todo el periodo de modelación (20 años). En el caso de las aguas continentales, se asume que su disponibilidad es equivalente a los valores del año 2017, presentados en la Tabla 3.3.

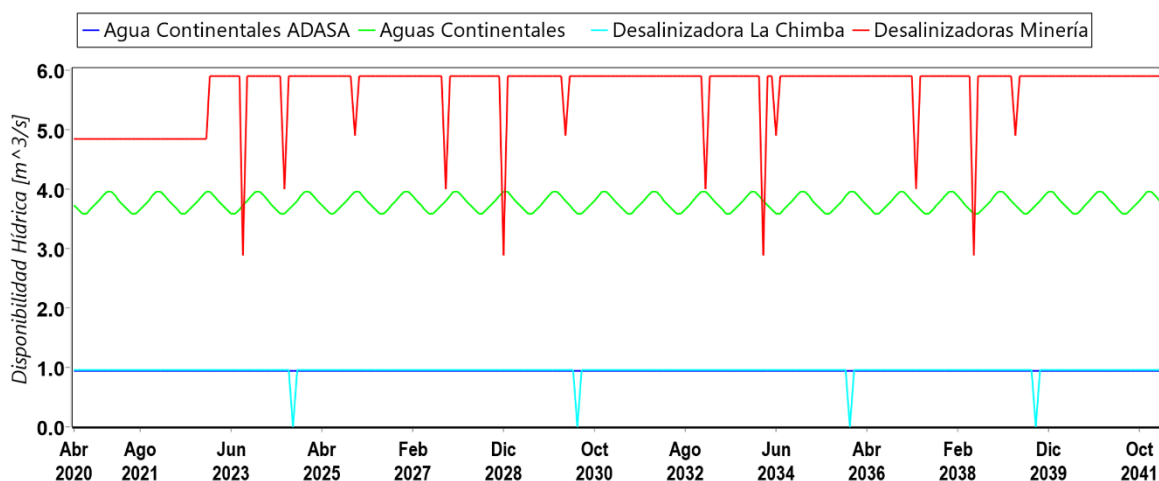


Figura 5.2. Fuentes de abastecimiento de la zona de estudio [ $m^3/s$ ].

En todo el periodo de modelación, desde abril del año 2020 hasta marzo del año 2042, se tiene una disponibilidad hídrica total de 7.846 millones de  $m^3$ .

En la Figura 5.3 se presentan en un mismo gráfico la disponibilidad y la demanda hídrica agregadas de toda la zona de estudio. Se puede apreciar que en términos globales la disponibilidad es entre 3 y 4  $m^3/s$  mayor a los requerimientos. Incluso en los episodios de fallas de las desalinizadoras, la disponibilidad total supera la demanda total, lo cual no significa que la demanda de cada usuario esté cubierta por la oferta disponible físicamente en el punto de demanda.

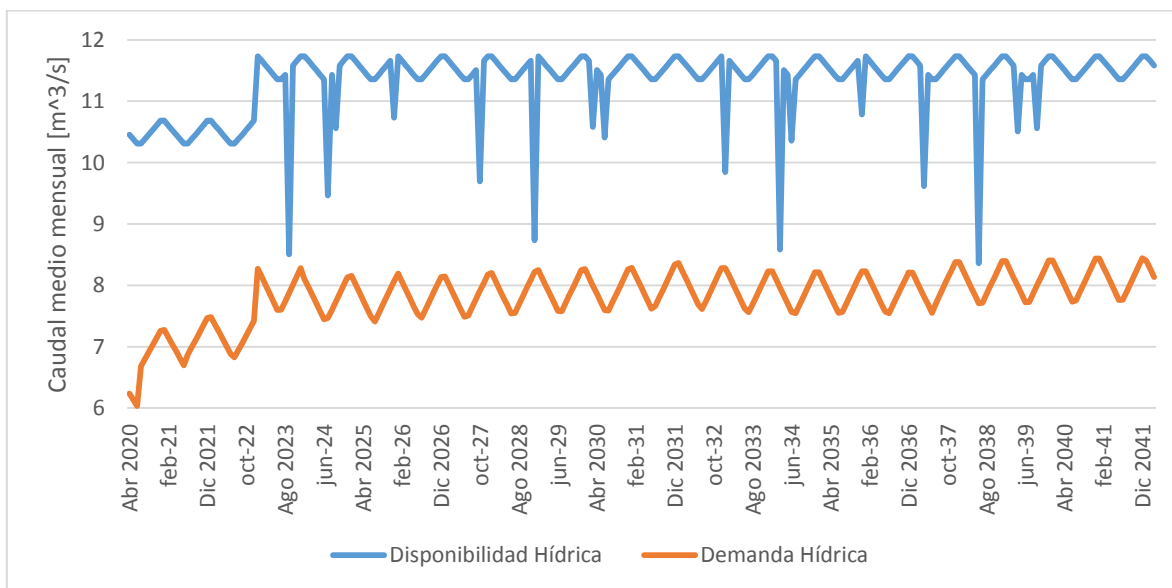


Figura 5.3. Disponibilidad y demandas hídricas totales en el periodo de simulación [ $m^3/s$ ].

### 5.3.3 Parámetros

Los parámetros utilizados en el modelo operacional corresponden a valores medios o típicos de la industria para estimar los costos de inversión y operación del sistema. En la Tabla 5.1 se presentan los valores ingresados en el modelo.

Tabla 5.1. Parámetros utilizados en el modelo operacional.

| Parámetro                                      | Valor                              |
|------------------------------------------------|------------------------------------|
| Precio medio de la energía                     | 0,1 [ $US\$/KWh$ ]                 |
| Eficiencias bombas SIAD                        | 70%                                |
| Caudal máximo interconexión                    | 0,75 [ $m^3/s$ ]                   |
| Tasa de interés y tasa de descuento            | 7%                                 |
| Años de modelación                             | 22 años en total; 2021-2042        |
| Periodo de evaluación de la infraestructura    | 20 años; 2023-2042                 |
| Valor de referencia del agua en la zona        | 3 – 6 [ $US\$/m^3$ ]               |
| Número de fallas de cada planta desalinizadora | 4 fallas; 98,33% de disponibilidad |

Además, se asume que no hay costos de extracción de las aguas continentales ante la falta de información en este aspecto.

## 6 Resultados del modelo

Los resultados que se presentan para analizar el comportamiento del sistema en términos hídrico y de costos del agua desalinizada de cada escenario son: volumen suministrado, costos de inversión y operación, costo medio del agua desalinizada en faena y el costo medio incremental del agua desalinizada en faena. Además, en los casos de mayor atención se incorporan los valores presentes de los costos de inversión, operación y total.

En primer lugar, se presentan los resultados del caso en que se utiliza la información base presentada en el subcapítulo 3.2 como datos de entrada del modelo operacional. Para luego en la sección de análisis de sensibilidad, realizar variaciones a esta información de entrada y analizar cómo varía el comportamiento en términos hídrico y de costos en el sistema

### 6.1 Volumen entregado y caudal medio no suministrado

El volumen suministrado muestra la cantidad de agua que se abastece a los sitios de demanda en todo el periodo de simulación. La diferencia de volumen suministrado con respecto a una situación base, puede ser visto como el beneficio generado a los sitios de demanda producido por alguna determinada inversión, aunque debido a que no se cuenta con información sobre los beneficios marginales producidos por el agua en cada faena minera, no es posible traspasar este beneficio hídrico en uno económico.

En la Figura 6.1 se presentan los caudales medios mensuales suministrados en cada escenario utilizando la información base del estudio. Se observa que las entregas son iguales salvo los meses en donde ocurren las fallas de las plantas desalinizadoras o en los sistemas de impulsión, en donde el caudal suministrado es mayor en los casos con interconexión.

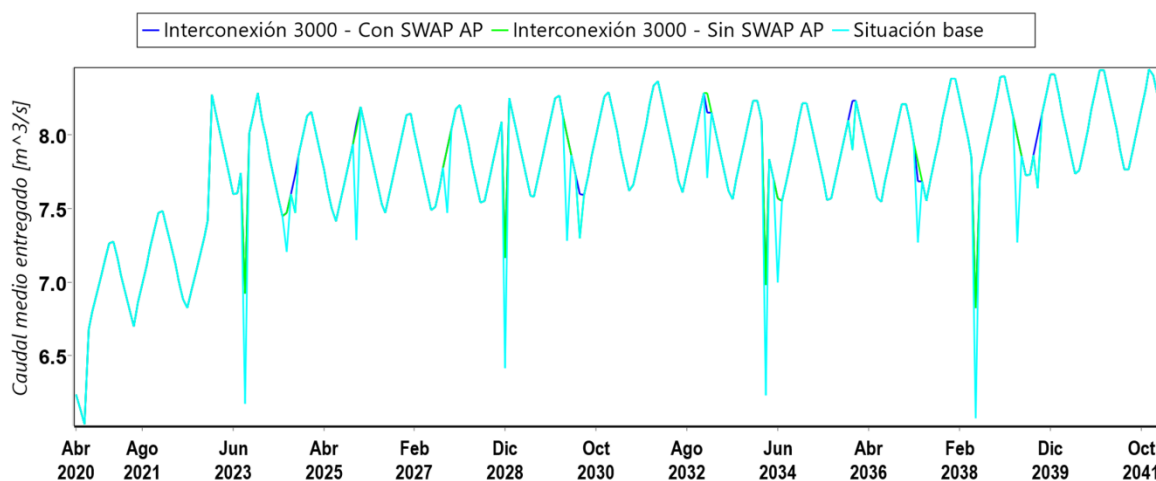


Figura 6.1. Volumen suministrado en el periodo de simulación en cada escenario

El volumen total suministrado en todo el periodo de simulación y la diferencia con respecto a la situación sin interconexión se presenta en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Volúmenes suministrados en cada escenario con la información base y diferencia con respecto al escenario sin interconexión [ $m^3$ ].

| Escenario                   | Volumen total suministrado [ $m^3$ ] | Diferencia [ $m^3$ ] |
|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Interconexión con SWAP      | 5.413.173.188                        | 22.718.661           |
| Interconexión sin SWAP      | 5.410.485.891                        | 20.031.364           |
| Situación sin interconexión | 5.390.454.527                        | 0                    |

Debido a la similitud de los valores de las series presentadas en la Figura 6.1, se presenta la Figura 6.2, en donde se muestran los caudales medios mensuales no suministrados hacia los sitios de demanda.

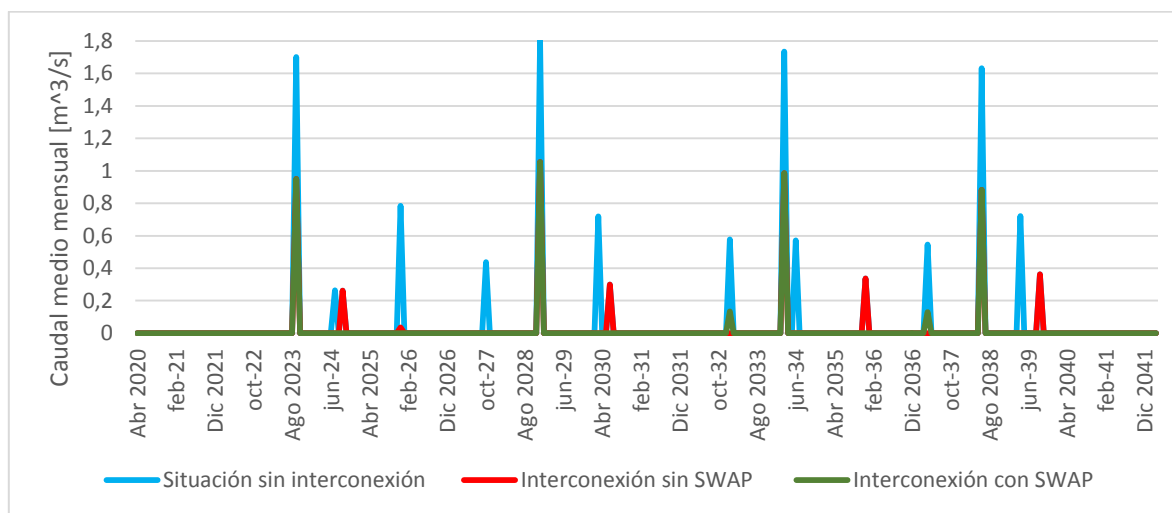


Figura 6.2. Caudales medios mensuales no suministrados en los sitios de demanda [ $m^3/s$ ].

De la Tabla 6.1 se observa en la columna Diferencia, que el beneficio hídrico de la interconexión por las obras sería aproximadamente de 23 y 20 millones de  $m^3$  en los casos con y sin intercambio respectivamente.

A partir de la Figura 6.2 se observa que las faenas mineras se pueden abastecer con la infraestructura existente utilizando la información base como datos de entrada. Los únicos problemas surgen en las faenas con abastecimiento de agua desalinizada en los momentos en que sus respectivos sistemas tienen alguna falla que les impide satisfacer sus requerimientos hídricos totalmente. En estos casos, se observa que la interconexión puede disminuir considerablemente la intensidad de estas fallas e incluso en algunos casos mitigarlas.

Además, el escenario de interconexión con swap permitiría asegurar totalmente el abastecimiento hídrico de Antofagasta.

## 6.2 Costos de funcionamiento del sistema hídrico

### 6.2.1 Inversión

Los costos de inversión son los asociados a materializar las obras necesarias para que los escenarios con interconexión puedan llevarse a cabo, en los casos con y sin intercambio hídrico.

En la Tabla 6.2 se presentan los costos de inversión estimados para cada tramo de la interconexión proyectado, los costos que se presentan corresponden a la suma de los costos de tubería y de las estaciones de bombeo. La única diferencia en términos de inversión entre la situación con y sin intercambio hídrico es la tubería que se proyecta entre la planta desalinizadora de Coloso y Antofagasta.

*Tabla 6.2. Costos de inversión estimados para la interconexión.*

| Tramo                                | Costo [US\$]       |
|--------------------------------------|--------------------|
| Interconexión Escondida - Zaldívar   | 2.801.146          |
| Interconexión Zaldívar - GM y LB     | 160.929.696        |
| Interconexión GM y LB - Spence       | 111.213.840        |
| Interconexión Spence - Codelco Norte | 182.199.211        |
| Conexión hacia Zaldívar              | 6.281.635          |
| Conexión hacia Lomas Bayas           | 43.064.775         |
| Conexión hacia Gabriela Mistral      | 2.005.840          |
| Conexión Spence                      | 104.737.230        |
| Conexión Coloso - Antofagasta        | 30.900.864         |
| <b>Total sin intercambio hídrico</b> | <b>613.233.374</b> |
| <b>Total con intercambio hídrico</b> | <b>644.134.238</b> |

Para determinar el costo del mensual amortizado de la inversión y los indicadores relacionados al precio unitario del agua en cada mes, las inversiones se amortizan en los 20 años en que se evalúan a una tasa de interés del 7% anual real. Los valores de las cuotas mensuales debido a la inversión son de 4,82 y 5,06 [MMUS\$] en los casos sin intercambio y con intercambio hídrico respectivamente.

Además, los valores de estas estimaciones no varían en los análisis de sensibilidad realizados, ya que las obras son las mismas, por lo tanto, no se presentan nuevamente.

## 6.2.2 Costos de operación mensuales

Los costos de operación se estiman cercanos a los 20 millones de dólares mensuales en todo el sistema hídrico, los cuales son similares en todos los escenarios, aunque siempre mayores en los casos con interconexión, debido principalmente a los costos operacionales fijos que aumentan al tener un sistema de tuberías de mayor longitud.

En la Figura 6.3 se presentan los costos operacionales mensuales del sistema hídrico en los escenarios simulados con la información base.

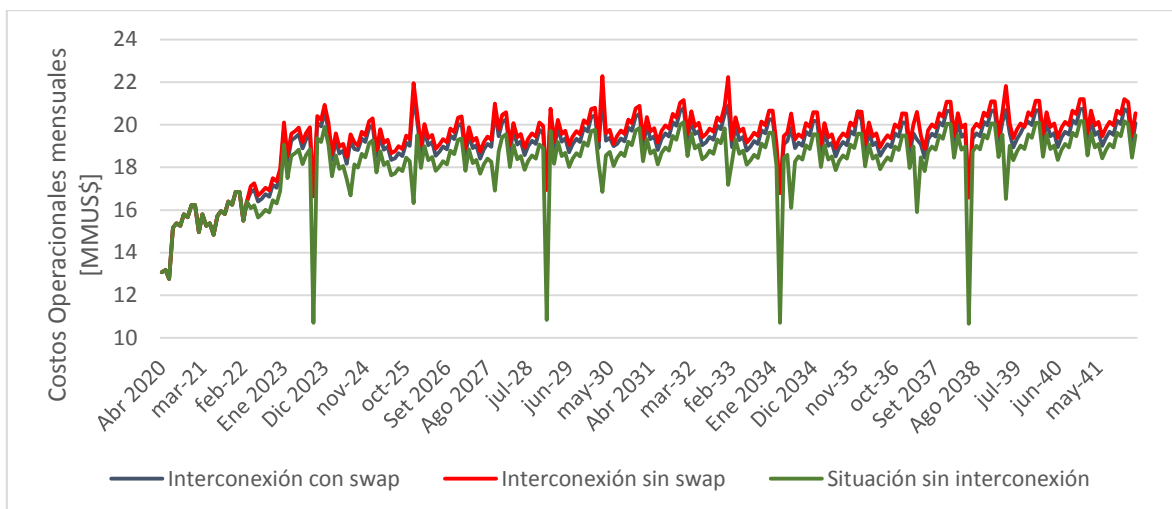


Figura 6.3. Costos operacionales de cada escenario con la información base [MMUS\$/mes].

Además, en la Tabla 6.3 se presentan el porcentaje del valor presente de los costos operacionales del sistema incurridos por las plantas desalinizadoras (PD) y los sistemas de impulsión de agua desalinizada (SIAD) en todo el periodo de simulación de cada escenario.

Tabla 6.3. Costos de operación estimados para las plantas desalinizadoras (PD) de las faenas mineras y sus sistemas de impulsión de agua desalinizada (SIAD) con sus respectivos porcentajes.

| Escenario                   | Costos operacionales [MMUS\$] |       | Porcentaje |       |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------------|-------|
|                             | PD                            | SIAD  | PD         | SIAD  |
| Interconexión con SWAP      | 851                           | 1.612 | 34,5%      | 65,5% |
| Interconexión sin SWAP      | 851                           | 1.655 | 34,0%      | 66,0% |
| Situación sin interconexión | 846                           | 1.512 | 35,9%      | 64,1% |

### 6.2.3 Costo total mensuales

El costo total se determina como la suma de los costos de inversión y los operacionales del sistema en cada mes de simulación. En la Figura 6.4 se presenta el costo total mensual de cada escenario en el periodo de modelación.

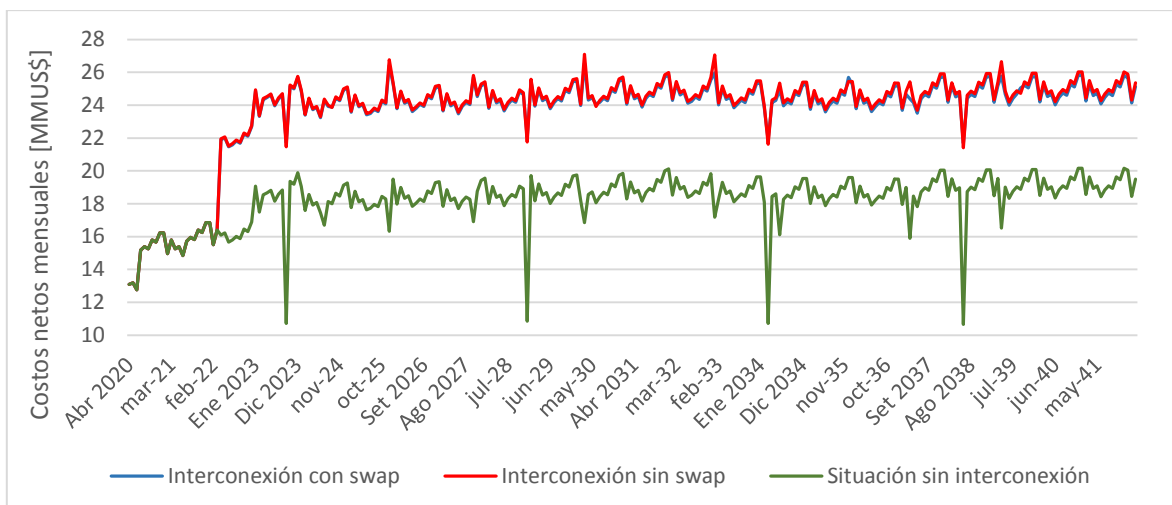


Figura 6.4. Costo total mensual de cada escenario simulado con la información base [MMUS\$/mes].

A partir de la Figura 6.4, se observa que los costos operacionales de los escenarios de interconexión con y sin swap son muy cercanos. En los meses sin fallas, el valor del ahorro de costos estimado es de unos US\$ 60.000 mensuales en el primer año de intercambio hídrico y en el último año este valor aumenta a unos US\$ 190.000 mensuales en los últimos años de la simulación, debido esencialmente al aumento del monto de agua intercambiado.

#### 6.2.4 Valor presente del costo total

Para cada alternativa se estima el valor presente de los costos y el diferencial del costo total con respecto a la situación sin interconexión, los cuales se presentan en la Tabla 6.4 en millones de dólares [MMUS\$]. En el caso del costo de capital, los valores difieren a los presentados en la Tabla 6.2, debido a que éstas se comienzan a materializar en el año 2 de las simulaciones.

Además, es necesario mencionar que, dado que el periodo de simulación comienza en el año 2021, considerado año base y la infraestructura de interconexión se asume operando en el año 2023. Los resultados de valor presente considerados en este estudio consideran los flujos de costos desde el año 2022 hasta el año 2042 llevados a moneda del año 2021. Por otro lado, se define que el año financiero comienza en abril del año anterior y finaliza en marzo del año respectivo

Tabla 6.4. Valor presente de los costos [MMUS\$].

| Escenario                   | Costo de capital | Costo de operación | Costo total | Diferencial |
|-----------------------------|------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Interconexión con swap      | 602              | 2.463              | 3.065       | 707         |
| Interconexión sin swap      | 573              | 2.506              | 3.079       | 721         |
| Situación sin interconexión | 0                | 2.358              | 2.358       | 0           |

A partir de estos resultados, se puede observar que en esta simulación (con la información base) y en caso de considerar como situación base el escenario de interconexión sin intercambio hídrico, realizar el intercambio hídrico sería conveniente, ya que, la inversión realizada sería menor que el

ahorro de costos operacionales en 20 años producido por una menor impulsión de agua desde el mar hacia las faenas mineras cordilleranas.

## 6.3 Costo del agua

### 6.3.1 Costo mensual del agua desalinizada

Este costo considera el agua producida por las plantas desalinizadoras y transportada por los sistemas de impulsión de las faenas mineras. Se determina mediante la ecuación 4.16.

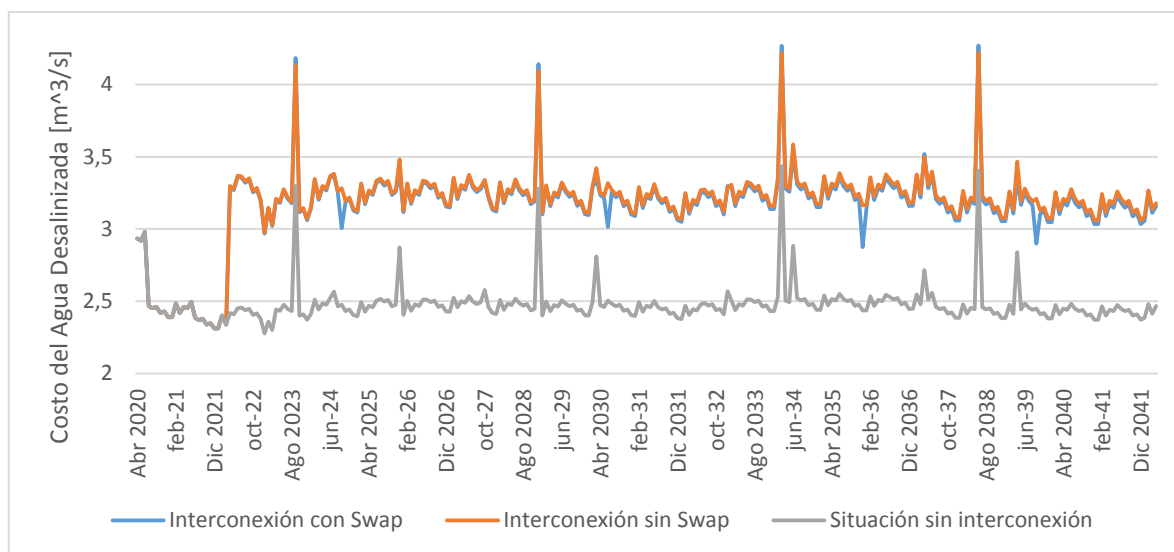


Figura 6.5. Costos medios mensuales del agua desalinizada en el sistema hídrico.

A partir de la figura anterior se puede observar el aumento del costo medios del agua desalinizada producidos por un aumento de los costos de inversión y operación en los escenarios con interconexión.

Además, dado que las condiciones de disponibilidad hídrica y demanda se mantienen constantes en el periodo de modelación, el valor medio del agua desalinizada tiene una tendencia estable (prácticamente mantiene su valor) en el intervalo de tiempo analizado, sólo observándose fuertes variaciones en los instantes en donde existe una falla de alguna planta desalinizadora o SIAD.

Los valores medios de cada escenario se presentan en la Tabla 6.5

Tabla 6.5. Costo medio del agua desalinizada en el periodo de modelación.

| Escenario                   | Promedio [US\$/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Interconexión con SWAP      | 3,23                            |
| Interconexión sin SWAP      | 3,25                            |
| Situación sin interconexión | 2,48                            |

Se tiene que recordar que estos valores no incluyen el costo de inversión de las plantas desalinizadoras ni de los SIAD asociados a dichas plantas, de modo que sólo sirven como

estimador de la diferencia en el costo medio del agua, entre la situación base sin interconexión y aquellas con interconexión.

### 6.3.2 Costo medio mensual incremental de la interconexión

Dado que existe una gran cantidad de periodos en donde no hay uso de la interconexión, se estaría pagando en promedio un costo medio incremental de  $62,6 \text{ US\$/m}^3$  y  $72,6 \text{ US\$/m}^3$  en los escenarios con y sin swap respectivamente en el periodo de 20 años.

## 6.4 Análisis de sensibilidad

Para observar el comportamiento de los escenarios planteados en el modelo operacional utilizando otros valores de entrada se realiza el análisis de sensibilidad. En este análisis, se modifican en igual porcentaje los valores de las demandas hídricas de las faenas mineras y la disponibilidad de aguas continentales.

### 6.4.1 Demandas hídricas

Dado que no se dispone de información para caracterizar en qué sitios se tiene una mayor incertidumbre sobre el valor de las demandas hídricas y cuánto podría variar el valor en cada una, se decide realizar una variación porcentual en el último año de la demanda hídrica de todos los sitios de demanda de las faenas mineras.

La demanda hídrica en los años intermedios tendrá un aumento suavizado desde el año 2021 hasta el 2042, último año de simulación, tal como se puede observar en la Figura 6.6.

#### 6.4.1.1 Aumento en un 20 % de las demandas al año 2042

A continuación, se presentan los principales indicadores de los resultados del modelo considerando un aumento de la demanda en un 20% por sobre lo utilizado en el caso inicial.

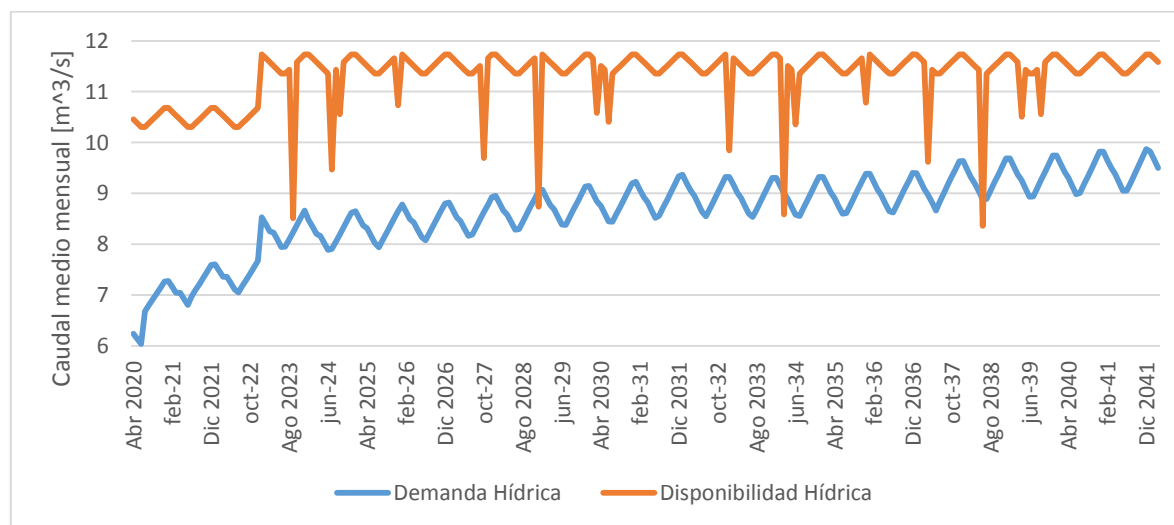


Figura 6.6. Demanda y disponibilidad hídrica en el caso de un 20% de aumento de la demanda.

En este caso, la demanda total en el periodo de modelación es de 5.999 millones de  $m^3$  y la disponibilidad hídrica es de 7.846 millones de  $m^3$ .

#### 6.4.1.1.1 Caudal medio mensual no suministrado y volumen suministrado

El caudal medio mensual no suministrado a los sitios de demandas se presenta en la siguiente figura.

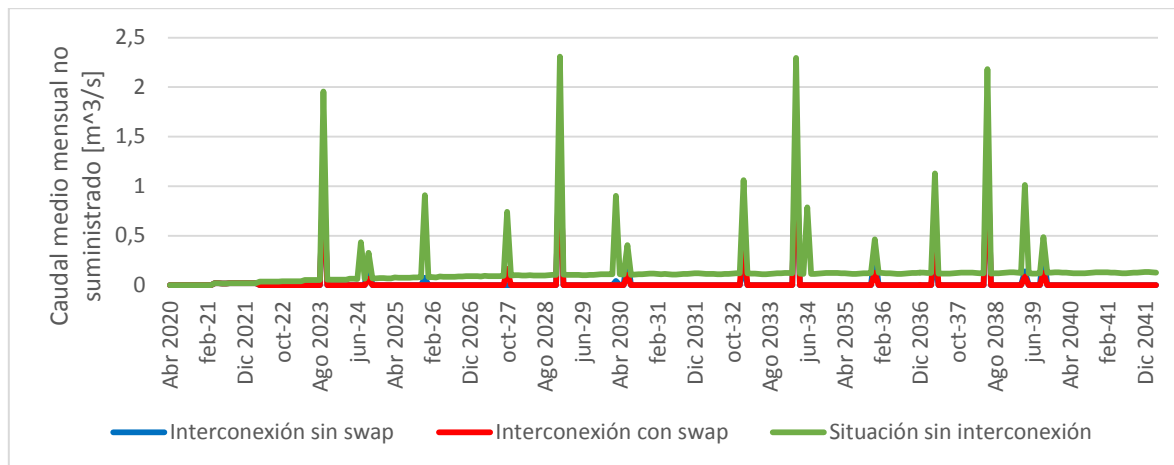


Figura 6.7. Caudal medio mensual no suministrado en el caso con un 20% del aumento de la demanda [ $m^3/s$ ].

En la Tabla 6.6 se presentan los volúmenes totales suministrados en cada escenario y la diferencia con respecto al caso sin interconexión.

Tabla 6.6. Volumen suministrado en cada escenario en el caso con un 20% de aumento de demanda hídrica [ $m^3$ ].

| Escenario                   | Volumen suministrado [ $m^3$ ] | Diferencia sin interconexión [ $m^3$ ] |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| Interconexión con swap      | 5.978.215.733                  | 87.252.592                             |
| Interconexión sin swap      | 5.977.700.902                  | 86.737.761                             |
| Situación sin interconexión | 5.890.963.141                  | -                                      |

Además, en la situación sin interconexión no se lograron entregar 107,6 millones de  $m^3$ , en el escenario sin swap no se suministraron 20,9 millones de  $m^3$  y en el escenario interconexión con swap 20,4 millones de  $m^3$ .

#### 6.4.1.1.2 Valor presente

En la Tabla 6.7 se presenta el valor presente de los costos y el diferencial del costo total con respecto a la situación sin interconexión de cada uno de los escenarios, considerando un aumentado de un 20% de la demanda hídrica al año 2042.

Tabla 6.7. Valor presente de los costos [MMUS\$].

| Escenario                   | Costo de operación | Costo total | Diferencial |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Interconexión con swap      | 2.885              | 3.487       | 765         |
| Interconexión sin swap      | 2.931              | 3.504       | 782         |
| Situación sin interconexión | 2.722              | 2.722       | 0           |

Comparando estos valores con el caso con información base, el valor presente del costo total aumentaría en unos 364 millones de US\$ en el escenario sin interconexión y de 425 millones de US\$ en el escenario con interconexión sin intercambio hídrico.

Además, en la Tabla 6.8 se presentan el porcentaje del valor presente de los costos operacionales del sistema incurridos por las plantas desalinizadoras y los sistemas de impulsión de agua en todo el periodo de simulación de cada escenario.

Tabla 6.8. Costos de operación estimados para las plantas desalinizadoras de las faenas mineras y sus sistemas de impulsión de agua con sus respectivos porcentajes.

| Escenario                   | Costos operacionales [MMUS\$] |       | Porcentaje |       |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------------|-------|
|                             | PD                            | SIAD  | PD         | SIAD  |
| Interconexión con SWAP      | 978                           | 1.907 | 33.9%      | 66.1% |
| Interconexión sin SWAP      | 979                           | 1.952 | 33.4%      | 66.6% |
| Situación sin interconexión | 958                           | 1.764 | 35.2%      | 64.8% |

#### 6.4.1.1.3 Costo medio mensual agua desalinizada

En la Figura 6.8 se presenta el comportamiento del costo medio mensual del agua desalinizada y en la Tabla 6.9 los costos medios del agua desalinizada en cada escenario en el periodo de modelación.

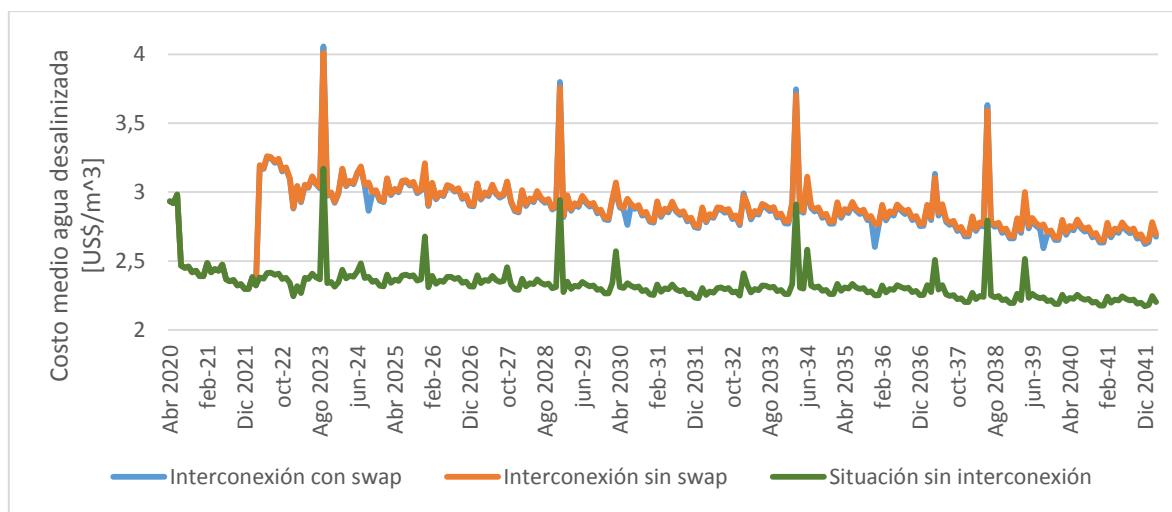


Figura 6.8. Costo medio mensual del agua desalinizada en el periodo de modelación.

Tabla 6.9. Costo medio del agua desalinizada en el periodo de modelación.

| Escenario                   | Promedio [ $US\$/m^3$ ] |
|-----------------------------|-------------------------|
| Interconexión Con SWAP      | 2,84                    |
| Interconexión Sin SWAP      | 2,86                    |
| Situación sin interconexión | 2,31                    |

De esta tabla se desprende que el costo medio del agua desalinizada aumentaría aproximadamente entre  $0,53 US\$/m^3$  y  $0,55 US\$/m^3$  en los escenarios con interconexión.

#### 6.4.1.1.4 Costo medio mensual incremental agua desalinizada

En la Figura 6.9 se presenta el costo medio mensual incremental del agua en el periodo de modelación.

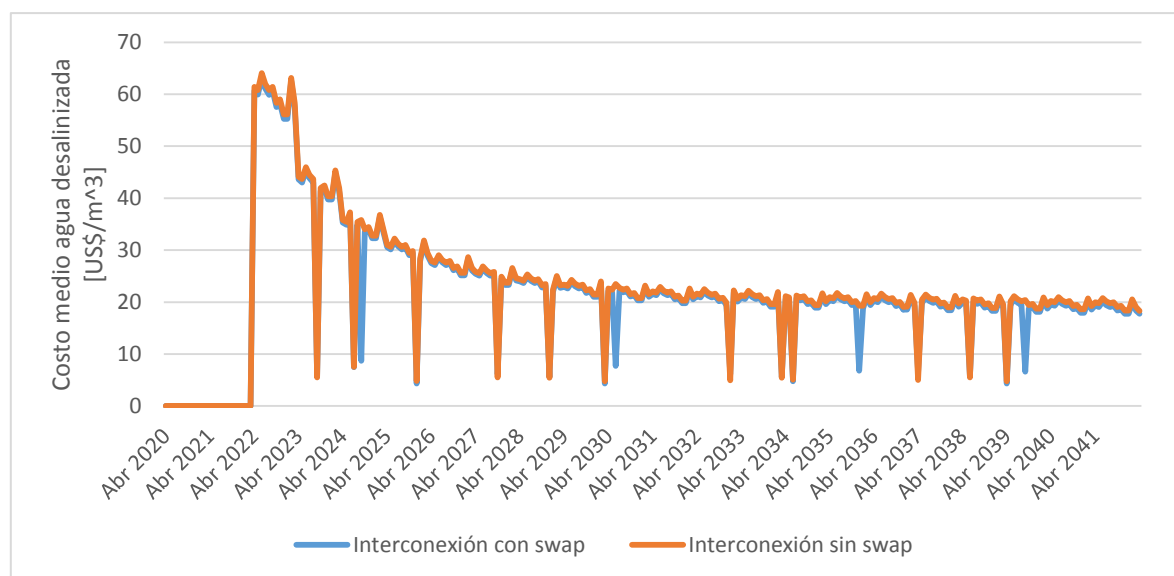


Figura 6.9. Costo incremental del agua en el periodo de modelación.

El valor medio del agua desalinizada incremental es de  $17,77 USW\$/m^3$  y  $18,34 US\$/m^3$  en los escenarios con swap y sin swap respectivamente.

#### 6.4.1.2 Aumento en un 40% de las demandas hídricas al año 2042

En este caso, las demandas de todo el sistema aumentan progresivamente su valor hasta alcanzar un 40% superior al año inicial, la disponibilidad hídrica se mantiene constante con respecto a la información base.

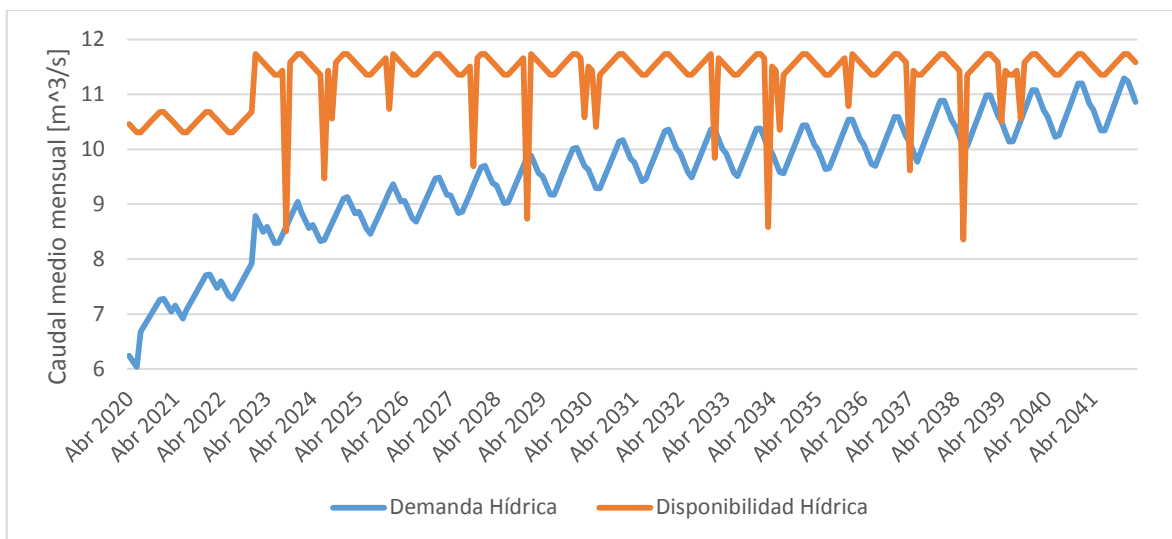


Figura 6.10. Demanda y disponibilidad hídrica agregada en el caso con un 40% de aumento de la demanda.

La demanda total en el periodo de modelación es de 6.573 millones de  $m^3$  y la disponibilidad se mantiene en 7.846 millones de  $m^3$ .

#### 6.4.1.2.1 Caudal medio mensual no suministrado y volumen suministrado

El caudal medio mensual no suministrado a los sitios de demandas se presenta en la Figura 6.11.

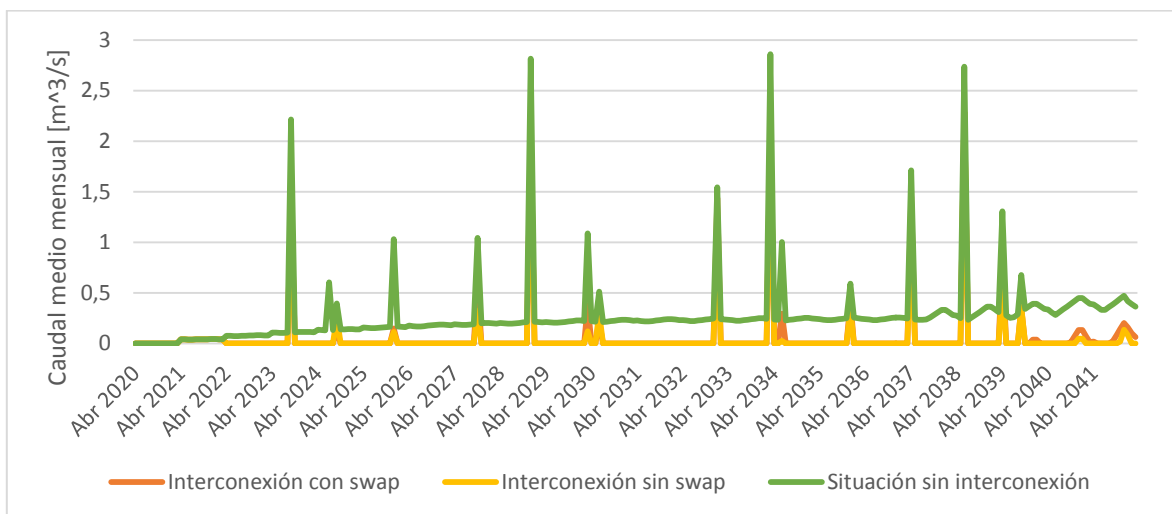


Figura 6.11. Caudal medio mensual no suministrado en el caso con un aumento de un 40% de las demandas hídricas.

En la situación base no se lograron entregar 195,16 millones de  $m^3$ , en el escenario interconexión sin swap no se entregaron 35,46 millones de  $m^3$  y en el escenario interconexión con swap 42,1 millones de  $m^3$ .

Por otro lado, el volumen suministrado en cada escenario corresponde a los presentados en la Tabla 6.10.

*Tabla 6.10. Volumen suministrado en cada escenario en el caso con un 40% de aumento de demanda hídrica [ $m^3$ ].*

| Escenario                   | Volumen suministrado [ $m^3$ ] | Diferencia sin interconexión [ $m^3$ ] |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| Interconexión con swap      | 6.531.079.465                  | 153.051.414                            |
| Interconexión sin swap      | 6.537.722.920                  | 159.694.868                            |
| Situación sin interconexión | 6.378.028.052                  | -                                      |

#### 6.4.1.2.2 Valor presente

En la Tabla 6.11 se presenta el valor presente de los costos y el diferencial del costo total con respecto a la situación sin interconexión de cada uno de los escenarios, considerando un aumentado de un 40% de la demanda hídrica al año 2042.

*Tabla 6.11. Valor presente de los costos [MMUS\$].*

| Escenario                   | Costo de operación | Costo total | Diferencial |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Interconexión con swap      | 3.305              | 3.907       | 825         |
| Interconexión sin swap      | 3.352              | 3.925       | 843         |
| Situación sin interconexión | 3.082              | 3.082       | 0           |

En comparación a los valores presentes del costo total obtenidos utilizando la información base, la situación base aumentaría el costo en 724 millones de US\$, los escenarios con interconexión sin swap y con swap en 846 y 842 millones de US\$ respectivamente.

Además, en la Tabla 6.12 se presentan el porcentaje del valor presente de los costos operacionales del sistema incurridos por las plantas desalinizadoras y los sistemas de impulsión de agua en todo el periodo de simulación de cada escenario.

*Tabla 6.12. Costos de operación estimados para las plantas desalinizadoras de las faenas mineras y sus sistemas de impulsión de agua con sus respectivos porcentajes.*

| Escenario                   | Costos operacionales [MMUS\$] |       | Porcentaje |       |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------------|-------|
|                             | PD                            | SIAD  | PD         | SIAD  |
| Interconexión con SWAP      | 1.103                         | 2.202 | 33,4%      | 66,6% |
| Interconexión sin SWAP      | 1.105                         | 2.247 | 33,0%      | 67,0% |
| Situación sin interconexión | 1.068                         | 2.014 | 34,7%      | 65,3% |

#### 6.4.1.2.3 Costo medio mensual del agua desalinizada

En la Figura 6.12 se presentan los costos medios mensuales y en la Tabla 6.13 el promedio de los costos medios mensuales en el periodo de modelación.

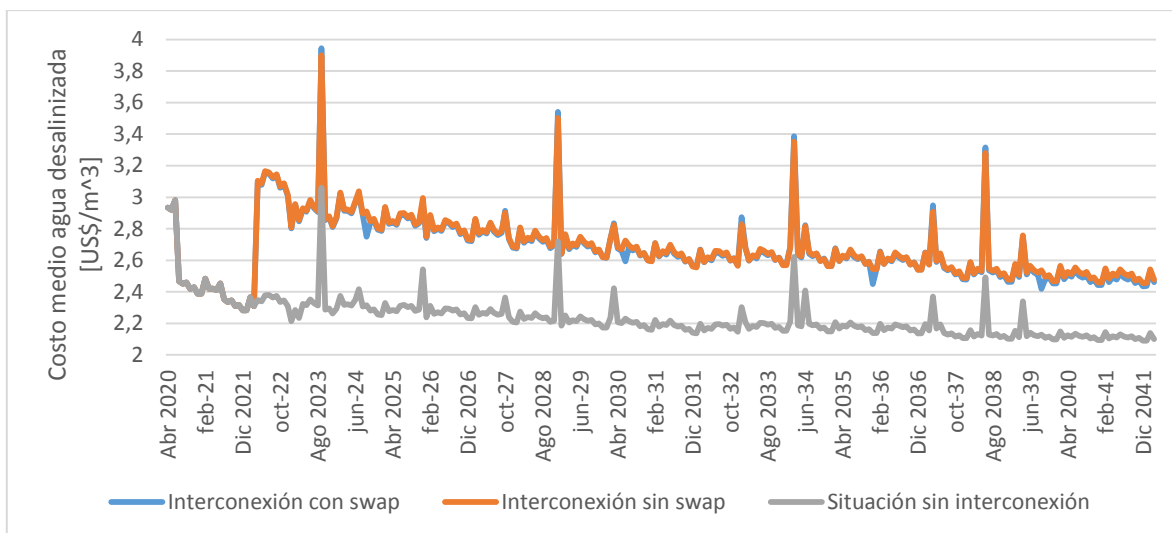


Figura 6.12. Costos medios mensuales del agua desalinizada en el caso de un 40% de aumento en la demanda hídrica.

Tabla 6.13. Costos medio del agua desalinizada en el periodo de modelación en el caso con un 40% de aumento de demanda hídrica.

| Escenario                   | Promedio [ $US\$/m^3$ ] |
|-----------------------------|-------------------------|
| Interconexión con swap      | 2,65                    |
| Interconexión sin swap      | 2,66                    |
| Situación sin interconexión | 2,21                    |

De esta tabla se desprende que el costo medio del agua desalinizada aumentaría aproximadamente entre  $0,44\ US\$/m^3$  y  $0,45\ US\$/m^3$  en los escenarios con interconexión.

#### 6.4.1.2.4 Costo medio mensual incremental agua desalinizada

En la Figura 6.13 se presenta el costo medio mensual incremental del agua desalinizada para los escenarios con interconexión en el caso de que la demanda aumenta gradualmente en un 40% hasta el último año de la simulación.

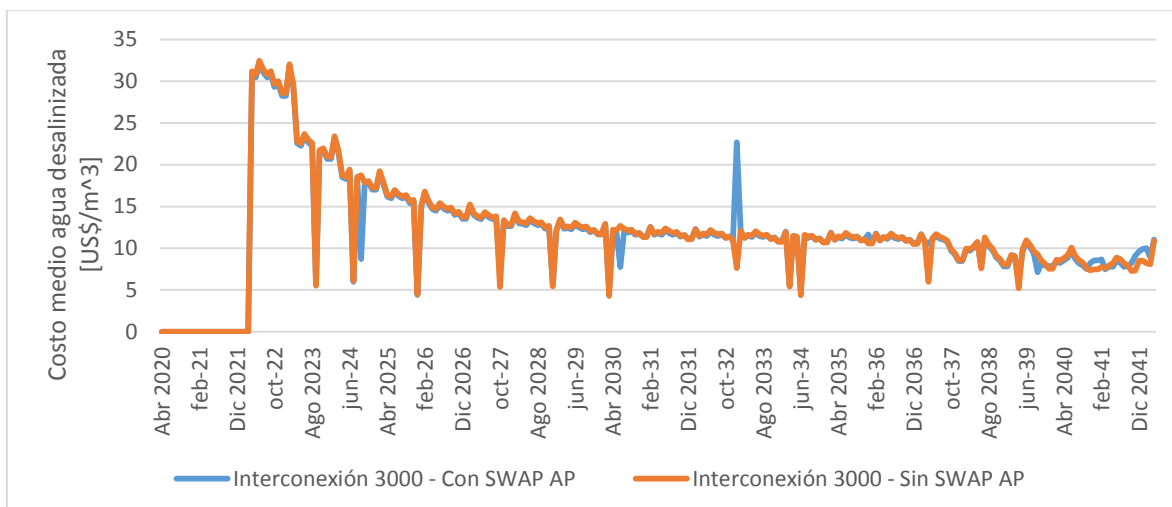


Figura 6.13. Costo medio mensual incremental del caso con un 40% de aumento de la demanda hídrica.

En este caso, el valor medio del agua incremental tendría un costo de 11,04 US\$/m<sup>3</sup> y 10,85 US\$/m<sup>3</sup> en los casos con y sin intercambio hídrico respectivamente.

#### 6.4.2 Disponibilidad Hídrica de aguas continentales

En este análisis de sensibilidad, el descenso de la disponibilidad de aguas continentales se realiza de manera escalonada como se puede observar en la Figura 6.14.

##### 6.4.2.1 Descenso en un 20% de los recursos totales y un aumento en un 20 % de la demanda al año 2042

En este caso, la demanda total en el periodo de modelación es de 5.999 millones de m<sup>3</sup> y la disponibilidad se descende a 7.484 millones de m<sup>3</sup>.

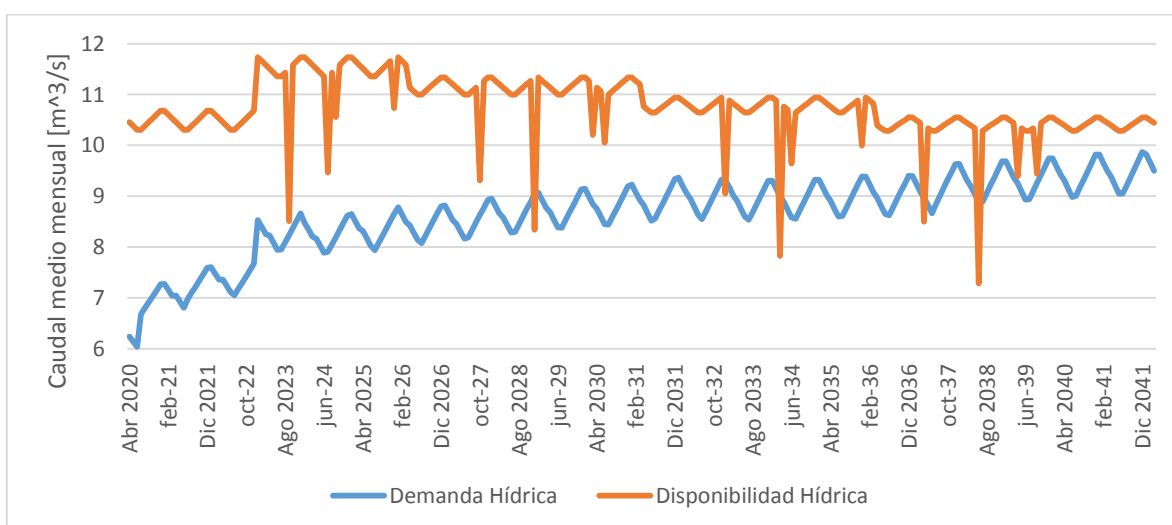


Figura 6.14. Demanda y disponibilidad hídrica agregada en el caso con un 20% de aumento de la demanda y 20% de descenso de recursos continentales.

## 6.4.2.1.1 Caudal medio mensual no suministrado y volumen suministrado

El caudal medio mensual no suministrado a los sitios de demandas se presenta en la Figura 6.15 y en la Tabla 6.14 se presenta el volumen suministrado en cada escenario.

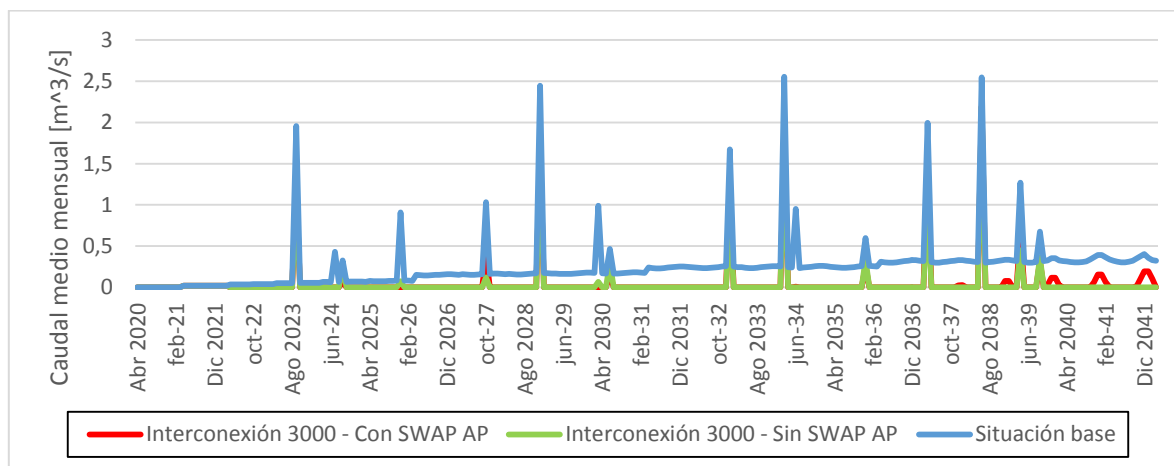


Figura 6.15. Caudal medio mensual no suministrado.

En la situación base no se lograron entregar 156,07 millones de  $m^3$ , en el escenario interconexión sin swap no se entregaron 25,32 millones de  $m^3$  y en el escenario interconexión con swap no se suministraron 26,19 millones  $m^3$ .

Tabla 6.14. Volumen suministrado en todo el periodo de modelación en caso con un aumento del 20% de la demanda y descenso de un 20% de los recursos continentales.

| Escenario                   | Volumen suministrado [ $m^3$ ] | Diferencia [ $m^3$ ] |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Interconexión con swap      | 5.972.444.711                  | 129.878.071          |
| Interconexión sin swap      | 5.973.318.175                  | 130.751.535          |
| Situación sin interconexión | 5.842.566.640                  | 0                    |

## 6.4.2.1.2 Valor presente

En la Tabla 6.15 se presenta el valor presente de los costos y el diferencial del costo total con respecto a la situación sin interconexión de cada uno de los escenarios, considerando un aumentado de un 20% de la demanda hídrica y un 20% de descenso en la disponibilidad de recursos hídricos continentales al año 2042.

Tabla 6.15. Valor presente del costo total [MMUS\$].

| Escenario                   | Costo de operación | Costo total | Diferencial |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Interconexión con swap      | 3.051              | 3.653       | 796         |
| Interconexión sin swap      | 3.097              | 3.670       | 814         |
| Situación sin interconexión | 2.857              | 2.857       | 0           |

En comparación a los valores presentes del costo total obtenidos utilizando la información base, la situación base aumentaría el costo en 499 millones de US\$, los escenarios con interconexión sin swap y con swap en 591 y 588 millones de US\$ respectivamente.

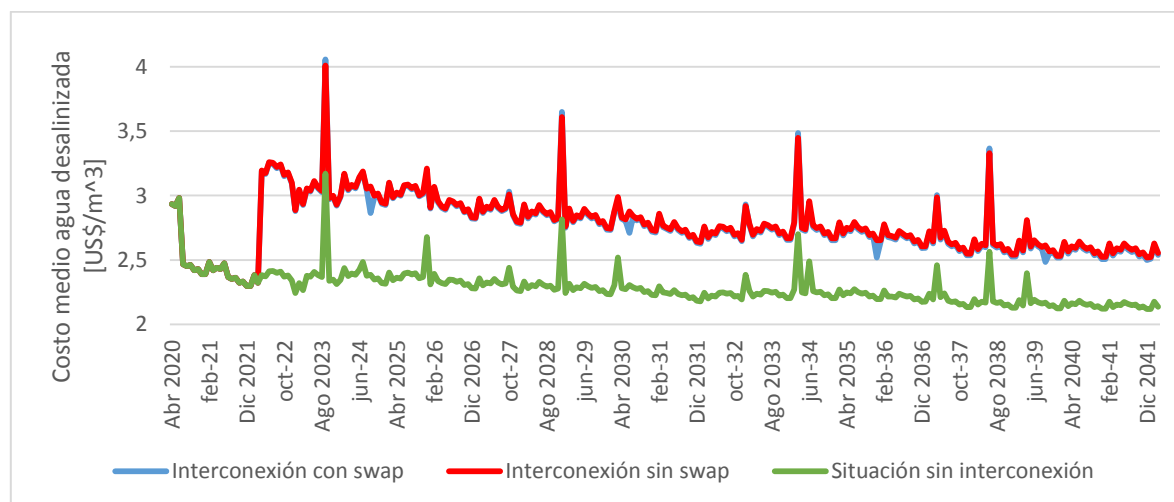
Además, en la Tabla 6.16 se presentan el porcentaje del valor presente de los costos operacionales del sistema incurridos por las plantas desalinizadoras y los sistemas de impulsión de agua en todo el periodo de simulación de cada escenario.

*Tabla 6.16. Costos de operación estimados para las plantas desalinizadoras de las faenas mineras y sus sistemas de impulsión de agua con sus respectivos porcentajes.*

| Escenario                   | Costos operacionales [MMUS\$] |       | Porcentaje |       |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------------|-------|
|                             | PD                            | SIAD  | PD         | SIAD  |
| Interconexión con SWAP      | 1.028                         | 2.023 | 33,7%      | 66,3% |
| Interconexión sin SWAP      | 1.029                         | 2.068 | 33,2%      | 66,8% |
| Situación sin interconexión | 1.001                         | 1.856 | 35,0%      | 65,0% |

#### 6.4.2.1.3 Costo medio mensual del agua desalinizada

El costo medio del agua desalinizada en cada escenario se presenta en la Figura 6.16 y el costo promedio de todo el periodo en la Tabla 6.17.



*Figura 6.16. Costo medio mensual del agua desalinizada en el caso en que aumenta un 20% la demanda y un 20% de disminución de recursos continentales.*

*Tabla 6.17. Costo medio del agua desalinizada en el periodo de modelación.*

| Escenario                   | Promedio [US\$/m³] |
|-----------------------------|--------------------|
| Interconexión con swap      | 2,74               |
| Interconexión sin swap      | 2,76               |
| Situación sin interconexión | 2,26               |

De esta tabla se desprende que el costo medio del agua desalinizada aumentaría aproximadamente entre  $0,48 \text{ US\$/m}^3$  y  $0,5 \text{ US\$/m}^3$  en los escenarios con interconexión.

#### 6.4.2.1.4 Costo medio mensual incremental agua desalinizada

En la Figura 6.17 se presenta el costo medio mensual incremental del agua desalinizada para los escenarios con interconexión en el caso de que los recursos continentales disminuyan en un 20% y la demanda aumente hasta un 20% en el último año de la simulación.

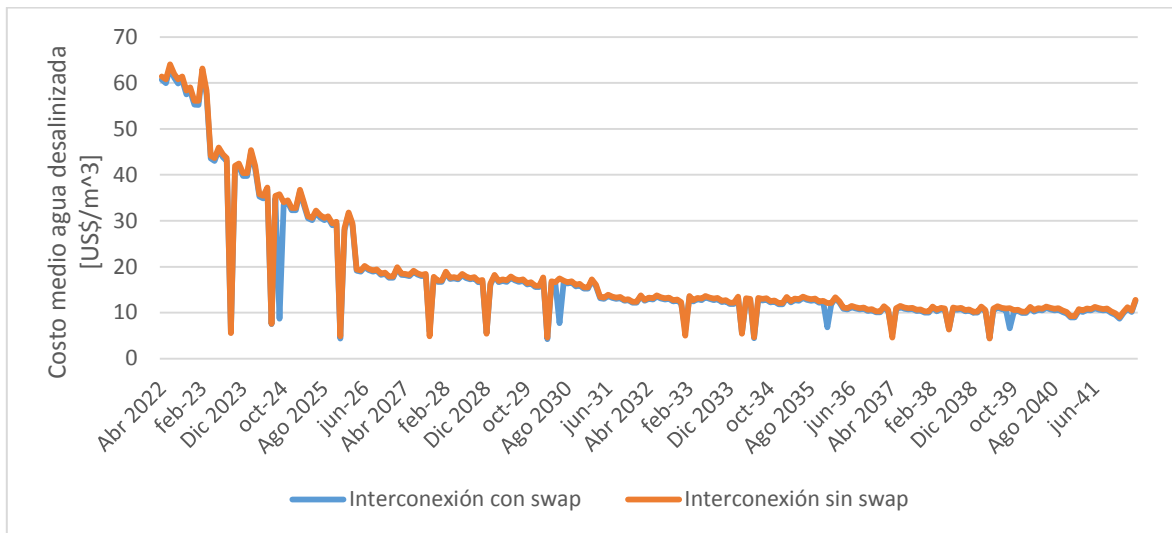


Figura 6.17. Costo medio incremental del agua desalinizada para el caso con un aumento del 20% de demanda y un descenso del 20% en aguas continentales.

En este caso, el valor medio del agua incremental tendría un costo de  $12,58 \text{ US\$/m}^3$  y  $12,82 \text{ US\$/m}^3$  en los casos con y sin intercambio hídrico respectivamente.

#### 6.4.2.2 Descenso en un 50% de los recursos hídricos continentales y un aumento del 20% de la demanda al año 2042

En este caso se induce un mayor uso de la interconexión debido a las peores condiciones hídricas a causa de un descenso en un 50% de los recursos hídricos continentales y a un aumento de los requerimientos hídricos de los sitios de demanda hasta en un 20%.

En este caso, la demanda total en el periodo de modelación es de 5.999 millones de  $\text{m}^3$  y la disponibilidad se mantiene en 7.193 millones de  $\text{m}^3$ .

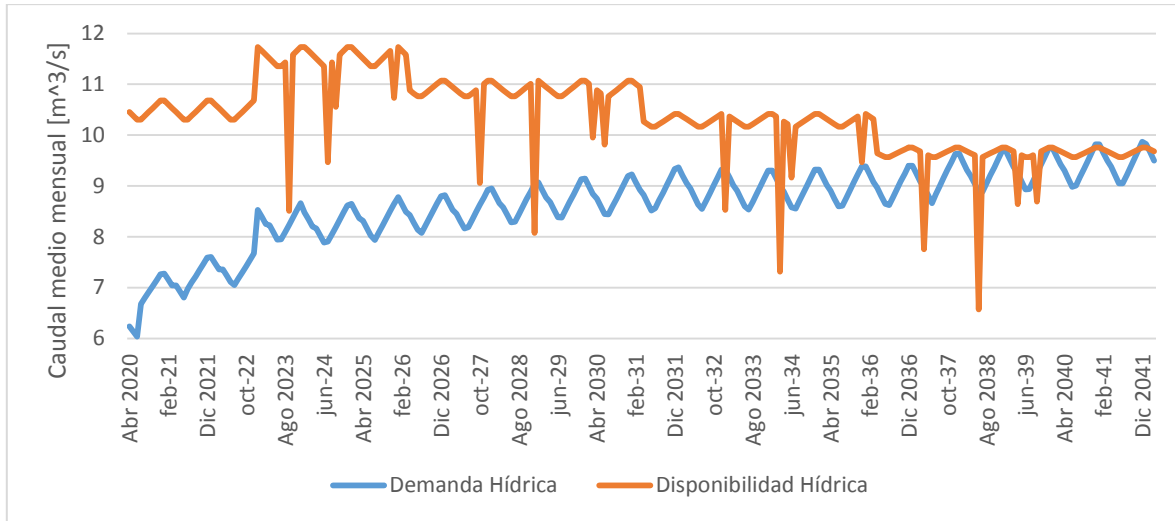


Figura 6.18. Demanda y disponibilidad hídrica agregada en el caso con un 20% de aumento de la demanda y un 50% de descenso en los recursos continentales.

#### 6.4.2.2.1 Caudal medio no suministrado y volumen

El caudal medio mensual no suministrado a los sitios de demandas se presenta en la Figura 6.19 y en la Tabla 6.18 se presenta el volumen suministrado por escenario.

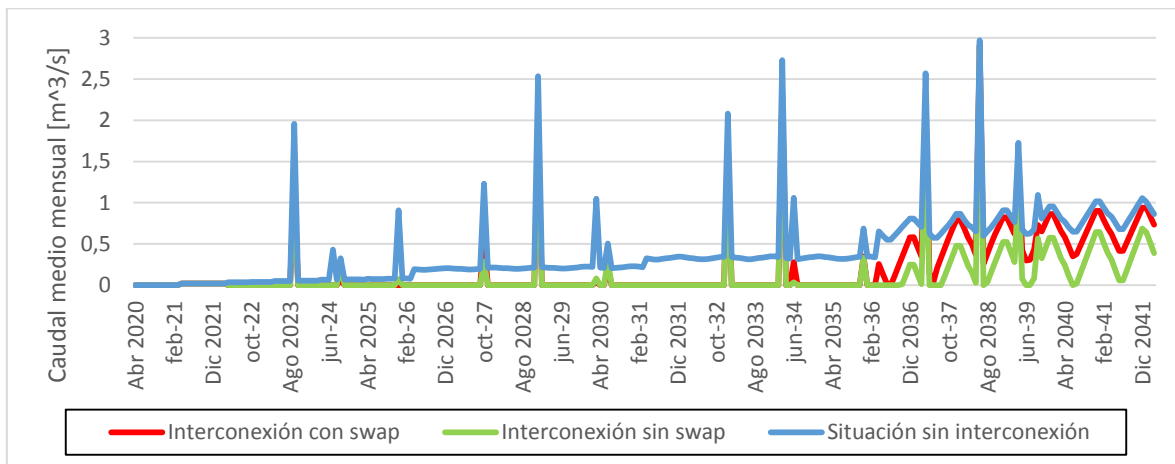


Figura 6.19. Caudal medio mensual no suministrado.

En la situación sin interconexión no se entregaron 287,6 millones de  $m^3$ , en el escenario interconexión sin swap no se entregaron 83,44 millones de  $m^3$  y en el escenario interconexión con swap no se suministraron 139,04 millones de  $m^3$ .

*Tabla 6.18. Volumen suministrado en todo el periodo de modelación en caso con un aumento del 20% de la demanda y descenso de un 50% de los recursos continentales.*

| Escenario                   | Volumen suministrado [ $m^3$ ] | Diferencia [ $m^3$ ] |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Interconexión con swap      | 5.859.597.291                  | 148.598.834          |
| Interconexión sin swap      | 5.915.190.368                  | 204.191.911          |
| Situación sin interconexión | 5.710.998.457                  | 0                    |

#### 6.4.2.2.2 Valor presente

En la Tabla 6.19 se presenta el valor presente de los costos y el diferencial del costo total con respecto a la situación sin interconexión de cada uno de los escenarios, considerando un aumentado de un 20% de la demanda hídrica y un 50% de descenso en la disponibilidad de recursos hídricos continentales al año 2042.

*Tabla 6.19. Valor presente del costo total [MMUS\$].*

| Escenario                   | Costo de operación | Costo total | Diferencial |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Interconexión con swap      | 3.246              | 3.848       | 818         |
| Interconexión sin swap      | 3.325              | 3.898       | 868         |
| Situación sin interconexión | 3.030              | 3.030       | 0           |

En comparación a los valores presentes del costo total obtenidos utilizando la información base, la situación base aumentaría el costo en 672 millones de US\$, los escenarios con interconexión sin swap y con swap en 819 y 783 millones de US\$ respectivamente.

Además, en la Tabla 6.20 se presentan el porcentaje del valor presente de los costos operacionales del sistema incurridos por las plantas desalinizadoras y los sistemas de impulsión de agua en todo el periodo de simulación de cada escenario.

*Tabla 6.20. Costos de operación estimados para las plantas desalinizadoras de las faenas mineras y sus sistemas de impulsión de agua con sus respectivos porcentajes.*

| Escenario                   | Costos operacionales [MMUS\$] |       | Porcentaje |       |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------------|-------|
|                             | PD                            | SIAD  | PD         | SIAD  |
| Interconexión con SWAP      | 1.089                         | 2.157 | 33,5%      | 66,5% |
| Interconexión sin SWAP      | 1.098                         | 2.227 | 33,0%      | 67,0% |
| Situación sin interconexión | 1.055                         | 1.975 | 34,8%      | 65,2% |

#### 6.4.2.2.3 Costo medio mensual del agua desalinizada

El costo medio mensual del agua desalinizada se presenta en la Figura 6.20 y el costo promedio en el periodo de simulación en la Tabla 6.21.

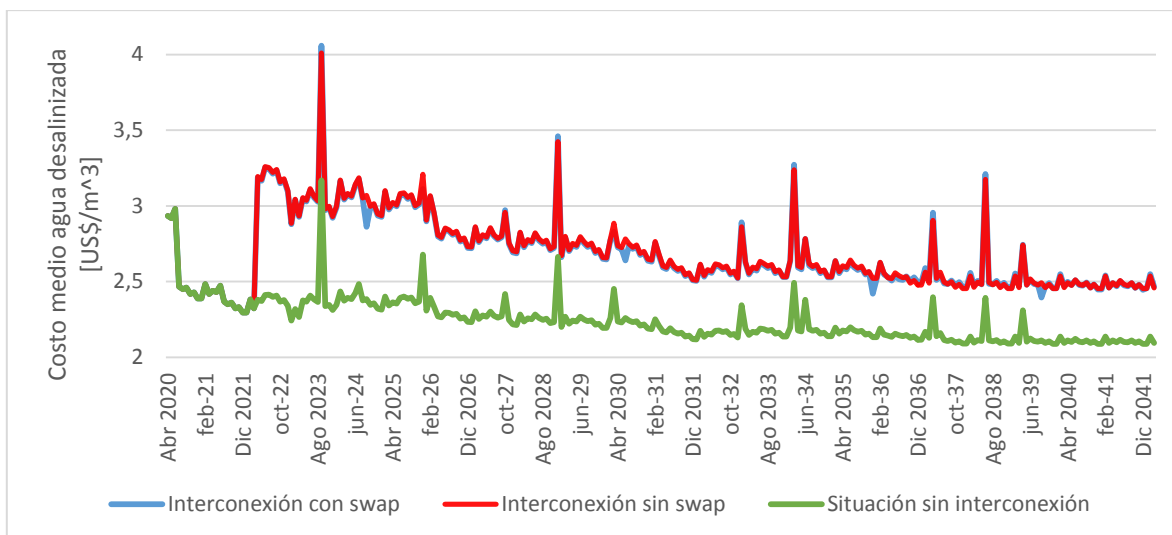


Figura 6.20. Costo medio mensual del agua desalinizada en el caso en que aumenta un 20% la demanda y un 50% de disminución de recursos continentales.

Tabla 6.21. Costo medio del agua desalinizada en el periodo de simulación.

| Escenario                   | Promedio [US\$/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Interconexión con swap      | 2,65                            |
| Interconexión sin swap      | 2,65                            |
| Situación sin interconexión | 2,21                            |

De esta tabla se desprende que el costo medio del agua desalinizada aumentaría aproximadamente 0,44 US\$/m<sup>3</sup> en los escenarios con interconexión.

#### 6.4.2.2.4 Costo medio mensual incremental agua desalinizada

En la Figura 6.21 se presenta el costo medio mensual incremental del agua desalinizada para los escenarios con interconexión en el caso de que los recursos continentales disminuyan en un 50% y la demanda aumente hasta un 20% en el último año de la simulación.

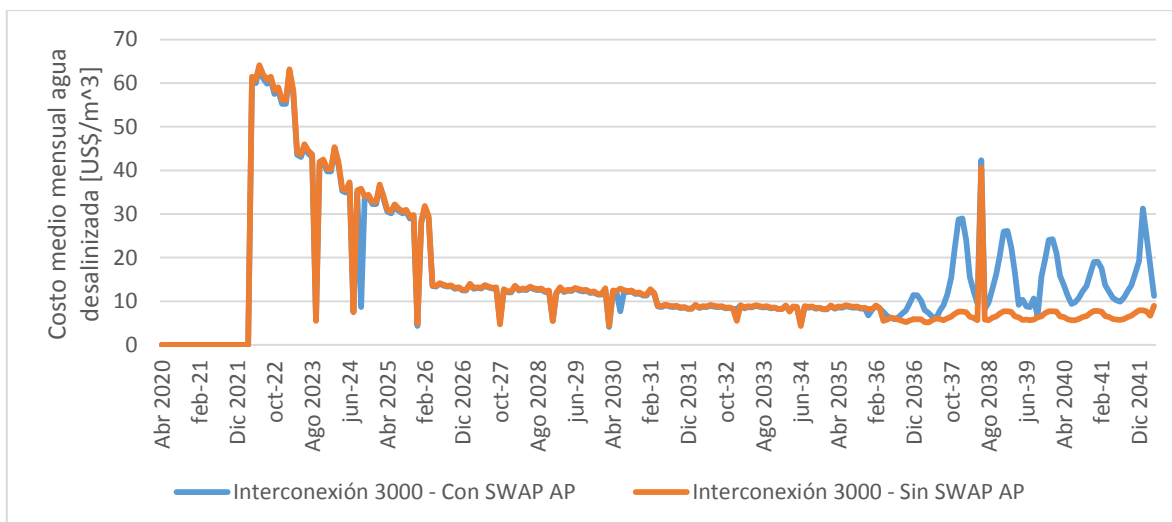


Figura 6.21. Costo medio incremental del agua desalinizada para el caso con un aumento del 20% de demanda y un descenso del 50% en aguas continentales.

En este caso, el costo incremental medio del agua tendría un costo de  $11,23 \text{ US\$/m}^3$  y  $8,94 \text{ US\$/m}^3$  en los casos con y sin intercambio hídrico respectivamente.

Además, en la Figura 6.21 se observa que en los últimos años el costo incremental del agua baja de los  $6 \text{ US\$/m}^3$  en algunos meses, teniendo un promedio de  $6,68 \text{ US\$/m}^3$ .

Por otro lado, en la Figura 6.22 se aprecia como varía el costo unitario del agua en cada mes del año, teniendo un valor mayor en los meses con mayor demanda y disminuyendo en los meses de junio y julio en donde la demanda hídrica es menor.

La principal razón que explica este comportamiento es que un aumento de la demanda y un descenso de los recursos hídricos, produce en la situación sin interconexión un alto grado de uso en la infraestructura de agua desalinizada, por lo que en el escenario con interconexión, el aumento de volumen suministrado de agua desalinizada debido a la infraestructura proyectada es bajo, dada la poca agua disponible para suministrar en la interconexión en comparación a los meses de menor demanda y esto produciría que el precio sea más alto en los meses de mayor demanda.

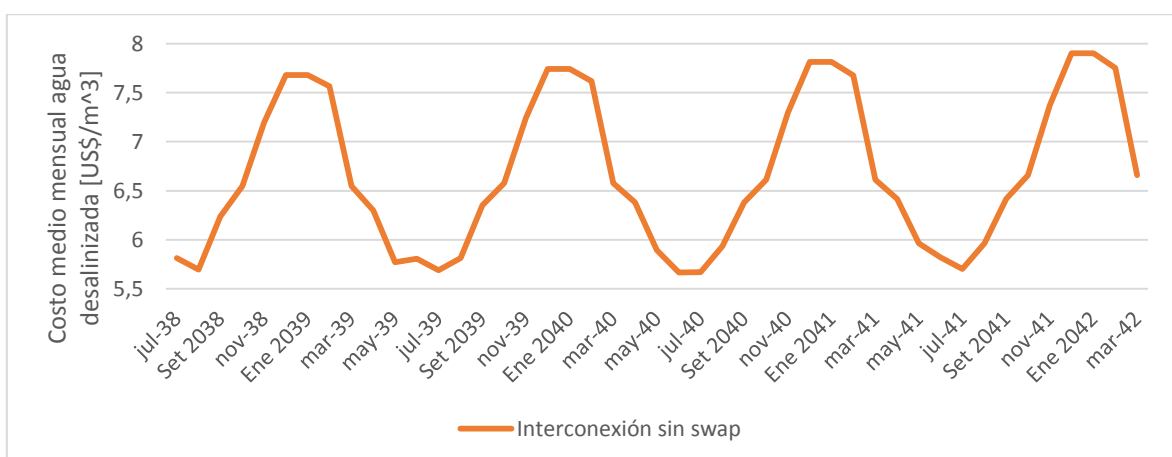


Figura 6.22. Costo incremental del escenario interconexión sin swap en el periodo julio 2038 – marzo 2042.

Finalmente, debido al descenso del costo incremental en el último periodo de simulación de este caso y a fin de obtener costos incrementales más bajo, se monitorean los flujos en la tubería de interconexión para observar en qué zona es más utilizada. En la Figura 6.23 se observan los flujos en los distintos tramos de la tubería, observándose que en el tramo entre Escondida y Gabriela Mistral-Lomas Bayas existe un mayor flujo en el último periodo en el cual los costos incrementales son menores.

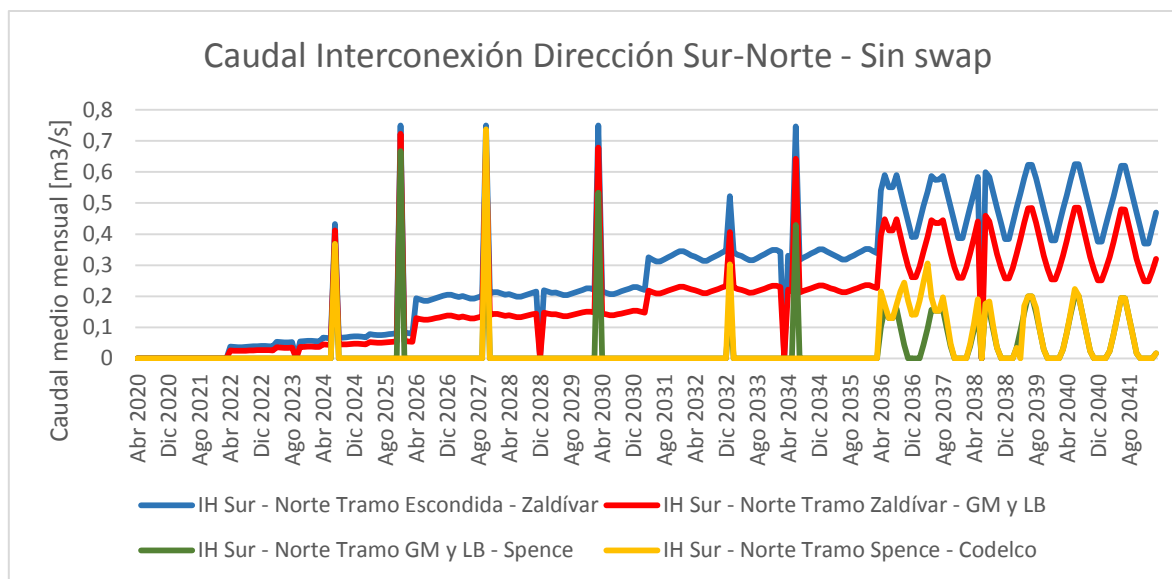


Figura 6.23. Caudales medios mensuales en la tubería de interconexión en el caso con un 20% de aumento de demanda y un descenso de un 50% de los recursos continentales para el escenario sin swap.

A partir de los flujos presentados en la Figura 6.23 se observar que los tramos más utilizados son los desde Escondida hasta Gabriela Mistral y Lomas Bayas, pasando por la minera Zaldívar. A partir de lo anterior y con la finalidad de obtener menores costos incrementales, se crean dos escenarios más para ser analizados en este caso.

### 6.4.3 Nuevos escenarios

Los nuevos escenarios que se generan consideran solamente una parte de las inversiones que se realizan en el escenario de interconexión sin swap, en la Tabla 6.22 se presentan los tramos considerados y el monto de cada inversión.

Tabla 6.22. Costos de inversión de los nuevos escenarios generados [US\$].

| Tramo                              | Prolongación SIAD Escondida | Interconexión Escondida-Spence |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Interconexión Escondida - Zaldívar | 2.765.573                   | 2.801.146                      |
| Interconexión Zaldívar - GM y LB   | 148.500.780                 | 160.929.696                    |
| Interconexión GM y LB - Spence     | -                           | 111.213.840                    |
| Conexión hacia Zaldívar            | 6.281.635                   | 6.281.635                      |
| Conexión hacia Lomas Bayas         | 43.064.775                  | 43.064.775                     |
| Conexión hacia Gabriela Mistral    | 2.005.840                   | 2.005.840                      |
| Conexión Spence                    | -                           | 104.737.230                    |
| <b>Total</b>                       | <b>202.618.603</b>          | <b>431.034.163</b>             |

Los resultados presentados para estos escenarios se evalúan bajo el caso de un aumento de un 20% de la demanda y un descenso en los recursos continentales de un 50%. Junto con los resultados de los nuevos escenarios, se presentan los resultados obtenidos en los escenarios sin interconexión e interconexión sin swap para tenerlos como referencia.

#### 6.4.3.1 Caudal medio mensual no suministrado y volumen entregado

El caudal medio mensual no suministrado en cada escenario se presenta en la Figura 6.24 y en la Tabla 6.23 se presentan los volúmenes suministrados en cada escenario en todo el periodo de simulación.

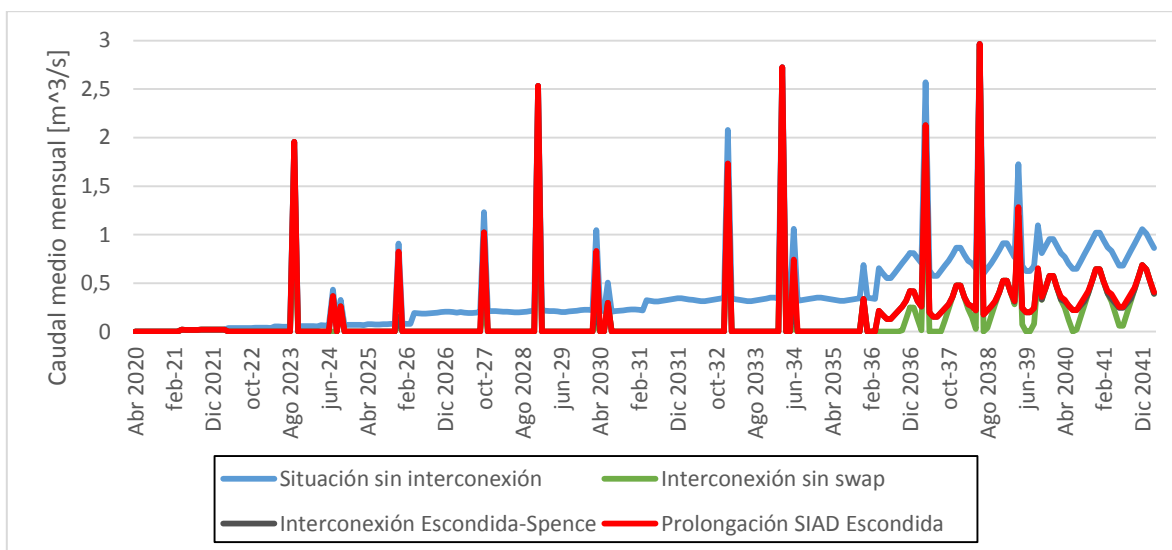


Figura 6.24. Caudal medio mensual no suministrado por escenario.

En la situación sin interconexión no se entregan 287,6 millones de  $m^3$ , en el escenario interconexión sin swap no se entregaron 83,4 millones de  $m^3$ , en el escenario interconexión

Escondida-Spence no se suministraron 111,2 millones de  $m^3$  y en el escenario prolongación de SIAD Escondida no se abastecieron 116,9 millones de  $m^3$ .

*Tabla 6.23. Volumen suministrado en los nuevos escenarios en todo el periodo de modelación, en el caso de un aumento del 20% de la demanda y descenso de un 50% de los recursos continentales.*

| Escenario                      | Volumen suministrado [ $m^3$ ] | Diferencial [ $m^3$ ] |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Ampliación SIAD Escondida      | 5.881.780.637                  | 170.782.180           |
| Interconexión sin swap         | 5.915.190.368                  | 204.191.911           |
| Interconexión Escondida-Spence | 5.887.402.348                  | 176.403.892           |
| Situación sin interconexión    | 5.710.998.457                  | 0                     |

#### 6.4.3.2 Valor presente

En la Tabla 6.24 se presenta el valor presente del costo total de los nuevos escenarios considerando un aumentado de un 20% de la demanda hídrica y un 50% de descenso en la disponibilidad de recursos hídricos continentales al año 2042.

*Tabla 6.24. Valor presente del costo total MMUS\$].*

| Escenario                        | Costo de capital | Costo de operación | Costo total |
|----------------------------------|------------------|--------------------|-------------|
| Ampliación SIAD Escondida        | 189              | 3.208              | 3.397       |
| Interconexión sin SWAP           | 573              | 3.325              | 3.898       |
| Interconexión Escondida - Spence | 403              | 3.258              | 3.661       |
| Situación sin interconexión      | 0                | 3.030              | 3.030       |

Además, en la Tabla 6.25 se presentan el porcentaje del valor presente de los costos operacionales del sistema incurridos por las plantas desalinizadoras y los sistemas de impulsión de agua en todo el periodo de simulación de cada escenario.

*Tabla 6.25. Costos de operación estimados para las plantas desalinizadoras de las faenas mineras y sus sistemas de impulsión de agua con sus respectivos porcentajes.*

| Escenario                      | Costos operacionales [MMUS\$] |       | Porcentaje |       |
|--------------------------------|-------------------------------|-------|------------|-------|
|                                | PD                            | SIAD  | PD         | SIAD  |
| Prolongación SIAD Escondida    | 1.090                         | 2.118 | 34.0%      | 66.0% |
| Interconexión sin swap         | 1.098                         | 2.227 | 33,0%      | 67,0% |
| Interconexión Escondida-Spence | 1.091                         | 2.167 | 33.5%      | 66.5% |
| Situación sin interconexión    | 1.055                         | 1.975 | 34,8%      | 65,2% |

En la Tabla 6.26 se presenta el diferencial del valor presente de los costos de inversión, operación y el total con respecto a la situación sin interconexión.

Tabla 6.26. Diferencial de valor presente de los costos de las nuevas alternativas evaluadas en comparación a la situación sin interconexión [MMUS\$].

| Escenario                      | Costo de Operación | Valor presente costo total | CAPEX/Total |
|--------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| Prolongación SIAD Escondida    | 178                | 367                        | 52%         |
| Interconexión sin swap         | 295                | 868                        | 66%         |
| Interconexión Escondida-Spence | 228                | 631                        | 64%         |

A partir de la información presentada en la Tabla 6.26, se observa que la alternativa con un menor costo unitario incremental presenta un menor porcentaje de costo de inversión con relación al costo total del proyecto. Este porcentaje debiese ser aún menor en la medida que la inversión sea utilizada con una mayor intensidad, debido al aumento de los costos operacionales, lo que también produciría un descenso de los costos unitarios del agua desalinizada.

#### 6.4.3.3 Costo medio mensual del agua desalinizada

El costo medio mensual del agua desalinizada en el periodo de modelación se presenta en la Figura 6.25 y el costo promedio en la Tabla 6.27.

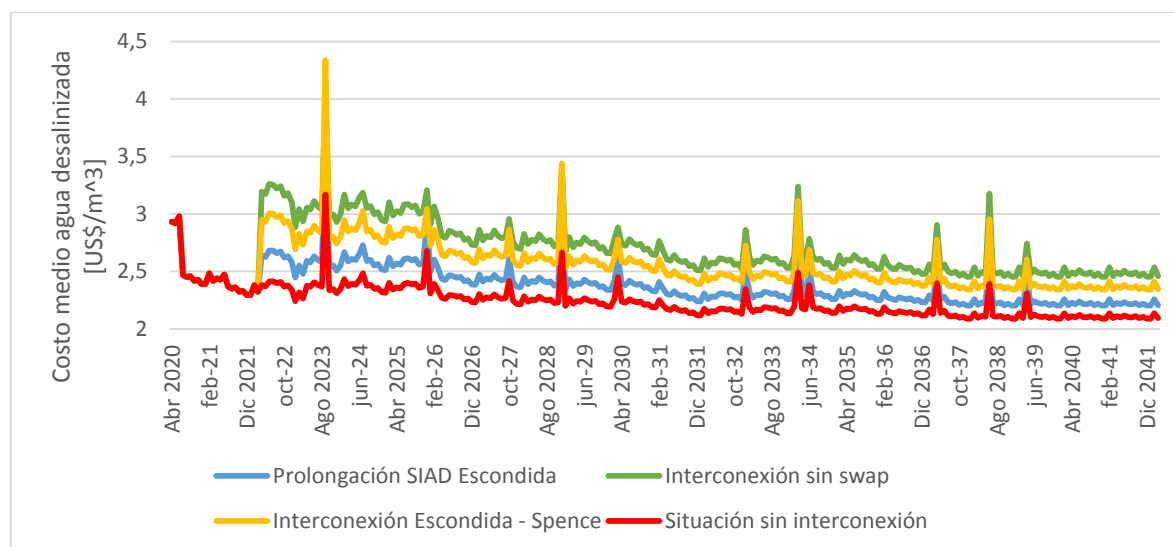


Figura 6.25. Costo medio mensual del agua desalinizada en los nuevos escenarios en el caso en que aumenta un 20% la demanda y un 50% de disminución de recursos continentales.

Tabla 6.27. Costo medio del agua desalinizada en el periodo de modelación.

| Escenario                        | Promedio [US\$/m³] |
|----------------------------------|--------------------|
| Prolongación SIAD Escondida      | 2,35               |
| Interconexión sin swap           | 2,65               |
| Interconexión Escondida - Spence | 2,52               |

Situación sin interconexión

2,21

De esta tabla se desprende que el costo medio del agua desalinizada aumentaría aproximadamente entre  $0,14 \text{ US\$/m}^3$  y  $0,44 \text{ US\$/m}^3$  en los distintos escenarios con interconexión.

#### 6.4.3.4 Costo medio mensual incremental agua desalinizada

En la Figura 6.26 se presenta el costo medio mensual incremental del agua desalinizada para los nuevos escenarios y en la interconexión sin swap, en el caso de que los recursos continentales disminuyan en un 50% y la demanda aumente hasta un 20% hasta el último año de la simulación.

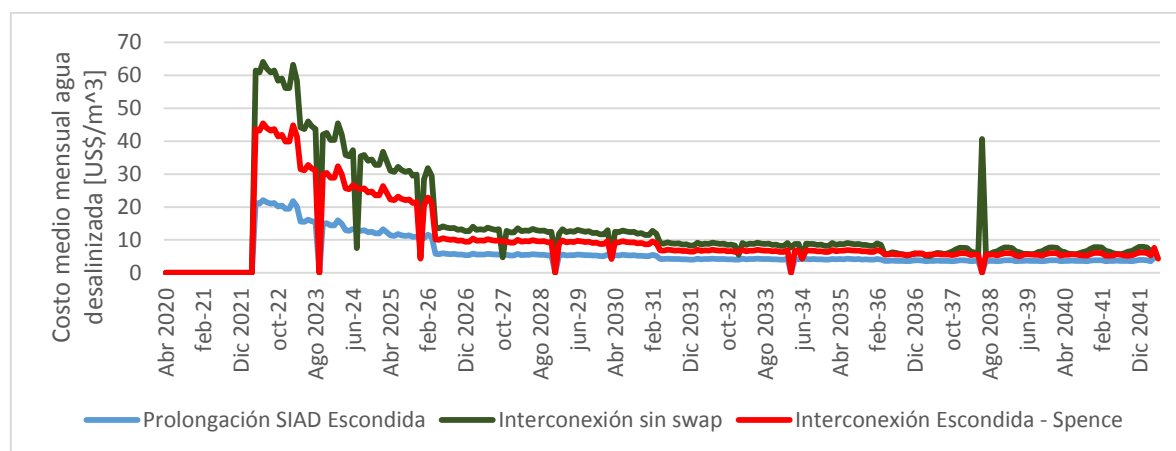


Figura 6.26. Costo medio mensual incremental del agua desalinizada para el caso con un aumento del 20% de demanda y un descenso del 50% en aguas continentales en los nuevos escenarios.

En la Tabla 6.28 se presentan los costos incrementales promedio del agua desalinizada en todo el periodo de modelación para los escenarios nuevos.

Tabla 6.28. Costo incremental promedio en el periodo de modelación de los nuevos escenarios [ $\text{US\$/m}^3$ ].

| Escenario                        | Costo incremental promedio [ $\text{US\$/m}^3$ ] |
|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Prolongación SIAD Escondida      | 4,65                                             |
| Interconexión sin swap           | 8,95                                             |
| Interconexión Escondida - Spence | 7,58                                             |

Finalmente debido a que los valores del costo incrementales son menores en el último periodo se presentan los costos obtenidos asociados entre julio 2038 y marzo 2042 en la Figura 6.27 y el promedio de cada escenario en la Tabla 6.29.

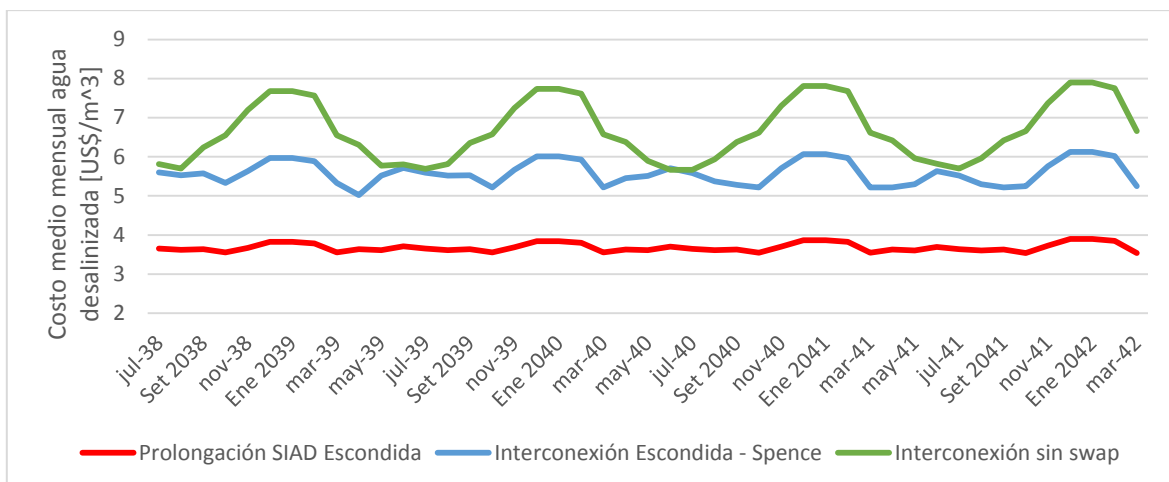


Figura 6.27. Costo medio mensual incremental del agua desalinizada en los escenarios nuevos e interconexión sin swap en el periodo julio 2038 hasta marzo 2042.

Tabla 6.29. Costos promedio incremental del agua desalinizada en el periodo julio 2038 hasta marzo 2042 [US\$/m³].

| Escenario                        | Costo promedio incremental agua desalinizada |
|----------------------------------|----------------------------------------------|
| Prolongación SIAD Escondida      | 3,68                                         |
| Interconexión sin swap           | 6,68                                         |
| Interconexión Escondida - Spence | 5,59                                         |

## 6.5 Análisis de los resultados

A partir de los resultados obtenidos, se pueden realizar distintos análisis del funcionamiento de la interconexión, ya sea con relación al volumen suministrado en cada escenario, el comportamiento del costo total en los casos analizados, los principales factores que afectarían el valor del costo marginal del agua desalinizada suministrada debido a la existencia de la interconexión y la variación de los costos medios del agua desalinizada en los diferentes casos considerados.

### 6.5.1 Suministro hídrico de los sitios de demanda

Si bien un proyecto de interconexión hídrica no aumenta la disponibilidad hídrica de las fuentes de suministro, si produce un aumento en la cobertura hídrica de la zona de estudio, lo cual se ha reflejado en todos los casos analizados.

El aumento del abastecimiento de los sitios de demanda producido por la interconexión aumenta a medida que existen dos condiciones básicas en el sistema: fuentes de abastecimiento y demandas hídricas en la tubería de interconexión en el mismo instante. Estas dos condiciones que inducen el flujo por la tubería podrían estar restringidas por la capacidad de la tubería, por lo tanto, la capacidad de diseño la tubería debería resultar de un análisis de los beneficios producidos por el agua transportada y por el costo que significa ir aumentando la capacidad de la interconexión, para así tomar la decisión sobre el tamaño óptimo de la infraestructura del proyecto.

En el presente análisis se considera una capacidad de  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$  de la interconexión, caudal que para las características de la zona de estudio sería suficiente para abastecer a las faenas que podrían requerir un suministro constante a partir de la interconexión y que sólo limitaría al flujo en el caso de que ocurriese una falla de algún sistema de abastecimiento de agua desalinizada, tal como se observa en la Figura 6.23.

Dependiendo del caso considerado, el volumen adicional suministrado por la interconexión aumenta entre 20 millones de  $\text{m}^3$  y 205 millones de  $\text{m}^3$  en los 20 años simulados, dependiendo de la disponibilidad de los recursos hídricos y las demandas a la infraestructura.

En los nuevos escenarios en donde se disminuye la extensión de la interconexión, se observa un volumen suministrado adicional de 170 millones de  $\text{m}^3$  debido a la interconexión, un 17% menos en comparación a la interconexión completa, lo cual indicaría que los trazados suprimidos presentarían un bajo uso y por ende una menor rentabilidad o un mayor costo incremental del agua que fluiría por esos tramos. Además, en la alternativa más económica, se estima que tendría un valor presente del costo total del 42% con relación al proyecto de interconexión completo.

#### 6.5.2 Valor presente de los costos

Del valor presente de los costos presentados en la Tabla 6.4, se observa que, en el caso de existir una tubería de interconexión, un intercambio hídrico que ahorre costos de transporte genera beneficios, los cuales dependerán de la magnitud del caudal intercambiado. Para el caso analizado, en donde el caudal intercambiado está entre los  $350 \text{ l/s}$  y  $450 \text{ l/s}$ , los beneficios generados alcanzarían para materializar la inversión de la tubería entre Coloso y Antofagasta, estimándose además un valor actual neto de 14 millones de  $\text{US\$}$  aproximadamente.

Analizando el valor presente obtenidos en las diferentes alternativas propuestas, se puede decir que el valor del proyecto de interconexión aumentaría entre 700 y 870 millones de  $\text{US\$}$  con respecto a la situación sin interconexión, según sea el caso analizado. Siendo menor la diferencia en el caso con la información base y mayor en el caso en que aumenta la demanda en hasta un 20% y disminuye la disponibilidad de recursos hídricos continentales en hasta un 50%, en este último caso también se analizaron las nuevas alternativas, estimándose un aumento de costo total de 367 millones de  $\text{US\$}$  en la alternativa de ampliación del SIAD de Escondida con respecto a la situación sin interconexión.

Con respecto al aumento de los costos en cada alternativa, a medida que en los casos analizados se requiera de una mayor cantidad de agua desalinizada, se observa que el costo total de cada alternativa va en aumento. En el caso en que la demanda aumenta hasta en un 40%, los costos totales de la situación sin interconexión aumentarían en aproximadamente 724 millones de  $\text{US\$}$  y en el caso de la interconexión con y sin swap, los costos totales aumentarían en 842 y 846 millones de  $\text{US\$}$  respectivamente con relación al caso con información base.

Finalmente, con respecto al valor presente costos de operación del suministro de agua desalinizada en mineras, se puede mencionar que los resultados muestran que entre un 33% y 36% aproximadamente de los costos operativos serían utilizados en la producción de agua desalinizada y entre un 64% y 67% aproximadamente serían los costos incurridos en el transporte

de ésta. El porcentaje de producción va disminuyendo a medida que se requiere de mayores cantidades de suministro de agua desalinizada según los resultados de las simulaciones. Además, es necesario aclarar que estos porcentajes responden al sistema en su conjunto y a sus características físicas, principalmente la altura y la longitud de los sistemas de impulsión, por lo tanto, pueden variar dependiendo de las condiciones mencionadas. Por otro lado, se observa que, en este sistema hídrico, los costos de operación del transporte hídrico serían cerca del doble de los asociados a la producción del agua desalinizada, situación completamente opuesta a observada en el sistema eléctrico según los datos del Consejo Minero presentados en la sección 2.2.

### 6.5.3 Costo medio del agua desalinizada

Dado que no se consideran los costos de las inversiones que ya están materializadas o prontamente en operación (Plantas desaladoras y SIAD respectivos), los valores absolutos presentados están subestimados al no considerar la respectiva amortización de estas inversiones. Por lo tanto, los análisis realizados a este indicador serán en función de las variaciones observadas en los escenarios en los diferentes casos.

En el caso de los escenarios con interconexión y prolongación del SIAD Escondida, siempre los costos medios son mayores en comparación a la situación sin interconexión. La magnitud de la diferencia dependería del monto de inversión del proyecto y también de la ubicación de las faenas que serán abastecidas por el proyecto. En este caso, las faenas están aún más lejos que las faenas que inicialmente poseen suministro de agua desalinizada, por lo que sus costos operacionales también son mayores en la situación con proyecto, por lo que siempre el costo medio del agua desalinizada en estos escenarios debería ser mayor que la situación sin interconexión.

Por otro lado, se observa que en todos los casos en donde el uso de la interconexión aumenta en el tiempo (casos del análisis de sensibilidad), el costo medio del agua desalinizada desciende a través del tiempo y, por lo tanto, la magnitud de este descenso en el costo medio estaría relacionado con el grado de utilización que se realiza en la interconexión.

### 6.5.4 Costo medio incremental del agua desalinizada

Al igual que el costo medio del agua desalinizada, el costo incremental desciende a medida que la infraestructura se utiliza en forma más intensiva. En el caso base, en donde la interconexión sólo se utilizaría para eventuales fallas, el costo incremental podría alcanzar los  $70 \text{ US\$/m}^3$ , suponiendo 4 fallas en 20 años de cada uno de los sistemas de abastecimiento de agua desalinizada. Este valor a medida que se utiliza la infraestructura podría descender a  $5 \text{ o } 6 \text{ US\$/m}^3$  cuando se utilicen los  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ , en el caso de la interconexión de todos los sistemas de impulsión analizados.

Otro factor que puede hacer disminuir considerablemente los costos incrementales del agua desalinizada es realizar eficientemente la inversión, es decir, invertir en los tramos que más se utilizarían. Esto produce un ahorro en términos de inversión y costos operacionales fijos en infraestructura que se utiliza en una menor intensidad y que produce que los costos por unidad de volumen del sistema aumenten considerablemente.

En el caso en que más se utiliza la infraestructura (20% de aumento de demanda y un 50% de descenso en los recursos continentales), se observa que el escenario en que sólo se prolonga el SIAD de Escondida, se obtienen costos incrementales aproximadamente un 45% menores al escenario con interconexión completa, la cual se observa en la Tabla 6.28 y en la Tabla 6.29, llegando a valores menores a los 4  $US\$/m^3$ .

## 7 Gobernanza del sistema de interconexión

### 7.1 Definiciones y alcance

El propósito de este capítulo no es diseñar un modelo de gobernanza sino definir cuáles son los principales requerimientos, particularidades y desafíos que plantea el sistema y luego analizar algunas alternativas que podrían ser adaptadas a las necesidades particulares de este sistema.

El modelo de gobernanza de un sistema de interconexión hídrica que involucra distintos “productores” o proveedores de agua y distintos “consumidores” o usuarios de agua representa un gran desafío. Algunos de los actores involucrados son a la vez proveedores y utilizadores de agua. En algunos casos, estos proveedores/usuarios pueden generar un exceso de agua que podría ser puesto a disposición de otros usuarios del sistema interconectado y, en otros casos, su producción propia puede no ser suficiente para dar cuenta de su consumo y tendrían que recurrir a terceros o al sistema de interconexión para poder satisfacer su demanda de agua. Si bien, a primera vista, el sistema de interconexión hídrica puede aparecer muy similar al sistema de interconexión eléctrica, presenta importantes diferencias que hacen difícil importar el modelo de gobernanza del sistema eléctrico al sistema hídrico.

En efecto, una de las principales diferencias es el impacto que tiene la ubicación de los puntos de consumo en el sistema hídrico. En el caso de la energía eléctrica, los mayores costos están en la generación y en la distribución, al menos en el caso de los clientes regulados, y los costos de transmisión representan solo una fracción menor del costo final para el usuario [16]. Más aún, el costo final depende poco de la ubicación del usuario final, excepto en lo que corresponde a la infraestructura exclusiva que permite al usuario conectarse con la red de interconexión. Un atributo fundamental en el sistema hídrico, tanto para la generación de agua como para el consumo, es la elevación en la cual se encuentra cada nodo del sistema. El costo de abastecer un usuario depende entonces no solamente del costo de producción de la fuente de abastecimiento sino también en forma importante de la distancia y de la diferencia de elevación entre un usuario y la fuente de suministro.

Si bien a primera vista el modelo de operación y costos de las empresas sanitarias puede aparecer como otra posible base para plantear el modelo de gobernanza de un sistema de interconexión hídrica, cabe destacar que las empresas de distribución de agua potable están sometidas a reglas específicas que no necesariamente aplicarían en este caso [17]. En la distribución de agua potable, los costos de infraestructura y los costos de conducción, al igual que todos los otros costos, se distribuyen entre todos los usuarios en función de su consumo e independientemente de su ubicación en la red de distribución.

Antes de definir cuál podría ser el modelo de gobernanza, es fundamental establecer objetivos y propósitos claros. Cabe señalar que los objetivos del sistema interconectado son múltiples y complementarios. La interconexión busca:

- Incorporar a nuevos usuarios o satisfacer un incremento de la demanda de usuarios existentes.
- Responder a una disminución permanente de la disponibilidad de agua continental.

- Permitir la implementación de SWAP de agua o compromisos de intercambio a futuro de un cierto volumen o flujo de agua; permitiría el intercambio entre agua desalinizada entregada en el área costera por un flujo o volumen equivalente de agua continental entregada en el área cordillerana.
- Reducir los riesgos de desabastecimiento frente a fallas puntuales y/o relativamente prolongadas de los sistemas de desalinización y/o de los sistemas de impulsión de agua; cabe señalar que la interconexión no necesariamente debe y puede cubrir un 100% del déficit de suministro de agua, pero podrá mitigar los efectos de las fallas.

El sistema de gobernanza dependerá también en gran parte de modo de financiamiento de la infraestructura de interconexión. La operación deberá cubrir los gastos de inversión y operación del sistema y por lo tanto es relativamente lógico que el inversor o quien coordina y asume la responsabilidad sobre la inversión tenga también una participación en la gobernanza del sistema.

Entre las opciones de financiamiento que a su vez pueden definir en parte las opciones de gobernanza están:

- Un sistema de cofinanciamiento de la infraestructura con participación de los principales actores interesados (proveedores y usuarios)
- Un sistema de concesión (probablemente privada o eventualmente pública), muy similar al sistema BOOT adoptado por algunas empresas para financiar y operar su planta de desalinización
- La incorporación de un operador independiente que financie y opere el sistema de interconexión.

Cualquier sea la opción de financiamiento, es fundamental que la operación del sistema logre cubrir la inversión. Por ello, es necesario que el sistema tenga un uso efectivo y que los costos se distribuyan entre los diferentes usuarios. En el caso del uso de la infraestructura para cubrir posibles fallas de los sistemas de producción e impulsión de agua, es difícil predecir a priori el uso de la infraestructura. En este caso, la inversión apunta a reducir el riesgo y eventualmente se podría establecer un costo asociado a esta reducción de riesgo. La inversión en infraestructura pasa a ser una forma de seguro.

## 7.2 Responsabilidad compartida

Considerando que el sistema de interconexión involucra en principio un número limitado de actores tanto proveedores como usuarios de agua y que algunos de ellos son a la vez proveedores y usuarios, es posible imaginar un sistema cofinanciado por estos distintos actores que conformarían entonces un consorcio el cual a su vez puede hacerse cargo de la gobernanza y administración del sistema a través de un organismo administrador en el cual estarían representadas cada una de las empresas que participan en la inversión y eventualmente los usuarios del sistema.

El modelo de inversión y la participación relativa de los diferentes socios podría establecerse a partir de una proyección de uso de la infraestructura y una ponderación de los costos totales de inversión en función de la participación relativa de los diferentes usuarios en los flujos totales conducidos por la infraestructura. Durante la operación, en función del uso efectivo de la

infraestructura y de las diferencias con el uso proyectado, podría operar un sistema de compensación para reequilibrar los costos invertidos por los diferentes socios.

### 7.3 Concesión privada o pública

El sistema de concesión ha permitido desarrollar numerosas obras de infraestructura a través de un proceso de financiamiento mixto en que el concesionario asume la responsabilidad de la construcción y operación de las obras concesionadas y recupera la inversión durante la operación bajo un sistema de ingreso mínimo garantizado (IMG) y/o a través de un subsidio. La concesión puede tener su origen en una iniciativa pública o en una iniciativa privada que luego de ser analizada por las autoridades competentes (Ministerio de Obras Públicas o instituciones relacionadas) puede eventualmente ser declarada de interés público [18]. La siguiente figura muestra los principales actores en un esquema de concesión.

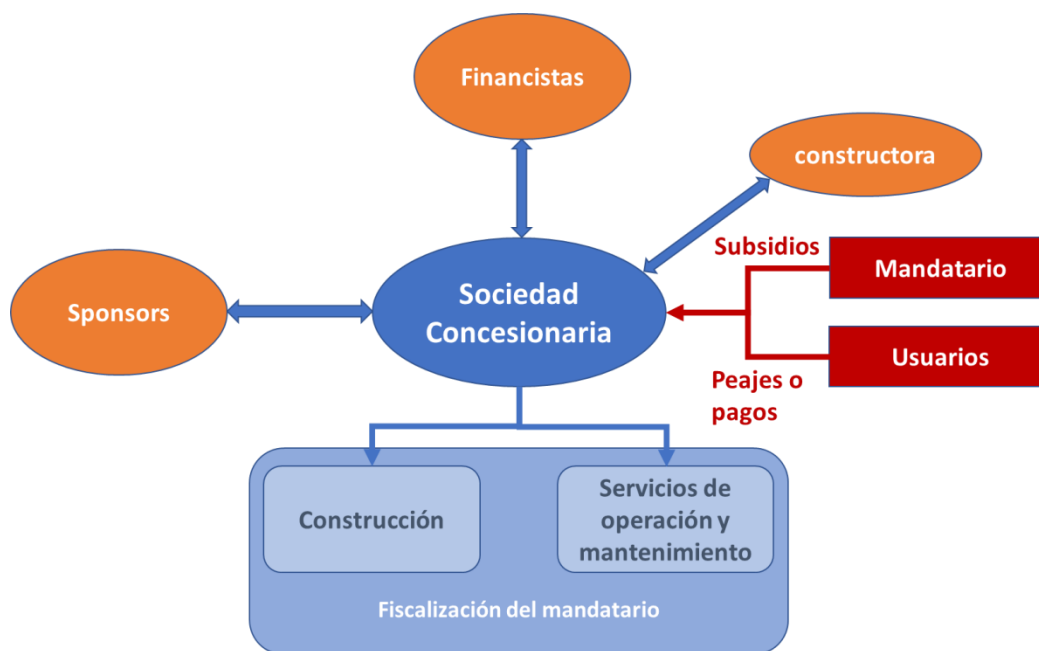


Figura 7.1. Principales actores en el sistema de concesión.

En el caso de la interconexión, el primer desafío consistiría en definir quién es el mandatario y cuál es el alcance de las obras licitadas. La complejidad nace de la preexistencia de gran parte de las infraestructuras que tendrán que conectarse con el sistema concesionado. Por lo tanto, este sistema concesionado no sería un sistema autónomo sino un sistema dependiente de los operadores existentes que operan su propia infraestructura de desalinización e impulsión de agua.

### 7.4 Operador externo

Las empresas mineras buscan concentrar sus esfuerzos en el corazón del negocio que es la extracción y el procesamiento de los minerales, dejando en mano de empresas externas otras actividades anexas, importantes para su negocio pero que no constituyen su actividad y especialidad principal. El suministro de energía y de agua no escapa a esta tendencia y estos

últimos años se han visto varios ejemplos de plantas de desalinización asociadas a proyectos mineros desarrolladas bajo una modalidad BOT (Build, Operate, Transfer) o BOOT (Build, Own, Operate, Transfer) [19] [20].

Estos modelos permiten a las empresas mineras transferir a un tercero la responsabilidad del desarrollo y de la operación del sistema, incluyendo en la modalidad del BOOT el financiamiento. Sin embargo, este tipo de contrato requiere un compromiso financiero claro de parte de las empresas mineras que se comprometen a un uso mínimo de la infraestructura a través de contratos de compra mínima de suministro de agua que, en la práctica, serían el equivalente del ingreso mínimo garantizado de los sistemas de concesión.

## 7.5 Institucionalización

El sistema de interconexión hídrica es, sin lugar a duda, una herramienta que permite avanzar hacia una gestión más integrada de los recursos hídricos. Sin bien se ha declarado la necesidad de implementar en Chile una gestión integrada de los recursos hídricos, el marco regulatorio y la actual institucionalidad no facilitan la transición a este tipo de gestión. Sin embargo, mirando a más largo plazo, es innegable que Chile tendrá que transitar en esta dirección. Una gestión y gobernanza pública del sistema interconectado de recursos hídricos surge entonces como una solución lógica para la implementación de esta política de gestión integrada de los recursos hídricos. Sin embargo, el financiamiento, la construcción y la operación de la infraestructura podrían concretarse a través de un sistema de concesión pública tal como fue mencionado en el punto 7.3.

## 7.6 Desafíos para la gobernanza de un sistema de interconexión hídrica

De acuerdo con lo señalado en los párrafos anteriores, los principales desafíos para la gobernanza de un sistema de interconexión hídricos se pueden resumir de la siguiente manera.

### 7.6.1 Objetivos y prioridades de la interconexión

El modelo de gobernanza está directamente relacionado con los objetivos de la interconexión, los cuales, tal como se ha señalado, pueden ser varios:

- Reducir la vulnerabilidad del suministro de agua frente a fallas de las plantas de desalinización y/o de los sistemas de impulsión de agua; en este caso, la gobernanza debería ser ejercida por un organismo integrado por los diferentes actores del sistema de interconexión.
- Optimizar el uso de las infraestructuras existentes de desalinización e impulsión de agua para reducir el costo global de suministro de agua, incluyendo el uso de SWAP entre recursos hídricos continentales y agua desalinizada; en este caso, cabe perfectamente un modelo de gobernanza operado por tercero, bajo un esquema de BOOT o de Concesión.
- Responder a una posible reducción de la disponibilidad de recursos hídricos continentales; en este caso, diferentes modelos de gobernanza son aplicables.

- Responder a un crecimiento de la demanda de los usuarios existentes o por la incorporación de nuevos usuarios; al igual que en el caso anterior, diferentes modelos son aplicables, pero modelos BOOT o de Concesión parecen los más atractivos.

### 7.6.2 Prioridades

Las prioridades del sistema están directamente relacionadas con los objetivos y en función de estas prioridades, se puede establecer el modelo de gobernanza. En el caso de un sistema de interconexión principalmente orientado a reducir la vulnerabilidad de suministro de agua frente a fallas, la prioridad del sistema es cubrir el déficit de suministro relacionado con la falla. Esta cobertura del déficit puede ser parcial y se pueden establecer diferentes prioridades: solo se cubre un porcentaje del déficit sin comprometer el suministro de otros usuarios o se establecen mecanismos solidarios en que eventualmente se reduce proporcionalmente el suministro a otros usuarios.

Sin embargo, si el objetivo del sistema es responder a una reducción de la disponibilidad de agua continental o a un aumento de la demanda, disminuye la posibilidad de responder a fallas y se reduce el porcentaje de cobertura del déficit de suministro asociado a fallas. La eventual incorporación de un uso intermitente de recursos continentales para responder a fallas permitiría, en parte, responder a este problema. En particular, el uso temporal de agua almacenada en embalse (el embalse Conchi, en la zona de estudio), permitiría una mejor respuesta frente a fallas. El agua así utilizada durante el periodo de falla podría reponerse progresivamente una vez superada la falla. Por lo tanto, en este caso se reduce globalmente el uso de recursos continentales, pero estos se reservan para enfrentar situaciones de fallas. Este tipo de gestión relativamente complejo requiere un modelo de gobernanza que probablemente involucra la participación de organismos públicos a cargo de la gestión de los recursos hídricos continentales (institucionalización).

### 7.6.3 Financiamiento y costos

El modo de financiamiento del sistema tendrá sin dudas un impacto significativo sobre el modelo de gobernanza. La inversión en el sistema de interconexión podría realizarse de distintas maneras:

- Coinversión compartida por los diferentes usuarios; la inversión podría ser proporcional al uso proyectado del sistema con una composición en función del uso real; sistema operado o gobernado por un organismo integrado por representantes de los inversionistas y usuarios.
- Inversión realizada por un tercero quien a través de contratos con los usuarios garantiza un uso mínimo de las instalaciones (modelo BOOT); el sistema
- Concesión pública o privada con o sin subsidios por parte del o de los mandantes y con Ingresos Mínimos Garantizados.

## 8 Aspectos legales y regulatorios

### 8.1 Código de agua y propuestas de modificación

El Código de Aguas actualmente vigente en Chile ha sido cuestionado por diferentes actores sociales y políticos y desde ya hace varios años, se inició una discusión en relación con una posible reforma. Han existido diferentes proyectos y propuestas de reforma que han sido ampliamente debatidos por los diferentes sectores.

Las principales modificaciones propuestas se pueden resumir en los siguientes puntos [21]:

- Derecho de aprovechamiento de aguas temporal: actualmente, el derecho de aprovechamiento de aguas es un derecho real, de carácter perpetuo, que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas; la propuesta pretende que, en la constitución de nuevos derechos, éstos tengan una extensión temporal limitada a un máximo de 30 años, siempre prorrogables.
- Redefinición del concepto de derecho de aprovechamiento de aguas: se reformula el concepto de derecho de aprovechamiento de aguas, eliminando la disposición que lo califica expresamente como derecho real y la facultad expresa de disponer del mismo, transformándolo en una concesión administrativa sobre las aguas que permitirá el uso y goce temporal de ellas, de conformidad a las reglas, requisitos y limitaciones que prescribe la propuesta de nuevo Código de Aguas.
- Caducidad del derecho de aprovechamiento de aguas: la propuesta contempla causales de caducidad de los derechos de aprovechamiento de aguas, que operarán por el sólo ministerio de la ley, en forma automática y sin necesidad de declaración judicial, en caso de no verificarse el uso efectivo del recurso.
- Limitación del ejercicio de los derechos de aprovechamiento de aguas: se propone limitar los derechos de aprovechamiento de aguas en función del interés público, con las siguientes facultades:
  - Reducción temporal de los derechos de aprovechamiento de aguas.
  - Redistribución temporal de las aguas, para reducir los daños generales derivados de la sequía, en los casos en que exista zona de escasez, o bien, en caso en que se acrediten graves carencias para satisfacer la función de subsistencia.
- Prohibición de constitución de derechos de aprovechamiento de aguas en Áreas protegidas y glaciares
- Categorización de los posibles usos del agua y usos prioritarios: categorización de los usos o funciones del agua, distinguiendo entre las siguientes:
  - Subsistencia: garantiza uso para el consumo humano y el saneamiento;
  - Preservación ecosistémica; y
  - Productivas.
- Patentes por no uso del derecho de aprovechamiento de aguas: aumento en el factor que determina el valor de la patente por no uso del derecho de aprovechamiento.
- Afectación a derechos de aprovechamiento de aguas antiguos: los derechos de aprovechamiento de aguas constituidos antes de la entrada en vigencia de la propuesta seguirán estando vigentes, pero sujetos a las limitaciones y restricciones que se disponen a

favor del interés público; no se le aplicarán las normas relativas a la caducidad de los mismos.

## 8.2 Condicionamiento de los derechos de aprovechamiento de agua

Aun contando con derechos de aprovechamiento de agua debidamente inscritos y aprobados, hoy la extracción de agua subterránea queda sujeta a la inexistencia de impactos ambientales significativos. Tanto en el otorgamiento de los nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas como en el proceso de evaluación ambiental de los proyectos, el Titular del proyecto deberá demostrar que el uso de agua requerido por el proyecto a lo largo de su vida útil declarada no afectará los ecosistemas en el área de influencia de las obras de extracción de agua. En el caso del proceso de evaluación ambiental, la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) establece el periodo por el cual se autoriza la extracción, que además queda condicionada a un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) y a un Plan de Alerta Temprana (PAT). El PSA define las variables ambientales que serán monitoreadas para verificar el estado de los sistemas ambientales presentes en la zona. El PAT corresponde a una herramienta de gestión ambiental que activa medidas preventivas orientadas a impedir que se supere el impacto establecido autorizado en la RCA. De acuerdo con el Informe Técnico de la DGA “Análisis Preliminar de Planes de Alerta Temprana con Condicionamiento de Derechos” [16], en el PAT *“se define un(os) indicador(es) específico(s) (variable directa del estado del sistema) y se determina un valor umbral en base a estudios técnicos, que corresponden al valor mínimo o máximo al cual el sistema puede llegar para mantener el objetivo ambiental del PAT, es decir, el impacto autorizado en el proceso de evaluación ambiental. Además de definir los umbrales, el PAT debe establecer acciones de contingencia que el estado del objeto de protección se mantendrá dentro de lo autorizado durante el proceso de evaluación ambiental”*.

Así, en acuíferos sometidos a escasez, existen dos instancias para condicionar la explotación de ellos, ambas asociadas a un PAT: en la resolución de otorgamiento de un derecho de agua y en la evaluación ambiental de un proyecto.

## 8.3 Uso obligado de agua de mar

Desde el año 2009, han surgido diferentes propuestas parlamentarias que apuntan a obligar a las grandes empresas mineras y satisfacer su demanda de agua a partir de agua de mar. La idea detrás de esta iniciativa es que el agua continental, considerada supuestamente de mejor calidad y de menor costo, debe ser privilegiada para otros usos, partiendo por su uso como agua potable. La idea de privilegiar o priorizar el uso de agua no es nueva y también está presente entre las modificaciones propuestas al Código de Aguas.

La última iniciativa impulsada en 2013 fue presentada por un grupo transversal de diputados y disponía que las empresas mineras cuya extracción de agua sobrepase los 150 litros por segundo, tendrían la obligación de incorporar la desalinización de aguas marítimas dentro de sus procesos productivos. Los diputados planteaban que, para evitar el uso excesivo de agua dulce en la minería, una de las soluciones era la desalación o desalinización de agua de mar. Basándose en un análisis muy simple que muestra cómo varios proyectos mineros han demostrado que es posible desarrollar sus procesos de manera económica con el uso de agua de mar desalinizada o, incluso en algunos casos, con agua de mar no desalinizada, su propuesta apunta a dotar al país de una

normativa legal que establezca principalmente su obligatoriedad en todas las empresas mineras. Esta propuesta que se basa un principio de BAT (Best Available Technology o Mejor Tecnología Disponible) no hace ninguna distinción en función de la ubicación del proyecto minero, ni de su realidad financiera, sino solamente en base a su capacidad de producción. Esto en parte contradice uno de los planteamientos iniciales de los legisladores quienes reconocen que existe una distribución desigual del recurso en las distintas zonas del país, dando lugar a zonas de abundancia y zonas de escasez de agua.

La propuesta finalmente aprobada por la Comisión de Minería y Energía de la Cámara de Diputados en diciembre de 2017 y que constituye una versión refundida de 2 propuestas anteriores establece lo siguiente:

**Artículo Único.** - Modifícase el Código de Minería en el siguiente sentido:  
Reemplázase el artículo 111 por el siguiente:

"Artículo 111.- El uso de las demás aguas necesarias para explorar, explotar o beneficiar sustancias minerales se sujetará a las disposiciones del Código de Aguas y demás leyes aplicables, salvo aquellas aguas de mar sin tratar y/o aguas de mar desaladas, las que serán reguladas por un reglamento que se dictará para tales efectos.

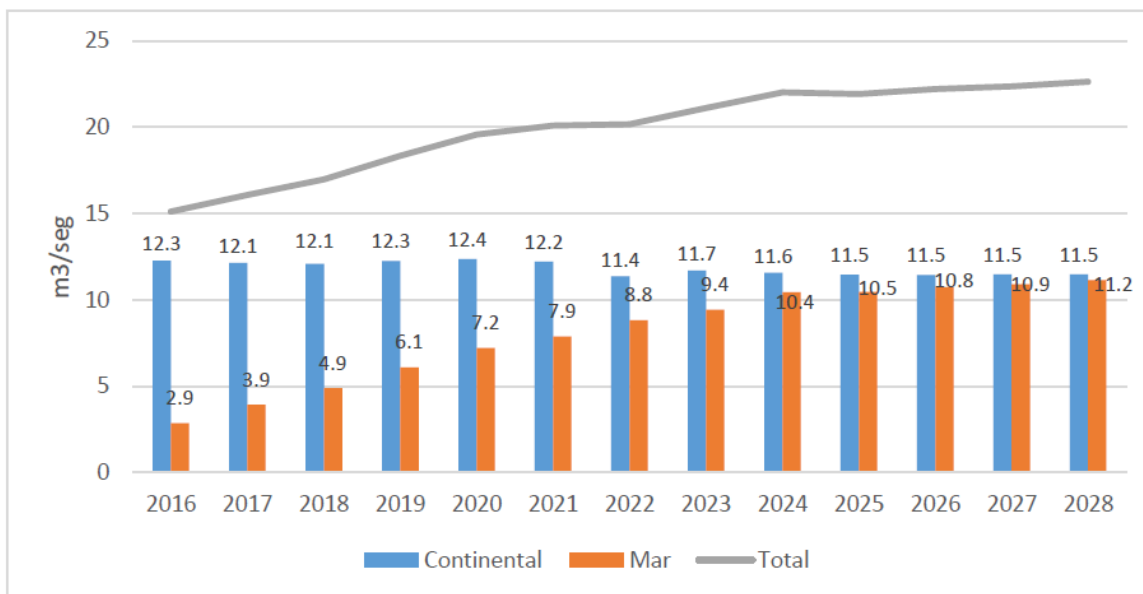
Las empresas de la gran minería tendrán la obligación de incorporar el uso de agua de mar sin tratar y/o desaladas en sus procesos productivos."

"Artículo Transitorio. - El reglamento a que hace referencia el artículo 111, contenido en el artículo único, se deberá dictar en el plazo de doce meses desde la publicación de esta ley."

En el Código de Minería actualmente vigente (Ley 18248 de 1983), el artículo mencionado establece lo siguiente:

"Artículo 111.- El uso de las demás aguas necesarias para explorar, explotar o beneficiar sustancias minerales se sujetará a las disposiciones del Código de Aguas y demás leyes aplicables."

Cabe señalar que, en base a una interpretación de los datos presentados por Cochilco en sus últimos estudios de proyección del uso y de la demanda de agua del sector minero [15], se ha instalado la idea de que, de manera decidida y sistemática, el agua de mar iba no solamente dar cuenta de todos los incrementos de demanda de agua sino también sustituir el uso actual de agua continental, tal como lo sugiere la siguiente figura.



Fuente: Cochilco, 2017

Figura 8.1. Proyección de la demanda de agua por origen [15].

Sin embargo, cabe señalar que estas proyecciones se basan simplemente en un cálculo que supone que las plantas desaladoras siempre se van a usar a su capacidad de diseño y en que el uso de agua continental se calcula por diferencia entre la demanda total proyectada y la capacidad de suministro de agua de mar. No se basa en una decisión objetiva de sustituir el suministro de agua continental por agua de mar desalinizada.

## 8.4 Proceso de evaluación ambiental

De acuerdo al artículo 10 de la Ley de Medio Ambiente (ley 20.417) y al artículo 3 del Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental (DS 40 de 2013), tanto los proyectos de infraestructura hídrica como acueductos, embalses, tranques o sifones (letra a) como los proyectos mineros (letra i) deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) a través de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) según corresponde de acuerdo al artículo 11 de la ley o al título II del reglamento. Las plantas desalinizadoras no aparecen tipificadas en la definición de los proyectos que deben someterse al SEIA (Art. 3), pero dada sus características y componentes (entre otros, el emisario submarino para la descarga de salmuera y el sistema de impulsión de agua desalinizada), también se sometan al SEIA.

Los proyectos mineros, debido a su complejidad y a los potenciales impactos que podrían generar se someten usualmente al SEIA a través de un EIA. De acuerdo con la ley y con el actual reglamento que impide “*fraccionar sus proyectos o actividades con el objeto de variar el instrumento de evaluación o de eludir el ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*” (Artículo 14 del Reglamento), los EIA de los proyectos mineros usualmente incluyen todas las obras de infraestructura asociadas al suministro de agua. Sin embargo, si se trata de proyectos claramente independientes, con distintos titulares, podrían eventualmente ingresar en forma independiente.

El suministro de agua es un componente importante de los proyectos mineros que hoy tiene particular relevancia en el proceso de evaluación ambiental. En estos últimos tiempos, varios proyectos mineros han sido cuestionados en relación con este punto. En la Región de Antofagasta, el Consejo Regional (Core) se pronunció recientemente en el contexto de un proyecto de minera Escondida que contemplaba la posibilidad de seguir extrayendo agua del pozo Monturaqui en el Salar de Atacama [23]. Dentro de sus facultades para pronunciarse por los proyectos que ingresan al Sistema de Evaluación Ambiental, el Core, en un comunicado, explica que *“considerando la información disponible que indica que la situación actual de disponibilidad de recursos subterráneos en el sector acuífero del Salar de Atacama, que contiene al acuífero Monturaqui, tiene derechos de agua otorgados por sobre el volumen sustentable de extracción, aproximadamente en seis veces, nos parece inconcebible continuar otorgando uso de este valioso bien a las empresas, vulnerando el desarrollo sostenible de la región”*. Precisa que *“el pleno del Core, en su última sesión, decidió no respaldar la solicitud de parte de MEL de seguir extrayendo agua del pozo Monturaqui, e invitamos a las demás autoridades de la región a comprometerse en forma activa en la defensa de los recursos de nuestra región”*.

Posteriormente, tal como sucedió unas semanas antes con el proyecto Monturaqui de Minera Escondida, el Core opinó en contra del proyecto de “Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar” presentado por Antofagasta Minerals (Amsa). La razón fue la misma esgrimida para oponerse a la iniciativa anterior: el proyecto considera extender la operación de extracción de agua desde los pozos ubicados en el sector de Negrillar (al sur del Salar de Atacama), situación que, de acuerdo con lo expresado por el Core, no está en línea con la Estrategia Regional de Desarrollo [24].

De este modo, se ha instalado en la práctica el uso del SEIA como instrumento para regular el uso de los derechos de aprovechamiento de agua y para disminuir la extracción y el uso de recursos hídricos continentales. Estos planteamientos reflejan una tendencia que ya se ha instalado en forma ya generalizada y que corresponde a privilegiar otros usos del agua por sobre su uso en la minería.

En el caso de las plantas desaladoras, si bien la mayoría de los proyectos han ingresado al SEIA a través de un EIA, existe algunos casos de ingreso a través de una DIA. Si bien usualmente un EIA significa mayor demora en la aprobación del proyecto, algunas plantas desaladoras ingresadas como DIA han tenido una aprobación más demorada que otras que ingresaron como EIA.

La siguiente tabla (Tabla 8.1) muestra los diferentes proyectos de plantas desalinizadoras y sistemas de impulsión ingresados al sistema de evaluación de impacto ambiental como EIA y como DIA, las diferentes adendas que se presentaron y el tiempo total de demora entre la fecha de ingreso y la resolución de calificación ambiental (RCA).

*Tabla 8.1. Proyectos de desalinización e impulsión de aguas ingresado al SEIA.*

| Nombre Planta                                                                           | Monto de la inversión | Fecha ingreso DIA | Fecha ingreso EIA | Adendas                                                                 | Fecha RCA  | Tiempo (días) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|
| Planta Desaladora de Agua de Mar Antofagasta                                            | 30 MMU\$              | 01-06-2001        |                   |                                                                         | 27-09-2001 | 118           |
| Suministro Complementario de Agua Desalinizada para Minera Escondida                    | 3500 MMU\$            |                   | 05-09-2008        | Adenda I, 13/02/2009<br>Adenda II, 23/03/2009                           | 16-06-2009 | 284           |
| Suministro Cerro Negro Norte y Desalinizadora Pta. Totoralillo                          | 33 MMU\$              | 26-07-2010        |                   | Adenda I, 15/11/2010<br>Adenda II, 14/01/2011                           | 28-02-2011 | 217           |
| Planta Desalinizadora Minera Candelaria                                                 | 270 MMU\$             |                   | 29-07-2010        | Adenda I, 10/12/2010<br>Adenda II, 04/02/2011<br>Adenda III, 20/04/2011 | 24-06-2011 | 330           |
| Abastecimiento de Agua Desalada Mantoverde                                              | 62 MMU\$              | 20-05-2010        |                   | Adenda I, 30/11/2010<br>Adenda II, 24/01/2011<br>Adenda III, 19/04/2011 | 13-05-2011 | 358           |
| Planta Desalinizadora Minera Candelaria                                                 | 270 MMU\$             |                   | 29-07-2010        | Adenda I, 10/12/2010<br>Adenda II, 4/02/2011<br>Adenda III, 20/04/2011  | 24-06-2011 | 330           |
| Planta Desaladora Sur Antofagasta                                                       | 120 MMU\$             | 21-09-2011        |                   | Adenda I, 01/08/2012                                                    | 07-09-2012 | 352           |
| Actualización del Actual Sistema de Conducción de Agua Desalinizada de Minera Escondida | 290 MMU\$             | 02-05-2013        |                   | Adenda I, 10/09/2013<br>Adenda II, 29/11/2013                           | 23-12-2013 | 235           |
| Actualización y Ampliación Planta Desaladora La Chimba                                  | 10 MMU\$              | 05-08-2013        |                   | Adenda I, 04/11/2013<br>Adenda II, 30/05/2014                           | 07-07-2014 | 336           |
| Planta Desaladora Bahía Caldera                                                         | 12,5 MMU\$            | 09-12-2013        |                   | Adenda I, 06/10/2014<br>Adenda II, 06/06/2015<br>Adenda III, 09/06/2015 | 13-07-2015 | 581           |
| Planta Desaladora Tocopilla                                                             | 26 MMU\$              | 18-02-2015        |                   | Adenda I, 22/12/2015<br>Adenda II, 24/03/2016                           | 13-05-2016 | 450           |
| Planta Desaladora de Pisagua                                                            | 2,55 MMU\$            | 23-12-2015        |                   | Adenda I, 01/07/2016<br>Adenda II, 31/05/2017                           | 12-07-2017 | 567           |
| Minerales Primarios Minera Spence                                                       | 2500 MMU\$            |                   | 24-07-2015        | Adenda I, 08/08/2016<br>Adenda II, 23/01/2017<br>Adenda III, 05/05/2017 | 04-08-2017 | 742           |
| Adecuación Planta Desaladora RT Sulfuros                                                | 1000 MMU\$            | 23-08-2017        |                   | Adenda I, 22/11/2017<br>Adenda II, 29/01/2018                           | 09-03-2018 | 198           |

La componente más compleja desde el punto de vista de los impactos ambientales de las plantas de desalinización está relacionada, sin duda alguna, con las obras marinas, es decir con las infraestructuras de toma de agua de mar y descarga de salmueras. Existen distintas alternativas

cuya aplicabilidad depende en gran parte de las condiciones geográficas de la zona. Las principales alternativas son las tomas abiertas, los pozos playeros y los drenes horizontales, siendo la primera la más usual para las plantas de gran capacidad. El principal impacto potencial de la toma de agua en sistemas de toma abierta es el ingreso de biota en la bocatoma de agua de mar. Para evitar este impacto, es necesaria reducir la velocidad de ingreso de agua (generalmente, por diseño, se limita a 0,3 m/s), asegurando un área suficiente en la misma toma. Además, se dispone una rejilla que evita el ingreso de material biológico en la toma.

La descarga de salmuera es sin embargo el aspecto ambiental más cuestionado en la operación de las plantas de desalinización. Dependiendo de la razón de flujos en la cual opera la planta que usualmente varía entre 30 y 50% de filtrado (300L de agua desalinizada por cada metro cúbico de agua de mar tratado), la concentración de sales en la salmuera puede llegar hasta 2 veces la concentración en el agua de mar. A ello, se deben agregar los reactivos que se usan para evitar el ensuciamiento y la formación de sarro en las membranas (antiscalants and antifouling agents) así como los reactivos coagulantes. Debido a su mayor densidad, la salmuera tiende a concentrarse en el fondo marino en la zona de descarga por lo cual se recomienda realizar una descarga que favorezca una rápida dilución mediante su mezcla con el agua de mar. Hoy existen diferentes alternativas que permiten distribuir la descarga entre varios difusores y así diluir rápidamente la descarga, limitando el impacto.

Los permisos ambientales sectoriales relacionados con plantas desalinizadoras que aparecen en el Reglamento del SEIA son los siguientes:

- Artículo 115, permiso para introducir o descargar en aguas sometidas a la jurisdicción nacional, materias, energía o sustancias nocivas o peligrosas de cualquier especie, que no ocasionen daños o perjuicios en las aguas, la flora o la fauna, a que se refiere el artículo 140 del D.S. 1/92 del Ministerio de Defensa Nacional, Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática.
- Artículo 119, permisos para realizar pesca de investigación que sea necesaria para el seguimiento de la condición de poblaciones de especies hidrobiológicas en la aplicación del primer año del plan de seguimiento ambiental, a que se refiere el Título VII de la Ley Nº 18.892, Ley General de Pesca y Acuicultura y sus modificaciones.

Además, las descargas están sujetas a la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (DS90 de 2001 del MINSEGPRES). Su objetivo es la protección y la preservación de los recursos hídricos de la República de Chile. Por consiguiente, no se podrán descargar efluentes que sobrepasen los rangos y límites máximos de concentraciones de contaminantes que se indican en el decreto. La norma establece los procedimientos de medición y control de los residuos líquidos. Los efluentes de Plantas Desalinizadoras deben cumplir con lo dispuesto en la tabla número 5 del D.S. 90/2001 (Límites referidos principalmente a metales disueltos y no a componentes principales del agua de mar).

## 8.5 Zonificación del borde costero y concesiones marítimas

### 8.5.1 Limitaciones en el desarrollo de plantas desalinizadoras

Si bien existe la noción del enorme potencial que tiene Chile para desarrollar a gran escala la desalinización por lo extenso de sus costas, es importante señalar que existen limitaciones geográficas, ambientales, sociales y económicas que limitan y acotan este posible desarrollo. Es efectivamente impensable imaginar una multiplicación indiscriminada del número plantas de desalinización a lo largo de las costas. A las limitaciones que ya significan la morfología de las costas y las distancias entre las plantas y los usuarios finales se suman restricciones que quedan reflejadas por los planos de zonificación costera establecidos en cada una de las regiones por los gobiernos regionales y que establecen claramente el tipo de actividad que se puede o no se puede desarrollar en distintos tramos de su zona costera.

Adicionalmente, la instalación de cada planta queda sujeta a la obtención de la concesión marítima, permiso otorgado por intermedio de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas y con la participación de diversos actores y que se suma al proceso de evaluación ambiental antes mencionado.

## 8.5.2 Política nacional de uso del borde costero

El borde costero del litoral se define como la franja del territorio que comprende los terrenos de playa fiscales, la playa, las bahías, golfos, estrechos y canales interiores, y el mar territorial y conforma una unidad geográfica y física de especial importancia. Hoy, por la importancia que ha adquirido esta área en los aspectos sociales, económicos y ambientales, se está adoptando el concepto de Zona Costera, definida como la zona donde se manifiesta ecológicamente la interacción de la tierra, el mar y la atmósfera.

La Política Nacional de Uso del Borde Costero del Litoral de la República, adoptada en 1994 mediante el Decreto Supremo 475, establece las bases para la planificación y gestión de los espacios costeros y marítimos, mediante orientaciones generales para la gestión de esta porción del territorio. Este mismo decreto creó también la Comisión Nacional de Uso de Borde Costero como instancia de toma de decisiones que integra a los múltiples actores, públicos y privados, que intervienen en la zona costera.

Los objetivos generales de la política son:

- 1.- Propender a una adecuada consideración de la realidad geográfica de cada uno de los sectores o áreas del litoral, que en algunos casos condicionan en forma determinante usos específicos, como es el caso de las bahías naturales, proximidad a centros poblados, condiciones meteorológicas locales, accesos, entre otras.
- 2.- Propender al desarrollo de los recursos y riquezas de los distintos sectores.
- 3.- Propender a la protección y conservación del medio ambiente marítimo, terrestre y aéreo, acorde con las necesidades de desarrollo y las demás políticas fijadas sobre tales materias.
- 4.- Propender a una adecuada compatibilización de las múltiples actividades que se realizan o puedan realizarse en el Borde Costero.
- 5.- Posibilitar y orientar el desarrollo equilibrado de las diferentes actividades, desde una perspectiva nacional, acorde con los intereses regionales, locales y sectoriales.
- 6.- Contribuir a la identificación de las perspectivas y proyecciones futuras de cada una de las actividades que precisen ser ejecutadas en los espacios territoriales que conforman el Borde

Costero, para evitar su uso inadecuado o inconveniente, tomando en consideración que éste constituye un recurso limitado.

En el año 2011, la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo publicó una Guía de Zonificación Costera para el Ordenamiento Territorial [17]. Esta guía busca *“orientar estratégicamente el desarrollo territorial de las múltiples actividades y usos económico-sociales que se emplazan en la zona costera, aplicando procedimientos técnico-políticos para la articulación estratégica de los actores”*.

### 8.5.3 Comisión Nacional de Uso del Borde Costero (CNUBC)

Es el órgano interministerial encargado de proponer al Presidente de la República, las acciones que impulsen la aplicación y cumplimiento de la Política Nacional de Uso del Borde Costero.

Sus principales funciones son:

- Proponer la Zonificación de los espacios del Borde Costero.
- Elaborar al menos cada dos años un informe de evaluación de la implementación de la Política Nacional, proponiendo los ajustes pertinentes y necesarios.
- Formular proposiciones, sugerencias y opiniones a las autoridades encargadas de estudiar y aprobar los diferentes planes de ordenamiento territorial a fin de que exista coherencia entre estos y los del Borde Costero.
- Solucionar discrepancias que se susciten respecto del mejor uso de este.
- Recopilar los estudios que en diversos servicios estatales se realicen sobre el uso del Borde Costero.
- Recomendar dentro de su competencia el mejor uso del Borde Costero.
- Proponer soluciones a los conflictos o discrepancias, que se refieren a la determinación y modificación o adecuación de los usos de los sectores del borde costero.
- Servir de instancia de coordinación de las acciones que proyecten o ejecuten los distintos organismos de la administración nacional y regional.

La Comisión Nacional de Uso del Borde Costero fue creada en el año 1994 y está presidida por el Ministro de Defensa Nacional e integrada por representantes de diversas instituciones, servicios y ministerios (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, Subsecretaría de Pesca, Ministerio de Planificación, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Ministerio de Bienes Nacionales, Armada de Chile, Servicio Nacional de Turismo, Ministerio del Medio Ambiente).

Dentro de sus principales funciones se encuentra:

- Proponer una Zonificación de los diversos espacios que conforman el Borde Costero del litoral.
- Elaborar al menos cada dos años, un informe de evaluación de la Política Nacional de Uso del Borde Costero y proponer los ajustes que sean pertinentes y necesarios.
- Formular recomendaciones sobre un mejor uso del Borde Costero.

Esta Comisión tiene una Secretaría Técnica que se encuentra en la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas.

#### 8.5.4 Zonificación del borde costero

De acuerdo con lo anterior, existen hoy políticas y planes regionales de zonificación del borde costero que determinan qué tipos de actividades se pueden desarrollar en los distintos tramos y zonas de la costa. Estos planes limitan sin lugar a duda la posible ubicación de plantas de desalinización que no podrán instalarse en algunas de las zonas definidas en los planes regionales. Destacan entre otras zonas de restricción las Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) y las zonas de protección ambiental, parques, reservas y monumentos naturales, donde quedarían excluidas las plantas desalinizadoras.

##### **Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB)**

Es un régimen de acceso que asigna derechos de explotación exclusiva a organizaciones de pescadores artesanales, mediante un plan de manejo y explotación basado en la conservación de los recursos bentónicos presentes en sectores geográficos previamente delimitados. En la zona norte, por ejemplo, estas áreas se distribuyen de la siguiente manera:

- Región de Atacama: 98 km de los 370 km de costa (30 AMERB)
- Región de Antofagasta: 131 km de los 472 km de costa (38 AMERB)
- Región de Tarapacá: 54 km de los 275 km de costa (21 AMERB)
- Región de Arica y Parinacota: 16 km de los 120 km de costa (3 AMERB)

##### **Zonas de protección ambiental:**

Las principales zonas de protección ambiental corresponden a Parques nacionales, Reservas nacionales y Monumentos naturales. También entran en consideración los sitios prioritarios para la protección de la biodiversidad que se definen como espacios geográficos que son relevantes para la biodiversidad del país, ya que proveen de servicios ecosistémicos importantes o cuyos ecosistemas, hábitats, especies, paisajes o formaciones naturales presentan características particulares de unicidad, escasez o representatividad. En estos sitios prioritarios se pueden aplicar una o más medidas de gestión para la conservación. También se deben tener en consideración las Áreas Marinas Protegidas que representan 4% de las costas chilenas:

- Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos (AMCP-MU): herramienta de gestión para la protección, administración, mantención y restauración de los recursos naturales y culturales de las aguas marinas y costeras.
- Reserva Marina: áreas de resguardo de los recursos marinos, con el objeto de proteger zonas de reproducción, caladeros de pesca y áreas de repoblamiento por manejo.
- Parque Marino: áreas cerradas a cualquier actividad, salvo con propósitos de observación, investigación o estudio.

A modo de ejemplo, la Figura 8.2 muestra la zonificación de la costa chilena en la zona Norte, entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Atacama.

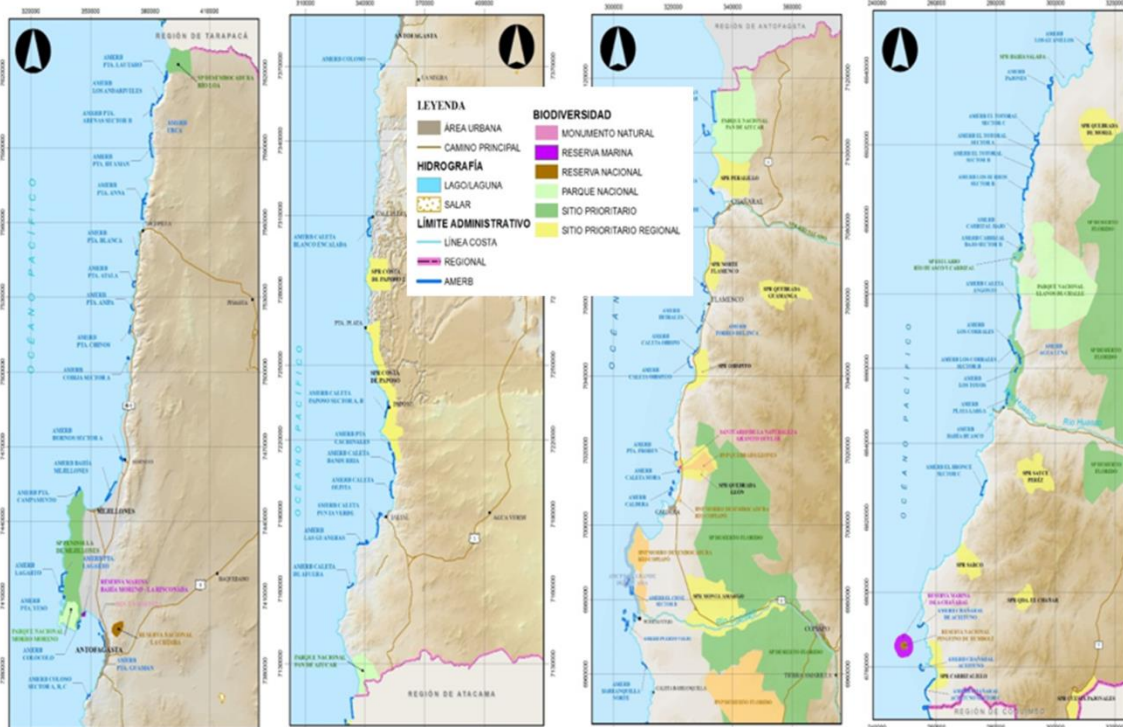


Figura 8.2. Zonificación del borde costero – Zona Norte de Chile, 2014.

## 8.5.5 Concesión marítima

Para poder usar el borde costero y el agua marina para la desalación, y construir en el mar la toma y la descarga de las aguas de la planta desaladora, es necesaria la solicitud de una concesión marítima.

La concesión marítima es un instrumento mediante el cual el ministerio de defensa nacional, por medio de la subsecretaría para las Fuerzas Armadas, ejerce la facultad privativa para conceder el uso particular en cualquier forma, de las playas y terrenos de playa fiscales dentro de una franja de 80 metros de ancho medidos desde la línea de más alta marea del litoral, de las rocas, de los fondos de mar, de las porciones de agua dentro y fuera de las bahías, de las playas de unos y otros, y de los terrenos fiscales ribereños hasta una distancia de 80 metros medidos desde donde comienza la ribera.

Las funciones de la oficina de concesiones marítimas es analizar, estudiar y elaborar los decretos supremos, exentos y resoluciones denegatorias de destinaciones marítimas, concesiones marítimas, bajo la forma de otorgamiento, renovación, modificación, transferencia, arriendo, ampliación, sucesión, término, deja sin efecto, caducidad y derogación; elaborar oficios, memorándum, mensajes y dar respuesta a las consultas formuladas por los usuarios a través de oficios, correos electrónicos y audiencias.

En las etapas que conforman el sistema de concesiones marítimas participan distintos actores, según sus facultades y responsabilidades. Estos son los siguientes:

- Subsecretaría para las Fuerzas Armadas.
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante Nacional.
- Servicio de Impuestos Internos.
- Comisión Regional de Uso del Borde Costero.
- Dirección de Obras Municipales.
- Dirección Regional del Servicio Nacional de Pesca.
- Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo.
- Secretaría Regional Ministerial de Obras Públicas.
- Ministerio de Relaciones Exteriores, Dirección de Fronteras y Límites del Estado. •Servicio Agrícola y Ganadero.
- Contraloría General de la República.

Para acceder a una concesión o destinación marítima, se debe presentar una solicitud en la capitanía de puerto correspondiente, dirigida al ministerio de defensa nacional. La autoridad marítima local revisará dicha presentación, la cual, en caso de ajustarse a lo establecido en el Reglamento sobre Concesiones Marítimas, procederá a ingresarla al sistema [www.concesionesmaritimas.cl](http://www.concesionesmaritimas.cl), para su análisis y resolución definitiva en la subsecretaría para las fuerzas armadas.

La norma general es el D.F.L. Nº 340, de 1960, que contiene la ley sobre concesiones marítimas.

## 9 Análisis FODA

| Fortalezas                                                                                                                                                          | Oportunidades                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Infraestructura existente</li> <li>Interés y disposición de los actores</li> <li>Sistema interconectado eléctrico</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Resiliencia a cambios en disponibilidad de recursos hídricos</li> <li>Optimiza requerimientos de nuevas infraestructuras</li> <li>Incorporación de nuevos usuarios</li> <li>Facilita la gestión integrada de los recursos hídricos</li> </ul> |
| Debilidades                                                                                                                                                         | Amenazas                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Diversidad en calidad del agua</li> <li>Gobernanza</li> <li>Marco regulatorio e institucionalidad</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Factores políticos y sociales</li> <li>Aprobación ambiental</li> <li>Ordenamiento territorial</li> <li>Precios de cobre y energía</li> </ul>                                                                                                  |

### 9.1 Fortalezas

#### 9.1.1 Infraestructura existente

La interconexión se realizaría sobre la base de una infraestructura existente, robusta y consolidada, que demostró su eficiencia en el suministro de agua en las diferentes operaciones mineras. La experiencia adquirida en la operación de esta infraestructura existente, tanto en lo que se refiere a las plantas de desalinización como a las líneas de impulsión de agua, constituye una importante garantía para la operación futura de un sistema de interconexión hídrica

#### 9.1.2 Interés y disposición de los actores

Conscientes del interés que puede presentar el sistema de interconexión hídrica en término de seguridad del suministro, de optimización de las infraestructuras existentes y de eventual reducción de los costos de abastecimiento de agua, los diferentes actores, tanto proveedores como usuarios de agua tienen un gran interés y una buena disposición en tratar de implementar este tipo de solución.

Existe una precepción compartida por la mayoría de ello en cuanto a los probables beneficios que este tipo de proyectos puede significar para todos. Esta visión compartida sobre la conveniencia de implementar un sistema de interconexión hídrica constituye sin lugar a duda una de las más importantes fortalezas.

#### 9.1.3 Sistema interconectado eléctrico

La existencia de un sistema interconectado eléctrico consolidado, que con los años ha demostrado su robustez, constituye un antecedente positivo muy alentador para un sistema de interconexión hídrica.

La disminución de los costos de energía constituye a su vez un factor positivo que reduce los costos de la incorporación de agua de mar desalinizada en el sistema de abastecimiento de agua, tanto por su impacto en los costos de desalinización como de impulsión.

## 9.2 Oportunidades

### 9.2.1 Resiliencia a la reducción de disponibilidad de agua continental y al cambio climático

Existe hoy una gran incertidumbre en relación con los posibles efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos. Varios estudios han mostrado que, en el mediano y largo plazo, el cambio climático que ya se instaló a nivel mundial tendrá importantes efectos en la distribución de los recursos hídricos, con una disminución notoria de recursos disponibles en diferentes zonas del país.

La mayor frecuencia de ocurrencia y mayor intensidad de los eventos meteorológicos extremos es otro factor que pone en riesgo el abastecimiento de agua por sus potenciales impactos en las infraestructuras.

En este contexto, la interconexión hídrica presenta sin duda una gran oportunidad para reducir los riesgos asociados a la disminución de disponibilidad de los recursos hídricos continentales y a una eventual indisponibilidad de parte de las infraestructuras.

### 9.2.2 Optimiza requerimientos de nuevas infraestructuras

Para hacer frente a la creciente demanda de agua y a la disminución de disponibilidad de recursos hídricos, estos últimos años se han multiplicado los nuevos proyectos de plantas desaladoras y de sistemas de impulsión de agua. El diseño, la aprobación y la construcción de estas nuevas infraestructuras son procesos demorosos y que requieren fuertes inversiones. La interconexión hídrica da la oportunidad de optimizar el despliegue de nueva infraestructura, con una mejor combinación entre plantas desaladoras y redes de transporte de agua.

### 9.2.3 Incorporación de nuevos usuarios – Aumento de la demanda

Haciendo uso de las infraestructuras existentes y de la holgura que estas presentan, sería posible a través de la interconexión de satisfacer un incremento de demanda de agua, sea por un aumento de consumos de los usuarios existentes o por la incorporación de nuevos usuarios. La interconexión aparece entonces como una oportunidad de darle un mayor uso a la infraestructura existente, aumentando el suministro. Sin embargo, es importante recalcar que este uso de las actuales holguras para satisfacer un crecimiento de la demanda puede significar una mayor exposición al riesgo de desabastecimiento temporal en caso de fallas en el sistema o en caso de peak de demanda.

## 9.2.4 Gestión integrada de los recursos hídricos

La gestión integrada de los recursos hídricos es hoy un tema recurrente en las discusiones relacionadas con las políticas de gestión de los recursos hídricos. Se han instalado mesas de trabajo y ya se están desarrollando programas pilotos en algunas cuencas del país. Sin embargo, poco se ha avanzado hasta la fecha por la falta de herramientas que permitan poner en práctica una verdadera gestión integrada de los recursos.

En este sentido, la interconexión hídrica constituye sin duda una interesante herramienta de manejo que permite optimizar el uso de los recursos y responder de manera oportuna a variaciones en la oferta y demanda de agua. En particular, permitiría proponer un uso intermitente de los recursos hídricos continentales, contribuyendo de esta forma a reducir globalmente el uso de agua continental, en particular agua subterránea, sin poner en riesgo el abastecimiento de agua de los diferentes usuarios.

Considerando, por un lado, la preocupación que hoy existe en relación con una eventual sobreexplotación de algunos acuíferos y las limitaciones impuestas en el uso de estos recursos y, por otro lado, la necesidad de asegurar un abastecimiento permanente y seguro de agua, se podría utilizar la interconexión hídrica para incorporar al sistema de abastecimiento, de manera temporal y excepcional, agua subterránea o superficial para así poder enfrentar eventual fallas en los sistemas de desalinización o de impulsión de agua, o un incremento temporal de la demanda de agua (peak de demanda estacional o por uso excepcional).

Del mismo modo, se podría eventualmente incorporar al sistema y por un tiempo limitado agua embalsada que, una vez superada la emergencia, podría ser repuesta a partir de otras fuentes continentales o de agua desalinizada.

## 9.3 Debilidades

### 9.3.1 Calidad del agua

Una posible debilidad del sistema de interconexión hídrica radica en las diferencias de calidad que pueden presentar las distintas fuentes de agua interconectada. Estas variaciones deberían poder mantenerse en un rango previamente establecido, lo cual podría significar la necesidad de instalar sistemas de tratamiento antes de poder inyectar el agua al sistema. Para poder ser distribuida a clientes residenciales, el agua debe cumplir con la norma de agua potable. En el caso de usos industriales, en particular en la minería, variaciones en la calidad del agua pueden significar eventuales variaciones en el rendimiento de los procesos. Es importante por lo tanto definir claramente los rangos de variabilidad de los principales parámetros de calidad del agua con los cuales deberá cumplir el agua alimentada al sistema de interconexión.

### 9.3.2 Gobernanza

La complejidad del sistema de gobernanza, sobre todo de las reglas y prioridades bajo las cuales deberá operar el sistema plantea un enorme desafío y representa una debilidad del sistema. En

efecto, es importante definir previamente las reglas de operación que aseguren una distribución eficiente de los beneficios del sistema entre los diferentes actores. Si bien el sistema puede en principio contribuir a reducir los riesgos de desabastecimiento de agua en caso de fallas, su uso para la incorporación de nuevos usuarios o para satisfacer un incremento permanente de la demanda pone de un cierto modo una restricción en su rol de seguro frente a eventuales fallas.

La complejidad del sistema de gobernanza se considera entonces como una de las principales debilidades del sistema de interconexión.

### 9.3.3 Marco regulatorio e institucionalidad

El actual marco regulatorio, y en particular el Código de Aguas, y la institucionalidad vigente no favorecen la implementación de la interconexión hídrica. En efecto, el marco de regulación actual tiende a favorecer soluciones individuales donde cada usuario busca resolver de manera individual sus necesidades de abastecimiento mediante la obtención de derechos de agua y/o la construcción de plantas de desalinización.

En cuanto a la institucionalidad, la Dirección General de Agua es el Organismo del Estado actualmente a cargo de la gestión de los recursos hídricos. Su misión es *“promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente; y proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica y la contenida en el Catastro Público de Aguas, con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas”*. Sin embargo, su accionar en término de gestión se ve limitado por el marco regulatorio vigente. Por ello, y tal como ya se mencionó anteriormente (ver punto 8.2), ha recurrido a otros instrumentos como es el Sistema de Evaluación Ambiental para condicionar los derechos de extracción de agua y tratar de implementar una gestión de los recursos que asegure una mayor sustentabilidad del recurso. De esta forma, el Sistema de Evaluación Ambiental se ha visto forzado y desviado de sus objetivos principales que son la prevención de los impactos ambientales asociados a un proyecto en particular para transformarse en una herramienta de gestión de la sustentabilidad hídrica.

En un sentido similar, la escasa fiscalización a los usuarios de agua que quedan fuera del SEIA o que individualmente son de baja escala, pero en forma agregada pueden significar volúmenes cuantiosos, o bien la presión para otorgar nuevos derechos de aprovechamiento a ese tipo de usuarios, reduce los incentivos para que los grandes usuarios avancen hacia una interconexión hídrica. La razón es que las mayores eficiencias alcanzadas por la interconexión, y su eventual impacto en menor demanda de agua continental, pueden ser totalmente anuladas por mayores extracciones ilegales o amparadas en nuevos derechos otorgados a terceros.

## 9.4 Amenazas

### 9.4.1 Factores políticos y sociales

Al demostrar que el sistema de interconexión hídrica permitiría hacer frente a una reducción de la disponibilidad de recursos hídricos continentales, surge la amenaza de que este mismo sistema se transforme en un argumento para reducir el acceso a aguas continentales, reservando o priorizando su uso para fines ambientales y para el consumo humano. Esta tendencia ya instalada

y reflejada en los proyectos de ley que apuntan a obligar a las empresas mineras a usar agua de mar (ver 8.3), tendrían mayores argumentos donde apoyarse. En este caso, en vez de contribuir a reducir los costos de abastecimiento de agua, el sistema de interconexión podría al revés traducirse por un aumento de los costos medios.

Cabe señalar que esta tendencia en privilegiar el uso de agua continental para consumo humano parte del supuesto que el agua continental presenta mejor calidad y sería por lo tanto más apta para el consumo humano o, incluso, para riego. Este argumento se contradice con muchas observaciones que indican que, en distintas partes, la calidad natural del agua tanto superficial como sobre todo subterránea la hace impropia para consumo humano o para riego, o bien hace necesario un tratamiento previo.

Una amenaza de consecuencias similares a la anterior sería que los sistemas de interconexión hídrica sean obligados a proveer agua a determinadas localidades o clientes, bajo la idea de que el agua desalada es un bien nacional de uso público. Esto, a partir de un proyecto de ley, de iniciativa parlamentaria, que se tramita en el Senado (Boletín 11.608-09).

#### 9.4.2 Aprobación ambiental

La aprobación de cualquier infraestructura nueva requiere someterse al sistema de evaluación ambiental para su aprobación. Este proceso, además de demoroso, significa no solamente que la infraestructura debe ser diseñada para minimizar los potenciales impactos ambientales sino también que debe contar con la aprobación de las comunidades potencialmente afectadas.

La dificultad que representa la aprobación ambiental del proyecto es entonces un claro desafío y una amenaza al sistema de interconexión.

#### 9.4.3 Ordenamiento territorial

Actualmente, el desarrollo de infraestructura portuaria, eléctrica y sanitaria se considera como de interés público y por lo tanto no está afecta a eventuales prohibiciones provenientes de los planos reguladores comunales. Estos últimos sí podrían restringir la instalación de plantas desaladoras (que no sean para usos sanitarios) y sus respectivos ductos, situación que podría verse agudizada en los futuros Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) que serán establecidos por los nuevos Gobernadores Regionales, con carácter vinculante.

#### 9.4.4 Precios de los minerales y de la energía

La materialización de los proyectos mineros depende fuertemente de las variaciones de precio que puede sufrir el metal en los mercados internacionales. Eso significa que una parte importante de la demanda futura de agua depende de las condiciones de mercado. Existe por lo tanto una fuerte incertidumbre en relación con la proyección de la demanda de agua que puede poner en riesgo la sustentabilidad económica del proyecto de interconexión. Esto constituye una amenaza al proyecto.

A su vez, un aumento del precio de la energía se traduciría por un aumento de los precios del agua, en particular del agua desalinizada impulsada hasta las faenas ubicadas en la Cordillera, lo cual significaría un menor interés por el sistema de interconexión.

## 10 Conclusiones y recomendaciones

### 10.1 Contexto y desarrollo del estudio

La industria minera enfrenta hoy importantes desafíos para asegurar el suministro de agua que requiere el desarrollo y la continuidad de sus proyectos. Estos desafíos derivan de:

- Condiciones hídricas naturales que se traducen por una disponibilidad de recursos hídricos muy limitada (zonas áridas y semi-áridas), eventualmente enfatizada por el cambio climático.
- Condiciones políticas que tienden a privilegiar el uso del agua continental para otros sectores por sobre su uso en procesos mineros.
- Condiciones sociales marcadas por una desconfianza hacia la minería que es percibida como responsable de la escasez de agua y por el eventual deterioro de su calidad.
- Condiciones ambientales complejas caracterizadas por ecosistemas frágiles.
- Condiciones técnicas y económicas que limitan el desarrollo de soluciones individuales.

El estudio desarrollado ha permitido identificar las oportunidades y los principales desafíos que representa la interconexión hídrica en el contexto de la minería en el norte de Chile. Se ha desarrollado un modelo conceptual sobre la base del cual se ha desarrollado un simulador técnico/económico en la plataforma WEAP (Water Evaluation And Planning). Al aplicar el modelo a una zona de estudio piloto (Región de Antofagasta), simulando diferentes escenarios de infraestructura y distintas condiciones de disponibilidad y requerimientos hídricos, se evaluaron por un lado el volumen de agua suministrado al sistema en cada simulación, y por otro lado, calcular los correspondientes costos totales, medios e incrementales asociados al suministro de agua desalinizada.

### 10.2 Conclusiones

La interconexión hídrica aparece como una solución que permitiría un mejor uso de las infraestructuras existentes, disminuyendo la vulnerabilidad del abastecimiento frente a fallas o frente a una reducción de la disponibilidad de recursos hídricos continentales, o permitiendo la incorporación de nuevos usuarios.

Los antecedentes del estudio muestran que, en la zona de estudio, la disponibilidad total de agua (agua continental actualmente disponible más agua desalinizada entregada por las desalinizadoras operando a plena capacidad), que llega aproximadamente a  $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (incluyendo los SIAD próximos a construirse a plena capacidad), supera ampliamente la demanda total de los diferentes usuarios considerados en el estudio, la cual es del orden de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ . De poder redistribuir el agua adecuadamente, la holgura disponible permitiría teóricamente cubrir gran parte de las fallas de las plantas de desalinización y/o de los sistemas de impulsión de agua desalinizada. En la práctica, la cobertura para cubrir fallas está limitada a la capacidad de conducción de agua del sistema de interconexión. Además, la interconexión representa una inversión significativa que sólo un uso importante la justificaría económicamente; una interconexión que sólo reduce la vulnerabilidad frente a fallas técnicas no se justificaría económicamente. En efecto, el costo marginal medio, es decir, el costo medio de cada metro cúbico entregado por el sistema interconectado y que no podría ser entregado al no existir la interconexión llega a valores promedios del orden de  $60 \text{ US}\$/\text{m}^3$ , considerando los costos de inversión y operación. Estos altos costos se explicarían por el

poco uso que se le da a la infraestructura en este caso y por los costos de inversión y operación asumidos al materializar el proyecto, que en este caso se estiman del orden de los 710 millones de US\$.

Por otro lado, se analizó la conveniencia de realizar un intercambio hídrico entre la empresa sanitaria de Antofagasta con fuentes hídricas cordilleranas y una empresa minera con planta desalinizadora a unos 20 km de Antofagasta, una vez ya materializada la interconexión. Se estima que en 20 años se podría recuperar la inversión de una tubería que conecte la planta desaladora La Chimba con Antofagasta. Los costos y beneficios de este proyecto son uno o dos órdenes de magnitud menores al proyecto de interconexión, con un caudal intercambiado de entre 350 y 450 l/s.

Si se considera un incremento progresivo de la demanda de agua, sin que aumente la disponibilidad de recursos hídricos, se produce un aumento en el uso de la infraestructura de interconexión que permite suplir el déficit de suministro de aquellas faenas que dependen de los recursos continentales y el costo marginal medio del agua entregada por la interconexión disminuiría de manera significativa, llegando a valores bajo los 10 US\$/m<sup>3</sup> en el caso en que la demanda aumente en un 40%. Aunque, en este caso, el valor presente del costo total del suministro de agua desalinizada con interconexión y el volumen aumentarían en unos 846 millones de US\$ y en 1.127 millones de m<sup>3</sup> respectivamente con respecto al caso base sin aumento de la demanda.

La interconexión hídrica, sólo se justificaría si existen excedentes de agua en los distintos sistemas de impulsión de agua desalinizada (SIAD) junto con requerimientos hídricos que no pueden ser cubiertos por aguas continentales y sí por el sistema interconectado, ya sean de usuarios actuales o nuevos. Si bien, a medida que aumenta el grado de utilización de la interconexión, debido a que no hay más alternativas de abastecimiento, el proyecto se vuelve más eficiente desde el punto de vista de los costos marginales y medios, también ocurre que al materializar la inversión y darle un uso intensivo, van aumentando los costos operacionales del sistema junto al costo total necesario para satisfacer las demandas de los usuarios del sistema, las cuales no podrían ser abastecidas de otra manera.

Por lo tanto, parece indispensable planificar y tener proyecciones de los recursos hídricos disponibles y de las demandas hídricas tanto de los actuales como de nuevos usuarios hídricos del sistema que se proyecte, de esa manera contar con la información necesaria para decidir si el proyecto se justifica y cuál es momento adecuado de implementarlo, junto con diseñarlo de la manera más eficiente posible en términos económicos e hídricos. Ya que, si la demanda o los recursos hídricos disponibles en el sistema interconectado son muy bajos, la inversión generará una alternativa hídrica con costos relativamente altos comparándola con una que si se utilice en niveles cercanos a su capacidad máxima. Por otro lado, si existen las condiciones que se mencionan para realizar una inversión eficiente o de bajos costos marginales y ésta no se materializa, podría ocurrir la situación en que existan faenas o proyectos mineros que estén dispuestos a asumir los costos de un sistema hídrico interconectado, pero al no materializarse el proyecto, junto a la no existencia de otras fuentes de agua, desperdicien su potencial minero, junto con los beneficios económicos que implican estas iniciativas.

Es importante analizar la factibilidad técnico-económica de la interconexión hídrica tramo por tramo; se puede plantear un sistema de interconexión que vaya creciendo por etapas, en función de las variaciones de oferta y demanda de agua en diferentes zonas. Los resultados obtenidos en la zona de estudio muestran por ejemplo que una simple extensión del SIAD de Escondida hasta el área de Gabriela Mistral, que significaría solamente un 47% de la inversión de la interconexión total sin SWAP, permite cubrir hasta 83% del volumen que entregaría el sistema de interconexión completo sin SWAP. El costo marginal en este caso podría ser menor que 4 US\$/m<sup>3</sup>.

El modelo de gobernanza, junto con el modelo de financiamiento y de repartición de costos representan un gran desafío. Entre los posibles modelos de financiamiento, el modelo de concesión o de BOOT aparece como el más atractivo. La institucionalización del sistema de interconexión es otra posible vía que adicionalmente se inscribe en el contexto de una voluntad declarada de desarrollar una gestión integrada de los recursos hídricos.

La interconexión es un instrumento esencial en la gestión integrada que permitiría un uso intermitente de los recursos hídricos continentales en función de su real disponibilidad y sin poner en riesgo el abastecimiento en agua de los diferentes usuarios, asemejándose a los modelos internacionales que ya existen en Israel o en Australia (Queensland).

## 10.3 Recomendaciones

Este estudio es un análisis preliminar y probablemente incompleto de algunas de las oportunidades y de los principales desafíos que representa la interconexión hídrica en el contexto del suministro de agua para la industria minera y de manera general de la gestión integrada de los recursos hídricos en el norte de Chile. Para seguir avanzando hacia una eventual materialización de los proyectos de interconexión, se recomienda avanzar en los siguientes pasos.

### 10.3.1 Consolidación de la información sobre oferta y demanda

El estudio mostró el carácter esencial de la información sobre la demanda actual y futura de agua por parte de cada uno de los usuarios y sobre disponibilidad de los recursos hídricos, en particular de los recursos continentales sobre los cuales existe un alto grado de incertidumbre. La interconexión toma sentido y valor cuando existen por el lado de algunos usuarios un déficit de agua y por el lado de algunos proveedores, un exceso de agua. Para poder estimar estos déficits y excesos de agua y proyectarlos en el tiempo, es necesario poder contar con una información detallada y confiable, o con estimaciones con su respectivo grado de confianza. Sería también interesante analizar el crecimiento potencial de la demanda de agua a partir de una estimación del potencial de crecimiento de producción de los proyectos existentes y de la materialización de proyectos nuevos.

En particular, en relación con los recursos superficiales y subterráneos, sería interesante poder acoplar al modelo de balance modelos hidrológicos e hidrogeológicos para estimar la disponibilidad de agua y su eventual variación en el tiempo.

Por el lado de la demanda, es necesario definir también qué tipo de usuarios se va a considerar y a partir de qué flujo mínimo de demanda se pueden incorporar al sistema interconectado. Este punto es particularmente relevante si se quiere aumentar el valor social del proyecto

incorporando al sistema demandas de agua para las comunidades y demandas de agua no industriales.

### 10.3.2 Mejoras en la estimación de costos y beneficios

Otro espacio de mejora en el modelo y en las simulaciones tiene relación con la estimación de los costos del agua y de los beneficios asociados a su uso (o pérdidas por indisponibilidad del recurso).

Por el lado de los costos, sería importante poder avanzar en los siguientes puntos:

- Mejorar la estimación de los costos de tuberías para diferentes tamaños y de su instalación, así como de los costos de las estaciones de bombeo.
- Incorporar los costos asociados al suministro de agua a la interconexión desde las otras fuentes de recursos hídricos adicionales a las aguas desalinizadas.
- Calibrar el modelo de costos con datos reales.
- Incorporar al modelo operacional variables económicas relevantes: precio de la energía, del cobre y de otras variables relevantes que podrían variar la rentabilidad del proyecto.

En cuanto a los beneficios por el uso del agua de interconexión o de pérdida de oportunidad por indisponibilidad de los recursos, sería interesante poder disponer de una estimación validada por cada uno de los usuarios. Es importante poder determinar el beneficio marginal (o pérdida marginal) para cada tipo de proceso y cada faena en particular. En el caso de la minería, estos valores dependerán evidentemente del precio de los minerales por lo cual sería importante poder sensibilizar esta estimación en función de las condiciones de mercado.

### 10.3.3 Estimación y caracterización de fallas

Es necesario analizar con mayor detalle y atención la probabilidad de ocurrencia de diferentes tipos de fallas, tanto de las plantas de desalinización como de los sistemas de impulsión, con su respectiva duración. En la actual configuración del modelo que establece los balances en una escala mensual, solo se puede simular fallas de duración mensual, lo cual no reflejaría la realidad.

Por otro lado, será necesario también incorporar en el modelo las capacidades de almacenamiento que existe, asociados a las diferentes faenas y que permiten responder, al menos parcialmente, a fallas de pequeña duración.

### 10.3.4 Calidad del agua

El tema de la calidad del agua debe ser analizado con atención. Debido a las características químicas muy distintas de las aguas, en particular de las aguas continentales, es necesario analizar el efecto de mezcla de los diferentes tipos de agua y eventualmente establecer criterios de calidad de entrada de agua al sistema interconectado. Esto puede derivar eventualmente en la necesidad de agregar sistemas de tratamiento de agua para asegurar la calidad mínima de entrada. De la misma manera, pueden existir requisitos específicos de calidad del agua en función de su uso que requieran también algún tipo de tratamiento. La calidad de agua requerida para procesos de lixiviación puede diferir de la calidad requerida para plantas de flotación. Este punto es particularmente relevante si se piensa incorporar entre los usuarios potenciales comunidades que requieren agua potable o agua para riego.

### 10.3.5 Administración y operación del sistema

Tal como se mencionó en el capítulo 6, la gobernanza del sistema es un tema complejo que está muy ligado también al financiamiento de la inversión que representa el sistema de interconexión. Es fundamental definir qué institución llevará adelante el proyecto. Se pueden analizar opciones impulsadas desde el sector privado o un sistema de interconexión manejado desde el sector público. Cualquiera sea la opción, el necesario analizar y diseñar el mercado y las reglas bajo las cuales operaría el sistema de interconexión. Es indispensable establecer reglas y compromisos muy claros de ingreso de los diferentes actores al sistema. Por un lado, deben existir compromisos de entrega de excedentes de agua al sistema de interconexión a mediano y largo plazo suficientes para darle viabilidad económica al sistema y para reducir al máximo la vulnerabilidad del abastecimiento a los usuarios del agua del sistema de interconexión. Adicionalmente se deben incluir reglas claras para el cálculo de los costos, tanto para el agua que los proveedores ingresan al sistema (que pueden ser distintos en función del carácter estacional, la calidad y ubicación de la fuente) como para el agua consumida por cada usuario.

En el caso de una interconexión impulsada por el sector público podría transformarse en una herramienta de gestión integrada de los recursos hídricos, lo que probablemente requeriría cambios regulatorios y cambios en la política de gestión de los recursos hídricos.

Ambos puntos requieren el desarrollo de estudios mucho más completos y profundos que van más allá de los aspectos esencialmente técnicos que se abordaron en este estudio preliminar.

### 10.3.6 Evaluación social del proyecto

Uno de los alcances del proyecto de interconexión que quedó fuera del ámbito de este estudio tiene relación con los beneficios sociales que podría tener un sistema de interconexión hídrico. Se propone desarrollar una evaluación social del proyecto, tal como se suele aplicar en general en proyectos de infraestructura pública. Este tipo de análisis se justificaría particularmente en el caso de un sistema de interconexión impulsado desde el sector público, probablemente a través del sistema de concesión.

Los beneficios sociales del proyecto pueden ser directos en caso de comunidades conectadas al sistema de interconexión hídrica, o indirectos a través de la generación de empleo por la mayor actividad económica impulsada por la interconexión.

### 10.3.7 Sociabilización del proyecto

Sobre la base de los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda iniciar una difusión de los resultados obtenidos para evaluar el interés de los diferentes actores, tanto desde el ámbito público como privado, para, a partir de ello, abrir una discusión en torno a la interconexión hídrica, las oportunidades y los desafíos.

## 11 Referencias

- [1] CIA, «The World Factbook,» 12 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/is.html>. [Último acceso: 19 Julio 2018].
- [2] B. Ziv, H. Saaroni, R. Pargament, T. Harpaz y P. Alpert, «Trends in rainfall regime over Israel, 1975–2010, and their relationship to large-scale variability,» *Regional Environmental Change*, 2012.
- [3] World Bank Group, «Water Management in Israel,» Washington, DC, 2017.
- [4] OECD, «Water Resources Allocation,» *OECD Studies on Water*, 2015.
- [5] Israel Water Authority, «Monitoring and Prevention of Water Pollution,» de *7th World Water Forum 2015*, 2015.
- [6] Israel Water Authority, «Challenges and Solutions for the Water Sector in Israel and the Region,» 2011.
- [7] Israel Water Authority, «<http://www.water.gov.il>,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.water.gov.il/Hebrew/ProfessionalInfoAndData/2012/02-Israel%20Water%20Sector%20-%20IWRM%20Model.pdf>. [Último acceso: Agosto 2018].
- [8] Seqwater, “Seqwater, Water for Life,” [Online]. Available: <https://www.seqwater.com.au>. [Accessed 10 Agosto 2018].
- [9] Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, «Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015,» Ministerio de Interior y Seguridad Pública, Santiago, Chile, 2015.
- [10] Dirección General de Aguas, «Atlas del Agua 2016,» Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile, 2016.
- [11] Escenarios hídricos 2030 Chile, «Resumen Estratégico Radiografía del Agua: Brechas y Riesgo Hídrico en Chile,» Fundación Chile, Santiago, Chile, 2018.
- [12] COCHILCO, «Consumo de agua en la minería del cobre al 2017,» Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Santiago, Chile, 2018.
- [13] Consejo Minero, «Plataforma del Agua,» 2018. [En línea]. Available: <https://consejominero.cl/inicio/comunicaciones/plataforma-de-agua/>. [Último acceso: 2018].
- [14] Stockholm Environment Institute, «Página Web WEAP,» [En línea]. Available: <http://www.weap21.org>. [Último acceso: 20 11 2018].
- [15] Comisión Nacional de Energía, «Resolución Exenta 699, Estudio de Costos de Servicios Asociados al Suministro de Electricidad de Distribución,» 2015.
- [16] Ministerio de Economía, *Ley 18902 - Crea la Superintendencia de Servicios Sanitarios*, 1990.
- [17] Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Concesiones, «Desalinización por Sistema de Concesiones: Financiamiento Sistema de Concesiones,» de *Taller Análisis de Iniciativas Plantas Desalinizadora*, Santiago, Chile, 2009.
- [18] Emol, «Codelco busca socio para construir y operar planta desaladora en la Región de Antofagasta,» *El Mercurio Online*, 21 Enero 2017.
- [19] El Pulso, «BHP aprueba inversión de US\$2.460 mills. para extender vida de Spence,» *El Pulso*, 18 Agosto 2017.
- [20] Estudio de abogados Carey, «<https://www.carey.cl>,» 2017. [En línea]. Available:

<http://reformacodigodeaguas.carey.cl/principales-reformas-al-codigo-de-aguas/>. [Último acceso: 19 Noviembre 2018].

- [21] DGA, «Informe Técnico - Análisis Preliminar de Planes de Alerta Temprana con Condicionamiento de Derechos,» Dirección General de Agua, División de Estudios y Planificación, SDT N° 335, 2012.
- [22] COCHILCO, «Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028,» Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Santiago, Chile, 2017.
- [23] Comisión Regional Antofagasta, «Acuerdo 14757-18 (S.Ord.612.22.06),» 2018.
- [24] C. R. Antofagasta, «Acuerdo 14796-18 (S.Ord.614.27.07),» 2018.
- [25] SUBDERE, «Guía de Zonificación Costera para el Ordenamiento Territorial,» Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, Departamento de Políticas y Descentralización - División de Políticas y Estudios, 2011.
- [26] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Estudio tarifario empresas de servicios sanitarios segunda región aguas Antofagasta S.A.,» 2016.