

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Eduardo Balladares V.

**DISPONIBILIDAD ACTUAL Y FUTURA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, Y USO
EFICIENTE DEL AGUA EN LA MINERÍA CHILENA**

NICOLÁS ABDIEL NAVARRETE ARRATIA

Informe de Memoria de Título para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Julio 2019

RESUMEN

El presente estudio busca establecer una referencia general sobre la situación hídrica en el sector minero de Chile, en especial, el sector minero del cobre, analizando las fuentes de agua disponibles para el uso de esta industria y la demanda siempre creciente así como considerable que este rubro necesita para suplir sus líneas de procesamiento. Se recabaron aquellos datos específicos de caudales de agua utilizados en cada uno de los sectores mineros y en cada área de la minería del cobre desde las fuentes informativas más actualizadas a la fecha, provenientes de las compañías mineras y las diferentes instituciones gubernamentales relacionadas al área.

La mayor proporción de la minería del cobre chilena se ubica en el Norte Grande, naturalmente una zona de extrema aridez, por lo que el impacto de la extracción hídrica minera genera un impacto mucho mayor en su entorno. Esta situación obliga a las empresas gestionar con sumo cuidado las extracciones de aguas superficiales y subterráneas, y propicia la constante innovación en tecnologías que aumenten la eficiencia hídrica de los procesos, o bien, la expansión de la oferta hídrica desde otras fuentes.

La extracción de agua total que realizó la industria minera del cobre durante el 2017 fue de 16,4 [m³/s], del cual un 80% corresponde a aguas de origen continental y el 20% a aguas de origen marino. Se calcula que el requerimiento hídrico de la industria alcance para el año 2029 un caudal de 25,4 [m³/s] con una presencia del agua oceánica que asciende al 43% del total de extracción hídrica. Se prevé que la demanda hídrica de la minería del cobre está asegurada por lo menos hasta 2027 gracias a la incorporación de nuevas plantas de utilización de agua marina.

Las empresas mineras han entregado señales que responden positivamente al escenario de estrechez hídrica que se vive, adoptando nuevas tecnologías e invirtiendo en la innovación de técnicas que permitan optimizar el uso de agua. Aún queda mucho por evolucionar y desarrollar para alcanzar el ideal de consumo, pero se estima que en los próximos años los índices de eficiencia hídrica seguirán mejorando progresivamente.

ABSTRACT

The present study seeks to establish a general reference about the water situation in the mining sector of Chile, in particular, the mining sector of copper, by analyzing the available sources of water for the use of this industry and the ever-growing demand as well as considerable that this item needs to meet their processing lines. We collected those data for specific water flow rates used in each of the sectors, miners and in every area of the mining of copper from the information sources up-to-date to date, from the mining companies and the various government institutions related to the area.

The largest proportion of the copper mining of Chile is located in the Norte Grande, of course, a zone of extreme aridity, so that the impact of the extraction water mining generates a much greater impact on their environment. This situation forces companies to manage with extreme care the extractions of surface water and groundwater, and contributes to the constant innovation in technologies that increase water efficiency of the processes, or the expansion of the supply of water from other sources.

The extraction of total water made by the mining industry of the copper during the 2017 was 16.4 [m³/s], of which 80% corresponds to water of continental origin and 20% to water of marine origin. It is estimated that the water requirement of the industry scope to the year 2029, a flow rate of 25.4 [m³/s] with a presence of ocean water which amounts to 43% of the total extraction of water. It is expected that the water demand of the copper mining is ensured until at least 2027, thanks to the addition of new plants using sea water.

The mining companies have given signals that they respond positively to the scenario of narrow-water that is living, adopting new technologies and investing in the innovation of techniques that allow to optimize the use of water. There is still much to evolve and develop to achieve the ideal of consumption, but it is estimated that in the next few years, the rates of water efficiency will continue to improve gradually.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2 DISPONIBILIDAD HÍDRICA ACTUAL	4
2.1. Disponibilidad y demanda hídrica mundial.....	4
2.2. Disponibilidad y demanda hídrica en Chile	6
CAPÍTULO 3 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA MINERÍA CHILENA Y MINERÍA DEL COBRE	10
3.1. Fuentes de agua en la minería nacional	12
3.2. Demanda hídrica minería chilena.....	15
3.2.1. Gran minería del cobre	15
3.2.2. Minería metálica no cuprífera y no metálica.....	17
3.2.3. Mediana minería del cobre	20
3.2.4. Fundiciones y refinería.....	22
3.2.5. Otros sectores mineros	22
3.3. Demanda hídrica minería del cobre.....	24
3.3.1. Fuentes de extracción hídrica.....	28
3.3.2. Consumo hídrico por procesos.....	31
3.3.3. Avances en la utilización del recurso hídrico	32
3.3.3.1. Optimización del recurso.....	33
3.3.3.2. Recirculación.....	35
3.3.3.3. Agua de mar.....	36
3.3.4. Consumo hídrico por regiones	37
CAPÍTULO 4 PROYECCIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA MINERÍA DEL COBRE	44
4.1. Proyección demanda hídrica por origen	46
4.2. Proyección demanda hídrica por procesos	47

4.3. Proyección demanda hídrica por regiones.....	52
CAPÍTULO 5 ALTERNATIVAS PARA EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE.....	54
5.1. Introducción.....	54
5.2. Agua de mar.....	56
5.2.1. Sistemas de desalación.....	58
5.2.2. Uso directo de agua de mar.....	60
5.3. Supresión de polvos.....	62
5.4. Optimización de relaves.....	64
5.5. Tratamiento de aguas residuales.....	66
5.6. Carretera hídrica.....	68
5.7. Recarga Artificial de acuíferos.....	69
CAPÍTULO 6 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....	71
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS	78
HOJA RESUMEN MEMORIA DE TÍTULO.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Disponibilidad de agua dulce en el planeta Tierra.....	4
Figura 2.2: Distribución de consumo agua dulce promedio.....	6
Figura 2.3: Oferta y demanda de los recursos hídricos en Chile, por regiones.....	7
Figura 2.4: Distribución del uso consuntivo de agua dulce a nivel nacional.....	8
Figura 3.1: Clasificación de las fuentes de agua en minería chilena.....	13
Figura 3.2: Distribución de las fuentes hídricas en la minería chilena al considerar el agua recirculada (izquierda) y al no considerar el agua recirculada (derecha).....	14
Figura 3.3: Distribución de fuentes hídricas utilizadas en la gran minería del cobre, sin considerar aguas recirculadas.	17
Figura 3.4: Distribución de fuentes hídricas utilizadas en la minería metálica no cuprífera y minería no metálica, sin considerar aguas recirculadas.....	20
Figura 3.5: Distribución de fuentes hídricas utilizadas en la mediana minería del cobre, sin considerar aguas recirculadas.....	21
Figura 3.6: Consumo de aguas continentales según sector minero.....	23
Figura 3.7: Consumo de aguas marinas según sector minero.	24
Figura 3.8: Procesamiento básico de minerales por vía de concentración.....	26
Figura 3.9: Procesamiento básico de minerales por vía hidrometalúrgica.....	26
Figura 3.10: Procesamiento básico de minerales en etapas de fundición y refinería.....	27
Figura 3.11: Fuentes de extracción hídrica en la Minería del Cobre.	30
Figura 3.12: Consumo de agua salobre y desalada en la Minería del Cobre, 2010-2017.....	30
Figura 3.13: Tasas de consumo unitario de agua continental por proceso en la Minería del Cobre, 2009-2017.....	34
Figura 3.14: Tasa de recirculación de agua en área concentración de la Minería del Cobre, 2012-2017.....	35
Figura 3.15: Evolución del consumo de agua de mar en la Minería del Cobre 2010-2017.....	37
Figura 3.16: Demanda de agua continental en la Minería del Cobre por regiones.	38
Figura 3.17: Tasas de consumo unitario en la Minería del Cobre por región, 2012-2017.....	42
Figura 3.18: Tasa de recirculación global en la Minería del Cobre por regiones.	43
Figura 4.1: Demanda hídrica de la minería del cobre, 2018-2029.....	45
Figura 4.2: Distribución porcentual de las aguas utilizadas en la Minería del Cobre según fuente de origen, 2018-2029.	47
Figura 4.3: Proyección demanda hídrica en área concentradora Minería del Cobre, 2018-2029.	48
Figura 4.4: Proyección demanda hídrica en área hidrometalurgia Minería del Cobre, 2018-2029. ..	49
Figura 4.5: Proyección demanda hídrica en área Otros Minería del Cobre, 2018-2029.....	50
Figura 4.6: Proyección demanda hídrica en área Fundición y Refinería Minería del Cobre, 2018-2029.	51
Figura A.1: Promedio del estrés hídrico mundial según relación captación-disponibilidad.....	78
Figura A.2: Evolución demanda aguas continentales y aguas de mar, 2015 - 2017.....	80
Figura A.3: Demanda hídrica global en la industria minera chilena y la presencia del agua recirculada, 2015 – 2017.	81

Figura A.4: Distribución del agua fresca utilizada en la Minería del Cobre por proceso.	81
Figura A.5: Mapa de las zonas de agotamiento hídrico en el Norte Grande, Chile.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Evolución demanda hídrica según fuentes entre los años 2015 a 2017 [m ³ /s].	15
Tabla 3.2: Tasas de Recirculación en la Minería del Cobre.....	29
Tabla 3.3: Caudal de aguas continentales según fuente de extracción en la Minería del Cobre.....	29
Tabla 3.4: Caudal y tipo de agua marina utilizada en la Minería del Cobre.	29
Tabla 3.5: Consumo de agua fresca por área en la Minería del Cobre.	32
Tabla 3.6: Distribución porcentual del consumo de agua fresca por área en la Minería del Cobre...	32
Tabla 3.7: Consumo de agua continental en la Minería del Cobre por región, 2012-2017.	38
Tabla 3.8: Consumo de agua según fuente de origen en la Minería del Cobre por región.	39
Tabla 3.9: Consumo de agua según proceso en la Minería del Cobre por región.....	40
Tabla 4.1: Proyección demanda aguas continentales por región en la Minería del Cobre, 2018-2029.	52
Tabla 4.2: Proyección demanda aguas de mar por región en la Minería del Cobre, 2018-2029.	52
Tabla 5.1: Catastro plantas desaladoras y sistemas impulsión de agua marina en minería del cobre.	57
Tabla A.1: Demanda hídrica por sector consumidor y región [m ³ /s].	79
Tabla A.2: Demanda hídrica por sector consumidor y región [Mm ³ /año].	79
Tabla A.3: Proyección demanda hídrica futura 2030 y 2040 por sector y región [Mm ³ /año].	80

NOMENCLATURA

AGR: Agrícola.

APR: Agua Potable Rural.

APU: Agua Potable Urbana.

COCHILCO: Comisión Chilena del Cobre.

CODELCO: Corporación Nacional del Cobre de Chile.

DGA: Dirección General de Aguas.

ELE: Eléctrico Consuntivo.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization).

IND: Industrial.

Km³: Kilómetros cúbicos.

KWh/m³: Kilowatt por hora por metro cúbico.

MIN: Minero.

m³/s: Metros Cúbicos por segundo.

Mm³: Millones de metros cúbicos.

MMUS\$: Millones de dólares.

MOP: Ministerio de Obras Públicas.

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics and Space Administration).

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PEC: Pecuario.

PIB: Producto Interno Bruto.

SONAMI: Sociedad Nacional de Minería.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey).

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El agua es uno de los compuestos más abundantes en la faz de la Tierra e incluso de los más comunes en nuestro Sistema Solar y en todo el Universo en sus formas de hielo y vapor. De la misma forma, el agua es uno de los compuestos más abundantes en el cuerpo humano, representando en promedio alrededor de dos terceras partes del peso corporal humano y en otras especies animales conocidas. Sin lugar a dudas, es un recurso imprescindible para originar y sustentar casi cualquier forma de vida conocida por el hombre y por lo tanto de primera necesidad para toda empresa humana.

Se ha subestimado la importancia del agua, catalogándola como un bien infinito, siempre disponible que nunca se acabará, pero en los últimos años la Tierra ha enviado numerosas señales de alerta sobre este asunto. En diferentes puntos del planeta comienza a notarse y a acrecentarse el problema de la escasez hídrica que está generando diversa clase de problemas. Las exorbitantes cantidades de agua que demanda la industria agrícola, el crecimiento desmedido de la población mundial y la industria minera son solo algunos de los factores que más fuertemente afectan la calidad y disponibilidad del agua a nivel planetario. Según estudios de la **National Aeronautics and Space Administration (2019)** (NASA, por sus siglas en inglés), actualmente la humanidad está consumiendo agua a mucha mayor velocidad de la que se puede reemplazar, y si este problema no se revierte en el mediano plazo, se podría estar hablando del problema más grave que enfrente la humanidad durante las próximas décadas.

En nuestro país, la actividad minero-metalúrgica se concentra en gran medida en el extremo norte, la zona más árida y con menor disponibilidad hídrica del territorio, pues ahí es donde se localiza el recurso minero por lo que esta industria se ve enfrentada al mismo desafío que enfrenta la población, fauna y flora local para subsistir, la obtención de agua fresca y abundante. A pesar de esto, no se evidencia que la demanda de agua en estas zonas por parte del sector minero sea una limitante para su desarrollo ya que durante los años la industria ha sabido incrementar de manera notable la eficiencia de su uso. Aunque por otro lado persiste el desafío de mejorar la calidad de los efluentes que la industria genera y devuelve al entorno.

En este caso particular, la industria minera tiene en el agua subterránea la principal fuente de extracción de agua fresca para sus procesos, servicios, consumo y transporte, entre otros. El objetivo es afrontar esta realidad manteniendo índices económicos competitivos a nivel mundial y sin que esto signifique un impacto ambiental o social en el entorno minimizando el riesgo de contaminación de las aguas como consecuencia de sus procesos productivos. En este contexto, la búsqueda de nuevas fuentes de agua y la optimización del consumo a través de la incorporación de mejores tecnologías al proceso representan la principal meta de este ámbito.

El presente estudio analiza la información levantada sobre la demanda hídrica en el área minera y cuprífera en específico, la proyección de esta demanda y su evolución durante la década siguiente además de presentar tendencias innovadoras y tecnológicas que rodean a la optimización del recurso en faenas mineras, que se traduce en disminución de costos asociados a la gestión del recurso hídrico, ampliación de la oferta hídrica para sus procesos, aumento en los índices de recirculación hídrica, disminución en las tasas de consumo unitario, o bien, descongestión de la competencia hídrica con las demás partes involucradas en el consumo de agua.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Recopilar y analizar información relacionada a la disponibilidad y consumo de agua asociado a la actividad minera nacional, con especial atención a la gran minería del cobre, en la actualidad, y cómo evolucionará y se comportará esta relación en el mediano plazo (2018-2029).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar detalladamente la relación entre oferta y demanda del recurso hídrico en el sector minero-metalúrgico nacional.
- Identificar cuantitativamente las brechas entre disponibilidad y las potenciales limitaciones de consumo del recurso hídrico en el sector minero-metalúrgico proyectado en el mediano plazo (2018-2029).
- Investigar e identificar nuevas alternativas basadas en tecnologías y procesos que permitan acortar la brecha de disponibilidad/requerimiento del recurso hídrico, incrementando ya sea la oferta de agua o bien la disminución en los consumos específicos en el sector minero-metalúrgico.
- Identificar limitaciones y barreras técnicas que dificulten o impidan la entrada de nuevas tecnologías y procesos que beneficien la disponibilidad del agua en la industria minera-metalúrgica.

CAPÍTULO 2 DISPONIBILIDAD HÍDRICA ACTUAL

2.1. Disponibilidad y demanda hídrica mundial

El planeta Tierra almacena un volumen de agua total de un poco más de 1.450 millones [km³] según las últimas estimaciones cubriendo el 71% de la superficie del globo, esta cantidad se ha mantenido casi inalterable durante los últimos milenios, a pesar de las diferentes eras y condiciones planetarias debido al ciclo del agua. De la totalidad del agua en la Tierra, más de un 97% corresponde a agua salada no potable presente en los océanos y mares, y menos del 3% es agua dulce. De este porcentaje de agua dulce, cinco sextas partes se encuentran congeladas en estado sólido, en los polos Antártico y Ártico y campos de hielo; mientras que apenas el 0,5% de toda el agua del mundo es agua fresca y dulce, potable y en estado líquido, encontrándose la mayor parte de este segmento en depósitos subterráneos y de difícil acceso, las que ascienden a un volumen estimado de 10⁶ [km³]; el agua dulce presente en las precipitaciones netas considerando la evaporación sería de 119.000 [km³]; entre lagos naturales y represas construidas por el hombre cerca de 100.000 [km³]; y el agua corriente en ríos constantemente reemplazada por precipitaciones y derretimiento de hielos y nieves asciende a un poco más de 2.000 [km³], tal como se aprecia en la Figura 2.1.

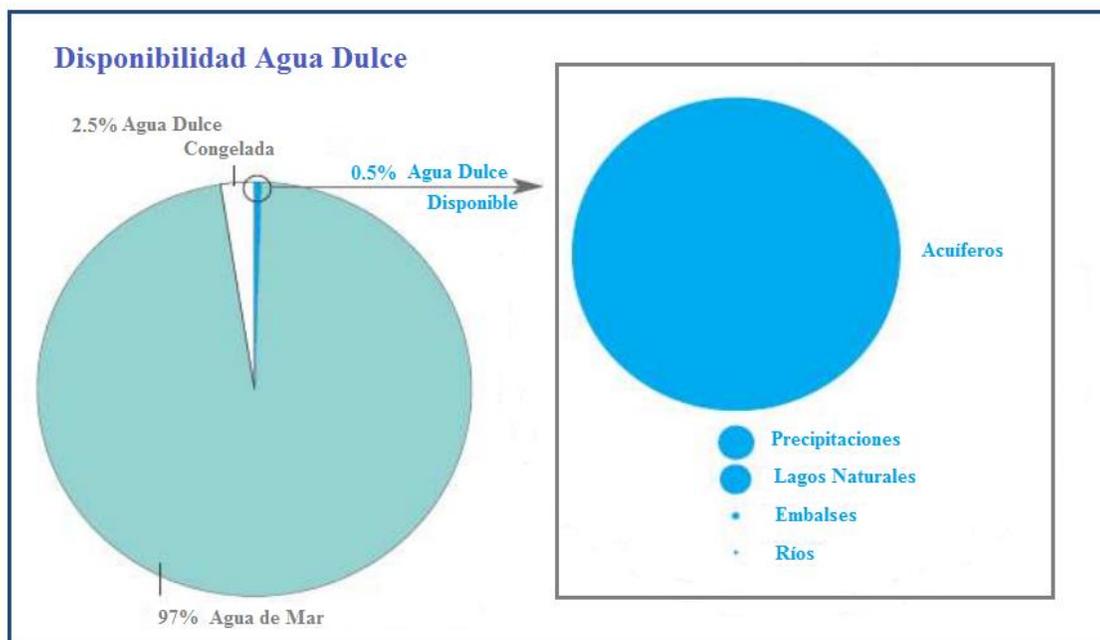


Figura 2.1: Disponibilidad de agua dulce en el planeta Tierra.

Fuente: Adaptado de "Water, Facts and trends" / World Business Council for Sustainable Development, 2009

Es notorio apreciar que aun en este acotado segmento de agua dulce global en estado líquido y potable la cantidad del recurso realmente al alcance de la población es tan solo una pequeña porción del total estimado. Esta suma de factores significa una disponibilidad limitada del agua para el consumo humano y se acentúa por la distribución desigual en las superficies continentales, lo que genera naturalmente zonas de abundancia y zonas de escasez hídrica, lo cual se agrava aún más producto de la poca conciencia responsable generalizada del ser humano sobre el uso y cuidado de este recurso.

Según **United Nations World Water Assessment Programme (2014)** (Reporte de Desarrollo Mundial del Agua), y como aparece representado en la Figura 2.2, de todo el volumen de agua dulce disponible en la Tierra, el sector agrícola representa el principal consumidor a nivel global considerando que la irrigación de esta actividad significa el 70% de las extracciones hídricas totales. Con la creciente demanda de comida, la competencia por el agua también aumenta, en general, los cultivos más especializados requieren más agua (y a su vez, más energía) lo que en la mayoría de las ocasiones significa también una mayor contaminación de las aguas utilizadas. Ahora, estas cifras pueden variar bastante de país a país y de sector a sector, por ejemplo, el consumo de agua fresca en el sector industrial es mucho más importante en países desarrollados, mientras que en países en vías de desarrollo el consumo de agua dulce de la agricultura es todavía más dominante respecto a otras actividades, llegando a índices sobre el 90% del total de extracciones. El sector industrial representa casi el 20% de todas las extracciones de agua, pero con inmensas variaciones regionales: en el sur de Asia el consumo de agua del sector industrial es de solo el 2%, mientras que en Europa Occidental para el mismo segmento llega al 77%. El área minera se encuentra en el tercer puesto dentro de las categorías que más extraen agua dentro del sector industrial donde el área dominante es la generación de energía (hidroeléctrica y nuclear) que usan alrededor de dos terceras partes del subtotal. La minería se disputa el segundo lugar de consumo equilibradamente junto a la industria del papel, la industria ganadera y otras industrias.

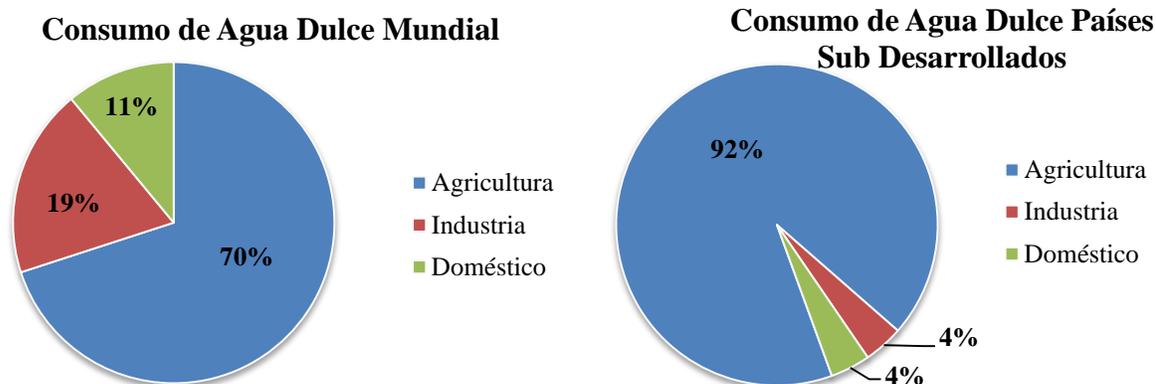


Figura 2.2: Distribución de consumo agua dulce promedio.

Fuente: Elaboración propia en base a “Water and Energy, Volume 1” / United Nations World Water Development Report, 2014.

El área minera, como se entiende, aunque siendo un actor importante en este ítem no está ni cerca de ser la industria o el segmento que más consume agua, y es preciso mencionar que según estudios del Servicio Geológico de los Estados Unidos (**United States Geological Survey, 2019**), la demanda de agua desde la industria minera representa menos del 1% de la demanda global de agua, sin embargo, esto no atenúa el gran impacto que ha tenido esta actividad sobre las reservas hídricas a nivel planetario derivados de los vertidos de aguas residuales y su potencial contaminación, lo que se ha evidenciado sobre todo durante las últimas décadas al aumentar el transporte de información y la conciencia ambiental responsable.

Para el consumo humano, el agua subterránea se alza como la principal fuente de abastecimiento de agua dulce a nivel mundial y en países como Dinamarca o México comprende una parte casi absoluta del suministro total (99% y 95% respectivamente)^[57].

2.2. Disponibilidad y demanda hídrica en Chile

Si se toma en cuenta la realidad mundial actual y se compara ésta de manera puntual a la realidad de cada país en el mundo, Chile fácilmente se puede considerar un país privilegiado en recursos hídricos, contando en todo el territorio nacional más de 1.250 ríos y más de 12.000 lagos y lagunas de diferentes formas y tamaños, y más de 24.000 glaciares de los que casi en su totalidad contienen agua de alta calidad^[23], lo que significa un incalculable valor tanto en lo medio ambiental como en lo social, turístico y económico. A toda esta reserva, se suma una

extensa línea costera de más de 5.000 [km] de longitud que representa un potencial aporte de agua dulce al país a través de su desalación o incluso su utilización en estado natural.

La disponibilidad de agua dulce media per cápita que presenta nuestro país es alrededor de 8 veces mayor al promedio mundial y muy por encima del umbral que establece el desarrollo sustentable sobre recursos hídricos, sin embargo esta cifra esconde una realidad bastante desigual. Si se analiza sectorialmente, desde Santiago al norte, la condición árida es la realidad predominante y la disponibilidad de agua por persona cae abruptamente unas 65 veces menor al promedio nacional ^[23], una situación totalmente opuesta a la realidad hídrica que se observa de Santiago hacia el sur donde la disponibilidad de agua proveniente de acuíferos, depósitos naturales y precipitaciones es sobreabundante. Realidad que se muestra representada en la Figura 2.3 referente a la presión de consumo sobre la disponibilidad de recursos hídricos en cada región.

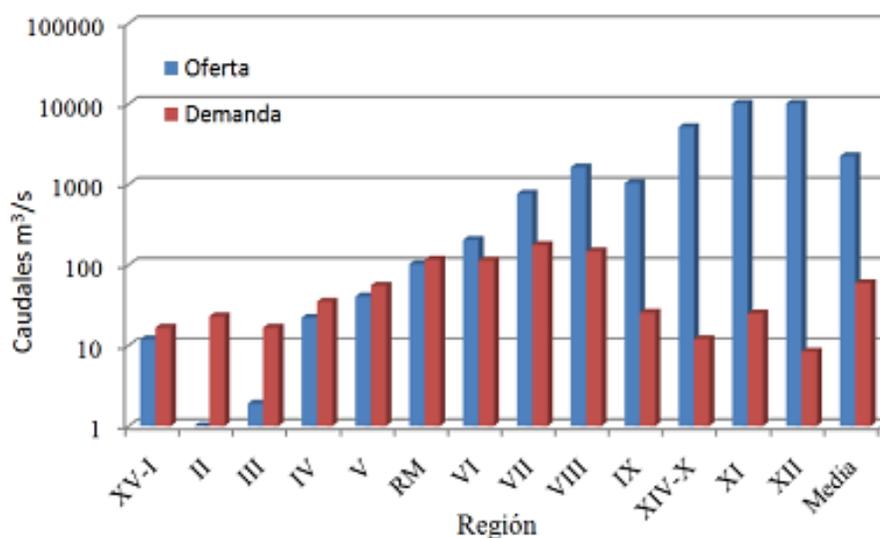


Figura 2.3: Oferta y demanda de los recursos hídricos en Chile, por regiones.

Fuente: Documento del Banco Mundial “Chile: Diagnóstico de gestión de los recursos hídricos”, 2011.

El cambio climático ha ofrecido con mayor frecuencia fenómenos asociados a sequías en todo el mundo, lo que unido al crecimiento económico prolongado que ha experimentado el país, sumado al desarrollo social y los distintos sectores consumidores de agua han generado un aumento en la demanda en un escenario en donde la gran mayoría de estos recursos ya se

encuentran comprometidos en el abastecimiento de los actuales usos, lo que incluso ha provocado escasez y como consecuencia políticas de restricción y prohibición de extracciones hídricas en ciertas regiones. Ya desde el 2010, la demanda del recurso supera ampliamente a su disponibilidad desde Santiago al norte lo que supone que prácticamente la mitad de Chile tiene una accesibilidad de agua subterránea por persona menor a la media mundial, y se espera que la demanda siga aumentando durante los próximos años por lo que se hace necesario tomar medidas urgentes y buscar soluciones para enfrentar este déficit.

De toda el agua dulce disponible en el territorio nacional, el requerimiento de consumo consuntivo se distribuye de la siguiente manera: el principal sector consumidor del recurso es el Agropecuario acaparando el 73% del total, más de seis veces la demanda del sector siguiente; muy de lejos está el sector de Agua Potable y Saneamiento con 11,9% del total; el sector Industria con 11,2%; y para cerrar esta lista, el sector Minería que aparece como sector consumidor particular, con el restante 3,9% según las últimas estimaciones de la **Dirección General de Aguas (2017)**. La Figura 2.4 muestra una representación de la distribución en la demanda hídrica consuntiva del país de acuerdo a sectores usuarios.

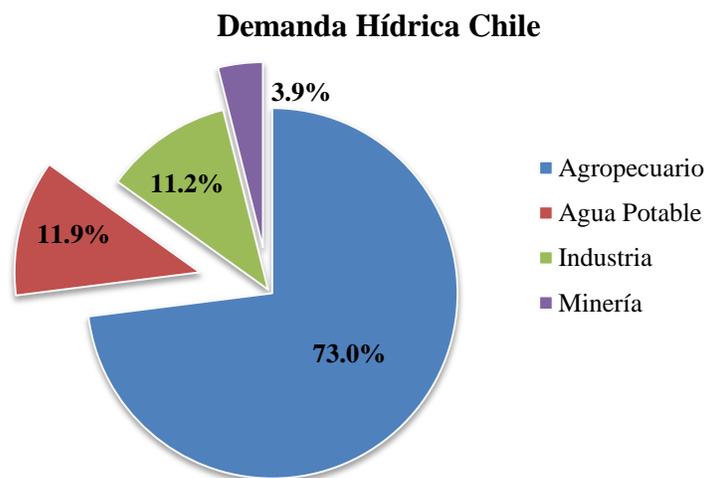


Figura 2.4: Distribución del uso consuntivo de agua dulce a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia en base a “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile.” / Dirección General de Aguas, 2017.

De la figura anterior se desprende que nuestro país sigue la tendencia sobre consumo hídrico de un país en vías de desarrollo, tal como se mencionó anteriormente, en donde el sector agrícola domina largamente el consumo de agua fresca disponible.

El sector minero, en cambio, hoy en día ocupa apenas un valor cercano al 4% del consumo de agua dulce total, un valor bastante menor a la percepción negativa que tiene gran parte de la población frente al tema del consumo y contaminación hídrica de esta industria en sus procesos, lo que produce un fuerte rechazo hacia ésta, aunque no sin argumentos.

A pesar de ser un sector de consumo minoritario su impacto no es menor. La principal problemática hídrica radica en que este sector económico se concentra geográficamente justo en la zona con mayor escasez de agua en el país y unos de los lugares más áridos del planeta, el Desierto de Atacama. Zona que posee la menor escorrentía del país con apenas el 0,13% del total nacional y en donde la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ya han sido adquiridos, por lo que el impacto ambiental relacionado al uso de los recursos hídricos es más notorio y profundo que en otros sectores del país. Solo la Región de Antofagasta consume el 46% de los recursos hídricos mineros del país, precisamente la región que presenta la menor disponibilidad de recursos hídricos es la que concentra la fracción mayoritaria de la actividad minera.

La presión hídrica de esta actividad es importante, más aún cuando esta actividad debe convivir con otras actividades productivas del país que también precisan de agua para su subsistencia en este escenario de escasez, por lo que es vital que se busquen nuevas alternativas de abastecimiento.

CAPÍTULO 3 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA MINERÍA CHILENA Y MINERÍA DEL COBRE

Al ajustar el enfoque sobre el consumo hídrico consuntivo del sector minero en el territorio nacional, se puede mencionar que durante los últimos años se han hecho importantes esfuerzos, tanto de entidades públicas como de empresas privadas, para recopilar antecedentes, generar y publicar informes sobre consumos de agua en la actividad minera para gestionar un consumo del recurso de manera responsable, que se condiga con el fuerte compromiso de sustentabilidad que debe tener la industria en estos tiempos, y apuntar hacia la optimización de este valioso recurso que permita a las empresas alcanzar las metas de producción de los distintos minerales de interés.

Existen algunos documentos confiables y bastante actualizados que son útiles de señalar, estos documentos son generados por instituciones gubernamentales como el MOP a través de la DGA y el Ministerio de Minería a través de SONAMI y COCHILCO.

Dentro de éstos, encontramos el “Atlas del Agua”, del año 2016, un documento elaborado por la DGA que distribuye el consumo de agua nacional en cuatro sectores globales: Agropecuario, Agua Potable, Industrial y Minero, estos cuatro sectores en su conjunto ocupan un caudal estimado de 645,4 [m³/s] y el sector Minero en específico utiliza 19,99 [m³/s] lo que representa 3,1% del consumo hídrico nacional. Se aprecia en este informe que más de la mitad del consumo hídrico minero se encuentra en la zona norte del país lo que se condice con la ubicación de la gran minería del cobre y se concentra especialmente en la región de Antofagasta, centro de la producción minera en Chile.

Un segundo documento en cuestión, del año 2017, denominado “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile” recoge datos y estadísticas de informes realizados por COCHILCO y SONAMI, principalmente del año 2016. Entrega información más detallada y acabada sobre el tema estudiando el consumo hídrico por sectores en cada región del país en particular y el resumen nacional correspondiente. Además realiza una proyección de la demanda en cada sector y región para los años 2030 y 2040 e incluso realiza comparaciones en los resultados presentados con aquellos que entrega el “Atlas del Agua” del año anterior; este segundo documento divide los sectores consumidores en siete categorías y el sector Minero en particular, representado exclusivamente por la minería del cobre, presenta una demanda

consuntiva de 430.296 [Mm³/año] de aguas continentales, o 13,64 [m³/s], de un total nacional de 10.908.731 [Mm³/año] lo que corresponde a una presencia de 3,9% para este sector. En las proyecciones a futuro se destaca que la demanda global en el sector minero disminuye 8,4% para el año 2030 y vuelve a disminuir 12,4% adicional para el año 2040, representando 3,5% y 2,9% ^[24], respectivamente, de la demanda hídrica nacional en cada uno de esos años, estableciéndose una tendencia a la baja en el consumo hídrico minero respecto a la actualidad, lo que pudiese explicarse debido a un aumento en las eficiencias de los procesos en la extracción del mineral.

En ambos estudios mencionados y en cualquier estimación actual sobre la demanda hídrica en el sector minero del país se aprecia una notable tendencia al aumento en el uso de agua de mar en los procesos minerales, ya sea agua salina o desalada previo tratamiento, lo que contrasta con una creciente reducción en la utilización de las aguas continentales en esta actividad.

Se debe notar que estos dos estudios sitúan el consumo hídrico minero dentro de la demanda nacional sobre agua fresca en todos sus sectores económicos, y es preciso resaltar que entre ambos estudios existe una diferencia importante de 6,35 [m³/s] en la demanda hídrica del sector minero aun cuando estos estudios fueron generados por la misma institución con un año de diferencia.

Esta diferencia ha generado complicaciones en el desarrollo del presente estudio pues no parece haber consenso sobre este tema en las publicaciones referentes al consumo hídrico minero. Estudios relacionados al tema, desarrollados posteriormente a los dos documentos nombrados se debaten entre uno y otro para actualizar su información, algunos ocupan como referencia el primer documento del año 2016, mientras que otros usan el estudio del año siguiente, por lo que existe una suerte de ambigüedad en la recopilación de datos que no logra conciliarse. Posiblemente se deba al aumento en la disponibilidad de información respecto al consumo minero de recursos hídricos variable de un año a otro, además de las características de esta información para poder realizar estimaciones de consumo con un buen nivel de aproximación. Si bien la minería del cobre ha levantado gran cantidad de información y datos sobre el tema, las estadísticas provenientes desde la minería no cuprífera y no metálica no presentan un volumen suficiente que permita una estimación directa del caso.

La explicación a esta diferencia de caudal no es sencilla y aunque tampoco ha logrado una respuesta completamente satisfactoria, escapa al análisis de este estudio.

3.1. Fuentes de agua en la minería nacional

Acerca de las fuentes de recursos de agua que usa la minería chilena, el agua fresca es uno de los insumos fundamentales para la extracción del material y el procesamiento de los minerales de los cuales se extraen los productos y subproductos. Los tipos de aguas usadas en minería se pueden clasificar de acuerdo a su fuente de origen. La mayor fracción de toda el agua consumida por la minería proviene del segmento continental, ya sean aguas superficiales, adquiridas por contrato a terceros, o subterráneas. Estas últimas se dividen en aguas de pozo y aguas del minero, también llamadas aguas de mina, que es aquella acumulada en cavidades bajo la superficie del suelo y que es hallada de forma espontánea, sin buscarse premeditadamente. [51]

Esta situación ha provocado una fuerte competencia entre la minería, otros sectores económicos y las comunidades, debido a su escasez y ubicación geográfica en la que se desarrolla principalmente la actividad minera en Chile.

La otra fuente de abastecimiento hídrico es el agua de mar, previo tratamiento desalinizador o natural según lo requiera el proceso, fuente que ha mostrado un crecimiento expansivo en los últimos años y que se ha materializado en numerosos proyectos de extracción y desalación en etapas de construcción, evaluación y diseño. Según los últimos informes del Consejo Minero (2019), se calcula una inversión aprobada de más de 1.800 [MMU\$] relacionados a recursos hídricos en la industria minera. Con los antecedentes recabados hasta la fecha, se estima que dentro de los próximos diez años el consumo de agua de mar podría igualar en cantidad al agua proveniente de fuente continental, algo que por temas de disponibilidad, abundancia e impacto ambiental, se ha buscado para así conseguir mayor sustentabilidad en la actividad.

Sin embargo, en la práctica los datos concretos indican a las agua recirculadas de otros procesos como la gran fuente de recursos hídricos utilizados en la industria minera, cuyos volúmenes son usados varias veces antes de salir del circuito y que según los últimos estudios llegarían al 73,6% del agua total consumida en la actividad minera.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema que representa las fuentes hídricas utilizadas en la minería de nuestro país:

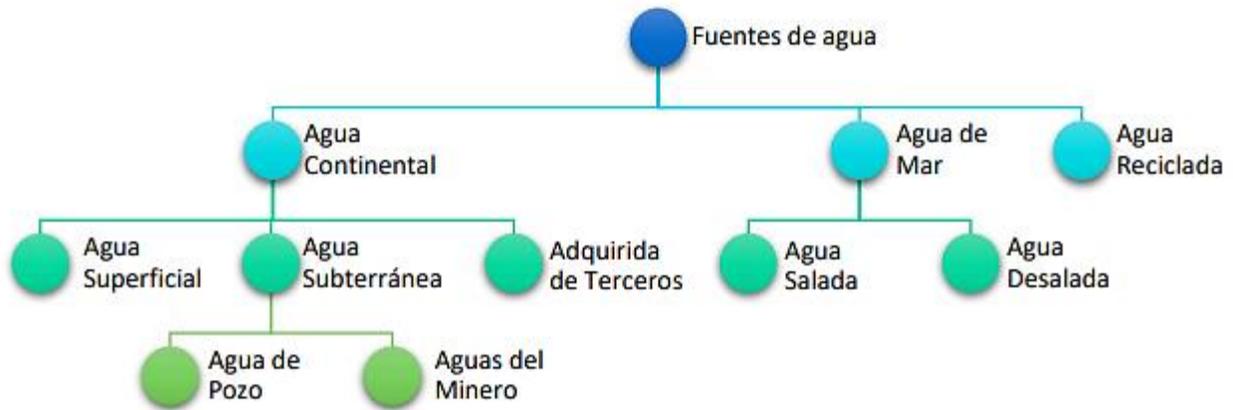


Figura 3.1: Clasificación de las fuentes de agua en minería chilena.

Fuente: “Informe Consumo de Agua en Minería 2016” / Sociedad Nacional de Minería, 2017.

Como ya se mencionó, la principal fuente hídrica que utilizan los procesos mineros es el agua reciclada con casi tres cuartos del global llegando a 50,6 [m³/s] en el 2017, la mayoría de esta suma tiene su origen en aguas continentales.

Luego están las mismas aguas continentales frescas, que representa un 21,6% del consumo total sumando 14,8 [m³/s] y de esta cantidad 8,0 [m³/s] corresponden a aguas de fuente subterránea que significan más de la mitad de la cantidad en este ítem particular, 5,9 [m³/s] son aguas superficiales y 0,9 [m³/s] son aguas adquiridas por contrato a terceros. Le siguen las aguas marinas cuya demanda asciende a 3,3 [m³/s] representando el 4,8% de la demanda minera total durante 2017. No existe detalle de qué fracción de agua en este segmento corresponden a aguas desaladas previo tratamiento y qué fracción del agua de mar se ha utilizado salobre de forma cruda y natural en los procesos. Las principales fuentes hídricas en la minería y su distribución de utilización se exponen en la Figura 3.2.

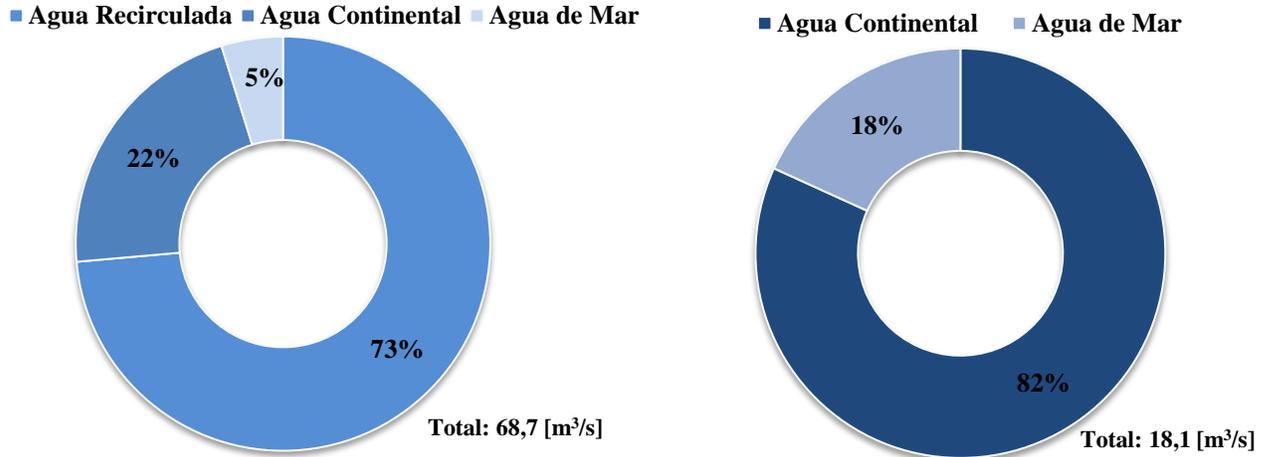


Figura 3.2: Distribución de las fuentes hídricas en la minería chilena al considerar el agua recirculada (izquierda) y al no considerar el agua recirculada (derecha).
Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

Con respecto al consumo hídrico de la industria durante el año anterior al estudio mencionado, se puede decir que se redujo la demanda de aguas continentales en 0,7% en comparación al 2016 cuando se consumieron 14,9 [m³/s], valor que fue fuertemente impactado por la reducción en la demanda estas aguas por parte de la minería del cobre que utilizó 13,6 [m³/s] en ese año.

El agua de mar, por su parte, experimentó un alza de 13,8% respecto a su demanda del año 2016 cuando se extrajeron 2,9 [m³/s] de agua marina. Este valor reafirma la tendencia al aumento en la utilización de agua proveniente de esta fuente durante los últimos años y se proyecta que aumentará su demanda a ritmos más acelerados durante los años venideros.^[12]

Por último, el agua recirculada también presenta un alza en la demanda respecto al 2016, cuando se utilizaron 47,5 [m³/s] en la industria minera lo que significó un aumento del 6,5% para el 2017. En la Tabla 3.1 se observa que la presencia del agua recirculada aumenta cada año en el total utilizado por la minería en Chile y cada vez es más masiva.

Tabla 3.1: Evolución demanda hídrica según fuentes entre los años 2015 a 2017 [m³/s].

Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2015, 2016 y 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

Fuente Hídrica	2015	2016	2017
Agua Continental	14.5	14.9	14.8
Agua de Mar	2.8	2.9	3.3
Agua Recirculada	43.7	47.5	50.6
Total Industria	61.0	65.3	68.68

3.2. Demanda hídrica minería chilena

Normalmente el sector minero nacional se clasifica en cuatro grandes grupos diferenciados según el tipo de material extraído y su estudio específico, estos grupos son: la minería del cobre, la minería metálica no cuprífera, la minería no metálica y la extracción de hidrocarburos.

El estudio sobre la estimación de la demanda hídrica hace una distribución similar, la Sociedad Nacional de Minería, SONAMI, realiza desde el año 2015 un sumario sobre la demanda hídrica del sector minero chileno casi en su totalidad abarcando en su estudio alrededor del 97% del total de la actividad. La clasificación que se hace en esta materia es también en cuatro sectores, la minería del cobre se subdivide en la gran minería del cobre y la mediana minería del cobre, además de la unión de la minería de otros metales con la minería no metálica; lo que se complementa con las publicaciones de COCHILCO sobre consumos hídricos en fundiciones y refinerías.

Los consumos, distribución y origen de agua dulce y salada en estos grupos se presentan en las secciones siguientes.

3.2.1. Gran minería del cobre

En este numeral se presenta solo resumidamente los consumos de agua en la gran minería del cobre en Chile, pues más adelante se entregarán sus detalles en un subcapítulo entero y exclusivo, complementado con otros sectores mineros ligados al cobre.

De los cuatro grupos ya mencionados que considera el estudio del consumo hídrico dentro de la minería chilena, el de mayor consumo de este recurso lo ostenta lógicamente la gran

minería del cobre, con sus mayores tonelajes de procesamiento se hace responsable del 96% de la producción de cobre en el país, exigentes índices de producción y competitividad en el mercado minero mundial, además de sus mayores recursos para acceder a las fuentes hídricas, se alza como el principal y el mayoritario consumidor de agua tanto continental como marina y con larga distancia respecto a los otros actores involucrados.

De los 18,1 [m³/s] totales que demanda la actividad minera sobre aguas continentales y aguas marinas, este sector en particular acapara más del 80% de toda la demanda hídrica minera tomando en cuenta estas dos fuentes hídricas, mientras que las tres categorías restantes en conjunto no llegan a la quinta parte del total sumando 3,3 [m³/s].

Respecto a aguas continentales la gran minería del cobre utiliza 11,8 [m³/s] de un total de 14,8 [m³/s] de la industria minera entera lo que representa un dominio de cuatro quintas partes del total en esta fuente de agua. Dentro de esta categoría el consumo se desglosa en 6,1 [m³/s] proveniente de aguas subterráneas, 4,9 [m³/s] que provienen de aguas superficiales, y 0.8 [m³/s] de aguas adquiridas a terceros.

El mar que baña las costas chilenas se ha transformado en una potente y provechosa fuente de recursos hídricos para la industria minera durante los últimos años y la presencia de la gran minería cuprífera aquí es aún más dominante que en el segmento de aguas terrestres, usa 3,0 [m³/s] llegando a demandar más del 90% del total de la industria que utiliza 3,3 [m³/s]. Esto se debe principalmente a la mayor cantidad de recursos que mueve este sector lo que le da la capacidad a las compañías para desarrollar mayor cantidad de proyectos relacionados al agua de mar y solventar los fuertes costos de esta inversión asociados a la extracción del agua, su proceso de tratamiento y desalación y sobre todo el gasto energético que conlleva transportar ese volumen de agua desde el borde costero hasta las ubicaciones de las plantas de procesamiento minero donde se usará, algunas de las cuáles se encuentran a más de 3.000 m.s.n.m. Sin embargo, este caudal de agua marina representa actualmente un poco más del 20% de la demanda hídrica del sector sin considerar aguas recirculadas, por lo que hay mucho campo aun por desarrollar. [47]

La distribución de las fuentes hídricas utilizadas en la gran minería del cobre, se muestran en la Figura 3.3.

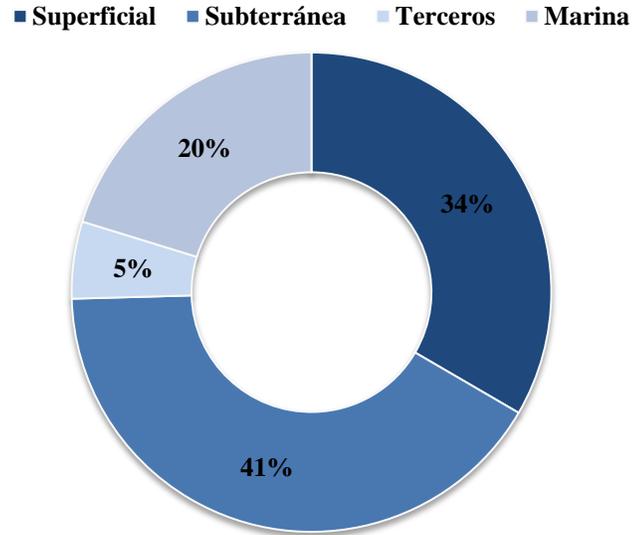


Figura 3.3: Distribución de fuentes hídricas utilizadas en la gran minería del cobre, sin considerar aguas recirculadas.

Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

Sobre la recirculación de agua, este sector también presenta índices mayores que la industria global, ya que el 76,5% de toda el agua que utiliza son aguas recirculadas abasteciendo la mayor parte del requerimiento hídrico del sector lo que se materializa en 48,4 [m³/s].

En relación al consumo hídrico del año 2016, las aguas continentales presentaron una disminución en la demanda de 1,7%, mientras que las aguas provenientes de origen marino presentaron un notable aumento de 25% en su utilización durante el año 2017. Esto concluyó en que la demanda total de recursos hídricos dulces y salados viviera un alza de 2,8% global para el sector de la gran minería del cobre.

3.2.2. Minería metálica no cuprífera y no metálica

El sector de la minería metálica no cobre se concentra en la extracción y procesamiento del molibdeno, oro, plata, hierro, zinc y plomo entre otros. La mayor parte del total producido en este segmento se obtiene como subproducto de la gran minería del cobre, por lo que este sector ve considerablemente mermado su demanda hídrica, debido a que gran parte del consumo de agua que se utiliza en esta producción se considera parte del consumo de este

último sector minero. Los principales metales involucrados en esta situación y que entran en el consumo hídrico de la minería del cobre son el Mo, el Au y Ag.

Respecto del consumo hídrico en la explotación de minerales no metálicos no existe la cantidad de información necesaria para establecer cifras e índices de consumo exactos en la totalidad de este segmento minero. Aquellos minerales que se extraen en mayor cantidad son los que presentan, en consecuencia, mayor información asociada y se ordenan a continuación en orden descendente según su producción:

- ❖ Cloruro de sodio
- ❖ Compuestos de potasio (cloruro y sulfato)
- ❖ Nitratos de sodio y potasio
- ❖ Boro
- ❖ Litio
- ❖ Yodo

Es por estas razones es que para efectos del estudio de la demanda hídrica normalmente estos dos sectores se analizan en conjunto.

Este sector minero se posiciona como el segundo mayor consumidor hídrico dentro de la minería chilena en casi todos los aspectos. A pesar de esto, el consumo de recursos hídricos de este segmento es significativamente menor al que presenta el sector anterior como ya se ha mencionado. La minería metálica no cobre y no metálica consumió en 2017 1,9 [m³/s] considerando tanto aguas dulces como aguas saladas, lo que representa un 10,4% de la demanda hídrica total de la industria minera en Chile y alrededor de una octava parte de la demanda hídrica de la gran minería del cobre. ^[52]

En específico, las aguas continentales son la principal fuente de recursos hídricos para este grupo minero, según el documento de estudio el sector en cuestión alcanzó una demanda para ese año de 1,1 [m³/s] sobre aguas de origen subterráneo, 0,5 [m³/s] sobre aguas superficiales y 0,1 sobre aguas adquiridas a terceros; lo que entrega una suma de 1,7 [m³/s] para las aguas continentales y este valor representa un 11,5% en las aguas terrestres usadas por el rubro.

Como ya se mencionó, la expansión en el uso de agua marina para este sector ha sido mucha más lenta en comparación con el sector anterior debido a que esta innovación requiere de inversiones demasiado altas para una industria de pequeña escala y existe menor disponibilidad de recursos para ejecutar las actividades relacionadas a ello. De todas formas, el agua de mar de a poco se abre camino en este sector, en el año 2017 se consumieron 0,2 [m³/s] de agua de mar lo que significa 10,6% de toda el agua utilizada por el sector sin considerar aguas recirculadas y 6,1% de la demanda de aguas marinas usadas por la industria. Esto se ve refrendado en la Figura 3.4.

La recirculación de agua por su parte, alcanza valores de 1,0 [m³/s] y representa la segunda fuente hídrica más importante en la minería no cuprífera y no metálica significando un 34,5% de su demanda hídrica global. Es muy importante destacar que a pesar de que en la minería no cuprífera y la minería no metálica se manejan recursos mucho menores y tasas de producción inferiores comparados con la gran minería cuprífera, estos sectores han logrado alcanzar tasas de recirculación bastante considerables llegando al valor mencionado.

Con respecto al año 2016, este sector minero aumentó notablemente su demanda de aguas continentales en 32,3%, debido en buena medida al aumento en las empresas del sector catastradas en el informe. El agua de mar en cambio, sufrió una disminución del 31,0% en su utilización. Estos resultados le brindaron al sector de la minería metálica no cuprífera y no metálica, un aumento de 20,5% en la demanda global de recursos hídricos.

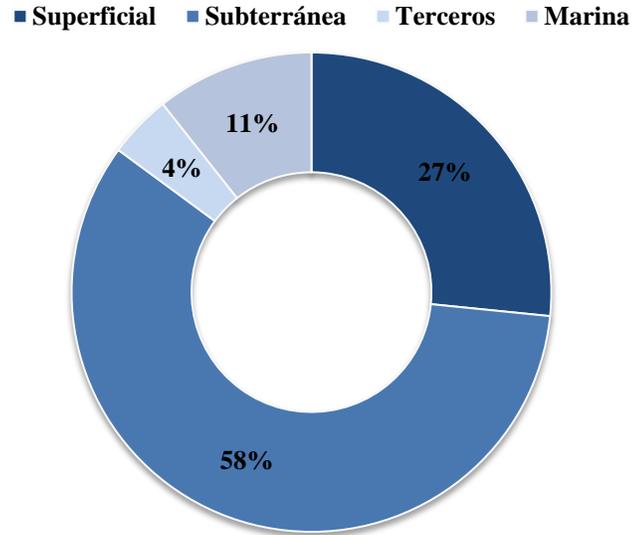


Figura 3.4: Distribución de fuentes hídricas utilizadas en la minería metálica no cuprífera y minería no metálica, sin considerar aguas recirculadas.

Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

3.2.3. Mediana minería del cobre

Se considera mediana minería del cobre a aquella que presenta una escala de extracción de mineral que va desde las 8.000 a 250.000 toneladas al mes según lo establece la **Sociedad Nacional de Minería (2017)**, es responsable del 3% de la producción de cátodos y concentrados de cobre. Esta diferencia de producción con la gran minería del cobre incide de forma lógica en una demanda hídrica mucho menor que la industria mayor.

Este sector minero se posiciona como el tercer consumidor de recursos hídricos en el país, durante 2017 alcanzó una demanda estimada de 0,83 [m³/s] en la extracción de aguas lo que representa un 4,6% de la demanda total del recurso en la industria considerando tanto aguas dulces como aguas saladas. ^[52]

El consumo de aguas continentales alcanza en el sector una cifra de 0,76 [m³/s] que se clasifican de acuerdo a lo siguiente: el consumo de aguas superficiales llega a 0,4 [m³/s] dominando por sobre el consumo de aguas subterráneas que alcanza 0,3 [m³/s], un hecho que diferencia a este sector de los dos sectores analizados anteriormente, por último el agua adquirido a terceros constituye un caudal de 0,06 [m³/s]. (Ver Figura 3.5)

El consumo de agua de mar por su parte, alcanzó un caudal de 0,07 [m³/s] en el año mencionado, lo que representa 8,4% de la demanda hídrica del sector sin considerar las aguas recirculadas y un 2,1% de las aguas marinas utilizadas por el rubro minero global. Un caudal levemente superior al de las aguas adquiridas a terceros, lo que demuestra al igual que en los sectores precedentes, que la extracción de agua marina en la mediana minería del cobre tiene mucho por desarrollarse aún. ^[52]

La recirculación de agua representa la principal fuente de consumo hídrico del sector, con un caudal de 1,22 [m³/s], que significa casi el 60% de toda el agua requerida por la mediana minería del cobre. Al igual que en el sector inmediatamente anterior, es muy importante destacar que a pesar de que en la mediana minería del cobre se cuentan muchos menos recursos y tasas de extracción mineral comparados con la gran minería del cobre se ha alcanzado una alta optimización en materia de recursos hídricos que le ha permitido al sector alcanzar una tasa de recirculación notable.

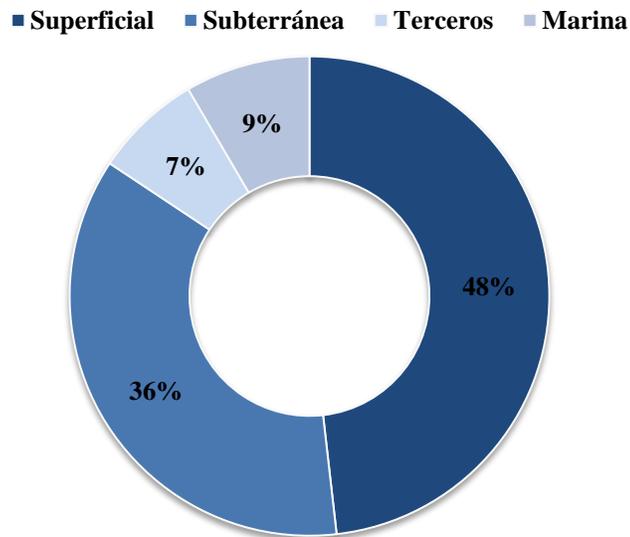


Figura 3.5: Distribución de fuentes hídricas utilizadas en la mediana minería del cobre, sin considerar aguas recirculadas.

Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

3.2.4. Fundiciones y refinería

Los datos sobre consumos hídricos en este sector provienen desde informaciones publicadas por COCHILCO sobre refinерías y fundiciones en Chile. No existe conocimiento sobre el origen de las aguas utilizadas ni de la tasa de recirculación que se maneja en esta área específica y se asume que buena parte del consumo asociado a este sector se encuentra ya incluido en la demanda de los sectores precedentes.

El sector de fundiciones y refinería aparece como el cuarto consumidor de recursos hídricos en el rubro minero y el menor entre las partes involucradas según las publicaciones de SONAMI. Con un caudal de 0,54 [m³/s], el sector abarca el 3,0% de la demanda hídrica global de la industria sin considerar a las aguas recirculadas. Con respecto al año 2016, el sector evidenció una disminución de 9,4% en su demanda hídrica. ^[52]

3.2.5. Otros sectores mineros

Dentro de esta categoría podemos encontrar los consumos hídricos básicamente de la pequeña minería y del área de extracción de hidrocarburos.

La pequeña minería representa a muchas faenas de menor calado en el país que sin embargo abarcan una extensa área geográfica de desarrollo, estando presente desde la región de Arica y Parinacota hasta la región del Libertador Bernardo O'Higgins. La demanda del segmento alcanzó en el año 2017 un caudal de 0,098 [m³/s] para sus procesos lo que significó un aumento de 6% en la demanda hídrica respecto al año anterior, debido principalmente al incremento en el consumo de agua en la fundición Hernán Videla Lira.

La mayor parte del volumen utilizado por la pequeña minería tiene su origen en aguas continentales de tipo subterránea y es importante destacar que este segmento también ha comenzado su incursión en el uso de agua de mar en sus procesos. Debido al bajo caudal demandado respecto a otros sectores mineros es que este segmento no es considerado en los catastros sobre consumo hídrico en la minería chilena.

Por su parte el consumo hídrico que representa al segmento de la extracción de hidrocarburos se refiere a las operaciones de fractura hidráulica ("*fracking*") que se aplica en el tratamiento de pozos desde donde se extraen los hidrocarburos. Se inyecta agua a presiones muy altas

para lograr fracturar la roca que contiene el material valioso y conseguir aumentar la permeabilidad del contenedor para facilitar la explotación de los hidrocarburos. ^[25]

Esta actividad se ubica geográficamente de forma exclusiva en la Región de Magallanes y el volumen hídrico utilizado significa el menor de todos los sectores mineros mencionados anteriormente llegando a una demanda de apenas 0,003 [m³/s], por lo que la demanda hídrica de este sector también se considera despreciable frente al consumo de las otras faenas mineras existentes y en general no se incluye en las estimaciones hídricas o en los estudios ya mencionados.

Para finalizar este subcapítulo, se presentan en la Figuras 3.6 y 3.7 la distribución de consumo hídrico de cada sector en la minería chilena de acuerdo al origen continental o marino del agua utilizada.

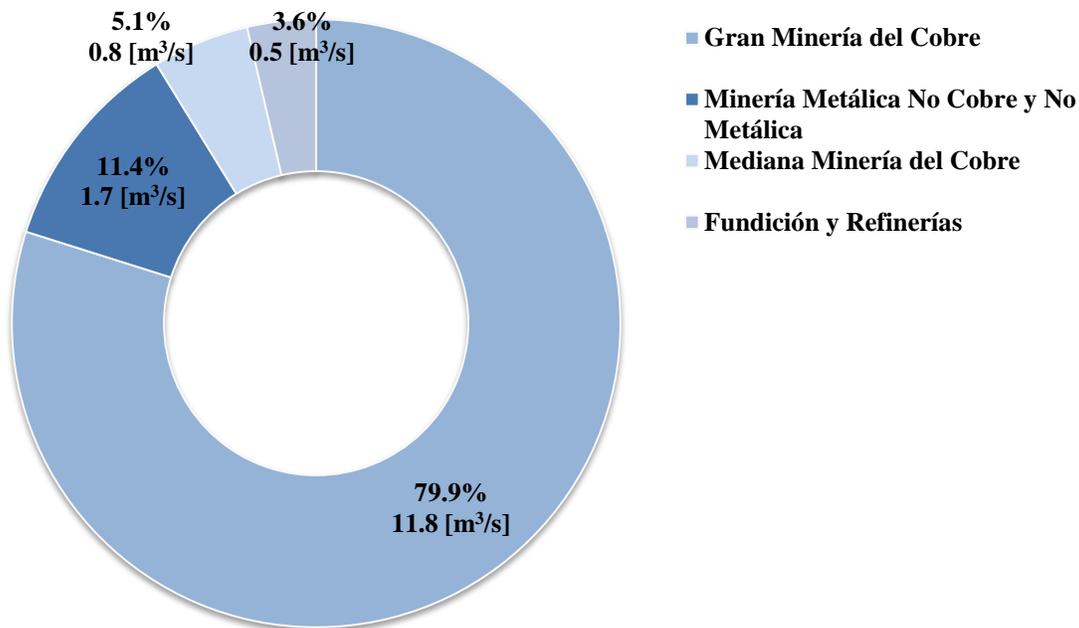


Figura 3.6: Consumo de aguas continentales según sector minero.

Fuente: “Informe Consumo de Agua en Minería 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

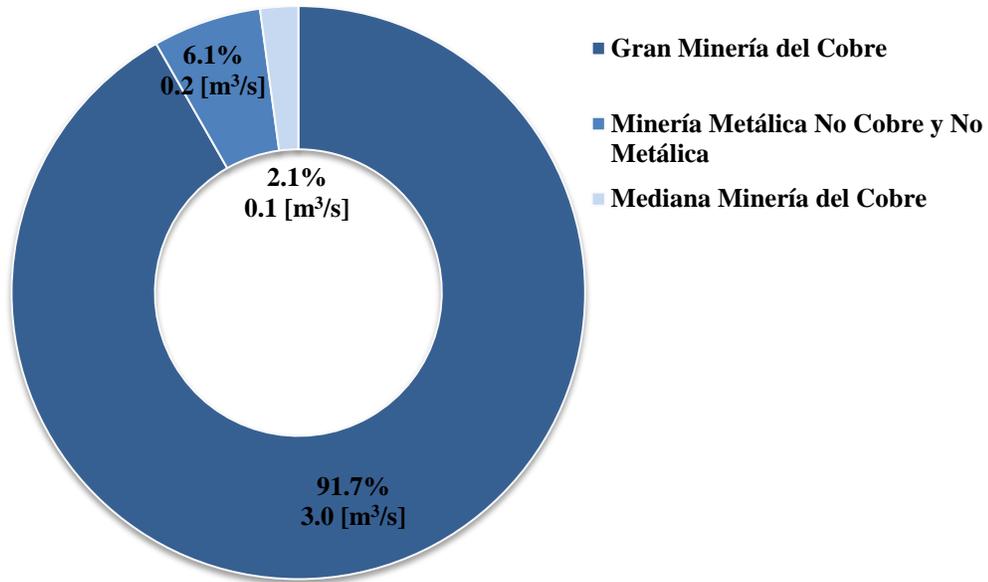


Figura 3.7: Consumo de aguas marinas según sector minero.

Fuente: “Informe Consumo de Agua en Minería 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

3.3. Demanda hídrica minería del cobre

Como ya se ha dicho anteriormente, la minería del cobre es por lejos el segmento más grande en la minería chilena, el sector más significativo y también representativo de una faceta de Chile que le otorga la acreditación y respaldo de considerarse un país minero. Es el sector de mayor producción por amplio margen representando el 99% de la producción de cobre y el 100% de la producción de molibdeno; es el sector de mayor exportación abarcando cerca de la mitad de las exportaciones totales del país y gran presencia a nivel internacional; es el sector minero de mayor protagonismo en el ingreso fiscal con alrededor de 6% de éste y en la economía del país con 9,4% del PIB nacional; y como es lógico se deduce, es el sector de mayor consumo de recursos hídricos en la minería chilena, acaparando más de cuatro quintas partes del total de agua fresca utilizada en este rubro.

Para la estimación en la demanda hídrica cuprífera es necesario caracterizar la faena minera ya que esta estimación depende de ciertos aspectos fundamentales, los que se presentan a continuación:

- ❖ Tipo de proceso. El tipo de mineral que se obtenga en cada yacimiento incidirá si el procesamiento mineral sigue una vía hidrometalúrgica o una vía pirometalúrgica, con su correspondiente tasa de consumo unitario de agua.
- ❖ Fuente hídrica. El grado de estimación se relaciona con la información disponible de la fuente hídrica utilizada por cada faena, si son aguas continentales, provenientes de acuíferos, adquiridas a terceros, o si son aguas de mar, salinas o desaladas.
- ❖ Ley mineral. Dado que las tasas de consumo unitario se definen a partir de las toneladas de material procesado, pero la información recibida de las empresas es de toneladas producidas, se debe hacer la conversión mediante la ley media de mineral de cada faena.
- ❖ Producción anual. Siguiendo indicadores mineros, técnicos y económicos, la producción anual de recursos metálicos finos puede variar de manera importante año a año, lo que va a incidir en la cantidad de recursos hídricos utilizados en cada faena.

Según los estudios de COCHILCO la demanda de recursos hídricos en este sector se utiliza en cuatro grandes áreas:

- Área Concentración. Representa el consumo mayoritario de recursos hídricos en toda la industria minera. La demanda comprende el procesamiento de minerales sulfurados involucrados en la conminución del mineral en sus diferentes etapas, como chancado y molienda, y las siguientes etapas de separación como la flotación, clasificación y espesamiento, además de transporte de concentrados a través de mineroductos que conducen la pulpa y su disposición en forma de relaves. Dentro de las plantas de concentración, las etapas que más consumen agua son la flotación, el transporte de concentrados y la evaporación del agua presente en los tranques de relave. (Figura 3.8)

Justamente la mayor parte de las aguas utilizadas en la flotación pasarán a formar parte de los relaves, caudal del volumen hídrico que provienen de los procesos de planta y que se almacena en tranques. Dependiendo de las características de la operación, gran parte de las aguas residuales pueden recircularse al proceso.

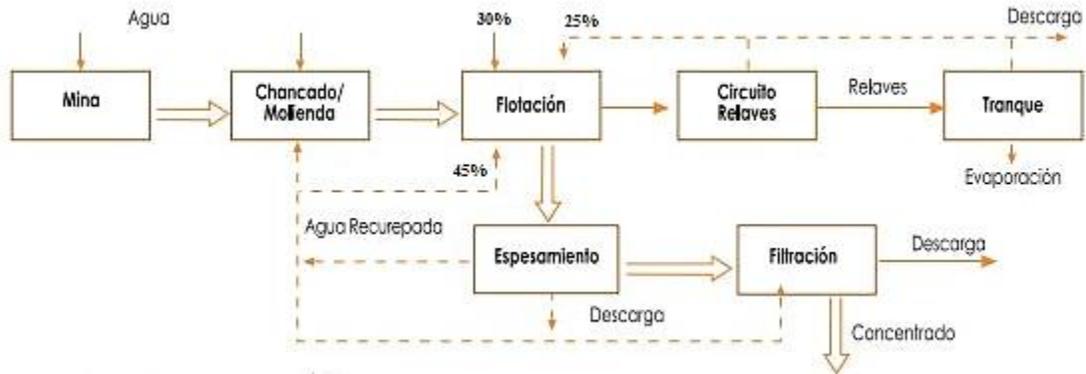


Figura 3.8: Procesamiento básico de minerales por vía de concentración.

Fuente: “Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera” / Comisión Chilena del Cobre, 2008.

- Área Hidrometalurgia. El consumo hídrico de esta área representa al procesamiento de minerales oxidados que siguen etapas de aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electroobtención de cátodos, principalmente. A pesar de que en todas estas etapas se utilizan soluciones ácidas que utilizan agua junto a ácido sulfúrico, el principal consumo del recurso hídrico se da en la lixiviación debido a la evaporación de esta solución ácida usada en pilas de gran tamaño y dimensión expuestas a las condiciones naturales del ambiente para disolver el cobre contenido en el mineral previamente chancado. (Figura 3.9)

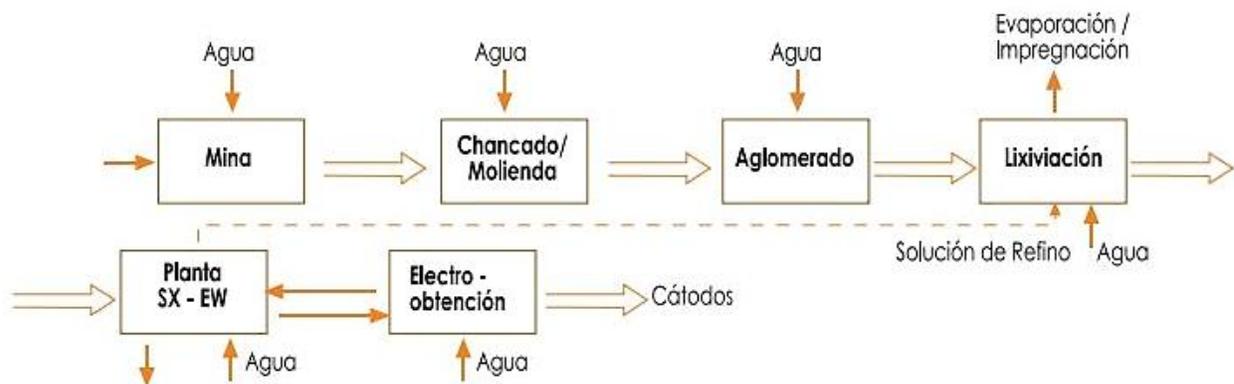


Figura 3.9: Procesamiento básico de minerales por vía hidrometalúrgica.

Fuente: “Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera” / Comisión Chilena del Cobre, 2008.

- **Fundición y Refinería.** Se refiere al consumo hídrico asociado a distintas etapas de proceso pirometalúrgico, como secado del concentrado, que sigue faenas pirometalúrgicas para la obtención de ánodos, sistemas de enfriamiento de gases o sólidos, producción de soluciones ácidas en las plantas de ácido sulfúrico, captación de contaminantes en las diferentes fases. Además, se consideran las demandas de agua en el proceso de refinación en celdas electrolíticas usando soluciones de ácido sulfúrico para producir los cátodos de alta pureza. Representa el sector de menor consumo hídrico frente a los demás requerimientos de agua considerados en la minería.

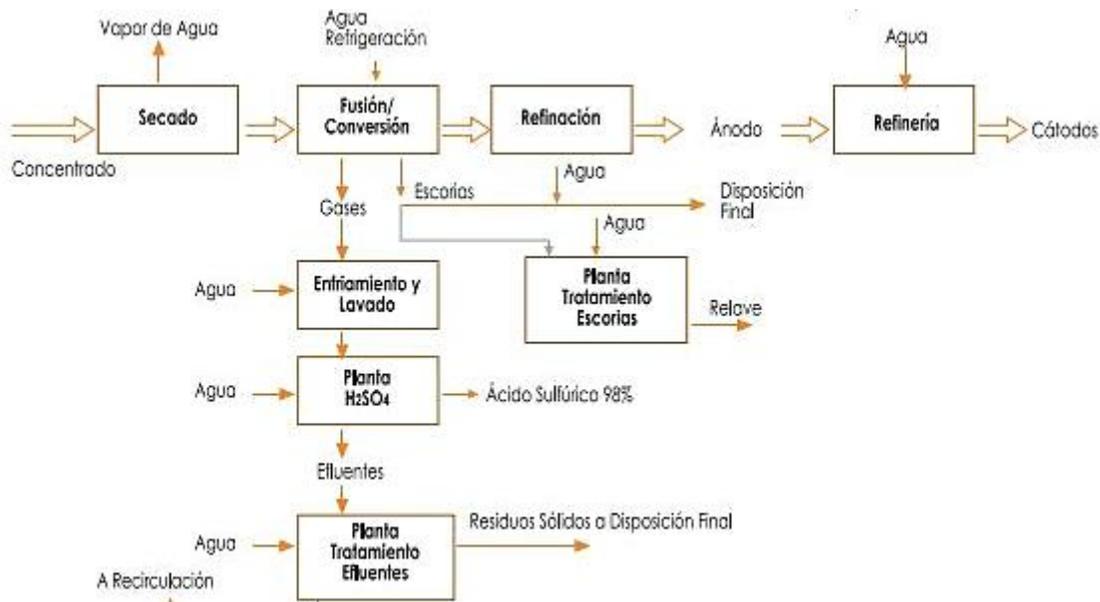


Figura 3.10: Procesamiento básico de minerales en etapas de fundición y refinación.

Fuente: “Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera” / Comisión Chilena del Cobre, 2008.

- **Otros.** Este ítem abarca los consumos de recursos hídricos correspondientes a las áreas de Mina y Servicios en la planta minera.
 - **Mina.** Se refiere al consumo de agua fresca utilizado en la extracción del mineral y su transporte hasta el chancado primario, ya sean faenas a rajo abierto o subterráneo. Representa principalmente el consumo de agua regada en los caminos dentro del recinto de las faenas mineras para evitar el polvo en suspensión debido al tránsito de vehículos y maquinarias, lo que deriva en serias consecuencias de salud en los trabajadores. Este consumo puede variar de 0 a 15% del agua total

utilizada en una empresa minera, variación que depende de muchos factores, como exposición de la superficie regada, geografía del terreno, vegetación natural de la zona, precipitaciones anuales, etc.

- Campamentos y Servicios. Corresponde al caudal hídrico asociado al consumo humano de diferentes maneras en las instalaciones, ya sean servicios higiénicos, bebida, aseo, cocina, lavado, riego, mantenimiento, ventilación, desagüe, etc.

El trabajo realizado por la Comisión Chilena del Cobre sobre la demanda de recursos hídricos en la minería nacional resulta de suma importancia y valor para establecer parámetros concretos que apunten a mejorar aspectos de optimización hídrica, innovación tecnológica y hábitos operacionales para avanzar en dirección a la sustentabilidad de la industria.

3.3.1. Fuentes de extracción hídrica

Los informes publicados por COCHILCO que contienen el detalle de la utilización del agua en la minería del cobre hasta el año 2017 presentan una leve diferencia con respecto a aquellos publicados por SONAMI para el mismo año y materia, pero esta diferencia es de solo algunos decimales en los caudales utilizados en la mayoría de los casos, por lo que no revisten mayor problemática y se consideran coherentes y complementarios para este estudio.

Tal como se mencionó anteriormente en el presente capítulo, la principal fuente de recursos hídricos que abastece a la Minería del Cobre corresponde a las aguas recirculadas que alcanzan 38,07 [m³/s] representando casi el 70% del origen de las aguas totales usadas en la minería global del cobre (Tabla 3.2 y Figura 3.11). Luego, las aguas continentales alcanzan una utilización de 13,26 [m³/s] que representa un 24,3% de toda el agua utilizada; la fuente de extracción subterránea significa el 50,3% del total en este ítem con 6,67 [m³/s] como se aprecia en la Tabla 3.3. Un caudal de 5,46 [m³/s] fue extraído desde fuentes superficiales lo que equivale a un 41,2% del subtotal. El agua que fue conseguida a través de terceras partes alcanzó 1,13 [m³/s] que representa el 8,5% de este subtotal; y el agua de mar representó el

6% de las aguas usadas en la faena minera con 3,16 [m³/s], de esta cantidad de agua marina, 48,5% fue utilizada previo tratamiento desalinizador, mientras que el 51,5% fue agua salobre (Ver Tabla 3.4 y Figura 3.12). En total, la Minería del Cobre habría alcanzado en 2017 un consumo de 54,5 [m³/s] globales en sus diferentes requerimientos.

Tabla 3.2: Tasas de Recirculación en la Minería del Cobre.

Fuente: Adaptado de “Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

	Recirculación									
	Unidad	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Agua Total Recirculada	[m ³ /s]	ND	ND	25,37	34,29	32,14	31,71	40,38	43,27	38,07
Tasa Recirculación Promedio	%	ND	ND	68,7%	74,0%	73,0%	73,9%	72,5%	72,9%	69,7%

Tabla 3.3: Caudal de aguas continentales según fuente de extracción en la Minería del Cobre.

Fuente: Adaptado de “Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

[m ³ /s]	Aguas Continentales									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Aguas Superficiales	ND	ND	ND	5,87	5,94	5,91	5,58	6,21	5,46	
Aguas Subterráneas	ND	ND	ND	5,75	6,20	6,32	6,43	6,33	6,67	
Aguas Adquiridas a Terceros	ND	ND	ND	0,76	0,58	0,74	1,06	1,08	1,13	
Aguas Marinas	0,32	0,24	0,71	0,98	1,29	1,71	2,28	2,45	3,16	
Total	-	-	-	13,36	14,00	14,06	15,35	16,01	16,43	

Tabla 3.4: Caudal y tipo de agua marina utilizada en la Minería del Cobre.

Fuente: Adaptado de “Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

[m ³ /s]	Aguas Marinas									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Agua Desalada	0,18	0,13	0,22	0,37	0,58	0,86	0,97	0,83	1,53	
Agua Salobre	0,14	0,11	0,49	0,61	0,71	0,82	1,31	1,61	1,63	
Total	0,32	0,24	0,71	0,98	1,29	1,70	2,28	2,44	3,16	

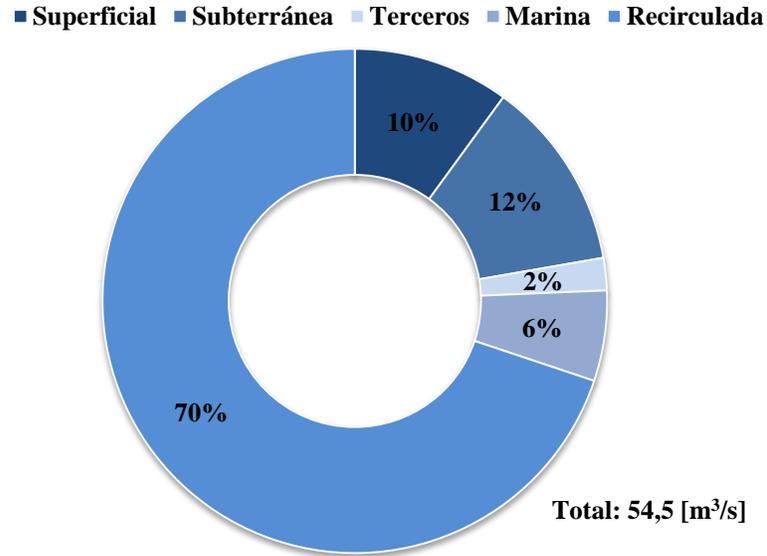


Figura 3.11: Fuentes de extracción hídrica en la Minería del Cobre.

Fuente: Elaboración propia en base a “Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

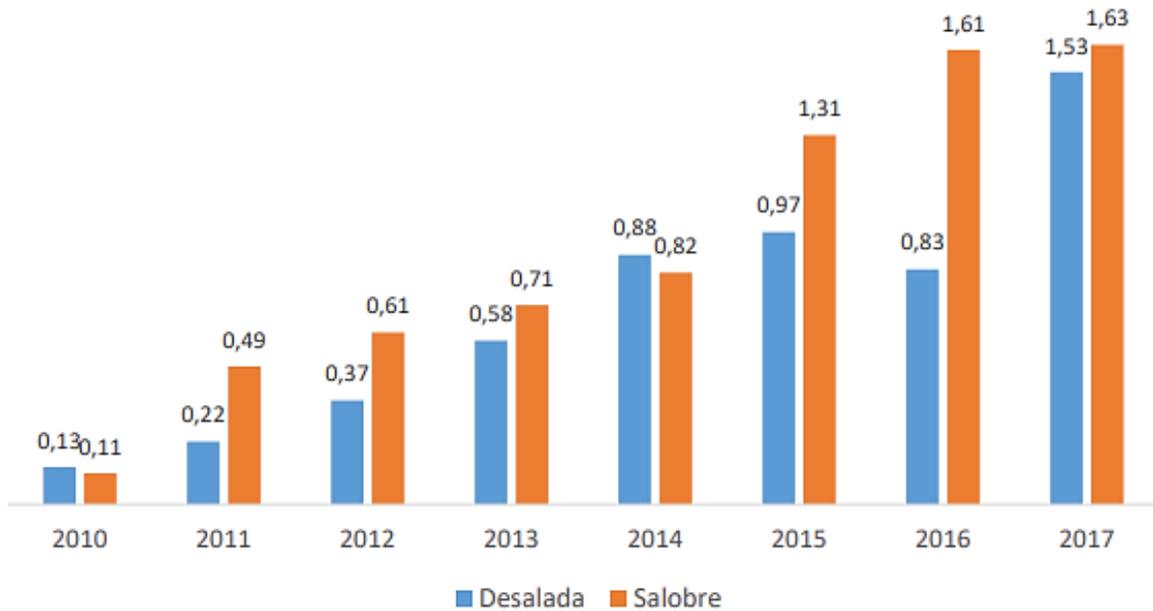


Figura 3.12: Consumo de agua salobre y desalada en la Minería del Cobre, 2010-2017.

Fuente: “Consumo de Agua en la Minería del Cobre al 2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Es importante destacar que la demanda de aguas continentales presenta un relativo equilibrio en su consumo restringiéndose su utilización en los últimos años. Distinta es la situación del agua proveniente del mar, que ha experimentado un notable aumento en su consumo dentro de las faenas cupríferas presentando un crecimiento de más de 1.300% con respecto a su utilización en el año 2010. El agua recirculada por su parte, también presenta índices bastante estables desde el año 2011 manteniendo su tasa siempre cercana al 70% del total. Estos son algunos ejemplos concretos que demuestran los esfuerzos que está haciendo la industria para optimizar el manejo del recurso, según los datos publicados. ^[6]

3.3.2. Consumo hídrico por procesos

El consumo neto de agua fresca que se utilizó en la Minería del Cobre durante el año 2017 fue de 13,26 [m³/s] sumando los consumos de las cuatro áreas de consumo hídrico en el sector mencionadas anteriormente. El área de concentración se erige como el principal consumidor del recurso y con gran diferencia respecto a las otras, debido al uso intensivo que se le da en etapas de procesamiento como la molienda y la flotación, el consumo alcanzó 8,9 [m³/s] del total ese año. Le sigue el área Otros que involucra tanto al sector Mina como al sector de Servicios, la que demandó 1,98 [m³/s]. Luego el área de hidrometalurgia requirió para sus procesos 1,85 [m³/s] durante ese año. Finalmente, el área de Fundición y Refinería utilizó 0,54 [m³/s] de agua continental para el 2017 (Ver Tabla 3.5). En consecuencia, la planta concentradora representa el 67% del consumo hídrico en minería, mientras que el área Otros llega al 15%, la Hidrometalurgia un 14% y el área de Fundición y Refinería el 4% restante. (Ver Tabla 3.6)

Tabla 3.5: Consumo de agua fresca por área en la Minería del Cobre.

Fuente: Adaptado de “Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

[m ³ /s]	Consumo Hídrico por Área								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Concentración	8,72	9,14	8,86	9,19	9,08	8,95	9,20	9,71	8,90
Hidrometalurgia	2,18	1,86	1,78	1,38	1,75	1,71	2,01	1,93	1,85
Otros	1,36	1,65	1,93	1,80	1,32	1,75	1,34	1,34	1,98
Fundición y Refinería	ND	ND	ND	ND	0,57	0,55	0,52	0,64	0,54
Total	12,27	12,65	12,56	12,38	12,72	12,95	13,07	13,61	13,26

Tabla 3.6: Distribución porcentual del consumo de agua fresca por área en la Minería del Cobre.

Fuente: Adaptado de “Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

%	Distribución Porcentual por Área								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Concentración	71,1%	72,3%	70,5%	74,2%	71,4%	69,1%	70,4%	71,3%	67,1%
Hidrometalurgia	17,8%	14,7%	14,1%	11,2%	13,8%	13,2%	15,4%	14,2%	13,9%
Otros	11,1%	13,1%	15,4%	14,6%	10,4%	13,5%	10,2%	9,8%	14,9%
Fundición y Refinería	-	-	-	-	4,4%	4,3%	4,0%	4,7%	4,1%

Como se desprende de la Tabla 3.5, la demanda total de agua fresca continental muestran relativa estabilidad a través de los últimos años. Esto se puede considerar un logro porque a pesar de que durante los últimos años las leyes minerales que se manejan en la minería chilena han mostrado disminuciones sostenidas, lo que significa que cada vez hay menor cantidad de cobre presente en el mineral, lo que a su vez se traduce en que se deben procesar toneladas mayores cada año para alcanzar la misma producción, el consumo de recursos hídricos no ha aumentado en la misma medida que lo han hecho los volúmenes de mineral, sino que lo ha hecho de forma menguada.

3.3.3. Avances en la utilización del recurso hídrico

Dada la situación de escasez hídrica que se vive en el norte del país, sumado a la competencia de este recurso con otros actores consumidores que revisten mayor relevancia

para la política pública, como la agricultura y el consumo humano, la industria se ha visto en la obligación de trabajar en busca de aminorar el aumento en la demanda de agua de sus procesos.

Se podría decir que las faenas han sabido llevar este desafío de buena manera, ya que los informes publicados sobre consumo hídrico evidencian mejores prácticas en este sentido con importantes logros. Además de la notable irrupción del agua proveniente de océano en el suministro hídrico, y las tasas de recirculación cada vez más altas, también se suma la optimización de las aguas utilizadas en las áreas más intensivas en su consumo como son la concentración y la hidrometalurgia. Esto último puede verse reflejado en las tasas de consumo unitario de aguas continentales por tonelada de mineral procesado, que muestran la cantidad de agua que se requiere para el procesamiento de una tonelada de material extraído y que han mostrado bajas constantes en su valor, sobre todo en el área de concentración, lo que significa que cada vez se requiere menor cantidad de agua para tratar el mismo volumen de mineral.

Por supuesto que aún queda mucho por trabajar en materias de innovación, diseño y responsabilidad en la manipulación de las aguas en minería, pero sin dudas, los reportes que llegan desde la industria son alentadores.

3.3.3.1. Optimización del recurso

Durante los últimos años se han visto avances en el manejo de las aguas usadas en la minería, un ejemplo de esto son las tasas unitarias de consumo que muestran que cada vez se requiere menor cantidad de agua para tratar la misma cantidad de mineral, y esto es mucho más notorio y pronunciado en el área de concentración, que a pesar de consumir más agua que el área hidrometalúrgica, ha mostrado mayores índices de optimización hídrica durante los años recientes. (Ver Figura 3.13)

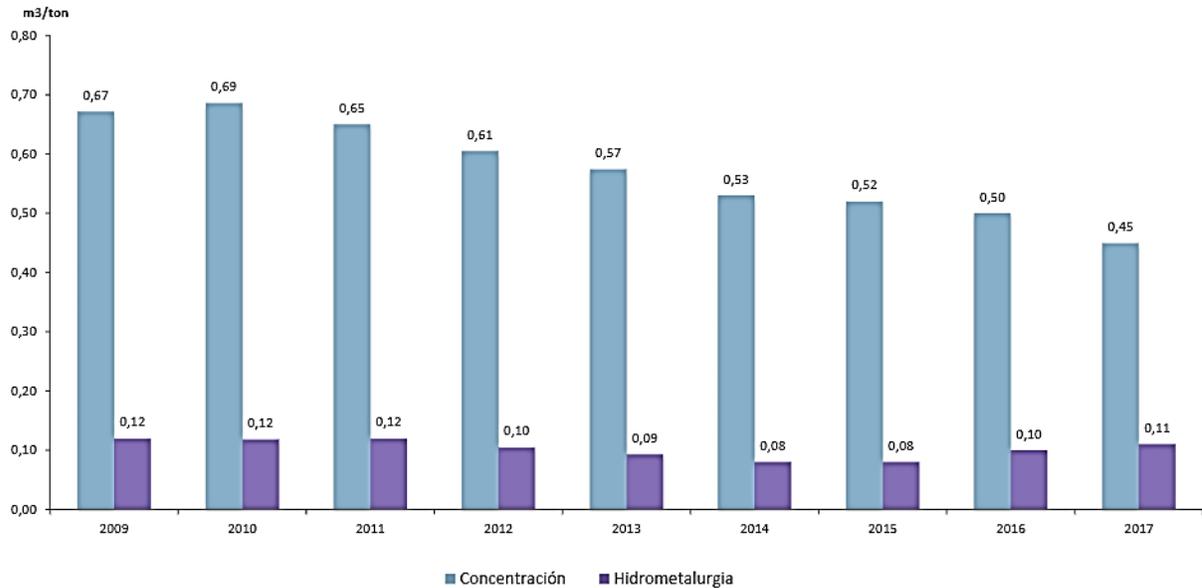


Figura 3.13: Tasas de consumo unitario de agua continental por proceso en la Minería del Cobre, 2009-2017.

Fuente: Consejo Minero, 2019.

En el área de hidrometalurgia, se han mantenido fuertemente estables las tasas consumo unitario de agua por tonelada procesada, sin aumentar. En el año 2009 se necesitaron 120 litros de agua para tratar cada tonelada de mineral faenado por esa vía, y en el año 2017 se usaron 110 litros. En el lapso de tiempo entre estas dos fechas, la variación de consumo fue mínima.

En el área concentradora en cambio, se observa un notorio descenso de las tasas de consumo unitario. Mientras que en el año 2010 se llegaron a utilizar 690 litros por cada tonelada de mineral tratado, en el año 2017 la cifra cayó a 450 litros por cada tonelada de mineral procesada por esta vía, lo que significa una disminución de 34,8% con respecto al consumo de ese año. Esto quiere decir que en concentración, en “la actualidad” se necesitan en promedio 240 litros menos que hace diez años para tratar cada tonelada de mineral que ingresa a la planta, y en la escala de tratamiento que maneja la minería del cobre en este país, ese recorte significa un ahorro de agua gigantesco de millones de metros cúbicos al año que beneficia notablemente a la industria y al medio ambiente.

3.3.3.2. Recirculación

La recirculación es otro de los pilares en que ha sostenido su camino sustentable la industria minera. Símbolo de la gestión responsable del recurso hídrico, desde hace largos años que se ha convertido en la principal fuente de las aguas usadas en la minería representando el 70% del total de éstas. Las aguas que han sido usadas en el proceso tienen la posibilidad de ser reutilizadas en el mismo proceso, en un proceso diferente o incluso en una actividad diferente a la minera previo tratamiento, lo que significa una disminución importante en la necesidad de extraer aguas continentales o marinas.

Tal como se muestra en la Figura 3.14, a nivel nacional los caudales de agua recirculada en el área concentradora han mostrado aumentos sostenidos durante los últimos años a pesar de que el año 2017 se muestra un retroceso importante en la tasa de recirculación de la minería global. Un factor negativo es que desde el año 2012 la tasa de recirculación ha disminuido levemente su porcentaje, bajando desde 74% en ese año hasta 69,7% en el año 2017, aun así la industria ha mantenido los niveles de recirculación en torno al 70% de toda el agua que requiere.

Específicamente en la planta concentradora, la industria ha mostrado números más auspiciosos que la minería global referente a la recirculación, ya que ha pasado de 68% de recirculación en 2012, 76% de recirculación en 2017, lo que significa un importante logro considerando que ésta es el área de consumo hídrico más intensivo de toda la industria.

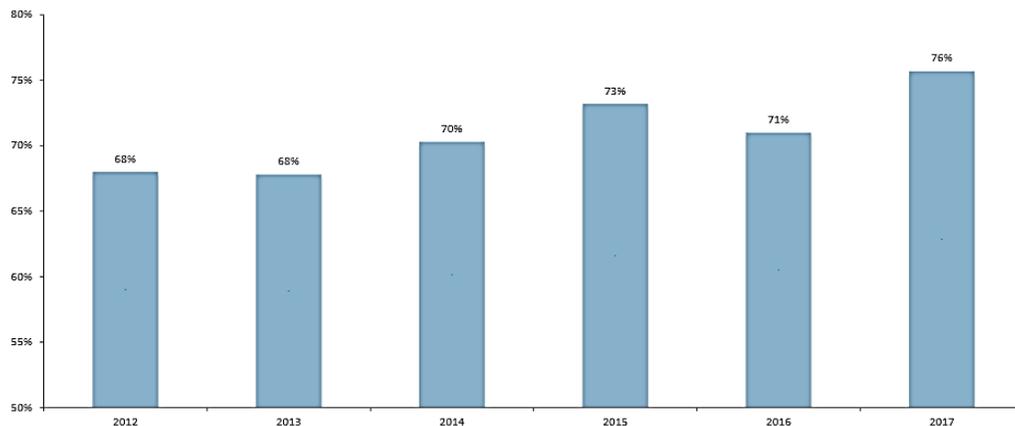


Figura 3.14: Tasa de recirculación de agua en área concentración de la Minería del Cobre, 2012-2017.

Fuente: Consejo Minero, 2019.

3.3.3.3. Agua de mar

Por último, aparece el uso de agua de mar en los procesos, un fenómeno que ha revolucionado el suministro hídrico en el sector minero de nuestro país en los últimos diez años. Ha dado una solución viable a la creciente producción como nueva fuente de abastecimiento disminuyendo drásticamente el requerimiento de extracción de aguas continentales por parte de la minería del cobre liberando así estas aguas para el beneficio de otros sectores sociales o económicos. Además no debe lidiar con la competencia de su uso con otros actores sociales ni entramparse en demasiados trámites legales para conseguir los derechos de aprovechamiento. El agua proveniente del océano ha mostrado un gran aumento en su demanda con un crecimiento anual promedio de 52% y este fenómeno seguirá expandiéndose con mayor velocidad en los próximos años según las proyecciones más actualizadas. ^[12]

Mientras que en 2010 se utilizaron 0,24 [m³/s] de agua marina que representó el 2% de las extracciones hídricas, ya en 2017 se consumieron 3,16 [m³/s] de agua de mar con una presencia del 19% del total de extracciones hechas por la industria y 6% de toda el agua utilizada por el rubro considerando a las aguas recirculadas, lo que se muestra en detalle en la Figura 3.15. De esta cantidad, la relación entre agua tratada antes de su uso y su versión natural es muy pareja ya que 51,6% del agua de mar se utilizó de forma cruda y salobre y 48,4% de esta cantidad fue agua desalada previamente a su utilización. ^[19]

Es preciso destacar que el uso de agua de mar en faenas mineras hoy en día está acotado solamente a las regiones de Antofagasta y Atacama donde ocupa un lugar prominente en el abastecimiento hídrico de ellas, a través de 13 plantas desalinizadoras ubicadas entre estas dos regiones con una capacidad máxima de desalinización de 4,6 [m³/s]. ^[8]

Por otra parte, existen en carpeta numerosos proyectos relacionados en diferentes estados de avance, con gran capacidad de extracción que ampliarían la oferta de recursos hídricos marinos en el futuro, estos proyectos involucrarían, además, otras regiones mineras como Tarapacá y Coquimbo, y otras empresas mineras también que buscan ponerse el corriente de esta necesaria tendencia.

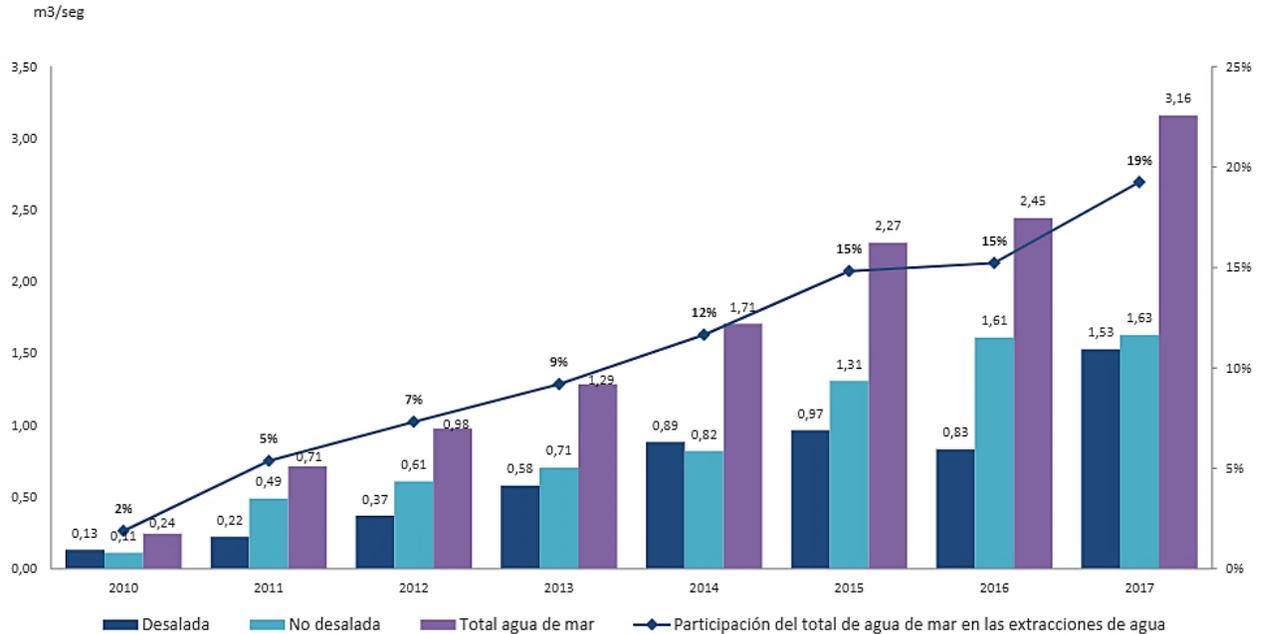


Figura 3.15: Evolución del consumo de agua de mar en la Minería del Cobre 2010-2017.

Fuente: Consejo Minero a partir de “Anuario COCHILCO 2017”, 2018.

3.3.4. Consumo hídrico por regiones

Dentro de la demanda hídrica en la minería cuprífera nacional es posible encontrar importantes diferencias en la situación particular de cada región minera, es decir, desde la región de Arica, hasta la región de O’Higgins. Algunas de estas diferencias tienen que ver con el volumen de agua extraída por cada región o por el tipo de fuente de abastecimiento hídrico que predomina en una zona en particular, o también el proceso minero que demanda mayor cantidad de recursos hídricos en la industria del cobre.

Si se habla de la demanda sobre aguas continentales, encontramos que la región de Antofagasta, región que concentra la mayor parte de la actividad minera y que lidera en la producción de cobre en Chile, también lidera en las extracciones hídricas de fuente terrestre como es lógico imaginar. En el año 2017 las faenas mineras de esta zona demandaron 4,97 [m³/s] de aguas continentales lo que representó 37% del total de agua dulce extraída por el sector minero. Le siguieron la región de O’Higgins que totalizó 2,27 [m³/s] de aguas continentales extraídas y la región de Atacama con 1,35 [m³/s], lo que significó una presencia de 17% y 10% respectivamente sobre las aguas continentales demandadas durante ese año.

De la Figura 3.16 y de la Tabla 3.7 se desprende que la región de Antofagasta consume más de un tercio de las aguas continentales que usa el sector de la minería del cobre y que durante el año 2017 disminuyó notoriamente su demanda hídrica regional en relación a los tres años anteriores, esto comparado con el resto de las regiones mineras, que en general mantuvieron sus requerimientos de agua con leves variaciones respecto a los años inmediatamente anteriores.

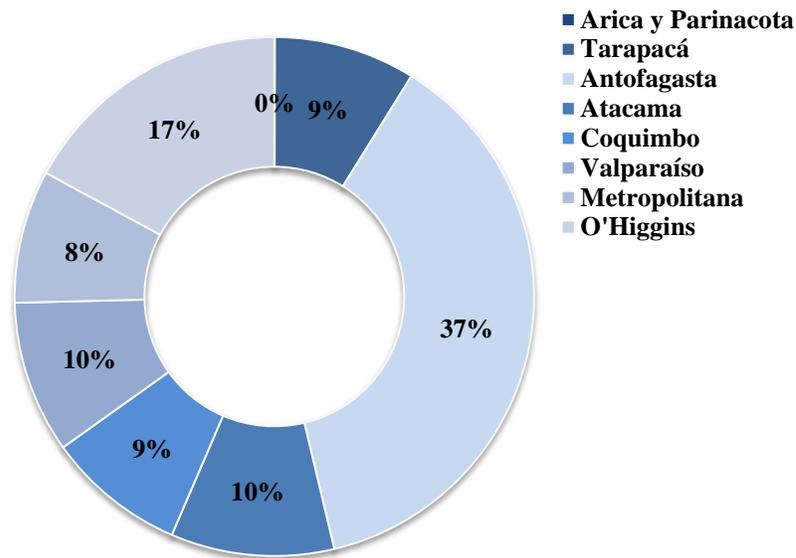


Figura 3.16: Demanda de agua continental en la Minería del Cobre por regiones.

Fuente: Elaboración propia en base a Cochilco, 2018.

Tabla 3.7: Consumo de agua continental en la Minería del Cobre por región, 2012-2017.

Fuente: Adaptado de Cochilco, 2018.

[m ³ /s]	Agua Continental					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Arica y Parinacota	ND	ND	0,004	0,007	0,005	0,005
Tarapacá	1,36	1,32	1,34	1,22	1,13	1,17
Antofagasta	4,95	4,99	5,42	5,51	5,31	4,97
Atacama	1,62	1,45	1,45	1,17	1,32	1,35
Coquimbo	1,02	1,08	0,99	1,15	1,29	1,15
Valparaíso	1,08	1,45	1,44	1,30	1,34	1,26
Metropolitana	0,69	0,79	0,71	0,71	0,98	1,10
O'higgins	1,66	1,63	1,60	2,01	2,24	2,27
Total Industria	12,38	12,71	12,95	13,08	13,62	13,28

En cuanto a las fuentes de abastecimiento, según las informaciones recogidas por COCHILCO, es posible observar que aquellas regiones en donde se sitúa el desierto de Atacama, vale decir, regiones de Tarapacá, Antofagasta y Atacama, predomina el agua subterránea como fuente de abastecimiento preferido, esto se deduce debido a la pobre disponibilidad de agua superficial que ofrece esta árida zona. Mientras que hacia el sur, en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, la fuente de abastecimiento más recurrente y mayoritaria en estos casos es el agua superficial, debido a la mayor cantidad de precipitaciones anuales, mayor presencia de acuíferos y ríos a los que la minería puede acceder.

También se destaca en este ítem que el agua de mar como fuente de abastecimiento se presenta exclusivamente en las regiones de Antofagasta y Atacama, y ha irrumpido de manera notoria en éstas como alternativa hídrica. En Antofagasta el agua de mar ya representa el 35% del abastecimiento hídrico total en el sector de la minería, mientras que en Atacama representa un 26%. (Ver Tabla 3.8)

Tabla 3.8: Consumo de agua según fuente de origen en la Minería del Cobre por región.
Fuente: Adaptado de Cochilco, 2018.

Origen Hídrico				
	Agua Superficial	Agua Subterránea	Agua Terceros	Agua Marina
Arica y Parinacota	0%	0%	100%	0%
Tarapacá	0%	93%	7%	0%
Antofagasta	10%	45%	10%	35%
Atacama	30%	35%	9%	26%
Coquimbo	53%	45%	2%	0%
Valparaíso	51%	48%	1%	0%
Metropolitana	82%	12%	6%	0%
O'higgins	89%	11%	0%	0%
Promedio Industria	33%	41%	7%	19%

Ahora, si se toma en cuenta la demanda hídrica por proceso minero en cada región se desprende que al igual que en la realidad global a nivel país, el proceso de concentración es aquel que consume la mayoría del agua que se utiliza en las obras mineras de cada región, esta realidad se comparte en prácticamente todas las regiones.

Salvo en la región de Arica y Parinacota, donde la concentración ocupa una cantidad despreciable de agua, y en la región de Antofagasta, en donde el área de concentración ocupa casi la mitad del recurso hídrico minero, en el resto de las regiones mineras, el proceso de concentración demanda más del 70% de toda el agua que usa la industria en esas regiones. Se destaca la situación de O'Higgins y la Metropolitana, donde la concentración alcanza niveles del 87% y 85% de requerimiento del agua total, respectivamente. (Tabla 3.9)

También es destacable que la región de Arica y Parinacota es la única en la cual el proceso de hidrometalurgia predomina en la demanda de agua, llegando hasta 98% del total. Pero debido al poco caudal hídrico minero requerido en esta región, esta situación no se considera relevante para el escenario nacional.

Tabla 3.9: Consumo de agua según proceso en la Minería del Cobre por región.

Fuente: Adaptado de Cochilco, 2018.

Área Demanda Hídrica				
	Concentración	Hidrometalurgia	Otros	Fund. Y Ref.
Arica y Parinacota	0%	98%	2%	0%
Tarapacá	72%	8%	20%	0%
Antofagasta	48%	30%	17%	5%
Atacama	74%	4%	16%	6%
Coquimbo	72%	5%	23%	0%
Valparaíso	76%	1%	16%	7%
Metropolitana	85%	11%	4%	0%
O'higgins	87%	0%	6%	7%
Promedio Industria	67%	14%	15%	4%

En el ámbito de las tasas de consumo unitario también encontramos una variabilidad interesante de región a región. Respecto al consumo hídrico específico del área de concentración, cuatro de las siete regiones mineras catastradas en este ítem presentan un desempeño menos eficiente que el promedio nacional, es decir, que durante el 2017 necesitaron más de 450 litros para procesar cada tonelada de material ingresada. En específico, la región de Antofagasta presenta el mejor registro, que corresponde al menor consumo de agua por tonelada procesada en el área concentración ocupando 310 litros de agua por cada tonelada, lo que disminuye profundamente el promedio nacional debido al

gran caudal hídrico ocupado en esta región. Por su parte, el peor registro lo ostenta la región de O'Higgins donde se necesitan 780 litros para procesar cada tonelada en la planta concentradora, vale decir, más del doble del agua que se necesita en Antofagasta para tratar la misma cantidad de mineral, valor que podría explicarse en buena medida a la gran distancia existente entre la planta concentradora y el tranque de relave de la Mina El Teniente lo que encarece la recirculación del recurso.

Respecto al área hidrometalúrgica, tres de las ocho regiones mineras no entregaron informaciones sobre este parámetro en 2017, las regiones de las que sí se tienen registros presentan coeficientes muy dispares. El mejor desempeño se encuentra en la región de Atacama con un requerimiento de tan solo 50 litros por cada tonelada lixiviada en esta área, la mitad del promedio nacional. Mientras que el peor valor se encuentra en la región de Coquimbo con 990 litros por cada tonelada lixiviada en hidrometalurgia, significando un consumo nueve veces mayor que el promedio a nivel nacional. (Ver Figura 3.17)



Figura 3.17: Tasas de consumo unitario en la Minería del Cobre por región, 2012-2017.

Fuente: Cochilco, 2018.

Para finalizar el análisis regional de las demandas hídricas en la minería del cobre nos enfocamos en las tasas de recirculación global que se pueden encontrar de región a región. Solo tres de las ocho regiones mineras presentan una tasa de recirculación mayor al promedio nacional, donde se destaca el registro proveniente de la región de Coquimbo que alcanza 81% de recirculación, el más alto entre las regiones. La peor tasa de recirculación corresponde a la región de Arica y Parinacota que no presentó caudal recirculado en sus

procesos durante el año 2017, le sigue la región de Valparaíso con la segunda peor tasa de recirculación llegando a 58,9% de aguas retornadas a los procesos mineros. (Figura 3.18)

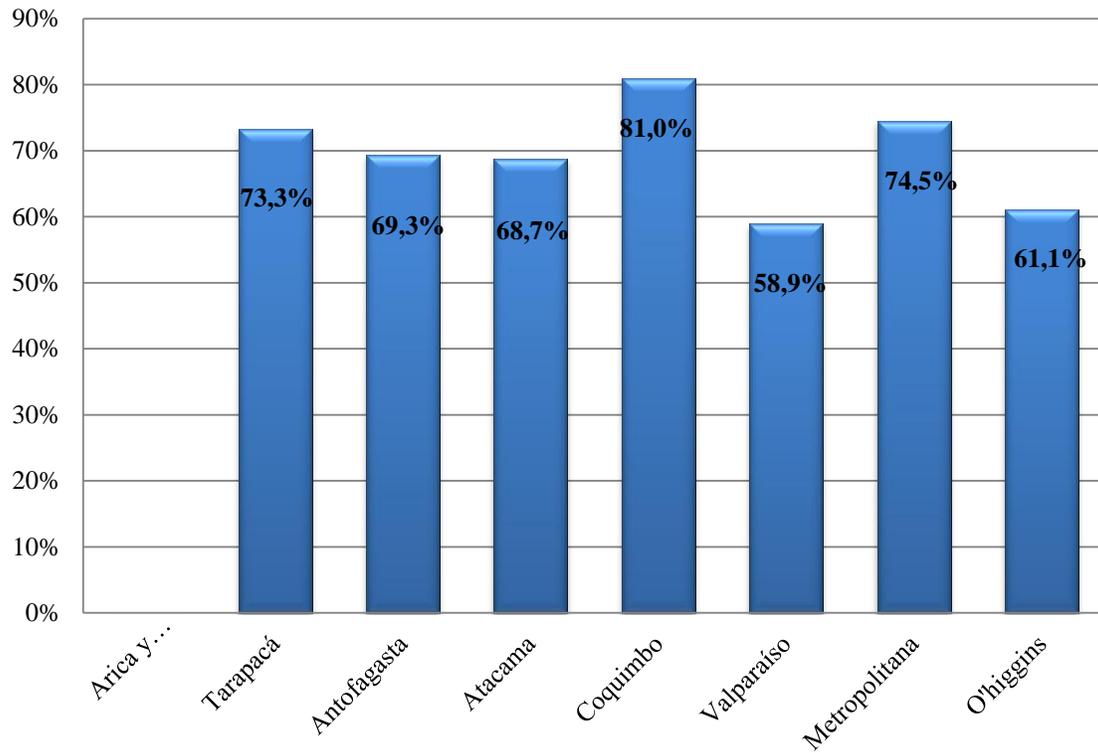


Figura 3.18: Tasa de recirculación global en la Minería del Cobre por regiones.
Fuente: Elaboración propia en base a Cochilco, 2018.

CAPÍTULO 4 PROYECCIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA MINERÍA DEL COBRE

Desde hace algunos años la Comisión Chilena del Cobre realiza anualmente una estimación sobre la demanda hídrica futura de la industria del cobre en nuestro país y la realiza con un alcance de once años desde aquel en que se publica cada informe. Por ejemplo, este presente capítulo se ha fundamentado en gran medida en aquella estimación de COCHILCO que proyecta el consumo hídrico de la minería del cobre en el rango de años 2018-2029, que es el más actualizado a la fecha de este informe.

La proyección del consumo de agua en la minería que realizó la **Comisión Chilena del Cobre (2018)** está fundamentada en la aplicación de los índices de consumo unitarios respectivos a la proyección de producción de cobre realizada por Cochilco, y así obtener la demanda hídrica futura de un determinado periodo. Además, se determina el consumo de agua según la fuente de origen en base a las distintas categorías de los proyectos, incluyendo proyectos de desalinización e impulsión que existen en etapas de factibilidad y ejecución.

La estimación que realiza esta institución genera tres escenarios diferentes sobre el consumo hídrico que se sustentan en la producción minera, debido a la incertidumbre lógica que se encuentra en la gran diversidad de faenas mineras existentes en el país, éstos son los escenarios de producción máxima, de producción más probable, y de producción mínima.

A partir de estos tres escenarios posibles se obtienen tres valores distintos de producción minera para cada año estudiado en la proyección, estos tres valores son sometidos a una simulación de Montecarlo para crear distribuciones probabilísticas de consumo anual para cada escenario y rescatar de cada distribución el parámetro estadístico “valor esperado”. Los valores esperados obtenidos de cada una de las tres distribuciones generadas se suman para entregar el consumo esperado de agua en cada año.

A grandes rasgos, se proyecta un aumento en la demanda hídrica de la minería cuprífera durante la próxima década a pesar de los esfuerzos recientes sobre recirculación y optimización del recurso hídrico. Esto se debe principalmente a tres factores técnicos asociados a la faena minera y a los cuales se ven y se verán enfrentadas en los próximos años la gran mayoría de las compañías mineras

en Chile. El primero de estos factores es el aumento de la producción de cobre global, en cualquiera de sus variedades, que exige el mercado de metales, requiriendo consecuentemente utilizar mayores recursos hídricos. El segundo factor tiene que ver con el conocido envejecimiento de los yacimientos de cobre que cada año entrega menores leyes del mineral presentes en cada tonelada de material, esto hace necesario tratar mayor cantidad de mineral en las compañías para mantener los niveles de producción deseados y eso significa utilizar más agua para producir la misma cantidad de cobre. El tercer factor se refiere a otra de las características presentes en la mayoría de los yacimientos, que presentan cada vez mayor presencia de minerales de cobre sulfurados por sobre minerales de cobre oxidados, esta proporción hoy en día es en razón cercana de 70%/30%, pero según las estimaciones este desequilibrio podría acentuarse de aquí a diez años cuando la misma razón sea más cercana a un 90%/10%. Esto claramente tiene un fuerte impacto en el requerimiento hídrico del rubro ya que dentro de las compañías mineras, el área concentradora ocupa de manera mucho más intensiva el agua disponible a través de procesos específicos muy consumidores, y es esa línea de procesamiento la que siguen los minerales de cobre sulfurados.

En la Figura 4.1 se observa el mencionado aumento de los recursos hídricos en la minería del cobre, clasificados en aguas continentales y aguas marinas. También es notorio notar que mientras el consumo de aguas continentales aumenta levemente durante el período de tiempo analizado, a razón de alrededor de 1% promedio anual, el agua proveniente del océano presenta un fuerte aumento en su demanda con una tasa cercana al 12% de crecimiento promedio anual.



Figura 4.1: Demanda hídrica de la minería del cobre, 2018-2029.

Fuente: “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

4.1. Proyección demanda hídrica por origen

Tal como se comentó anteriormente, la proyección de la demanda hídrica en la minería del cobre indica un importante aumento en los requerimientos de este recurso durante los próximos años. Las dos principales fuentes de origen del agua que utiliza la industria minera experimentarán de manera diferente este aumento en su demanda.

Las aguas provenientes de fuente continental presentan un leve aumento al año 2029 manteniendo su extracción relativamente estable en el tiempo. Esto considerando el poco margen de acción que entrega la escasa disponibilidad de agua en las zonas geográficas donde se desenvuelve mayoritariamente la minería. El consumo de agua continental proyectado para el año 2018 fue de 12,98 [m³/s] y presentó paulatinas alzas con una tasa de crecimiento cada año cercano al 1% hasta alcanzar los 14,53 [m³/s] en el año 2029, esto significa un aumento global de 11,9% con respecto al 2018, año en que se inició este estudio.

El agua proveniente de los océanos aunque también muestra un aumento en su demanda, su evolución se da de forma mucho más acelerada, lo que da cuenta de que la minería del cobre se ha volcado en dirección al mar para suplir sus requerimientos hídricos en sus diferentes usos y poder así solventar las metas y proyectos que el rubro tiene a futuro. Si en 2018 la proyección de consumo de agua de mar fue de 3,28 [m³/s], para el año 2029 se espera que esta demanda alcance un caudal de 10,82 [m³/s] lo que representa un incremento global de 229,8% con respecto al año 2018, y promediando una tasa de crecimiento anual cercana al 12%.

Es importante también destacar que el agua de mar cada vez tiene un lugar más protagónico en los recursos hídricos que utiliza la industria minera. En 2018 se estimó una presencia del 20% de agua de mar sobre el total de agua extraída por la minería, se proyecta que para el año 2024 su presencia sea del 40% y para el 2029 alcanzaría un porcentaje del 43% de toda el agua extraída, apreciable en la Figura 4.2. Se presume que la presencia del agua de mar seguirá aumentando y en los próximos años se convertirá en la principal fuente de extracción de recursos hídricos que tenga el área minera, lo que demuestra la “revolución” hídrica que se vive actualmente.

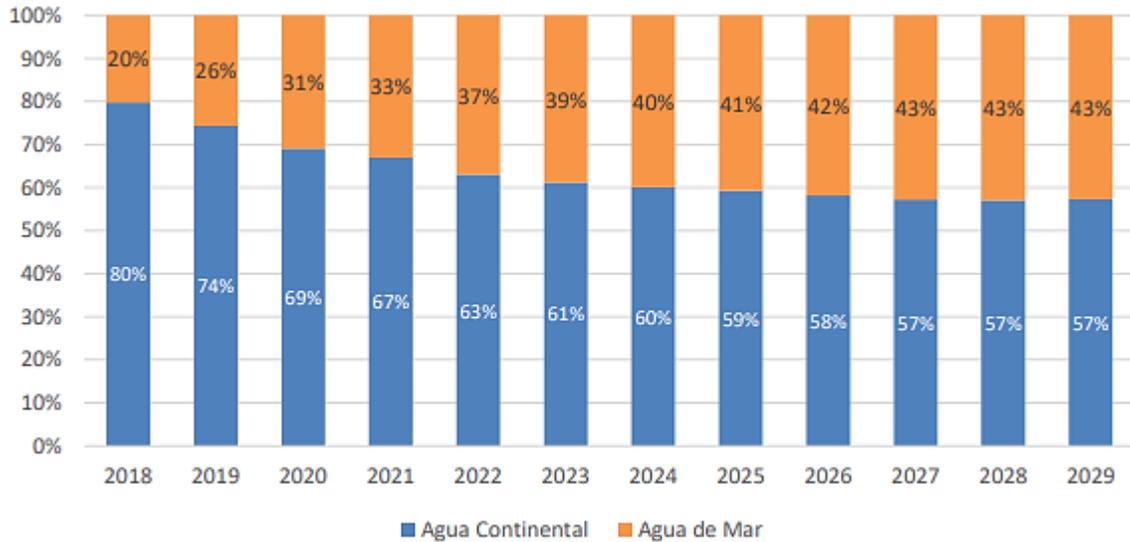


Figura 4.2: Distribución porcentual de las aguas utilizadas en la Minería del Cobre según fuente de origen, 2018-2029.

Fuente: “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

4.2. Proyección demanda hídrica por procesos

Actualmente, como ya se indicó, la principal área de proceso dentro de la minería del cobre es el área concentradora que utiliza alrededor del 70% de todos los recursos hídricos que maneja la industria. Todas las estimaciones y proyecciones que se encuentran dentro del ambiente minero y del cobre apuntan a que en los próximos años ese porcentaje aumentará, debido en su totalidad a que el procesamiento del mineral se inclinará aún más sobre los minerales de cobre sulfurados que son más comunes y abundantes que los minerales de cobre oxidados, lo que también se encuentra ligado al envejecimiento de los yacimientos mineros.

Esto significa que la proporción de aquellos minerales que siguen la vía de concentración será cada vez mayor con respecto a aquellos minerales que siguen la vía hidrometalúrgica y como ya se ha comentado la producción de concentrado involucra un uso mucho más profundo de los recursos hídricos, entonces a futuro se espera una demanda mucho más intensa sobre las aguas marinas y también continentales producto del constante incremento del tratamiento de minerales sulfurados.

En la Figura 4.3 se muestra el detalle de la proyección en la demanda hídrica del área concentradora en la minería del cobre, el área de mayor consumo de este insumo. Se aprecia que esta área sigue el mismo patrón que el consumo general de la industria, en donde el consumo de

agua continental se mantiene estable en el tiempo mientras que el agua de mar presenta un notorio aumento en su utilización.

Con respecto a las aguas continentales el año 2029 se espera un consumo de 7,6 [m³/s] lo que significa un aumento de 4,1% con respecto al 2018 cuando se ocuparon 7,3 [m³/s]. Con respecto al agua marina el incremento fue de 244,4% en el mismo período de tiempo cuando se pasó de 2,7 [m³/s] en 2018 a 9,3 [m³/s] en 2029. También es importante destacar que en el año 2026 se espera que el agua de mar se transforme en la fuente de agua más importante en la concentración desplazando al agua de continente y en 2029 alcanzará un porcentaje de 56,8% sobre el total de agua requerida en concentración.



Figura 4.3: Proyección demanda hídrica en área concentradora Minería del Cobre, 2018-2029.
Fuente: “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Respecto al área hidrometalurgia es posible notar un menor consumo hídrico que el área anterior y como se manifestaba anteriormente, la producción de cobre a través de esta vía irá disminuyendo en el tiempo lo que tiene como consecuencia lógica que la demanda hídrica de esta área también lo haga. (Ver Figura 4.4)

El consumo de agua continental disminuirá casi hasta su tercera parte en 2029 cuando presente una baja de 62,5% con respecto a su consumo en 2018 pasando de 1,6 [m³/s] a 0,6 [m³/s]. El

agua de mar por su parte presentará un desarrollo irregular, pasando por períodos de mayor demanda durante 2018-2023 y períodos de disminución en su requerimiento desde 2024 en adelante. El consumo punta de agua marina se dará en los años 2022 y 2023 cuando se alcance un caudal de 2,1 [m³/s] en faenas asociadas a lixiviación, extracción por solventes y electroobtención. También es importante resaltar que desde 2020 en adelante el agua proveniente de mar se erige como la principal fuente de origen de agua utilizada en el área hidrometalúrgica.



Figura 4.4: Proyección demanda hídrica en área hidrometalurgia Minería del Cobre, 2018-2029.
Fuente: “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Acerca del área Otros, es posible ver que el agua de origen continental constituye la totalidad del suministro hídrico de esta cartera que se divide en actividades de Mina y Servicios. La demanda de agua de esta área presenta un aumento sostenido durante la próxima década, cuando pase de una utilización de 2,5 [m³/s] en 2018 a 4,1 [m³/s] en 2029, lo que significa un aumento de 64% con respecto al primer año de estudio. (Ver Figura 4.5)

El sector de servicios dentro del área Otros representa más de cuatro quintas partes del total del consumo hídrico de esta área y es responsable principal del aumento en el requerimiento hídrico de este ítem durante los próximos años.



Figura 4.5: Proyección demanda hídrica en área Otros Minería del Cobre, 2018-2029.

Fuente: “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Por su parte, el área de fundición y refinerías tampoco incluye a las aguas de origen marino en sus procesos, por lo que el agua continental constituye la totalidad del suministro hídrico en esta área. La evolución de su demanda muestra gran estabilidad y poca variación durante la próxima década sobre todo después del año 2024 cuando la variación de su requerimiento hídrico es prácticamente nula.

Se aprecia que en el año 2018, la demanda del área de fundición y refinerías alcanzaba los 1,7 [m³/s] y al final de la proyección analizada alcanzaría los 2,2 [m³/s], es decir, en este rango de estudio el aumento de la demanda hídrica sería de 29,4%. (Ver Figura 4.6)

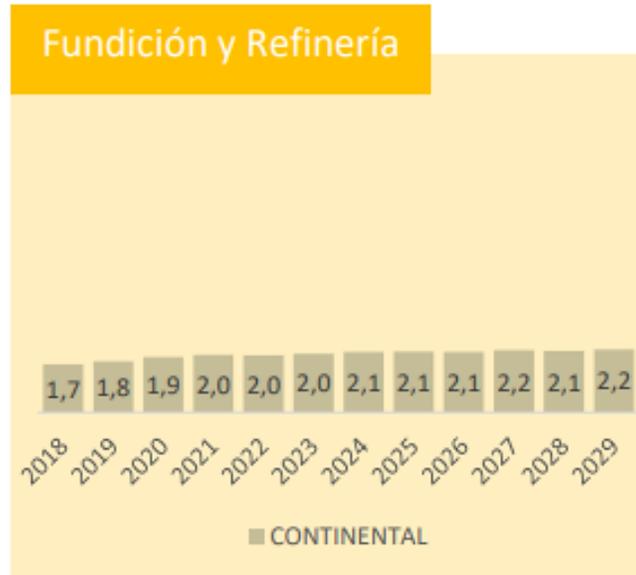


Figura 4.6: Proyección demanda hídrica en área Fundición y Refinería Minería del Cobre, 2018-2029.

Fuente: “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

En resumen, es posible percibir que el área dentro de la minería del cobre que presentará mayor consumo de los recursos hídricos en el corto y mediano plazo seguirá siendo la concentración y durante los años venideros mantendrá su posición acaparando cada vez mayor porcentaje del suministro de agua total. Para el año 2029 la concentración ocupará el 52,3% de las aguas continentales, el 85,3% de las aguas marinas, y el 66,5% de toda el agua utilizada en las faenas mineras. Es muy interesante detallar que la proyección en la producción de cobre para el período 2018-2029 presenta una tasa de crecimiento promedio anual de 2,1%, mientras que para el consumo total de insumos hídricos la tasa de crecimiento promedio anual se estima en 4,2% durante el mismo espacio de tiempo, debido a lo ya explicado anteriormente, la matriz productiva de la minería cuprífera se está volcando gradualmente a los minerales sulfurados que siguen la vía concentradora cuyos procesos utilizan el agua de manera mucho más intensa.

El área hidrometalúrgica, continuará siendo la tercera área consumidora de agua desplazada por el área Otros. Esta última consumirá el 16,1% de los recursos hídricos en el año 2029, el área hidrometalúrgica usará el 8,7%, y el área de fundición y refinerías el mismo 8,7% de las aguas totales durante el mismo año en la minería del cobre.

4.3. Proyección demanda hídrica por regiones

Si se analizan las Tablas 4.1 y 4.2, que contienen los valores de la proyección hídrica en cada una de las ocho regiones en las que se desarrolla la minería del cobre en Chile, se muestra que prácticamente todas las regiones experimentarán un alza en sus requerimientos de este insumo, algunas de ellas tendrán un incremento leve, mientras que otras tendrán un aumento mayor.

Tabla 4.1: Proyección demanda aguas continentales por región en la Minería del Cobre, 2018-2029.

Fuente: Adaptado de “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Agua Continental												
[m ³ /s]	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Arica y Parinacota	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Tarapacá	1,06	1,19	1,30	1,17	1,21	1,14	1,17	1,17	1,18	1,17	1,18	1,18
Antofagasta	5,40	5,61	5,42	5,37	5,26	5,14	5,19	5,07	4,88	4,75	4,46	4,42
Atacama	1,59	1,86	1,95	1,91	2,03	2,34	2,53	2,61	2,63	2,68	3,23	3,61
Coquimbo	0,80	0,83	0,65	0,70	0,78	0,80	0,86	0,86	0,85	0,85	0,83	0,82
Valparaíso	1,21	1,22	1,31	1,35	1,39	1,36	1,37	1,29	1,23	1,17	1,37	1,37
Metropolitana	1,17	1,21	1,24	1,29	1,28	1,28	1,32	1,35	1,36	1,41	1,43	1,43
O'higgins	1,74	1,85	1,93	1,99	1,94	1,74	1,75	1,73	1,74	1,80	1,70	1,70
Total Industria	12,97	13,76	13,81	13,79	13,89	13,82	14,21	14,09	13,87	13,82	14,20	14,53

Tabla 4.2: Proyección demanda aguas de mar por región en la Minería del Cobre, 2018-2029.

Fuente: Adaptado de “Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Agua Marina												
[m ³ /s]	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Arica y Parinacota	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Tarapacá	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,28	0,40	0,42	0,44	0,47	0,54	0,55
Antofagasta	2,79	4,21	5,11	5,46	6,39	6,52	6,92	7,07	7,29	7,55	7,75	7,75
Atacama	0,49	0,52	0,60	0,71	0,84	1,17	1,31	1,36	1,41	1,46	1,55	1,66
Coquimbo	0,00	0,00	0,46	0,63	0,74	0,77	0,79	0,83	0,82	0,85	0,85	0,86
Valparaíso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metropolitana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O'higgins	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total Industria	3,28	4,74	6,18	6,81	8,14	8,75	9,43	9,68	9,96	10,33	10,69	10,82

Otra situación interesante de analizar es que durante la próxima década la utilización de agua de mar en las faenas mineras se expandirá fuera de las regiones de Antofagasta y Atacama. Se espera que la región de Coquimbo comience a utilizar agua marina desde el año 2020 al igual que la región de Arica y Parinacota en menor medida, y se estima que la región de Tarapacá inicie la extracción de este insumo en el año 2022, sumándose así a las dos primeras regiones mencionadas en el uso del agua de mar. Por su parte, las regiones de la zona central como Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins no proyectan consumo de agua de mar durante este período y basan su requerimiento hídrico completamente en las fuentes continentales.

Ahora bien, de forma particular, la región de Antofagasta seguirá siendo la región que concentre la mayor demanda de agua en la minería del cobre y con gran diferencia, al menos hasta 2029. La región de Atacama se instalará como la segunda región que más consuma recursos hídricos durante la próxima década desplazando a la región de O'Higgins al tercer lugar.

También es preciso destacar que si bien todas las regiones presentan en general un relativo aumento en el consumo de agua total la demanda de aguas continentales presentará un estancamiento, teniendo a la región de Atacama como única excepción, dando lugar a la utilización de agua marina en las regiones ya mencionadas. Algunos ejemplos clarificadores son que en la región de Antofagasta, ya desde el año 2021 y en adelante el agua de mar será la principal fuente de origen hídrico, y en la región de Coquimbo el año 2023 el agua de mar representará el 50% del suministro hídrico regional, debido a la gran cantidad de proyectos en carpeta relacionados a plantas desaladoras e impulsión de agua de mar para la minería.

CAPÍTULO 5 ALTERNATIVAS PARA EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE

5.1. Introducción

Las faenas mineras enfrentan un gran obstáculo a sortear sobre el abastecimiento hídrico para sus procesos, gran parte del territorio nacional comprendido entre el centro y norte del país vive una escasez creciente de los recursos hídricos y una demanda que compite con otros sectores económicos y sociales, el uso responsable y racional es clave para asegurar su disponibilidad en el futuro. El escenario actual muestra que las presiones sobre los recursos hídricos son una realidad, y una realidad cada vez más notoria y cada vez más latente, no solo en la industria minera sino que en la mayoría de los sectores industriales y laborales que constituyen la economía de un país, y en actividades aún más importantes y necesarias como el consumo humano en todas sus variedades.

El suministro hídrico de cualquier actividad que lo requiera se vuelve cada vez más complejo de satisfacer por lo que se hace necesario un cambio de paradigma para no seguir haciendo lo mismo que se hacía sino que generar una transformación del hábito para un uso y manejo del agua más sustentable. En este sentido, se ha generado la búsqueda de nuevas formas de obtención de agua para compensar la carencia que existe, además de las técnicas convencionales como la captación de aguas lluvia, la acumulación del recurso hídrico en embalses, la cosecha mediante pozos, hoy en día es posible encontrar un desarrollo constante de ideas y sistemas que buscan desarrollar nuevas alternativas no tradicionales o mejorar aquellas existentes para lograr satisfacer las demandas siempre crecientes de los insumos hídricos.

Si bien, la información presentada anteriormente en este estudio indica que la minería del cobre en Chile ha tomado acciones al respecto integrando políticas para optimizar el recurso, tal como lo reflejan los índices de recirculación y de eficiencia hídrica, pareciera que la industria se ha volcado mayoritariamente sobre el agua de mar como principal alternativa para aumentar la oferta de agua global y disminuir la presión sobre los recursos hídricos continentales, y cada vez son más las faenas que incorporan a sus operaciones agua de mar y desalinizada para suplir sus necesidades hídricas presentes y futuras. Sin embargo, existen múltiple variedad de procesos o tecnologías que permitirían incrementar el suministro de agua para la industria en las que sería

posible incursionar, probar, desarrollar e implementar para así disminuir las pérdidas y el consumo específico de los procesos en el sector minero metalúrgico o aprovechar de manera más eficiente el recurso.

Como se ha dicho, ya se han introducido políticas de eficiencia hídrica efectivamente en las operaciones y los últimos registros dan cuenta de ello, la incorporación del agua de mar en los procesos y el aumento en las tasas de recirculación de agua parecieran ser tan solo el prólogo de toda una nueva ingeniería minera que busca indudablemente asegurar la cantidad de agua necesaria para satisfacer el alza de producción de cobre proyectada en el futuro cercano.

Algunos aspectos clave para garantizar el éxito en la gestión y que permitirán manejar en forma integrada el recurso hídrico según lo expuesto por la **Comisión Chilena del Cobre (2008)** son:

- Manejo y control adecuado de los derechos de agua disponibles, llevando un catastro actualizado de los derechos empleados, sus compensaciones y/o restituciones, si corresponde (derechos consuntivos y no consuntivos).
- Disponer del instrumental adecuado que permita medir en línea los volúmenes de agua en las entradas y salidas de los procesos unitarios a fin de determinar el balance hídrico de la faena.
- Construcción de indicadores: en aquellas actividades identificadas como claves se requiere de controles específicos para controlar los caudales y la calidad establecida para el agua.

A continuación se detallarán algunas de las buenas prácticas relacionadas al consumo eficiente del agua a través de nuevas tecnologías o procesos que ya han comenzado a aplicarse en la minería cuprífera para aprovechar de mejor manera el agua disponible y aquellas ideas o propuestas que ya circulan en el ambiente minero, unas más factibles que otras, aun en etapas de desarrollo y que esperan ser implementadas a nivel operacional. Algunas de las tendencias se relacionan a la optimización en el consumo del recurso hídrico y otras se relacionan a la ampliación de la oferta de los insumos hídricos disponibles para la minería.

5.2. Agua de mar

Se ha visto como la extracción de agua de mar han aumentado explosivamente durante los últimos años. Según las estimaciones de COCHILCO en el año 2010 las extracciones de agua marina alcanzaron 0,24 [m³/s] lo que representó 2% del total de las aguas extraídas en la minería del cobre. Ya para el año 2017 las extracciones de agua de mar habían alcanzado los 3,16 [m³/s], es decir, un aumento de más de 13 veces en siete años y representando en ese último año 19% de las extracciones hídricas totales. La proyección que hace esta misma institución entre 2018 y 2029 indica que al final de este período la extracción de agua de mar llegaría a un caudal de 10,82 [m³/s] representando 43% de la demanda hídrica total en el rubro de la minería del cobre.

El uso de agua de origen oceánico ha crecido mucho lo cual se debe no solo a factores técnicos propios de la faena sino también a cuestiones sociales y medio ambientales. Si bien es sabido que el uso de agua de mar provoca fenómenos de corrosión e incrustaciones en tuberías e infraestructura de la planta, debido a la gran cantidad de iones presentes en ésta lo que le otorga al agua marina gran conductividad eléctrica, en especial las sales de cloruro Cl⁻, la principal problemática de su uso directo y sin tratamiento desalinizador en faenas mineras radica en el procesamiento mismo del mineral donde se ha comprobado las pérdidas de los subproductos que aparecen en la minería del cobre, como por ejemplo el molibdeno, el oro y la plata debido a la presencia de algunas sales. Estas pérdidas minerales se traducen en cuantiosas pérdidas económicas que desestabilizan el negocio minero por lo que se vuelve necesario tratar previamente el agua de mar a través de plantas desaladoras u otros procesos. ^[14]

Los últimos reportes de COCHILCO indican que actualmente existen diez plantas en operación que extraen el agua de mar para utilizarla en la minería del cobre y la totalidad de ellas se ubican en el borde costero del norte grande y en especial de la región de Antofagasta. Otras doce plantas más en proyección esperan entrar en funcionamiento para el año 2025. Dentro de este catastro se encuentra la segunda planta desalinizadora perteneciente a la empresa BHP Billiton, Escondida EWS, en la región de Antofagasta, capaz de desalar hasta 2,5 [m³/s] de agua marina ^[8] y cuya inversión superó los US\$4.300 millones, lo que la convierte en una de las mayores plantas en su tipo a nivel planetario. De las diez plantas que se encontraban funcionando al menos hasta 2018, ocho tienen la capacidad de desalinizar el agua de mar, siete de las diez extraen y usan el agua de mar directa sin desalar, y cuatro de las diez son capaces de cumplir ambas funciones, contando con infraestructura tanto para extraer y utilizar agua de mar y

desalarla, como para extraer y utilizar el agua de mar en condición salobre. Las capacidades máximas de cada planta con los caudales respectivos para cada función aparecen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Catastro plantas desaladoras y sistemas impulsión de agua marina en minería del cobre.
Fuente: “Consumo de Agua en la Minería del Cobre al 2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

Puesta en marcha	Estado	Propiedad	Nombre	Región	Capacidad Planta Desaladora (lts/seg)	Capacidad Agua de Mar Directa (lts/seg)
-	Cerrada (se espera reactivación en 2019)	Haldeman	Michilla	Antofagasta	75	25
-	Operando	ENAMI	Planta J.A. Moreno (Taltal)	Antofagasta	-	15
-	Operando	Las Cenizas	Las Cenizas Taltal	Antofagasta	9	12
-	Operando	Mantos de la luna	Mantos de la luna	Antofagasta	5	20
-	Paralizado	Pampa Camarones	Pampa Camarones	Arica y Parinacota	-	25
-	Operando	BHP Billiton	Escondida – Planta Coloso	Antofagasta	525	-
-	Operando	AMSA	Distrito Centinela (Esperanza + El Tesoro)	Antofagasta	50	1.500
-	Operando	AMSA	Antucoya	Antofagasta	20	280
-	Operando	Mantos Copper	Mantoverde	Atacama	120	-
-	Operando	Lundin Mining	Candelaria	Atacama	300	-
-	Operando	KGHM Int.	Sierra Gorda	Antofagasta	-	1.315
-	Operando	BHP Billiton	Escondida EWS	Antofagasta	2.500	-
2018	Factibilidad	Lundin Mining	Candelaria 2030 – Continuidad operacional	Atacama	200 (1)	-
2020	Factibilidad	AMSA	Desarrollo minera Centinela – Etapa 1	Antofagasta	-	850 (2)
2020	Factibilidad	AMSA	Los Pelambres – ampliación marginal I y II	Coquimbo	400	-
2020	Factibilidad	COPEC	Diego de Almagro	Atacama	-	315
2020	Factibilidad	BHP Billiton	Spence Growth Option	Antofagasta	1.000	-
2020	Factibilidad	Mantos Copper	Desarrollo Mantoverde	Atacama	260 (3)	-
2020	Factibilidad	Codeco	Adecuación planta desaladora RT Sulfuros – Etapa 1	Antofagasta	630 (4)	-
2021	Factibilidad	Teck	Quebrada Blanca Hipógeno	Tarapacá	1.300	-
2021	Sin EIA	Goldcorp y Teck	Nueva Unión	Antofagasta	740	-
2023	Factibilidad detenida	Capstone Mining	Santo Domingo	Antofagasta	30	400
2024	Factibilidad	AMSA	Desarrollo minera Centinela- Etapa 2	Antofagasta	-	1.650 (5)
2025	Sin EIA	Freeport McMoran	El Abra Mill Project	Antofagasta	500	-

El uso de agua de mar desalinizada o agua de mar sin desalinizar dependerá de las características geológicas y propiedades superficiales que presente el mineral obtenido en cada yacimiento y en cada faena minera, además de las condiciones que presente el agua a extraer tales como temperatura y otros parámetros físico-químicos, por lo que hay mineras que no necesitan desalar el agua marina que utilizan.

Por otro lado se debe considerar que el uso de plantas desalinizadoras de agua de mar para el suministro de los procesos mineros conlleva un potencial riesgo sobre la calidad de agua en los cursos superficiales y/o subterráneos, no es solo el factor de salinidad propia del agua marina, sino también de sus diferentes componentes químicos. Adicionalmente, las aguas descartadas y residuales de este proceso podrían afectar a largo plazo el medio ambiente marino.

Además, las faenas que utilicen este recurso deben contar con una infraestructura necesaria para resistir la salinidad contenida en el agua de mar, por tanto, es motivo de evaluación técnica y económica si en mineras antiguas es viable reemplazar el equipamiento por uno que resista la corrosión marina.

5.2.1. Sistemas de desalación

Con respecto a aquellas plantas destinadas al uso de agua marina que ocupan procesos para la desalación de agua, existen tres grandes categorías en las que se pueden clasificar básicamente los diversos mecanismos útiles para llevar a cabo esta faena:

- ❖ Desalinización por destilación.
- ❖ Desalinización por congelación.
- ❖ Desalinización a través de membranas.

Es preciso recalcar que el procedimiento al que se somete el agua de mar para su utilización de forma desalinizada en la minería consta de al menos cinco etapas explicadas a muy grueso modo: captación y extracción del agua de mar, pre tratamiento para extraer agentes sólidos o líquidos ajenos al agua marina que afectan negativamente al proceso, técnica de desalinización del agua de mar para obtener agua dulce, post tratamiento para remineralizar el agua obtenida para usarse con diferentes motivos, transporte del agua dulce al lugar donde se utilizará.

Básicamente, la desalinización por destilación consiste en someter a calor al agua de mar para lograr la evaporación del agua contenida, luego el vapor obtenido se enfría y condensa a través de corrientes de baja temperatura y obteniéndose así agua dulce. Este mecanismo es simple y requiere un bajo costo, pero también presenta un bajo rendimiento de conversión de agua dulce, lo que no soluciona la demanda hídrica que requiere la industria.

La desalinización por congelación se basa en congelar parcialmente el agua de mar, en esta condición los cristales formados flotan encima del agua de mar restante y es posible separar mecánicamente los cristales de agua de los cristales de sal. Esta técnica requiere menor energía que la destilación, pero no presenta una efectividad completa y no asegura obtener un agua completamente dulce debido a que la salmuera tiende a adherirse a los cristales de agua dulce.

Para fines mineros que requieren un grueso caudal para satisfacer las altas demandas de agua que reclaman los índices de producción que se manejan, además de un nivel considerable de efectividad y limpieza en el proceso para obtener agua desalinizada, son pocos los mecanismos que están a la altura de la exigencia y costos que necesita la industria minera.

Hoy en día, la mayoría de las plantas desaladoras, no solo relacionadas con la minería del cobre sino que a nivel mundial y para diversos fines, usan la técnica de osmosis inversa para lograr su objetivo debido a la efectividad que presenta en la remoción de agentes contenidos en el agua marina no deseados en el procesamiento mineral y a su menor consumo energético comparado con otra técnicas similares, estimándose su consumo eléctrico cercano a 3,4 [kWh/m³]. ^[7]

Esta técnica consiste resumidamente en un proceso industrial que permite separar la sal y otros elementos contaminantes del recurso hídrico, transformándola en agua apta para diferentes usos productivos incluido el consumo humano. Su funcionamiento se basa en hacer pasar el agua de mar, aplicando una fuerte presión, a través de grandes tubos filtrantes con membranas semi permeables lo que impide el paso de la gran mayoría de sales disueltas en el agua salobre, pero permitiendo el paso del agua misma, lo que genera dos productos, una solución de salmuera muy concentrada formada por las sales que constituían el agua de mar y una solución de agua dulce. La efectividad de este mecanismo depende de las condiciones de concentración salina que presente el agua de mar, de la presión que se aplique sobre el agua marina y de la permeabilidad de la membrana.

Entre las grandes ventajas que ofrece esta alternativa hídrica se cuenta que la fuente marina ofrece independencia de los conflictos y la competencia del agua continental con otros actores, además de ser una opción segura ante las variaciones climáticas que se han vivido y que se espera sigan presentándose en el futuro quizás con mayor agresividad.

Sobre los factores limitantes que aparecen junto a la desalinización no deja de ser importante el consumo energético, que a pesar de ser inferior con respecto a otras técnicas de desalinización y que el costo de la tecnología ha bajado durante los últimos años, sigue siendo una solución cara para enfrentar la crisis hídrica. Se requiere de mucha electricidad para realizar el proceso de desalinización del agua de mar, pero aún más para la etapa de la impulsión del agua desde el borde costero hasta las faenas mineras sumado al costo de

infraestructura necesaria, algunas de ellas en zonas cordilleranas a una altitud de más de 3.000 m.s.n.m., si a esto se suma un escenario energético restrictivo en el cual la electricidad también es un insumo escaso en la minería nacional, el problema se vuelve más complicado. Justamente para las mineras que se ubican a gran altitud sobre el nivel del mar y a mayor distancia de la costa se ha estimado que el costo del transporte del agua desalinizada alcanzaría 14 [kWh/m³] ^[7] llegando a cinco dólares por cada metro cúbico de agua tratada, lo que en el global significa hasta un 8% del costo total en la producción de una compañía minera ^[42]. Este enorme gasto operacional es una condición más para repensar la viabilidad económica del uso de agua de mar en algún yacimiento en particular.

En el último período han aparecido importantes proyectos de uso de agua de mar en la minería y se espera la construcción de más de una decena de plantas desaladoras para la próxima década, entre las más destacables debido a su envergadura están la de Radomiro Tomic perteneciente a CODELCO, Distrito Minero Centinela de Antofagasta Minerals, y Spence de BHP Billiton.

Otro factor negativo sobre la alternativa de agua desalada para la minería es que hoy no existe una normativa única que regule la instalación y operación de las plantas desalinizadoras, sino que hay al menos seis diferentes de éstas que se superponen entre sí obstaculizando la ejecución y puesta en marcha de este tipo de proyectos. Una regulación ordenada y una coordinación efectiva entre las partes involucradas constituirían una importante ayuda en la reducción de costos y aumento de productividad en la industria.

Hoy en día, la meta en la expansión de las plantas desaladoras es lograr una mayor competitividad, que sean menos contaminantes y que aumenten su eficiencia energética basándose en dos variables, una para reducir el consumo de electricidad en sus operaciones quizás migrando poco a poco a fuentes de energía renovables y la otra aumentar el factor de conversión, lo que significa devolver la menor cantidad posible de salmuera al mar producida en la desalinización por cada metro cúbico que se extrae de agua marina.

5.2.2. Uso directo de agua de mar

A pesar de la denominación de la utilización del agua de mar directa manteniendo su contenido salino, ésta requiere de un proceso de pre tratamiento básico de filtración que

consiste en remover el material particulado orgánico e inorgánico del fluido tales como arena, aceite, plancton y algas, entre otras para poder usarse de manera óptima en el proceso minero. Luego, el transporte de estas aguas claras hasta los centros mineros donde se utilizará requiere de infraestructura y ductos capaces de soportar el ataque corrosivo y las incrustaciones de las sales disueltas en el agua de mar.

La Mina Michilla en la región de Antofagasta fue pionera en los años noventa en el uso de agua de mar directo en sus procesos de lixiviación y aglomeración para procesar minerales oxidados y producir cátodos basando todas sus operaciones en la utilización de agua marina por medio de un sistema de impulsión. La gran ventaja de este ejemplo es que Michilla no ocupa recursos hídricos continentales disminuyendo así su impacto ambiental al evitar la extracción desde acuíferos y fuentes superficiales necesarios para el sustento de las comunidades.

Las desventajas del uso de agua marina en todas sus variantes sigue siendo el inmenso costo energético que significa transportar el insumo desde la costa marina hasta las alturas donde se encuentre ubicada la faena minera y su correspondiente distancia. Hoy en día el costo de la impulsión del agua de mar extraída hasta el lugar donde se utilizará en el proceso metalúrgico en sí, representa el 80% del costo total del uso de agua de mar en la minería.^[7]

El empleo de agua de mar en etapas de procesamiento tiene otras desventajas al generar altas concentraciones de cloro en las soluciones que se manejan. Para mantener los niveles de concentración de cloro aceptables se requiere descartar el electrolito y compensar en el circuito agregando agua dulce o desmineralizada proveniente desde fuentes de agua dulce o plantas desalinizadoras. Además, se debe considerar el aumento en el consumo de ciertos insumos como la cal o las bolas de molienda, así como un envejecimiento anticipado de los equipos y la maquinaria que esté en contacto con el agua marina debido a su contenido de sales. Como alternativa se baraja la inversión en equipamiento minero fabricado con materiales que sean resistentes a la corrosión, de cualquier manera, la utilización de agua de origen oceánico significa un costo operacional considerable.

Complementario a esta tendencia es posible encontrar estudios cuyos resultados se sitúan en un lugar intermedio entre la utilización de agua de mar directa y el agua de mar desalinizada. Se ha descubierto empíricamente que las pérdidas minerales que ocasiona el agua de mar no

se deberían exclusivamente a su salinidad, sino que a iones mayoritarios presentes en el agua de mar como es el caso de los iones magnesio y calcio que abundan en el mar, la infinidad de otras sales disueltas en el océano no revisten dificultades para el procesamiento metalúrgico de los minerales de cobre, pero sí, estos dos agentes mencionados. Es decir, que al retirar solamente los iones de magnesio y de calcio del agua de mar, ésta última presentaría recuperaciones minerales similares que al utilizar agua dulce en el procesamiento de la minería del cobre. ^[46]

Esta condición ha sido probada y confirmada en dependencias de la Universidad De Concepción ^{[14][46]} y por académicos de esta institución relacionados al área, lo que significaría un avance muy importante en el ahorro de energía asociada al tratamiento de aguas marinas en las plantas desaladoras y representaría una disminución en el gasto operacional de una compañía que utilice agua de mar. La razón por la que esta herramienta no se aprovecha hoy a escala industrial se debe básicamente al desconocimiento de esta situación, al temor de introducir procesos y tecnologías nuevas, y al hecho de que la inversión para la instalación de plantas desaladoras ya se ha realizado.

5.3. Supresión de polvos

Dentro del consumo hídrico dentro del área Otros, un porcentaje importante de ésta se utiliza en el área del yacimiento para regar continuamente los caminos y rutas que siguen los camiones de gran tonelaje, maquinaria pesada y otros tipos de vehículos a fin de evitar que el polvo del que están hechos estos caminos se disperse en el aire y afecte negativamente la operación.

El polvo es un elemento natural presente en toda operación minera y que se genera en grandes cantidades, no es posible evitar su presencia en los caminos transitables existentes al interior de la mina, pero se vuelve de suma importancia controlar su comportamiento para prevenir que se levante del suelo y se disperse por el ambiente. Esta situación repercute en la calidad del trabajo realizado en la faena, disminuye la visibilidad del camino, afecta la salud de los trabajadores a través de enfermedades oculares, respiratorias y pulmonares muy peligrosas, además de afectar a las comunidades cercanas al yacimiento con el polvo que es arrastrado por el viento. Debido a esta problemática es que existe necesidad de encontrar una solución que impida que el polvo se disperse, hoy en día se utiliza un caudal importante de agua para regar constantemente los

caminos mediante camiones aljibe y cumplir esta función, pero se barajan alternativas que respondan de mejor manera al caso y así optimizar la utilización del recurso hídrico muy escaso además de disminuir costos debido al alto costo que tiene el agua en el norte.

La innovación tecnológica del área se relaciona a la adaptación del producto supresor del polvo a las características del suelo y del agua en cada faena, y los equipos a la realidad del territorio específico; desarrollos en la gestión de los caminos, control de las tasas de riego y optimización en el uso del supresor, del agua y de los equipos involucrados. Las condiciones del Desierto de Atacama entregan suelos y aguas muy ácidas, y temperaturas extremas por lo que el producto a considerar debe sortear estas variables. Un insumo apropiado para la mitigación en la dispersión del polvo puede tener variadas repercusiones, como una notoria reducción del agua utilizada para el riego de los caminos, disminución del riesgo de accidentes en los caminos mineros otorgando seguridad en la operación, y un aumento en la eficiencia de los neumáticos de los vehículos mineros aumentando su vida útil. ^{[21][54]}

De los muchos supresores de polvo que pueden encontrarse en el mercado, hay tres tipos de éstos que cumplen con las condiciones y beneficios descritos en el párrafo anterior. El primero es una emulsión bituminosa a base de crudo de petróleo derivado de hidrocarburos. Su mecanismo consiste en mezclar esta emulsión con agua y regarla sobre los caminos con un camión aljibe, las altas temperaturas del ambiente minero provocarán la evaporación del agua que la separan de la emulsión, el material restante formará una carpeta en los suelos que atraparán a las partículas de polvo evitando que se dispersen y dejando una textura lisa pero no resbaladiza en la ruta de la faena facilitando el traslado de vehículos. Se han encontrado casos de mineras que logran captar hasta un 94% del polvo y un ahorro cercano al 90% del agua en los caminos usando esta alternativa.

El segundo tipo de supresor es la conocida bischofita, una sal que se consigue por evaporación en el Desierto de Atacama y está compuesta en un 97% por cloruro de magnesio hexahidratado $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ y el 3% restante lo constituyen otras sales. Esta sustancia se mezcla con agua y se aplica de igual forma que la alternativa anterior. Tiene la propiedad de absorber la humedad del ambiente lo que reduce la tasa de evaporación del agua. Además, es capaz de unir molecularmente a las partículas finas del polvo haciendo un solo conjunto unificado evitando que el tráfico vehicular levante polvo. Esta alternativa es capaz de reducir sobre el 80% de las

concentraciones ambientales de polvo emitido en condiciones naturales y más del 90% del agua utilizada en este segmento.

También están los llamados polímeros naturales, supresores de polvo derivados de materiales naturales que pueden absorber la humedad ambiental durante un período prolongado de tiempo, así esta humedad percola y se introduce en la superficie de los suelos aglomerando a las partículas de polvo. La sustancia se mezcla con agua y se riega sobre la superficie de las rutas mineras logrando una captación entre 70% y 80% del polvo emitido en condición normales y una disminución de al menos el 90% del agua utilizada en el regadío de caminos lo que significa un importante beneficio en el consumo hídrico del rubro.

5.4. Optimización de relaves

Los grandes volúmenes de relaves que se obtienen en el proceso de flotación del mineral tratado, compuesto principalmente por material sólido molido, agua, minerales de ganga y reactivos utilizados en las etapas anteriores, también es posible encontrar concentraciones de metales pesados como mercurio, plomo, cobre, níquel y metaloides como el arsénico. Esta gran cantidad de material se depositan en forma habitual en grandes tranques delimitados por muros de contención que ocupan una extensión considerable para lograr la separación del material sólido y contaminantes del material líquido por decantación pudiéndose formar una laguna de aguas claras, así se facilitarían la extracción del agua desde la capa superior del volumen y se reinyectaría al proceso minero, aunque mucha del agua contenida inicialmente en el relave se pierde por evaporación al ambiente. Hoy en día, existen varios sistemas de recuperación de aguas contenidas en los relaves como por ejemplo a través de espesamientos o filtración de éstos que permitirían optimizar la recuperación del recurso a los distintos procesos metalúrgicos de la faena minera y a la vez disminuir la contaminación a raíz de infiltraciones de sustancias tóxicas a las napas subterráneas. ^{[34][37][40][45][56]}

Debido a las grandes dimensiones de los relaves, en cualquier compañía minera el costo asociado a su tratamiento y manejo será muy elevado, las empresas planean la ubicación del tranque lo más cercano a la planta de concentración para disminuir el costo de transporte del material y del agua recuperable. Además, se ha probado la técnica de depósito inclinado en los tranques de relave optimizando la disposición del material, que provoca la sedimentación del

material sólido y más denso en un extremo del tranque, y la contención como sobrenadante del agua en el otro extremo formando verdaderas lagunas de aguas claras dentro del depósito facilitando su extracción. Pero esta técnica aún es motivo de estudio en Chile debido a que existen dudas sobre la seguridad de este tipo de depósitos a escala industrial en zonas sísmicas. [7]

Algunas de las alternativas que más fuerza han tomado sobre el manejo hídrico óptimo de los relaves mineros es el consistente en el espesamiento y filtración previo del relave antes de su depositación en el tranque ^{[40][45]}, estas técnicas podrían disminuir a gran escala el agua contenida en los relaves de manera más eficiente que hacerlo una vez depositado en el tranque y disminuir las pérdidas por evaporación en estos mismos.

Luego de la etapa de flotación, el flujo de descarte se hace pasar por un proceso de espesamiento en espesadores de gran capacidad y altura que va de los 15 a 20 [m] que lograrían disminuir hasta en ocho puntos porcentuales el contenido de agua en el relave, así es como se consigue un relave espesado o en pasta. Luego, algunas técnicas dan un paso más allá llevando el relave espesado a una etapa batch de filtración en la que puede usarse presión con grandes placas verticales y medios filtrantes como mallas y telas con una posible etapa de soplado posterior para entregar un queque solo con humedad residual. Una sola unidad de filtrado podría ser capaz de extraer hasta 9.300 [m³/día] de agua desde los relaves espesados generando un queque hiperconcentrado con hasta 15% de humedad ^[40], índice bastante inferior a lo que se maneja de manera tradicional y optimizando notablemente el recurso hídrico. El agua colectada en las etapas de espesamiento y filtración del relave son almacenadas en estanques para ser devueltas a etapas de concentración y al proceso productivo del cobre aumentando la tasa de recirculación de la faena y utilizando de mejor manera el recurso.

Una de las características importantes de la filtración de relaves está en el área que se necesita para filtrar con placas verticales el inmenso volumen de material que se maneja en la minería del cobre, actualmente se consideran áreas de filtración superiores a los 2.000 [m²]. Entre las ventajas de extraer toda el agua posible antes de la depositación del relave está el incremento en la recuperación de agua para ser recirculada a la línea de procesos de hasta un 50% con respecto a tranques convencionales, además de extender la vida útil del tranque, reducir el riesgo de contaminación de las napas y capas subterráneas por infiltración, disminución del área requerida

para la ubicación del depósito optimizando el uso del suelo, mayor estabilidad de los depósitos de relave, y menor energía involucrada en el bombeo de agua remanente. La Minera Centinela, de Antofagasta Minerals, se destaca por la implementación de la tecnología para espesar sus relaves a gran escala, siendo uno de los pioneros en incorporar esta mejora. Otros casos exitosos en la utilización de esta técnica son Collahuasi, Minera Esperanza, Planta Delta y Minera Las Cenizas.

La tecnología de espesamiento de relaves es relativamente nueva por lo que aún quedan aspectos por resolver como alcanzar la proporción justa de sólido y líquido en el relave que permita tanto su transporte eficiente como la máxima recuperación de agua, pero muchas corrientes dentro del ambiente minero señalan que la filtración de relaves debiera ser el futuro de la minería en cuanto al tratamiento de estos flujos debido a los beneficios que ofrece. Sin embargo, la gran dificultad para integrar esta técnica en faenas actualmente en operación radica en el número de modificaciones que se deben hacer en el proceso operativo para adaptarlo a la nueva técnica sumado al gran costo de inversión en la construcción de espesadores de gran tamaño y en extensas superficies de filtrado, por lo que es una alternativa pensada en mayor medida para faenas mineras en proyección o en ampliaciones de gran magnitud.

5.5. Tratamiento de aguas residuales

Debido a que en los procesos de una faena la cantidad de efluentes líquidos que ésta genera es proporcional a la cantidad de agua que se utiliza, es que los conceptos de reutilización y reciclaje del recurso adquieren mayor valor pues se reduce el volumen de efluente generado y se gana en abastecimiento hídrico. En la actualidad existe una variada carpeta de procesos, tecnologías, métodos para el tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales, los cuales se van actualizando, ampliando y volviéndose cada vez más eficientes con el pasar del tiempo.

El tratamiento de las aguas residuales mineras implica devolverle las características necesarias a ésta para ser reutilizada en el mismo proceso industrial de donde fue generada, o en otros procesos diferentes pero aun dentro del proceso minero. La dificultad del tratamiento elegido para tratar estos caudales tendrá estrecha relación con el grado de impurezas o contaminación que presente el agua, mientras peor sea la calidad del agua a tratar y mayor sea la pureza necesaria a alcanzar según el proceso de destino, más complejo tendrá que ser el proceso de

purificación y por lo tanto, más costoso; sumado a esto, el volumen de aguas residuales que se quiera tratar y la concentración de los elementos contaminantes presentes. Algunas complicaciones que presentan las aguas residuales y que deben ser tratadas son concentraciones altas de metales disueltos como plomo, cobre, hierro, arsénico, mercurio y cadmio, entre otros. También un pH extremo que esté fuera de las normas ambientales establecidas o de los requerimientos del proceso, concentraciones de material sólido suspendido fuera de las normas establecidas, y contenido bacteriológico proveniente de efluentes domésticos.

Muchas veces la calidad necesaria que debe tener el agua para reintroducirse al proceso es bastante menor a lo que se conoce como agua potable, ya que el destino del líquido es netamente industrial, la rigurosidad en la condición final del agua tratada solo debe bastar con no ser desventajosa para el proceso, esta concepción permite a la industria minera ampliar su abanico de opciones en esta área y acceder a tecnologías menos costosas.

Entre los métodos que se consideran en el ámbito minero sobre el procesamiento de sus efluentes residuales priman aquellos de tratamiento activo, que necesitan de la operación directa del hombre. Por cierto, una compañía minera puede necesitar no solo un proceso de depuración sino una combinación de técnicas disponibles que le permitan extraer los agentes contaminantes del agua que utiliza de acuerdo a las características de su actividad. Algunas de las tecnologías más reconocidas en el ámbito minero para esta labor son hidrociclones, centrífugas, sedimentadores, filtros de membrana y filtros perpendiculares, usando técnicas como la mencionada osmosis inversa, neutralización y precipitación, filtración, aereación, intercambio químico y ablandamiento químico, entre otras.

Las aguas residuales se observan como un manantial hídrico abundante y accesible para satisfacer la demanda actual y futura de la minería, y ya hay en tramitación un proyecto de ley desde 2014 que intenta facilitar la utilización de aguas grises en la industria (básicamente aguas de origen doméstico, excluyendo aguas negras), privilegiando el uso de aguas servidas tratadas a disposición de la minería y la agricultura, aunque para este objetivo se debe trabajar en la infraestructura sanitaria para la separación de aguas grises de las aguas negras, algo que hoy no sucede.

Sin embargo, más que una cuestión normativa o logística, la gran limitante para su uso es cultural, y hoy en día la cifra de reutilización de este tipo de efluentes es muy bajo. En todo el

territorio nacional existen 283 plantas que tratan el agua servida, pero tan solo el 3,6% del volumen total es reutilizado en distintas actividades sin importar su tipo, un importante número de estas plantas luego de procesar y purificar el agua, la vierten al océano, desaprovechándose un enorme potencial hídrico que alcanzaría, según estimaciones, a 8.000 [m³/s] de agua desperdiciada y que bien podrían utilizarse en la minería del cobre u otras áreas, considerando que la tecnología existe y ya está incorporada al tratamiento, se podría llegar incluso a un 98% de reutilización de todas las aguas servidas. Esto hace pensar fuertemente en que las aguas residuales podrían ser una de las soluciones que busca la minería para satisfacer su demanda hídrica.

En este sentido se destaca la experiencia de minera Candelaria, que ha adoptado el reúso de aguas residuales para abastecer a su línea de procesos supliendo el 3% de su demanda de agua desde las aguas servidas. También hay muchos casos exitosos en Australia, un país minero, Israel y España entre otros. ^[47]

5.6. Carretera hídrica

Esta alternativa que busca aumentar la oferta hídrica en sectores donde escasea el recurso se fundamenta en la distribución hidrológica irregular que presenta el territorio nacional. Mientras en la mitad sur de Chile la presencia de agua dulce se observa de manera muy abundante en ríos de gran caudal, extensos lagos, lagunas y otros cuerpos de agua, altas tasas de precipitación anual, la mitad norte presenta una realidad totalmente opuesta en donde la cantidad disponible de recursos hídricos apenas sí alcanza para la subsistencia de la población y la vida adaptada a la desértica condición de las regiones nortinas.

La escasez hídrica en la región de Antofagasta ha sido desde siempre un obstáculo a superar, pero la situación parece profundizarse debido a los últimos cambios climáticos, aumento en la duración de las sequías, una mayor demanda para consumo humano y otras actividades, y un manejo irresponsable del agua disponible. Los reportes pluviométricos informan que el promedio de lluvias registrado hasta el mes de marzo de 2019, entre Antofagasta y Los Andes, presenta un déficit del 100% en comparación con los índices recabados entre los años 1981 y 2010 ^[35]. El Ministerio de Obras Públicas a través de la DGA ha decretado zonas de restricción y de prohibición de aprovechamiento de derechos de agua debido a síntomas de agotamiento de

reservas superficiales. Esta es la misma problemática que debe superar cualquier actividad económica que se realice en estas regiones, incluyendo a las empresas mineras y del cobre en específico, ubicadas densamente en estas zonas, por lo que deben estar en constante búsqueda de nuevas y seguras fuentes de abastecimiento hídrico.

Hoy en día se han levantado algunas propuestas alternativas respecto al traslado de grandes caudales de agua dulce desde ríos en las regiones del centro y sur del país hasta las zonas del norte. Una de ellas, Aquatacama, de la compañía francesa Via Marina fue enviada durante el 2018 al Sistema de Concesiones del MOP para el estudio de su realización, significa un ambicioso proyecto que contempla la construcción de una carretera hídrica submarina que circule junto a la costa de Chile para trasladar una fracción del agua dulce proveniente de las desembocaduras de los ríos Bío Bío, Maule y Rapel en las regiones centrales del país. Una tubería depositada en el lecho marino junto a la costa llevaría el valioso recurso a las regiones de Valparaíso, Coquimbo, Atacama y Antofagasta para sustentar la demanda hídrica de los asentamientos humanos en los distintos valles de estas áreas, así como para el desarrollo de actividades productivas como la agricultura y la minería. El proyecto contempla un recorrido de más de 2.000 [km] de sur a norte llevando un caudal hídrico de 4,15 [m^3/s], además de una inversión de US\$ 8.082 millones y una demanda energética de 0,75 [kWh/m^3] ^[44]. Existen además otros proyectos del mismo ámbito que están pronto a presentarse.

Algunas de las grandes desventajas de esta alternativa para la demanda hídrica minera sería el aporte inferior de caudal para la minería en desmedro del consumo de otras actividades económicas, aun así se consideraría un aporte en la oferta hídrica de la industria minera, por otro lado aparecen el consumo energético que representan, las barreras legales que deben sobrellevar para su ejecución y por sobre todo el juicio social relacionado al impacto ambiental que podría significar.

5.7. Recarga Artificial de acuíferos

A pesar de lo que se ha comentado anteriormente y numeradas ocasiones sobre la escasez hídrica en el Desierto de Atacama, en el norte del país cada año se presenta el fenómeno del invierno andino paradójicamente durante la época de verano en el hemisferio sur, entre los meses de

diciembre y marzo, aproximadamente. Este fenómeno conlleva un gran flujo de precipitaciones que producen crecidas en los ríos que escurren hasta el océano sin poder ser aprovechadas.

Esta alternativa consiste en que las empresas mineras localicen zonas geológicas que sirvan para ser utilizadas como reservorios naturales subterráneos de agua dulce en épocas cuando el recurso abunde, como el invierno andino, para ser utilizadas en temporadas de escasez después de períodos extensos.

Además de un posible incremento en la oferta hídrica en el Norte Grande, esta alternativa ofrece una amortiguación de los efectos destructivos que provoca este fenómeno climático en asentamientos humanos y actividades productivas, conteniendo gran parte del caudal precipitado en estos reservorios naturales.

A pesar de que ya existen ciertas compañías mineras que utilizan desde hace años esta alternativa no se ha masificado, y arrastra una incierta estabilidad, debido a la imposibilidad de predecir la disponibilidad y cantidad con que se presentará cada año sin tener certeza de las condiciones climáticas ^[7]. Además se debe tener en cuenta la cantidad de material sólido y escombros que puedan acompañar el volumen de agua recolectado en los reservorios. Esta alternativa aún se encuentra en un estado de desarrollo incipiente y es necesario desarrollar con mayor amplitud las tecnologías y temáticas asociadas a esta alternativa para posicionarse con propiedad como una opción válida que satisfaga la demanda hídrica de la industria minera nacional y evitar una utilización inadecuada del recurso.

CAPÍTULO 6 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Chile, aun siendo una nación que posee abundantes recursos hídricos contando con innumerables lagos, ríos y cuerpos de agua, además del aporte de precipitaciones, ha presentado en los últimos años fuertes problemáticas de escasez de agua para el consumo humano, para el suministro de actividades de subsistencia y el desarrollo del área productiva e industrial. Ésta situación ha sido causada principalmente debido a la distribución irregular que presentan los recursos hídricos dentro del territorio nacional, encontrándose zonas de excesiva abundancia como el sur del país y zonas de profunda aridez como el Desierto de Atacama en el extremo norte del territorio. También se suman otros factores como las condiciones climáticas adversas que han ofrecido menores tasas de precipitaciones favoreciendo las sequías y un manejo deficiente y poco responsable sobre el valioso recurso.

Según los reportes de SONAMI, la minería nacional en su conjunto extrajo durante 2017 un caudal de 18,1 [m³/s] de recursos hídricos, de los cuales 82% tienen su origen en fuentes continentales y 18% en fuentes marinas.

Desde las informaciones recopiladas por COCHILCO, la industria del cobre es por lejos el sector minero que más agua consume, alcanzando en 2017 una demanda de 16,4 [m³/s] que se distribuye en aguas continentales con un 80,8% y aguas oceánicas con un 19,2% de este volumen. Además, la tasa de recirculación de la industria alcanza un 70%.

La industria minera y la industria del cobre en específico han tomado medidas a la situación de estrechez hídrica actual y sumado iniciativas para encontrar alternativas que permitan disminuir las tasas de consumo en el proceso, o bien, aumentar la oferta de agua para el requerimiento creciente. Durante los últimos años las tasas de recirculación han aumentado sostenidamente, pasando de 68% en 2012 a 76% en 2017, solo en el área concentradora. También se ha visto una mayor eficiencia en la utilización del agua, reducción en las pérdidas del recurso, de la misma forma han descendido los consumos unitarios por procesos por tonelada procesada, el área hidrometalúrgica ha mantenido su tasa de consumo unitario cercano a 0,1 [m³/s] mientras que en Concentración el mismo ítem pasó de 0,69 [m³/s] en 2010 a 0,45 [m³/s] en 2017. En la actualidad hay muchos ejemplos exitosos en que las mineras del ámbito cuprífero han incursionado en nuevas tecnologías y alternativas que permiten optimizar el uso del recurso disponible o aumentar la oferta de agua al servicio del sector, lo que

denota la preocupación activa que se ha tomado en vías de una sustentabilidad hídrica. De la misma manera, el sector tiene el importante desafío de minimizar el volumen de efluentes nocivos para el medio ambiente y el riesgo de contaminación de los cursos de aguas como consecuencia de sus procesos productivos.

Se espera que la demanda hídrica aumente en el futuro cercano debido al envejecimiento de los yacimientos, la disminución de las leyes de cobre, el incremento de la producción y el aumento de la hegemonía de los minerales de cobre sulfurados que involucran una utilización más intensiva de recursos hídricos en su procesamiento. El área concentradora dentro de la faena es la que consume mayores recursos hídricos, hecho que será más notorio en el mediano plazo debido a lo ya comentado. El área hidrometalúrgica en cambio, seguirá siendo la tercera área de mayor consumo de recursos hídricos dentro del rubro cobre en la próxima década, detrás de Concentración y Otros, consecuencia del menor procesamiento de minerales oxidados de cobre en el país.

La Región de Antofagasta continúa y continuará manteniendo su posición líder en consumo de recursos hídricos, tanto de fuente continental como de fuente marina, relacionado estrechamente al volumen de producción que ostenta.

Así también, la industria cuprífera muestra una intensa expansión en la utilización de aguas marinas mientras que las aguas continentales viven un estancamiento en su uso con un aumento apenas notorio durante la próxima década, ya sea por propia iniciativa o por factores externos. Según las estimaciones se espera que la demanda de estas últimas aumente 12% para el año 2029, mientras que el agua de origen marino presentaría un incremento del orden de 230% para el mismo año. Hoy en día, el agua de mar representa el 20% de las extracciones hídricas, y se calcula que al final de la próxima década ésta misma represente más del 40% del total en la minería del cobre.

Aún quedan cuestiones que necesitan dedicación y mejora, Chile, a diferencia de otros países referentes, no cuenta con espacios importantes de prueba para la innovación en minería, lo que representa una barrera para el desarrollo de nuevas tecnologías. Tampoco existen estándares unificados de interoperabilidad en el rubro, lo que reduce las posibilidades de intercambio de datos e información sobre la innovación.

Se espera que en los próximos años los índices de eficiencia hídrica nacional continúen mejorando, esto se deduce debido a que las tasas de consumo específico de agua y de recirculación son promedios de la minería nacional del cobre, y todavía son muchas las empresas mineras que no han

adoptado una política sostenible frente al recurso hídrico, por lo que cuando esta fracción de compañías que tienen aún un amplio margen de progreso en este asunto implementen mejores prácticas, los promedios generales aumentarán consecuentemente. Sin embargo, los especialistas aseguran que en los últimos tiempos se han acortado los espacios de mejora acercándose a los límites físicos del ideal de consumo, por lo que de aquí en adelante el margen relacionado al óptimo de eficiencia hídrica se volverá cada vez más pequeño.

Finalmente, con el aporte hídrico de las nuevas plantas proyectadas de desalación y extracción de agua de mar, se cubriría la demanda hídrica de la industria del cobre al menos hasta el 2027 según las estimaciones realizadas. Para eliminar la brecha existente en la demanda del año 2029 de 0,64 [m³/s] se necesitará la ampliación en la extracción de agua marina o en su defecto, conseguir este caudal restante a terceras partes.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Agua en la Minería*. **BETANCOUR, María Cristina**. 443, s.l.: Editec SPA, 16 de Mayo de 2018, Minería Chilena, pág. 47.
- [2] *Agua: Eficiencia y Nuevas Tecnologías*. **Minería Chilena**. 324, s.l.: Editec SPA, 23 de Junio de 2008, Minería Chilena.
- [3] **Banco Mundial, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2011.** *Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*. 2011.
- [4] **CHAPARRO ÁVILA, Eduardo**. Los Procesos Mineros y su Vinculación con el Uso del Agua. *Políticas para el uso sostenible del agua y prestación eficiente de servicios públicos vinculados a ella. Perspectiva desde CEPAL*. Santiago: s.n., Abril de 2009.
- [5] **Comisión Chilena del Cobre**. *Análisis de Variables Claves para la Sustentabilidad de la Minería en Chile*. Cochilco. Santiago: s.n., 2014. ISBN: 978-956-8242-21-3.
- [6] **Comisión Chilena del Cobre**. *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017*. Cochilco. Santiago: s.n., 2018. ISSN: 0716-8462.
- [7] **Comisión Chilena del Cobre. 2008.** *Buenas Prácticas y Uso Eficiente del Agua en la Industria Minera*. 2008. ISBN: 978-956-8242-10-7.
- [8] **Comisión Chilena del Cobre**. *Consumo de Agua en la Minería del Cobre al 2017*. 2018.
- [9] **Comisión Chilena del Cobre**. *Factores Clave para el Desarrollo de la Minería Chilena*. Cochilco. Santiago: s.n., 2015. ISBN: 978-956-8242-23-7.
- [10] **Comisión Chilena del Cobre**. *Gestión del Recurso Hídrico y la Minería en Chile*. 2009.
- [11] **Comisión Chilena del Cobre**. *Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2017-2028*. 2017.
- [12] **Comisión Chilena del Cobre**. *Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2018-2029*. 2018.
- [13] **Comisión Nacional de Productividad**. *Productividad en la Gran Minería del Cobre*. Primera. Santiago: Universitaria S.A., 2017.
- [14] **CONCHA, Fernando**. Agua Para la Minería. *Ciclo de Charla Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería*. Concepción: s.n., 4 de Abril de 2019.
- [15] **Consejo Minero**. *Cifras Actualizadas de la Minería*. 2019.
- [16] **Consejo Minero**. *Industria Minera en 2016*. 2017.

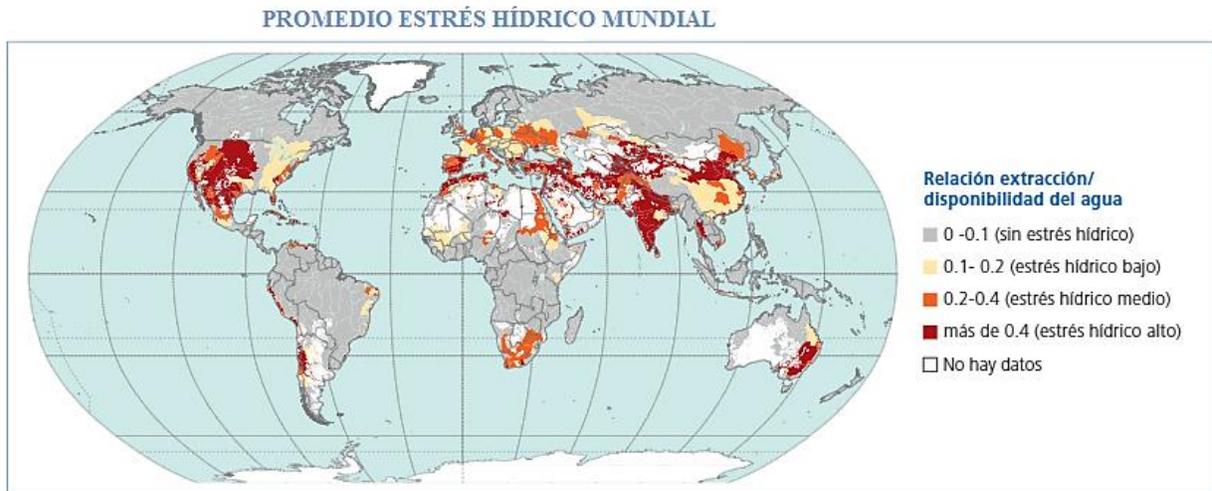
- [17] **Consejo Minero.** *Minería en Números.* 2017.
- [18] **Consejo Minero.** *Proyectos de Inversión de Empresas Socias.* 2019.
- [19] **Consejo Minero.** *Reporte Anual 2017.* 2018.
- [20] **Consejo Minero.** *Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Prácticas.* 2002.
- [21] **Control de Polvo en Minería: Tecnología, Seguridad y Eficiencia.** **HERNÁNDEZ C., Victoria.** [ed.] Marcelo Casares Z. 24, s.l.: Construcción Minera, Junio de 2017, Construcción Minera, págs. 50-55.
- [22] **Corporación Nacional del Cobre.** *Reporte de Sustentabilidad.* 2017.
- [23] **Dirección General de Aguas.** *Atlas del Agua.* Santiago: s.n., 2016. ISBN: 978-956-7970-30-8.
- [24] **Dirección General de Aguas.** *Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. Resumen Ejecutivo.* 2017.
- [25] **Dirección General de Aguas.** *Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. Volumen I.* 2017.
- [26] **Dirección General de Aguas.** *Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. Volumen II.* 2017.
- [27] **Dirección General de Aguas.** *Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. Volumen III.* 2017.
- [28] **Dirección General de Agua.** *Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras.* 2007.
- [29] **DURÁN, Miguel Ángel.** Electro Industria. *Electro Industria.* [En línea] Septiembre de 2014. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2374&edi=121&xit=el-agua%85-un-recurso-estrategico-para-la-mineria>.
- [30] *Eficiencia Hídrica en la Minería: Entre los Límites Físicos y los Nuevos Modelos.* **Minería Chilena.** 416, s.l.: Editec SPA, 4 de Febrero de 2016, Minería Chilena, págs. 58-61.
- [31] **Empresa Nacional de Minería.** *Reporte de Sustentabilidad.* 2017.
- [32] **Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.** *Chile cuida su agua.* 2012.
- [33] **Feria y Congreso Internacional Expomin.** Más del 70% del Agua que Usa la Minería es Reciclada. *Water in Mining.* s.l. : Editec SPA, 24 de Abril de 2018.
- [34] **GALAZ PALMA, Juanita.** *Estado del Arte en la Disposición de Relaves Espesados.* 2011.
- [35] **GONZÁLEZ T., Karen.** Chile se seca: Reportes del MOP dan cuenta del real déficit de agua. *La Tercera.* 14 de Abril de 2019.

- [36] **MENA PATRI, María Pía.** Alternativas de Abastecimiento Desalinización de Aguas. *Seminario Minería y Recursos Hídricos*. 25-27 de Octubre de 2006.
- [37] **Ministerio de Energía y Minas, Perú.** *Guía Ambiental de Manejo de Agua en Operaciones Minero-Metalúrgicas*. Lima: s.n., 2000.
- [38] **National Aeronautics and Space Administration.** Nasa. *Nasa*. [En línea] 2019.
<https://www.nasa.gov/content/water-and-ice>.
- [39] **Oficina de Naciones Unidas de apoyo al Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” 2005-2015.** Agua e industria en la economía verde. *Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC)*. Zaragoza, España: s.n., 2011.
- [40] *Optimizando la Recuperación de Agua desde Relaves.* **PRADO J., Sergio.** 418, s.l.: Editec SPA, 13 de Abril de 2016, Minería Chilena, págs. 195-199.
- [41] **Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.** *Aguas Residuales, El Recurso Desaprovechado*. Paris: s.n., 2017.
- [42] *Plantas Desaladoras: Una Solución con Pros y Contras.* **Minería Chilena.** 450, s.l.: Editec SPA, 8 de Diciembre de 2018, Minería Chilena, págs. 12-18.
- [43] *Plantas Desalinizadoras en la Minería: Alternativas para el Uso del Agua.* **SAAVEDRA L., Alfredo.** [ed.] Alejandro Pavez V. 12, s.l.: Construcción Minera, Junio de 2015, Construcción Minera, págs. 6-15.
- [44] Presentan en la ciudad proyecto de carretera hídrica submarina. *El Mercurio de Antofagasta*. 13 de Mayo de 2019, 40.305, pág. 3.
- [45] *Recuperación del Recurso Hídrico: Tratamiento de Relaves Mineros.* **AVARIA R., Patricia.** [ed.] Marcelo Casares Z. 28, s.l.: Construcción Minera, Abril de 2018, Construcción Minera, págs. 30-34.
- [46] **RIOSECO CERDA, Paula Lorena Del Carmen.** *Estudio del Efecto Aguas Salinas Sobre la Flotación de Especies Puras: Calcocita, Calcopirita, Pirita y Molibdenita*. Concepción : s.n., 2011.
- [47] *Servidas para la Minería.* **Induambiente.** 2018, Induambiente, págs. 44-46.
- [48] **Sociedad Nacional de Minería.** Consumo y Desafíos en el Uso del Agua en la Minería. *Octavo Seminario de Estudiantes de Metalurgia Extractiva, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*. Viña del Mar: s.n., 10 de Agosto de 2018.
- [49] **Sociedad Nacional de Minería.** *Fundamentos y Desafíos para el Desarrollo Minero*. 2017.

- [50] **Sociedad Nacional de Minería.** *Informe Consumo de Agua en Minería 2015.* 2016.
- [51] **Sociedad Nacional de Minería.** *Informe Consumo de Agua en Minería 2016.* 2017.
- [52] **Sociedad Nacional de Minería.** *Informe Consumo de Agua en Minería 2017.* 2018.
- [53] **Sociedad Nacional de Minería.** Proyecto de Ley que Reforma el Código de Aguas. *Presentación ante la Comisión Especial sobre Recursos Hídricos, Desertificación y Sequía del Senado.* Santiago: s.n., 10 de Enero de 2017.
- [54] *Tendencias: Control de Polvo en la Minería.* **SAAVEDRA L., Alfredo.** 2017, Construcción Minera.
- [55] **The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan.** *THE STATE OF THE WORLD'S LAND AND WATER RESOURCES FOR FOOD AND AGRICULTURE.* Nueva York: FAO, 2011. ISBN: 978-1-84971-326-9.
- [56] *Tratamiento de Relaves: Sistemas de Recuperación de Aguas.* **AVARIA R., Patricia.** [ed.] Marcelo Casares Z. 19, s.l.: Construcción Minera, Agosto de 2016, Construcción Minera, págs. 58-61.
- [57] **United Nations World Water Assessment Programme.** *Water and Energy. Volume 1.* Paris: UNESCO CLD, 2014. págs. 22-26, 69-75. ISBN 978-92-3-104259-1.
- [58] **United States Geological Survey.** USGS. [En línea] 2019. <https://www.usgs.gov/>.
- [59] **VIDAL GONZÁLEZ, Alejandro Julián.** Impacto de la Actividad Minera en la Proyección de Generación y Consumo de Energía Eléctrica en Chile. *Memoria de Título.* Concepción: s.n., Noviembre de 2015.

ANEXOS

En este apartado, se entregan figuras, gráficos y tablas que demuestran con mayor detalle la realidad hídrica nacional y dentro de la industria minero-metalúrgica en Chile, además de permitir obtener una visión más acabada sobre el tema.



Nota: La referencia del estrés hídrico mide la relación entre el total anual de las captaciones de agua y el total del suministro renovable anual disponible, que representa el uso consuntivo de aguas arriba. Los valores más altos indican una mayor competencia entre los usuarios.

Figura A.1: Promedio del estrés hídrico mundial según relación captación-disponibilidad.

Fuente: Centro de Investigación de Sistemas Ambientales, Universidad de Kassel (Generado en diciembre de 2014 utilizando el modelo Water-GAP3), sobre la base de Alcamo y otros (2007).

Tabla A.1: Demanda hídrica por sector consumidor y región [m³/s].

Fuente: “Atlas del Agua” / Dirección General de Aguas, 2016.

Macrozona	Región	Agropecuario	Agua Potable	Industrial	Minero	Total [m ³ /s]
Norte	XV	3,71	0,96	0,25	0,00	4,92
	I	5,21	0,69	1,43	1,54	8,87
	II	3,31	1,68	1,29	6,26	12,54
	III	12,03	0,87	0,52	1,90	15,32
	IV	27,19	1,89	0,25	0,71	30,04
Centro	V	42,44	5,82	4,81	1,26	54,33
	RM	82,36	27,41	10,42	0,90	121,09
	VI	97,96	2,41	1,23	1,88	103,48
	VII	166,49	2,53	3,77	0,00	172,79
Sur	VIII	69,44	5,16	9,54	1,21	85,35
	IX	11,51	2,34	0,26	0,00	14,11
	XIV	2,21	1,02	1,63	0,00	4,86
	X	1,10	1,39	2,46	1,50	6,45
Austral	XI	0,64	0,29	0,08	2,60	3,61
	XII	1,12	0,38	5,91	0,23	7,64
		526,72	54,84	43,85	19,99	645,40

Tabla A.2: Demanda hídrica por sector consumidor y región [Mm³/año].

Fuente: “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. Vol. II” / Dirección General de Aguas, 2017.

Región	Nombre	DEMANDA CONSUNTIVA 2015 (Mm ³ /año)							TOTAL
		APU	APR	AGR	PEC	MIN	IND	ELE*	
XV	Arica y Parinacota	12.926	604	73.010	330	571	195	0	87.635
I	Tarapacá	21.698	337	17.087	106	51.534	4.387	0	95.149
II	Antofagasta	38.705	481	46.230	102	151.072	29.563	0	266.153
III	Atacama	17.005	689	140.215	239	39.950	15	0	198.114
IV	Coquimbo	39.496	6.214	462.090	1.470	41.967	4.742	0	555.979
V	Valparaíso	102.003	10.766	672.337	3.378	47.571	16.554	221.370	1.073.979
XIII	Metropolitana	659.893	11.570	1.269.824	18.226	23.442	38.468	37.166	2.058.589
VI	O'Higgins	43.074	28.524	1.723.417	17.479	70.721	12.276	66	1.895.558
VII	Maule	41.848	17.389	2.822.598	4.342	1	33.304	7.709	2.927.192
VIII	Biobío	100.744	12.189	475.978	2.117	31	350.470	194.400	1.135.928
IX	Araucanía	38.322	6.742	172.483	6.195	0	25.822	27.910	277.474
XIV	Los Ríos	16.118	7.316	5.457	7.201	0	75.491	2.640	114.223
X	Los Lagos	31.235	7.349	2.613	9.457	0	137.943	0	188.597
XI	Aysén	5.388	1.332	734	1.337	2.846	1.018	0	12.656
XII	Magallanes y Antártica	10.756	184	2.096	3.157	591	603	4.120	21.506
TOTAL NACIONAL		1.179.209	111.684	7.886.169	75.136	430.296	730.853	495.382	10.908.731

Tabla A.3: Proyección demanda hídrica futura 2030 y 2040 por sector y región [Mm³/año].
Fuente: “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile” / Dirección General de Aguas, 2017.

Región	DEMANDA CONSUNTIVA FUTURA (Mm ³ /año)															
	APU		APR		AGR		PEC		MIN		IND		ELE		TOTAL	
	2030	2040	2030	2040	2030	2040	2030	2040	2030	2040	2030	2040	2030	2040	2030	2040
XV	27.049	35.772	683	694	68.087	63.067	479	555	719	849	255	290	0	0	97.272	101.226
I	29.249	34.387	534	552	17.472	16.933	150	182	48.043	49.368	6.973	8.683	0	0	102.421	110.103
II	44.480	49.085	569	577	42.315	42.395	146	177	99.566	75.990	48.836	59.700	0	0	235.912	227.924
III	18.388	19.465	779	812	189.213	210.312	474	568	48.629	33.543	26	33	0	0	257.508	264.733
IV	47.667	52.123	7.230	7.505	720.118	790.984	2.664	3.198	46.021	40.900	6.629	8.034	0	0	830.328	902.744
V	112.158	117.727	12.207	12.495	736.452	779.568	5.320	6.521	48.169	42.604	19302	20911	169.880	174.115	1.103.489	1.153.939
XIII	772.105	841.915	14.255	15.360	1.216.806	1.253.000	31.696	39.240	26.152	25.649	75.894	99.170	24.895	24.966	2.161.802	2.299.300
VI	47.473	49.418	34.574	36.153	1.838.778	1.954.694	30.105	37.507	75.154	73.960	16.597	18.985	76	80	2.042.757	2.170.798
VII	43.741	46.223	19.914	20.905	2.503.605	2.437.756	4.495	4.609	0	0	50.660	62.628	9.069	8.974	2.631.484	2.581.096
VIII	108.604	112.385	15.812	16.203	432.803	416.301	2.152	1.836	34	32	423.289	544.534	172.530	183.951	1.155.224	1.275.241
IX	41.032	43.437	8.337	8.582	167.521	171.064	6.732	6.135	0	0	47.107	60.444	25.387	19.215	296.116	308.878
XIV	17.273	17.835	16.501	16.974	7.028	8.171	11.871	12.606	0	0	146.189	196.059	2.456	2.358	201.318	254.004
X	34.369	35.977	8.940	9.262	3.173	3.719	17.740	18.121	0	0	186.168	211.415	0	0	250.389	278.494
XI	5.947	6.454	1.389	1.391	488	482	2.482	2.514	971	1.654	1.611	2.010	0	0	12.888	14.505
XII	11.272	11.578	334	312	2.648	2.987	4.254	4.231	643	1.041	788	908	4.964	4.591	24.904	25.648
TOTAL	1.360.806	1.473.779	142.059	147.776	7.946.505	8.151.433	120.761	138.000	394.100	345.590	1.030.325	1.293.804	409.256	418.250	11.403.812	11.968.632

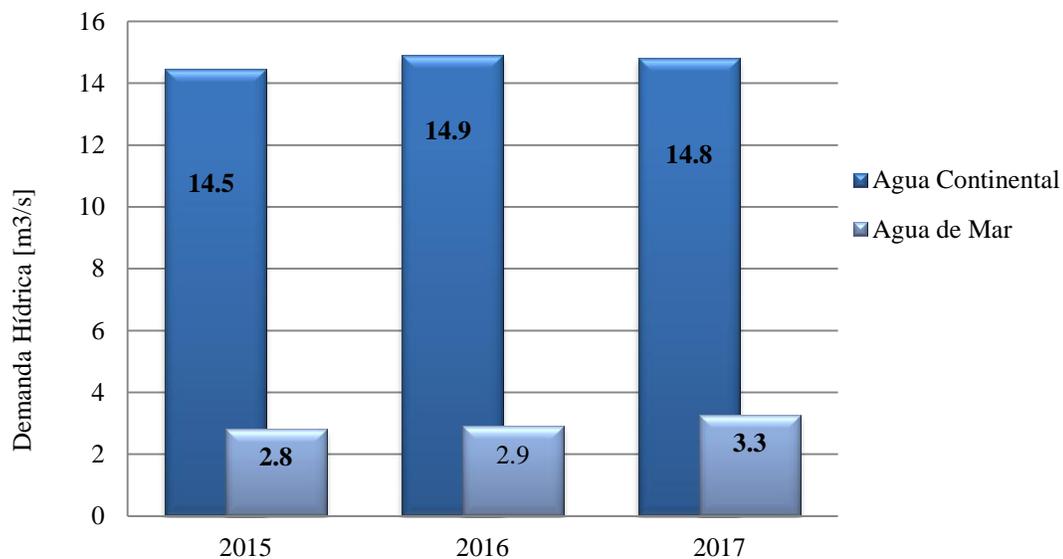


Figura A.2: Evolución demanda aguas continentales y aguas de mar, 2015 - 2017.
Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2015, 2016 y 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.

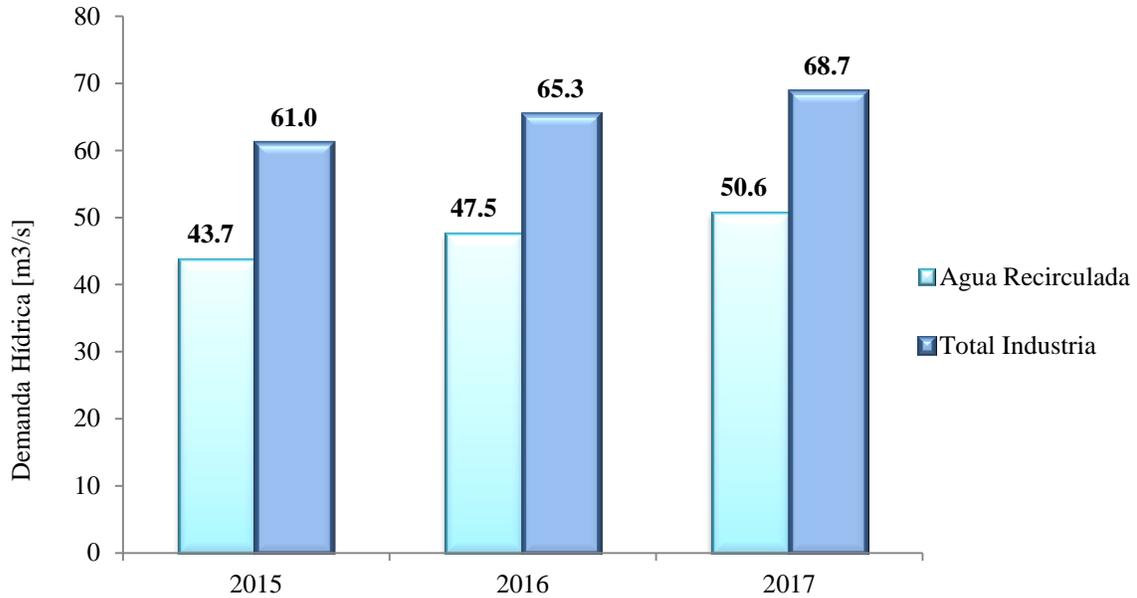


Figura A.3: Demanda hídrica global en la industria minera chilena y la presencia del agua recirculada, 2015 – 2017.

Fuente: Elaboración propia en base a “Informe Consumo de Agua en Minería 2015, 2016 y 2017” / Sociedad Nacional de Minería, 2018.



Figura A.4: Distribución del agua fresca utilizada en la Minería del Cobre por proceso.

Fuente: “Consumo de Agua en la Minería del Cobre al 2017” / Comisión Chilena del Cobre, 2018.

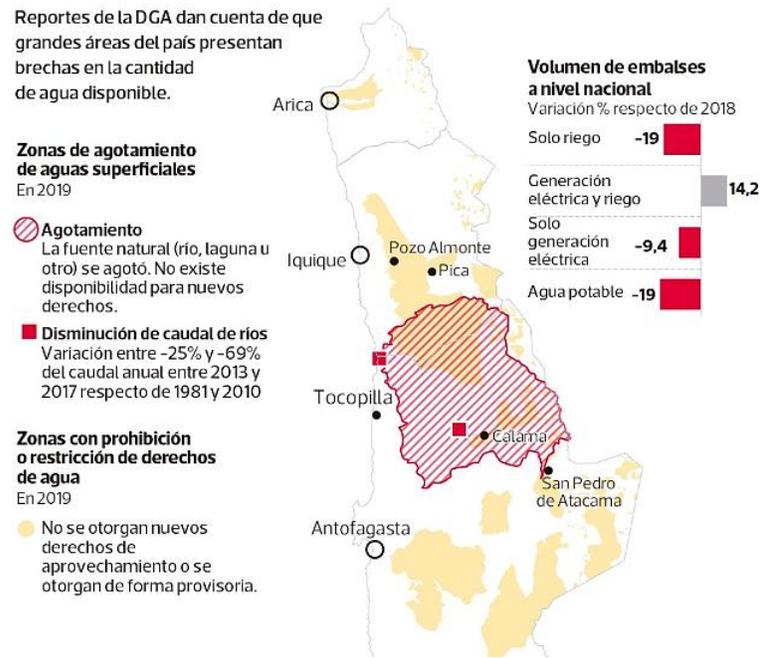


Figura A.5: Mapa de las zonas de agotamiento hídrico en el Norte Grande, Chile.
Fuente: “Chile se seca: reportes del MOP dan cuenta del real déficit de agua.” / Diario La Tercera, 2019.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: DISPONIBILIDAD ACTUAL Y FUTURA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, Y USO EFICIENTE DEL AGUA EN LA MINERÍA CHILENA	
Nombre Memorista: Nicolás Abdiel Navarrete Arratia	
Modalidad	Profesor(es) Patrocinante(s) Prof. Eduardo Balladares V.
Concepto	
Calificación	
Fecha	
Ingeniero Supervisor:	
Institución: Universidad de Concepción	
Prof. ^a Eugenia Araneda H.	
Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Fernando Parada L.	Prof. Froilán Vergara G.
Resumen	
<p>El presente trabajo corresponde a una investigación y recopilación de antecedentes dentro de la minería chilena y con especial atención a la minería del cobre sobre la demanda hídrica actual, de acuerdo a sus diferentes fuentes de origen y distintas áreas de consumo. Además, se analiza la proyección de la misma en el mediano plazo (2018-2029) incluyendo a todas las regiones relacionadas a la minería del cobre en el país.</p> <p>Durante el año 2017, la minería cuprífera alcanzó una demanda de agua de 16,4 [m³/s] clasificados en aguas continentales (81%) y en aguas marinas (19%). La región de Antofagasta se alza como la región minera de mayor consumo demandando 37% del agua dulce y 84% del agua marina en el rubro. El área de Concentración representa el mayor consumo dentro de planta utilizando el 67% del recurso.</p> <p>La proyección de la demanda hasta 2029 indica un alza en el consumo hasta 25,3 [m³/s]: aguas continentales 14,5 [m³/s] (57%), aguas marinas 10,8 [m³/s] (43%).</p> <p>En la vereda de la oferta hídrica, aparecen 12 nuevos proyectos de utilización de agua marina para la minería que satisfarían la demanda de la industria al menos hasta 2027.</p> <p>Con estos resultados se hace necesario seguir ampliando la oferta hídrica para la minería si se quiere cubrir la demanda global hasta el final de la próxima década.</p>	