



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

**ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE FUENTES DE AGUA EN LA ZONA CENTRO-NORTE
DE CHILE: POTENCIAL REÚSO DE AGUAS SERVIDAS EN EL SECTOR AGRÍCOLA Y
MINERO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JORGE FELIPE AMADOR GODOY BRAVO

PROFESORA GUÍA

KATHERINE LIZAMA ALLENDE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ANA LUCIA PRIETO SANTA

ADOLFO OCHOA LLANGATO

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: Jorge Felipe Amador Godoy Bravo
FECHA: Agosto de 2021
PROF. GUÍA: Katherine Lizama Allende**

**ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE FUENTES DE AGUA EN LA ZONA CENTRO-
NORTE DE CHILE: POTENCIAL REÚSO DE AGUAS SERVIDAS TRATADAS EN EL
SECTOR AGRÍCOLA Y MINERO.**

Los mayores usos de agua en la zona centro-norte corresponden a la industria minera y al sector agrícola, y por ende inducen una alta presión hídrica en la zona. Esto ha impulsado la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua y el desarrollo de alternativas de tratamiento. El uso de agua desalada de mar ha sido desarrollada principalmente por la industria minera, mientras que el reúso de aguas residuales figura como potencial fuente, considerando que entre las regiones de Arica y Parinacota y Valparaíso un 70% de las aguas servidas tratadas son destinadas a través de emisarios submarinos, equivalentes a 6.520 L/s. El objetivo de este trabajo es analizar de manera crítica el reúso de aguas servidas y la desalación de agua de mar como fuentes de agua, en cuanto a su calidad, eficiencia de remoción, costos de implementación e impacto socioambiental, enfocándose en la evaluación de factibilidad técnica y económica del reúso de aguas servidas tratadas para el sector agrícola y minero en la zona centro-norte, con fuente de agua las descargas de emisarios submarinos y mediante 3 alternativas de tratamiento secundario: Lodos activados (LA), Biorreactores de membrana (MBR) y Humedales construidos (HC). Se concluyó que en base a los requerimientos de calidad de agua para el uso en el sector agrícola y minero definidos según la norma NCh1333 y en base a la NCh3456 y a la tabla N°1 del D.S.90 respectivamente, los tratamientos que se deberán implementar corresponden a: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario, incluyendo un proceso de filtración para la remoción de contaminantes que pudiesen estar presentes en las aguas servidas según las descargas características del emisario. De la evaluación de los casos de estudio, se identificó como fuentes potenciales de agua las descargas provenientes de los emisarios submarinos La Serena, Coquimbo y Dos Norte con caudales de descarga de 616, 575 y 1.296 L/s para el año 2035. Los sistemas con Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de MBR, son los de mayor costo directo con 1,53, 1,49 y 2,03 USD/m³ para los sistemas de reúso de La Serena, Coquimbo y Dos Norte respectivamente, mientras que los costos de la alternativa de LA: 0,54, 0,51 y 0,75 USD/m³. Sobre el tratamiento mediante HC, estos implican áreas extensas y los costos de uso de terrenos son más de un 50% de la PTAS. En los costos de O&M de la PTAS, los sistemas MBR son los más elevados, obteniéndose valores de 0,22, 0,21 y 0,42 USD/m³, mientras que para LA se obtuvo un 50% de los costos de los sistemas MBR, sin embargo se obtiene un menor espacio requerido, obteniéndose para los 3 sistemas MBR propuestos 1,9 1,8 y 3,7 ha. Los costos directos de transporte tienen una mayor influencia sobre los costos directos totales en 2 de los 3 sistemas, obteniéndose valores de 1,42, 2,18 y 3,63 USD/m³ y con costos en O&M de 0,13, 0,30 y 0,29 USD/m³, siendo la altura final de elevación lo que tiene una mayor influencia sobre este último con 471, 1.062 y 420 metros respectivamente. Se recomienda los sistemas con PTAS mediante LA, ya que cumple con la calidad objetivo para reúso en el sector agrícola y minero al complementarse con tratamientos terciarios y siendo también la alternativa con menores costos de implementación.

Dedicatoria

A todos y todas que alguna vez no han encontrado rumbo y han pensado en darse por vencidos. A los que han luchado por sus oportunidades y también a los que se han quedado pateando piedras.

Agradecimientos

Después de tantos años por fin me encuentro escribiendo los agradecimientos a las personas que han sido indispensables a lo largo de este camino que comenzó el 2014 con un Jorge que aún no llegaba a la adultez.

Primero comenzar por lo más importante en la vida, la familia. Agradezco a mi mamá, realmente, sin ti nada de esto sería posible. Eres el pilar fundamental de nuestras vidas, la más fuerte, la más aperrada y la que siempre está ahí para todo, en las buenas y en las malas siempre dando tu apoyo y comprensión, por sobre todo lo último...Papá, gracias también por tu apoyo, creo que cualquier logro en la vida también es un triunfo que se comparte con otros, que no necesariamente salen en el cartón o en primera plana, pero tú también eres parte de este logro. Imposible no agradecer a mi hermana, consejera y oídos de mil historias durante toda mi etapa universitaria, alegrías, tristezas, penas, felicidades. Eres la mejor y la primera amiga que tuve en la vida, espero que siempre sigamos siendo tan unidos como siempre lo hemos sido hasta hoy.

A mi abuelita, que me recibió más de alguna vez en su casa mientras estaba en la u y con mil crisis existenciales, de hecho, me recibiste desde que nací. Te agradezco por las mil velas que prendiste cuando tenía un examen y por todas esas veces que me retaste para que me levantara para ir a clases o no me devolviera tan tarde a la casa en estados pocos saludables. A mi tía Fabiola, que me recibió cuantas veces para ir almorzar, descansar un ratito o siendo mi cómplice para capear clases.

Pero también hay que agradecer a la familia que uno forma en su camino. A mi amiga Angela, desde 2014 cuando entramos a la universidad, increíble la amistad que hemos formado y todos los buenos momentos juntos, estudiando, carreteando, yendo a la playa, pelando, retándome por mis tonteras amorosas. Fani, mi amiga de civil, con la que nos complementamos porque ninguno se quedaba callado en clases, que gran lazo fuimos formando y también muchas buenas historias con las que siempre tendremos para reír.

También a mis otros amigos, sobre todo a Carlitos, con el que más compartí durante mis últimos años universitarios haciéndonos grandes amigos, apoyándome siempre y convirtiéndote en una persona muy valiosa para mí. A todo el gran grupo de la sección que hasta hace algunos días estábamos sacándonos una foto en el frontis de 850 en pleno toque de queda y muchos otros que compartí durante mi etapa universitaria. Gracias también a la Javi, gran compañera que me ha apoyado enormemente durante todo este proceso.

Como no mencionar a mis amigos de toda la vida, a los que conozco desde los 5 años, cumpliendo 20 años de amistad, viviendo toda la etapa escolar y que luego, aunque cada uno siguiendo su propio camino seguimos juntos disfrutando la vida, compartiendo, discutiendo, sumando y sumando momentos. Inolvidables los jueves de chicos, que hasta la semana pasada seguimos celebrando y estoy seguro de que serán muchos más.

Finalmente me agradezco a mí, por jamás bajar los brazos y siempre levantar cabeza, sin importar que tan fuerte te puedan golpear o yo mismo tropezar.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.2.3 Estructura del informe.....	3
2. Revisión bibliográfica.....	5
2.1 Antecedentes generales.....	5
2.1.1 Situación hídrica en el mundo y nacional	5
2.1.2 Distribución de consumo de agua en Chile	8
2.1.3 Calidad de agua en Chile	11
2.2 Fuentes hídricas alternativas	14
2.2.1 Reúso de aguas residuales	14
2.2.1.1 Tecnologías de tratamientos secundarios.....	16
2.2.1.2 Experiencia internacional y nacional	20
2.2.2 Desalación de agua de mar	23
2.2.2.1 Tecnologías de tratamiento.....	24
2.2.2.2 Experiencia internacional y nacional	26
2.2.3 Otras fuentes alternativas.....	30
2.2.3.1 Recarga artificial de acuíferos.....	30
2.2.3.2 Trasvase hídrico.....	33
3 Análisis de fuentes hídricas alternativas e identificación de potenciales zonas para su implementación	35
3.1 Disponibilidad y calidad de fuentes de agua	35
3.1.1 Aguas residuales	35
3.1.2 Aguas servidas	35
3.1.3 Emisarios submarinos	37
3.1.3.1 Descarga y distribución geográfica de emisarios submarinos.....	38
3.1.3.2 Normativa de descarga para emisarios submarinos	41
3.1.3.3 Calidad de agua de los emisarios submarinos entre las regiones de Arica y Parinacota y Valparaíso.....	43

3.1.4	Agua de mar	45
3.1.4.1	Normativa vigente	48
3.2	Requerimientos de calidad según uso	50
3.2.1	Sector Agrícola	50
3.2.2	Minería.....	56
3.3	Análisis comparativo de alternativas de tratamiento	61
3.3.1	Uso de suelo.....	61
3.3.2	Eficiencia en remoción de contaminantes	62
3.3.3	Costos de energía e implementación	64
3.3.4	Impactos socioambientales	67
3.4	Identificación de potenciales zonas para aplicación de sistema de reúso de aguas servidas tratadas	69
3.4.1	Conflictos socioambientales en la zona centro-norte.....	69
3.4.2	Demanda hídrica de la minería y sector agrícola en la zona centro-norte..	73
4	Casos de estudio: Reúso de aguas servidas tratadas para el sector agrícola y minero	80
4.1	Metodología de evaluación	80
4.1.1	Conducciones, Plantas elevadoras y Estanques	80
4.1.1.1	Caudal de Diseño	80
4.1.1.2	Materialidad de tuberías	81
4.1.1.3	Pérdidas de carga y diámetro de tuberías	81
4.1.1.4	Presión Máxima de diseño	82
4.1.1.5	Plantas elevadoras de aguas y estanques de succión	82
4.1.1.6	Estanques de almacenamiento de aguas.....	82
4.1.2	Planta de tratamiento de aguas servidas y requerimientos de calidad	83
4.1.3	Estimación de costos de inversión y operación de los sistemas proyectados	85
4.1.3.1	Costos directos de inversión.....	85
4.1.3.2	Costos de operación y mantenimiento.....	88
4.2	Casos de estudio	90
4.2.1	Sistema de reúso emisario submarino La Serena	90
4.2.1.1	Caudal de diseño.....	90
4.2.1.2	Zona de Implementación	91

4.2.1.3	Conducción y Elevación del sistema	92
4.2.1.4	Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS	93
4.2.1.5	Resumen Costos Sistema de reúso La Serena	94
4.2.2	Sistema de reúso emisario submarino Coquimbo	95
4.2.2.1	Caudal de diseño	95
4.2.2.2	Zona de Implementación	95
4.2.2.3	Conducción y Elevación del sistema	96
4.2.2.4	Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS	98
4.2.2.5	Resumen Costos Sistema de reúso Coquimbo	99
4.2.3	Sistema de reúso emisario submarino Dos Norte.....	99
4.2.3.1	Caudal de diseño	99
4.2.3.2	Zona de Implementación	100
4.2.3.3	Conducción y Elevación del sistema	101
4.2.3.4	Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS	102
4.2.3.5	Resumen Costos Sistema de reúso Dos Norte	103
4.2.4	Análisis de Resultados	104
5	Conclusiones	106
6	Bibliografía	111
7	Anexos.....	118

Índice de Tablas

Tabla 1: Precipitación media anual por región	6
Tabla 2: Derechos superficiales consuntivos y no consuntivos - Caudal otorgado por región.	9
Tabla 3: Derechos subterráneos - Caudal otorgado por región.....	9
Tabla 4: Distribución de usos consuntivos de agua promedio anual por región y actividad productiva.	10
Tabla 5: Promedio histórico de concentraciones para algunos parámetros en 12 ríos de las zonas Norte y Centro de Chile.	13
Tabla 6: Tratamientos secundarios aeróbicos.....	15
Tabla 7: Tratamientos terciarios.....	15
Tabla 8: Categorías de reúso del agua y sus aplicaciones típicas	21
Tabla 9: Uso agrícola para aguas reusadas en distintos países	21
Tabla 10: Número, capacidad y participación global de plantas desaladoras operativas por región y uso del sector.....	26
Tabla 11: Catastro de plantas desaladoras y Sistemas de impulsión de agua de mar (SIAM) en la minería del cobre en operación.	27
Tabla 12: Futuros proyectos de plantas desaladoras de agua de mar en la minería.	28
Tabla 13: Listado de proyectos sanitarios e industriales que contemplan agua desalinizada....	29
Tabla 14: Métodos de recarga de acuíferos gestionada.....	30
Tabla 15: Volumen de aguas servidas tratadas según región y destino.....	36
Tabla 16: Caudales medios anuales 2015-2019 de emisarios submarinos en regiones de la zona centro-norte.....	38
Tabla 17: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro y fuera de la zona de protección litoral.	42
Tabla 18: Composición y características típicas de agua de mar	45
Tabla 19: Proyectos de ley sobre desalación que han sido presentados y afectan a la industria minera, redactados en el Congreso Nacional entre 2011-2019.....	49
Tabla 20: Guía sugerida para aguas tratadas en reúso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.....	50
Tabla 21: Cultivos agrícolas que utilizan aguas residuales sin tratar o tratadas parcialmente...	51
Tabla 22: Clasificación de aguas para regadío según conductividad específica y sólidos disueltos totales.	52
Tabla 23: Calidad sugerida de aguas residuales tratadas de acuerdo con parámetros físicos, químicos y biológicos.....	52
Tabla 24: Límites máximos permitidas para normas de calidad de agua de riego y descargas de submarinos fuera de protección litoral	53
Tabla 25: Consumo de agua continental en la minería del cobre por proceso y total [L/seg]	57
Tabla 26: Valores máximos permitidos en tablas N°1 y 5 del Decreto Supremo 90	59
Tabla 27: Ejemplos de tratamientos de aguas residuales mediante humedales artificiales	61
Tabla 28: Requerimiento de área para tratamientos de lodos activados y sistemas MBR.....	62
Tabla 29: Eficiencia de remoción de plantas de tratamientos de aguas residuales mediante humedales construidos	63

Tabla 30: Eficiencia de remoción mediante alternativas de Lodos Activados y sistemas MBR .	63
Tabla 31: Eficiencia de remoción de desalación de agua de mar mediante osmosis inversa	64
Tabla 32: Costos de energía y operación según alternativa de tratamiento	66
Tabla 33: Clasificación de impactos socioambientales según alternativa de tratamiento	68
Tabla 34: Distribución uso Agrícola por sectores en la cuenca del río Aconcagua.....	78
Tabla 35: Calidad de agua objetivo sistemas de reúso de aguas servidas tratadas en la industria minera y agrícola.	83
Tabla 36: Procesos de tratamiento en PTAS para cada sistema proyectado	84
Tabla 37: Facturación de aguas servidas anuales proyectadas comuna La Serena	91
Tabla 38: Potencia Instalada Plantas elevadoras Sistema La Serena.....	93
Tabla 39: Estanques de succión y almacenamiento sistema La Serena	94
Tabla 40: Áreas requeridas PTAS Sistema La Serena.....	94
Tabla 41: Resumen de costos Sistema de reúso La Serena.....	94
Tabla 42: Facturación de aguas servidas anuales proyectadas comuna Coquimbo	95
Tabla 43: Potencia Instalada Plantas elevadoras Sistema Coquimbo.....	98
Tabla 44: Estanques de succión y almacenamiento sistema Coquimbo	98
Tabla 45: Área requerida PTAS Sistema Coquimbo	98
Tabla 46: Resumen de costos Sistema de reúso Coquimbo	99
Tabla 47: Facturación de aguas servidas anuales proyectadas para las comunas del Emisario submarino Dos Norte.....	100
Tabla 48: Potencia Instalada Plantas elevadoras Sistema Dos Norte.....	102
Tabla 49: Estanques de succión y almacenamiento sistema Dos Norte	103
Tabla 50: Área requerida PTAS Sistema Dos Norte	103
Tabla 51: Resumen de costos Sistema de reúso Dos Norte	103

Índice de Figuras

Figura 1: Línea base anual del estrés hídrico mundial.	5
Figura 2: Balance hídrico de la oferta y la demanda y los índices de escasez de agua para cada región.	8
Figura 3: Distribución porcentual de usos consuntivos de agua según actividad productiva en Chile.	10
Figura 4: Esquema planta de tratamiento de aguas mediante Lodos activados convencionales	17
Figura 5: Reactor biológico de membrana externa sumergida.	18
Figura 6: Tipos de humedales construidos y componentes.	20
Figura 7: Tendencias en la desalación mundial por (a) número y capacidad de instalaciones de desalación totales y operativas y (b) capacidad operativa por tecnología de desalación.	23
Figura 8: Esquema general de la osmosis natural y osmosis inversa.	25
Figura 9: Ubicación pretratamiento emisarios submarinos en la zona centro-norte.	39
Figura 10: Caudal medio mensual para emisarios submarinos con descarga mayor a 200 l/s en regiones de la zona centro-norte para período 2015-2020.	40
Figura 11: Uso de agua en el procesamiento de sulfuros de cobre.	57
Figura 12: Costo de producción de agua por Osmosis Inversa y pre-tratada en función de la altura de elevación del sistema.	65
Figura 13: Conflictos socioambientales por región y estado actual.	70
Figura 14: Conflictos socioambientales región de Coquimbo.	71
Figura 15: Conflictos socioambientales en la región de Valparaíso.	72
Figura 16: Principales faenas mineras y yacimientos en explotación de la Región de Coquimbo	74
Figura 17: Principales faenas mineras y yacimientos en explotación de la Región de Valparaíso	75
Figura 18: Red de canales y emisarios submarinos en la región de Coquimbo.	76
Figura 19: Sectores de riego Cuenca del río Elqui.	77
Figura 20: Red de canales y principales emisarios submarinos en la región de Valparaíso.	78
Figura 21: Demanda agrícola en región de Valparaíso.	79
Figura 22: Ajuste para Costos de Inversión PTAS Lodos Activados.	86
Figura 23: Ajuste para Costos de Inversión PTAS MBR.	87
Figura 24: Ajuste para estimación de área requerida PTAS Lodos Activados.	87
Figura 25: Curva de ajuste para la determinación de costos de O&M en PTAS mediante sistema MBR.	89
Figura 26: Curva de ajuste para la determinación de costos de O&M en PTAS de Lodos Activados.	89
Figura 27: Zonas de aplicación aguas servidas tratadas desde emisario submarino La Serena	91
Figura 28: Trazado y PEAS para sistema de reúso de aguas servidas tratadas emisario submarino La Serena.	92
Figura 29: Perfil piezométrico de impulsión sistema de reúso emisario submarino La Serena. .	93
Figura 30: Zonas de aplicación aguas servidas tratadas desde emisario submarino Coquimbo	96

Figura 31: Trazado y PEAS para sistema de reúso de aguas servidas tratadas emisario submarino Coquimbo.....	97
Figura 32: Perfil piezométrico de impulsión sistema de reúso emisario submarino Coquimbo. .	97
Figura 33: Zonas de aplicación aguas servidas tratadas desde emisario submarino Dos Norte	100
Figura 34: Trazado y PEAS para sistema de reúso de aguas servidas tratadas emisario submarino Dos Norte.	101
Figura 35: Perfil piezométrico de impulsión sistema de reúso emisario submarino Dos Norte.	102
Figura 36: Costos unitarios de inversión y O&M para PTAS y transporte de los sistemas de reúso proyectados.	105

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Una de las mayores problemáticas que hoy enfrenta el mundo es la denominada crisis del agua. Esto debido a que el suministro de este valioso recurso se está viendo afectado por su agotamiento o falta de acceso, como también por la calidad de las aguas. Lo anterior se puede deber al incremento insostenible de la demanda de agua para actividades humanas, agotando las fuentes, como también a la disminución de la oferta hídrica en el entorno producida entre otras causantes por el cambio climático.

Un 2,5% de las aguas a nivel planetario corresponden a aguas de tipo dulce o continental. Del total de agua dulce, el 75% se encuentra en glaciares o en los casquetes polares por lo que solo un 0,62% está en acuíferos subterráneos, lagos y ríos. El 97,5% del agua total del planeta restante corresponde a agua salada de los océanos, la cual tiene mayores impedimentos para su consumo directo. (Dirección General de Aguas, 2016).

En Chile la disponibilidad del recurso puede ser muy variable, debido a la gran variedad de climas y los distintos tipos de regímenes hidrológicos. Como ejemplo de esto, las precipitaciones anuales en el norte de Chile son escasas y en algunas regiones pueden ser menores a 20 [mm/año] mientras que desde la región del Biobío hacia el sur se supera el promedio de precipitación mundial y de Sudamérica por sobre los 1500 mm/año (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, 2012).

El uso del recurso hídrico en Chile está reglamentado de manera normativa en el Código de aguas. En este se define al agua como un bien nacional de uso público y se otorgan a la sociedad y sus particulares a través de derechos de aprovechamiento (Código de Aguas, 1981). Estos derechos se clasifican de manera general en consuntivos y no consuntivos. Los derechos consuntivos facultan al titular a constituir totalmente las aguas en cualquier actividad. Por otra parte, los derechos de tipo no consuntivos permiten hacer uso del agua, pero sin consumirla, por lo que se debe restituir el caudal otorgado mediante la forma en que lo determine el acto de adquisición. La mayor parte de los usos consuntivos de agua en Chile es destinada al sector agropecuario. Sobre la distribución de consumo de agua, se estima que el 82% se utiliza para el sector agropecuario, 8% para agua potable, un 3% para minería y un 7% para usos industriales (Dirección General de Aguas, 2016).

La escasez hídrica se entiende como la falta de agua o suministro de esta y se estima mediante la relación entre el consumo de agua humana y el suministro de agua disponible en un área determinada (Schulte, 2014). De acuerdo con el Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2021), los decretos de escasez se dictan con el objeto de proveer determinadas herramientas a usuarios del agua y a la población en general para reducir al mínimo los daños derivados de la sequía. En complemento, la sequía se define como períodos de tiempo secos que pueden estar causados por patrones de precipitaciones irregulares y la disminución de masas de agua naturales disponibles (Biblioteca del Congreso Nacional, 2018).

La alta demanda del recurso hídrico y el sobre otorgamiento en algunas comunas de las regiones de nuestro país llevó a que entre los meses de enero de 2019 y marzo de 2020 se declararan 136 comunas en situación de escasez hídrica, lo que equivale a un 39% de las comunas a nivel nacional (Fernández, 2020). Los últimos decretos de escasez declarados contemplan comunas entre las regiones de Atacama y Metropolitana siendo la de Valparaíso la con mayor cantidad de decretos emitidos con un total de 37 ¹.

El reúso de aguas residuales es una alternativa que toma fuerza como solución a la escasez hídrica, ya que propone un uso sostenible y circular de nuestras aguas. El 80% de las aguas residuales del mundo retornan a océanos o ríos sin ser recirculadas o tratadas causando un daño en los ecosistemas como también pudiendo generar una contaminación crítica en las fuentes de agua (Kammeyer, 2017). En Chile si bien las aguas residuales que se descargan al mar son tratadas, estas no están siendo reutilizadas. En la zona centro-norte, desde la región de Arica y Parinacota hasta la de Valparaíso, y a excepción de la región de Atacama, todas vierten mayoritariamente sus aguas servidas al mar a través de emisarios submarinos. Las regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota vierten un 100% de sus aguas servidas al mar y en el caso de la región de Valparaíso la mayor parte de sus aguas servidas, siendo un volumen de 103,4 millones [m³/año] equivalentes a un 74,5% de las aguas totales servidas de la región o 3278 [L/s] (Ministerio de Obras Públicas, 2020).

Otra de las alternativas que se ha ido implementado en diferentes partes del mundo, y que en la última década ha aumentado fuertemente en Chile, es el uso de agua de mar mediante plantas desalinizadoras. Esto ha permitido producir agua con calidad para distintos usos, como lo son para el consumo de agua potable y la industria minera. Actualmente el consumo de agua desalada de mar en la minería del cobre alcanza cerca de 6 [m³/s]. Las proyecciones son de un gran crecimiento y para el año 2031 alcanzaría los 10,9 [m³/s], llegando a ser un 46,7% del consumo de agua total en la industria (Comisión Chilena del Cobre, 2020). En el caso del consumo potable, se ha desarrollado principalmente en zonas costeras del norte de Chile. Por ejemplo, la planta Desaladora Norte de Aguas Antofagasta abastece a un 90% de la población de la ciudad con 950 [l/s] de capacidad (Aguas Antofagasta, 2019), mientras que la planta ubicada en Caldera, que abastecerá de agua potable a Copiapó, Tierra Amarilla y Chañaral tendrá una capacidad de 1200 [l/s] cuando concluya la construcción de su etapa final (ECONSSA CHILE, 2019).

Dicho lo anterior, existen potenciales fuentes alternativas que pueden contribuir a mitigar situaciones de déficit hídrico, pudiendo cubrir parte de las demandas para distintas actividades y usos. Una de estas alternativas, es el reúso de aguas servidas tratadas en el sector agrícola y minero en la zona centro norte de Chile, específicamente desde aguas que hoy están siendo vertidas a través de emisarios submarinos. A su vez existen distintas tecnologías de tratamiento para las aguas residuales que pueden emplearse para llegar a la calidad de agua requerida, pudiendo hacer uso de este recurso que hoy está siendo descargado sin un aprovechamiento efectivo.

¹ Anexo 1: Decretos de escasez vigentes enero 2021 (DGA, 2021).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es realizar un análisis de la disponibilidad de las fuentes de agua en la zona centro-norte de Chile, con énfasis en el reúso de aguas servidas en el sector agrícola y minero. Específicamente se busca analizar el potencial reúso de aguas servidas dispuestas mediante emisarios submarinos.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos de este trabajo:

- Desarrollar una revisión de balance del recurso hídrico en las zonas centro-norte de Chile y de las potenciales alternativas a analizar, las cuales son el reúso de aguas residuales y la desalación de agua de mar.
- Desarrollar un análisis comparativo entre reúso de aguas servidas tratadas y la desalación de agua de mar, considerando la disponibilidad de las fuentes de agua respectivas y la calidad de estas, las tecnologías de tratamiento y su eficiencia, requerimientos de energía, los costos asociados, como también los impactos socioambientales y las normativas vigentes. Para el caso de reúso de aguas residuales se analizan 3 alternativas de tratamiento: LA, MBR y HC.
- Identificar zonas de aplicación para el reúso de aguas servidas tratadas, lo anterior en base a las zonas de conflicto relacionadas al uso del recurso hídrico, considerando problemas de tipo socioambiental y la demanda de agua de las industrias minera y agrícola en las regiones del centro-norte de Chile.
- Realizar una evaluación de la factibilidad técnica y económica para 3 sistemas propuestos de reúso de aguas servidas tratadas para su posterior uso en los sectores agrícola y minero.

1.2.3 Estructura del informe.

La estructura del informe la cual permitió cumplir con los objetivos se describe a continuación.

- Capítulo 2

Se realiza una revisión bibliográfica la cual se enfoca principalmente en las dos alternativas analizadas en este trabajo, que son el reúso de aguas servidas tratadas y la desalación de agua de mar.

Para cada una de estas alternativas se investiga sobre los principales procesos de tratamiento desarrollados actualmente. Además, se hace una revisión sobre la experiencia nacional e internacional en cuanto a proyectos aplicados.

De manera adicional se realiza una revisión general de otras alternativas, como lo son la recarga de acuíferos y el trasvase hídrico entre cuencas, y proyectos relacionados a su implementación.

- Capítulo 3

El análisis se basa en primera instancia sobre la disponibilidad y la calidad de las fuentes de agua de las dos alternativas abordadas con mayor profundidad en el capítulo anterior: reúso de aguas residuales y desalación de agua de mar. Para efectos de este análisis se evalúa el uso en dos de las industrias con mayor demanda hídrica en el país. Estas industrias corresponden a la minería y el sector agrícola, identificando los requerimientos de calidad de agua respectivos.

Por otra parte, se desarrolla el análisis respecto a la eficiencia de los tratamientos de las alternativas en cuanto al cumplimiento de los requerimientos de calidad como objetivo; a los costos del reúso de aguas servidas para las 3 alternativas de tratamiento y agua desalada de mar; a la eficiencia de las alternativas de tratamiento en cuanto al cumplimiento de los requerimientos de calidad como objetivo; y al impacto ambiental que conlleva la implementación de estas alternativas.

Con el fin de identificar las potenciales zonas en conflicto por el recurso hídrico, se desarrolla entre las regiones de Arica y Parinacota y Valparaíso, una evaluación preliminar en cuanto a la disponibilidad de aguas servidas desde emisarios submarinos y que permite identificar la implementación de un sistema de reúso de aguas servidas tratadas para la industria minera y sector agrícola.

En este análisis se considera factores tales como las proyecciones de demanda en las industrias mencionadas, la disponibilidad hídrica de aguas residuales, zonas de conflicto socioambiental y también la ubicación geográfica de los emisarios submarinos como fuente de agua y de las demandas hídricas en estas regiones, de manera de establecer una relación factible y estratégica para la implementación del sistema de reúso.

- Capítulo 4

En esta sección se proponen dos casos de estudio en la región de Coquimbo y otro en la de Valparaíso. Se evalúa la factibilidad técnica y económica de desarrollar proyectos consistentes en el reúso de aguas servidas tratadas, con fuente de agua emisarios submarinos, para el sector agrícola y minero. Para la evaluación se diseña en base a las principales obras del sistema de conducción e impulsión de las aguas producidas hacia las zonas de aplicación y la comparación entre los posibles procesos de tratamiento de acuerdo con sus costos respectivos. Con el diseño y la estimación de costos asociados al anteproyecto de cada sistema y alternativa de tratamiento, se realiza un análisis sobre la factibilidad, ventajas y desventajas de las alternativas propuestas.

2. Revisión bibliográfica

2.1 Antecedentes generales

2.1.1 Situación hídrica en el mundo y nacional

El consumo de agua ha ido en aumento aproximadamente en un 1% por año desde 1980 a nivel global. Este incremento se ha debido principalmente a la creciente demanda en los países en desarrollo y en las economías emergentes. La agricultura, ya sea para riego de cultivos, ganadería y acuicultura, es la mayor actividad de consumo de agua, la cual representa el 69% de las extracciones anuales de agua en el mundo. Por otra parte, el consumo de agua en las industrias representa el 19%, y para uso doméstico el 12% (WWPA, 2019).

Debido a la alta densidad de población de las ciudades y al aumento de la urbanización, el suministro de agua urbana es potencialmente vulnerable. Para el año 2050 alrededor de 685 millones de personas viviendo en más de 570 ciudades, enfrentarán a una disminución de disponibilidad de agua dulce. Algunas ciudades como Ciudad del Cabo y Melbourne pueden experimentar declives en la disponibilidad del agua dulce de entre 30 a 49%, mientras que en Santiago de Chile puede haber una disminución por encima del 50% (C40 Ciudades, 2018).

En esta misma línea, se han realizado diversas estimaciones para clasificar el nivel de estrés hídrico en el mundo, lo cual se puede observar en la siguiente figura.

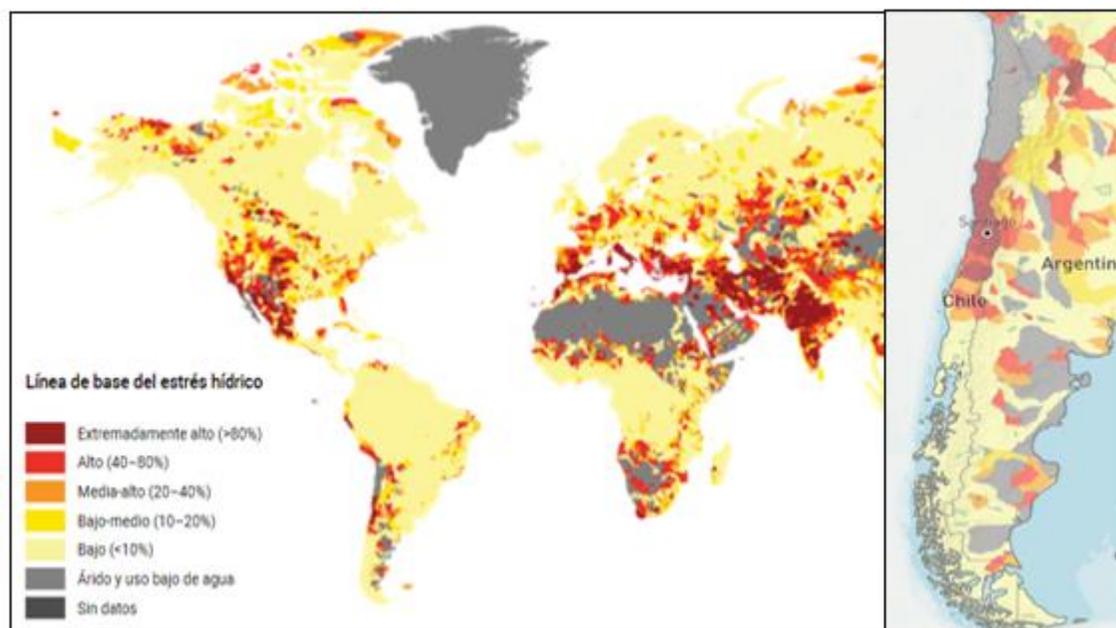


Figura 1: Línea base anual del estrés hídrico mundial. Adaptado de (WRI, 2019).

La línea de base anual del estrés hídrico mostrada en la figura 1 mide la relación del total de retiros de agua en comparación al suministro de agua renovable disponible. Las extracciones de agua incluyen usos domésticos, industriales, de riego y de ganado, mientras que los suministros de agua renovable disponibles incluyen suministros de agua subterránea y superficial.

De acuerdo con la misma información mostrada en la figura anterior, Chile califica como un país con un alto estrés hídrico, en el cual gran parte de sus ciudades y población tendrán un déficit en la disponibilidad o suministro de agua urbana. Esto sugiere de manera directa un riesgo hídrico para la población, el cual se define como la probabilidad de que un territorio experimente un evento perjudicial relacionado con el agua. Muchas condiciones como escasez de agua, contaminación, mala gobernanza, infraestructura inadecuada, el cambio climático y otras, crean riesgos hídricos (Biblioteca del Congreso Nacional, 2018). Los problemas identificados que generan riesgo hídrico en Chile se atribuyen en un 44% a la gestión y gobernanza del recurso, 17% por aumento de la demanda, 14% por contaminación de las aguas, 12% por disminución de oferta, entre otros asociados al daño ambiental, desastres naturales y desarrollo de actividades anexas al recurso hídrico (Fundación Chile, 2019).

Como es sabido Chile posee una gran diversidad climática lo que se traduce en recursos hídricos muy variados a lo largo de su extensión y con grandes contrastes entre las zonas norte, centro y sur del país. Según el Banco Nacional de Aguas de la Dirección General de Aguas (DGA) el territorio nacional está compuesto por 101 cuencas hidrográficas compuestas por un total de 1.251 ríos, 12.784 cuerpos de agua entre lagos y lagunas, a lo cual se suman 24.114 glaciares, los que pueden aportar al caudal de escorrentía en el estiaje de periodos secos (Dirección General de Aguas, 2016).

La precipitación promedio a nivel país es de 1.525 mm/año. Sin embargo, cuando se analiza regionalmente este valor, es posible identificar una gran diferencia hídrica como se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla 1: *Precipitación media anual por región.*

Región	Precipitación [mm/año]
XV	132
I	77
II	45
III	82
IV	222
V	434
RM	650
VI	898
VII	1377
VIII	1766
IX	2058
XIV	2656
X	3068
XI	3263
XII	2713

Fuente: elaboración propia a partir de (Dirección General de Aguas, 2016).

De la tabla 1 se observa la escasez de precipitaciones de la zona norte. Cuando ocurren estos eventos de precipitación en estas zonas, se abastecen acuíferos, corrientes efímeras y algunos ríos exorreicos tales como el Lluta, San José, Loa, Copiapó y Huasco, los cuales son de gran importancia regional desde el punto de vista económico, social y ambiental.

Si se observa la zona central, la precipitación aumenta hasta 200-1400 mm/año. Muchos de los ríos de la región, tales como Limarí, Elqui, Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito y Maule tienen regímenes hidrológicos de tipo nival o pluvionival, y en los cuales sus flujos mensuales más elevados están en sincronía con las mayores demandas agrícolas (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, 2012).

Por otra parte, los ríos generalmente presentan una marcada variabilidad en su caudal a lo largo de los meses del año según el régimen de la cuenca en que se encuentran. La escorrentía total promedio a nivel país es de 29,2 [m³/s] (Dirección General de Aguas, 2016). El caudal promedio regional más bajo se da en la región de Antofagasta con 0,9 [m³/s] y el más alto en la región de Aysén con 1.134 [m³/s]. Lo anterior se traduce directamente en una mayor o menor disponibilidad del recurso hídrico. Según estimaciones de la Dirección General de Aguas (DGA), la escorrentía per cápita en la región de Antofagasta es de 47 [m³/persona/año] equivalente a 128 [L/día], siendo la región de menor disponibilidad a nivel nacional. Distinta es la situación en la zona central y sur del país en la cual a partir de la sexta región se presenta una marcada diferencia en cuanto a disponibilidad con 7.037 [m³/persona/año] equivalentes a 19.200 [L/día]. El resto de las regiones hacia el sur de la sexta región van aumentando significativamente su disponibilidad en comparación a las regiones de la zona norte, lo que se traduce finalmente en una desigualdad en cuanto a la disponibilidad de agua para el desarrollo de distintas industrias y actividades².

Otra fuente de recurso importante son los acuíferos. El agua subterránea almacenada en ellos tiene su origen en la precipitación que se infiltra por las capas superiores del acuífero hasta alcanzar la napa. Hasta el año 2015, la DGA delimitó un total de 137 acuíferos a lo largo del territorio nacional. La distribución por región de los volúmenes de acuíferos muestra que en la zona norte la región con un mayor volumen de almacenamiento disponible corresponde a la de Valparaíso con 663.167.392 [m³/año], lo que considera la cantidad de agua anual asociada a la recarga del acuífero y los derechos de agua de tipo subterráneos provisional y no definitivos. La región con un menor volumen disponible es la de Arica y Parinacota con sólo 56.607.120 [m³/año]. De acuerdo con la DGA, el volumen comprometido de los acuíferos, referentes a la cantidad de agua de todos los derechos constituidos y reconocidos, es mayor que el disponible desde la región de Arica y Parinacota hasta la región Metropolitana³. La presión sobre los recursos subterráneos va en aumento, ya que las solicitudes de concesión para extraer aguas subterráneas exceden por mucho las estimaciones actuales de recarga disponible. Al mismo tiempo, los ecosistemas y comunidades humanas que dependen de la infiltración de agua subterránea para sobrevivir están amenazados por su sobreexplotación.

² El detalle de la escorrentía per cápita por región se encuentra en el Anexo 2.

³ La disponibilidad de volúmenes de agua en acuíferos por región se especifica en el Anexo 3 junto con el volumen comprometido.

La evidencia sobre los niveles extremadamente bajos de disponibilidad de agua en las zonas centro y norte, en conjunto con una demanda de agua en constante crecimiento, ha generado déficits en el balance hídrico de las cuencas producto de un sobre otorgamiento del recurso. El alcance de estos déficits se puede observar en la figura 2, donde el índice de escasez es la relación entre la demanda y la disponibilidad de agua. En esta se puede observar regiones como las de Antofagasta (c) y Atacama (d) en las cuales la demanda supera ampliamente a la oferta del recurso hídrico en la zona, lo que genera un desbalance grave en cuanto al uso del recurso hídrico y que estaría agotando su disponibilidad en las distintas fuentes. Por otra parte, cabe destacar que la demanda de agua supera la oferta desde la región de Tarapacá hasta la región Libertador Bernardo O'Higgins.

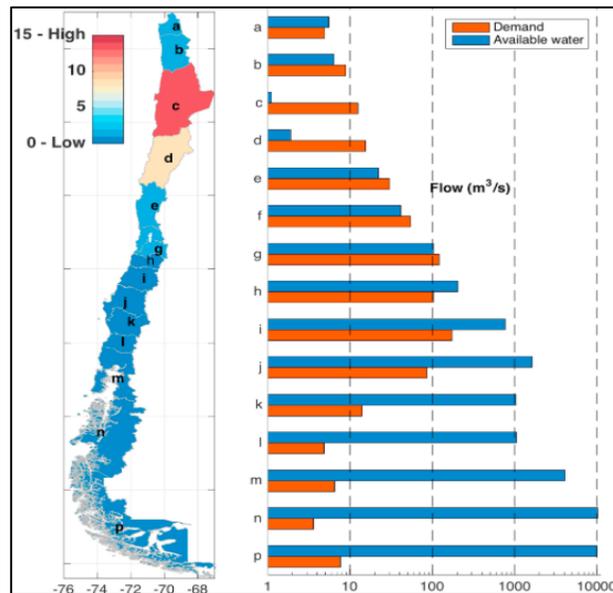


Figura 2: Balance hídrico de la oferta y la demanda y los índices de escasez de agua para cada región (Alvez, y otros, 2020).

2.1.2 Distribución de consumo de agua en Chile

De acuerdo con los principales usos de agua en nuestro país, es posible clasificarlos según el tipo de derecho de aprovechamiento otorgado como también cuantificar su distribución regional según su uso. Esta distribución puede ser muy variable dependiendo de la región que se analice. El agua consumida en Chile proviene en su mayoría de aguas de tipo continental y estas pueden ser de tipo superficiales o subterráneas.

El mayor caudal otorgado de acuerdo con los derechos de aprovechamiento corresponde a aguas de tipo superficial. Los valores más altos se encuentran en la zona sur de nuestro país específicamente en la región del Biobío en donde los derechos consuntivos alcanzan poco más de 464 mil [l/s] los que equivalen a un 15,68% del total otorgado. En el caso de los derechos de tipo no consuntivo, es la misma región que lidera el consumo con más de 8,6 millones [l/s].

En la tabla 2 es posible visualizar la distribución del caudal otorgado para cada región según uso consuntivo o no consuntivo para extracciones desde fuentes de tipo superficial.

Tabla 2: *Derechos superficiales consuntivos y no consuntivos - Caudal otorgado por región.*

Región	Derechos superficiales - Caudal otorgado		
	Consuntivo [m3/s]	No Consuntivo [m3/s]	Total [m3/s]
XV	26	8,39	34,25
I	3,3	1,07	4,37
II	11,29	14,22	25,51
III	22,54	6,18	28,72
IV	98,16	144,42	242,58
V	305,41	236,12	541,53
RM	261,72	1041,69	1303,41
VI	239,17	1620,55	1859,72
VII	425,69	3141,57	3567,26
VIII	464,15	8665,80	9129,95
IX	445,95	5710,33	6156,28
XIV	121,54	4747,91	4869,45
X	178,3	5316,54	5494,84
XI	204,18	6328,14	6532,32
XII	151,68	65,84	217,52

Fuente: Recuperado de (Dirección General de Aguas, 2016).

Por otra parte, los derechos que son extraídos desde fuentes de agua en forma de acuíferos presentan un mayor otorgamiento en la zona centro de nuestro país. Esto se debe a la alta disponibilidad del recurso en estas zonas, a la gran demanda de la zona central producto de la concentración de la población en estas regiones y al desarrollo de la agricultura y otras actividades económicas. En la tabla 3 se muestra la distribución de los derechos subterráneos otorgados según región.

Tabla 3: *Derechos subterráneos - Caudal otorgado por región.*

Región	XV	I	II	III	IV	V	RM	VI	VII	VIII	IX	XIV	X	XI
Caudal [m3/s]	3,53	6,64	14,30	28,77	27,90	66,13	123,51	58,38	54,52	29,22	18,11	11,59	23,60	0,47

Fuente: Recuperado de (Dirección General de Aguas, 2016).

Un registro reciente sobre la distribución para los usos consuntivos de agua fue realizado por la DGA en el informe “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile”. En este informe se clasificó los usos en: Agua potable urbana (APU), Agua potable rural (APR), Agrícola (AGR), Pecuario (PEC), Minero (MIN), Industrias (IND), Eléctrico (ELE). De acuerdo con los resultados que entrega el estudio, se estimó el caudal como demanda consultiva según cada región, obteniéndose la información que se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: *Distribución de usos consuntivos de agua promedio anual por región y actividad productiva.*

Región	Nombre	Demanda consuntiva promedio anual [L/s]							
		APU	APR	AGR	PEC	MIN	IND	ELE	TOTAL
XV	Arica y Parinacota	410	19	2.315	10	18	6	0	2.779
I	Tarapacá	688	11	542	3	1.634	139	0	3.017
II	Antofagasta	1.227	15	1.466	3	4.790	937	0	8.440
III	Atacama	539	22	4.446	8	1.267	0	0	6.282
IV	Coquimbo	1.252	197	14.653	5	1.331	150	0	17.588
V	Valparaíso	3.234	341	21.320	107	1.508	525	7.020	34.056
XIII	Metropolitana	20.925	367	40.266	578	743	1.220	1.179	65.277
VI	O'Higgins	1.366	904	54.649	554	2.243	389	2	60.108
VII	Maule	1.327	551	89.504	138	0	1.056	244	92.821
VIII	Biobío	3.195	387	15.093	67	1	11.113	6.164	36.020
IX	Araucanía	1.215	214	5.469	196	0	819	885	8.799
XIV	Los Ríos	511	232	173	228	0	2.394	84	3.622
X	Los Lagos	990	233	83	300	0	4.374	0	5.980
XI	Aysén	171	42	23	42	90	32	0	401
XII	Magallanes	341	6	66	100	19	19	131	682
	Total Nacional	37.393	3.542	250.069	2.341	13.645	23.175	15.708	345.872

Fuente: Adaptado a partir de (Dirección General de Aguas, 2017).

De la información mostrada en la tabla 4 se obtiene la distribución porcentual de los usos consuntivos de agua a nivel nacional.

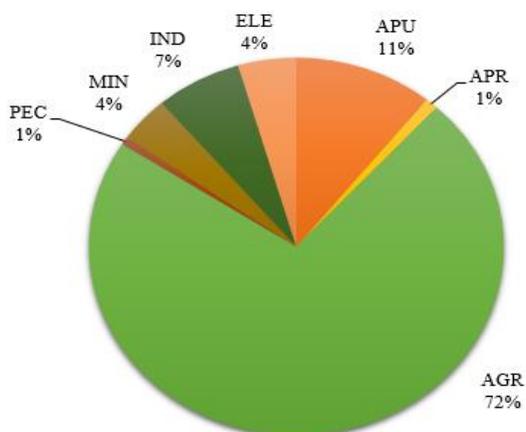


Figura 3: *Distribución porcentual de usos consuntivos de agua según actividad productiva en Chile. Elaboración propia a partir de (Dirección General de Aguas, 2017).*

La distribución mostrada en la Figura 3 puede ser muy diferente según la región que se analice. Una de las principales actividades económicas que se desarrolla en la zona norte es la minería, por lo que en algunas regiones será esta actividad la que tenga la mayor demanda de agua de uso consuntivo. Las regiones con mayor uso consuntivo en minería de acuerdo con la tabla 4 es la región de Antofagasta con 4.790 [L/s], lo que equivale a un 57 % de los usos consuntivos de la región y a un 35% del uso de agua en la minería a nivel nacional.

Por otra parte, destaca la región de Tarapacá como la segunda región de mayor uso consuntivo para la minería en la zona norte alcanzando los 1.634 [L/s]. Esto equivale a un 54% de usos consuntivos totales en la región y a un 12% del total de usos en la minería a nivel nacional. Como segundo mayor uso consuntivo se encuentra el sector agrícola con un 18%.

Cabe destacar además que hasta la región de Coquimbo se concentra el 78% del total nacional de empresas dedicadas a la extracción de cobre, oro, plata y otros minerales (Dirección General de Aguas, 2016). Se proyectó que al año 2021 esta actividad requerirá una demanda estimada de 18,4 m³/s entre aguas continentales y agua desalada a nivel nacional (Comisión Chilena del Cobre, 2019). Este valor es mayor al entregado por la DGA y puede deberse al gran crecimiento de la demanda en la industria minera, como también a la incesante introducción de agua desalada en los últimos años.

Respecto del uso agrícola en la zona centro-norte, son las regiones de Coquimbo y Valparaíso donde predomina el mayor consumo para esta industria. En el caso de la cuarta región el consumo de agua en el sector agrícola alcanza poco más del 83% de los usos consuntivos totales con alrededor de 14.600 [L/s]. La industria que le sigue en cuanto a consumo de agua es la minería con un 7,5% de los usos consuntivos totales lo que equivale a poco más de 1.300[L/s].

La región de Valparaíso, al igual que en la región de Coquimbo, tiene un alto consumo de agua destinadas para el sector agrícola y alcanza el 62% aproximadamente de los usos consuntivos totales en la región. Por otra parte, la generación eléctrica también tiene una alta influencia con un 20% y equivalente a un caudal de 27.036 [L/s]. Debido a la gran población de la región, el uso de agua potable urbano es el tercer sector con mayor consumo con un 9% de los usos consuntivos totales que equivalen a 3.234 [L/s]. Gran parte de estas aguas son recolectadas, pretratadas y posteriormente descargadas al mar a través de emisarios submarinos. Lo anterior ocurre en gran parte de las ciudades costeras de la zona centro-norte.

Según la información anterior, se identifica una predominancia en el uso consuntivo de agua para el sector agrícola en la zona centro-norte, específicamente para las regiones de Arica y Parinacota, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O'Higgins. Por su parte las regiones de Tarapacá y Antofagasta son las regiones con mayor uso consuntivo de aguas para la industria minera y en cada una de estas regiones el caudal de consumo es de más del 50% de los usos en cada región. Finalmente cabe destacar que el consumo de agua para la minería en estas dos regiones representa un 47% del uso total de aguas en minería en el país.

2.1.3 Calidad de agua en Chile

La calidad de las aguas en Chile se ha visto influenciada por los contrastes en relación a los recursos hídricos y sus condiciones hidrológicas, como también a la geoquímica natural de las fuentes. A esto se suma el impacto de distintas actividades que implican el desarrollo urbano, minero, agrícola e industrial. En general, la alta concentración de sales disueltas en cuencas del norte se debe a una combinación de la alta evaporación con fuentes hidrotermales, drenaje ácido y el afloramiento de aguas subterráneas salobres.

Los enriquecimientos minerales andinos continúan hacia la zona central, donde los aportes de sales disueltas y metales son diluidos por condiciones hidrológicas más favorables como en las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo-Mapocho, Rapel y Mataquito. En esta zona, donde la agricultura representa el mayor usuario de agua y donde reside la mayoría de la población, la calidad del agua es resultado de la contaminación de pesticidas y fertilizantes sumado a cargas orgánicas provenientes de los asentamientos humanos. (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, 2012). Debido a esto se presenta un enriquecimiento de nitrato en las aguas que se asocia a contaminación en zonas urbanas y a prácticas agroindustriales y de la ganadería, identificándose concentraciones medias altas de nitrato en las cuencas de Aconcagua, Maipo y Rapel (IANAS, 2019).

En el informe “Radiografía del Agua” de la Fundación Chile se evaluó la calidad de aguas en nuestro país a través del Índice de Calidad de Aguas Superficiales (ICAS). Este índice es una herramienta que entrega información de la calidad de agua de manera simplificada, englobando en un solo factor aquellos parámetros más importantes que puedan incidir en la afectación de la calidad de agua (Fundación Chile, 2018).

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos en el estudio y evaluando la situación de calidad de aguas por región y sus principales cuencas, se tiene en la región de Arica y Parinacota, las cuencas del río San José y la cuenca del río Lluta. En el caso de la cuenca del río San José destacan valores elevados de arsénico por sobre los 0,01 [mg/l] que establece la norma de agua potable, mientras que en las aguas subterráneas se tienen valores elevados de cloruros y sulfatos.

En la región de Tarapacá una de las principales cuencas es la Pampa del Tamarugal, en donde gran parte de las aguas extraídas son una fuente de tipo subterránea. La composición de las aguas superficiales presenta valores altos en arsénico, cloruro, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT), lo cual se ve también reflejado en las aguas subterráneas.

Cabe destacar que la región de Antofagasta es la que presenta mayor cantidad de estaciones con calidad insuficiente. Estos registros están asociados al río Loa y a la cuenca del Salar de Atacama. En cuanto a las concentraciones, se observan valores por sobre los 0,1 mg/l que superan lo normado respecto de la calidad de agua para riego de la NCh1333 en arsénico, cloruro, conductividad eléctrica y SDT (Dirección General de Aguas, 2017).

En la región de Coquimbo hay nueve estaciones con calidad insuficiente, relacionado a los niveles de arsénico, cadmio y cobre, todas ellas en la parte alta de la cuenca del río Elqui (Fundación Chile, 2018). Se destaca que en el río Elqui, la concentración promedio de arsénico de las últimas décadas es 1,705 [µg/L], valor que supera ampliamente el nivel establecido por la norma NCh1333. Este alto valor se atribuye al desarrollo de la minería de oro en la cuenca, actividad intensiva desde la década de los 80 (IANAS, 2019).

La región de Valparaíso presenta 11 estaciones con calidad insuficiente, principalmente por arsénico. También se han encontrado valores altos de cobre, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y mercurio. Sin embargo, en general las estaciones de la región presentan una buena calidad⁴.

Para la Región Metropolitana, en todas las épocas del año predomina la calidad regular asociada a la DQO como parámetro principal, sin embargo, en algunas épocas se presenta una calidad insuficiente, producto del contenido de arsénico, que se encuentran en el río Mapocho y en el río Maipo (Fundación Chile, 2018).

La zona sur del país, desde el Maule hasta Magallanes, tiene una clara dominancia de buena calidad. Sin embargo, existen estaciones particulares que tienen calidad insuficiente en la zona sur (Fundación Chile, 2018). La concentración de nitrógeno y fósforo se ha incrementado 6 y 9 veces, respectivamente, desde la época previa a la industrialización, en los principales ríos del mundo. Los ríos de las zonas centro y sur de Chile no escapan a esta tendencia y el creciente aporte de nitrógeno y fósforo afecta la calidad del agua y acrecienta el proceso de eutrofización. Como ejemplo de lo anterior, la concentración promedio de nitrógeno que se presenta en el río Rapel es la más elevada debido a la intensa actividad de industrias agroalimenticias, agrícolas y al fuerte incremento del turismo en la zona y densidad poblacional. Sin embargo, el mayor incremento en los últimos años lo presentan los ríos Biobío, Bueno, y Valdivia (IANAS, 2019). En relación y complemento de lo descrito en los párrafos anteriores, en la tabla 5 se muestra un resumen de datos para la calidad de aguas en 12 ríos de la zona centro-norte.

Tabla 5: Promedio histórico de concentraciones para algunos parámetros en 12 ríos de las zonas Norte y Centro de Chile.

Cuencas	As [mg/L]	Cu [mg/L]	Cr [mg/L]	Hg [mg/L]	Cd [mg/L]	Mo [mg/L]	Pb [mg/L]	SO ₄ ⁻² [mg/L]
Copiapó	0,484	0,077	0,060	0,148	0,077	0,060	0,148	0,484
Huasco	0,010	0,123	0,031	0,006	0,093	0,060	0,292	0,360
Los Choros	0,176	-	0,060	0,817	-	0,060	0,817	0,176
Elqui	1,705	6,082	0,026	0,003	0,028	0,070	0,147	0,446
Limarí	0,006	0,041	0,030	0,003	0,035	0,060	0,060	0,077
Choapa	0,014	0,078	0,025	0,004	0,043	0,138	0,063	0,111
Petorca	0,182	0,043	0,054	0,003	-	0,063	-	0,053
Ligua	0,054	-	0,068	-	-	0,068	-	0,054
Aconcagua	0,132	0,789	0,025	0,087	-	0,175	0,080	0,115
Maipo	0,012	1,293	0,055	0,009	0,035	0,463	0,167	0,216
Rapel	0,119	0,045	0,215	0,281	0,045	0,215	0,281	0,119
NCh 1333. of 78	0,100	0,200	0,100	0,001	0,010	0,010	5,000	0,250

Fuente: Adaptado de (IANAS, 2019).

Resulta entonces necesario, que las aguas extraídas de estos ríos pudiesen ser tratadas para su posterior uso en agricultura. Además, también son usadas por industrias y para consumo potable, en las cuales según su requerimiento también se debería implementar los tratamientos de agua adecuados para su posterior uso según corresponda.

⁴ En los Anexos 10 y 11 se presentan los resultados del informe “Radiografía del Agua” de la Fundación Chile en el cual se evaluó la calidad de aguas a través del Índice de Calidad de Aguas Superficiales (ICAS).

2.2 Fuentes hídricas alternativas

Debido a la necesidad de buscar nuevas fuentes hídricas para abastecer la demanda para los distintos sectores en nuestro país, han surgido potenciales alternativas para enfrentar esta problemática. En este capítulo se revisará las tecnologías de tratamiento y el desarrollo internacional y nacional relacionado a las potenciales alternativas hídricas en estudio y que puedan ser aplicadas en la zona centro-norte, correspondientes al reúso de aguas residuales y la desalación de agua de mar. De manera adicional, se abordarán otras potenciales alternativas como la recarga de acuíferos y el trasvase de cuencas.

2.2.1 Reúso de aguas residuales

Los sistemas de reúso han adquirido amplia aceptación en diferentes regiones del mundo, sobre todo en las zonas áridas y semiáridas, pero también en zonas urbanizadas e industrializadas que tienen un alto consumo de agua el cual incrementa la presión sobre el recurso hídrico. Para esta alternativa es indispensable el uso de plantas de tratamiento con procesos que permitan obtener una calidad adecuada, la cual dependerá del destino en que se vuelvan a emplear estas aguas.

Las distintas tecnologías de tratamiento actuales permiten obtener una calidad de agua para un posterior uso tanto productivo, de abastecimiento o de mitigación en las distintas zonas que se encuentren en una situación de déficit hídrico. Estas tecnologías deben asegurar el cumplimiento de la normativa de descarga y las exigencias ambientales según sea el caso.

Los procesos de tratamiento de las tecnologías empleadas se pueden clasificar según lo siguiente:

- **Tratamiento primario**

Corresponde a procesos de tipo físicos y químicos. Permiten la reducción de sólidos en suspensión y acondicionar el agua para el tratamiento secundario. Los procesos físicos corresponden a la remoción de sólidos gruesos, el desarenado que consiste en la separación de partículas pequeñas de alta densidad, la sedimentación para remoción de sólidos en suspensión entre 1 mm y 1 m, y la flotación que consiste en la remoción de grasas y aceites. De los procesos químicos estos consisten en reacciones de coagulación y floculación que alteran las propiedades fisicoquímicas de las partículas para fomentar la aglomeración de partículas que posteriormente serán decantadas (Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales, 2017).

- **Tratamiento secundario**

Estos procesos tienen como objetivo principal la degradación de materia orgánica mediante procesos biológicos para reducir la demanda de oxígeno disuelto. En general, se utilizan procesos artificiales aeróbicos y anaeróbicos, también existen otros que contemplan el uso de humedales artificiales, biodiscos y lombrifiltros. El proceso aeróbico es un mecanismo de remoción de materia orgánica mediante el uso de microorganismos aeróbicos, los que requieren de aireadores que permitan la incorporación de oxígeno, por lo que se caracteriza por tener un consumo eléctrico elevado.

El proceso anaeróbico es un mecanismo de remoción de materia orgánica mediante reacciones bioquímicas que generan biogás en ausencia de oxígeno. Estos compuestos gestionados correctamente pueden generar energía. Posee un bajo tiempo de retención hidráulico y una alta tasa de producción de biogás (Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales, 2017).

A continuación, se muestran algunos tratamientos de tipo secundario aeróbicos:

Tabla 6: *Tratamientos secundarios aeróbicos.*

Tratamiento	Descripción
Lodos Activados	Tratamiento en el que se somete las aguas residuales a una aireación para reducir el contenido de materia orgánica formándose un lodo floculento.
Lagunas aireadas	Lagunas profundas en las que se oxigena las aguas mediante aireación. En estas no se recicla el lodo
MBR	Sistema en los que el agua pasa por un biorreactor en el que una suspensión concentrada de microorganismos degrada los contaminantes presentes en el agua, los cuales posteriormente son retenidos en un sistema de membranas.
Humedales Artificiales	Sistema de depuración de agua compuesto por vegetación, un medio de soporte filtrante. La presencia de microorganismos y la acción de la vegetación permiten depurar el agua eliminando gran cantidad de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos productos químicos tóxicos.

Fuente: Adaptado de (Cortina, 2005) y (Fundación Chile, 2019).

- Tratamiento terciario

En los casos donde los tratamientos primarios y secundarios no alcancen la calidad de agua requerida, existen los procesos de tratamiento terciarios, los cuales, mediante tecnologías de tratamiento específicas, logran alcanzar estándares de calidad más específicos, eliminando contaminantes que el tratamiento secundario no pudo eliminar (Comisión Nacional de Riego, 2007). Algunos procesos que participan del tratamiento terciario se mencionan a continuación.

Tabla 7: *Tratamientos terciarios.*

Tratamiento	Descripción
Adsorción en carbón activo	Remueve iones, en particular As, con alta eficiencia, y plaguicidas mediante la adsorción.
Intercambio iónico	Remueve con gran eficiencia iones en concentraciones pequeñas mediante mecanismos de adsorción por resinas.
Cloración	Proceso de desinfección de agua residual mediante hipoclorito.
Luz ultravioleta	Remoción de bacterias por daño en sus genes usando rayos UV.
Filtración por cartucho	Remoción por exclusión de bacterias y partículas sólidas.
Nanofiltración	Remoción de sustancias orgánicas, micro contaminantes, algunos iones multivalentes, entre otros, mediante la exclusión por membrana.
Microfiltración y Ultrafiltración	Remoción por exclusión de microorganismos para ambos y partículas/plaguicidas respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Comisión Nacional de Riego, 2007).

2.2.1.1 *Tecnologías de tratamientos secundarios*

Las tecnologías de tratamiento para aguas servidas mayormente utilizadas en Chile corresponden a lodos activados, con un 63% respecto al total de sistemas. Por otro lado, el número de sistema en base a lagunas aireadas es de un 18%. Además, los sistemas de emisarios submarinos equivalen a un 11% respecto al total, siendo estos últimos un tratamiento primario (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2019).

A continuación, se describen algunas de las alternativas de tratamiento secundarios correspondientes a procesos biológicos y que serán comparadas para los casos de estudio que se proponen: Lodos Activados (LA), Reactores biológicos de Membrana (MBR) y Humedales Construidos (HC).

➤ Lodos Activados:

Corresponden a los procesos de mayor aplicación en el mundo para el tratamiento de las aguas servidas. Los sistemas de lodos activados tienen la particularidad de abordar tanto el tratamiento del agua como del lodo producido, lo que permite un buen nivel de control y otorgan flexibilidad operacional para enfrentar situaciones eventuales adversas de carga orgánica, caudal o de clima que pudieran presentarse y afectar a los sistemas de tratamiento dada su condición biológica.

El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales se ponen en contacto con una población microbiana en forma de suspensión floculenta en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal son eliminadas rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos, los cuales en una tercera etapa se separan del agua (sedimentación) para posteriormente pasar a una etapa de filtración y desinfección. Los sistemas de lodos activados más empleados son aireación extendida y convencionales (Fundación Chile, 2019).

• Lodos Activados Convencionales:

Esta tecnología se basa en la estabilización biológica de la materia orgánica mediante un reactor que opera en condiciones aeróbicas, al cual se le otorga aireación por medio de difusores o sistemas mecánicos. Una vez que el agua residual ha sido tratada en el reactor, la masa biológica resultante se separa del líquido en un tanque de sedimentación y parte de los sólidos sedimentados son retornados al reactor mediante un sistema de recirculación de lodos; la masa de lodos excedentes es eliminada para su posterior espesado, estabilización y deshidratación previa a su disposición final.

Una de las características principales radica en que es posible controlar adecuadamente el proceso gracias, entre otras cosas, a la posibilidad de ajustar la concentración de microorganismos en el reactor lo que es posible mediante la extracción continua de los lodos producidos. Dentro de esta tecnología es posible encontrar una serie de modalidades y configuraciones que otorgan a estos sistemas gran flexibilidad de aplicación.

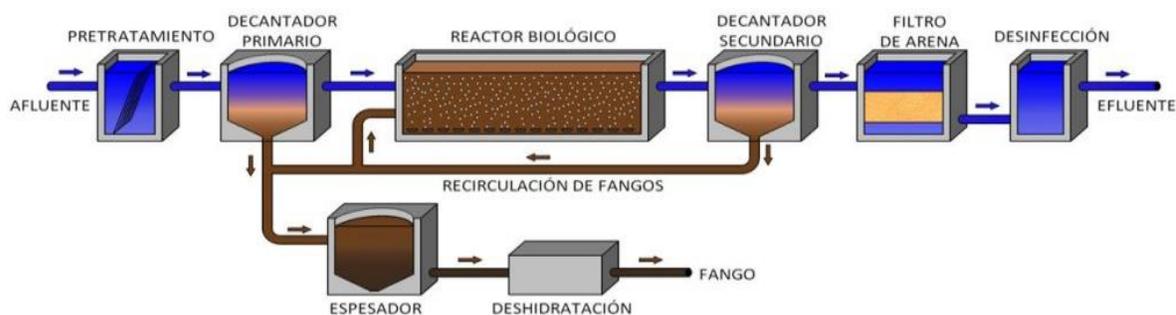


Figura 4: Esquema planta de tratamiento de aguas mediante Lodos activados convencionales (Lopez, 2012).

- Lodos Activados en Modalidad Aireación Extendida (LA-AE)

Los sistemas de LA-AE tienen como principal característica una menor complejidad operativa comparada con un sistema de lodos activados convencional, dado que las aguas y los lodos se tratan en las mismas unidades de proceso del agua, no requiriendo de un digestor de lodos, y tampoco utilizan la fase de sedimentación primaria, haciendo aún más simple el proceso de tratamiento.

Estos sistemas operan con una edad de lodos alta, superior a 20 días y, por lo tanto, en el mismo proceso de tratamiento del agua se produce buena parte del proceso de estabilización del lodo, de modo tal que no se requiere considerar unidades de digestión aerobia o anaerobia adicionales. La línea de aguas está compuesta básicamente por los procesos de tratamiento preliminar, reactores biológicos y desinfección, mientras que la línea de lodos consiste en un espesamiento gravitacional de lodos, almacenamiento y mezcla con aireación de lodos, deshidratación y disposición final de lodos deshidratados (Econssa Chile, 2013).

- Reactores biológicos de membranas

Los reactores biológicos de membranas (MBR) consisten en un reactor donde la biomasa aerobia permanece en dispersión en presencia de oxígeno junto con el agua a tratar.

En el sistema del biorreactor se degrada la materia orgánica, seguido por las membranas que separan los sólidos mediante filtración. El uso de membranas en vez de clarificadores tiene como consecuencia un lodo activado con mayor concentración de biomasa lo que permite el uso de biorreactores más pequeños. En este sistema se sustituye el decantador secundario y el tratamiento terciario por unidades de membrana de ultrafiltración (tamaño de poro entre 0,005 y 0,1 μm) o de microfiltración (tamaño de poro entre 0,1 y 1 μm), para producir un efluente libre de sólidos en suspensión microorganismos (Vazquez, 2015). El pequeño tamaño de los poros permite que el efluente tratado tiene una claridad muy alta.

Una ventaja significativa es que los lodos quedan completamente retenidos en el biorreactor. Esto significa que el tiempo de retención de sólidos (SRT) en el biorreactor se puede controlar independientemente del tiempo de retención hidráulica (HRT) (The MBR Site, 2021).

La retención de sólidos en el reactor y el aumento de SRT para generar mayores concentraciones de sólidos de biomasa, significa que la misma masa total de sólidos está contenida en un volumen más pequeño, por lo que permite reducir el tamaño de la instalación.

Los MBR se están convirtiendo cada vez más en la tecnología de elección para aplicaciones de aguas residuales donde se requiere agua tratada de alta calidad o donde hay espacio limitado. Su carácter modular posee flexibilidad en la elección de configuraciones de membrana lo cual permite obtención de efluentes de calidades equiparables a las obtenidas tras un tratamiento terciario (Fundación Chile, 2019). El volumen del reactor MBR es entre 2 y 5 veces inferior al del sistema convencional, para la misma carga másica de trabajo. Las concentraciones típicas de un sistema aerobio convencional están entre 2 y 6 kg/m³, ya que a concentraciones mayores no se consigue decantar todo el fango. En un MBR se puede llegar hasta 20-30 kg/m³ (Yamamoto & Muang, 1991) aunque los valores óptimos de concentraciones de biomasa para MBR se encuentran entre 8 y 12 kg/m³ (Judd & Judd, 2006).

Las ventajas que ofrece el proceso MBR han llevado a su implantación con instalaciones cada vez mayores. En 2004 había dos plantas de más de 40 MLD (millones de litros diarios). La primera planta de 100 MLD se puso en servicio en 2007. Para 2016, había más de treinta plantas de capacidad de 100 MLD instaladas en todo el mundo, principalmente en China. Para 2019, esta cifra se había más que duplicado.

Dentro de la tecnología de los MBR se distinguen tres modalidades: biorreactores con membrana externa, biorreactores con membrana interna sumergida y biorreactores con membrana externa sumergida (figura 5). Las membranas sumergidas se introducen en el reactor biológico o en un depósito anexo, con el fin de disminuir el consumo de energía necesario y de facilitar los procesos de operación sin acumulación de sólidos en la superficie de las membranas. El consumo de energía se reduce considerablemente comparado con el de membranas externas, ya que la presión aplicada es mucho menor que la requerida para el permeado por flujo cruzado y que no se emplea recirculación lo que lo convierte en el método más viable para su aplicación a gran escala (Van der Roest, Lawrence, & Van Bentem, 2002).

Los biorreactores de membrana tienen una serie de ventajas sobre otras tecnologías de aguas residuales, aunque esto no quiere decir que siempre sean la opción óptima y hay una serie de factores para tener en cuenta.

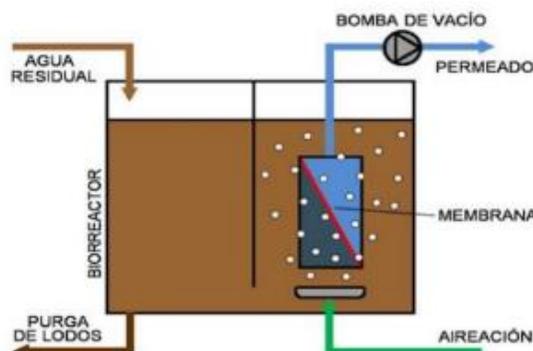


Figura 5: Reactor biológico de membrana externa sumergida (Lopez, 2012).

➤ Humedales Construidos

Los humedales naturales son ecosistemas acuáticos, que cumplen múltiples funciones tales como captación y reciclaje de nutrientes, generación de hábitats, estabilización de costas, control y amortiguación de inundaciones, recarga de aguas subterráneas, entre otras. Así también, cumplen un rol importante en el tratamiento de agentes contaminantes en el agua. Esto ha permitido el desarrollo de sistemas artificiales que emulen estas funciones, creando humedales construidos, para el tratamiento de efluentes de origen urbano como industrial (Plaza de los Reyes & G., 2007).

El proceso de depuración en estos sistemas utiliza conceptos hidráulicos, microbiológicos y/o biológicos para simular y controlar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales. Su diseño se basa principalmente en el uso de plantas macrófitas emergentes, flotantes y/o sumergidas, dispuestas en lagunas, canales o zanjas a una profundidad inferior a 1 metro; y en la introducción de parámetros climáticos tales como precipitaciones, temperatura y radiación.

La compleja interacción entre los distintos componentes de estos sistemas (sustrato, columna de agua, vegetación y microorganismos) condicionan el grado de depuración que pueden ser alcanzado (Stottmeister, y otros, 2003). El sustrato (suelo, tierra o grava) constituye un material de soporte para el crecimiento de las plantas y la formación de biopelículas. La columna de agua permite el transporte de sustancias y gases, lo que proporciona un ambiente óptimo para el desarrollo de procesos biogeoquímicos para plantas y bacterias. Las plantas, en tanto, desempeñan funciones tales como airear el sistema radicular y proporcionar oxígeno a los microorganismos que habitan en la rizosfera, eliminación de contaminantes mediante procesos de asimilación y/o fijación, y filtración de sólidos a través de su sistema radicular (Gersberg, Elkins, Lyon, & Goldman, 1986).

Finalmente, los microorganismos (bacterias, hongos, algas y protozoos) degradan las sustancias contaminantes presentes en los efluentes para obtener nutrientes y/o energía necesaria para sus ciclos de vida (Hammer, 1992).

De acuerdo con el tipo de humedal que se instale según tipo de flujo, al medio de soporte y la vegetación que se utilice, en los humedales pueden ocurrir distintos procesos que se detallan a continuación.

- Fitoextracción: la vegetación absorbe los contaminantes a través de sus raíces.
- Fitoestabilización: las raíces y los microorganismos de la planta retienen los contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante la unión de estos a las partículas del suelo o procesos de precipitación y sorción en raíces.
- Fitodegradación: degradación de contaminantes orgánicos debido al contacto con enzimas liberadas por las raíces mediante actividad metabólica dentro de tejido vegetal.
- Fitovolatilización: algunas especies de plantas pueden extraer contaminantes desde el medio de soporte y luego liberarlo a través de sus hojas a la atmosfera.
- Fitofiltración: las raíces extraen contaminantes a través de procesos de adsorción. También ocurre precipitación de contaminantes en la rizosfera.

Esta alternativa puede ser factible para diferentes necesidades de tratamiento de aguas residuales con respecto al tratamiento de algunos contaminantes como metales pesados, materia orgánica, surfactantes, sólidos suspendidos, entre otros, pero una de sus principales limitantes a considerar es que necesitan una superficie entre 20 y 80 veces superior comparados con tecnología convencionales de tratamiento (Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales, 2017). Por lo general, se emplea como tratamiento secundario o incluso terciario siempre a continuación de un tratamiento primario como la sedimentación primaria convencional o una laguna anaerobia (Fundación Chile, 2019).

De acuerdo con la dirección de flujo y la posición del nivel de agua, los humedales construidos se clasifican principalmente en tres tipos: a) flujo horizontal superficial (HS); b) flujo horizontal subsuperficial (HSS); c) flujo vertical subsuperficial (HV) (Vera, Jorquera, López, & Vidal, 2016).

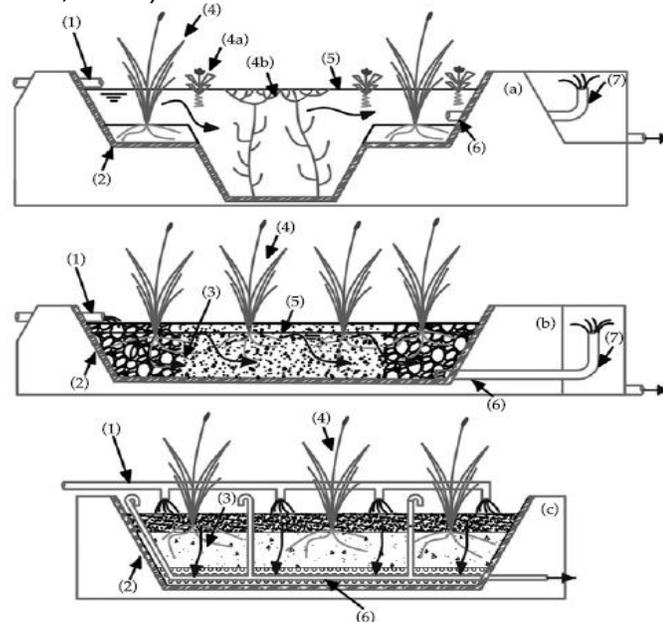


Figura 6: Tipos de humedales construidos y componentes: (a) flujo horizontal superficial (HS); (b) flujo horizontal subsuperficial (HSS); (c) flujo vertical (HV); (1) tubería influente; (2) impermeabilización; (3) medio de soporte; (4) vegetación emergente (5) nivel de agua (6) tubería efluente (Vera, Jorquera, López, & Vidal, 2016).

2.2.1.2 **Experiencia internacional y nacional**

El reúso de aguas residuales tratadas es una práctica cada vez más habitual en el mundo, especialmente en países desarrollados que cuentan con sistemas de tratamiento adecuados que permiten generar aguas de calidad suficiente para ser reutilizadas. Esto se ha desarrollado en países como Israel, Singapur, Estados Unidos y Australia, entre otros, los que hoy llevan a cabo experiencias de reúso en grandes magnitudes debido al estrés hídrico. Para ello han debido generar cambios relacionados con el financiamiento de los sistemas depuradores, elaborar estándares de calidad de acuerdo con el uso que se le dé al recurso, y establecer marcos regulatorios (Fundación Chile, 2018).

Las principales categorías de reúso del agua residual tratada se presentan en la tabla 8, en orden descendiente de acuerdo con el volumen de consumo.

Tabla 8: Categorías de reúso del agua y sus aplicaciones típicas.

Categoría	Aplicación típica
Agricultura/irrigación	Riego de cultivos y viveros comerciales
Riego de Jardines	Parques y campos de golf
Industrial: Reciclado y reúso	Agua de enfriamiento y para procesos industriales
	Construcción pesada
Recarga de acuíferos	Aumento de nivel y control de agotamiento
Recreacional/ usos ambientales	Lagos y lagunas, pesca
	Aumento de caudales
Reúso potable	Mezcla en el agua de abastecimiento en los reservorios

Fuente: (Comisión Nacional de Agua, 2015).

La aplicación más utilizada para las aguas recuperadas corresponde al riego de productos agrícolas. A continuación, en la tabla 9, se muestran algunos ejemplos de uso agrícola en distintos países.

Tabla 9: Uso agrícola para aguas reusadas en distintos países.

Localidad	Uso del agua Regenerada
Victoria, Australia	Riego de Viñedos, tomates, papas, otros cultivos y jardines.
Chipre	Utilizan el 90% del agua regenerada disponible en el país en el riego de árboles cítricos, Olivos y cultivos forrajeros.
Israel	Riego de árboles áreas verdes, árboles frutales y sector agrícola. El 2005 el reúso alcanzo los 350 millones de m ³ , los cuales 216 millones fueron entregados al sector agrícola.
Ciudad de México	Agricultura, riego de áreas verdes y recarga de lagos recreacionales. Uso aprox. De 2 m ³ /s de agua regenerada.
California, USA	En 2009 se reutilizaron 82,5 millones de m ³ , destinando un 37% a la agricultura y un 17% al riego de áreas verdes

Fuente: (Fundación Chile, 2016)

No sólo la industria agrícola utiliza como fuente las aguas residuales tratadas. Por ejemplo, en Durban, Sudáfrica, se producen aproximadamente 47.000 [m³/día] de aguas residuales las que son reusadas en aplicaciones industriales. La empresa Mondi Group utiliza agua de reúso para la producción de papel fino y el cual es extremadamente sensible a la calidad del agua procesada por su impacto en el brillo.

En Singapur, se ha desarrollado e implementado una política integral, denominado las "Cuatro Grifos Nacionales", que incluye una planta de agua regenerada NEWater, la que fue construida para recibir y tratar las aguas residuales a un nivel que puedan ser reutilizadas en la industria del país. Durante 2012, la capacidad total de las industrias de NEWater fue de 554.600 [m³/día], con una proyección para el 2020 de 873.000 [m³/día]. Al año 2016 NEWater cubría aproximadamente un tercio de la demanda del país y se proyecta que para el 2060 aumente a la mitad de la demanda total (Fundación Chile, 2016).

Por último, cabe destacar que en los países en que se ha logrado viabilizar intensivamente el reúso de estas aguas, como Israel, se paga un valor más alto por cada metro cúbico que se extrae de un acuífero, un curso de agua superficial o un embalse, que por un metro cúbico de agua servida tratada (Asociación Interamericana De Ingeniería Sanitaria y ambiental, 2016).

- Situación nacional sobre reúso

Actualmente se reutilizan de manera indirecta las aguas residuales tratadas provenientes de los sistemas de tratamientos urbanos que descargan sus aguas a cuerpos superficiales. En Santiago se estima un total de 3,7 [m³/s] de aguas reutilizadas para el riego de diversos cultivos como árboles frutales y uva vinífera, sin embargo, no se realiza de manera formal o regulada. En la región de Tarapacá se reúsan poco más de 30 [L/s] para riego agrícola en las localidades de Pozo Almonte, Huara, Pica y La Tirana. En Antofagasta desde el año 1971 se reúsan alrededor de 120 [L/s] para el sector industrial y riego provenientes de un tratamiento de lodos activados.

Un caso oficial es el reúso del efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas domésticas de Cerrillos de Tamaya, en la región de Coquimbo, para uso agrícola en una zona aledaña a la planta. Este sistema fue implementado a partir de la planta de tratamiento ya existente y que ocupa un terreno de 1000 m². La localidad posee un sistema de alcantarillado que transporta las aguas servidas domiciliarias de aproximadamente 2.900 habitantes hacia la PTAS de Cerrillos de Tamaya, generando un caudal de aguas servidas tratadas constante de aproximadamente 6 [L/s]. La planta es un sistema de tratamiento secundario de lodos activados y el efluente generado por la PTAS de Cerrillos de Tamaya cumple con la norma de emisión establecida en la tabla 1 del Decreto Supremo 90/2000, la cual regula las descargas de residuos líquidos a cuerpos o masas de aguas superficiales y marinas (Fundación Chile , 2018).

Otro caso de uso de agua residual se desarrolló en la región de Atacama, por parte de la empresa sanitaria Aguas Chañar. El déficit de la región en cuanto a disponibilidad del recurso hídrico impulsó a esta empresa, en 2008, a concretar la venta de aguas servidas tratadas a la Compañía Minera Candelaria. Estas aguas fueron transportadas, a través de acueductos a un estanque de acumulación de agua de proceso de la Compañía Minera Candelaria, a un caudal de 175 [L/s] (Fundación Chile , 2018).

El proyecto más reciente de reúso de aguas servidas es la “Nueva Planta de Tratamiento de Agua Servidas para reúso en Antofagasta”. Este contempla la construcción de una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), en donde actualmente convergen el sistema de pretratamiento de las aguas servidas de Antofagasta; el sistema de impulsión para el emisario submarino de Antofagasta que puede descargar con una capacidad máxima de 1.500 [L/s] y una PTAS con un tratamiento aproximado de 120 [L/s]. El futuro emplazamiento de la nueva PTAS contempla una conducción por un tramo aproximado de 14 km y cuatro Plantas Elevadoras de Aguas Servidas (PEAS). Además en este sistema se contemplan dos conducciones de aguas servidas tratadas desde la nueva PTAS hasta el sector de La Negra y otra hacia Mantos Bancos, con trazados de casi 27 km cada uno. La PTAS se contempla construir en tres módulos, capaz de tratar 300 [L/s] cada uno, con una capacidad total de tratamiento de 900 [L/s] en su etapa final (Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A, 2019).

2.2.2 Desalación de agua de mar

Al año 2019, se registraban más de 15 mil plantas desaladoras de agua de mar en el mundo, que en total operaban una capacidad total de desalación de aproximadamente 95,37 millones de m³/día. Las primeras plantas de desalinización utilizaban predominantemente tecnologías térmicas, ubicadas en regiones ricas en petróleo, pero con escasez de agua, especialmente en el Medio Oriente. Por ejemplo, antes de la década de 1980, el 84% de toda el agua desalinizada mundial se producía mediante las dos principales tecnologías térmicas, flash multietapa (MSF) y destilación multiefecto (MED). El aumento en el uso de tecnologías de membranas después de 1980, en particular la ósmosis inversa (OI, RO en inglés), desplazó gradualmente el dominio de las tecnologías térmicas. En el año 2000, los volúmenes de agua desalada producida por tecnologías térmicas (dominadas por MSF) y ósmosis inversa eran aproximadamente 11,6 millones de m³/día y 11,4 m³/día respectivamente, representando en conjunto el 93% del volumen total de agua desalada producida en el mundo.

Desde el año 2000, tanto el número como la capacidad de las plantas de ósmosis inversa ha aumentado significativamente, mientras que las tecnologías térmicas solo han experimentado aumentos menores. La producción actual de agua desalada por ósmosis inversa asciende a 65,5 millones de m³/día, lo que representa el 69% del volumen de agua desalada producida (Jones, Qadir, Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019)

A continuación, en la figura 7 se muestra el crecimiento de las principales tecnologías de desalación de agua de mar desde la implementación de las primeras plantas. En esta se identifica el gran crecimiento de la OI como también el crecimiento de otras alternativas de tratamiento: MSF, MED y electrodiálisis.

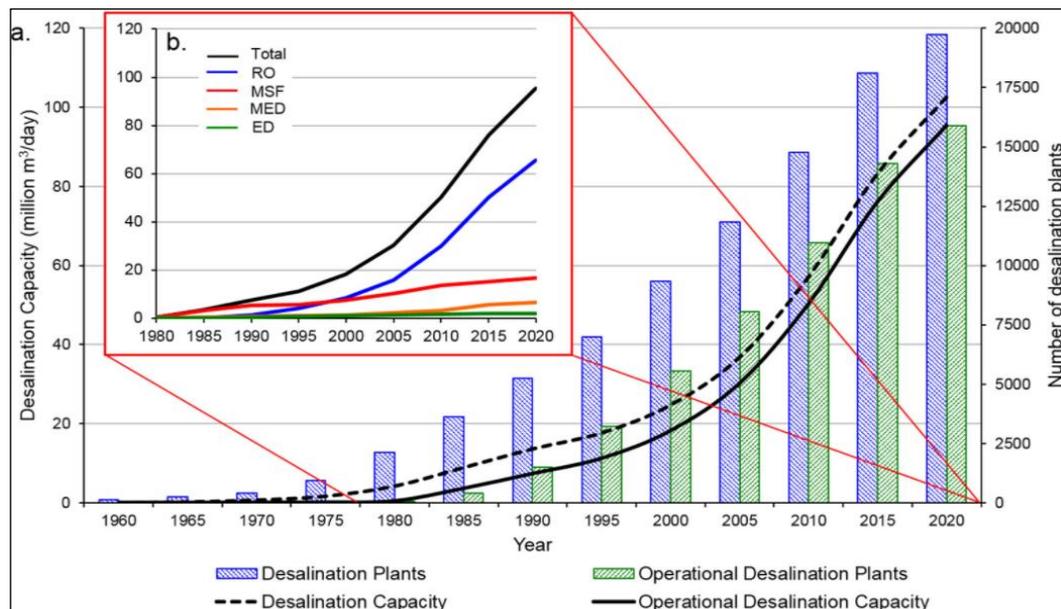


Figura 7: Tendencias en la desalación mundial por (a) número y capacidad de instalaciones de desalación totales y operativas y (b) capacidad operativa por tecnología de desalación (Jones, Qadir, Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019)

Las plantas desaladoras requieren de un pretratamiento, lo cual es una parte fundamental del proceso de desalación, y su diseño condiciona de una manera muy importante los costos de mantenimiento de la planta. El proceso de pretratamiento tiene el objetivo de adecuar las características fisicoquímicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos. Respecto a lo último se busca reducir al máximo posible el riesgo de atascamiento de las membranas por acumulación de sustancias, materiales y microorganismos sobre su superficie.

Entre algunos de los procesos de pretratamiento que permiten cumplir las funciones anteriores y que son más utilizados en las plantas de membranas son los siguientes: dosificación de inhibidores de la incrustación, coagulación-floculación, decantación, flotación, filtración por lecho filtrante, filtración por cartuchos y adsorción.

En cuanto a los procesos de desalación por destilación, el objetivo del pretratamiento es eliminar o reducir al máximo posible el riesgo de precipitación de sales insolubles en las superficies de intercambio de calor, y la eliminación de gases no condensables capaces de reducir el coeficiente de transmisión de calor, y provocando serios problemas de corrosión en los evaporadores y en los equipos de la planta (AEDYR, AQUAESPAÑA, AEAS, TRAGSATEC, 2009).

2.2.2.1 Tecnologías de tratamiento

La desalación es el proceso en el cual se busca la separación de minerales disueltos y otras sustancias contenidas en las aguas salobres o marinas, para convertir un producto de agua adecuada para el consumo humano, agua apta para uso industrial o agrícola. A continuación, se describen algunas alternativas para el proceso de desalación mediante membranas y de tipo térmicas.

- Tecnologías de membrana

Estas tecnologías consisten en la aplicación de membranas de filtración para separar algunos componentes del agua.

Osmosis inversa (OI): Consiste en la difusión de agua a través de una membrana semipermeable desde una solución de alta concentración de sólidos disueltos totales (SDT) a una de baja concentración, mediante el aumento de presión aplicada por una bomba. Su rango de aplicación es entre 50 - 46000 mg/l de salinidad (Fraunhofer, 2017). El sistema intentará alcanzar el equilibrio, es decir, intentará alcanzar la misma concentración a ambos lados de la membrana. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones. La ósmosis inversa consiste en invertir este proceso aplicando una presión superior a la presión osmótica correspondiente. A continuación, se muestra la configuración para los procesos de osmosis y osmosis inversa.

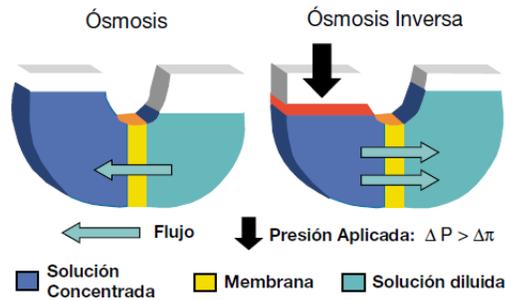


Figura 8: Esquema general de la osmosis natural y osmosis inversa (AEDYR, AQUAESPANA, AEAS, TRAGSATEC, 2009)

Nanofiltración (NF): Es una tecnología de filtración mediante membrana de ultra y baja presión logrando un grado de retención molecular entre 0.001 – 0.01 mm por lo cual los solutos de bajo peso molecular son retenidos pero las sales pasan total o parcialmente a través de la membrana. Su aplicación resulta útil como pretratamiento de osmosis inversa de agua de mar. La nanofiltración produce un rechazo de sal del 80% menos y de dureza suele superar el 90% (Fundación Chile, 2019).

- Tecnologías térmicas

En estas se aplica la destilación del agua salada mediante la aplicación de calor, la disminución de la presión, o una combinación de ambas.

Destilación solar (SD): Proceso que a partir de la radiación solar y de la evaporación y condensación de agua, obtiene agua pura. Al utilizar la radiación solar como fuente energética es una técnica que aporta grandes ahorros económicos, en cuanto al consumo de electricidad y petróleo (Fundación Chile, 2019).

Flash multietapa (MSF): Proceso que evapora el agua mediante el aumento de la temperatura y la disminución de presión, para luego condensarla. Este proceso tiene varias etapas, y el vapor producido se utiliza para aumentar la temperatura del agua de alimentación, para reducir la cantidad necesaria de calor en la primera etapa. Este proceso es el más utilizado a lo largo del mundo, pero también es uno de los que utiliza más energía, por lo que es solo factible para países con energía a bajo costo (Fraunhofer, 2017).

Destilación multiefecto (MED): Consiste en la evaporación del agua de mar, condensación del vapor obtenido y recuperación del calor latente de condensación del vapor para calentar más agua de mar, que vuelve a ser evaporada. El vapor producido, pasa a través de unos separadores de gotas, para extraer las gotas de salmuera que pueda arrastrar, y entra en el interior de los tubos del siguiente efecto donde se condensará, evaporando igualmente una parte del agua de mar que está siendo rociada por el exterior de los tubos. Este proceso se va repitiendo de efecto en efecto, reduciéndose cada vez más la temperatura a la que tiene lugar y por tanto, disminuyendo así mismo la presión correspondiente en el interior de cada efecto, hasta llegar al último que es el condensador final (AEDYR, AQUAESPANA, AEAS, TRAGSATEC, 2009).

2.2.2.2 *Experiencia internacional y nacional*

Las plantas que producen agua para consumo humano están ubicadas en todo el mundo, pero son particularmente dominantes en la región de Medio Oriente y África del Norte. Por otra parte, hay una gran cantidad de plantas desalinizadoras que producen agua para otros fines en América del Norte, Europa Occidental y las regiones de Asia Oriental y el Pacífico.

En la tabla 10 se resume las plantas desaladoras a nivel mundial mostrando su cantidad, la capacidad y el uso según sector para las aguas tratadas.

Tabla 10: *Número, capacidad y participación global de plantas desaladoras operativas por región y uso del sector.*

	Número de plantas desaladoras	Capacidad de desalación	
		(millones de m ³ / día)	(%)
Global	15,906	95,37	100
Oriente Medio y África del Norte	4826	45,32	47,5
Asia oriental y el Pacífico	3505	17,52	18,4
América del norte	2341	11,34	11,9
Europa Oriental	2337	8,75	9,2
América Latina y el caribe	1373	5,46	5,7
Asia meridional	655	2,94	3,1
Europa del Este y Asia Central	566	2,26	2,4
África Sub-sahariana	303	1,78	1,9
Uso del sector			
Municipal	6055	59,39	62,3
Industria	7757	28,80	30,2
Energía	1096	4,56	4,8
Irrigación	395	1,69	1,8

Fuente: (Jones, Qadir, Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).

El número y la capacidad de las plantas desaladoras por región geográfica y uso sectorial de agua desalada se encuentra principalmente en la región de Medio Oriente y África del Norte (47,5%), siendo Arabia Saudita (15,5%), los Emiratos Árabes Unidos (10,1%) y Kuwait (3,7%) los principales productores de la región y a nivel mundial. Las regiones de Asia oriental, el Pacífico y América del Norte producen el 18,4% y el 11,9% del agua desalinizada mundial, principalmente debido a las grandes capacidades en China (7,5%) y EE. UU. (11,2%). El uso generalizado de la desalación en España (5,7%) representa más de la mitad de la desalación total en Europa Occidental (9,2%).

Mientras que casi la mitad del número total de plantas desaladoras producen agua para el sector industrial, el sector municipal es el mayor usuario de agua desalada en términos de capacidad. El 62,3% del agua desalada se produce para consumo humano (sector municipal), frente al 30,2% para aplicaciones industriales.

Lo anterior se debe a la menor capacidad de las instalaciones de desalinización industrial, que promedian 3.712 m³/día, en comparación con las plantas de desalinización que producen agua municipal con un promedio de 12,126 m³/día. Los sectores municipal e industrial representan la gran mayoría de la capacidad mundial de desalación, los sectores de energía (4,8%) y riego (1,8%) consumen una pequeña pero significativa proporción de agua desalada producida.

- Situación Nacional:

La alternativa de desalar agua de mar ha tomado mucha relevancia en la última década en nuestro país desarrollándose diversos proyectos destinados principalmente para el uso del recurso en la industria minera. Sin embargo, también se ha recurrido a esta alternativa para abastecer de agua potable a la población de algunas ciudades de la zona Norte. La ciudad de Antofagasta es abastecida en un 90% de agua desalada de mar, Mejillones en un 100% y las ciudades de Chañaral, Caldera, Copiapó y Tierra Amarilla también se están viendo beneficiadas con la planta de la concesionaria estatal ECONSSA la cual produce 1200 l/s de agua potable. A nivel porcentual se espera que el uso de agua de mar para la minería de cobre a nivel regional en el año 2030 sea de un 14% para la región de Tarapacá, un 69% para la región de Antofagasta, un 13% para Atacama y de un 4% para la región de Coquimbo (Comisión Chilena del Cobre, 2019). De acuerdo con información proporcionada por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), los proyectos mineros que desalan agua de mar y que se encontraban en estado de operación al año 2019 se muestran a continuación.

Tabla 11: *Catastro de plantas desaladoras y Sistemas de impulsión de agua de mar (SIAM) en la minería del cobre en operación.*

Propietario	Mina	Región	Etapa De Desarrollo	Capacidad Desalación (L/s)	Capacidad Uso Agua De Mar (L/s)	Longitud Tuberías De Transporte (Km)
ENAMI	Planta J.A. Moreno	II	Operando	-	15	
LAS CENIZAS	Las Cenizas Taltal	II	Operando	9	12	7
MANTOS DE LA LUNA	Mantos de Luna	II	Operando	5	20	8
ANTOFAGASTA MINERALS	Distrito Centinela (Esperanza+ElTesoro)	II	Operando	50	1500	145
CAP Minería	Cap Minería y otros	III	Operando	600	-	120
BHP BILLITON	Escondida - Planta Coloso	II	Operando	525	-	180
ANTOFAGASTA MINERALS	Antucoya	II	Operando	20	280	145
LUNDING MINING	Candelaria	III	Operando	300	-	110
MANTOS COPPER	Mantoverde	III	Operando	120	-	42
KGHM INT.	Sierra Gorda	II	Operando	-	1315	142
BHP BILLITON	Escondida EWS	II	Operando	2500	-	180
LUNDING MINING	Candelaria 2030	II	Operando	agrega 200 *	-	110

*Alcanza los 500 l/s de capacidad que tiene la planta actual. Acuerdo vender a aguas chañar 170 l/s de agua desalinizada para disminuir la presión en el acuífero de Piedra Colgada. Adaptado en base a información de COCHILCO, solicitado por Ley de Transparencia.

Por otra parte, los proyectos en carpeta para la industria minera que contemplan plantas desaladoras de agua de mar ingresados o en construcción al año 2019 se muestran en la tabla 12.

Tabla 12: *Futuros proyectos de plantas desaladoras de agua de mar en la minería.*

Puesta En Marcha	Propietario	Mina	Región	Etapas De Desarrollo	Capacidad Desalación (Lts/Seg)	Capacidad Uso Agua De Mar	Longitud Tuberías (Km)
2020	Antofagasta Minerals	INCO	IV	Construcción	400	-	150
2022	Capstone Mining	Santo Domingo	III	Factibilidad	30	400	112
2020	Copec	Diego de Almagro	III	Factibilidad	-	315	61
2020	Haldeman	Continuidad operacional Michilla	II	Factibilidad	20	70	
2020	Bhp Billiton	Spence Growth Option	II	Construcción	800 (potencial de 1.600)	-	154
2021	Mantos Copper	Desarrollo Mantoverde	III	Factibilidad	agrega 260	-	42
2022	Teck	Quebrada Blanca Hipógeno	I	Factibilidad	850 (potencial de 1.200)	-	160
2022	Codelco-Chile	Planta desaladora Distrito Norte	II	Factibilidad	630 (potencial 1.680)	-	160
2023	Collahuasi	Collahuasi	I	En Calificación	525 (potencial 1.050)		195
2024	Antofagasta Minerals	Distrito Minero Centinela	II	Factibilidad	-	1650	145
2025	FREEPORT McMoran	El Abra Mill Project	II	Sin EIA	500	-	

Fuente: Adaptado en base a información de COCHILCO, solicitado por Ley de Transparencia.

De las tablas 11 y 12, se identifica la región de Antofagasta es donde se espera el mayor desarrollo de esta alternativa. Las operaciones que actualmente utilizan agua de mar son Escondida, Centinela, Antucoya, Michilla, Mantos de la Luna, Las Cenizas Taltal, planta J.A. Moreno (ENAMI) y Sierra Gorda. Además, existen proyectos que planifican el uso de este recurso, entre los que se encuentran una nueva ampliación de la planta desalinizadora de Escondida, actualización de Esperanza y sus posteriores extensiones de red para abastecer el proyecto Encuentro, planta Distrito Norte de Codelco, Concentradora El Abra Project y Spence Growth Project.

En el caso de Tarapacá, el diseño del proyecto Quebrada Blanca Hipógeno o Fase 2, considera el uso de agua de mar desalinizada para su operación. Del mismo modo el proyecto “Collahuasi SxEw” proyecta el uso de agua de mar habilitando dos fases para suplir caudales máximos de 525 y 1.050 [L/s].

Para la región de Atacama los principales proyectos que proponen el uso de agua de mar son la actual planta de Mantoverde y su futura expansión para el proyecto Desarrollo Mantoverde, Candelaria y su expansión Candelaria 2030, actualmente operativa, Santo Domingo de Capstone y el proyecto Diego de Almagro.

En referencia a la región de Coquimbo, el uso de agua de mar está dado principalmente por el desarrollo de la ampliación de Los Pelambres, en el marco del proyecto INCO. La planta desalinizadora tendrá una capacidad de producción de 400 [L/s] de agua desalada de calidad industrial, proyectándose su uso como respaldo en períodos de sequía. A esto se suma el proyecto de Andes Iron, Dominga, el cual también considera el uso de agua de mar para sus procesos (Comisión Chilena del Cobre, 2019).

Por otra parte, los proyectos que contemplan plantas desaladoras y que corresponden a uso industrial o sanitario se muestran en el siguiente registro.

Tabla 13: *Listado de proyectos sanitarios e industriales que contemplan agua desalinizada.*

Proyecto	Uso	Estado	Año	Comuna	Región	Caudal (L/s)
Región de Atacama Etapa III	Sanitaria	EIA Aprobado	-	Caldera	Atacama	1200
Tocopilla	Sanitaria	DIA Aprobado	2019	Tocopilla	Antofagasta	100
Bahía Caldera	Sanitaria	DIA Aprobado	-	Caldera	Atacama	93
Planta Agua potable Atacama	Sanitaria	EIA Aprobado	2018	Caldera	Atacama	1000
Antofagasta (ex Sur Antofagasta)	Sanitaria	DIA Aprobado	2018	Antofagasta	Antofagasta	600
Pisagua	Sanitaria	DIA	2018	Huara	Tarapacá	4
Proyecto Aconcagua	Sanitaria	EIA	2020	Puchuncaví	Valparaíso	1000
Planta Combarbalá	Sanitaria	-	-	Mincha	Coquimbo	37
Planta Cogotí	Sanitaria	-	-	Ovalle	Coquimbo	50
Planta Paloma	Sanitaria	-	-	Ovalle	Coquimbo	50
Planta Pullaly	Sanitaria	-	2019	Papudo	Valparaíso	67
Planta Longotoma	Sanitaria	-	2019	La Ligua	Valparaíso	48
Proyecto Enapac	Industrial	-	2022	Caldera	Atacama	1750
Planta Mejillones	Industrial	DIA Aprobado	-	Mejillones	Antofagasta	9,22

Fuente: Adaptado de (Wiertz, 2018).

De los proyectos mostrados anteriormente, un proyecto innovador es ENAPAC el cual abastecerá de agua de manera multipropósito, el cual consiste en la generación de agua para uso industrial, la cual será almacenada en un reservorio de aproximadamente 592.000 m³ de capacidad mediante dos piscinas de 296.000 m³ cada una. Dicha agua será comercializada a usuarios locales que requieran agua de estas características para su operación y adecuado funcionamiento. El agua de uso industrial será generada en una planta desaladora que se emplazará contigua a la línea de costa. Luego, el caudal será conducido al reservorio mediante un acueducto de 68 km de longitud. Todos los procesos antes mencionados serán provistos de energía generada principalmente en una Planta Fotovoltaica de 100 MW, complementada con energía adquirida a terceros a través del Sistema Interconectado Central (SIC). De lo anterior cabe destacar que el abastecimiento de energía mediante alternativas renovables resulta ser una opción atractiva para la reducción del impacto de huella de carbono producto de la energía requerida en el proyecto.

2.2.3 Otras fuentes alternativas

2.2.3.1 Recarga artificial de acuíferos

La Recarga Artificial de acuíferos (RAA) o también Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG) ha sido reconocida en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica y económica de gran efectividad en el ámbito de la gestión integral de los recursos hídricos.

Los principales objetivos de la recarga artificial pueden ser almacenar agua superficial excedente en acuíferos, trasvasar agua a través del acuífero de un punto a otro sin necesidad de obras de conducción, crear barreras hidráulicas para frenar el descenso del nivel de aguas subterráneas o frenar el avance de la intrusión marina. Las principales ventajas de la implementación de proyectos de recarga artificial son reducir el descenso del nivel del agua producido por sobreexplotación y la utilización del acuífero como embalse regulador natural, aumentando el rendimiento y la regulación de los recursos del agua (División de Estudios y Planificación SDT N°344, 2013).

Mediante el desarrollo de esta alternativa se ha identificado que la tecnología aplicable para realizar la recarga de acuíferos depende de varios factores: el nivel y tipo de acuífero; calidad de las aguas subterráneas del acuífero que se quiere recargar; la calidad del agua que se quiere utilizar para la recarga; las características y tipo de suelo de donde se encuentra el acuífero como también donde se efectuará la recarga, y proximidad a la superficie del terreno.

En la tabla 14 se describen algunos métodos de recarga de acuíferos gestionada o artificial.

Tabla 14: *Métodos de recarga de acuíferos gestionada.*

Métodos de Recarga	Descripción
ASTR(aquifer storage, transfer and recovery): Pozos secos	Implica inyectar agua en un pozo para su almacenamiento y luego recuperación en un pozo diferente. Pozos poco profundos donde los niveles freáticos están a mayor profundidad, que permite infiltración en un acuífero profundo.
Estanques de percolación o vertederos de recarga	Las represas construidas en ríos intermitentes detienen el agua que se infiltra a través del lecho del río para mejorar el almacenamiento en acuíferos no confinados y se extrae aguas abajo.
Recolección de agua de lluvia	La escorrentía se desvía hacia un pozo lleno de arena o grava y se deja filtrar hasta el nivel freático.
Bancos filtrantes en lechos de ríos	Extracción de agua subterránea de un pozo cerca o debajo de un río o lago para inducir la infiltración del agua superficial.
Galería de infiltración	Zanjas subterráneas en suelos permeables que permiten la infiltración a través de la zona no saturada hacia un acuífero no confinado.
Piscinas de infiltración	Implica desviar el agua superficial hacia piscinas fuera del cauce, permitiendo que el agua penetre a través de una zona no saturada.

Fuente: (Comisión Nacional de Riego, 2020).

La recarga de acuíferos es una alternativa que ha sido mayormente empleada en países desarrollados, tales como Alemania, Holanda, EE. UU., Australia e Israel. Precisamente en algunos países de Europa es en donde esta técnica se emplea más frecuentemente, como Alemania y Holanda. La ciudad de Berlín depende de este tipo de aguas en un 75 %, y Ámsterdam se abastece en un 65 % con agua proveniente de la recarga para fines industriales, pero no potable (Rojas C. , 2019).

India es líder en la recarga artificial con 4 km³/año para rellenar las napas de agua subterránea y sostener los suministros de agua esenciales. La aceptación de la mejora de recarga ha sido extraordinariamente exitosa en términos volumétricos y ha respaldado gran parte de la producción agrícola y a muchas comunidades que de otro modo no serían sostenibles (Comisión Nacional de Riego, 2020).

En el estado de California, se ha practicado la RAG desde el año 1865 para satisfacer la creciente demanda de agua, principalmente la demanda del sector agrícola. Durante los períodos de sequías, las extensas áreas agrícolas del centro de California dependen del agua subterránea para su riego. El uso de aguas subterráneas alcanza alrededor del 38% del total de agua utilizada en California, tanto en comunidades como zonas agrícolas. En 2013, el 20% del agua destinada a agricultura provenía de los acuíferos.

Durante los últimos años se han desarrollado diversos proyectos y pilotos de la RAG en Chile. La primera iniciativa formal orientada a la RAG impulsada por la DGA se desarrolló en el año 2012, en las cuencas del Choapa y Quilimarí. Esta tuvo por objetivo identificar zonas relevantes para recarga e implementar obras para la RAG, evaluando la capacidad de infiltración de diversos sectores y el comportamiento del flujo subterráneo a través de su modelación. En este contexto, se evaluaron dos alternativas de entre seis sitios identificados con mayor potencial de recarga, concluyendo que los proyectos no eran rentables ni económica ni socialmente.

Del mismo modo, la Comisión Nacional de Riego (CNR) y el GORE de Atacama realizaron un estudio analizando alternativas de obras de infiltración para su uso en riego, a nivel de prefactibilidad y a lo largo de la cuenca del río Copiapó. A partir de estos resultados, la Comunidad de Aguas Subterráneas (CASUB) Copiapó - Piedra Colgada – Desembocadura ejecutó en 2017 un proyecto de tres piscinas de infiltración entre las localidades de Toledo y San Francisco, utilizando aproximadamente 12,6 hectáreas totales. La CASUB menciona que este proyecto utilizó los excedentes del agua generados producto de los eventos extremos de precipitación en Copiapó durante 2017. De manera similar, la Junta de Vigilancia del Río Copiapó (JVRC) utilizó tres piscinas de infiltración, de 3,8 hectáreas totales, para infiltrar agua en la localidad de Cerrillos utilizando los mismos excedentes mencionados anteriormente.

Por otra parte, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) realizó un estudio en la cuenca del Aconcagua, región de Valparaíso que buscó analizar la factibilidad hidrogeológica para realizar proyectos RAG en la primera y tercera sección del río Aconcagua concluyendo que la primera sección es más apta para obras de recarga. Como consecuencia la DOH generó una obra RAG en la primera sección del valle del Aconcagua, específicamente en la localidad de Curimón utilizando dos piscinas de infiltración de 4.316 m².

Siguiendo esta línea, la CNR realizó un estudio de prefactibilidad para un proyecto de mejoramiento de aguas subterráneas para riego apuntando a las cuencas de los ríos Ligua y Petorca. Se seleccionaron cuatro sitios, los cuales fueron evaluados económicamente, resultando en dos proyectos con rentabilidades negativas para precios de mercado y la totalidad de los proyectos con rentabilidades positivas para precios sociales, siendo los proyectos de La Ligua los mejores evaluados. Posteriormente, se efectuó un proyecto piloto en la localidad de Bartolillo, La Ligua, el que consistió en tres piscinas de infiltración de 250 m² cada una.

La Junta de Vigilancia del Río Diguillín y sus afluentes, ubicado en la región de Ñuble, tiene una larga experiencia en cuanto a la RAG utilizando los canales de distribución en su territorio durante 8 años. Mediante un acuerdo entre la DOH y la Junta de Vigilancia se lleva a cabo la unión de canales operativos y abandonados (15 Km, los cuales actualmente se deben mantener con agua todo el año) para permitir una recarga de aproximadamente 6-7 m³/s a través de captaciones rústicas y con compuerta que recuperan las napas, abasteciendo los pozos cercanos (Comisión Nacional de Riego, 2020).

Respecto al marco normativo de la recarga de acuíferos, en la modificación efectuada en el año 2005 al Código de Aguas se incorpora el concepto de esta alternativa. De acuerdo con el Artículo 66, la Dirección General de Aguas podrá otorgar provisionalmente derechos de aprovechamiento en aquellas zonas que haya declarado de restricción. En dichas zonas, la citada Dirección limitará prudencialmente los nuevos derechos pudiendo incluso dejarlos sin efecto en caso de constatar perjuicios a los derechos ya constituidos. Sin perjuicio de lo establecido en el inciso primero del artículo 67, y no siendo necesario que anteriormente se haya declarado área de restricción, cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo por ello la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras y mientras ellas se mantengan (Rojas C. , 2019).

Por otra parte, de acuerdo con el Artículo 67, los derechos de aprovechamiento otorgados se podrán transformar en definitivos una vez transcurridos cinco años de ejercicio efectivo en los términos concedidos, y siempre que los titulares de derechos ya constituidos no demuestren haber sufrido daños. Lo anterior no será aplicable en el caso del inciso segundo del Artículo 66, situación en la cual subsistirán los derechos provisionales mientras persista la recarga artificial.

Finalmente el Reglamento de Aguas Subterráneas de la DGA, establece en el artículo 34 que para los efectos de lo dispuesto en los artículos 66 inciso segundo y 67 inciso primero parte final, quienes deseen ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos, deberán entregar una memoria técnica que contenga, a lo menos, lo siguiente: Descripción del sistema de recarga artificial; descripción de la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga artificial; descripción del sitio de recarga; características geológicas e hidrogeológicas del sector; características de la zona no saturada; características de acuífero; velocidad y dirección del flujo; comportamiento histórico de los niveles de agua en el sector; calidad del agua; impactos asociados a la obra de recarga artificial, área de influencia de la recarga artificial, impactos calculados, análisis de domos e impacto sobre la calidad del agua; plan de monitoreo y plan de contingencia (División de Estudios y Planificación SDT N°344, 2013).

2.2.3.2 *Trasvase hídrico*

El trasvase hídrico significa una transferencia de agua mediante obras hidráulicas, de una cuenca de río emisora a una cuenca de río receptora. Los trasvases de agua son acuerdos legales y reguladores, que definen qué cantidad de recursos hídricos se transfieren.

La implementación del trasvase depende del cumplimiento de ciertas condiciones, como transferir una cantidad limitada de agua, planes de conservación de agua como parte del proyecto, planes de protección aguas abajo, entre otras. Por lo tanto, está estrictamente regulado en muchas áreas y está completamente prohibido en otras (Climate Technology Centre & Network, 2019).

En relación con los beneficios ambientales y socioeconómicos y barreras de este tipo de proyectos, se identifican como beneficios la recarga de agua subterránea en la cuenca receptora, aliviando los impactos negativos en el ecosistema asociados con la escasez crítica de agua; aumenta el suministro de agua en la cuenca receptora para satisfacer las demandas de agua de la agricultura, doméstica, recreación, industria, generación de energía, otros; pueden proporcionar beneficios de adaptación al cambio climático en regiones con escasez de agua, si se limitan los impactos ambientales negativos.

Las principales barreras se identifican respecto a las obras e implementación generalmente costosas y lentas; posibles consecuencias socioeconómicas negativas para las comunidades aguas abajo de la cuenca donante; la extracción de la cuenca y puede afectar negativamente el equilibrio del ecosistema, incluyendo la calidad del agua y la flora y fauna existente; posibles impactos ambientales negativos en las áreas donde se establecen las estructuras de transferencia de aguas (San Martín, 2011).

En cuanto a la experiencia internacional, el Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético de Olmos se desarrolló en el departamento de Lambayeque en el norte de Perú. Consiste en el trasvase de las aguas del río Huancabamba de la vertiente del Atlántico a la vertiente del Pacífico, a través de un túnel trasandino de 20 kilómetros para su aprovechamiento en la irrigación de tierras eriazas y la generación hidroenergética. Las obras incluyeron la construcción de la presa Limón de 43 metros de altura, cuyo objetivo es crear un embalse de volumen útil de 30 hm³, el túnel y los canales y sistemas de riego que abastecen de agua a los campesinos locales y a los fundos subastados a empresas peruanas y extranjeras. El objetivo principal del proyecto es la creación de un polo de desarrollo económico y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población en el norte del país, a través del regadío de 43.000 hectáreas (Corporación Reguemos Chile, 2019)

El Acueducto del Trasvase Tajo-Segura es la obra hidráulica más importante realizada en España, tanto por su complejidad técnica, como por la repercusión que tuvo y tiene en el desarrollo económico y social en el sureste del país. Esta obra permite el transporte de agua desde los ríos Alto Tajo, hasta la cuenca del Segura, así como también un aporte menor a la cuenca del Júcar. El canal, con una capacidad de caudal de 33 m³/s, permite garantizar un trasvase de hasta 600 hm³, aunque el volumen medio anual a lo largo de su vida ha sido de unos 350 hm³.

En el caso de EE. UU, de sus 18 regiones hidrológicas, tan sólo cuatro realizan exportaciones significativas de agua. Los trasvases de la cuenca del río Colorado están destinados principalmente a California, donde cantidades significativas se destinan al regadío (San Martín, 2011). El State Water Project es un proyecto estatal que consiste en un sistema de almacenamiento y entrega de agua de embalses, acueductos, centrales eléctricas y plantas de bombeo. Su objetivo es almacenar agua y distribuirla a 29 proveedores de agua urbana y agrícola en el norte y sur de California, el área de la bahía de San Francisco, el valle de San Joaquín y la costa central. Proporciona agua suplementaria a 25 millones de californianos y alrededor de 304.000 hectáreas de cultivo de regadío. En este caso se ha aplicado el principio de recuperación de costos y los usuarios están pagando completamente el costo de las infraestructuras. Para favorecer los usos agrícolas se están produciendo subvenciones cruzadas desde los usos urbanos hacia los de regadío, ya que el abastecimiento urbano tiene una mayor capacidad de pago (Corporación Reguemos Chile, 2019).

Respecto a proyectos en Chile, las iniciativas de trasvase de aguas más relevantes, tanto por su innovación como por su envergadura, son los proyectos Aquatacama y la Carretera Hídrica.

Aquatacama es un proyecto propuesto por la firma francesa Vía Marina, que consiste en tomar agua en ríos desde la VI a la VIII región, siendo transportada por al menos 1.000 km a través de una mega-tubería submarina flexible y altamente resistente, hacia zonas productivas de las regiones del norte. Esta tubería estaría dispuesta a 200 metros de profundidad, flotando en el lecho marino, anclada a la costa con el fin de no generar impactos en otras actividades y ecosistemas (Aquatacama, 2021). De existir interés público la empresa continuará con la propuesta, que tendría una inversión de US\$ 8 mil millones. Por otra parte, el proyecto entregaría agua a un costo de 0,7 USD/m³, generaría 100.000 hectáreas de riego, permitiendo también ser empleada para fines urbanos e industriales. Además, se destaca que el proceso consume poca energía (0,9 kWh/m³) y que los costos de inversión son 4 veces menores que un trasvase terrestre (Fundación Chile, 2019).

El Proyecto Carretera Hídrica⁵ para Chile es una propuesta enfocada en la agricultura de la corporación Reguemos Chile que, al igual que Aquatacama, busca trasladar agua hacia el norte chileno. El proyecto consiste en cinco tramos no conectados que cubren distintas zonas de riego desde el Bío Bío hasta Huasco.

Se estima que el proyecto sería capaz de duplicar las exportaciones agrícolas y generaría alrededor de un millón de empleos. La inversión estimada alcanzaría un total de US\$ 20.030 millones (Jimenez & Wainer, 2017). Sin embargo, a nivel medioambiental, la extracción excesiva de un caudal de un río podría provocar la destrucción de cursos fluviales y alteración de ecosistemas, ya que se altera el ciclo hidrológico local. Este tipo de proyecto implica un impacto ambiental negativo alto a nivel de cuencas, hábitat, paisajes y suelos (Fundación Chile, 2019). Considerando lo anterior, desde el punto de vista ambiental y los altos costos de implementación, preliminarmente no parece un proyecto con una prefactibilidad viable y con un costo-beneficio favorable.

⁵ En el Anexo 13 se muestra el trazado del proyecto Carretera Hídrica.

3 Análisis de fuentes hídricas alternativas e identificación de potenciales zonas para su implementación

3.1 Disponibilidad y calidad de fuentes de agua

3.1.1 Aguas residuales

Las aguas residuales, además de patógenos, contienen muchas otras sustancias contaminantes, ya que están en función del tipo de uso del agua y del sistema de recolección que se emplea, por lo que sus características dependen del origen de descargas del sistema. De manera general estas pueden ser:

- Aguas residuales municipales y domésticas, procedentes de zonas residenciales o similares, a su vez pueden ser aguas grises o negras.
- Aguas residuales industriales, que provienen de procesos de actividad industrial.

El agua residual se recolecta mediante el alcantarillado, se conduce mediante emisores a las plantas de tratamiento y después del tratamiento se descarga a cuerpos de agua receptores o se reutiliza en diferentes actividades (Metcalf & Eddy, 2014). Cabe destacar que estas aguas también se originan a partir de residuos industriales, recreativos, aguas lluvias y todas las aguas que lleguen y sean transportadas por la red de alcantarillado.

3.1.2 Aguas servidas

Las aguas servidas corresponden al conjunto de aguas residuales provenientes del uso doméstico, incluyendo las aguas grises (uso doméstico excepto inodoro) y aguas negras (mayor descarga orgánica, provenientes de inodoro).

El aumento de los clientes residenciales se ha incrementado de manera constante en los últimos años como consecuencia del desarrollo de infraestructura sanitaria. El saneamiento de las aguas residuales de la población ha presentado un crecimiento de más de 1,1 millones de clientes en los últimos 10 años.

Como consecuencia directa del aumento de clientes y la infraestructura hidráulica desarrollada se ha producido un mayor tratamiento de aguas residuales, específicamente aguas servidas. Hasta el 2018 la cobertura de tratamiento de las aguas servidas era de 99,98%, respecto del total de aguas servidas recolectadas. De lo anterior se puede desprender que el sistema de recolección de las aguas servidas es altamente eficiente en lo que respecta a recolección y que el destino hacia plantas de tratamiento de las aguas generadas por los clientes de las empresas sanitarias según su concesión alcanza casi la totalidad, deduciéndose que la oferta hídrica en cuanto al volumen de aguas servidas generadas y tratadas podría tener un importante valor en distintas zonas en las cuales el recurso es escaso.

Si se analizan las aguas servidas tratadas respecto a la cantidad o volumen generado anualmente, su distribución por región y el destino del efluente, de acuerdo con la información proporcionada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), esto corresponde a lo siguiente.

Tabla 15: *Volumen de aguas servidas tratadas según región y destino.*

Región	N° de Sistemas de Tratamiento	Volumen Total (millones de m ³)	Destino Aguas Servidas Tratadas		
			Cuerpo Fluvial o Lacustre	Mar	Riego o terceros
Arica y Parinacota	1	13,7	0	12,7	0
Tarapacá	7	23,5	0	19,1	4,5
Antofagasta	9	42,9	9,6	29,8	3,5
Atacama	9	18	15,6	1	1,5
Coquimbo	23	47,7	11,7	35,7	0,2
Valparaíso	33	138,7	35,3	103,4	0
Metropolitana	36	566,4	559,1	0	7,3
O'Higgins	24	48,7	48,7	0	0
Maule	31	85,1	85,1	0	0
Ñuble	17	27,1	27,3	0	0
Biobío	32	101,3	61,9	39,4	0
Araucanía	34	74,4	74,4	0	0
Los Ríos	11	20,8	20,8	0	0
Los Lagos	21	54,9	24,6	30,4	0
Aysén	8	6,1	5,8	0,3	0
Magallanes	3	15	0	15	0
Total	299	1284	980	287	17

Fuente: (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2019)

El mayor volumen de generación de aguas servidas tratadas se ubica en la región Metropolitana, resultado esperado dada su población habitante y la alta cobertura en cuanto a recolección con un 99,8%. Este volumen generado está muy por sobre el resto de las regiones llegando a un equivalente de 44% del total de aguas servidas tratadas a nivel nacional.

Por otra parte, en donde se destina una mayor cantidad de aguas servidas tratadas a través de emisarios submarinos, corresponde a la región de Valparaíso. En relación con el total de aguas servidas tratadas en la región corresponde a un 74,5%, porcentaje relacionado a la concentración de la población residente en la costa.

El resto de las regiones que contienen sistemas de emisarios submarinos no superan los 40 millones de m³/año, encontrándose los mayores efluentes en las regiones de Coquimbo y Bío Bío. También es posible observar regiones en las cuales la totalidad de las aguas servidas tratadas son destinadas a través de emisarios submarinos, como es el caso de Arica y Parinacota, Tarapacá y Magallanes.

En cuanto a las regiones de la zona norte, a excepción de Atacama, todas destinan sus aguas servidas tratadas a través de emisarios submarinos. Es importante mencionar que en estas regiones la oferta hídrica es insuficiente en comparación a la demanda como se mostró en el capítulo anterior lo que puede significar que las aguas servidas tratadas puedan tener un gran valor.

De la información de la tabla 15, se desprende que el volumen de aguas servidas tratadas que luego son destinadas a través de emisarios submarinos equivale a un 22% del volumen total. Aún más relevante resulta analizar el equivalente para las regiones entre Arica y Parinacota y Valparaíso, en las cuales del total de aguas servidas tratadas un 70% se descargan a través de los emisarios dispuestos. Por otra parte, también representan poco más del 70% de las aguas servidas tratadas que son descargadas al mar.

3.1.3 Emisarios submarinos

Los sistemas de emisarios submarinos consisten en instalaciones de tratamiento que aseguran la remoción de sustancias flotantes, material particulado mayor, aceites y grasas con la finalidad de que se descargue un residuo líquido biodegradable y que no genere mayores daños al medio ecológico submarino o para reducir su impacto solo a la zona local en donde se vierten las descargas o interviene.

En algunos medios, se ha indicado que las descargas de aguas residuales al mar por medio de emisarios submarinos y sistemas de difusores, representan una alternativa viable para las ciudades costeras. Estos sistemas pueden aprovechar la capacidad natural de asimilación del mar, que funciona como una planta de tratamiento sin producir ningún impacto indeseable en las aguas marinas (Armada de Chile - Directemar, 2007). No obstante, otras fuentes señalan que la implementación de estos sistemas en nuestro país podría ser fuente de graves conflictos ambientales, debido a que los emisarios submarinos no solucionan el problema de la contaminación y no deben ser la primera opción de tratamiento de desechos para las empresas en general y cercanas a la costa, existiendo evidencia contundente que los emisarios submarinos generan alteraciones en los sistemas costeros producto de la contaminación generada y a un tratamiento no avanzado (Gibbs, 1995).

Los contaminantes que se descargan al mar por los emisarios submarinos en Chile pueden clasificarse en materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos, dependiendo del tipo de fuente emisora que arroja sus desechos a los cuerpos de agua (Armada de Chile - Directemar, 2007). Entre las principales fuentes emisoras de la zona centro-norte se encuentran principalmente las industrias sanitarias, acuícola y agricultura para el caso de desechos de tipo materia orgánica. En el caso de los metales pesados, estos se atribuyen principalmente a la actividad minera, petroquímica y termoeléctricas; y para el caso de los hidrocarburos se asocian a la refinería, terminales marítimos, astilleros y nuevamente actividad petroquímica. Para efectos de este trabajo, se enfocará el estudio en los emisarios submarinos destinados a descargar aguas servidas desde las principales ciudades costeras de la zona centro-norte.

3.1.3.1 Descarga y distribución geográfica de emisarios submarinos

En esta sección se presenta primeramente en la tabla 16 el registro de los caudales medios anuales para cada uno de los emisarios submarinos de aguas servidas entre las regiones de Arica y Parinacota y Valparaíso. Estos caudales fueron medidos en el periodo de tiempo 2015-2020 de acuerdo con la información entregada por la SISS. Además, se presenta el comportamiento de los caudales medios mensuales para los emisarios submarinos con descarga de más de 200 [L/s] como media anual en la zona centro-norte.

Tabla 16: Caudales medios anuales 2015-2019 de emisarios submarinos en regiones de la zona centro-norte.

Región	Emisario	Caudal medio anual [L/s]						Promedio 2015-2020
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	
XV	Es - Chinchorro Norte	381	381	380	409	411	389	392
I	Es - Barrio Industrial	193	239	301	209	161	160	210
I	Es - Playa Brava	369	342	386	395	512	450	409
II	Es - Gran Antofagasta	754	682	788	803	787	780	766
II	Es - Mejillones	25	26	28	28	20	14	23
II	Es - Tal Tal	29	28	29	27	30	29	29
II	Es - Tocopilla	42	42	43	46	45	46	44
III	Es - Huasco	17	33	15	11	14	13	17
III	Es - Chañaral	17	19	18	18	19	19	18
IV	Es - Coquimbo	341	576	495	459	468	411	458
IV	Es - La Serena	301	521	575	565	535	454	492
IV	Es - Los Vilos	32	31	33	31	30	31	31
V	Es - Loma Larga	1661	1892	1660	1738	1754	1808	1752
V	Es - Dos Norte	1128	1041	1164	1342	1163	1124	1160
V	Es - San Antonio	277	224	205	195	167	204	212
V	Es - Higuierillas	220	152	66	274	50	47	135
V	Es - Algarrobo	133	54	59	54	56	57	69
V	Es - Concon	72	69	69	161	80	81	89
V	Es - Quinteros	95	74	67	580	66	73	159
V	Es - Cartagena	119	60	79	72	72	89	82
V	Es - El Tabo	43	41	51	48	41	56	47

Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por la SISS mediante Ley de transparencia, 2020.

Se observa que la región de Valparaíso es la con mayor cantidad emisarios submarinos, con 9 distribuidos en sus distintas comunas de la costa. Con respecto a la información de la SISS, se obtiene que el caudal medio de descarga de los emisarios submarinos en la región alcanza los 3.705 [L/s]. Esto equivale a un 56% de la descarga total de aguas a través de emisarios submarinos en la zona centro-norte. Además, cabe destacar que 2 de los 9 emisarios de la región concentran aproximadamente un 78% de las descargas totales, los cuales corresponden a los emisarios Loma Larga y Dos Norte.

En la región de Coquimbo se identifican dos emisarios con una descarga por sobre los 400 litros por segundo, estos corresponden a los emisarios de Coquimbo y La Serena, teniendo directa relación con la población habitantes en estas localidades y la cobertura sanitaria.

En la región de Antofagasta, se encuentran 4 emisarios submarinos, siendo el de mayor envergadura en cuanto a caudal el emisario Gran Antofagasta. Este emisario tuvo una descarga promedio de 766 [L/s] considerando el registro entre los años 2015 y 2020. El potencial recurso que se descarga a través de este emisario tal como fue mencionado en el capítulo anterior fue identificado para llevar a cabo el proyecto “Nueva planta de tratamiento de aguas servidas para reúso en Antofagasta”.

Finalmente, más hacia el norte en la región de Arica y Parinacota y de Tarapacá, se encuentran 3 emisarios. Dos de estos se ubican en las costas de Iquique con una descarga aproximada de 600 [L/s] entre ambos emisarios, y uno en la ciudad de Arica con aproximadamente un caudal de 392 [L/s]. Estos 3 emisarios submarinos al igual que los anteriormente mencionados sugieren una gran oportunidad como fuente de recurso hídrico, sobre todo considerando la baja oferta hídrica de la zona norte comparada y además superada por la demanda de agua.

La ubicación geográfica de cada uno de los emisarios submarinos de la zona centro-norte se puede visualizar en la figura 9.



Figura 9: Ubicación pretratamiento emisarios submarinos en la zona centro-norte. Fuente: Elaboración propia en base a información de la SISS.

Por otra parte, en la figura 10 es posible visualizar gráficamente la evolución de los caudales medios mensuales medidos para algunos de los emisarios mostrados en la tabla 16 y de los cuales se obtuvieron los caudales medios anuales. Se considera sólo los emisarios con un caudal medio de descarga mayor a los 200 [L/s]⁶.

⁶ Los gráficos de caudal medio mensual para el periodo 2015-2020 en el resto de los emisarios submarinos de las regiones de la zona centro-norte se encuentran entre los Anexos 15 y 18.

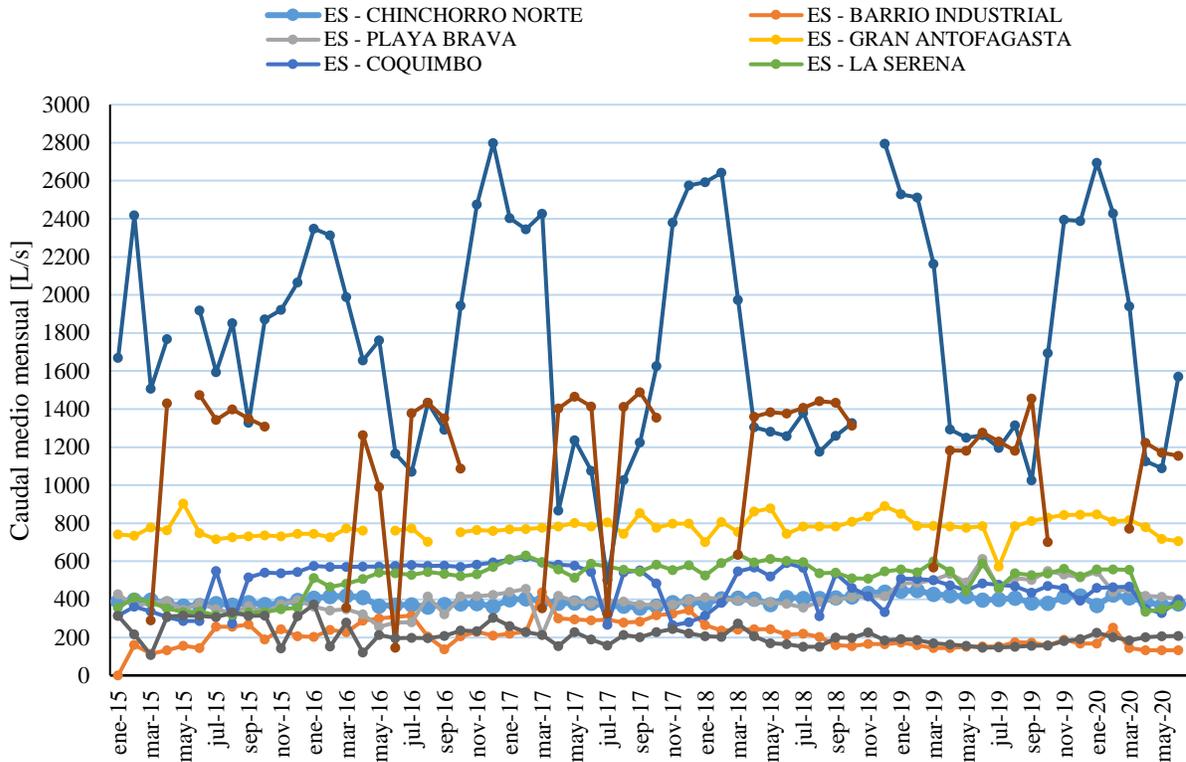


Figura 10: Caudal medio mensual para emisarios submarinos con descarga mayor a 200 l/s en regiones de la zona centro-norte para. período 2015-2020. Elaboración propia

Del gráfico anterior se puede observar claramente la variabilidad estacional del caudal descargado en el emisario Loma Larga, asociado a la ciudad costera de Valparaíso. Este efecto se puede atribuir a la estación de verano en la cual una gran cantidad de turistas llega a esta zona del litoral central generando una mayor cantidad de aguas residuales como también al emisario Dos Norte el cual complementa el sistema de tratamiento y descargas de la zona.

Por otra parte, el comportamiento de la descarga en el resto de los emisarios submarinos se ha mantenido relativamente constante en los últimos 5 años y si bien se observa una pequeña variación estacional durante el transcurso del año, lo cual podría atribuirse a un mayor flujo de personas por la época del año, no es significativa.

Un caudal de descarga constante podría ser favorable por ejemplo para una planta de tratamiento de aguas, ya que el caudal de diseño y de máxima capacidad podrían ajustarse al caudal medio de operación de la planta. En los casos en donde la variación de descarga durante el año fuese significativa debería proyectarse un diseño de emisario submarino que permita el tratamiento adecuado para el caudal medio de operación como también para eventuales caudales máximos y su correcta evacuación a través de los ductos en el fondo marino de manera difusa. Si se quisiera reutilizar estas aguas mediante una PTAS sería necesario elaborar un diseño bajo el mismo criterio mencionado. Sin embargo, para este último caso el emisario submarino podría funcionar como un sistema de respaldo en caso de que la PTAS fallé en su operación o no pueda llegar a la calidad objetivo al tratar las aguas servidas por un aumento de concentración en algún contaminante u otra causa.

3.1.3.2 Normativa de descarga para emisarios submarinos

La normativa vigente que regula el vertimiento de emisarios submarinos es el Decreto N°90: Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. La fiscalización del cumplimiento de esta normativa le corresponde a la SISS, a la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante y a los Servicios de Salud.

La norma clasifica 5 tipos de receptores, para los cuales establece valores máximos, que las descargas líquidas deberán cumplir:

- Cuerpos de agua fluviales, sin capacidad de dilución
- Cuerpos de agua fluviales, con capacidad de dilución
- Cuerpos lacustres
- Cuerpos marinos que están dentro de la zona de protección litoral
- Cuerpos marinos que están fuera de la zona de protección litoral

Para efectos de descargas submarinas se consideran los valores establecidos según las dos últimas clasificaciones mostradas anteriormente.

Descarga dentro de ZPL: implica la necesidad de considerar un sistema de tratamiento secundario para la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos, aceites y grasas, incluyendo desinfección final. Adicionalmente, el tratamiento debe incluir la estabilización de los lodos generados por el tratamiento de la línea de aguas.

Descarga fuera de ZPL: el tratamiento requerido consiste en un pretratamiento con rejillas para la retención de sólidos de gran tamaño y el desarenado de las aguas servidas recolectadas, para ser dispuestas mediante emisario submarino en el punto de descarga. Los residuos sólidos generados, correspondientes a arenas y residuos retenidos en rejillas, pueden ser lavados, compactados y enviados a botadero.

Según una descarga dentro o fuera de protección litoral, se debe dar cumplimiento a los límites establecidos en la Tabla N°4 o N°5 del D.S. N°90 respectivamente. Específicamente los emisarios submarinos de descargas con aguas servidas tratadas deben cumplir con lo normado en la clasificación de descarga fuera de protección litoral de acuerdo con su disposición.

En la tabla 17 se presentan los parámetros normados y sus límites según clasificación de descarga. Tal como se podrá observar, los límites máximos permisibles para el caso de lo normado dentro de protección litoral son más estrictos que la zona de fuera de protección litoral. Esto se ve reflejado en valores permisibles de menor concentración como es el caso de aceites y grasas, aluminio, arsénico, cobre, plomo, sulfuros y entre otros. Además, se distingue algunos contaminantes tales como coliformes fecales, DBO5, hierro disuelto y nitrógeno total que se norman sólo para los límites establecidos dentro de la protección litoral por lo que no se determina necesaria su remoción en el caso de emisarios submarinos que descargan aguas servidas tratadas.

Tabla 17: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro y fuera de la zona de protección litoral.

Contaminantes	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permisible Tabla N°4	Límite Máximo Permisible Tabla N°5
Aceites y Grasas	mg/L	AyG	20	150
Aluminio	mg/L	Al	1	10
Arsénico	mg/L	As	0,2	0,5
Cadmio	mg/L	Cd	0,02	0,5
Cianuro	mg/L	CN-	0,5	1
Cobre	mg/L	Cu	1	3
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100ml	Coli/100ml	1000-70*	-
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5	1
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,2	0,5
Cromo Total	mg/L	CrTotal	2,5	10
DBO5	mgO2/L	DBO5	60	-
Estaño	mg/L	Sn	0,5	1
Fluoruro	mg/L	F-	1,5	6
Fósforo	mg/L	P	5	-
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	10	20
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCV	1	-
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10	-
Manganeso	mg/L	Mn	2	4
Mercurio	mg/L	Hg	0,005	0,02
Molibdeno	mg/L	Mo	0,1	0,5
Níquel	mg/L	Ni	2	4
Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50	-
PH	Unidad	pH	6,0-9,0	5,5-9,0
Plomo	mg/L	Pb	0,2	1
SAAM	mg/L	SAAM	10	15
Selenio	mg/L	Se	0,01	0,03
Sólidos Sedimentables	ml/1/h	SSED	5	20
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	100	300
Sulfuros	mg/L	S2-	1	5
Zinc	mg/L	Zn	5	5
Temperatura	°C	T°	30	-

* En áreas aptas para la acuicultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100 ml. Elaboración propia, datos obtenidos del Decreto N°90.

Actualmente se está desarrollando la actualización del D.S. 90. A enero de 2021 ya fue aprobado el anteproyecto y se encuentra en proceso de una nueva revisión. De acuerdo con lo establecido como anteproyecto y respecto a las tablas N°4 y N°5, se incorporan como parámetros el Cloro libre residual (CLR) y los Trihalometanos (THms). Los límites máximos que serían permitidos en las tablas mencionadas se definieron en 1 y 2 mg/L para CLR y en 0,1 y 0,2 mg/L para los THms respectivamente.

3.1.3.3 Calidad de agua de los emisarios submarinos entre las regiones de Arica y Parinacota y Valparaíso.

De acuerdo con la información entregada por la SISS para el periodo 2015-2019 sobre el registro de las concentraciones de parámetros medidos y regulados en las descargas de los emisarios submarinos de aguas servidas, se analiza si estos cumplen con la normativa vigente correspondiente a la tabla N°5 según lo descrito en la sección 3.1.3.1. De manera representativa se ha tomado la fuente de información para 8 emisarios submarinos tomando al menos un caso entre la región de Arica y Parinacota y la de Valparaíso (XV a V). Estos corresponden a los emisarios: Chinchorro Norte, Playa Brava, Gran Antofagasta, Chañaral, Coquimbo, La Serena y Dos Norte⁷.

Del análisis efectuado se desprende que para el emisario submarino Chinchorro Norte de la región de Arica y Parinacota y correspondiente a las aguas servidas tratadas de la ciudad de Arica, las concentraciones medias anuales para la totalidad de los parámetros normados se encuentran bajo el límite establecido. Sin embargo, si se analiza los máximos valores registrados se observan eventos en los cuales se superó los límites establecidos para los parámetros de Hidrocarburos Volátiles (HCV) con un valor informado de < 5 mg/L en 4 mediciones entre los años 2017 y 2019 y para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) en 4 mediciones efectuadas con valores de 305, 311, 303 y 420 mg/L, siendo cada registro en años distintos.

A pesar de lo anterior, en el numeral 6.4.2 del D.S N°90 se indica que si analizadas 10 o menos muestras mensuales, incluyendo remuestreos, si sólo una de ellas excede, en uno o más contaminantes, hasta en un 100% el límite máximo establecido en las tablas, entonces no se considerarán sobrepasados los límites máximos. Dado lo anterior el emisario Chinchorro Norte cumple con lo establecido en la normativa si es que los HCV no superaron los 4 mg/L (100% del límite establecido en 2 mg/L). Sin embargo, el año 2019 se denunció de manera informal que uno de los conductos de agua servidas habría tenido una rotura lo que podría haber estado contaminando la orilla del balneario con materia fecal. Además, se indicó la presencia de fuertes olores en la zona. Sobre lo anterior, desde la SISS se comunicó que esto no habría tenido implicancia sobre el medio ambiente ni tampoco sobre la ciudadanía (Jara, 2019).

En la región de Tarapacá el emisario Playa Brava las concentraciones medias no superaron los límites establecidos. Sin embargo, se registraron mediciones en las cuales se superó el límite para los parámetros de SAAM (sustancias activas al azul de metileno) y SST. En el primer parámetro se registraron 2 valores de 15,3 y 16,1 mg/L y en el caso de los SST solo un valor de 348 mg/L. Bajo el mismo argumento del numeral 6.4.2 descrito en el párrafo anterior no se considera a este emisario con descargas que exceden los límites máximos normados. Sin embargo, los emisarios submarinos asociados a la ciudad de Iquique, Barrio Industrial y Playa Brava, han sido objeto de preocupación ambiental por la contaminación de descargas al mar, donde vierten sus residuos en Punta Negra y Playa Brava. El año 2017 Aguas del Altiplano ya debió pagar una multa de 33,6 millones de pesos por constatarse fallas de operación en estos emisarios y en la PTAS de Alto Hospicio.

⁷ La información sobre las concentraciones promedio y máximas para los parámetros registrados en cada emisario submarino para el análisis, se encuentra entre los Anexos 20 y 27.

Además, estos emisarios han sido objeto de denuncias por carecer de tratamientos y ser vertidos directamente en la costa, denuncias que se realizaron en virtud del temor a un eventual daño irreparable que podría sufrir el ecosistema y el colapso del sistema sanitario en la ciudad (Jenkins Peña y Lillo, 2020). El año 2020 nuevamente se presentaron problemas de contaminación por materia fecal y malos olores, esta vez por una rotura en el emisario Playa Brava.

En la región de Antofagasta, el emisario Gran Antofagasta y que descarga las aguas provenientes de la correspondiente ciudad costera ha presentado mediciones por sobre los límites establecidos en aceites y grasas (AyG), sólidos sedimentables (SSED) y sólidos suspendidos totales (SST). El límite máximo de AyG fue de 339 mg/L en una medición del año 2015, para los SSED se registró una concentración de 58 mg/L en el año 2018 y para los SST se ha superado el límite máximo en 10 mediciones efectuadas entre los años 2015 y 2019, siendo el mayor valor informado de 820 mg/L, muy por sobre los 300 mg/L permitidos. Dado esto la calidad de agua de la descarga del emisario Gran Antofagasta no habría estado dando cumplimiento a lo establecido bajo esa medición.

Sin embargo, para efectos de este emisario submarino y tal como se describió en la sección 2.2.1.2, el año 2020 se aprobó el proyecto de reúso de aguas servidas tratadas para Antofagasta, las cuales utilizarán como una de sus fuentes las aguas que hoy son vertidas a través del emisario submarino Gran Antofagasta. Esto ayudará también a prevenir y reducir situaciones de contaminación producto de descargas que no cumplieren con lo establecido.

Por otro lado, el emisario submarino Chañaral de la región de Atacama registró una mayor concentración en AyG el año 2015 son una medición de 200 mg/L. Sin embargo, el aspecto más preocupante son las descargas por sobre el límite de SST, en los cuales se han registrado más de 24 mediciones con valores con más de 300 mg/L. De acuerdo con esto este emisario no estaría en cumplimiento de la normativa teniendo 2 o más mediciones mensuales por sobre el límite en un mismo mes.

En la región de Coquimbo nuevamente los límites superados corresponden a valores de concentración en el parámetro de SST. En este caso se superó 9 veces en el límite entre los años 2015 y 2019 presentándose sólo 1 mes en el cual se superó 2 veces el valor permitido, no dando cumplimiento a lo normativa. Cabe destacar que en este emisario se efectuó una medición de Boro el año 2018, registrándose una concentración de 0,81 mg/L. También se han registrado mediciones para el Fosforo con un valor de 5,8 mg/L, Cloruros con 1860 mg/L, Hierro disuelto con un máximo de 0,08 mg/L, Cromo total con 0,05 mg/L y Sulfatos en 391,4 mg/L. Los valores máximos de DBO5 han alcanzado poco más de 1000 mg/L teniendo una media de 234 mg/L anual entre los años 2015 y 2019.

Para el caso del emisario submarino La Serena se superaron los límites para los AyG, SST y SAAM. Sin embargo, solo para el parámetro de SST no se dio cumplimiento a la normativa superando 2 veces el límite establecido en un mismo mes, en solo una ocasión. En este emisario también se efectuaron mediciones en otros parámetros tales como el Boro el año 2018, registrándose una concentración de 0,64 mg/L. También se han registrado mediciones para Cloruros con 398 mg/L, Hierro disuelto con un máximo de 0,05 mg/L, Cromo total con 0,05 mg/L y Sulfatos en 188,9 mg/L.

Finalmente, en el emisario Dos Norte ubicado en la región de Valparaíso se registraron valores por sobre lo normado en el caso de los HCV con 4,15 y 8,97 mg/L, siendo mayor al doble del límite permitido de 2 mg/L. Además, se registraron mediciones por sobre los 300 mg/L en SST en 12 valores. Solo en 1 ocasión se registró un valor por sobre el límite permitido en un mismo mes, no cumpliendo con la normativa.

3.1.4 Agua de mar

El agua en nuestro planeta es abundante y se estima que existen 1.370 millones de kilómetros cúbicos, la mayor parte de ella formando el agua del océano. El agua de los océanos no es pura, sino que contiene en solución una gran variedad de elementos y compuestos químicos llamados sales, en una proporción de 96,5% de agua y 3,5% por ciento de estos últimos.

La composición del agua del mar varía según su origen o según las características marinas, siendo de mayor concentración de sales en lugares cálidos con poca renovación como en el Mediterráneo, y menor en lugares semi-cerrados con abundantes aportes continentales como el mar Báltico. El agua de mar es una solución concentrada de sales inorgánicas, y sirve de hábitat a infinidad de seres vivos. El volumen más importante de biomasa lo compone el plancton, constituido fundamentalmente por algas y animales microscópicos.

En la tabla 18 se muestran las concentraciones medias de los constituyentes químicos mayoritarios del agua marina, comprobándose que se trata de una solución con una gran cantidad de sales disueltas, pero muy pobre en nutrientes (nitrógeno, fósforo y carbono).

Tabla 18: *Composición y características típicas de agua de mar.*

Composición y características típicas del agua de mar	
Parámetro	Intervalos de Referencia
Temperatura, °C	9 – 35
pH	7,9 - 8,1
Sales disueltas, mg/L	35.000 - 45.000
Conductividad, uS/cm (a 20 °C)	44.000- 58.000
Bicarbonatos, mg/L	120 - 170
Sulfatos, mg/L	2.425 - 3.000
Cloruros, mg/L	17.500 - 21.000
Nitratos, mg/L	0,001 - 4,0
Fluoruros, mg/L	1
Boro, mg/L	4 – 6
Amonio, mg/L	0,005 - 0,05
Sodio, mg/L	9.600 - 11.700
Potasio, mg/L	350 - 500
Calcio, mg/L	375 - 525
Magnesio, mg/L	1.025 - 1.400
Estroncio, mg/L	12 - 14
Sílice (SiO ₂), mg/L	0,01 - 7,4
Carbono orgánico total, mg/L	1,2 - 3,0
Nitrógeno orgánico, mg/L	0,005 - 0,03

Fuente: Adaptado en base a información de (Custodio E. - Llamas MR., 1983) y (Nikolav Voutchkov, 2013).

La composición mostrada en la tabla 18 puede cambiar significativamente en presencia de zonas marinas afectadas por contaminación por alguna actividad relacionada a industrias de distinta índole. En términos generales, se reconoce que entre 70% y 75% de la contaminación marina global es producto de las actividades humanas que tienen lugar en la superficie terrestre, siendo un 90% del total transportado por los ríos al mar. Las principales fuentes fijas de contaminación corresponden a las plantas industriales, desechos domésticos y sitios de extracción, explotación agrícola, forestal, minera y construcción como excavaciones.

Los contaminantes presentes en las fuentes industriales son por lo general nutrientes, metales pesados, compuestos orgánicos con variadas propiedades físicas y químicas específicas como pH, salinidad, demanda de oxígeno, dureza, entre otras. Los componentes de los desechos son microorganismos patógenos, nutrientes y carbono orgánico y se encuentran combinados con aceites, grasas y productos químicos derivados de las industrias, los que entran en las corrientes de desechos domésticos a través de los sistemas de alcantarillado, emisarios submarinos o la escorrentía pluvial.

En cuanto a la contaminación de la zona centro-norte de Chile, la región de Arica y Parinacota presenta contaminación marina asociada a la actividad minera efectuada en la zona. Por otra parte, la descarga de residuos líquidos con alta carga orgánica derivados de los procesos de descarga de pescado y la producción de harina ha generado serios inconvenientes para la vida acuática de sectores litorales. El alto contenido de aceites y grasas asociados con este tipo de residuos líquidos forma una delgada película oleosa sobre la superficie del mar, que, junto con impedir una adecuada oxigenación del agua, se adhiere a los más variados sustratos dificultando el asentamiento de especies bentónicas y el uso de playas para recreación.

La región de Tarapacá, específicamente en Iquique, si bien los niveles de metales pesados no indican condiciones de enriquecimiento, la cercanía al sector portuario refleja ligeras alzas en algunos metales. Sin embargo, los niveles observados no indican la existencia de condiciones de degradación en la calidad ambiental de las aguas de esta bahía.

En la región de Antofagasta existen problemas de contaminación que se asocian a cuatro actividades: minería, generación termoeléctrica, pesca artesanal e industrial y descargas de aguas sanitarias.

Dentro de la costa de Tocopilla, el problema de contaminación por cobre y zinc es el rasgo más sobresaliente, encontrándose que los niveles son los más altos de las aguas marinas monitoreadas a nivel nacional. Otras actividades productivas que tienen efecto sobre el ecosistema marino costero se asocian a la producción de explosivos y terminales portuarios de carboncillo. Este caso se presenta en la comuna de Mejillones. En el sector norte de la bahía de Taltal, se detectan altas concentraciones de cobre y plomo, no apreciándose signos de contaminación orgánica o microbiológica para estas aguas

En la región de Atacama, la intensa actividad minera deriva en el vertimiento de RILes con alta carga en sólidos suspendidos y sedimentables, por metales (cobre, mercurio, cadmio, níquel, zinc, entre otros metales).

Emblemático es el caso de la bahía de Chañaral, que es considerado por muchos como irrecuperable y en el cual se proyecta la recuperación de cobre por el proyecto “Mina Playa Verde” desde la bahía. La bahía de Caldera se caracteriza por las actividades portuarias, mineras y de reparación de embarcaciones que se efectúan en su ribera. Aunque se trata de una bahía relativamente pequeña es esperable la ocurrencia de altos contenidos de metales pesados e hidrocarburos.

La actividad industrial en Huasco que potencialmente puede significar algún grado de impacto negativo en las aguas costeras está representada por plantas de concentrado de minerales, centrales termoeléctricas y la pesca artesanal.

Las aguas de la región de Coquimbo están sometidas a los efectos de las actividades portuarias del Puerto de Coquimbo, a las que se suma las actividades de faenamiento de pesca en el puerto pesquero artesanal. Debido a que el río Elqui desagua en la bahía Coquimbo, las aguas litorales próximas al sector de la desembocadura deberían reflejar el aporte de contaminantes que recibe este río aguas arriba, a raíz de las actividades mineras, agrícolas y sanitarias que se desarrollan en su cuenca. Debido a esto podría existir presencia de sustancias químicas tales como metales pesados (principalmente cobre y plomo), algunos tipos de nutrientes (amonio), aceites y grasas y puntualmente de coliformes fecales, con un impacto sobre las aguas costeras considerado como leve.

El litoral de la región de Valparaíso se destaca por su importante actividad portuaria, industrial y turística, por lo que las aguas marinas de su borde costero son susceptibles de recibir los impactos de estas actividades.

Los principales problemas de calidad de las aguas del litoral obedecen a vertidos generados de la actividad portuaria, los que en su mayoría son de tipo accidental, por operaciones propias de las naves y operaciones en terminales de carga de los puertos de Quintero, Valparaíso y San Antonio. En las comunas de Quintero y Con Con se presenta una contaminación de tipo químico y físico por residuos industriales, actividades de carga y descarga o derrames de hidrocarburos (OIKOS CHILE S.A., 2010).

Según lo descrito en los párrafos anteriores, las actividades que se desarrollan en las zonas costeras centro-norte impactan la calidad de agua del medio submarino, debido a la evacuación de residuos líquidos y sólidos al mar, los cuales generan problemas de disminución de recursos hidrobiológicos y bioacumulación de compuestos contaminantes en organismos marinos.

En cuanto a las captaciones de agua de mar para las plantas desaladoras, estas se encuentran en la franja costera, que es la que soporta la mayor parte de la contaminación marina y contiene la mayor riqueza biológica. La contaminación de las aguas marinas puede incidir de manera muy importante en las diversas fases del proceso de desalación, de modo que, al elegir un emplazamiento para la captación del agua de mar, es fundamental conocer previamente su calidad y los riesgos de contaminación presentes en la zona (AEDYR, AQUAESPAÑA, AEAS, TRAGSATEC, 2009).

3.1.4.1 Normativa vigente

A la fecha, a nivel legislativo, no existe ninguna norma específica referente a la desalinización, debiendo ajustarse al ordenamiento jurídico general existente. El Código de Aguas (Codigo de Aguas, 1981) solo regula las aguas continentales descartando su aplicación a las aguas marítimas.

Las aguas marítimas, solo se han regulado como un todo indivisible, concesionadas por el Ministerio de Defensa Nacional como porciones de aguas en la medida que permiten el emplazamiento de elementos flotantes, o lugar de depósito para aprovecharla por ejemplo en la acuicultura, careciendo de una regulación que vele por la extracción de caudales y características de un uso y no de otro, siendo alcanzado solo a descripciones generales de ello conforme el artículo 3° del Decreto con Fuerza de Ley 340 sobre Concesiones Marítimas y en el artículo 1° del Reglamento de Concesiones Marítimas.

La solución momentánea a la falta de normativa ha sido el sometimiento a una autorización ambiental conforme a una aplicación extensiva o amplia del artículo 10 de la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la que impone el sometimiento al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental proyectos de: acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas. Esto ha permitido que los proyectos de desalación de agua de mar estén regulados ambientalmente (Rojas & Delpiano, 2016).

Existen una serie de permisos ambientales sectoriales (PAS) que en principio resultan necesarios para el desarrollo de procesos de desalinización. Cabe destacar que la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) recientemente dictó directrices técnicas para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación, estableciendo los requerimientos básicos que deben contener la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) o Declaración de Impacto Ambiental (DIA) tales como: (i) línea de base que contenga caracterización de la calidad y ecosistema de la columna de agua y el suelo marino a impactar; (ii) las condiciones y descripción del diseño de descarga; (iii) caracterización de la descarga de salmuera; y (iv) los requerimientos para la succión/aducción de agua de mar; entre otros aspectos.

Lo anterior, se deduce con el objetivo de dar instrucciones y criterios a tener en consideración por los funcionarios de la propia autoridad marítima al participar durante el procedimiento de evaluación efectuando sus observaciones a las DIA o EIA, y no de requerimientos de carácter obligatorio para el titular (Skewes, 2017).

Para el caso de descarga de salmueras al medio marino, dentro de los cuerpos normativos nacionales actuales y a tener en consideración, resultan especialmente relevantes la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas (D.S. N°90).

A continuación, se muestran algunos de los proyectos de ley que a la fecha se han propuesto para regular el uso de agua desalinizada principalmente para su posterior uso en la industria minera.

Tabla 19: *Proyectos de ley sobre desalación que han sido presentados y afectan a la industria minera, redactados en el Congreso Nacional entre 2011-2019.*

Cuenta*	Explicación**
N ° 8006-08 (2011)	Este proyecto de ley proponía que el gran sector minero (minas que extraen agua a una tasa de más de 200 L / s) sea obligado a utilizar agua desalada a partir de 2016, con el objetivo de liberar los derechos de agua continentales en las zonas con estrés hídrico. Para las empresas mineras que extraigan más de 150 L / s, el uso obligatorio de agua de mar sería a partir de 2020. Esta propuesta de los miembros del Congreso Nacional no ha tenido mayor desarrollo desde 2012. Se encuentra en estado de Primer trámite constitucional
N ° 9185-08 (2013)	Este proyecto de ley tenía como objetivo establecer un marco legal para la desalación de agua de mar para su uso en procesos productivos mineros. Propuso una reforma al artículo 111 del Código de Minería para hacer obligatorio el uso de agua de mar para todas las empresas mineras de cobre que extraigan más de 150 L / s Este proyecto de ley se encuentra en estatus de Primer trámite constitucional.
N ° 10319-12 (2015)	Este proyecto de ley tenía como objetivo modificar el decreto N ° 340 de Concesiones Marítimas para regular la extracción de agua de mar. Propuso obtener una concesión para extraer un determinado volumen de agua de mar con fines industriales, comerciales o de consumo humano. El proyecto de ley también propuso la implementación de una tarifa por desalación y limita la cantidad de agua de mar (L / s) autorizada para cada usuario. Actualmente se encuentra en tramitación con estado sin urgencia en el senado.
N ° 9862-33 (2015)	Este proyecto de ley tenía como objetivo permitir al Estado chileno construir plantas desaladoras en zonas con estrés hídrico. Actualmente se encuentra en el Segundo trámite constitucional del Senado.
N ° 11608-09 (2018)	Este proyecto de ley tenía como objetivo regular la naturaleza jurídica del agua de mar extraída una vez desalada y que esta sea de uso público. Se propuso que el Estado solo pueda otorgar derechos de agua de mar (L/s) a personas u organizaciones públicas o privadas mediante un procedimiento administrativo que también incluya permisos ambientales. Este proyecto de ley también recomendó la creación de una Estrategia Nacional de Plantas Desaladoras para establecer prioridades de uso del agua de mar. Actualmente se encuentra bajo revisión en el Senado. Actualmente el proyecto se encuentra aprobado en general con indicaciones y ha sido remitido a la Comisión Especial sobre Recursos hídrico, Desertificación y Sequía, para la elaboración de un informe complementario.

*La cuenta corresponde al número de boletín con el cual fue ingresado a tramitación el proyecto.

Fuente: (Alvez, y otros, 2020).

De la tabla 19 se evidencia la intención de legislar respecto al uso de agua de mar mediante plantas de desalación, para que posteriormente estas sean usadas principalmente en la minería. Cabe mencionar que se presenta como una estrategia para poder desestresar zonas en las cuales haya déficit hídrico pudiendo priorizar los usos de agua continental para otras actividades tales como el consumo potable.

A pesar de que se han presentado distintos proyectos de ley estos aún están en proceso de legislación o simplemente no han sido aprobados por lo que sigue existiendo la necesidad de avanzar en esta materia con el propósito de regularizar el uso de agua de mar pudiendo asegurar el correcto desarrollo de este tipo de proyectos.

3.2 Requerimientos de calidad según uso

La calidad de las aguas a utilizar en todo tipo de uso o industria es fundamental. Es por esto, que resulta relevante poder definir los parámetros de calidad requeridos según el uso que se le quiera dar. Considerando la gran importancia del sector agrícola y la industria minera en cuanto al desarrollo económico de Chile, como también al consumo de agua en la zona centro-norte, en la presente sección y para efectos de este estudio se evaluará a calidad de aguas requerida para estas dos industrias.

3.2.1 Sector Agrícola

Para el uso de aguas residuales en el sector agrícola debe considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública, principalmente en lo que se refiere a sus características microbiológicas. Ésta es considerada la principal razón para el establecimiento de guías y regulaciones para el reúso seguro de estas aguas en diferentes aplicaciones (Metcalf & Eddy, 2014).

En el año 2006, la OMS estableció directrices para el uso seguro de las aguas residuales con enfoques en la gestión de riesgos y recomiendan definir objetivos sanitarios realistas. Las directrices se refieren al nivel de tratamiento de las aguas residuales, restricción de cultivos, métodos de aplicación de las aguas residuales y control de la exposición humana. Sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura, se definió 3 categorías según el cultivo que se requiera regar: A) Riego de cultivos consumidos crudos, campos deportivos o parques públicos; B) Riego de cereales, cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles; y C) Riego local de cultivos en la categoría B si no se expone a trabajadores y/o público. Además, se han sugerido los siguientes requerimientos de tratamiento para aguas tratadas en el reúso agrícola.

Tabla 20: *Guía sugerida para aguas tratadas en reúso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.*

Tipos de reúso agrícola	Calidad del agua residual	Opción de tratamiento
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente	pH 6.5 - 8.4 DBO <10 mg·L ⁻¹ Turbiedad <2 UNT Coliformes fecales <14 Nematodos intestinales <1	Secundario, filtración, desinfección
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente	pH 6.5 - 8.4 DBO <30 mg·L ⁻¹ SST <30 mg·L ⁻¹ Coliformes fecales <200	Secundario, desinfección

Fuente: Adaptado de (Comisión Nacional de Agua, 2015).

Para la aplicación del reúso sobre un cultivo específico, es necesario tener en cuenta aspectos como: la capacidad de asimilación de nutrientes, el consumo de agua, la presencia de iones tóxicos, la concentración relativa de sodio (Na) y el contenido de sales solubles, ya que en ciertas condiciones climáticas puede salinizarse el suelo y modificarse la composición iónica, alterándole características como el desarrollo vegetativo y la productividad (Medeiros et al., 2005).

La salinidad es el parámetro más importante que determina la conveniencia del agua para su uso en irrigación. La tolerancia de las plantas a la salinidad varía mucho. El potencial de influencia que el sodio puede tener sobre las propiedades del suelo se indica por la relación de absorción de sodio (RAS), la cual se basa en el efecto del intercambio de sodio sobre la condición física del suelo. La concentración de sodio en el agua relativa a la concentración de calcio y magnesio es expresada como RAS. La influencia de las sales de sodio en el intercambio de la composición del suelo disminuye la permeabilidad, y está relacionado con un alto contenido de sodio o muy bajo contenido de calcio en el suelo o agua irrigada.

El cloro residual en concentraciones menores que 1 mg/L usualmente no afecta a las plantas. Sin embargo, algunos cultivos sensibles se pueden dañar a niveles más bajos que 0.05 mg/L. El cloro en concentraciones mayores que 5 mg/L causan daño a la mayoría de las plantas (Comisión Nacional de Agua, 2015).

En la tabla 21 se muestran cultivos que se riegan con aguas residuales sin tratar o tratadas parcialmente (esta tabla no incluye todos los cultivos, pero muestra los más comunes).

Tabla 21: *Cultivos agrícolas que utilizan aguas residuales sin tratar o tratadas parcialmente.*

Tipos	Ejemplo de cultivos
Cultivos agrícolas	Cebada, maíz (maíz verde), avena, trigo
Cultivos de fibras y semillas	Algodón, semillas de flores y hortalizas
Hortalizas que puede consumirse crudas	Brócoli, repollo, coliflor, apio, ají, tomate verde, lechuga, pimiento, tomate
Hortalizas que se procesan antes del consumo	Alcachofa, frijol, cebolla, maní, papa, espinaca, zapallo, remolacha, girasol
Cultivos para forraje	Alfalfa, cebada, trébol, mijo, heno, maíz, pasto
Huertos y viñedos	Árboles frutales, manzanos, paltos, cítricos, limoneros, duraznos, pistachos, ciruelos, olivos, dátiles, vides

Fuente: (FAO, 2013).

La mejor calidad del agua regenerada se logra mediante procesos de tratamiento terciarios con membranas. Esto, sin embargo, resulta costoso. Un enfoque pragmático consiste en hacer que el tratamiento de las aguas residuales sea adecuado al objetivo, dependiendo del uso específico y el grado de contacto humano que exista (FAO, 2013).

En el ámbito nacional actualmente rigen las directrices de la norma de calidad del agua para diferentes usos, NCh 1333. En esta se define por ejemplo que para el cálculo del sodio porcentual, la fórmula que hace referencia a la relación entre este elemento, y otros cationes presentes en el agua es la siguiente, no pudiendo superar un 35%.

$$Na = \left(\frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} \right) * 100$$

Para el caso de los pesticidas, se detalla que para los herbicidas la autoridad competente debe pronunciarse para cada caso, y se considera que los insecticidas no perjudican las aguas de riego, por lo que no tienen límite máximo. Por otra parte, los estándares para la conductividad específica y sólidos disueltos totales en aguas de regadío se detallan según la siguiente clasificación.

Tabla 22: *Clasificación de aguas para regadío según conductividad específica y sólidos disueltos totales.*

Clasificación de aguas	Conductividad Específica (c): mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales (s) mg/l a 150°C
Generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c < 750$	$s < 500$
Puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c < 1500$	$500 < s < 1000$
Puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	$1500 < c < 3000$	$1000 < s < 2000$
Puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3000 < c < 7500$	$2000 < s < 5000$

Fuente: Adaptado de NCh 1333.Of78, modificada en 1987.

Recientemente, en el año 2021, se han aprobado otras normativas referentes al reúso de aguas residuales en riego, las cuales son: NCh3456 - Directrices para el uso de aguas residuales tratadas para proyectos de riego, NCh3682 - Directrices para la evaluación y gestión de riesgos para la salud en el reúso de aguas servidas tratadas y NCh3483 - Directrices para la clasificación del grado de calidad para el reúso de agua. La calidad de agua y tratamientos sugeridos que se establecen en la NCh3456 se muestran en la tabla 23.

Tabla 23: *Calidad sugerida de aguas residuales tratadas de acuerdo con parámetros físicos, químicos y biológicos.*

Categoría	Agua generada	DBO [mg/L]	SST [mg/L]	Coliformes termotolerantes [n°/100ml] Max.	Usos potenciales en cultivos agrícolas	Posibles tratamientos
A	Muy alta calidad	10	10	100	Alimenticios consumidos crudos	Secundario, filtración por contacto o membrana y desinfección
B	Alta calidad	20	25	1.000	Alimenticios procesados	Secundario, filtración y desinfección
C	Buena calidad	35	50	10.000	No alimentarios	Secundario y desinfección
D	Mediana calidad	35	80	10.000	Industriales y sembrados	Secundario o clarificación de alta velocidad con coagulación

Fuente: en base a información de NCh 3456/2.

Con la aprobación de la NCh3456/2021 la NCh1333 podría ser derogada o modificada para actualizar ciertos estándares que se establecen en esta. Para efectos de este trabajo se evaluarán y seguirán las directrices establecidas en esta última, complementando con lo sugerido en la tabla 23 de la NCh3456. De acuerdo con los requerimientos y las normas asociadas a la calidad de las aguas para el uso agrícola, se muestra en la tabla 24 los parámetros normados internacionalmente, los límites máximos permisibles recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) y la NCh1333.

Tabla 24: *Límites máximos permitidas para normas de calidad de agua de riego y descargas de submarinos fuera de protección litoral*

Contaminante	Unidad	Tabla N°5 DS90	NCh 1333	Guía Australiana	EPA 1992
Aceites y Grasas	mg/L	150	-	-	-
Aluminio	mg/L	10	5	5-20	5
Arsénico	mg/L	0,5	0,1	0,1-2	0,1
Bario	mg/L	-	4	-	-
Berilio	mg/L	-	0,1	-	-
Boro	mg/L	-	0,75	0,5	0,75
Cadmio	mg/L	0,5	0,01	-	0,01
Cianuro	mg/L	1	0,2	-	-
Cloruro	mg/l	-	200	-	-
Cobre	mg/L	3	0,2	0,2-5	0,2
Cobalto	mg/L	-	0,05	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 ml	-	1000	-	-
Índice de Fenol	mg/L	1	-	-	-
Cromo Hexavalente	mg/L	0,5	0,1	-	0,1-1
Cromo Total	mg/L	10	-	-	-
DBO5	mgO2/L	-	-	600	<10
Fluoruro	mg/L	6	1	1-20	1
Fósforo	mg/L	-	-	0,05-12	-
Hierro Disuelto	mg/L	-	5	-	5
Litio	mg/L	-	2,5	-	-
Manganeso	mg/L	4	0,2	-	0,2
Mercurio	mg/L	0,02	0,001	0,002	-
Molibdeno	mg/L	0,5	0,01	0,01-0,05	0,01
Níquel	mg/L	4	0,2	-	0,2
Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/L	-	-	5-125	-
PH	Unidad	5,5-9,0	5,5-9	-	-
Plata	mg/L	-	0,2	-	-
Plomo	mg/L	1	5	-	5
Selenio	mg/L	0,03	0,02	-	0,02
SST	mg/L	300	-	-	-
Sulfuros	mg/L	5	-	-	-
Zinc	mg/L	5	2	-	2
Sulfatos	mg/L	-	250	-	-
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	-	-	-	500- 2000
Vanadio	mg/L	-	0,1	-	-

Fuente: Decreto supremo N°90 y (Fundación Chile, 2018).

De la tabla 24 se observa claramente que la norma chilena NCh1333 establece límites iguales o menores de concentración para la totalidad de contaminantes en relación con las normas internacionales comparadas.

Por otra parte, se observa que si se desea reutilizar las aguas servidas descargadas mediante emisarios submarinos se debería implementar los tratamientos necesarios para remover contaminantes que los límites establecidos por la tabla N°5 del D.S.90 estén por sobre a los que se definen la norma NCh1333. Un ejemplo de estos contaminantes son el aluminio, arsénico, cadmio, cobre, manganeso, cromo, fluoruros, zinc, entre otros que tendrán que ser llevados a concentraciones acordes a los límites máximos en caso de requerirse.

Sin embargo, es importante mencionar que la calidad de las descargas de los emisarios submarinos de aguas servidas tratadas está condicionada por la calidad establecida en la norma de agua potable, correspondiente a la NCh409. De los 28 elementos que presentan límite máximo en la NCh1333, se identifican 13 elementos normados en la norma NCh409. Estos elementos corresponden a: cobre, cromo, cloruros, fluoruro, manganeso, selenio, zinc, arsénico, cadmio, cianuro, mercurio, sulfatos y sólidos disueltos totales (SDT). De los anteriores, 6 necesitarían un tratamiento en caso de encontrarse como contaminante en los efluentes de los emisarios, ya que lo establecido como límite en la NCh409 es mayor a los límites de la norma de riego. Estos contaminantes corresponden al cobre, cloruros, fluoruros, zinc, sulfatos y SDT.

Entre otros parámetros relevantes a mencionar está la DBO5, que no está normada en la tabla N°5 del D.S 90 y tampoco en la NCh1333, siendo un parámetro crítico para el reúso. Es completamente necesario tratar las aguas para remover la concentración de DBO5.

De acuerdo con lo visto en la sección 3.1.3.3 es posible identificar otros contaminantes que tendrían que ser removidos en caso de superar los límites permitidos, como por ejemplo el boro, que en el caso del emisario submarino de Coquimbo cuando se realizó su medición se registró un valor que estaba por sobre el límite de la norma NCh1333 de 0,75 mg/L.

Por otra parte, de la sección 3.1.4 se puede observar que algunos parámetros tales como el boro, cloruros, sulfatos tienen una alta concentración en las aguas de mar. En los casos en que se quisiera desalar agua de mar para utilizar en el sector agrícola, resultaría estrictamente necesario remover estos elementos mediante los tratamientos adecuados llevándolos a una concentración permisible acorde a la norma de riego.

Algunos métodos de tratamiento que permiten reducir la concentración de boro en el agua son la osmosis inversa y el intercambio iónico, sobre todo para aguas de mar en que las concentraciones de boro están entre 4 - 6 mg/L. Para aguas superficiales o subterráneas con boro, también es posible utilizar humedales construidos con macrófitas que son tolerantes al boro (Flores, 2020). Sin embargo, es importante mencionar que este elemento es esencial para algunos cultivos en su crecimiento, y en concentraciones de 0.2 mg/L puede ser beneficioso, pero de 1 a 2 mg/L puede ser tóxico.

Los sulfatos están compuestos por azufre, y las plantas absorben azufre por sus raíces. Los principales tratamientos para este compuesto se relacionan a los procesos de osmosis inversa (algunas membranas logran hasta un 99% de remoción), nanofiltración, intercambio iónico, destilación, precipitación química y tratamiento biológico.

Por otro lado, los procesos de tratamiento para el cloruro recomendados también son la osmosis inversa y el intercambio iónico, siendo indispensables cuando se tiene como fuente de recurso hídrico las aguas de mar.

El arsénico es tóxico para una gran cantidad de especies de plantas. Existen variados tratamientos y procesos que permiten remover este elemento: microorganismos o bacterias que transforman As (III) a As (V), precipitación-coprecipitación, coagulación, filtración, osmosis inversa, adsorción, intercambio iónico, sedimentación y oxidación con oxígeno, ozono, hipoclorito, cloro, permanganato, peróxido de hidrógeno y radiación UV. Es necesario comentar que las aguas servidas poseen un bajo contenido de arsénico, dado que este elemento es removido durante el proceso de potabilización y las aguas servidas tratadas no deberían contaminarse con este elemento.

Respecto al parámetro de la DBO5 y la materia orgánica, esta puede ser removida por una gran variedad de tratamientos biológicos o secundarios, entre ellos los lodos activados, lagunas aireadas, MBR, humedales construidos, entre otros para llevar la concentración a niveles sugeridos por la NCh3456.

Para los elementos correspondientes a metales como el cobre y zinc, estos pueden ser removidos mediante procesos de intercambio iónico, destilación y osmosis inversa. Los filtros de intercambio iónico pueden ser una gran solución para el cobre mezclándolos con resinas o sustancias minerales mientras que los filtros de arena pueden ser altamente útiles para remover el zinc.

Los métodos para la eliminación del fluoruro del agua potable se pueden clasificar en métodos de precipitación-floculación, adsorción, procesos que implican la evaporación del agua y procesos basados en tecnologías de membranas, siendo los más utilizados los procesos de la primera clasificación mencionada mediante precipitación química con reactivos cálcicos, que es el método convencional para la eliminación de fluoruros en aguas residuales. En cuanto a las técnicas de evaporación y de membranas, estas corresponden a la destilación y a la osmosis inversa o electrodiálisis respectivamente (Remtavares, 2007).

De lo descrito anteriormente se desprende que las tecnologías a emplear para la remoción de contaminantes que permitan el uso de agua en el sector agrícola son un tratamiento primario, secundario e incluso terciarios para su reúso en cultivos agrícolas alimentarios. Estos tratamientos podrían corresponder a tratamientos secundarios mediante lodos activados, sistemas MBR o humedales construidos en adición de un tratamiento terciario de filtración y desinfección, con lo que sería posible obtener los estándares requeridos para aguas de alta calidad. Por otro lado, con fuente de recurso las aguas de mar serían necesarios un proceso de pretratamiento, que pueden ser filtración por lecho filtrante, filtración por cartuchos o adsorción y posteriormente el proceso de osmosis inversa y una etapa final de desinfección.

3.2.2 Minería

Los procesos que utilizan agua en la industria de la minería del cobre se pueden clasificar en 5 grandes áreas según lo siguiente (Comisión Chilena del Cobre, 2020):

- **Área Mina:** Incluye la mina a cielo abierto o subterránea y el transporte del material hasta el chancado primario. El agua es utilizada principalmente para la supresión de polvo en caminos, y en la extracción y bombeo desde labores subterráneas.
- **Área Planta Concentradora:** Comprende el procesamiento de minerales. Esta área involucra la conminución del mineral, luego la flotación, clasificación y espesamiento. Las aguas residuales de los procesos pueden o no ser recirculadas al proceso desde las lagunas de los depósitos de relaves, como de los procesos de espesamiento y filtrado, entre otros.
- **Área Planta Hidrometalurgia:** Considera los procesos de lixiviación en pilas, la extracción por solventes y la electro-obtención para la producción de cátodos. En este proceso los principales consumos de agua resultan como consecuencia de la evaporación de las pilas de lixiviación donde se vierte una solución ácida, de agua con ácido sulfúrico en la superficie de las pilas. Esta solución se infiltra en la pila disolviendo el cobre contenido en los minerales oxidados.
- **Fundición y Refinería:** El concentrado seco se somete a un proceso de pirometalurgia para obtener placas gruesas, de forma de ánodos. Este es comercializado directamente o enviado al proceso de refinación la cual se lleva a cabo en las celdas electrolíticas en una solución de ácido sulfúrico. Se le aplica una corriente eléctrica, que hace que se disuelva el cobre del ánodo y se deposite en el cátodo inicial, lográndose cátodos de alta pureza.
- **Otros /Servicios:** Se agrupan todas aquellas actividades con volúmenes de consumo de agua poco significativos frente al total consumido en una operación minera principalmente para abastecer los servicios. El principal uso del agua es para bebida, cocción, lavado, riego y baños en los campamentos, y otros consumos menores.

El mayor uso de agua ocurre en la extracción de sulfuro de cobre, actividad dominante en Chile y se da en el proceso de las concentradoras llamado flotación, que requiere un contenido de agua de alrededor del 70% del total de aguas utilizadas en este tipo de extracción (Ramos, Castro, & Laskowski, 2013). Por lo general, el 60% de esta agua se recupera en espesantes y la mayor parte del agua restante se retiene en los relaves y, posteriormente, se pierde por evaporación (Gunson, Klein, Veiga, & Dunbar, 2012). Las tasas de reutilización y reciclaje del agua han aumentado considerablemente y la industria en su conjunto redujo su consumo de agua de proceso de $0,61 \text{ m}^3$ / tonelada de mineral en 2012 a $0,45 \text{ m}^3$ / tonelada en 2017. Esta mejora resultó en una tasa de reciclaje promedio de 68% a 75,7 % y en algunas operaciones, las tasas de reciclaje han alcanzado el 87% (Chilean Copper Commission, 2016).

De acuerdo con información proporcionada en el “Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales” (Comisión Chilena del Cobre, 2019), el uso de agua en los procesos de la faena se distribuye según lo siguiente:

Tabla 25: Consumo de agua continental en la minería del cobre por proceso y total [L/s].

Proceso	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Concentración	8.724	9.144	8.856	9.190	9.079	8.947	9.201	9.708	8.902	8.085
Hidrometalurgia	2.184	1.856	1.778	1.384	1.751	1.705	2.008	1.930	1.845	1.729
Mina	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	675
Fundición y Refinería	ND	ND	ND	ND	566	551	523	640	539	518
Otros	1.362	1.651	1.930	1.804	1.324	1.748	1.339	1.337	1.978	2.082
Cesión o Venta a Terceros	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	269
Total País/Chile	12.27	12.651	12.564	12.379	12.719	12.951	13.072	13.614	13.264	13.358

Fuente: (Comisión Chilena del Cobre, 2019).

Según la información anterior, el proceso con el mayor uso de agua en la industria del cobre es la concentración. Este consiste en que los sulfuros de cobre se adhieren a burbujas de aire inducidas en celdas de flotación con las cuales se elevan hasta la superficie de la celda, formando una espuma. Esta espuma se somete posteriormente a un proceso de separación de fases para obtener concentrado de cobre y recuperar la mayor parte del agua. El resto del material abandona la celda a través de un sistema de descarga hacia el depósito de relaves. El concentrado tiene como destino una fundición, que produce ánodos de cobre que posteriormente son electro refinados mediante un proceso que consiste en la disolución electroquímica del cobre de los ánodos, en un electrolito que transporta selectivamente los iones de cobre hasta una superficie en la que se deposita hasta formar un cátodo destinado al mercado de cobre metálico.

En la siguiente figura se muestra el uso de agua para los procesos de extracción de cobre mediante concentración, siendo esta la actividad de mayor uso de agua a nivel nacional.

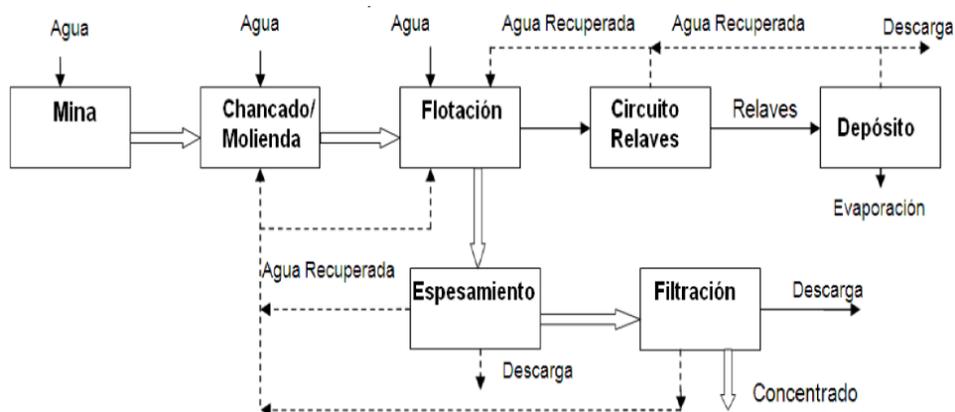


Figura 11: Uso de agua en el procesamiento de sulfuros de cobre (Cochilco, 2011).

Por otra parte, el proceso para los minerales oxidados se caracteriza porque el cobre presente es soluble al ataque del ácido, por lo que es necesario recurrir a lixiviación para ser removido de la mena. Mediante este proceso se recupera el cobre soluble y se logra soluciones ricas del elemento. Para ello el mineral se reduce de tamaño y se dispone en pilas sobre carpetas impermeables. Las pilas de lixiviación se riegan con una solución de agua y ácido sulfúrico que disuelve el cobre contenido. Los ciclos de lixiviación pueden durar varias semanas, durante las cuales la solución se recircula hasta obtener una concentración de cobre apta para el proceso de intercambio iónico (Morales, 2017).

Para el uso de aguas en la minería se ha evaluado la opción de reducir costos mediante el uso de agua de mar cruda o agua de mar parcialmente tratada, a pesar de que el agua de mar cruda generalmente no es adecuada para muchos procesos. Particularmente en la flotación no es utilizable.

La salinidad en sí no es una limitación para la flotación de minerales de cobre o de subproductos, más bien, el problema es la presencia en el agua de mar cruda de iones de magnesio y otros iones menores en el agua de mar cruda, que precipitan como coloides en la flotación y deprimen la molibdenita y otros subproductos valorados. Estos precipitados se someten a una separación sólido-líquido. Por lo tanto, el agua de mar cruda, a pesar de su alta salinidad, entre 44.000 y 58.000 uS/cm, podría ser de buena calidad metalúrgica (Alvez, y otros, 2020). Sin embargo, la salinidad presenta otras problemáticas relacionadas a la corrosión y desgaste de las cañerías de conducción hasta las faenas por lo que preferentemente se prioriza la desalación de las aguas de mar.

Si se desea definir un requerimiento de calidad de agua para uso minero, específicamente en el proceso de la flotación, se puede deducir que la calidad influye de gran manera en la eficiencia de la obtención del concentrado de cobre, por lo que las aguas que se utilizan en este proceso son ajustadas para lograr un mayor rendimiento del proceso mediante aditivos. Por otra parte, es importante mencionar que la eficiencia de obtención de concentrado de cobre depende de la composición mineral de la roca de extracción, de la calidad de aguas que se utilice y los aditivos incluidos para optimizar el proceso. Actualmente algunas faenas emplean softwares de modelación para el proceso de la flotación, pudiendo simular la calidad requerida de agua y las concentraciones de los distintos aditivos pudiendo así optimizar la eficiencia en la obtención de cobre.

En cuanto a la utilización de aguas residuales para este tipo de procesos es necesario remover con una alta eficiencia la materia orgánica y otros elementos como el fósforo y nitrógeno que pudiesen promover la generación de microalgas.

Un caso de reúso de aguas servidas tratadas como se mencionó en el capítulo 2 se desarrolló en la región de Atacama, por parte de la Compañía Minera Candelaria, la cual utilizó como fuente de recurso las aguas tratadas por la empresa sanitaria Aguas Chañar con un caudal de 175 L/s. Otro caso que muestra la alta posibilidad del reúso de aguas servidas tratadas en la industria y en la minería es el proyecto “Nueva planta de tratamiento de aguas servidas para reúso en Antofagasta” en el cual se estableció como requerimiento lo señalado en la tabla N°1 del Decreto Supremo 90, en la cual se definen los valores límites permisibles para descargas de agua de tipo superficial en cuerpos de agua sin dilución.

A continuación, se analizan los límites máximos permitidos de la tabla N°5 y la tabla N°1 del D.S 90, analizando un sistema de reúso de aguas servidas tratadas para la industria minera del cobre que ocupe como fuente de recurso las aguas descargadas por emisarios submarino de las sanitarias. Lo anterior con el fin de determinar cuáles son los contaminantes que requieren remoción para poder utilizarse en esta actividad o incluso en otras industrias con un estándar de calidad de agua similar.

Tabla 26: Valores máximos permitidos en tablas N°1 y 5 del Decreto N°90.

Contaminantes	Unidad	Expresión	Tabla N°5	Tabla N°1
Aceites y Grasas	mg/L	AyG	150	20
Aluminio	mg/L	Al	10	5
Arsénico	mg/L	As	0,5	0,5
Boro	mg/l	B	-	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,5	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	1	0,2
Cloruros	mg/l	Cl-	-	400
Cobre	mg/L	Cu	3	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100ml	Coli/100ml	-	1000
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,5	0,05
Cromo Total	mg/L	CrTotal	10	-
DBO5	mgO2/L	DBO5	-	35
Estaño	mg/L	Sn	1	
Fluoruro	mg/L	F-	6	1,5
Fósforo	mg/L	P	-	10
Hidrocarburos fijos	mg/l	HF	-	10
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	20	-
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCV	2	-
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	-	5
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	1	0,5
Manganeso	mg/L	Mn	4	0,3
Mercurio	mg/L	Hg	0,02	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	0,5	1
Níquel	mg/L	Ni	4	0,2
Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	-	50
Pentaclorofenol	mg/l	C6OHC15	-	0,009
PH	Unidad	pH	5,5-9,0	6,0-8,5
Plomo	mg/L	Pb	1	0,05
Poder Espumógeno	mm	PE	-	7
SAAM	mg/L	SAAM	15	
Selenio	mg/L	Se	0,03	0,01
Sólidos Sedimentables	ml/l/h	SSED	20	-
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	300	80
Sulfatos	mg/L	SO42-	-	1000
Sulfuros	mg/L	S2-	5	1
Temperatura	°C	T°	-	35
Tetraclometano	mg/l	C2C14	-	0,04
Tolueno	mg/l	C6H5CH3	-	0,7
Triclorometano	mg/l	CHC13	-	0,2
Xileno	mg/l	C6H4C2H6	-	0,5
Zinc	mg/L	Zn	5	3

Fuente: Decreto N°90.

De la tabla 26 es posible observar que hay contaminantes tales como el estaño, hidrocarburos totales y volátiles y los SAAM que son regulados en la tabla N°5 y que no están normados en la tabla N°1. Sin embargo, la gran mayoría de los contaminantes presentes en la tabla N°1, son regulados también en la tabla N°5, aunque los límites máximos permisibles se definen con una concentración mayor a la permitida en la tabla N°1.

En complemento a lo anterior, hay otros contaminantes tales como el boro, cloruros, coliformes fecales, DBO5, fósforo, hidrocarburos fijos, hierro disuelto, nitrógeno total, pentaclorofenol, y poder espumógeno que no son normados en la tabla N°5 pero que si se establecen en la tabla N°1, por lo que también sería necesario remover estos contaminantes en caso de que se presenten en concentraciones mayores a las permitidas en las descargas de los emisarios submarinos. Sin embargo, la calidad de las descargas de los emisarios submarinos de aguas servidas está condicionada por la calidad establecida en la norma de agua potable, correspondiente a la NCh 409.

De los 36 elementos que se presentan con un límite máximo en la tabla N°1 del D.S.90, se identifican 20 de estos normados en la norma NCh 409: cobre, cromo, fluoruro, hierro, manganeso, selenio, zinc, arsénico, cadmio, cianuro, mercurio, plomo, tetracloroetano, tolueno, xilenos, pentaclorofenol, triclorometano, cloruros, sulfatos y compuestos fenólicos. Solo el cobre está normado con una concentración límite mayor en la norma de agua potable con 2 mg/L por lo que el resto de los elementos debería haber sido removido en cierta parte en el proceso de potabilización de las aguas. Sin embargo, las aguas servidas pueden volver a estar contaminadas con estos elementos teniendo que ser removidos nuevamente mediante distintos procesos como los que se mencionaron en la sección anterior.

En general para los metales pesados se utilizan métodos de precipitación química seguido por un proceso de separación de sólidos, que puede incluir clarificación, flotación y posterior filtración. Los aceites y grasas es otro ejemplo de contaminante a remover en el cual se debe pasar a una desde los 150 mg/L permitidos en la tabla N°5 a una concentración menor de 20 mg/L, siendo removidos por el pretratamiento o primario mediante equipos desgrasantes. Además de acuerdo con el registro mencionado en la sección 3.1.3.3, se identificó que las concentraciones en las descargas en todos los emisarios analizados estuvieron por sobre los 20 mg/L.

Otros contaminantes que deberán ser removidos para reducir su concentración según lo permitido en la tabla N°5 del DS 90 y que no se encuentra en la norma NCh 409 son el aluminio, boro, níquel, fósforo y nitrógeno. La ósmosis inversa se considera la opción más efectiva para reducir el aluminio del agua, con la capacidad de eliminar aproximadamente el 98% de todo su contenido. El fósforo ha sido removido biológicamente mediante una modificación del proceso de lodos activados. En cuanto al nitrógeno este puede ser removido mediante el proceso de nitrificación y desnitrificación el cual utiliza bacterias amonio-oxidantes y nitrato-oxidantes. La DBO5 es otro parámetro crítico en el análisis, y que para el caso de la tabla N°1 se establece en 35 mg/L como límite máximo. Tal como ya se ha visto la materia orgánica puede ser removida por una gran variedad de tratamientos biológicos o secundarios, entre ellos los lodos activados, lagunas aireadas, sistemas MBR, humedales construidos, entre otros.

3.3 Análisis comparativo de alternativas de tratamiento

3.3.1 Uso de suelo

Un factor relevante para comparar distintas alternativas de tratamiento es el uso de espacio que estas requieren, debido a la intervención y uso de suelos que puedan generar impacto en las zonas donde se implementan.

Para el caso de los humedales construidos como tecnología de tratamiento de aguas servidas, esta alternativa se caracteriza por abarcar grandes áreas. Podrían necesitar una superficie entre 20 y 80 veces mayor comparados con otras tecnologías convencionales de tratamiento. Otras estimaciones indican que podrían requerir 1750% del espacio utilizado por un sistema de lodos activados (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2012).

De acuerdo con lo anterior se muestra en la tabla 27, algunos casos de proyectos que han sido implementados para el tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas mediante humedales de tipo flujo horizontal y la extensión que estos requieren.

Tabla 27: Ejemplos de tratamientos de aguas residuales mediante humedales artificiales.

Localidad	País	Área [m ²]	Caudal [m ³ /d]
Wigmore	Reino Unido	328	87
Onsov	Republica Checa	2100	92
Leek Wootton	Reino Unido	825	306
Lifosa	Lituania	3780	180-400
Uggerhalne	Dinamarca	2640	103

Fuente: Adaptado de (Vymazal, 2008).

De la tabla anterior se observa que en el caso empleado en el país de Lituania, el humedal construido abarca una extensión de 3.780 m² para un caudal entre 180 y 400 m³/día, lo anterior equivale a un caudal de tratamiento máximo de 4,63 L/s. Considerando esto para caudales de diseño mayores como los que son requeridos en el caso de sistemas de tratamiento para aguas residuales municipales o servidas de ciudades, la extensión del humedal puede abarcar áreas extremadamente grandes lo que podría aumentar el costo de la planta de tratamiento y del proyecto por el uso de suelo. Además, esto podría generar otras problemáticas tales como no poder intervenir las zonas requeridas, ya sea por los propietarios del lugar como también por la intervención de paisajes que pudiesen estar protegidos.

El volumen del reactor MBR es entre 2 y 5 veces inferior al de un sistema convencional como el de lodos activados, para una misma carga másica de trabajo. Además, el sistema MBR supone un ahorro de ocupación de espacio de la planta, ya que se elimina tanto el decantador secundario como el sistema terciario del sistema convencional para llegar a una calidad similar del efluente. Otros estudios indican que el espacio promedio requerido es de un 35% del espacio requerido para un sistema de lodos activados (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2012).

En la tabla 28 se muestra una comparación de otra fuente que estima el requerimiento de área de un sistema de lodos activados y un sistema MBR para un mismo caudal de tratamiento.

Tabla 28: *Requerimiento de área para tratamientos de lodos activados y sistemas MBR.*

Tratamiento tecnológico	Requerimiento de área
Lodos activados	1820 m ² (por 1 millón de litros /día)
MBR	450 m ² (por 1 millón de litros /día)

Fuente: Adaptado de (Parde, Aakash, Shukla, & Vijay, 2020)

Por otro lado, la alternativa con una mayor ventaja en cuanto al usos de espacios es la desalinización de agua de mar mediante osmosis inversa. Su sistema modular de membranas en plantas de tratamiento de gran escala le permite utilizar de mejor manera los espacios. Las principales instalaciones que demandan mayores áreas en estas plantas de tratamiento son los filtros de pretratamiento y los estanques de acumulación de aguas cruda y agua tratada.

Para una planta pequeña de 25 L/s el espacio requerido es de alrededor de 200 m². Por otra parte, para un caudal de 500 L/s de tratamiento se estima un área de planta de 14.200 m². De acuerdo con esto una planta de osmosis inversa requeriría alrededor de 5 veces menos el área requerida por un sistema MBR y entre 8 y 10 veces menos que una planta de tratamiento convencional mediante lodos activados. Sin embargo, es importante mencionar que estas plantas de tratamiento de osmosis inversa tienen como afluente las aguas extraídas desde el mar y que las alternativas de tratamiento secundario son para aguas residuales domesticas o servidas con una alta carga orgánica.

3.3.2 Eficiencia en remoción de contaminantes

Respecto a la eficiencia de remoción de las alternativas en estudio, los humedales construidos poseen la gran ventaja por sobre otros procesos de tratamiento de poder depurar una amplia variedad de tipos de aguas con distintas calidades, donde, dependiendo del tipo de sustrato con el cual se construye y el tipo de vegetación que se utilice podría llegar a presentar altas eficiencias de remoción. Estos sistemas naturales se han utilizado a lo largo de los años como sistemas de control y estabilización de efluentes en muchas partes del mundo, como también en aplicaciones a pequeña escala, como tratamiento primario y secundario de aguas servidas de un hogar, o para tratamiento de caudales importantes originados por drenajes mineros removiendo metales pesados y otros contaminantes (A.S. Sheoran, 2006).

Los humedales construidos también permiten la remoción de contaminantes específicos como el boro, arsénico (aunque este no está presente en altas concentraciones en las aguas servidas), y potencialmente otros metales pesados. Para el caso del arsénico se puede llegar a remover entre un 30% y 80% utilizando *Juncus effusus*, y entre 10% y 40% utilizando *Cyperus haspan*, considerando una concentración inicial de 85 µg/L a un caudal de 36 L/día. Con respecto al boro, experimentos que utilizan macrófitas como *Typha angustifolia* y *Puccinellia frígida* con sustrato de cascara de arroz (San Miguel - Espinoza, Ramila, Leiva, & Lizama-Allende, 2019), registran remociones de aproximadamente un 40%.

Para metales pesados, un estudio determina que la macrófita *Phragmites Australis* incorpora Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn (G.Bonanno & Giudice, 2010), donde las concentraciones acumuladas en la planta se distribuyen de manera que es mayor en las raíces, luego menor para el rizoma, las hojas y mínimo en el tallo.

El mecanismo Biotreat fomentado por la Fundación Chile propone un tratamiento que utiliza la simbiosis entre un sistema de humedal artificial y un sistema microbiológico de tratamiento. Un caso de estudio indica que, con un área de 3.600 m², un rango operacional de caudal de 4 a 100 m³/día, con tiempos de retención de 10 días, permite la reducción de DQO, SST, color, turbidez en más de un 90%, una remoción de NT de 66% y una estabilización del pH a 6.56. Por otro lado, en algunos casos es más accesible y competitivo que el tratamiento con lodos activados (Vidal, 2015).

De acuerdo con lo anterior se muestra en la tabla 30 los mismos proyectos de la tabla 29 pero ahora en cuanto a la efectividad de remoción en DBO5, parámetro crítico para el reúso de aguas servidas en las industrias objetivo.

Tabla 29: *Eficiencia de remoción de plantas de tratamientos de aguas residuales mediante humedales construidos.*

Localidad	País	Caudal [m3/d]	DBO5 Entra	DBO5 Sale	Remoción [%]
Wigmore	Reino Unido	87	5,8	1,1	81,0%
Onsov	Republica Checa	92	5,9	2,7	54,2%
Leek Wootton	Reino Unido	306	8,5	2,3	72,9%
Lifosa	Lituania	180-400	51	7,8	84,7%
Uggerhalne	Dinamarca	103	115	6	94,8%

Fuente: Adaptado de (Vymazal, 2008).

De la tabla anterior se observa que esta tecnología tiene eficiencia que va desde el 54% hasta el 94,8% como es el caso del humedal construido en Uggerhalne. Sin embargo, las concentraciones de DBO5 que entran a sistema son más bajas que la concentración media de DBO5 en aguas servidas. Si se lograra un porcentaje de remoción mínimo del 90% este tratamiento podría ser efectivo en llevar la concentración de DBO5 bajo un nivel de 35 mg/L como se indica en la tabla N°1 del D.S. 90. Aunque para el riego de cultivos podría requerirse una concentración menor a los 20 mg/L. En este caso las concentraciones afluentes no podrían estar por sobre los 200 mg/L.

En el caso de las alternativas de tratamiento mediante lodos activados y sistemas MBR se indica los porcentajes de remoción en la tabla 30.

Tabla 30: *Eficiencia de remoción mediante alternativas de Lodos Activados y sistemas MBR.*

Parámetro	Lodos Activados	MBR
DBO5	90-95%	95-99%
SST	85-95%	95-98%
Nitrógeno Total	70-90% incluyendo desnitrificación	94-99%
Fósforo Total	70-90% incluyendo proceso	95-98%
Coliformes fecales	60-90%	90-99%

Fuente: (Unites States Enviromental Protection Agency, 2007).

Finalmente, si se compara con la alternativa con agua de mar como fuente la desalación con osmosis inversa tiene una gran eficiencia en la calidad alcanzada y en la tabla 31 se indica la capacidad de remoción de diferentes tipos de contaminantes.

Tabla 31: *Eficiencia de remoción de desalación de agua de mar mediante osmosis inversa.*

Contaminante	OI (%)
TDS	90 – 99.5
Pesticidas, Orgánicos	5 – 50
Patógenos	>99.99
TOC (Carbono orgánico Total)	95 – 98
Nitrato	90 – 94
Calcio	95 – 97
Magnesio	95 – 97
Bicarbonato	95 – 97
Potasio	90 – 90

Fuente: (Nikolav Voutchkov, 2013).

De esta alternativa cabe mencionar que algunos contaminantes que son requeridos para riego agrícola también son removidos, por lo que sería necesario mezclar con aguas crudas o bien utilizar fertilizantes.

3.3.3 Costos de energía e implementación

En cuanto a requerimientos de energía y costos de tratamiento de las alternativas en estudio, se tiene que para el caso de los humedales construidos algunas fuentes han indicado que para tratar 1 m³/día se estima en un CAPEX de 2.350 USD y un OPEX de 0,23 USD/ m³.

Las unidades de membranas como lo son los sistemas de MBR tienen un costo elevado y una vida útil que actualmente está limitada entre 5 y 8 años, por lo que su instalación y reposición constituye un gasto a tener en cuenta. Respecto al consumo energético de esta tecnología este es uno de los inconvenientes esenciales, siendo considerablemente altos. El coste del consumo de energía por metro cúbico de agua depurada en los MBR puede oscilar entre 0,6 y 1,5 kWh/m³, mientras que para un sistema de lodos activados convencional está entre 0,38 y 0,48 kWh/m³ (Vazquez, 2015). En los sistemas MBR se estima un costo CAPEX de 3.029 MUSD y un OPEX de 0,25 USD/m³. Lo anterior para un caudal medio de 25 m³/día.

Para PTAS centralizadas de zonas urbanas (>2000 habitantes) de la zona centro de Chile basadas en lodos activados, los costos de construcción se estiman entre 65 y 200 USD/habitante. Específicamente para un sistema de reúso de aguas servidas de emisarios submarinos se ha estimado un CAPEX de 42,2 MM USD con una planta de tratamiento de lodos activados. Esto para una PTAS de 1,1 m³/s, mientras que para el OPEX un costo de 0,17 USD/m³.

En la desalación de agua de mar los costos relacionados a la energía han disminuido considerablemente. El consumo específico de 8-9 [kWh/m³] de hace 40 años paso a ser de 3-4 [kWh/m³] en las plantas implementadas en la actualidad (Fundación Chile, 2019).

E incluso en otros estudios se indican valores menores, los cuales estiman costos de inversión de una planta de OI entre 0.9 y 2 USD/m³ y con costos energéticos menores a 3 kWh/m³.

La experiencia de Chile en la desalación tiene relación con la necesidad de impulsar el agua desalada a las faenas mineras que se encuentran alejadas y en altura, lo que hace que estos proyectos sean costosos por los altos requerimientos de energía. Por ejemplo, según la experiencia del Grupo CMP (ex CAP), la energía requerida para el proceso de desalinización representa el 67% del costo, mientras que, para el bombeo de agua, que requiere un altísimo consumo de energía, representa el 97% del total del costo operacional del transporte (Biblioteca del Congreso Nacional, 2017). El consumo de energía en la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa representa un tercio del costo total del proceso, lo que, dependiendo de la capacidad de tratamiento de la planta desaladora, tendría un costo total que oscila entre los 0,6 y 1,2 US\$/m³ (Proceso, costo y proyectos: Desalinización en la industria minera, 2014). En cuanto a costos de operación en la desalación se estima en USD 0,76/m³ (Incluyendo energía eléctrica, PEAP de captación, agua de rechazo y emisario; personal, mantención y repuestos) (Fundación Chile, 2019).

A medida que el costo de las tecnologías de energía renovable continúa disminuyendo, un sistema de suministro de agua alimentado por tecnología solar fotovoltaica, por ejemplo, puede resultar con menores costos que utilizar la red eléctrica regional. La incorporación de un suministro de energía renovable de bajo costo en un sistema de suministro de agua integrado podría garantizar que se minimicen los impactos ambientales indirectos y el sistema de suministro de energía podría potencialmente expandirse para proporcionar energía renovable para otros usos locales (Alvez, y otros, 2020).

En zonas de altura, donde están varias mineras, los costos puede llegar a US\$ 8 y US\$ 10 /m³. En el 2016, el Consejo Minero indicó que estaría en torno a US\$ 5 por m³, lo que es más de tres veces el costo de fuentes continentales (Consejo Minero, 2016). Mediante el desarrollo de modelos económicos para una típica mina de cobre a gran escala en Chile, se calculó el costo de producción de agua para todo el sistema para el uso de agua de mar pretratada y desalinizada para diferentes niveles de elevación. Estos valores se muestran en la figura 12.

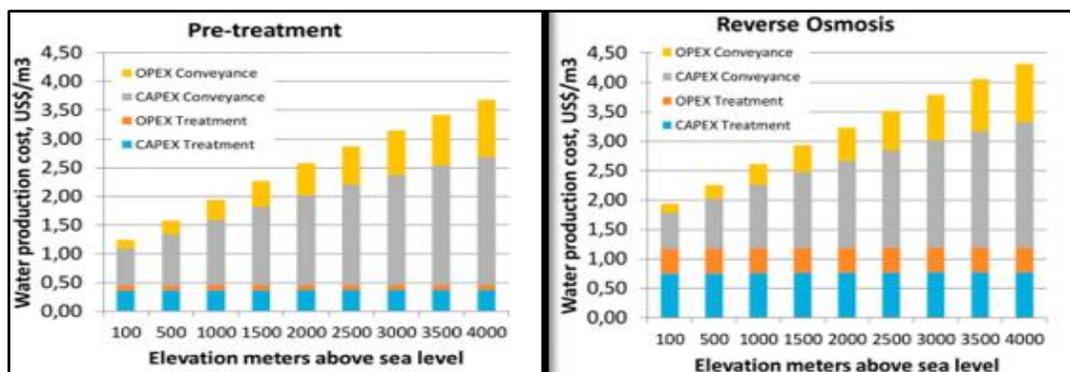


Figura 12: Costo de producción de agua por Osmosis Inversa y pre-tratada en función de la altura de elevación del sistema (Alvez, y otros, 2020).

De la figura 12, se observa que los mayores costos para un sistema de abastecimiento de agua mediante desalación de agua de mar, por osmosis inversa o pretratadas, se deben a inversión y operación para la conducción y elevación de las aguas hasta las faenas mineras. Por otra parte, la producción de agua mediante osmosis inversa induce mayores costos de operación en cuanto el proceso de tratamiento se trata.

De lo anterior es relevante analizar, que para cualquier proceso de tratamiento de aguas que sea empleado en un proyecto en el cual se requiera elevar y transportar las aguas a grandes alturas y/o largas trayectorias, los mayores costos estarán asociados a la inversión y a la operación del proceso de transporte.

A continuación, en la tabla 32 se muestra el resumen para las alternativas en estudio respecto a los costos de consumo energético y los costos de operación.

Tabla 32: *Costos de energía y operación según alternativa de tratamiento.*

Alternativa	Lodos Activados	MBR	Humedal Construido	Osmosis Inversa
Costo energía [kW/m³]	0,38 - 0,48	0,6 - 1,5	<0,1	3 - 4
Costo operación [USD/m³]	0,17	0,25	0,29	0,76

Fuente: Elaboración propia en base a información de (Fundación Chile, 2019).

De la tabla anterior se observa que la alternativa de desalación de agua de mar muestra los mayores costos asociados a su operación. Esto puede deberse al alto requerimiento de energía para el funcionamiento de sus equipos pero que a su vez tiene una alta tasa de remoción de contaminantes por lo que pueden llegar a mejores estándares de calidad para el posterior uso de estas aguas.

Por otra parte, los lodos activados muestran los menores costos de operación y mantenimiento y los sistemas MBR los mayores costos de energía en comparación a las alternativas de tratamiento de aguas residuales. Los menores costos de operación corresponden a los humedales construidos, pero en contra de esta alternativa están las extensas áreas de emplazamiento que requieren y por otra parte tiene menores tasas de remoción de contaminantes que los lodos activados y los sistemas MBR

Cabe destacar que los costos mostrados en la tabla 32 son sólo referenciales y que finalmente depende de cada proceso de tratamiento los costos asociados que tendrán.

3.3.4 Impactos socioambientales

Otro aspecto para considerar de gran relevancia es el impacto socioambiental que generan las alternativas de tratamiento.

Todo proyecto, ya sea durante su etapa de construcción u operación suelen producir alteraciones a la calidad del medioambiente. Para poder establecer ciertos parámetros y criterios o consideraciones sobre las alternativas de tratamiento a escoger al momento de diseñar una PTAS, se abordan las distintas afectaciones y riesgos asociados de las alternativas en estudio y se determinan los impactos socioambientales en el ecosistema.

Para el caso de la desalación de agua de mar, los riesgos están relacionados a la descarga de salmuera de las plantas de osmosis inversa, la cual varía la salinidad entre un 30 a 70% del total de agua tratada, lo que significa un 1,3 a 1,7 veces la concentración del agua de mar. Por tanto, es necesario asegurar una adecuada dilución de la descarga y minimizar sus efectos adversos en el ambiente marino a través del uso de tecnología apropiada para este objetivo.

El impacto de la descarga al mar de salmuera concentrada y su magnitud dependerá de factores ambientales e hidrogeológicos, como batimetría, olas, corrientes, profundidad de la columna de agua. Estos factores determinan la extensión de la mezcla de la salmuera y por ende el rango geográfico del impacto. La disposición de concentrados puede generar impactos sobre comunidades bentónicas, si la descarga es pobremente diluida e influir a la alteración del fondo marino.

Por otra parte, los impactos asociados a la operación de la planta se pueden generar por el uso de aditivos y subproductos para el control de la contaminación biológica, como el cloro. Además, para la eliminación de sólidos en suspensión, se utilizan coagulantes como el cloruro de hierro, el cual puede estar presente si se acondiciona el agua de la fuente y no se trata debidamente el agua de retrolavado del filtro. Junto con esto puede haber otros productos que puedan descargarse en consecuencia de los aditivos empleados para el control de incrustaciones y de espumas (Gude, 2016).

En cuanto a los impactos socioambientales relacionados con esta alternativa se puede generar el descontento en la comunidad local por el posible impacto sobre la fauna del fondo marino como también por la intervención en parte de la zona costera. Dos sectores que pueden verse afectados negativamente son la pesca y el turismo debido a la reducción de las poblaciones de peces y el impacto estético de las plantas de tratamiento y las tuberías (Alvez, y otros, 2020).

En relación con las alternativas de tratamiento de aguas residuales, los humedales construidos tienen un impacto beneficioso al medio ambiente, aportando con áreas verdes y al paisajismo de la zona lo que trae consigo un impacto socioambiental positivo en las comunidades locales.

Este tipo de sistemas disminuyen el consumo de energía considerablemente y propician condiciones para la formación de nuevos hábitats para la flora y fauna, sin embargo, debe tener un plan de mantenimiento que permita la óptima operación en caso de un exceso de fauna no deseada.

Siguiendo con lo anterior, los impactos negativos podrían estar dados por un manejo inadecuado y el desarrollo no controlado de insectos y plantas con consecuente saturación del sistema. Esto a su vez generaría un eventual rechazo de la comunidad por la aparición de los insectos y malos olores.

Los sistemas MBR, de manera contraria a los humedales construidos, tienen un mayor gasto energético, incluso más que los sistemas convencionales, lo que se traduce de manera directa en un impacto negativo por la demanda de energía y la generación eléctrica requerida.

Los principales impactos ambientales se asocian a la acumulación de residuos tóxicos en sistemas operativos y sus riesgos posteriores en salud pública. Los lavados químicos de membranas u otros equipos utilizan hipoclorito al 2-5%, lo que puede generar cloramina y que, por su carácter cancerígeno, debe ser tratado en forma específica. Aun así, es uno de los productos más empleados para esta actividad.

Un impacto ambiental positivo de esta alternativa es el menor uso de suelo en comparación con otros tratamientos de aguas residuales, interviniendo menos en el territorio.

En el caso de los impactos sociales de la alternativa se puede inferir que este está asociado a los altos costos de implementación de esta tecnología, dificultando su adquisición.

Finalmente, en cuanto al proceso de lodos activados los principales impactos ambientales negativos se asocian al uso de productos o compuestos químicos en los distintos procesos de la planta. Esto genera, por ejemplo, el riesgo de derrame de ácido clorhídrico, derrame de hipoclorito de sodio a cuerpos de agua, y fugas de gas cloro. Por otra parte, se produce una intervención de territorio y paisajismo en toda el área en donde se emplace la planta de tratamiento, pudiendo haber impacto en la flora y fauna de estas zonas. También se identifica la emanación de material particulado y gases durante la etapa de operación y posible contaminación a la napa subterránea por infiltración de sustancias peligrosas y desechos químicos.

También es importante mencionar que el manejo de los lodos es otro factor relevante para evaluar el impacto ambiental de este tratamiento, ya que una mala gestión de los residuos podría generar problemas ambientales relacionados con malos olores, contaminación, entre otras. De acuerdo con lo descrito anteriormente y en base a lo señalado por (Fundación Chile, 2019), es posible analizar de manera comparativa los impactos que estas alternativas tienen como consecuencia en su implementación.

Tabla 33: *Clasificación de impactos socioambientales según alternativa de tratamiento.*

Proceso	Clasificación ambiental	Clasificación social
Osmosis Inversa	Impacto negativo alto	Impacto negativo alto
Humedal Artificial	Impacto positivo medio.	Impacto negativo bajo.
MBR	Impacto negativo bajo.	Impacto negativo medio
Lodos Activados	Impacto positivo bajo.	Impacto negativo medio

Fuente: Elaboración propia en base a información de (Fundación Chile, 2019).

3.4 Identificación de potenciales zonas para aplicación de sistema de reúso de aguas servidas tratadas

Las regiones de Coquimbo y Valparaíso se han visto fuertemente afectadas por la mega sequía que ha azotado a Chile en la última década, lo que se ha visto reflejado en los decretos de escasez en estas zonas, lo cual ha generado foco de importantes conflictos por el interés de distintas industrias en el uso de agua.

Considerando lo ya revisado en el presente estudio, en las siguientes secciones se describen los conflictos socioambientales en la zona centro-norte, enfocando el estudio en las regiones mencionadas debido al alto potencial de reúso de aguas residuales desde emisarios submarinos como también a la escasez hídrica presente en estas zonas. Además, se identifica conflictos socioambientales relacionados al consumo de agua y que generen una presión sobre el recurso, y se analiza la demanda hídrica respecto a la industria minera y sector agrícola.

3.4.1 Conflictos socioambientales en la zona centro-norte

Los conflictos socioambientales son un tipo particular de conflicto social que han adquirido gran notoriedad en las últimas cuatro décadas. El carácter ambiental de estas controversias apunta a los daños causados a recursos naturales, la distribución territorial de los impactos o externalidades de una determinada actividad o al acceso y control de los recursos del medio ambiente (Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID), 2017). Entonces lo socioambiental se entiende como las relaciones entre sociedad y medioambiente en un sentido amplio y considerando que los conflictos que surgen a raíz de estas relaciones tienen un estrecho vínculo con el territorio.

Dentro de lo que se considera protestas socioambientales, existe una variedad de 13 tipos de demandas diferentes, siendo las más relevantes en términos cuantitativos las por “desarrollo local” con un 17,6% del total, seguido por conflictos alrededor de construcción de “infraestructura urbana” con un 17%, “contaminación en la zona” con un 14,6% y posteriormente las demandas por “proyectos energéticos en la zona” con un 14,2% del total de demandas socio ambientales. Las protestas con componente socioambiental se dan mayoritariamente en territorios urbanos (78,1%) y solo el 21,9% se materializa en territorios rurales. Al distribuir las protestas por región, obtenemos que ellas ocurren en todo Chile, y que el 89,3% ocurre fuera de la Región Metropolitana (Centro de Estudios de Conflicto y Cohesión Social, 2018).

Los principales problemas medioambientales en Chile se constituyen por la escasez del agua en la zona centro norte y la contaminación de esta por diversas fuentes; la contaminación atmosférica esencialmente vinculada a áreas urbanas y zonas mineras, las amenazas que enfrenta la conservación de la biodiversidad, tanto a nivel de especies como a nivel ecosistémico, la gestión de residuos sólidos, el aumento en la generación y su disposición en sitios no adecuados, la contaminación y erosión de suelos, y diversos aspectos relativos al cambio climático, como el aumento de las emisiones y la vulnerabilidad del país respecto de sus efectos (Bergamini, Irarrazabal, Monckeberg, & Pérez, 2017).

Respecto al problema medioambiental en el ámbito de los recursos hídricos, se identifican también la influencia de las distintas actividades relacionadas al consumo de agua en el uso de suelo y la alta variabilidad en cuanto a calidad de aguas de distintas fuentes.

Las regiones del centro y norte de Chile son económica y socialmente importantes debido a la presencia de operaciones agrícolas y mineras, y ejercen una gran presión sobre los recursos hídricos locales compartidos. La escasez de agua ha provocado conflictos entre los usuarios del agua y daños a los ecosistemas en estas zonas. Al año 2018 persistían 116 conflictos socioambientales según el Instituto Nacional de Derechos Humanos (INDH, 2018) y se identificó 101 casos de conflictos socio territoriales vinculados a las industrias minera y eléctrica entre los años 2005 y 2014, según el catastro del Proyecto Fondecyt “Lo que los conflictos producen” (Allain, 2019).

El registro de conflictos socioambientales del INDH ha quedado plasmado en el mapa elaborado por la institución que tiene como meta visibilizar problemáticas de vulneración de derechos humanos ligados con el medioambiente. Además, en este registro el INDH distingue varias etapas de los conflictos, entre las que se encuentran conflictos activos (nuevos hitos ocurridos durante el último año), latentes (sin nuevos hitos, pero sin cierre), cerrados (acuerdo entre las partes o decisión institucional poniendo fin al conflicto) y archivados (estos últimos conflictos ya no aparecen en el mapa, llevan más de un año de cierre y se caracterizan por no haber registrado nuevos hitos) (INDH, 2021)

En la siguiente figura se muestra la distribución de conflictos socioambientales por región y de acuerdo con su estado según la clasificación descrita anteriormente.

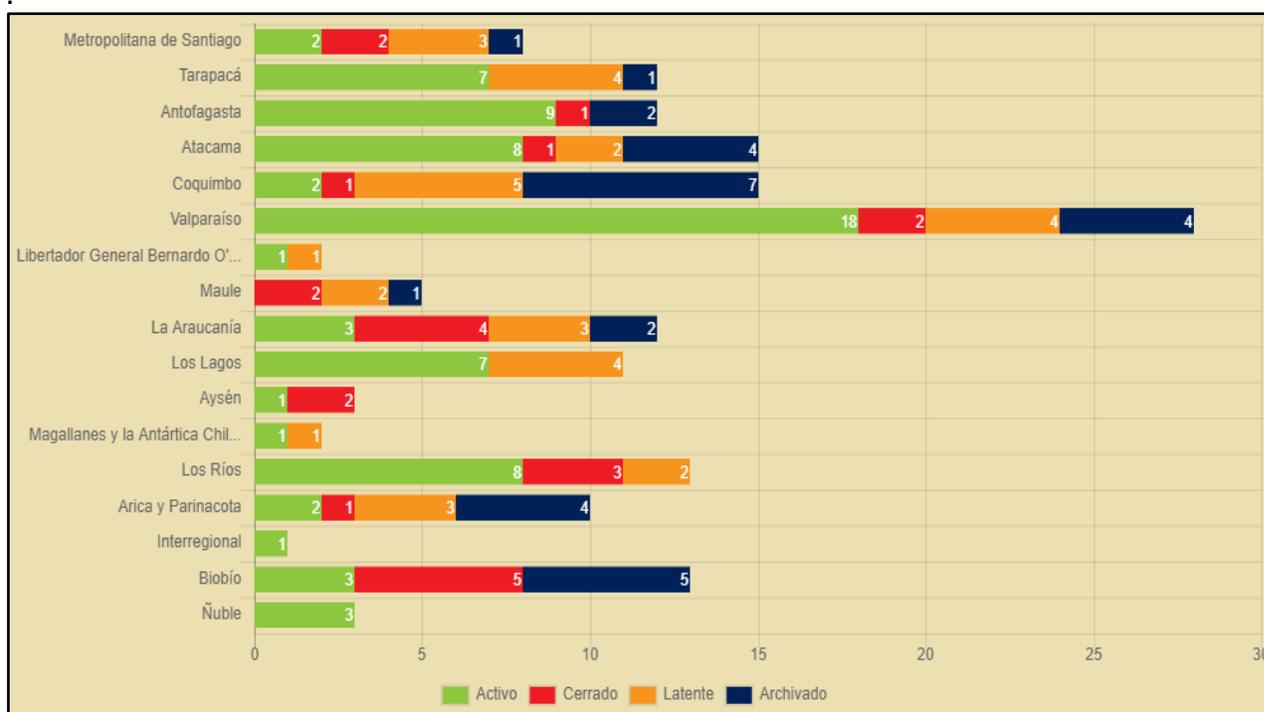


Figura 13: Conflictos socioambientales por región y estado actual (INDH, 2021).

De acuerdo con la figura anterior, se destaca la gran cantidad de conflictos en la zona centro-norte alcanzando un total de 48 conflictos activos entre la región de Arica y Parinacota y de Valparaíso. Además, esta última registra la mayor cantidad de conflictos socioambientales, con 18 conflictos en estado activo y 4 en estado latente.

Con respecto a las actividades que causan estos conflictos, se ha identificado la superioridad de conflictos producto de la industria minera como también del sector energético. Entre ambas actividades suman un total de 48 conflictos activos a lo largo del país. En el Anexo 19 se muestra la distribución de conflictos de acuerdo con su causa.

A continuación, se analiza los conflictos socioambientales identificados en la región de Coquimbo, de acuerdo con el objetivo en estudio.

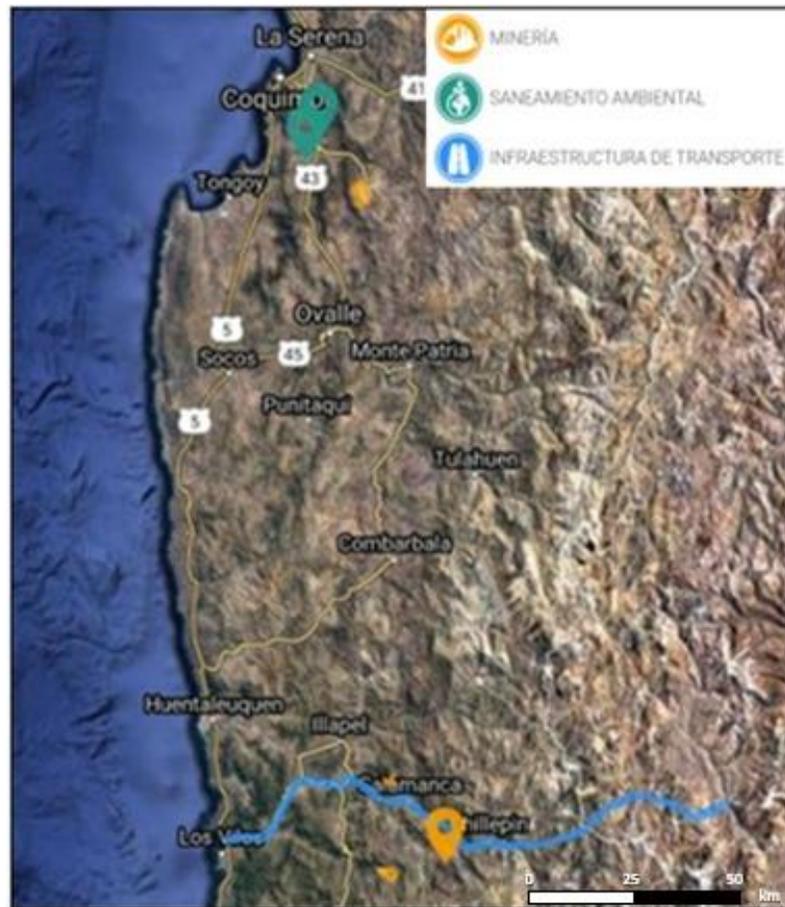


Figura 14: Conflictos socioambientales región de Coquimbo (INDH, 2021).

Entre los conflictos identificados como saneamiento ambiental en la figura 14, estos corresponden a la contaminación del Humedal El Culebrón y al Relleno sanitario El Panul. De los conflictos relacionados con la actividad minera se encuentra la contaminación del Río Choapa por parte de la Minera Los Pelambres, el Proyecto Tres Valles en la comuna de Salamanca, el tranque de relave El Mauro y los problemas de contaminación por parte de la Mina de Andacollo.

Otro de los conflictos latentes en la región es por el Proyecto Dominga. El conflicto se origina porque el puerto del proyecto se ubicaría dentro de la Reserva Nacional de Humboldt, afectando una zona rica en biodiversidad. A la vez afectaría las principales actividades económicas de los lugareños y el desarrollo de la actividad turística. Por otro lado, el proyecto contempla una planta desaladora, y la sal sería depositada en el mar pudiendo generar una serie de impactos en el ecosistema.

Con respecto al conflicto de la Minera Los Pelambres, estos se generan por el impacto ambiental en las aguas y la agricultura de los desechos tóxicos del tranque, ya que este se construyó sobre las vertientes que dan origen al Estero Pupío, obstruyendo y aislando las fuentes de agua superficiales con dicha construcción. Además, se acusa la usurpación de derechos de aguas a los regantes del valle de Pupío y Caimanes (Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID), 2017). Actualmente se encuentra en construcción una planta desaladora de agua de mar de 400 L/s para abastecer del recurso a sus actividades mineras.

Entre los motivos de conflicto socioambiental generados por la mina a rajo abierto de cobre Carmen de Andacollo, se ha planteado inseguridad por parte la comunidad desde los inicios de la operación de la mina en 1995 que se generaría producto de las tronaduras, los malos olores y posibles filtraciones de pilas de desechos hacia las napas de agua (Instituto Nacional de Derechos Humanos, 2015).

Continuando con el análisis, en la figura 15 se muestran los conflictos socioambientales identificados en la V región, y los causantes de estos.



Figura 15: Conflictos socioambientales en la región de Valparaíso (INDH, 2021).

De la figura anterior es posible observar una gran cantidad de conflictos asociados al sector de energía. Estos se relacionan con las centrales Termoeléctricas en zonas costeras entre Concón y Puchuncaví.

Las comunas de La Ligua, Cabildo y Petorca son reconocidos sectores agrícolas que presentan un alto grado de déficit en recurso hídrico. Los ríos Ligua y Petorca han sufrido una enorme presión hídrica y las napas subterráneas se encuentran agotadas. Uno de los conflictos identificados por el INDH y que se observa en la figura 15 corresponde a la usurpación de agua en estas zonas, y en la cual organizaciones ambientalistas acusan a empresarios de construir drenes para acarrear agua de forma impropia a sus explotaciones. Actualmente existen diversos poblados de la provincia que acceden a agua potable a través de camiones aljibes, pequeños agricultores han visto cómo se pierden sus siembras y plantaciones producto de la creciente sequía (Instituto Nacional de Derechos Humanos, 2015).

En relación con los conflictos relacionados con infraestructura de transporte, estos corresponden a obras hidráulicas, específicamente a la construcción de los embalses Chacrillas y Puntilla del Viento.

Los conflictos generados por la actividad minera se relacionan con Minera Andina, minas de Hierro en Longotoma y la Ligua, las faenas de fundición Ventanas y Mina El Soldado. Esta última provocó graves daños al ecosistema y especies autóctonas destruyendo de manera significativa parte de la flora y fauna en la Quebrada El Gallo por el vertimiento de toneladas de material estéril de roca sobre su fondo. Otras medidas que se debieron tomar por parte de la minera fue la restitución del cauce de la quebrada a su estado anterior a la intervención (Instituto Nacional de Derechos Humanos, 2015).

De lo expuesto anteriormente es posible identificar que gran parte de los conflictos socioambientales son causa de actividades mineras en la zona centro-norte. Los proyectos mineros tienen una fuerte intervención en los territorios aledaños a su emplazamiento como también con otros actores cuando se trata del recurso hídrico. En este ámbito se desarrollan conflictos con comunidades locales y con agricultores que ven disminuidas la oferta del recurso para su consumo. Por otra parte, esta fuerte intervención se debe a la degradación de la ecología de los lugares por el agotamiento del recurso como también a la no preservación de los medios intervenidos.

3.4.2 Demanda hídrica de la minería y sector agrícola en la zona centro-norte

En esta sección se cuantifica la demanda hídrica de la industria y también se identifica las principales faenas mineras y su ubicación en potenciales regiones para el sistema de reúso de aguas servidas tratadas en las mismas regiones en las cuales ya se ha enfocado el estudio.

- Industria minera

De manera general la estimación para la demanda de agua de origen continental esperada al 2031 alcanzará los 12,4 [m³/s], lo que representa una disminución cercana al 4% respecto al consumo esperado para el 2020. Por otro lado, en la medida que el consumo de agua continental mantiene una tasa de decrecimiento anual promedio cercana a un 0,3%, el agua de mar observa un crecimiento con una tasa promedio anual del 6%, alcanzando los 10,9 [m³/s] al 2031. En síntesis, al 2031 el consumo de agua de mar aumentaría un 93% respecto al 2020. Además, se espera que al 2031 el agua de mar represente un 47% del agua requerida por la minería del cobre a nivel nacional y el agua continental represente un 53%.

Ya que la situación es muy variable según cada región respecto al consumo de agua, a continuación, se muestra la distribución de faenas mineras de acuerdo con las regiones de interés que se mencionaron anteriormente, identificándose con mayor precisión las demandas hídricas

En base a la información entregada por el SERNAGEOMIN en el “Anuario de la minería de Chile” se presentan las principales faenas mineras por región según su producción.

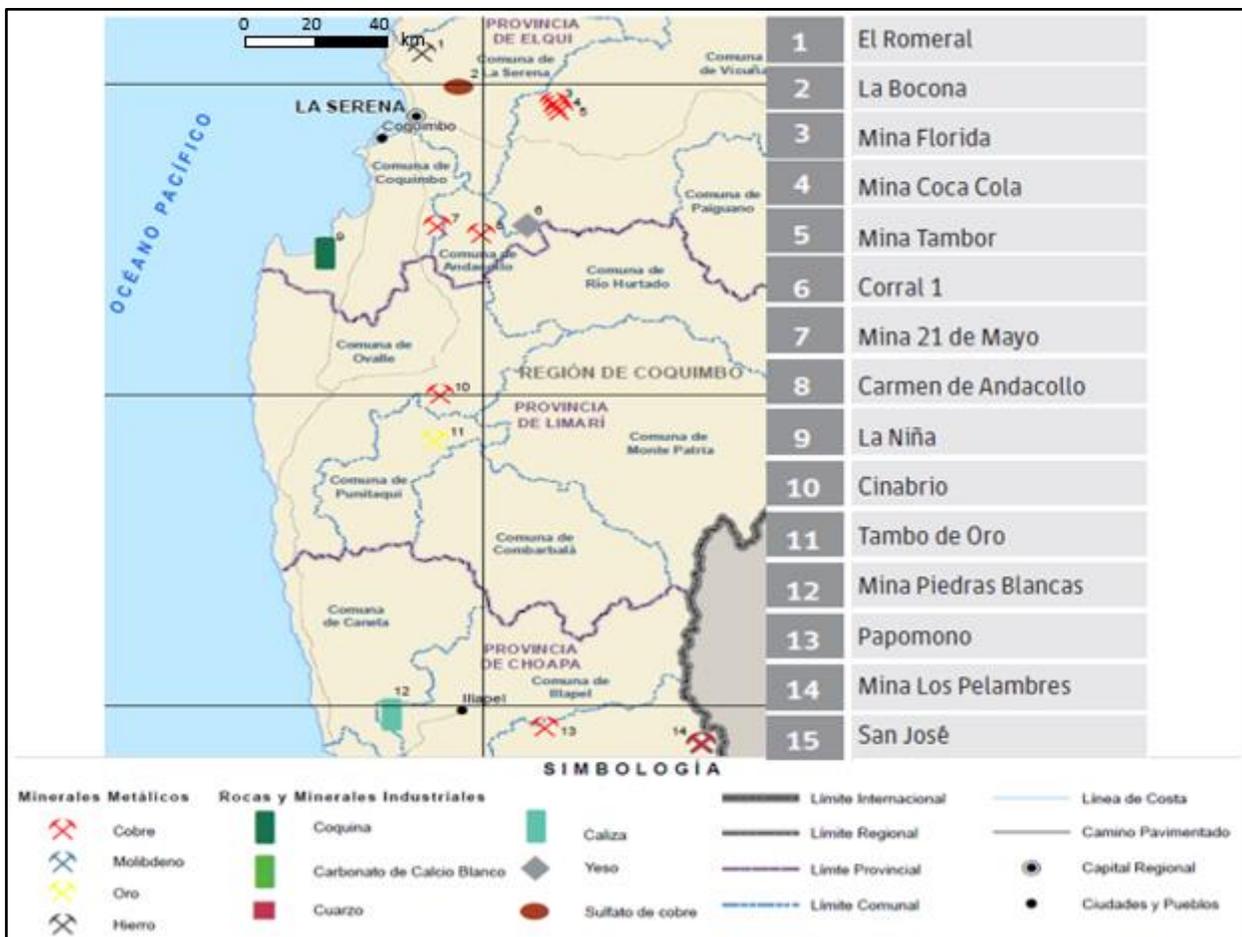


Figura 16: Principales faenas mineras y yacimientos en explotación de la Región de Coquimbo Adaptado de (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2020).

De la figura 16 se observa que en la región de Coquimbo algunas faenas mineras están cercanas a las ciudades y a los emisarios submarinos de La Serena y Coquimbo, las cuales corresponden a las numeradas del 1 al 8 según lo mostrado. De acuerdo con el registro de derechos de agua de la DGA la faena con una mayor cantidad de derechos de agua corresponde a Carmen de Andacollo con 540 [L/s] pertenecientes a la Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo, de las cuales alrededor de 340 [L/s] serían utilizados actualmente (EJAtlas, 2020).

Del resto de las faenas, se identifica en base al registro público de derechos de aprovechamiento de agua de la DGA, derechos para la mina La Bocona con 32 [L/s], Mina 21 de Mayo con 15 [L/s] y Mina Florida con 15 [L/s]. Por último, la compañía Minera Ninetsu Chile registra derechos de agua por 30 L/s, siendo un proyecto ubicado en la comuna de Vicuña y a 70 km del noreste de La Serena. Por otra parte, de acuerdo con estimaciones de (Dirección General de Aguas, 2017) para el año 2030 se proyecta una demanda de 1459 [L/s].

Para las principales faenas ubicadas en la región de Valparaíso se registra lo siguiente.

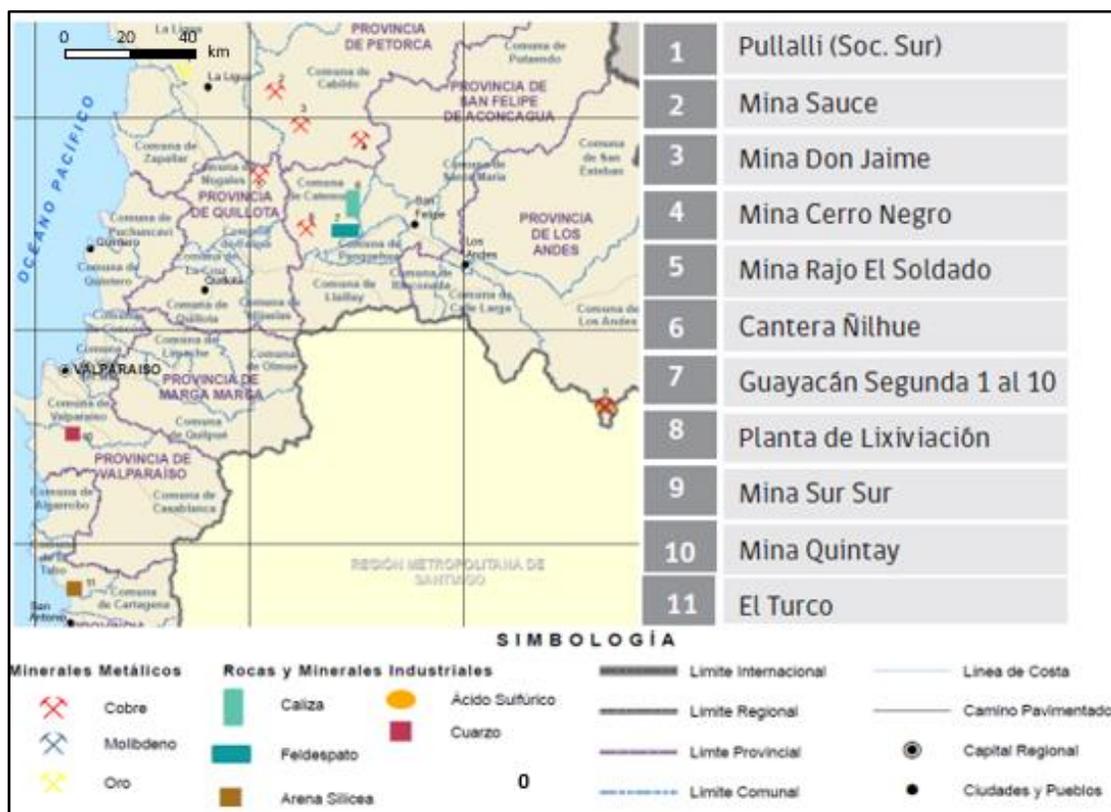


Figura 17: Principales faenas mineras y yacimientos en explotación de la Región de Valparaíso (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2020).

Tal como se puede ver en la figura anterior la mayor cantidad de faenas mineras se concentra en las comunas de Cabildo y Catemu. Sin embargo, la faena con extracción de cobre más cercana a la costa corresponde a Mina Rajo El Soldado perteneciente a la empresa Anglo American Sur.

Si bien la faena tiene derechos de agua por poco más 400 L/s /de acuerdo con el registro de la DGA, sin embargo sólo utilizan alrededor de 160 L/s según un estudio realizado para el balance hídrico de la faena (Zuñiga, 2013).

De acuerdo con la información recopilada del registro de derechos de agua de la DGA en la región de Valparaíso y con respecto al resto de las faenas en la zona, la Mina Sauce registra derechos de agua por 55 L/s, Mina Cerro Negro por 101 L/s, la Planta de Lixiviación perteneciente a Compañía Minera Amalia Ltda por 40 L/s, Pullalli con 17 L/s y Mina Sur Sur con 16 L/s. De acuerdo con estimaciones de (Dirección General de Aguas, 2017) para el año 2030 se proyecta una demanda de 1.527 [L/s].

- Sector agrícola:

En cuanto a la demanda consuntiva en las regiones de interés en estudio, este alcanza hasta un 83,1% como es el caso de la región de Coquimbo. En la región de Valparaíso también tiene un valor significativo con un consumo de 62,6% del total.

Respecto a la región de Coquimbo, los 3 valles principales corresponden a: Limarí, Choapa y Elqui. En estos valles, el sector agrícola tiene un papel fundamental desde el punto de vista económico, lo que significa una tasa creciente respecto a la demanda hídrica.

De acuerdo con información obtenida desde el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) respecto al Visualizador SIG en la región de Coquimbo y ocupando la información respecto a la red de canales presentes en la zona se identifica de manera preliminar las principales zonas agrícolas.



Figura 18: Red de canales y emisarios submarinos en la región de Coquimbo. Elaboración propia.

De la figura anterior se observa cómo se marcan distintivamente cada uno de los valles anteriormente mencionados y que de norte a sur corresponden a Elqui, Limarí y Choapa. Además, es posible observar la cercanía de los emisarios submarinos de las ciudades de Coquimbo y La Serena con el valle del Elqui, lugar en donde hay una gran extensión de canales producto de la intensa actividad agrícola.

Los terrenos agrícolas se presentan principalmente a lo largo del valle del río Elqui aguas abajo de la localidad de Vicuña hasta la desembocadura en La Serena. Estos terrenos se presentan únicamente en áreas aledañas a las terrazas fluviales de este cauce, mayoritariamente entre la localidad del Almendral y ciudad de La Serena. En el sector alto del río, la superficie de terrenos de agrícolas es muy reducida, pero, se logra desarrollar una pequeña superficie en algunos sectores del río Claro o Derecho y el río Cochiguaz, afluente de este último. Según los antecedentes, la provincia del Elqui posee terrenos agrícolas destinados principalmente a cultivos de forrajeras anuales y permanentes, frutales, hortalizas y parronales viníferos. El sector agrícola más extenso e importante según los tipos de cultivos anteriores, se localiza en las comunas de Coquimbo y La Serena, destacando también la superficie agrícola destinada a frutales, viñas y parronales en la comuna de Vicuña (Dirección General de Aguas, 2004)

Finalmente en base a información recopilada por la CIREN (2011) se muestra en la siguiente figura la disposición de los sectores de cultivo en la cuenca del río Elqui lo cual se relaciona con la figura anterior sobre la ubicación de la red de canales del valle.

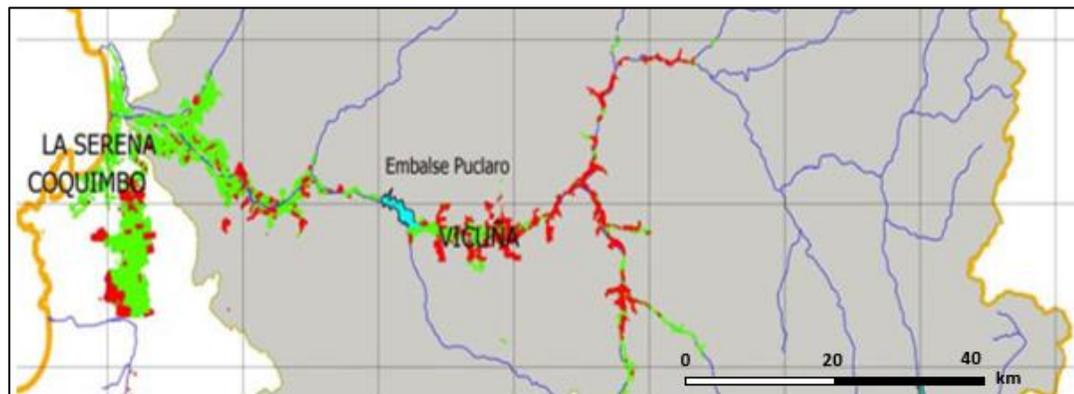


Figura 19: Sectores de riego Cuenca del río Elqui. (CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013).

El embalse Puclaro, es una infraestructura altamente relevante para el abastecimiento de agua en la cuenca principalmente para el sector agrícola.

De acuerdo la proyección de la demanda efectuada por la (Dirección General de Aguas, 2017) del sector agrícola en la región de Coquimbo, es estimado un aumento de un 16% entre los años 2015 y 2040. Esto significa que el consumo agrícola al año 2040 alcanzaría los 779.568 [Mm³/año], lo que equivale a un caudal constante de 24.719 L/s, lo que significaría que la región de Coquimbo pasaría a tener un mayor consumo que la región de Valparaíso en el sector agrícola.

En base a la información proporcionada por el Visualizador CIREN se muestra la red de canales que se expande por las cuencas de la región de Valparaíso.



Figura 20: Red de canales y principales emisarios submarinos en la región de Valparaíso. Elaboración propia.

De la figura anterior la red de canales de mayor envergadura y que se puede apreciar cómo se extiende entre las localidades de San Felipe hasta el norte de la costa de Valparaíso corresponde a la cuenca del río Aconcagua.

Para efectos del estudio de la cuenca del río Aconcagua y de acuerdo con el “Diagnóstico para desarrollar plan de riego en cuenca de Aconcagua (CIREN, 2016), se puede dividir en 9 sectores: Primera Sección del Río Aconcagua (1), Segunda Sección del Río Aconcagua (2), Tercera Sección del Río Aconcagua (3), Cuarta Sección del Río Aconcagua (4), Valle de Putaendo (5), Puchuncaví y Quintero (6), Quilpué – Villa Alemana (7), Laguna Verde- Peñuelas (8) y Valle de Casablanca (9). De acuerdo con la sectorización anterior la distribución del uso agrícola según los distintos cultivos presentes en la zona se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 34: *Distribución uso Agrícola por sectores en la cuenca del río Aconcagua.*

Uso Agrícola	Superficie (HA) por Sector								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Terrenos agrícolas	17.162	19.647	26.757	9.377	15.482	917	1.002	373	15.048
Chacras y Hortalizas	28	818	497	212	101	7			72
Cultivo anual	1.135	1.320	656	91	701				318
Flores			270	5					1
Frutales	10.810	9.165	14.573	2.909	9.316	142	201	29	755
Otros usos agrícolas	1.629	2.080	5.103	2.599	1.861	514	393	48	1.818
Pradera Artificial	3.337	5.413	5.206	3.216	3.434	215	407	294	5.545
Rotación cultivo pradera	6	115	91	15		1			
Viñas	214	731	359	327	66				6.537

Fuente: (Comisión Nacional de Riego, 2016).

4 Casos de estudio: Reúso de aguas servidas tratadas para el sector agrícola y minero

En esta sección, tal como ya se ha indicado previamente se proponen 3 casos de estudio en las regiones de Coquimbo y Valparaíso para las industrias agrícola y minera, recuperando una fuente de agua que hoy es desechada hacia el mar.

Los proyectos propuestos consisten en recolectar y conducir las aguas pretratadas desde las instalaciones de los emisarios submarinos existentes hasta una planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) en donde se realizarán los procesos correspondientes para obtener una calidad de agua que pueda ser aplicada a nivel industrial (específicamente en minería) y en el sector agrícola. Posteriormente se eleva y conducen las aguas servidas tratadas a las zonas de aplicación considerando estanques de acumulación y plantas elevadoras en el trazado.

Los sistemas propuestos se diseñan para 3 tipos de tratamiento biológico de aguas servidas: Lodos activados (LA), biorreactores de membrana (MBR) y Humedales construidos (HC). El objetivo de este análisis comparativo es poder optar por un tratamiento costo-efectivo desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

4.1 Metodología de evaluación

En esta sección se presenta la metodología y los criterios adoptados para el diseño de los sistemas, y la estimación de los presupuestos de las obras para cada escenario seleccionado.

Se presentan las bases de cálculo y criterios de diseño para la estimación del caudal de cada sistema, la materialidad y dimensión de las conducciones en función de las pérdidas de carga y presión en el sistema, plantas elevadoras de aguas pretratadas y tratadas (PEAS) hasta la PTAS, estanques de acumulación y otras obras requeridas para el abastecimiento de agua tratada en las zonas de aplicación.

El nivel de detalle de los sistemas presentados queda establecido como un anteproyecto en el cual se incluye el global de las obras involucradas considerando también elementos tales como bombas de impulsión, materialidad de conducciones, estanques de almacenamiento y obras civiles asociadas, en base a información utilizada en proyectos ya ejecutados.

4.1.1 Conducciones, Plantas elevadoras y Estanques

4.1.1.1 Caudal de Diseño

Para efectos del desarrollo del presente estudio, se determina el caudal de diseño a partir de la información obtenida a través de la SISS sobre los estudios tarifarios de las Sanitarias ESVAL y Aguas del Valle⁸.

⁸ Los Estudios tarifarios son información pública obtenidos desde la Biblioteca técnica de la SISS. Las direcciones URL asociadas se indican en las referencias.

Específicamente la información corresponde a la facturación de Aguas Servidas en las comunas correspondientes a los emisarios submarinos en estudio. En base a estos datos se proyectará un caudal de diseño para 15 años de vida útil del proyecto, considerando que posterior a este periodo puedan ser necesarias obras de ampliación y/o mejoramiento.

4.1.1.2 Materialidad de tuberías

El material de la conducción se determinará a partir de las presiones en los tramos de conducción del sistema según lo siguiente:

- Para presiones menores a 100 m.c.a: HDPE PE100 PN10.
- Para presiones mayores a 100 m.c.a: Acero con revestimiento de Polietileno exterior.

Sin embargo, se considera también los costos de tubería en función de los diámetros y otros factores técnicos.

4.1.1.3 Pérdidas de carga y diámetro de tuberías

Para el diseño de las conducciones e impulsión se consideró una velocidad máxima de 2,5 m/s. Cabe mencionar que para efectos de la optimización del diseño se prioriza velocidades no mayores a 1,5 m/s en la tubería para evitar grandes pérdidas de energía y prevenir daño en las tuberías con el tiempo, por lo que se escogerá diámetros convenientes en base a este criterio. La pérdida de carga friccional será calculada mediante la siguiente expresión de Hazen- Williams.

$$J = 10,67 * \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87} * C^{1,85}} * L$$

Donde:

- J: Pérdida de carga [m/m]
- Q: Caudal [m³/s]
- D: Diámetro interior [m]
- C: Coeficiente de rugosidad HW
- L: Largo tubería [m]

El valor de C depende del material de la tubería. Para este caso se utilizará un valor de C =140, para tuberías de HDPE y para el acero se considerará un factor de fricción 150 de acuerdo con el catálogo técnico de tuberías.

Las pérdidas de cargas singulares se han supuesto como un 5% de las friccionales. Además, se incluye un 0.5% de las pérdidas friccionales como otras pérdidas adicionales del sistema relacionadas con los equipos y piezas especiales en los trazados tales como válvulas, medidores de caudal, entre otras.

4.1.1.4 Presión Máxima de diseño

Una vez obtenida la información de elevación del diseño, los caudales a impulsar y las pérdidas asociadas, se calcula las presiones de diseño, información que permite definir y verificar las características de las tuberías que se diseñaran, y el número de estaciones de bombeo necesarias para impulsar el caudal requerido. Se verifican las presiones obtenidas para cada tramo de conducción de manera que la cañería a emplear tenga una capacidad mayor a la presión máxima de diseño y ajustando el espesor requerido para minimizar los costos del sistema.

4.1.1.5 Plantas elevadoras de aguas y estanques de succión

Las plantas elevadoras de aguas servidas estarán compuestas por bombas centrífugas de impulsión. A su vez estas bombas se dimensionan para el caudal y la altura de elevación según el tramo del diseño. Esta última se calcula mediante la diferencia de cota a partir del perfil de terreno y las pérdidas totales en el tramo.

La potencia de las bombas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Potencia\ Bomba[kW] = \frac{H * Q * g * \rho}{1000 * \left(\frac{n}{100}\right)}$$

Donde:

- H: Altura total de elevación[m].
- Q: Caudal elevación [l/s]
- g: Gravedad [m/s²]
- ρ : Densidad del fluido [kg/m³]
- n: Rendimiento de bomba [80%]

El volumen del estanque de succión se calcula para un tiempo de bombeo de 20 minutos de acuerdo con los criterios para el dimensionamiento de PEAS y PEAP en las normas NCh. 2472 “Aguas Residuales-Plantas Elevadoras-Especificaciones Generales” y Nch. 692 “Agua potable – Plantas Elevadora – Especificaciones Generales”.

4.1.1.6 Estanques de almacenamiento de aguas

De acuerdo con el diseño de cada sistema se consideran estanques de almacenamiento de agua con capacidad acorde a los requerimientos de la zona.

Se considera una capacidad de almacenamiento de 1 o 2 días para la demanda de cada tramo del sistema correspondiente. Esto con el fin de almacenar un volumen de abastecimiento considerable de acuerdo con los distintos usuarios proyectados. Por otra parte, no se justifica un almacenamiento mayor considerando que se proyecta abastecer tanques de almacenamiento particulares presentes en cada zona.

4.1.2 Planta de tratamiento de aguas servidas y requerimientos de calidad

Mediante una planta de tratamiento de aguas servidas en los sistemas proyectados, se busca obtener la calidad de agua requerida para su uso en la industria minera y sector agrícola.

En base a la revisión de los capítulos anteriores se establece que la calidad de agua requerida para riego se define en la Norma NCh1333, ya que esta define las concentraciones máximas de parámetros para el uso de agua en el sector agrícola. En complemento se consideran las directrices sugeridas sobre los tratamientos requeridos y recientemente aprobadas en la NCh3456 sobre el reúso de aguas residuales para proyectos de riego.

Por otra parte, para la calidad de agua requerida en la industria minera, se determina que esta quedará definida en base a la Tabla N°1 del DS90 la cual establece las concentraciones máximas para distintos parámetros para la descarga de aguas residuales en sistemas sin dilución y la cual ya ha sido aprobada para el reúso de aguas servidas tratadas en la industria minera y otros usos en la región de Antofagasta, estableciéndose como una calidad de agua suficiente para usos industriales.

El estándar de calidad de agua objetivo con el tratamiento de la PTAS se muestra en la tabla 35:

Tabla 35: *Calidad de agua objetivo sistemas de reúso de aguas servidas tratadas en la industria minera y agrícola (continúa en página 84).*

Contaminantes	Unidad	Expresión	Límites Máximos Objetivo
Aceites y Grasas	mg/L	AyG	20
Aluminio	mg/L	Al	5
Arsénico	mg/L	As	0,1
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	0,2
Cobre	mg/L	Cu	0,2
Coliformes Fecales	NMP/100ml	Coli/100ml	1000
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
DBO5	mgO2/L	DBO5	35
Fluoruro	mg/L	F-	1
Fósforo	mg/L	P	10
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCV	2
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5
Manganeso	mg/L	Mn	0,2
Mercurio	mg/L	Hg	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	0,01
Níquel	mg/L	Ni	0,2
Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
PH	Unidad	pH	6,0-8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Sedimentables	ml/l/h	SSED	20
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Zinc	mg/L	Zn	2
Boro	mg/l	B	0,75

Contaminantes	Unidad	Expresión	Límites Máximos Objetivo
cloruros	mg/l	Cl-	200
Hidrocarburos fijos	mg/l	HF	10
Pentaclorofenol	mg/l	C6OHC15	0,009
Poder Espumógeno	mm	PE	7
Sulfatos	mg/L	SO42-	250
Tetraclometano	mg/l	C2C14	0,04
Tolueno	mg/l	C6H5CH3	0,7
Triclometano	mg/l	CHC13	0,2
Xileno	mg/l	C6H4C2H6	0,5
Berillo	mg/l	Be	0,1
Cobalto	mg/l	Co	0,05
Cromo	mg/l	Cr	0,1
Litio	mg/l	Li	2,5
Plata	mg/l	Ag	0,2
Sodio porcentual	%	Na	35
Vanadio	mg/l	V	0,1

Para cumplir con el objetivo de la tabla 35 se deberá contar con un pretratamiento y tratamiento primario que complementará el pretratamiento o tratamiento primario efectuado por las instalaciones existentes de los emisarios submarinos según lo visto en la sección 3.1.3. A lo anterior deberá incluirse los tratamientos secundarios en el cual se proyectan y diferencian entre 3 alternativas para cada sistema: LA, MBR y HC. Posteriormente se ha determinado la inclusión de un tratamiento terciario en cada una de las alternativas permitiendo obtener una calidad de agua que permitirá su uso en las industrias como objetivo. De requerirse una calidad de agua más exigente en ciertos parámetros según su uso, esta será exclusiva responsabilidad del usuario en particular.

Cabe mencionar que dentro de los alcances de este estudio no se ha considerado el diseño específico de cada una las plantas de tratamiento para cada alternativa.

Los tratamientos que se deben incluir para los tratamientos se muestran en la tabla 36:

Tabla 36: *Procesos de tratamiento en PTAS para cada sistema proyectado*

Proceso de Tratamiento	Sistema Lodos Activados	Sistema MBR	Sistema Humedal Construido
Pretratamiento	Desarenado y desgrasado	Desarenado y desgrasado	Desarenado y desgrasado
Primario	Floculación / Coagulación		Floculación / Coagulación
Secundario	Decantador Primario Lodos Activados Clarificador	MBR	Decantador Primario Humedal Construido
Terciario	Filtración / Intercambio iónico Desinfección	Filtración / Intercambio iónico Desinfección	Filtración / Intercambio iónico Desinfección

Para efectos del anteproyecto no se especifica el tratamiento de lodos. Sin embargo, se deberá considerar lo establecido por el Decreto Supremo 04 sobre la clasificación, manejo y la posterior disposición de lodos tratados.

4.1.3 Estimación de costos de inversión y operación de los sistemas proyectados

Para estimar los distintos costos de los sistemas propuestos se ha recopilado información desde la biblioteca técnica de la SISS, específicamente de los estudios tarifarios de las empresas sanitarias de Aguas del Valle, ESVAL, ESSBIO y Aguas Andinas. Los datos recopilados han sido utilizados para la estimación de los costos de inversión de la PTAS mediante LA y además se ocupó para estimar los precios unitarios del suministro e instalación de las cañerías de acero recubiertas en polietileno de alta densidad (HDPE), bombas de impulsión y movimientos de tierra. En complemento de la información anterior, se incluye en el presupuesto precios unitarios vigentes y dispuestos por la constructora HYDRO Ingeniería y Construcción SpA (HYDRO IC), empresa que se desempeña en el rubro de construcción de obras hidráulicas. El detalle de precios unitarios utilizados se encuentra entre los Anexos 28 y 31.

4.1.3.1 Costos directos de inversión

El presupuesto para los costos directos de inversión se estima según la siguiente estructura⁹:

A Conducción y Elevación

1. Movimientos de tierra: excavaciones y obras asociadas a las tuberías y estanques¹⁰.
 - Excavaciones en zanja: m3
 - Relleno cama de arena: m3
 - Relleno lateral e inicial: m3
 - Relleno material de excavación: m3
 - Relleno material empréstito: m3
 - Retiro de Excedentes: m3

2. Obras Civiles: específicamente a las obras asociadas para los estanques de succión.
 - Hormigón H30-G25: m3
 - Emplantillado: m3
 - Enfierradura Acero redondo A63-42H: kg
 - Moldajes Cilíndricos: m2
 - Moldajes Lisos: m2

3. Suministro e instalación de tuberías: costo asociado al precio del material como también a la colocación e instalación en terreno.

⁹ Para estimaciones y uso de precios unitarios en USD y UF, se utilizó la siguiente tasa de conversión actualizada al día 27/07/2021: 1 USD = 758 CLP / 1 UF = 29754 CLP.

¹⁰ Los precios unitarios para cada ítem de esta sección se obtuvieron del informe sanitaria de ESVAL y Aguas del Valle para los sistemas de la IV y V región respectivamente.

4. Terreno y expropiaciones: costos asociados al terreno y expropiaciones realizadas para la conducción del sistema y las plantas elevadoras. A partir del diseño de cada sistema se estimó el área requerida y a partir del valor del metro cuadrado se estima el costo¹¹.
5. Equipos: equipos asociados a elevación de aguas. Se estima el costo de estos en base a la potencia calculada y a cotizaciones de los informes sanitarios ya mencionados.

B PTAS

1. PTAS: según cada alternativa de tratamiento se ha determinado una curva de estimación de costos en función del caudal o área requerida (este último en el caso de humedales construidos). Los ajustes empleados para la estimación se presentan a continuación.

Lodos Activados: mediante el registro recopilado de los informes sanitarios de las empresas ESVAL, ESSBIO y Aguas Andinas respecto a los costos de inversión de PTAS con tratamiento mediante lodos activados¹², se determina un ajuste potencial de tendencia en función del caudal de diseño, la cual se muestra en la siguiente figura.

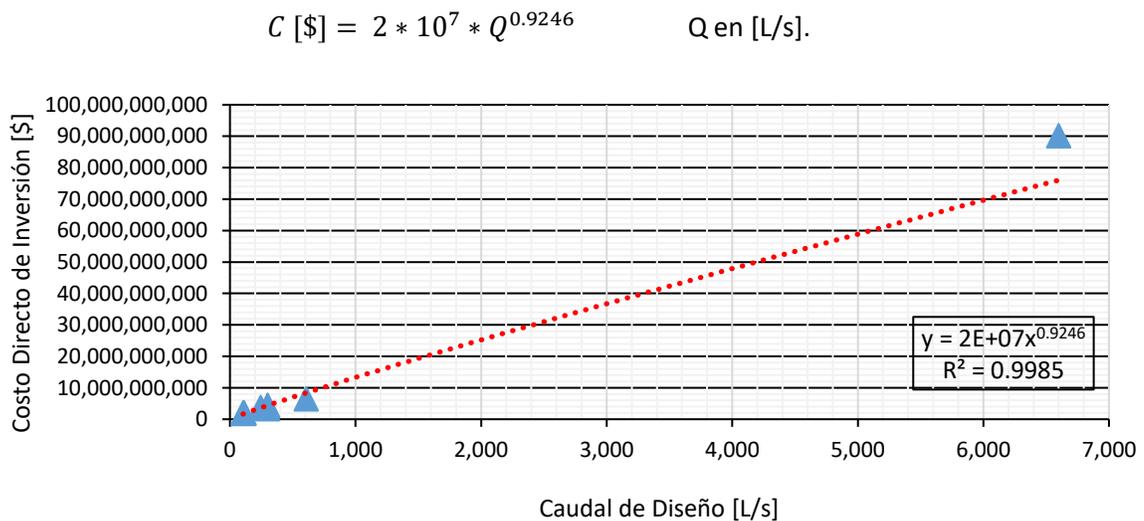


Figura 22: Ajuste para Costos de Inversión PTAS Lodos Activados. Elaboración Propia

MBR: para la estimación de los costos en la implementación de PTAS mediante biorreactores de membrana se ha empleado una ecuación en función del caudal de diseño de plantas existentes en el mundo y sus costos de inversión según lo indicado en (Codagua, 2018) y (Costwater, 2020). La función queda definida según lo siguiente.

¹¹ El valor del metro cuadrado se obtuvo de los informes sanitarios disponibles en la SISS y se muestran en los Anexos 29.

¹² La información de PTAS utilizadas se encuentra en el Anexo 42.

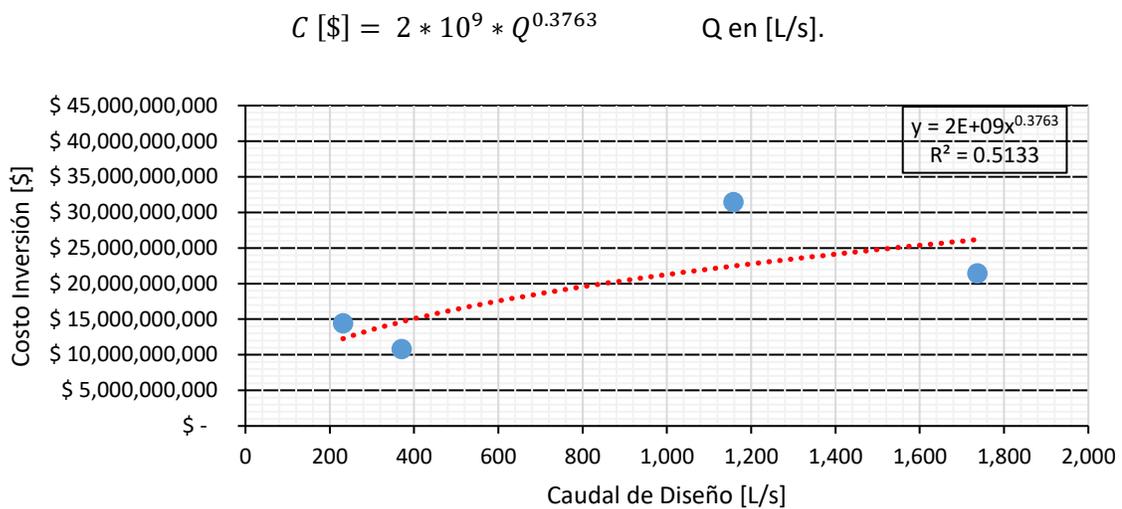


Figura 23: Ajuste para Costos de Inversión PTAS MBR. Elaboración Propia

- Humedales Artificiales: para la estimación de los costos de inversión de esta alternativa se ha empleado una ecuación en función del caudal de diseño estimada a partir de casos aplicados y estimada por (Kadlec & Scott, 2009) . El área requerida se estimó en base a 1750% el área de un sistema de lodos activados según referencias de (Unites States Enviromental Protection Agency, 2007) revisadas en el análisis de costos del capítulo 3.

$$C [\text{miles de USD}] = 194 * A^{0.69} * 1,4 \quad \text{Área: [ha].}$$

- Área requerida PTAS: para la determinación del espacio requerido por las plantas de tratamiento en cada alternativa, se estimó en primer lugar el área empleada por una PTAS mediante lodos activados. Esta estimación se realiza bajo la misma fuente de datos con la cual se calculó los costos de inversión. Las áreas requeridas para los sistemas de MBR y Humedal construido se estiman bajo información bibliográfica mostrada en la sección 3.3.3., estimándose en un 30% del área requerida de lodos para los sistemas MBR y en 1750% para humedales construidos. A continuación, se muestra el ajuste para la estimación de área mediante una PTAS de lodos activados.

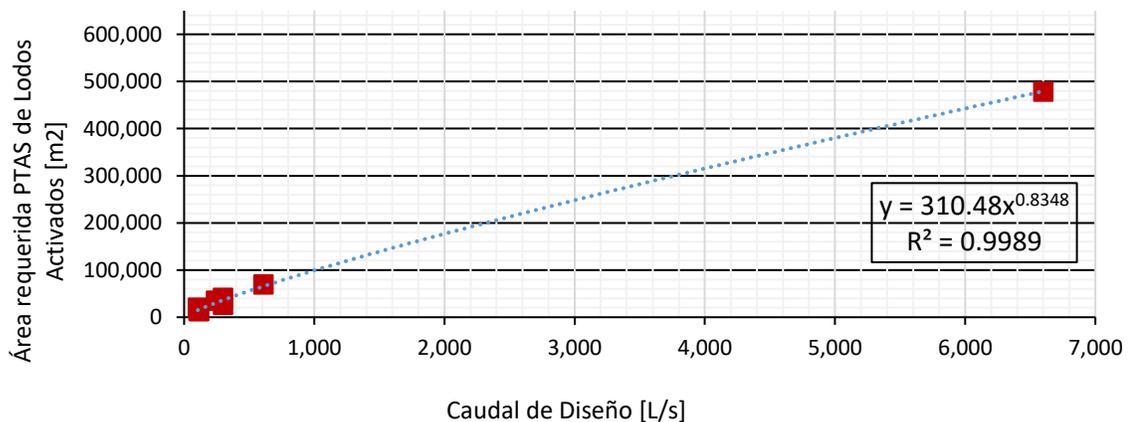


Figura 24: Ajuste para estimación de área requerida PTAS Lodos Activados. Elaboración Propia

C Obras complementarias

1. Obras civiles asociadas a los estanques de almacenamiento. Se estiman según el desglose del detalle 2 de la sección A.

2. Terreno y expropiaciones: costos asociados al terreno y expropiaciones realizadas para la instalación de estanques de almacenamiento.

Cabe destacar que la estimación del presupuesto incluye los costos directos de cada uno de los proyectos, no así los gastos generales, imprevistos en la ejecución y utilidades de la empresa constructora.

4.1.3.2 Costos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento (O&M) del sistema están determinados por el uso de energía, productos químicos, los procesos de tratamiento, transporte, disposición de lodos, control de procesos, monitoreo ambiental, análisis de laboratorio, personal, entre otros. A su vez los costos del sistema de tratamiento se pueden separar en costos fijos y costos variables.

Entre los costos fijos se encuentran los siguientes:

- **Personal de operación y mantención:** requerido para la operación de la PTAS y PEAS y todas las actividades relacionadas con el sistema en general.
- **Servicios de laboratorio y control de procesos:** corresponden a costos por los servicios de Toma de muestras y análisis de los parámetros requeridos para el cumplimiento del objetivo de calidad.
- **Monitoreo ambiental:** Se verifican y valorizan los monitoreos ambientales del sistema.

Por otra parte, los costos variables se pueden segregar de acuerdo con lo siguiente:

- **Energía eléctrica:** considera el consumo eléctrico requerido (potencia).
- **Productos químicos:** estos pueden ser hipoclorito de sodio para la desinfección, cal, polímeros de deshidratación de lodos, entre otros que sean utilizados en los procesos de tratamiento.
- **Transporte de residuos y de lodos:** se relaciona con los costos para el retiro, transporte y disposición de los residuos sólidos extraídos en el tratamiento preliminar y de los lodos generados en las PTAS.

Para efectos de la evaluación, se estiman los costos de O&M en la PTAS y transporte (conducción, elevación y obras complementarias) por separado.

Los costos de O&M de la PTAS mediante un sistema MBR se determinan en base a un ajuste polinómico según distintos casos aplicados y elaborado por (AMPHOS, 2014). A continuación se muestra la curva empleada, la cual está en función del caudal de diseño.

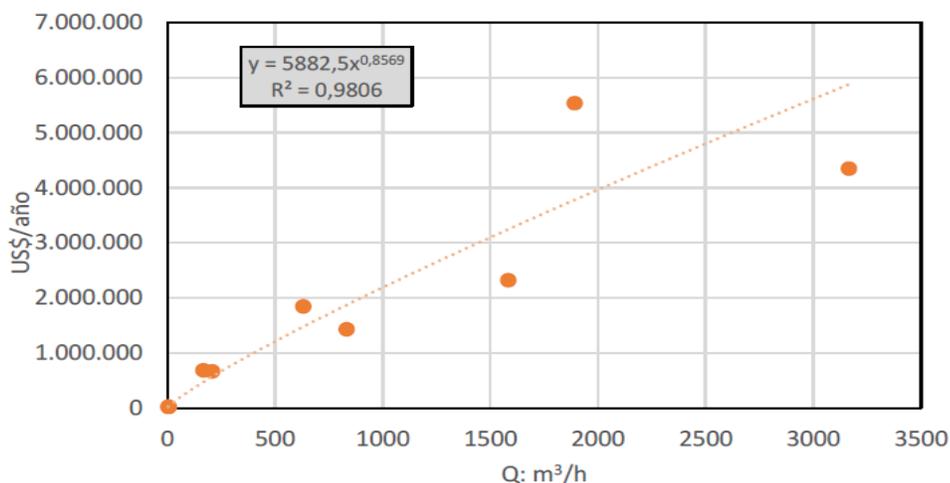


Figura 25: Curva de ajuste para la determinación de costos de O&M en PTAS mediante sistema MBR.

Por otra parte, para los costos de O&M de la PTAS mediante lodos activados se ha implementado el mismo método que para la estimación de los costos de inversión. Es decir, en base a la información proporcionada por los estudios tarifarios de las empresas sanitarias ESVAL y ESSBIO se ajusta una línea de tendencia potencial calculando los costos anuales para el caudal de diseño correspondiente en cada caso. El ajuste se puede observar en la siguiente figura y la fuente de información en el Anexo 43.

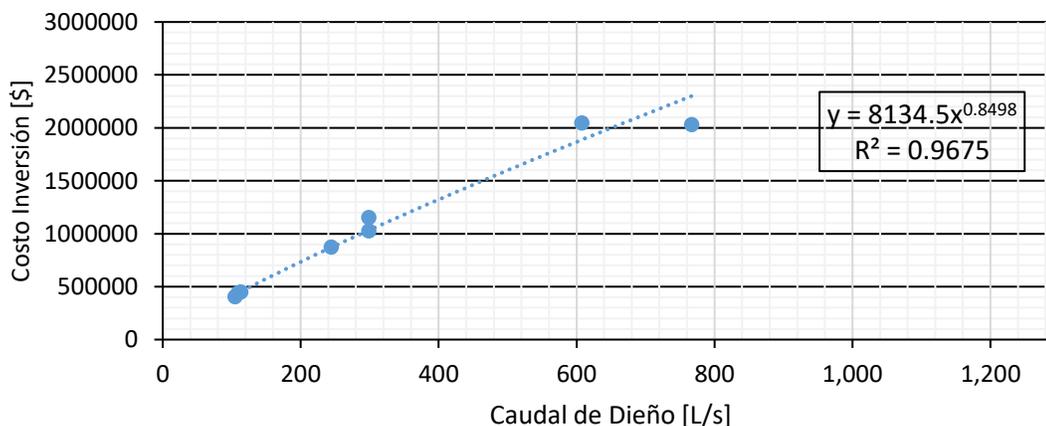


Figura 26: Curva de ajuste para la determinación de costos de O&M en PTAS de Lodos Activados.

En el caso de la PTAS mediante un Humedal construido se ha tomado información teórica sobre los costos asociados ocupando la misma fuente que para la determinación de los costos de inversión (Kadlec & Scott, 2009). Según lo anterior, se estiman los costos de O&M en base a la siguiente ecuación:

$$C [USD] = 2000 * A \quad , \quad A = \text{área humedal [ha]}$$

Finalmente, los costos de O&M de transporte, asociados a la conducción, elevación y obras complementarias, se determinan mediante la potencia instalada. Por otra parte, se utilizan las tarifas de suministro actualizadas a Julio de 2021 por la Compañía General de Electricidad S.A (CGE)¹³ y considerando que el proyecto pertenecería a un cliente de clasificación AT-2, referentes a consumo por alta tensión y con potencia contratada y medición de energía. Por otra parte, se considera un factor de 1.1, asociado a los costos de mantención, específicamente de tuberías y equipos. Según lo anterior los costos totales de O&M al año se estiman mediante:

$$C \text{ [$/mes]} = CF + (CST + CSP + CE) * CM + CP$$

$$CT \text{ [USD/año]} = C * 12 * 1.1/758$$

- CF: Cargo fijo mensual [\$/mes]
- CST: Cargo por uso del sistema de transmisión [\$/kWh]
- CSP: Cargo por Servicio Público [\$/kWh]
- CE: Cargo por energía [\$/kWh]
- CPC: Cargo por potencia contratada [\$/kW/mes]

4.2 Casos de estudio

4.2.1 Sistema de reúso emisario submarino La Serena

Se propone un sistema de reúso de aguas servidas tratadas en la región de Coquimbo, específicamente recuperando las aguas descargadas a través del emisario submarino La Serena. El sistema se proyecta para uso principalmente agrícola, sin perjuicio de poder utilizar en labores industriales o actividades mineras de la zona. Las principales zonas de uso en riego corresponden a la zona baja de la cuenca del río Elqui y como suministro de abastecimiento al Embalse Puclaro.

4.2.1.1 Caudal de diseño

De acuerdo con la metodología mostrada en la sección anterior el caudal de diseño quedará definido por la estimación efectuada por la sanitaria Aguas del Valle sobre la facturación anual de aguas servidas para la comuna de La Serena.

En la tabla 37 se muestran las proyecciones.

¹³ Se muestran los precios unitarios de tarifas respectivas en Anexo 41.

Tabla 37: Facturación de aguas servidas anuales proyectadas comuna La Serena.

Año	Población Urbana INE (hab)	Población Territorio Operacional (hab)	Cobertura AS (%)	Población Saneada AS (hab)	Clientes AS Total	Facturación AS Total (m3/año)
2021	241.522	226.975	99.1%	224.988	86.562	14.944.633
2022	245.682	232.834	99.1%	230.796	88.762	15.279.348
2023	249.913	238.845	99.1%	236.754	90.961	15.611.965
2024	254.217	245.011	99.1%	242.866	93.161	15.942.493
2025	258.596	251.336	99.1%	249.136	95.361	16.270.940
2026	263.049	257.824	99.1%	255.567	97.561	16.597.318
2027	267.580	264.480	99.1%	262.165	99.761	16.921.634
2028	272.188	271.308	99.1%	268.933	101.961	17.243.898
2029	278.312	278.312	99.1%	275.876	104.161	17.564.120
2030	285.497	285.497	99.1%	282.998	106.360	17.882.309
2031	292.867	292.867	99.1%	290.303	108.560	18.198.473
2032	300.427	300.427	99.1%	297.798	110.760	18.512.623
2033	308.183	308.183	99.1%	305.485	112.960	18.824.766
2034	316.139	316.139	99.1%	313.372	115.160	19.134.913
2035	324.300	324.300	99.1%	321.462	117.360	19.443.073

De lo anterior se obtiene que para el año 2035 se estima una facturación anual de 19.443.073 (m3/año), lo que equivale a un caudal medio de 616 L/s, ocupando este último como caudal de diseño para el sistema.

4.2.1.2 Zona de Implementación

Las principales zonas de implementación o aplicación de las aguas servidas reusadas se han identificado conforme a lo siguiente.



Figura 27: Zonas de aplicación aguas servidas tratadas desde emisario submarino La Serena.

De acuerdo con la revisión del capítulo 3 se identificó que la provincia del Elqui posee terrenos agrícolas destinados principalmente a cultivos de forrajeras anuales y permanentes, frutales, hortalizas y parronales viníferos. La extensión del proyecto podría potenciar alrededor de 10.000 hectáreas agrícolas, sin embargo, se podría beneficiar directamente alrededor de 2.500 hectáreas con un caudal de 616 [L/s].

4.2.1.3 Conducción y Elevación del sistema

El trazado del sistema se elaboró conforme a la ubicación de la planta de pretratamiento del emisario submarino, a las rutas viales existentes que permitan la instalación y construcción de tuberías a lo largo del sistema y finalmente a una ubicación propuesta para el emplazamiento de la planta de tratamiento de aguas servidas, considerando los espacios requeridos para su instalación.

Por lo demás se determina el emplazamiento de las plantas elevadoras del sistema con el objetivo de optimizar la elevación de las aguas impulsadas hasta las zonas de aplicación y distribución.

En las siguientes figuras se muestra la disposición de las instalaciones para el sistema propuesto.



Figura 28: Trazado y PEAS para sistema de reuso de aguas servidas tratadas emisario submarino La Serena.

Para el dimensionamiento de la impulsión, en cada una de plantas elevadoras se debe determinar el perfil de elevación para cada tramo, como también las presiones de funcionamiento que estarán en función principalmente de las cañerías empleadas en el sistema, la pérdida asociada y la diferencia de cotas entre plantas elevadoras (PE).

En la siguiente figura se muestra el perfil piezométrico obtenido para el sistema.

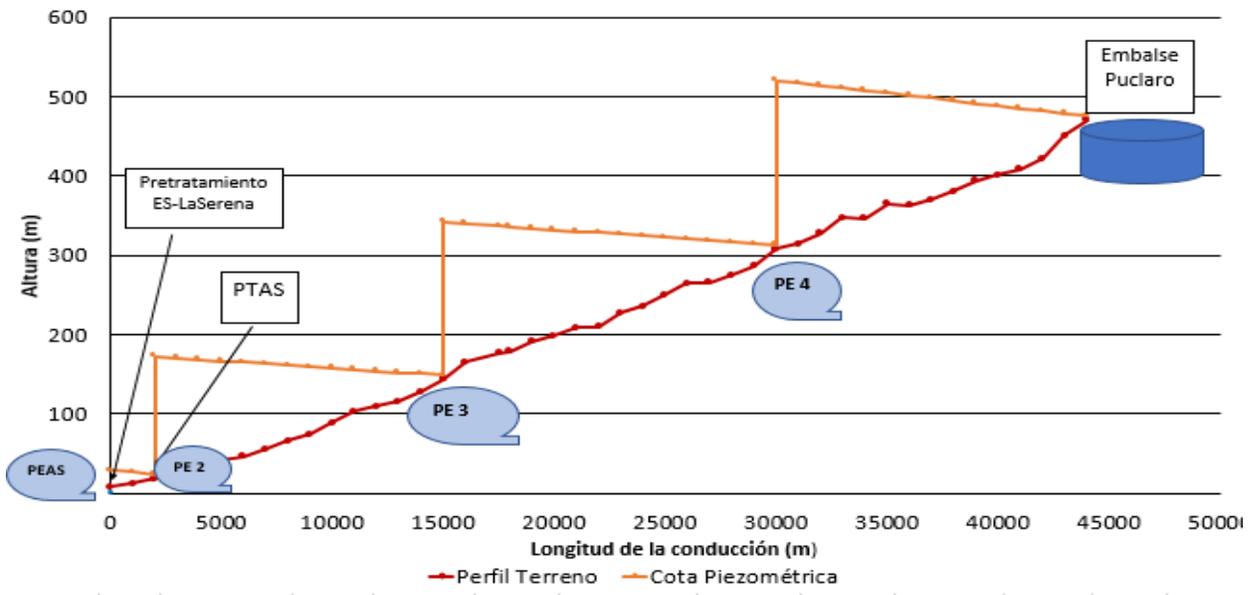


Figura 29: Perfil piezométrico de impulsión sistema de reúso emisario submarino La Serena.

A partir de lo anterior se estimó las alturas de elevación para la operación de las bombas en cada tramo. El sistema de impulsión opera con $n + 1$ bombas, considerando n en operación y una de respaldo en casos de pérdidas de presión o como reserva.

Tabla 38: Potencia Instalada Plantas elevadoras Sistema La Serena.

Planta Elevadora	Tramo de Impulsión	Longitud [m]	Altura de Operación [m]	Número de Bombas [N+1]	Caudal (L/min)	Potencia Bomba [kW]	Potencia Instalada [kW]
PEAS	1	2.000	24	5	9.240	45	223
PE2	2	13.000	156	5	9.240	295	1.476
PE3	3	15.000	174	4	7.000	249	994
PE4	4	14.000	174	3	4.500	160	480

4.2.1.4 Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS

A partir de lo descrito en la metodología de diseño se presentan los estanques de succión (ES) y de almacenamiento (EA) contemplados para el proyecto. Cada planta elevadora cuenta con un estanque de succión. En las instalaciones de la PTAS se proyectan dos estanques, uno para el afluente de aguas servidas y otro para el efluente desde donde se impulsarán las aguas tratadas.

Se han contemplado 3 estanques de almacenamiento en total, dos se emplazarán aledaños a la PE3 y otro estanque en la PE4.

Tabla 39: *Estanques de succión y almacenamiento sistema La Serena.*

Estanque	Capacidad Diseño [m3]
ES1	700
ES2A-ES2B [2]	700
ES3	500
ES4	300
EA1-EA2 [2]	10.000
EA3	13.000

De acuerdo con cada alternativa de tratamiento se estima el espacio requerido por la PTAS.

Tabla 40: *Áreas requeridas PTAS Sistema La Serena.*

Sistema La Serena	Área PTAS [m2]
Lodos Activados	66.505
MBR	19.951
Humedal Construido	1.163.834

4.2.1.5 Resumen Costos Sistema de reúso La Serena

Finalmente se presenta el resumen de costos de inversión para el anteproyecto del sistema de reúso de aguas servidas tratadas con aguas recolectadas desde el emisario submarino La Serena. El detalle de los costos y precios unitarios asociados a las instalaciones del sistema se puede encontrar entre los Anexos 28 y 31. A continuación, se muestra el resumen del itemizado del proyecto.

Tabla 41: *Resumen de costos Sistema de reúso La Serena.*

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO LA SERENA		
Ítem	Tratamiento	Lodos Activados	MBR	Humedal Construido
	Descripción	Precio Total		
A	CONDUCCION Y ELEVACION	\$ 19,690,748,658	\$ 19,690,748,658	\$ 19,690,748,658
B	PTAS	\$ 7,986,360,492	\$ 22,544,592,749	\$ 12,409,317,115
C	OBRAS COMPLEMENTARIAS	\$ 1,292,410,186	\$ 1,292,410,186	\$ 1,292,410,186
1	COSTO DIRECTO [\$]	\$ 28,969,519,336	\$ 43,527,751,593	\$ 33,392,475,958
2	COSTO DIRECTO SISTEMA [USD]	\$ 38,218,363	\$ 57,424,474	\$ 44,053,398
3	COSTO O&M PTAS [USD/año]	\$ 1,909,486	\$ 4,301,679	\$ 232,767
4	COSTO O&M TRANSPORTE [USD/año]	\$ 1,449,500	\$ 1,449,500.14	\$ 1,449,500.14
5	COSTO DIRECTO UNITARIO TRANSPORTE [USD/m3]	\$ 1.42	\$ 1.42	\$ 1.42
6	COSTO DIRECTO UNITARIO PTAS [USD/m3]	\$ 0.54	\$ 1.53	\$ 0.84
7	COSTO UNITARIO O&M PTAS [USD/m3]	\$ 0.10	\$ 0.22	\$ 0.01
8	COSTO UNITARIO O&M TRANSPORTE [USD/m3]	\$ 0.13	\$ 0.13	\$ 0.13
9	COSTO DIRECTO UNITARIO SISTEMA [USD/m3]	\$ 1.97	\$ 2.96	\$ 2.27
10	COSTO O&M UNITARIO SISTEMA [USD/m3]	\$ 0.22	\$ 0.35	\$ 0.14

4.2.2 Sistema de reúso emisario submarino Coquimbo

Se propone un sistema de reúso de aguas servidas tratadas en la región de Coquimbo, específicamente recuperando las aguas descargadas a través del emisario submarino Coquimbo (La Pampilla). El sistema se propone para uso principalmente en el sector agrícola y minero, sin perjuicio que puedan utilizarse las aguas para labores industriales de la zona.

4.2.2.1 Caudal de diseño

De acuerdo con la metodología mostrada en la sección anterior el caudal de diseño quedará definido por la estimación efectuada por la sanitaria Aguas del Valle sobre la facturación anual de aguas servidas para la comuna de Coquimbo. En la tabla 42 se muestran las proyecciones de facturación de aguas servidas para cada año.

Tabla 42: *Facturación de aguas servidas anuales proyectadas comuna Coquimbo.*

Año	Pob Urbana INE (hab)	Población Territorio Operacional (hab)	Cobertura a AS (%)	Población Saneada AS (hab)	Clientes AS Total	Facturación AS Total (m3/año)
2021	252.796	226.018	99.1%	224.040	76.258	13.740.209
2022	258.067	232.124	99.1%	230.092	78.304	14.067.511
2023	263.447	238.394	99.1%	236.307	80.349	14.392.780
2024	268.940	244.833	99.1%	242.690	82.395	14.716.025
2025	274.547	251.447	99.1%	249.246	84.440	15.037.256
2026	280.272	258.239	99.1%	255.979	86.486	15.356.481
2027	286.115	265.215	99.1%	262.894	88.532	15.673.711
2028	292.081	272.379	99.1%	269.995	90.577	15.988.952
2029	298.171	279.737	99.1%	277.288	92.623	16.302.215
2030	304.388	287.293	99.1%	284.779	94.668	16.613.509
2031	310.734	295.054	99.1%	292.471	96.714	16.922.841
2032	317.213	303.024	99.1%	300.372	98.759	17.230.221
2033	323.827	311.210	99.1%	308.486	100.805	17.535.659
2034	330.578	319.616	99.1%	316.819	102.851	17.839.161
2035	337.471	328.250	99.1%	325.377	104.896	18.140.738

De lo anterior se obtiene que para el año 2035 se estima una facturación anual de 18.140.738 (m3/año), lo que equivale a un caudal medio de 575 L/s, ocupando este último como caudal de diseño para el sistema.

4.2.2.2 Zona de Implementación

Las principales zonas de implementación o aplicación de las aguas servidas reusadas se han identificado conforme a lo siguiente.



Figura 30: Zonas de aplicación aguas servidas tratadas desde emisario submarino Coquimbo.

De acuerdo con la revisión del capítulo 3 se identificó que la provincia posee terrenos agrícolas destinados principalmente a cultivos de forrajeras anuales y permanentes, frutales, hortalizas y parronales viníferos. La extensión del proyecto abarca 8.531 hectáreas potenciales en regadío, de las cuales se podría beneficiar directamente alrededor de 2.300 hectáreas con un caudal de 575 [L/s]. Además, se identifica el mayor potencial usuario a la faena minera Teck Andacollo la cual consume 340 [L/s] desde derechos de aguas subterráneos, por lo que se proyectan sólo 235 [L/s] para riego agrícola en este sistema pudiendo abastecer poco más de 1.000 hectáreas.

4.2.2.3 Conducción y Elevación del sistema

El trazado del sistema se elaboró conforme a la ubicación de la planta de pretratamiento del emisario submarino, a las rutas viales existentes que permitan la instalación y construcción de tuberías a lo largo del sistema y finalmente a una ubicación propuesta para el emplazamiento de la planta de tratamiento de aguas servidas, considerando los espacios requeridos para su instalación.

Por lo demás, se determina el emplazamiento de las plantas elevadoras del sistema con el objetivo de optimizar la elevación de las aguas impulsadas hasta las zonas de aplicación.

En las siguientes figuras se muestra la disposición de las instalaciones para el sistema propuesto.



Figura 31: Trazado y PEAS para sistema de reúso de aguas servidas tratadas emisario submarino Coquimbo.

Para el dimensionamiento de las bombas proyectadas en cada una de las bombas se debe determinar el perfil de elevación para cada tramo, como también las presiones de funcionamiento que estarán en función principalmente de las cañerías empleadas en el sistema, la pérdida asociada y la diferencia de cotas entre impulsiones.

En la siguiente figura se muestra el perfil piezométrico obtenido para el sistema.

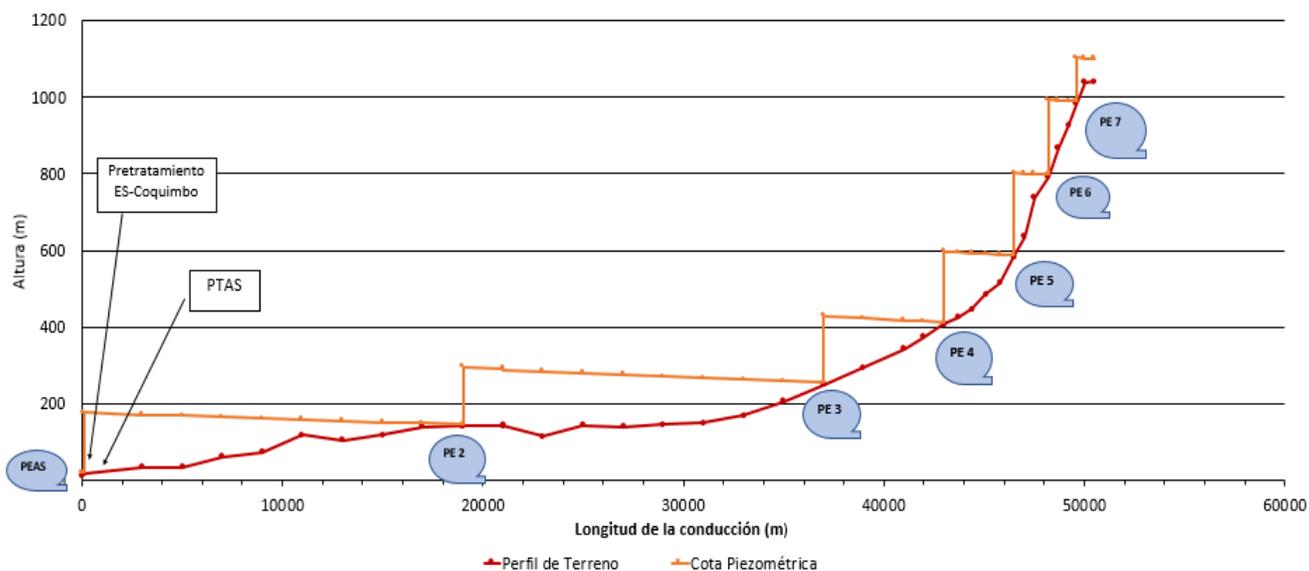


Figura 32: Perfil piezométrico de impulsión sistema de reúso emisario submarino Coquimbo.

A partir de lo anterior se estimó las alturas de elevación para la operación de las bombas en cada tramo. El sistema de impulsión opera con n bombas más una de respaldo en casos de pérdidas de presión o como reserva.

Tabla 43: *Potencia Instalada Plantas elevadoras Sistema Coquimbo.*

Planta Elevadora	Tramo de Impulsión	Longitud [m]	Altura de Operación [m]	Número de Bombas [Operando]	Caudal (L/min]	Potencia Bomba [kW]	Potencia Instalada [kW]
PEAS	1	100	13	4	8.250	22	111
PE1	2	18.900	160	4	8.250	271	1.353
PE2	3	18.000	157	4	7.500	241	1.207
PE3	4	6.000	182	3	6.800	253	1.011
PE4	5	3.500	192	3	6.800	268	1.072
PE5	6	1.700	222	3	6.800	309	1.237
PE6	7	1.400	203	3	6.800	282	1.127
PE7	8	2.900	94	3	6.800	131	523

4.2.2.4 Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS

A igual que en el sistema anteriormente mostrado se presentan los estanques de succión y almacenamiento contemplados para este sistema. En las instalaciones de la PTAS se proyectan dos estanques, uno de agua cruda y otro para el efluente desde donde se impulsarán las aguas tratadas.

Para los estanques de almacenamiento (EA) se han contemplado 2 estanques en total y se ubican de acuerdo con los requerimientos hídricos en la zona. A continuación, se muestra las capacidades de los estanques respectivos.

Tabla 44: *Estanques de succión y almacenamiento sistema Coquimbo.*

Estanque	Capacidad [m3]
ES1	700
ES2 - ES3 [2]	700
ES4	600
ES5	500
ES6	500
ES7	500
ES8	500
ES9	500
EA1	9.000
EA2	14.000

Tabla 45: *Área requerida PTAS Sistema Coquimbo.*

Sistema Coquimbo	Área PTAS [m2]
Lodos Activados	62.770
MBR	18.831
Humedal Construido	1.098.477

4.2.2.5 Resumen Costos Sistema de reúso Coquimbo

Finalmente se presenta el resumen de costos de inversión para el anteproyecto del sistema de reúso de aguas servidas tratadas con aguas recolectadas desde el emisario submarino Coquimbo. A continuación, se muestra el resumen del itemizado del proyecto.

Tabla 46: *Resumen de costos Sistema de reúso Coquimbo.*

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO COQUIMBO		
Ítem	Tratamiento	Lodos Activados	MBR	Humedal Construido
	Descripción	Precio Total		
A	CONDUCCION Y ELEVACION	\$ 31,297,727,945	\$ 31,297,727,945	\$ 31,297,727,945
B	PTAS	\$ 7,514,486,540	\$ 21,969,754,003	\$ 12,132,861,692
C	OBRAS COMPLEMENTARIAS	\$ 785,241,210	\$ 785,241,210	\$ 785,241,210
1	COSTO DIRECTO [\$]	\$ 39,597,455,695	\$ 54,052,723,158	\$ 44,215,830,847
2	COSTO DIRECTO SISTEMA [USD]	\$ 52,239,387	\$ 71,309,661	\$ 58,332,231
3	COSTO O&M PTAS [USD/año]	\$ 1,800,929	\$ 4,055,389	\$ 219,695
4	COSTO O&M TRANSPORTE [USD/año]	\$ 3,477,828	\$ 3,477,828	\$ 3,477,828
5	COSTO DIRECTO UNITARIO TRANSPORTE [USD/m3]	\$ 2.18	\$ 2.18	\$ 2.18
6	COSTO DIRECTO UNITARIO PTAS [USD/m3]	\$ 0.51	\$ 1.49	\$ 0.82
7	COSTO UNITARIO O&M PTAS [USD/m3]	\$ 0.09	\$ 0.21	\$ 0.01
8	COSTO UNITARIO O&M TRANSPORTE [USD/m3]	\$ 0.30	\$ 0.30	\$ 0.30
9	COSTO DIRECTO UNITARIO SISTEMA [USD/m3]	\$ 2.69	\$ 3.67	\$ 3.00
10	COSTO O&M UNITARIO SISTEMA [USD/m3]	\$ 0.39	\$ 0.51	\$ 0.31

4.2.3 Sistema de reúso emisario submarino Dos Norte

Se propone un sistema de reúso de aguas servidas tratadas en la región de Valparaíso, específicamente recuperando las aguas descargadas a través del emisario submarino Dos Norte. El sistema se propone para uso principalmente en el sector agrícola y minero, sin perjuicio que puedan utilizarse las aguas para labores industriales de la zona.

4.2.3.1 Caudal de diseño

De acuerdo con la metodología mostrada en la sección anterior el caudal de diseño quedará definido por la estimación efectuada por la sanitaria Aguas del Valle sobre la facturación anual de aguas servidas para las comunas de Reñaca, Quilpué, Villa Alemana y parte de Viña del Mar. Cabe mencionar que las proyecciones efectuadas por ESVAL, sólo llegaban hasta el año 2029 por lo que se proyectó la facturación de aguas servidas de cada comuna en función del promedio del crecimiento porcentual en los años anteriores. Además, se consideró un 60% de cobertura para la población de Viña del Mar debido a que el resto de la población tiene saneamiento por parte del emisario Loma Larga. En la tabla 47 se muestran las proyecciones.

Tabla 47: Facturación de aguas servidas anuales proyectadas para las comunas del Emisario submarino Dos Norte.

Año / Localidad	Quilpué	Reñaca	Villa alemana	Viña del mar	Total [m3/año]
2021	9.882.349	3.176.051	7.064.637	13.074.864	33.197.901
2022	10.040.316	3.232.228	7.188.483	13.253.575	33.714.602
2023	10.198.283	3.288.405	7.312.328	13.432.286	34.231.302
2024	10.356.251	3.344.581	7.436.174	13.610.996	34.748.002
2025	10.514.218	3.400.758	7.560.019	13.789.707	35.264.702
2026	10.672.185	3.456.934	7.683.865	13.968.418	35.781.402
2027	10.830.152	3.513.111	7.807.711	14.147.129	36.298.102
2028	10.988.119	3.569.288	7.931.556	14.325.839	36.814.802
2029	11.146.086	3.625.464	8.055.402	14.504.550	37.331.503
2030	11.315.941	3.680.712	8.178.158	14.725.585	37.900.397
2031	11.488.384	3.736.802	8.302.785	14.949.988	38.477.961
2032	11.663.456	3.793.748	8.429.311	15.177.811	39.064.327
2033	11.841.195	3.851.560	8.557.765	15.409.106	39.659.628
2034	12.021.643	3.910.254	8.688.177	15.643.925	40.264.001
2035	12.204.841	3.969.843	8.820.576	15.882.323	40.877.584

De lo anterior se obtiene que para el año 2035 se estima una facturación anual de 40.877.584 (m3/año), lo que equivale a un caudal medio de 1.296 L/s, ocupando este último como caudal de diseño para el sistema.

4.2.3.2 Zona de Implementación

Las principales zonas de implementación o aplicación de las aguas servidas reusadas se han identificado conforme a lo siguiente.

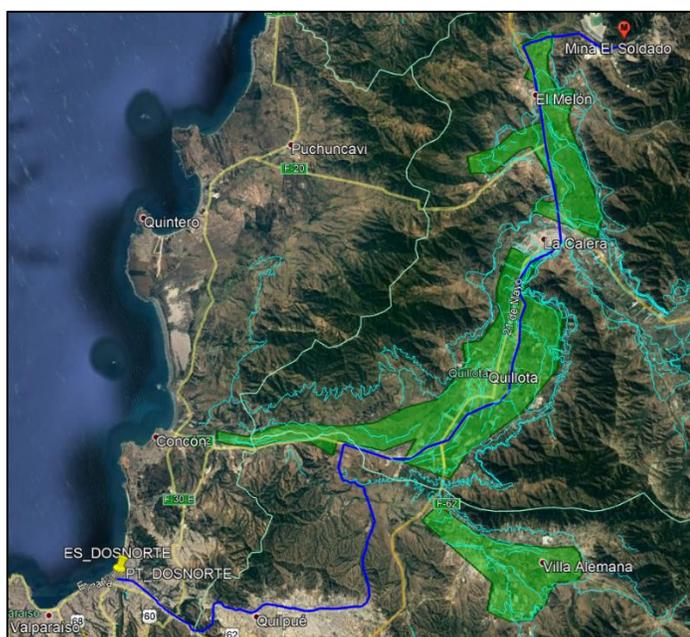


Figura 33: Zonas de aplicación aguas servidas tratadas desde emisario submarino Dos Norte.

En la siguiente figura se muestra el perfil piezométrico obtenido para el sistema.

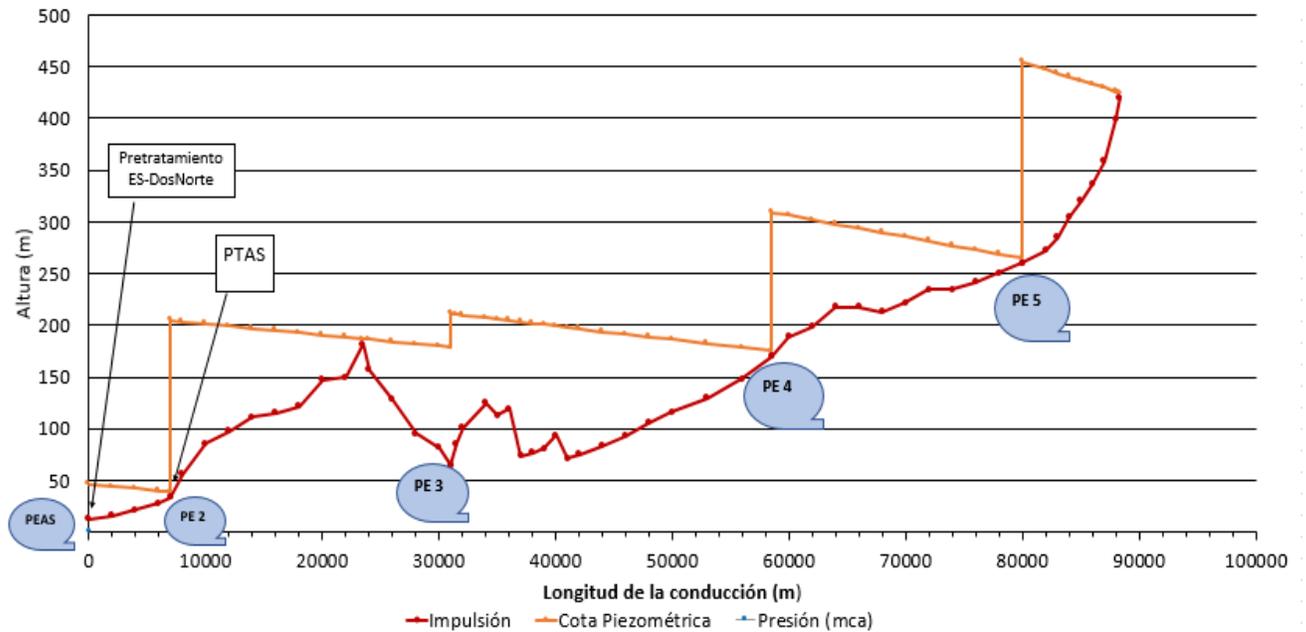


Figura 35: Perfil piezométrico de impulsión sistema de reuso emisario submarino Dos Norte.

A partir de lo anterior se estimó las alturas de elevación para la operación de las bombas en cada tramo. El sistema de impulsión opera con n bombas más una de respaldo en casos de pérdidas de presión o como reserva.

Tabla 48: Potencia Instalada Plantas elevadoras Sistema Dos Norte.

Planta Elevadora	Tramo de Impulsión	Longitud [m]	Altura de Operación [m]	Número de Bombas [Operando]	Caudal (L/min)	Potencia Bomba [kW]	Potencia Instalada [kW]
PEAS	1	7.000	38	8	9.720	75	671
PE2	2	24.000	182	8	9.720	361	3.249
PE3	3	27.500	149	6	8.500	259	1.813
PE4	4	21.500	142	4	8.500	196	982
PE5	5	8.300	197	2	8.500	193	580

4.2.3.4 Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS

A partir de lo descrito en la metodología de diseño se presentan los estanques de succión y almacenamiento contemplados para el proyecto. Cada planta elevadora cuenta con un estanque de succión (ES). En las instalaciones de la PTAS se proyectan dos estanques, uno para el afluente de agua servida y otro para el efluente desde donde se impulsarán las aguas tratadas.

Para los estanques de almacenamiento (EA) se han contemplado 5 estanques en total y se ubican de acuerdo a los requerimientos hídricos de la zona. A continuación, se muestra las capacidades de los estanques proyectados.

Tabla 49: *Estanques de succión y almacenamiento sistema Dos Norte.*

Estanque	Capacidad [m3]
E1	1.600
E2A-E2B [2]	1.600
E3	1.400
E4	600
E5	600
EA1	18.000
EA2-EA3 [2]	26.000
EA4-EA5 [2]	16.000

Tabla 50: *Área requerida PTAS Sistema Dos Norte.*

Sistema Dos Norte	Área PTAS [m2]
Lodos Activados	124.137
MBR	37.241
Humedal Construido	2.172.404

4.2.3.5 Resumen Costos Sistema de reúso Dos Norte

Finalmente se presenta el resumen de costos de inversión para el anteproyecto del sistema de reúso de aguas servidas tratadas con aguas recolectadas desde el emisario submarino Dos Norte.

A continuación, se muestra el resumen del itemizado del proyecto:

Tabla 51: *Resumen de costos Sistema de reúso Dos Norte.*

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO DOS NORTE		
Ítem	Tratamiento	Lodos Activados	MBR	Humedal Construido
	Descripción	Precio Total		
A	CONDUCCION Y ELEVACION	\$ 51,283,623,114	\$ 51,283,623,114	\$ 51,283,623,114
B	PTAS	\$ 11,020,721,592	\$ 29,946,042,653	\$ 32,256,445,170
C	OBRAS COMPLEMENTARIAS	\$ 2,193,956,181	\$ 2,193,956,181	\$ 2,193,956,181
1	COSTO DIRECTO [\$]	\$ 64,498,300,888	\$ 83,423,621,949	\$ 85,734,024,465
2	COSTO DIRECTO SISTEMA [USD]	\$ 85,090,107	\$ 110,057,549	\$ 113,105,573
3	COSTO O&M PTAS [USD/año]	\$ 3,592,714	\$ 8,131,052	\$ 434,481
4	COSTO O&M TRANSPORTE [USD/año]	\$ 3,333,047	\$ 3,333,047	\$ 3,333,047
5	COSTO DIRECTO UNITARIO TRANSPORTE [USD/m3]	\$ 3.63	\$ 3.63	\$ 3.63
6	COSTO DIRECTO UNITARIO PTAS [USD/m3]	\$ 0.75	\$ 2.03	\$ 2.19
7	COSTO UNITARIO O&M PTAS [USD/m3]	\$ 0.18	\$ 0.42	\$ 0.02
8	COSTO UNITARIO O&M TRANSPORTE [USD/m3]	\$ 0.29	\$ 0.29	\$ 0.29
9	COSTO DIRECTO UNITARIO SISTEMA [USD/m3]	\$ 4.38	\$ 5.67	\$ 5.82
10	COSTO OyM UNITARIO SISTEMA [USD/m3]	\$ 0.47	\$ 0.70	\$ 0.31

4.2.4 Análisis de Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en la sección anterior, se analizan y comparan las distintas alternativas para un mismo sistema la relación de los costos en función del caudal a tratar, de la altura de elevación requerida y la conducción de los proyectos, clasificándose entre los costos directos o de inversión y los costos de O&M para las PTAS y para el transporte de agua y obras de cada sistema.

El sistema con una PTAS mediante tratamiento secundario de sistemas MBR, es el de mayor costo directo para 2 de las 3 alternativas, siendo sólo más bajo en el caso del sistema de reúso Dos Norte. Los resultados obtenidos para los costos directos unitarios fueron de 1,53, 1,49 y 2,03 USD/m³ para los sistemas de reúso de La Serena, Coquimbo y Dos norte con caudales de 616, 575 y 1296 L/s respectivamente. El tratamiento de MBR tiene costos de alrededor de un 300% los costos de la alternativa de tratamiento de LA, en los cuales se obtuvo costos directos unitarios de 0,54, 0,51 y 0,74 USD/m³ para los 3 sistemas (mismo orden respectivo presentado anteriormente), lo que hace que esta última sea la alternativa más factible desde el punto de vista económico ya que para los sistemas de HC se obtuvieron costos directos unitarios de 0,84, 0,82 y 2,19 USD/m³ respectivamente.

Es relevante mencionar que, para el sistema de reúso de Dos Norte, en el cual la alternativa de tratamiento mediante HC es la de mayor costo directo de la PTAS, se relaciona directamente con el costo de los HC producto de las grandes áreas de extensión que requiere esta alternativa para implementarse y el costo del uso de suelos, que en el caso del sistema Dos Norte se estimó en 217,2 hectáreas para la PTAS con 0,25 UF el costo del terreno. Bajo esto último, resulta poco factible poder implementar este tipo de alternativa para caudales de diseño elevados como los que se evaluaron en los sistemas propuestos, ya que implican áreas muy extensas de emplazamiento y la mayor parte de la inversión de la PTAS se relaciona con esto y no con el tratamiento en sí mismo, siendo más de un 50% del costo directo de la planta.

De los costos de O&M de la PTAS, se obtuvo para los 3 sistemas que la alternativa de tratamiento mediante MBR son nuevamente los más elevados, lo que está relacionado con el alto gasto energético de este tipo de proceso de membranas obteniéndose valores de 0,22, 0,21 y 0,42 USD/m³. Por otro lado, los costos operacionales para las PTAS mediante HC son los más bajos con valores de 0,01 y 0,02 USD/m³ ya que no requieren un alto gasto energético. En el caso de la alternativa de tratamiento con LA se obtuvieron valores de 0,10, 0,09 y 0,18 UDS/m³, siendo menos de un 50% de los costos de los sistemas MBR.

A pesar de los mayores costos directos y de O&M de la alternativa MBR, este tipo de sistemas tiene la gran ventaja de una menor ocupación en cuanto a espacio requerido con un 25 a 30% estimado de las áreas requeridas para sistemas de LA y que para los 3 sistemas MBR propuestos equivalen a 1,9, 1,8 y 3,7 hectáreas. Esto podría implicar un menor impacto ambiental en la zona respecto a las alternativas de LA y HC, y además lo hace un sistema más factible de implementar ya que las PTAS deberán instalarse de acuerdo con los terrenos disponibles como también al posible impacto socioambiental en la zona.

Respecto a los costos directos relacionados con el transporte de las aguas, tanto para conducción y elevación hasta las zonas de aplicación, se obtuvo que estos se incrementan con una tasa mayor al aumento de los costos de inversión asociados a las alternativas de tratamiento versus el aumento o el largo de los trazados requeridos en cada sistema, obteniéndose valores de 1,42, 2,18 y 3,63 USD/m³ para los sistemas de La Serena, Coquimbo y Dos Norte.

Respecto a los costos de O&M, que se calculó en base a la potencia instalada, estos se relacionan directamente con la altura de elevación de los sistemas, el largo de trazado de los sistemas y el número de plantas elevadoras, resultando costos unitarios de O&M de 0,13, 0,30 y 0,29 USD/m³, obteniéndose que en estos costos la altura final de elevación es lo que tiene una mayor influencia y que para los sistemas propuestos son de 471, 1.062 y 420 metros. Lo anterior se desprende de que el sistema de reúso Dos Norte tiene un largo de trazado de 88,3 [km] mientras que el sistema de Coquimbo sólo 52,5 [km], pero una mayor altura de elevación, por lo que finalmente se obtiene un mayor costo de O&M de transporte de las aguas producidas en ese caso de estudio. En resumen de lo anterior en la figura 36 se presentan los costos unitarios de la PTAS, transporte y de O&M para cada uno de los sistemas propuestos.

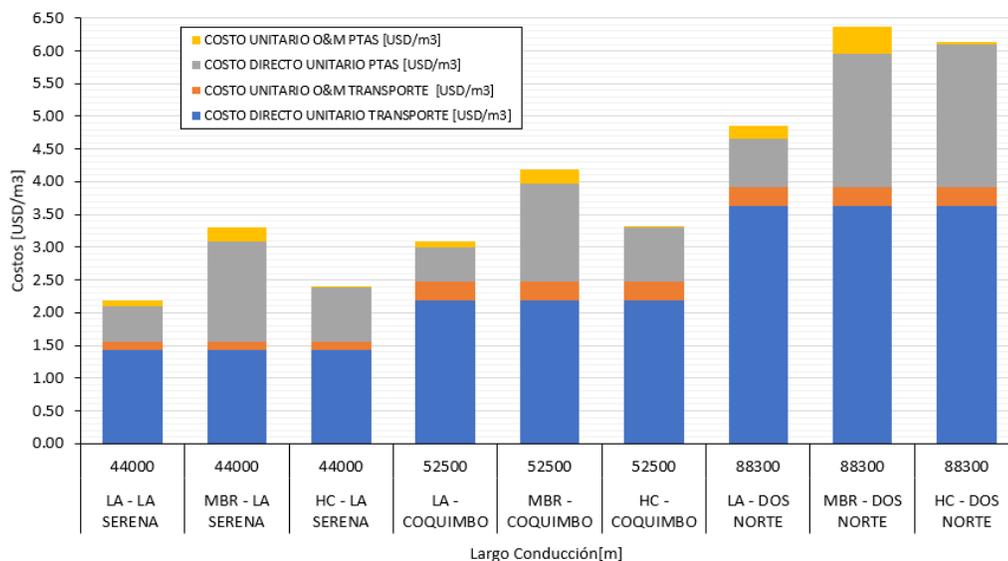


Figura 36: Costos unitarios de inversión y O&M para PTAS y transporte de los sistemas de reúso proyectados.

Finalmente se obtiene del análisis anterior que, para un sistema de reúso en cuanto a la PTAS, la alternativa de LA es la de menores costos directos y de operación, lo que la hace la más factible de implementar desde un punto de vista económico, sin embargo, podría tener un mayor impacto socioambiental que los sistemas MBR, debido a una mayor extensión de emplazamiento y el uso de suelos y la disponibilidad de terrenos.

Es importante destacar que entre más extenso sea el trazado de conducción del sistema proyectado, la alternativa de tratamiento MBR podría ser más factible de implementar. Lo anterior, ya que como se puede observar en la figura 36, los costos totales del sistema se verían más influenciados por los costos de la conducción que por la inversión en la PTAS, resultando en un mayor porcentaje de influencia respecto al costo total.

5 Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo, en primer lugar, del análisis de fuentes hídricas en la zona centro-norte de Chile, se identificó que el recurso hídrico presenta un sobre otorgamiento de derechos de agua lo que ha llevado a que algunas zonas enfrenten una situación de escasez hídrica, situación plasmada mediante numerosos decretos de escasez emitidos por la DGA para ciertas comunas, y que a enero del 2021 tuvieron su mayor concentración en la región de Valparaíso. Por otra parte, respecto a la calidad de las aguas superficiales, en ríos de relevancia económica y social en la zona centro-norte, se registran concentraciones elevadas de arsénico, cobre, mercurio, cadmio y molibdeno en comparación con lo normado en la Nch1333 para estos contaminantes, como lo son por ejemplo el río Copiapó, Elqui y Aconcagua, siendo esto una desventaja para el uso directo de las aguas en el sector agrícola y también otros usos como agua potable.

Respecto a las demandas de agua, se identificó en la zona centro-norte que las regiones de Tarapacá y Antofagasta concentran mayoritariamente el consumo en minería con 1.634 y 4.790 [L/s] respectivamente. El resto de las regiones de la zona centro-norte tiene un mayor uso de agua para la industria agrícola con 44.742 [L/s], siendo estas actividades las de mayor presión hídrica sobre los cursos superficiales y fuentes subterráneas de la zona.

Revisión de fuentes alternativas y tratamientos:

De las fuentes de agua y las alternativas de tratamiento, la osmosis inversa para la desalación de agua de mar ha sido la de mayor desarrollo a nivel mundial y en la zona centro-norte de Chile en los últimos años, principalmente en la región de Antofagasta por la actividad minera como también para consumo potable. Según estimaciones habría un aumento de utilización de agua desalada en faenas mineras pasando de 6 m³/s actualmente, a los 12,9 m³/s para el año 2031. Otros proyectos en evaluación como el proyecto ENAPAC, sugieren una mejor alternativa sobre el desarrollo actual, buscando el abastecimiento de agua desalada para distintas industrias e incluso pudiendo entregar agua al sector agrícola de estas zonas. Este tipo de proyectos con clientes multipropósito significa un mayor beneficio, ya que instalando una planta de tratamiento de mayor caudal resulta más favorable desde el punto de vista económico, disminuyendo el costo de producción en comparación con la construcción de muchas plantas de menor caudal las cuales podría significar además una mayor intervención en el medio.

De la revisión de alternativas, se puede concluir que el reúso de las aguas residuales posee un alto potencial de desarrollo debido a que existen procesos de tratamiento adecuados para cumplir con los objetivos de calidad y que es una alternativa que se está desarrollado fuertemente en otros países del mundo tales como Israel, EEUU, entre otros. Lo anterior se complementa con que del total de aguas servidas tratadas en Chile el 22% se destina a través de emisarios submarinos, equivalente a un caudal estimado de 9 m³/s.

Por otra parte, si bien existen otras alternativas tales como el trasvase hídrico entre cuencas, como por ejemplo el proyecto de carretera hídrica, este tipo de soluciones tienen un gran impacto ambiental producto de su intervención y altos costos de implementación.

Análisis comparativo entre alternativas:

Del análisis de disponibilidad de aguas servidas dispuestas mediante emisarios submarinos en la zona centro-norte, se identificó que existen 9 emisarios submarinos que tienen un caudal de descarga por sobre los 200 [L/s], los cuales están directamente relacionados con el desarrollo de la población de las ciudades costeras en donde se encuentran. Por lo tanto, la implementación de proyectos de reúso de aguas servidas ligados a emisarios submarinos, podrían desarrollarse favorablemente con zonas de aplicación en sectores cercanos a ciudades costeras o valles de alta importancia en cuanto al desarrollo de productividad agrícola, minera y también industrial.

Sobre la calidad de descarga de los emisarios submarinos evaluados como referencia, se obtiene que de acuerdo con lo normado en la Tabla N°5 del D.S.90, estos cumplen en su mayoría con los límites establecidos, sin embargo, en algunos casos se superaron algunos límites de aceites y grasas o sólidos suspendidos totales en el período 2015-2019, como el caso del emisario Gran Antofagasta. Si bien la mayoría de los emisarios cumplen con lo normado, diferentes situaciones de alerta se han producido por la descarga de estos, por lo que, a pesar de estar normados ciertos parámetros, estos límites podrían superarse en ocasiones dañando el medio ambiente costero y submarino. Cabe destacar que el anteproyecto para la actualización del D.S 90 mantuvo los límites establecidos en la tabla N°5, incorporando los contaminantes de cloro libre residual y los trihalometanos.

Sobre el uso de aguas reusadas y requerimientos de calidad, se concluye que la calidad de agua para riego deberá ser acorde a lo definido en la NCh1333 como recomendación y a lo recientemente aprobado en las normas: NCh3456 - Directrices para el uso de aguas residuales tratadas para proyectos de riego, NCh3682 - Directrices para la evaluación y gestión de riesgos para la salud en el reúso de aguas servidas tratadas, NCh3483 - Directrices para la clasificación del grado de calidad para el reúso de agua. Cabe destacar que estas normativas son directrices y no son imposiciones para su reúso.

De acuerdo a las normativas mencionadas y los requisitos de calidad, los procesos de tratamiento para reúso de aguas servidas en riego que se deberían implementar corresponderían a uno primario y secundario para obtener aguas de mediana calidad. Para obtener aguas de buena calidad sería necesario la adición de tratamientos terciarios mediante desinfección y para obtener aguas de alta y muy alta calidad sería necesario incorporar a lo anterior el proceso de filtración y filtración por contacto o membrana respectivamente. Lo anterior según la clasificación de aguas generadas de la reciente normativa aprobada en mayo 2021 NCh3456.

En base a la revisión de la calidad de agua de los emisarios submarinos y la calidad objetivo de los casos de estudio, es posible que pudiese haber otros contaminantes por remover tales como el boro y cobre, ya que estos no están incluidos en la norma de calidad de agua potable NCh409 o bien se permite un límite superior de concentración en la tabla N°5 del D.S 90. Se recomienda para la remoción de estos contaminantes la adición de procesos de tratamiento terciarios como el intercambio iónico o filtración, asegurando una alta eficiencia del proceso completo en cuanto a la calidad requerida.

Para el caso de reúso de aguas servidas tratadas en minería, se identificó que un buen estándar base de calidad de agua es lo establecido en la tabla N°1 del D.S. 90, la cual fue definida como la calidad objetivo para el presente estudio. Cabe destacar que los límites establecidos en la tabla mencionada podrían servir como ejemplo para otros usos mineros o industriales. Esto último se concluye de lo establecido en el proyecto de reúso llamado “Nueva planta de reúso de aguas servidas tratadas en Antofagasta”, aprobado en diciembre de 2020.

Del análisis entre alternativas se identifica que la osmosis inversa es una alternativa altamente efectiva en la desalación de agua de mar, sin embargo, esta alternativa requiere un alto consumo energético y se relaciona con un impacto ambiental en las zonas de descarga de salmueras y otros componentes químicos, por lo que el exceso de implementación de esta alternativa podría tener efectos aún no proyectados en nuestro país. Además, el reúso de aguas servidas tratadas puede significar menores costos de inversión y operación en comparación a la desalación de agua de mar.

Al comparar entre tratamientos secundarios que puedan implementarse en un sistema de reúso de aguas servidas, los sistemas MBR, son una tecnología con altos costos de inversión y de operación, los cuales se asocian al tratarse de tecnologías de membranas y a la energía que requieren para su funcionamiento. Por otra parte, los sistemas de tratamiento mediante LA tienen menores costos de inversión y operación y podrían alcanzar aguas de alta calidad con la adición de otros tratamientos tales como filtración y desinfección.

Casos de estudio:

Del análisis para la identificación de casos de estudio para sistemas de reúso de aguas servidas con fuente de agua las descargas de emisarios submarinos se obtuvo que los emisarios La Serena, Coquimbo y Dos norte son proyectos potenciales por desarrollar debido a su caudal de descarga asociado y por la cercanía a zonas de aplicación en uso agrícola y minero.

Del análisis efectuado sobre la factibilidad técnica se determinó que un tratamiento efectivo para obtener aguas de alta calidad está compuesto por un pretratamiento, tratamiento primario, secundario mediante LA, MBR y HC para efectos del caso de estudio y por último tratamientos terciarios consistentes en filtración y desinfección. Cabe mencionar que los HC podría tener problemas en obtener aguas de alta calidad debido a su menor remoción por ejemplo para la DBO5, lo que podría reducir la eficiencia de los procesos terciarios.

Sobre la evaluación económica de los casos de estudio propuestos, se concluye que para cada una de las 3 alternativas de PTAS, mediante LA, MBR y HC, los sistemas están determinados en gran parte por los costos asociados al transporte de agua hasta las zonas de aplicación, debido a la conducción y elevación. Esto se debe a que el agua que se está reusando se recupera desde los emisarios submarinos ubicados en la costa y que los sistemas propuestos requirieron extensiones de tubería de a lo menos 40 kilómetros.

Respecto a las alternativas de tratamiento se concluye que a pesar de los mayores costos directos y de O&M de la alternativa MBR esta presenta una mayor eficiencia en cuanto a la remoción de contaminantes y la calidad objetivo-definida. Además, podría significar una mayor facilidad de operación y mantenimiento de la planta ya que requiere menos espaciamiento que un sistema de LA, lo que también tiene como ventaja un menor impacto socioambiental en la zona donde se instale y finalmente porque el volumen de lodos producidos es menor, posibilitando una mejor gestión de residuos.

Sin embargo, la alternativa de LA podría alcanzar una alta calidad objetivo de las aguas tratadas al complementar el sistema con tratamientos de filtración y desinfección, por lo que desde un punto de vista económico y de la eficiencia de remoción alcanzada, es posible concluir que esta alternativa de tratamiento podría ser la más favorable.

Con respecto a los HC, debido a su alto requerimiento de área para su implementación, se ha concluido que este tipo de sistemas sólo sería factible proyectarlos para diseños de menor escala de tratamiento que los sistemas propuestos en este trabajo, pudiendo ser incluso menor a 50 [L/s] para ser una alternativa realmente viable en cuanto a implementación y operación.

Por otra parte, en síntesis de los sistemas propuestos se obtiene que entre más largo sea el trazado de conducción del proyecto, la alternativa de tratamiento MBR podría ser más factible de implementar ya que los costos totales del sistema se verían más influenciados por los costos de la conducción y elevación que por los costos directos de la PTAS, resultando en un mayor porcentaje de influencia respecto al costo total. Sin embargo, la alternativa de LA seguirá siendo la más económica. Por otra parte, esto también implica que lo más conveniente es buscar zonas de aplicación que se encuentren cercanas a las descargas de los emisarios submarinos y a la PTAS con el fin de disminuir los costos de este tipo de proyectos.

Recomendaciones y comentarios:

Una de las principales recomendaciones para la implementación de este tipo de proyectos, es que se siga las recomendaciones y directrices normadas en las normas NCh1333, la NCh3456 y de las futuras normativas que se aprueben al respecto. Además, es importante que se desarrolle una cultura de información hacia la población, mejorando la percepción pública sobre las normativas mencionadas y sobre la eficiencia de los distintos tratamientos y tecnologías actuales que permite reusar las aguas de una manera confiable y adecuada.

Otra recomendación a destacar es que se desarrolle un avance legislativo respecto a la propiedad de las aguas servidas descargadas mediante emisarios submarinos, ya que esto aún no está definido ni ciertamente claro por parte de las autoridades y aún sigue siendo debate si es que las aguas pertenecen a las empresas sanitarias o bien pasan a ser de uso público posterior al tratamiento de los emisarios submarinos.

Por otra parte, es importante mencionar que si bien el reúso de aguas servidas tratadas es una alternativa para mitigar la escasez hídrica en distintas zonas, esto no significa que esta sea la única solución ni tampoco que se acabe esta problemática implementando los sistemas propuestos ya que no se alcanza a cubrir el total de desbalance hídrico.

Un buen manejo y gestión de aguas tiene que abarcar distintas medidas que permitan avanzar desde diferentes soluciones, desde un uso consciente de las aguas por parte de la población, la reducción de las pérdidas de agua potable en el sector sanitario, mejorando la eficiencia de riego en el sector agrícola pasando a sistemas tecnificados como el regadío por goteo, en la eficiencia del uso de agua en el sector industrial, entre otras. Además, se puede complementar estas medidas evaluando el uso de las otras fuentes alternativas de agua revisadas en este trabajo como lo son las plantas de desalación de agua de mar, recarga de acuíferos y entre otras posibles según cada caso.

Cabe mencionar que los sistemas presentados como anteproyecto en este trabajo podrían tener gran recibimiento para algún día ser ejecutados, sin embargo, es importante destacar que los diseños propuestos van a variar dependiendo de los usuarios que se definan de manera concreta una vez que diseñen estos sistemas y los criterios de diseño, ya que con esta información se podrá estimar de mejor forma los trazados de conducción, plantas de elevación, estanques de acumulación y todas las instalaciones u obras necesarias para los sistemas.

Finalmente, así como se ha evaluado tres sistemas de reúso de aguas servidas para las regiones de Coquimbo y Valparaíso, a lo largo de nuestro país existen 33 emisarios submarinos que pueden ser una fuente de recurso para distintas actividades y que hoy en día no se ha aprovechado como tal. En la zona sur del país también se podrían implementar este tipo de sistemas, ya que esta alternativa independiente de donde se implemente potencia el desarrollo de un uso circular del recurso hídrico, siendo más sostenible en el tiempo y amigable con el medio ambiente. A la fecha solo se ha aprobado un proyecto el cual corresponde al reúso de aguas servidas tratadas provenientes de la ciudad de Antofagasta para ser utilizadas en el sector industrial de la zona por lo que hoy en Chile hay un recurso que no está siendo aprovechado y que podría contribuir con la mitigación de la escasez hídrica.

6 Bibliografía

- A.S. Sheoran, V. S. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19 (2), 105-116.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.006>.
- AEDYR, AQUAESPaña, AEAS, TRAGSATEC. (2009). *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Ministerio de sanidad y política social .
- Aguas Andinas S.A. (2018). *Estudios Tarifarios 2015-2020*. Obtenido de Superintendencia de Servicios Sanitarios: <https://infota.siss.cl/concesiones/index.php?dir=empresas%2FAguasAndinas%2F>
- Aguas Antofagasta. (2019). *Aguas Antofagasta*. Obtenido de La desalación cómo solución a la escasez hídrica del planeta: <http://www3.aguasantofagasta.cl/noticias/531-2019-10-07-15-24-21.html>
- Aguas del Valle S.A. (2016). *Estudios Tarifarios 2016-2021*. Obtenido de Suprintendencia de Servicios Sanitarios : <https://infota.siss.cl/concesiones/index.php?dir=empresas%2FAguasdelValle%2F>
- Allain, M. (2019). Conflictos y protestas sociambientales en Chile; Reflexiones metodológicas y resultados. *Revista de Sociología*, 34, 81-101. doi:10.5354/0719-529X.2019.54271
- Alvez, A., Aitken, D., Rivera, D., Vergara, M., McIntyre, N., & Concha, F. (2020). At the crossroads: can desalination be a suitable public policy solution to address water scarcity in Chile's mining zones? *Journal of Environmental Management*, 258, 110039.
- AMPHOS. (2014). *Generación de información base para la evaluación de normas de calidad y emisión: revisión y actualización sobre tecnologías y costos de abatimiento de contaminantes de residuos líquidos*. Informe Final.
- Aquatacama. (2021). *Aquatacama*. Obtenido de <http://www.aquatacama.com>
- Armada de Chile - Directemar. (2007). *Emisarios Submarinos en Chile*.
- Asociación Interamericana De Ingeniería Sanitaria y ambiental. (2016). *Edición Especial: Reuso de aguas servidas tratadas*.
- Bergamini, K., Irarrazabal, R., Monckeberg, J., & Pérez, C. (2017). *Principales problemas ambientales en Chile: Desafíos y propuestas*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de políticas Públicas.
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2017). *Análisis económico de aspectos asociados a la desalinización del agua en la minería*. Departamento de estudios, publicación y extensiones.
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2018). *Sequía y Escasez Hídrica: conceptos relacionados, situación actual y experiencia comparada en varios países para abordar el tema*. Obtenido de <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=128268&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>

C40 Ciudades. (2018). *Restoring the flow*. Obtenido de www.c40.org/other/the-future-we-don-t-want-restoring-the-flow

Centro de Estudios de Conflicto y Cohesión Social. (2018). *Observatorio de Conflictos 2018*.

Chilean Copper Commission. (2016). WATER USE IN COPPER MINING: Trends of a critical input.

CIREN. (2016). *Diagnóstico para desarrollar plan de riego en Cuenca de Aconcagua*.

Climate Technology Centre & Network. (Octubre de 2019). *Inter-basin transfers*. Obtenido de <https://www.ctc-n.org/technologies/inter-basin-transfers>

Cochilco. (2011). *Proyecciones del uso de agua en la minería*.

Codagua. (7 de Febrero de 2018). Costos de inversión y exploración en soluciones de membranas .

Código de Aguas. (29 de Octubre de 1981). DFL 1122 Código de Aguas. *Diario Oficial de la República de Chile*.

Comisión Chilena del Cobre. (2019). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales* .

Comisión Chilena del Cobre. (2019). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030*.

Comisión Chilena del Cobre. (2020). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020-2031*.

Comisión Nacional de Agua. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Avanzados con Fines de Reúso*. Tlalpan, México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional de Riego. (2007). *Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego*. Santiago, Chile.

Comisión Nacional de Riego. (2016). *Diagnostico para desarrollar plan de riego en cuenca de Aconcagua*. Santiago.

Comisión Nacional de Riego. (2020). *Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos*.

Compañía General de Electricidad S.A. (2021). *Tarifas de Suministro Eléctrico* .

CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores. (2013). *Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, región de Coquimbo*. Gobierno Regional de Coquimbo.

Consejo Minero. (2016). *Minería y uso sustentable del agua*. Santiago. Obtenido de <http://bcn.cl/21u5g>

Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID). (2017). *Evaluación de los conflictos socio-ambientales de proyectos de gran tamaño con foco en agua y energía para el periodo 1998 al 2015*.

Corporación Reguemos Chile. (2019). Memoria Corporación Reguemos Chile 2015-2018.

Corporación Reguemos Chile. (s.f.). Presentación Carretera hídrica.

- Cortina, J. (2005). *Evaluación Tecnológica de la Aplicación de Reactores Biológicos de Membranas en Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona - Enginyeria Industrial.
- Costwater. (2020). *Base de datos MBR*. Obtenido de http://www.costwater.com/membranes/mbr/mbr_database.php
- Custodio E. - Llamas MR. (1983). *Hidrología Subterránea* (2° edición ed., Vol. Tomo I). Barcelona: Omega.
- Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Elqui*.
- Dirección General de Aguas. (2016). *Atlas del Agua*.
- Dirección General de Aguas. (2017). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile*. Ministerio de Obras Públicas.
- División de Estudios y Planificación SDT N°344. (2013). *Análisis y Síntesis preliminar de iniciativa sobre Recarga Artificial en Chile*. Santiago.
- ECONSSA. (2020). *Nueva planta de tratamiento de aguas servidas para reúso en Antofagasta*. Declaración de Impacto Ambiental.
- Econssa Chile. (2013). *Sistema de Disposición Final de las Aguas Servidas de Antofagasta*.
- ECONSSA CHILE. (2019). *ECONSSA*. Obtenido de Descripción del Proyecto desalación Atacama: <https://www.econssachile.cl/proyectos/proyectos-de-econssa/28-planta-desalinizadora-de-agua-de-mar-para-atacama>
- EJAtlas. (07 de Mayo de 2020). *Atlas de Justicia ambiental*. (J. M. Patricio Chavez, Editor) Obtenido de <https://www.ejatlas.org/print/mina-de-cobre-carmen-de-andacollo-chile>
- Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A. (2019). *Nueva Planta de Tratamiento de Agua Servidas para reúso de Antofagasta*.
- Enel. (2021). *Concepto de Tarifas*. Obtenido de <https://www.enel.cl/es/clientes/informacion-util/conceptos-tarifas.html>
- ESSBIO S.A. (2016). *Estudios Tarifarios 2016-2021*. Obtenido de Superintendencia de Servicios Sanitarios: <https://infota.siss.cl/concesiones/index.php?dir=empresas%2FESSBIO%2F>
- ESVAL S.A. (2017). *Estudios Tarifarios 2015-2020*. Obtenido de Superintendencia de Servicios Sanitarios: <https://infota.siss.cl/concesiones/index.php?dir=empresas/ESVAL/>
- FAO. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Roma.
- Fernández, O. (11 de Marzo de 2020). Sequía: comunas con decreto de escasez hídrica ascienden a 136. *La Tercera*. Obtenido de <https://www.latercera.com/nacional/noticia/sequia-comunas-con-decreto-de-escasez-hidrica-ascienden-a->

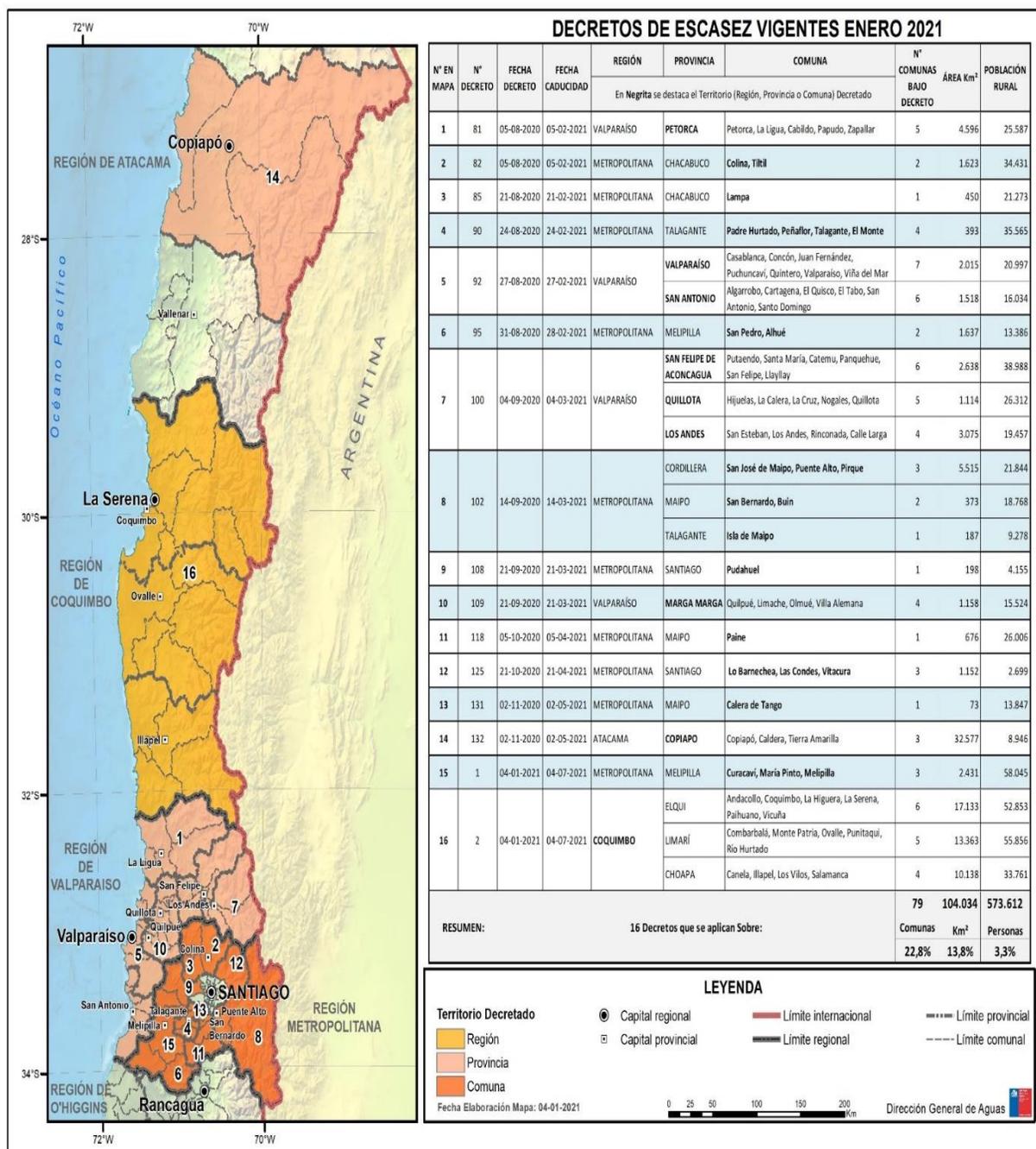
- Instituto de Nacional de Normalización. (28 de Julio de 2000). NCh 2472. of2000 Aguas Residuales - Plantas Elevadoras - Especificaciones Generales. (Primera Edición).
- Instituto Nacional de Derechos Humanos. (2015). *Mapa de conflictos socioambientales en Chile 2015*. Santiago.
- Instituto Nacional de Normalización. (22 de Mayo de 1987). NCh 1333. Of78 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- Instituto Nacional de Normalización. (27 de Abril de 2000). NCh 692 of.2000 Agua Potable - Plantas Elevadoras - Especificaciones Generales.
- Jara, C. (07 de 08 de 2019). *ADN Radio*. Obtenido de <https://www.adnradio.cl/nacional/2019/08/07/habitantes-de-arica-denuncian-contaminacion-en-la-playa-chinchorro-3937414.html>
- Jenkins Peña y Lillo, G. (2020). *Regulación de los emisarios submarinos y la reutilización de aguas en Chile*.
- Jimenez, S., & Wainer, J. T. (2017). *Realidad del Agua en Chile ¿Escasez o falta de infraestructura?*
- Jones, E., Qadir, M., Vliet, M., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Judd, S., & Judd, C. (2006). *Judd, Simon y Judd, Claire. 2006. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. Elsevier.
- Kadlec, R., & Scott, W. (2009). *Treatment Wetlands*.
- Kammeyer, C. (24 de Octubre de 2017). *Pacific Institute*. Obtenido de <https://pacinst.org/worlds-water-challenges-2017/>
- Libhaber, M., & Orozco-Jaramillo, Á. (2012). *Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater*. London: IWA Publishing.
- Lopez, A. (2012). *Diseño De Un Biorreactor De Membranas Sumergidas A Escala Piloto Para El Tratamiento De Aguas Residuales*. Universidad de Alicante, Alicante.
- Medeiros et al. (2005). Utilización de agua residual de origen doméstico en la agricultura. Estudio de alteraciones químicas. *Revista Brasileña de ingeniería Agrícola y ambiental*.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering treatment and resource*. New York: Mc Graw Hill.
- Ministerio de Obras Públicas. (2020). *Mesa Nacional del Agua, primer informe*.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (30 de Mayo de 2000). Decreto 90 - Establece norma de misión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

- Morales, F. (2017). *Estudio del efecto de las interacciones del sistema "agua de mar - cal" en procesamiento de minerales*. Tesis para optar a magíster en ciencias de la ingeniería, mención metalurgia extractiva , Universidad de Chile.
- Nikolav Voutchkov. (2013). *Desalination Engineering Planning and Design*. McGraw Hill.
- OIKOS CHILE S.A. (2010). *Consultoría sobre el Estado del Medio Ambiente Marino de Chile*. Informe Final Programa CONPACSE, DIRECTEMAR, Valparaíso.
- Parde, D., Aakash, P., Shukla, A., & Vijay, R. (2020). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 101261. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Plaza de los Reyes, C., & G., V. (2007). Humedales construidos: una alternativa a considerar para el tratamiento de aguas residuales. *Tecnología del Agua*, 288, 34-44.
- Proceso, costo y proyectos: Desalinización en la industria minera. (Septiembre de 2014). *Revista Electricidad*. Obtenido de <http://bcn.cl/21u58> (Agosto,
- Ramos, O., Castro, S., & Laskowski, J. (2013). Copper–molybdenum ores flotation in sea water: floatability and frothability. *Mineral Engineering*, 53, 108-112.
- Remtavares. (09 de 11 de 2007). *Madrid blogs*. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2007/11/09/78393>
- Rojas, C. (2019). Aspectos jurídicos sobre la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA). Revisión desde el derecho de aguas chileno, con referencia a España y Australia. *Revista Ius et Praxis*, 25(2), 151-188.
- Rojas, C., & Delpiano, C. (Julio-Diciembre de 2016). Algunas consideraciones jurídicas sobre la desalación de agua marina. Caracterizaciones y problemas iniciales. *Revista de Derecho Administrativo económico*, N°23, 107-128.
- San Martin, E. (2011). *Un Análisis económico de los trasvases de agua intercuenas: El trasvase Tajo-Segura*.
- San Miguel - Espinoza, C., Ramila, C., Leiva, E., & Lizama-Allende, K. (2019). "Boron & Sulfate". *BioResources*, 363-375.
- Sastre, M. (2009). Aspectos jurídicos de la recarga artificial de acuíferos: regulación actual y retos. *Boletín Geológico y Minero*, 120(2), 279-288.
- Schulte, P. (4 de Febrero de 2014). *Pacific Institute*. Obtenido de <https://pacinst.org/water-definitions/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2020). *Anuario de la minería de Chile*. Santiago.
- Shahzad, M., Burhan, M., Ang, L., & Ng, K. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination* 413, 413, 52-64.

- Skewes, F. (Enero-Julio de 2017). Autorización ambiental para actividades de desalinización de agua de mar. *Revista de Derecho Ambiental, Año V N° 7*, 35-59.
- Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., . . . Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology advances*, 22, 93-117.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2019). *Informe de gestión del sector sanitario*.
- Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales. (2017). *Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas*. Obtenido de www.tecspar.org
- The MBR Site. (2021). *The Membrane Bioreactors*. Obtenido de <https://www.thembrsite.com/>
- Trends Industrial SA. (2017). *Estudio de Impacto Ambiental: "ENAPAC"*.
- Unites States Enviromental Protection Agency. (2007). *Wastewater Management Fact Sheet Membrane Bioreactors*.
- Van der Roest, H., Lawrence, D., & Van Bentem, A. (2002). *Membrane Bioreactors for Munipal Wastewater Treatment*. Stowa.
- Vazquez, E. (2015). *Estudio De Biorreactor De Membrana Para El Tratamiento De Aguas Residuales Urbanas*. Trabajo Fin de Master, Universidad de Alicante, Escuela politécnica superior.
- Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (Mayo de 2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), 19-35.
- Vidal, C. (2015). Tecnologías emergentes & no convencionales. Santa Cruz, Bolivia. Obtenido de <https://docplayer.es/13903973-Tecnologias-emergentes-no-convencionales-santa-cruz-bolivia.html>
- Vymazal, J. (2008). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 1-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>
- Wiertz, J. (2018). Taller DESAL: ¿Agua de mar para todos? *Water Congress*.
- WRI. (2019). *World Resource Institute* . Obtenido de Aqueduct: www.wri.org/aqueduct
- WWPA (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos 2019. (2019). *No dejar a Nadie atrás*. Perugia.
- Yamamoto, K., & Muang, K. (1991). Tannery wastewater treatment using a sequencing batch membrane reactor. *Water Science and Technology*, 23, 1639-1648.
- Zuñiga, Z. (2013). *Balance de agua en planta de sulfuros y tranque El Torito*. Proyecto para optar al título de ingeniero civil químico, Universidad Católica de Valparaíso.

7 Anexos

Anexo 1 : Decretos de escasez vigentes enero 2021.



Fuente: (Dirección General de Aguas, 2021).

Anexo 2: Escorrentía per cápita por región en Chile.

Región	Escorrentía per cápita [m³/persona/año]
XV	725
I	599
II	47
III	190
IV	908
V	703
RM	444
VI	7037
VII	23191
VIII	24432
IX	33167
XIV	81563
X	154058
XI	2950168
XII	1938956

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2016).

Anexo 3: Volúmenes de acuíferos por región de acuerdo con clasificación SHAC

Región	Sustentable [m³/año]	Disponible [m³/año]	Comprometid o [m³/año]	Solicitado [m³/año]
XV	39.735.360	56.607.120	161.126.520	185.882.911
I	73.006.437	87.341.914	238.691.939	353.256.481
II	271.548.715	198.661.135	272.166.527	103.349.210
III	300.356.811	336.842.796	778.802.926	1.193.028.713
IV	344.470.881	577.578.687	735.460.354	1.012.389.892
V	432.424.786	663.167.392	1.648.581.519	1.376.036.757
RM	1.435.978.534	2.838.024.159	3.669.865.445	5.552.260.009
VI	636.973.588	1.633.969.405	1.472.766.281	1.895.056.322
VII	2.676.544.227	3.048.716.331	1.400.266.026	1.683.986.789
VIII	2.258.269.344	2.258.269.344	583.354.705	828.238.730
IX	2.676.091.811	2.676.091.811	433.266.414	477.590.671
XIV	1.843.465.636	1.843.465.636	317.521.244	388.218.984
X	3.085.499.264	3.085.499.264	529.410.498	592.375.206

Nota: **Volumen Sustentable:** es la cantidad de agua anual asociada a la recarga del acuífero. **Volumen Provisional:** es la cantidad de agua anual asociada a derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas del tipo provisional y no definitivo. **Volumen Disponible:** corresponde a la suma de los volúmenes sustentables y provisionales estimados. **Volumen Total Comprometido:** es la cantidad de agua que corresponde a todos los derechos constituidos y reconocidos y a las solicitudes tramitadas conforme a los artículos transitorios 2° (Código de Aguas, 1981), 3°, 4° y 6° (Ley N° 20.017, 2005). **Volumen Total Solicitado:** es la cantidad de agua anual que corresponde a todas las solicitudes tanto resueltas como en trámite.

Fuente: elaboración propia en base a información de (Dirección General de Aguas, 2016).

Anexo 4: Resumen de demanda consuntiva en la región de Arica y Parinacota

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	12.926	27.049	35.772
Agua Potable Rural	604	683	694
Agrícola	73.010	68.087	63.067
Pecuario	330	479	555
Minero	571	719	849
Industrial	195	255	290
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	87.635	97.272	101.226
Acuícola	0	0	0
Generación Eléctrica	16.170	18.518	14.951
TOTAL NO CONSUNTIVO	16.170	18.518	14.951
Secano	953.583	793.988	656.071
Forestal (Productivo)	155.874	43	48
Forestal (No Productivo)	37	155.897	155.899
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	1.109.494	949.929	812.018

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2017).

Anexo 5: Resumen de demandas consuntivas en la región de Tarapacá.

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	21.698	29.249	34.387
Agua Potable Rural	337	534	552
Agrícola	17.087	17.472	16.933
Pecuario	106	150	182
Minero	51.534	48.043	49.368
Industrial	4.387	6.973	8.683
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	95.149	102.421	110.103
Acuícola	0	4.240	5.063
Generación Eléctrica	39.210	33.499	32.026
TOTAL NO CONSUNTIVO	39.210	37.739	37.089
Secano	3.010.893	3.204.009	3.206.686
Forestal (Productivo)	967	968	969
Forestal (No Productivo)	108.432	108.432	108.432
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	3.120.292	3.313.410	3.316.087

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2017).

Anexo 6; Resumen de demandas consuntivas en la región de Antofagasta.

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	38.705	44.480	49.085
Agua Potable Rural	481	569	577
Agrícola	46.230	42.315	42.395
Pecuario	102	146	177
Minero	151.072	99.566	75.990
Industrial	29.563	48.836	59.700
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	266.153	235.912	227.924
Acuícola	0	0	0
Generación Eléctrica	5.397	8.353	8.790
TOTAL NO CONSUNTIVO	5.397	8.353	8.790
Secano	4.879.423	5.282.348	5.281.119
Forestal (Productivo)	1.347	1.374	1.376
Forestal (No Productivo)	372.537	372.550	372.551
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	5.253.307	5.656.272	5.655.045

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2017).

Anexo 7: Resumen de demandas consuntivas en la región de Atacama.

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	17.005	18.388	19.465
Agua Potable Rural	689	779	812
Agrícola	140.215	189.213	210.312
Pecuario	239	474	568
Minero	39.950	48.629	33.543
Industrial	15	26	33
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	198.114	257.508	264.733
Acuícola	0	0	0
Generación Eléctrica	89.266	198.717	198.717
TOTAL NO CONSUNTIVO	89.266	198.717	198.717
Secano	1.475.180	1.439.161	1.425.431
Forestal (Productivo)	1.066	1.140	1.144
Forestal (No Productivo)	18.377	18.371	18.373
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	1.494.622	1.458.672	1.444.948

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2017).

Anexo 8: Resumen de demandas consuntivas en la región de Coquimbo

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	39.496	47.667	52.123
Agua Potable Rural	6.214	7.230	7.505
Agrícola	462.090	720.118	790.984
Pecuario	1.470	2.664	3.198
Minero	41.967	46.021	40.900
Industrial	4.742	6.629	8.034
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	555.979	830.328	902.744
Acuícola	154	556	211
Generación Eléctrica	189.100	214.735	229.268
TOTAL NO CONSUNTIVO	189.254	215.290	229.479
Secano	25.783.317	25.666.796	25.166.147
Forestal (Productivo)	29.543	34.288	36.654
Forestal (No Productivo)	343.960	339.922	339.965
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	26.156.819	26.041.006	25.542.766

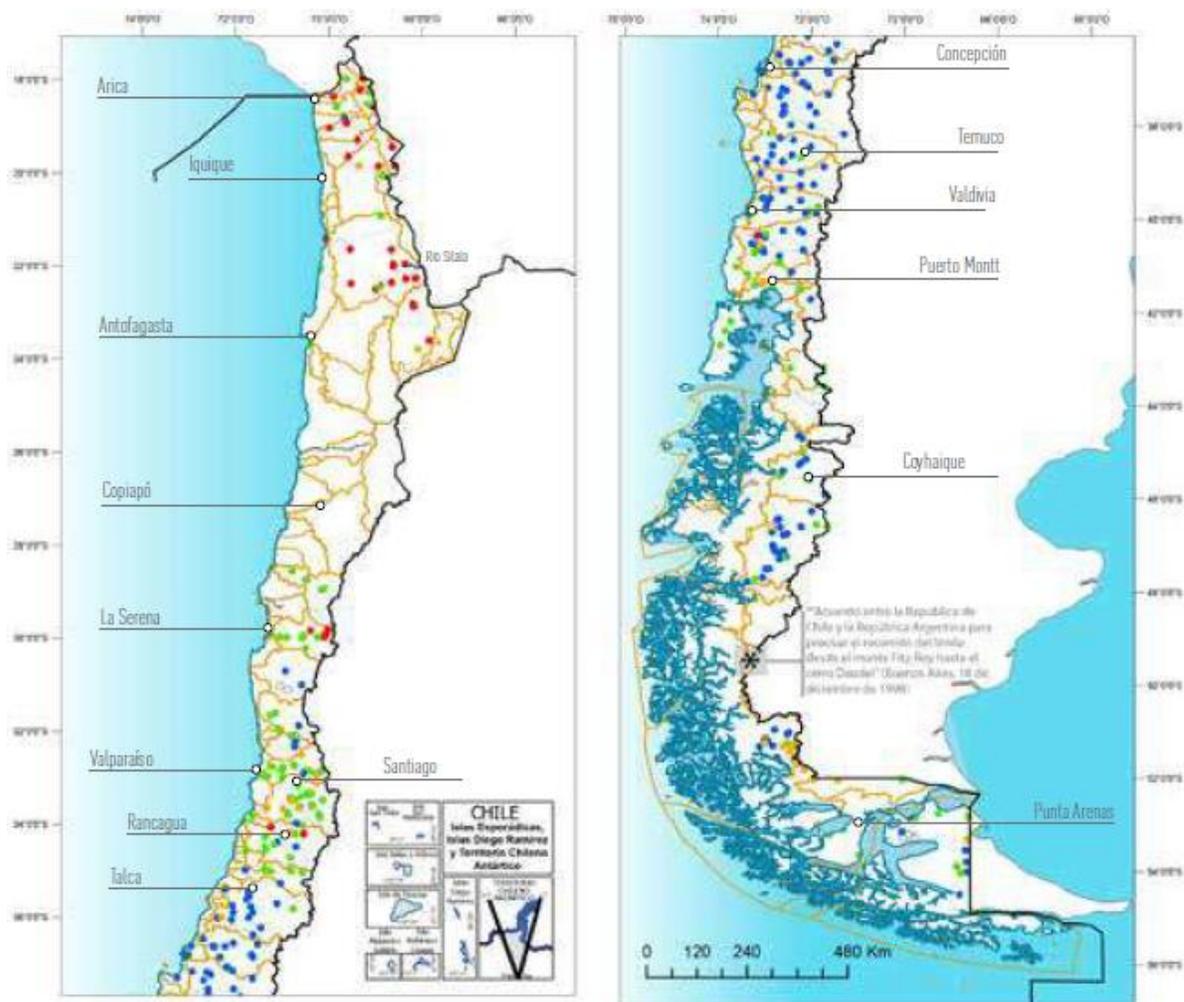
Fuente: (Dirección General de Aguas, 2017).

Anexo 9: Resumen demandas consuntivas en la región de Valparaíso.

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	102.003	112.158	117.727
Agua Potable Rural	10.766	12.207	12.495
Agrícola	672.337	736.452	779.568
Pecuario	3.378	5.320	6.521
Minero	47.571	48.169	42.604
Industrial	16.554	19.302	20.911
Generación Eléctrica	221.370	169.880	174.115
TOTAL CONSUNTIVO	1.073.979	1.103.489	1.153.939
Acuícola	189	853	248
Generación Eléctrica	1.473.620	1.166.331	878.372
TOTAL NO CONSUNTIVO	1.473.809	1.167.184	878.620
Secano	2.391.439	1.995.507	2.056.135
Forestal (Productivo)	216.288	225.433	231.639
Forestal (No Productivo)	1.234.678	1.226.185	1.226.226
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	3.842.405	3.447.126	3.514.000

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2017).

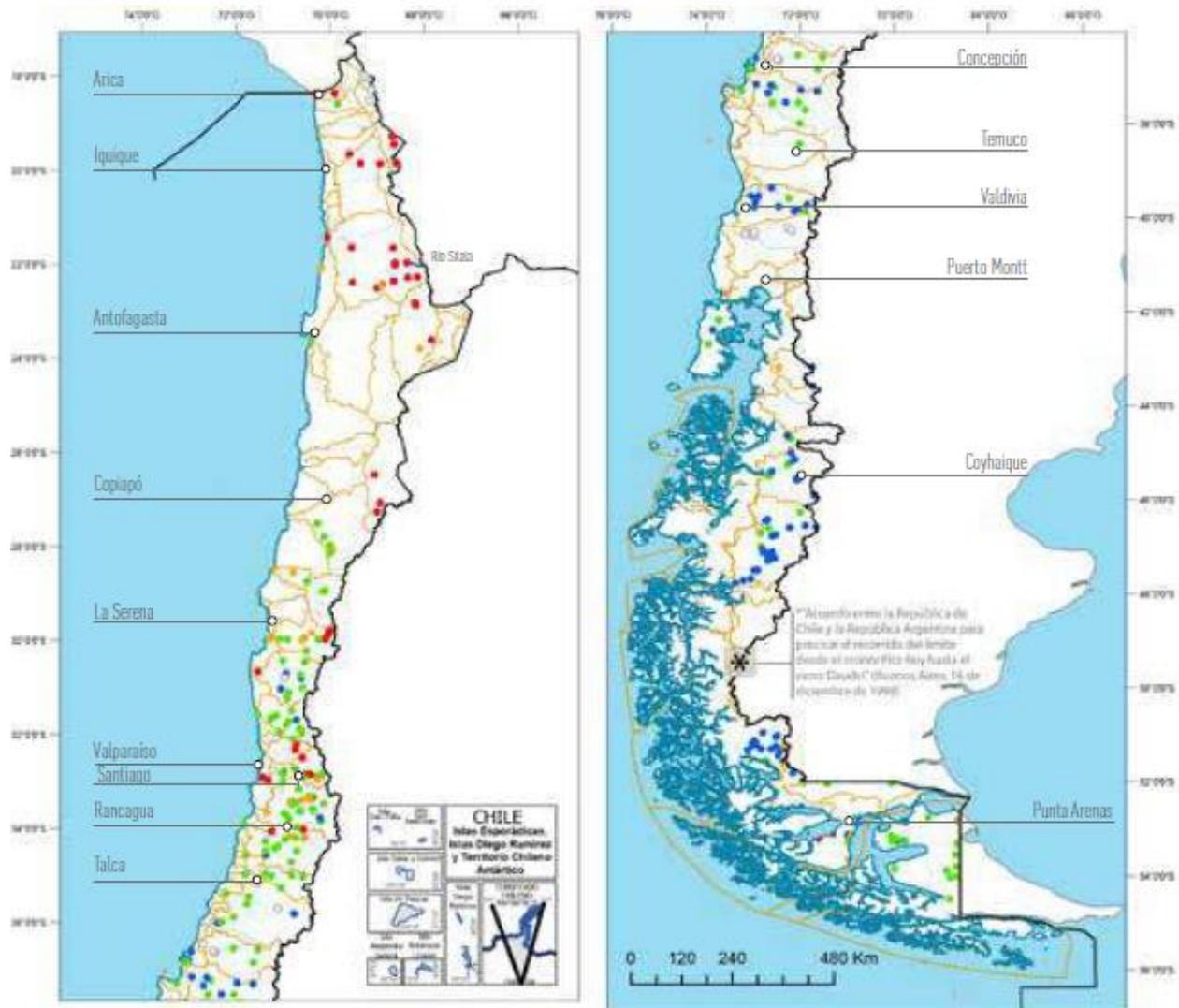
Anexo 10: Índice de calidad de aguas superficiales 2011-2016 en invierno.



Fuente: (Fundación Chile, 2018).

- Capital regional
 - Sin información
 - Límite de cuencas
 - Límite internacional
 - Excepcional
 - Buena
 - Regular
 - Insuficiente
- Red de drenaje
- Río

Anexo 11: Índice de calidad de aguas superficiales 2011-2016 en verano.



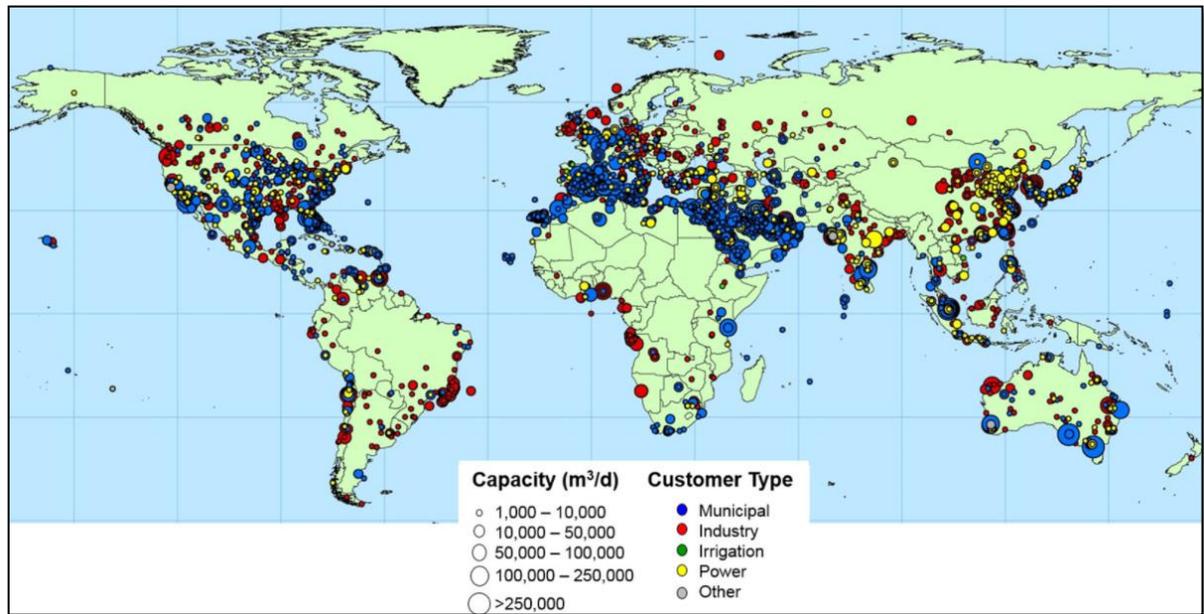
- Capital regional
- Sin información
- Límite de cuencas
- Límite internacional
- Excepcional
- Buena
- Regular
- Insuficiente

Red de drenaje

- Río

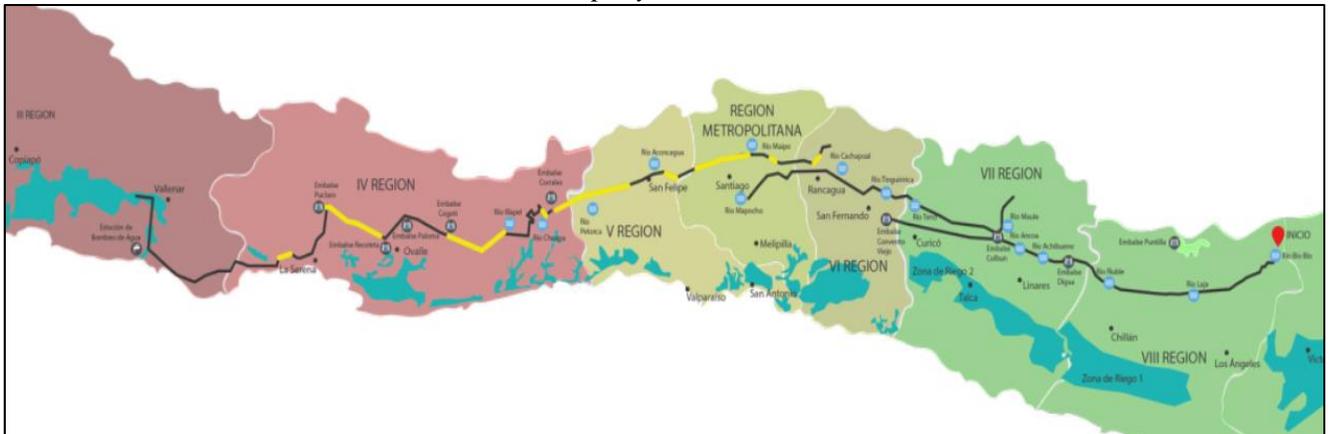
Fuente: (Fundación Chile, 2018).

Anexo 12: Distribución global de las instalaciones y capacidades de desalación operativas (>1000 m³/día) por sector usuario de agua producida..



Fuente: (Jones, Qadir, Vliet, Smakhtin, & Kang, 2019).

Anexo 13: Trazado de proyecto Carretera Hídrica



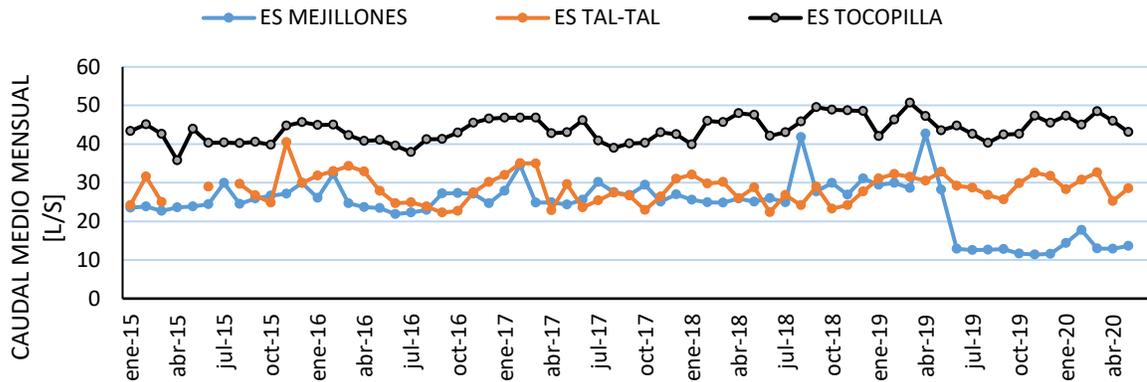
Fuente: (Corporación Reguemos Chile, 2019).

Anexo 14: Ubicación geográfica de emisarios submarinos desde la región de Arica y Parinacota a Valparaíso.

Región	Emisario	Ubicación de Pretratamiento		Ubicación Descarga Cámara de Carga		Datum	Huso
Región De Tarapacá	Es - Playa Brava	7761800	380088	7761838	380102	WGS-84	19
Región De Tarapacá	Es - Barrio Industrial (Punta Negra)	7765834	381064	7765878	381074	WGS-84	19
Región De Antofagasta	Es - Gran Antofagasta	7388063	358082	7388060	358124	WGS-84	19
Región De Antofagasta	Es - Tal Tal	7189979	351438	7191055	355723	WGS-84	19
Región De Antofagasta	Es - Tocopilla	7557286	376559	7557726	376683	WGS-84	19
Región De Antofagasta	Es - Mejillones	7444660	350622	7455985	350741	WGS-84	19
Región De Atacama	Es - Huasco	6849266	281648	6849493	280974	WGS-84	19
Región De Atacama	Es - Chañaral	7084800	337625	7084819	337632	WGS-84	19
Región De Atacama	Es - Chañaral	7084819	337632	7085428	336182	WGS-84	19
Región De Coquimbo	Es - La Serena	6690349	282024	6690349	282024	WGS-84	19
Región De Coquimbo	Es - Coquimbo	6684126	272223	6684099	272258	WGS-84	19
Región De Coquimbo	Es - Los Vilos	6466819	262007	6466807	261983	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Quintero	6371558	262810	6371541	262816	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Concon	6354222	265550	6353812	265332	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - San Antonio	6282121	256537	6282115	256527	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - El Tabo	6294133	253235	6294140	253258	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Cartagena	6285998	258311	6286006	258310	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Algarrobo	6306089	252695	6306089	252692	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Higuierillas	6353857	262250	6353863	262269	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Dos Norte	6343464	261183	6343425	261199	WGS-84	19
Región De Valparaíso	Es - Loma Larga	6340772	251768	6340792	251886	WGS-84	19
Región De Arica Y Parinacota	Es - Chinchorro Norte	7958684	362549	7958722	362569	WGS-84	19

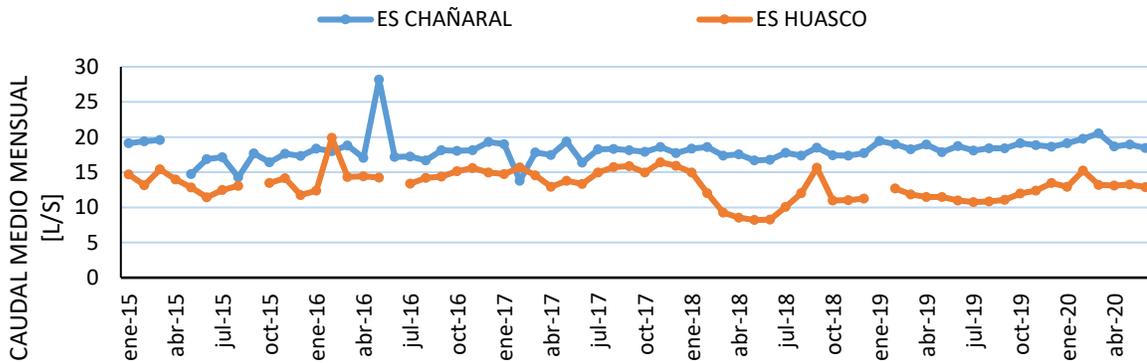
Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 15: Caudal medio mensual emisarios submarinos Región de Antofagasta, 2015-2020 (< 100 l/s)



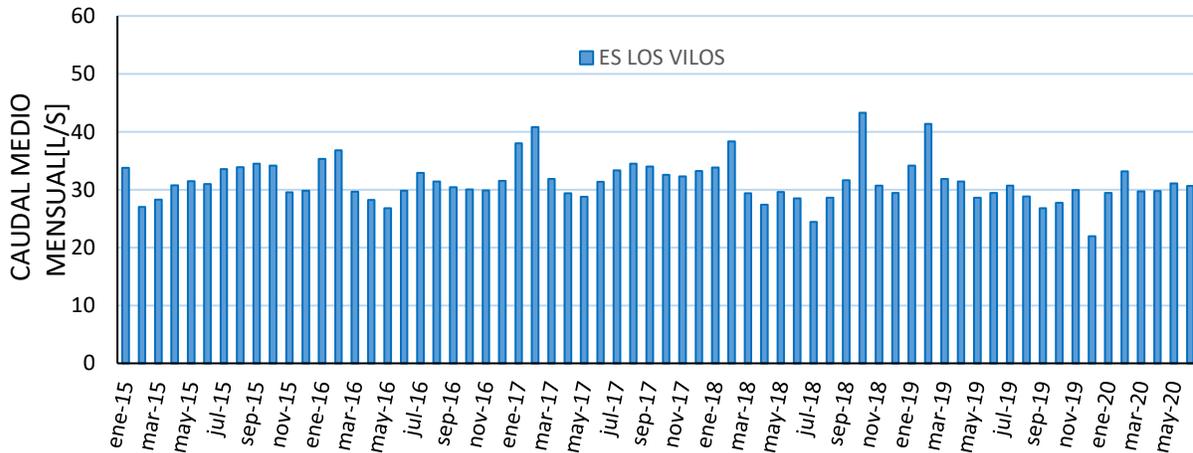
Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 16: Caudal medio mensual emisarios submarinos Región de Atacama, 2015-2020



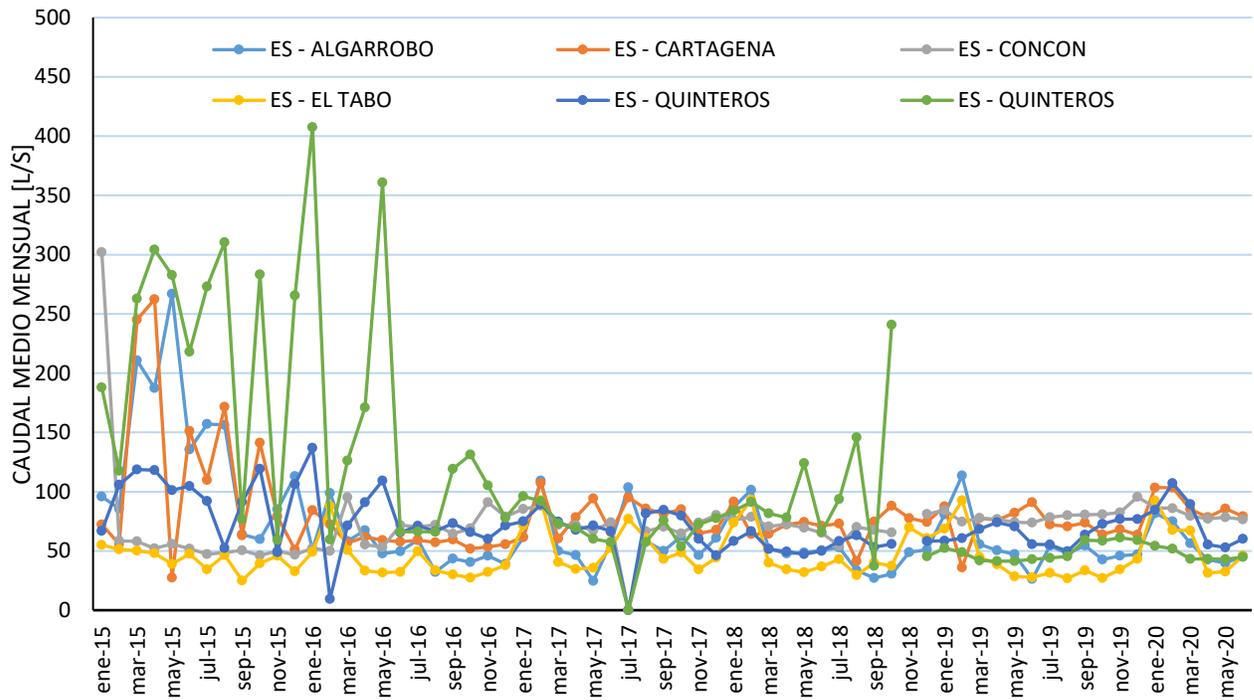
Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 17: Caudal medio mensual emisarios submarinos Región de Coquimbo, 2015-2020 (< 100 l/s)



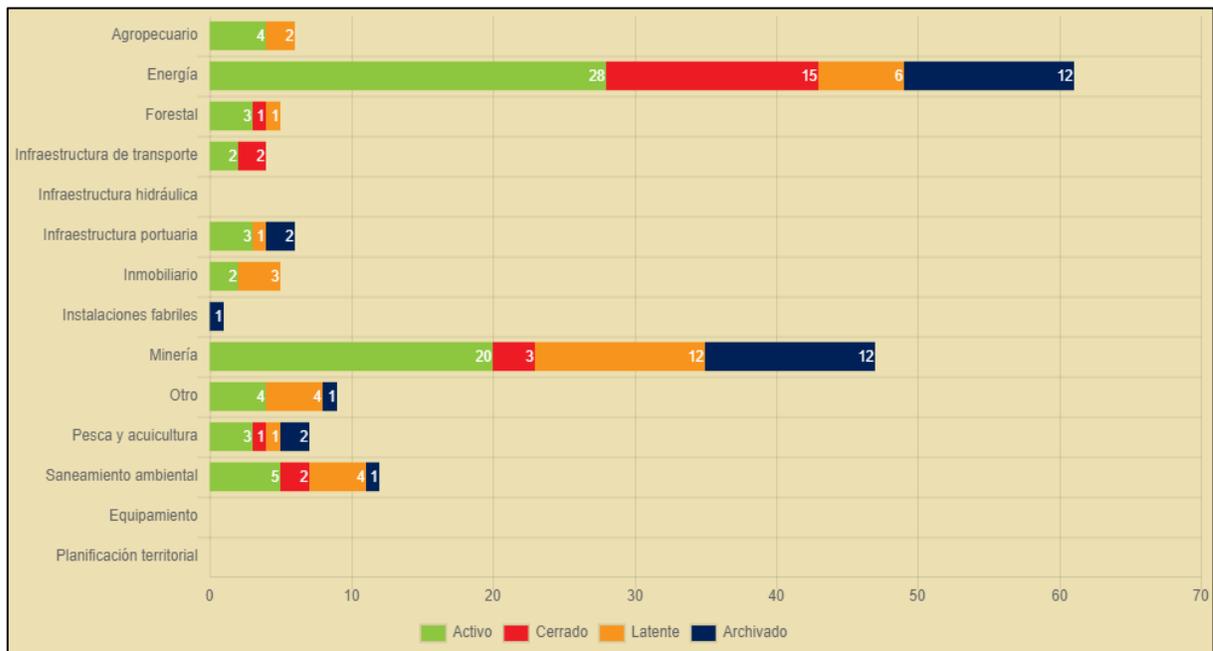
Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 18: Caudal medio mensual emisarios submarinos Región de Valparaíso, 2015-2020 (< 100 l/s)



Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 19: Conflictos socioambientales por estado y estado actual



Fuente: (INDH, 2021).

Anexo 20: Calidad de agua en descargas de Emisarios Submarino Chinchorro Norte

Contaminantes	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
ACEITES Y GRASAS	68,000	35,297	124,000	38,075	148,000	46,660	96,000	28,277	22,000	14,392
ALUMINIO	1,420	1,140	0,680	0,650	1,050	0,680	0,910	0,605	0,730	0,465
ARSENICO	0,007	0,006	0,008	0,007	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,007
CADMIO	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
CIANURO	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
COBRE TOTAL	0,120	0,110	0,120	0,090	0,120	0,120	0,120	0,090	0,080	0,065
COLIFORMES FECALES	160000000,000	34227272,727	160000000,000	47436363,636						
CROMO HEXAVALENTE	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
CROMO TOTAL	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
DBO5	265,000	192,692	289,000	170,087	613,000	166,545	382,000	186,489	292,000	174,140
ESTAÑO	0,010	0,010	0,010	0,010	0,030	0,020	0,030	0,030	0,030	0,030
FLUORURO	0,500	0,500	0,600	0,600	0,600	0,600	0,700	0,600	0,600	0,550
HIDROCARBURO VOLATIL	1,000	0,914	1,000	0,221	5,000	0,300	5,000	0,302	5,000	0,488
HIDROCARBUROS TOTALES	10,000	9,459	10,000	5,158	11,000	5,306	8,000	4,983	5,000	4,712
INDICE DE FENOL	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,010	0,010	0,010	0,010
MANGANESO TOTAL	0,080	0,070	0,090	0,065	0,090	0,085	0,050	0,045	0,100	0,065
MERCURIO	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
MOLIBDENO	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,015	0,020	0,020	0,020	0,020
NIQUEL	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
PH	8,700	7,877	8,270	7,800	8,290	7,739	8,110	7,490	8,010	7,477
PLOMO	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,040	0,030	0,030	0,030	0,030
SAAM	14,900	6,332	14,600	7,300	11,800	4,664	4,800	1,711	9,700	5,481
SELENIO	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
SOLIDOS SEDIMENTABLES	4,500	2,054	8,000	1,792	7,000	1,594	4,000	1,270	10,000	1,260
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	305,000	202,135	291,000	165,256	311,000	162,213	303,000	158,617	420,000	135,854
SULFUROS	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
TEMPERATURA	29,600	25,165	31,100	24,163	30,500	21,573	29,400	18,169	28,800	16,624
ZINC	0,230	0,225	0,140	0,130	0,260	0,220	0,160	0,115	0,190	0,150

Anexo 21: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino Playa Brava

Contaminantes	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
ACEITES Y GRASAS	96,000	45,405	62,000	33,225	109,000	34,351	64,000	29,976	28,000	15,000
ALUMINIO	0,350	0,335	0,410	0,335	0,600	0,490	0,320	0,205	0,260	0,235
ARSENICO	0,019	0,015	0,010	0,010	0,009	0,008	0,007	0,004	0,018	0,013
CADMIO	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
CIANURO	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
COBRE TOTAL	0,070	0,065	0,050	0,030	0,080	0,065	0,060	0,050	0,050	0,045
COLIFORMES FECALES	90000000,000	28056000,000	160000000,000	42161016,949						
CROMO HEXAVALENTE	0,030	0,030	0,030	0,030	0,050	0,040	0,030	0,030	0,030	0,030
CROMO TOTAL	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,040	0,050	0,050	0,050	0,050
DBO5	410,000	201,250	471,000	183,565	212,000	152,040	329,000	214,939	266,000	211,370
ESTAÑO	0,010	0,010	0,010	0,010	0,030	0,020	0,030	0,030	0,030	0,030
FLUORURO	0,700	0,650	0,900	0,850	1,100	0,950	0,900	0,850	0,700	0,700
HIDROCARBURO VOLATIL	1,000	0,784	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
HIDROCARBUROS TOTALES	10,000	8,649	5,000	5,000	5,000	5,000	6,000	5,024	5,000	5,000
INDICE DE FENOL	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,010	0,010	0,010	0,010
MANGANESO TOTAL	0,050	0,040	0,030	0,030	0,080	0,055	0,050	0,045	0,060	0,055
MERCURIO	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
MOLIBDENO	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,015	0,020	0,020	0,020	0,020
NIQUEL	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
PH	8,820	7,969	8,900	7,649	8,200	7,582	8,200	7,593	7,850	7,451
PLOMO	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,040	0,030	0,030	0,030	0,030
SAAM	15,000	5,268	15,300	7,928	16,100	5,200	7,000	2,238	13,200	6,426
SELENIO	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
SOLIDOS SEDIMENTABLES	6,000	2,562	8,000	2,085	6,000	2,051	8,000	2,733	10,000	3,735
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	194,000	133,973	244,000	159,075	296,000	154,789	348,000	206,190	280,000	207,217
SULFUROS	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
TEMPERATURA	34,300	25,858	28,900	23,530	29,100	18,904	28,700	18,995	28,700	17,967
ZINC	0,180	0,150	0,150	0,140	0,180	0,170	0,250	0,190	0,200	0,190

Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 22: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino Gran Antofagasta

	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio								
ACEITES Y GRASAS	339,000	46,708	262,000	51,979	89,000	19,191	62,000	28,837	21,000	14,521
DBOS	582,000	252,143	395,000	248,063	515,000	185,818	183,000	157,800	233,000	173,556
HIDROCARBURO VOLATIL	0,100	0,100	0,100	0,100	0,200	0,123	0,200	0,200	0,200	0,200
HIDROCARBUROS TOTALES	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	7,000	5,047	5,000	5,000
PH	8,660	7,276	7,900	7,149	7,760	7,174	8,300	7,400	8,800	8,015
SAAM	4,890	0,987	4,500	1,363	5,560	2,108	7,800	1,977	11,800	1,531
SOLIDOS SEDIMENTABLES	8,000	1,800	16,000	2,664	15,000	2,543	58,000	5,923	10,000	3,658
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	665,000	166,354	820,000	181,292	467,000	147,596	298,000	175,233	304,000	148,833
TEMPERATURA	28,700	20,004	21,500	19,925	21,400	18,780	23,200	15,527	27,300	22,752

Anexo 23: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino Chañaral

Contaminantes	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
ACEITES Y GRASAS	200,000	64,703	130,000	60,916	133,000	22,821	39,000	17,548	31,500	8,236
ALUMINIO			0,71	0,69	1,15	0,85	0,81	0,68	1,31	0,79
ARSENICO			0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
BORO									3,30	3,30
CADMIO			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CIANURO			0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
CLORUROS									629,00	629,00
COBRE TOTAL			0,10	0,08	0,19	0,11	0,11	0,09	0,17	0,11
COLIFORMES FECALES	24000000000,00	8581170256,46	16000000000,00	7581879714,29	16000000000,00	13734782608,70	16000000000,00	10472000064,00	16000000000,00	7875000000,00
CROMO HEXAVALENTE			0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CROMO TOTAL			0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
DBOS	427,000	276,189	489,000	318,698	859,000	328,842	666,000	293,180	497,000	228,413
ESTAÑO			0,52	0,37	0,84	0,44	0,05	0,03	0,48	0,24
FLUORURO			0,78	0,49	0,20	0,20	0,69	0,66	1,48	1,01
HIDROCARBURO VOLATIL	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	1,000	0,177
HIDROCARBUROS FIJOS	5,00	5,00	5,00	5,00	46,00	6,10	15,00	5,92	12,20	2,62
HIDROCARBUROS TOTALES	5,000	5,000	5,000	5,000	46,000	6,103	15,000	6,072	12,200	2,640
HIERRO DISUELTO									0,00	0,00
INDICE DE FENOL			0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,03
MANGANESO TOTAL			0,05	0,05	0,09	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05
MERCURIO			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
MOLIBDENO			0,01	0,01	0,17	0,09	0,01	0,01	0,01	0,01
NIQUEL			0,01	0,01	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01
PENTAFLOROFENOL									0,00	0,00
PH	8,900	8,124	8,800	7,671	8,900	8,140	8,800	8,052	9,000	8,267
PLOMO			0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
SAAM	3,990	0,994	4,520	1,000	4,690	1,580	3,930	1,434	2,770	1,447
SELENIO			0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
SOLIDOS SEDIMENTABLES	12,000	2,186	10,000	2,371	10,000	3,459	8,000	3,914	8,000	3,560
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	492,000	244,297	440,000	194,644	432,000	240,103	436,000	241,520	366,000	203,229
SULFATOS									823,00	823,00
SULFUROS			0,65	0,45	0,26	0,18	0,22	0,16	4,10	1,82
TEMPERATURA	27,000	23,465	27,400	23,601	28,700	24,168	28,800	23,715	28,100	24,210
TOLUENO									0,01	0,01
XILENO									0,01	0,01
ZINC			0,17	0,16	0,90	0,53	0,25	0,24	0,33	0,25

Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 24: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino Coquimbo

	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
ACEITES Y GRASAS	119,000	42,327	127,000	38,292	120,000	30,083	61,000	21,920	27,000	14,958
ALUMINIO			1,100	0,725	0,810	0,755	0,620	0,580	0,440	0,440
ARSENICO			0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
BORO							0,810	0,810		
CADMIO	0,005	0,005	0,010	0,007	0,010	0,007	0,010	0,006	0,002	0,002
CIANURO	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
CLORUROS							1860,000	1860,000		
COBRE TOTAL	0,029	0,029	0,110	0,102	0,140	0,105	0,020	0,020	0,050	0,050
COLIFORMES FECALES	50000000,000	7585861,222	30000000,000	4687500,167	26000000,000	6960000,000	23000000,000	13772277,228	80000000,000	14489583,552
CROMO HEXAVALENTE			0,030	0,025	0,030	0,025	0,030	0,030	0,030	0,030
CROMO TOTAL	0,010	0,010	0,050	0,026	0,050	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020
DBOS	369,000	164,680	375,000	253,979	398,000	252,292	422,000	256,680	384,000	243,688
DQO	805,700	520,717	1053,500	718,527	1026,800	615,667	1547,000	641,558	1155,220	604,564
ESTAÑO			0,500	0,500	0,180	0,095	0,150	0,150	0,150	0,150
FLUORURO			0,500	0,500	0,500	0,450	0,500	0,500		
FOSFORO	5,800	5,800								
HIDROCARBURO VOLATIL	0,200	0,167	1,600	0,246	1,200	0,211	0,940	0,203	0,200	0,200
HIDROCARBUROS FIJOS	5,000	4,898	9,000	5,146	7,600	5,054	5,000	5,000	6,000	5,021
HIDROCARBUROS TOTALES	5,000	4,896	9,000	5,146	7,700	4,956	5,000	5,000	6,000	5,021
HIERRO DISUELTO	0,080	0,080					0,010	0,010		
INDICE DE FENOL	0,233	0,085	0,256	0,073	0,117	0,064	0,800	0,181	0,289	0,084
MANGANESO TOTAL	0,050	0,050	0,060	0,050	0,060	0,050	0,030	0,025	0,030	0,030
MERCURIO			0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
MOLIBDENO			0,070	0,040	0,070	0,040	0,030	0,025		
NIQUEL	0,020	0,020	0,050	0,035	0,050	0,035	0,060	0,055	0,010	0,010
NITROGENO TOTAL KJELDAHL							75,800	75,800		
PENTAFLUOROFENOL							1,000	1,000		
PH	8,230	7,668	8,270	7,953	8,920	7,928	8,250	7,821	8,390	7,772
PLOMO	0,030	0,030	0,050	0,031	0,050	0,035	0,030	0,025	0,020	0,020
SAAM	13,800	6,322	13,900	7,517	10,200	3,989	7,060	4,344	7,500	3,753
SELENIO			0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
SOLIDOS SEDIMENTABLES	6,500	2,560	9,000	4,306	11,000	3,154	8,000	3,360	12,000	2,794
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	405,710	189,562	335,000	222,075	398,330	193,632	328,200	204,196	312,100	171,590
SULFATOS							391,400	391,400		
SULFUROS	0,100	0,100	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
TEMPERATURA	23,000	17,901	26,200	18,262	25,600	18,325	25,900	18,230	25,900	20,279
TETRAFLUOROETENO							0,000	0,000		
TOLUENO							0,005	0,005		
TRICLOROMETANO							0,004	0,004		
XILENO							0,005	0,005		
ZINC	0,034	0,034	0,134	0,127	0,280	0,185	0,100	0,060	0,090	0,090

Anexo 25: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino La Serena

	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
ACEITES Y GRASAS	88,000	40,167	226,000	43,367	69,000	30,750	65,000	19,776	21,000	14,396
ALUMINIO			1,100	0,760	1,000	0,710	0,600	0,490	0,400	0,400
ARSENICO			0,008	0,006	0,006	0,005	0,007	0,006	0,007	0,007
BORO							0,640	0,640		
CADMIO	0,005	0,005	0,010	0,007	0,010	0,007	0,010	0,006	0,002	0,002
CIANURO	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
CLORUROS							398,000	398,000		
COBRE TOTAL	0,075	0,075	0,104	0,097			0,090	0,090	0,040	0,040
COLIFORMES FECALES	130000000,000	10823529,775	30000000,000	5632653,102	50000000,000	7878504,832	130000000,000	11323232,364	130000000,000	16445544,62
CROMO HEXAVALENTE			0,030	0,025	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
CROMO TOTAL	0,010	0,010	0,050	0,026	0,050	0,050	0,020	0,020	0,020	0,020
DBOS	310,000	164,735	353,000	238,408	375,000	255,313	332,000	212,306	418,000	239,167
DQO			574,000	574,000	713,800	637,375			523,200	438,280
ESTAÑO			0,500	0,500	0,500	0,340	0,150	0,150	0,150	0,150
FLUORURO			0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500		
HIDROCARBURO VOLATIL	0,200	0,169	1,820	0,266	1,320	0,258	1,210	0,252	0,200	0,200
HIDROCARBUROS FIJOS	5,000	5,000	10,000	5,208	5,000	5,000	7,000	5,041	5,000	5,000
HIDROCARBUROS TOTALES	7,000	5,042	10,000	5,208	5,000	4,899	7,000	5,041	5,000	5,000
HIERRO DISUELTO	0,050	0,050					0,040	0,040		
INDICE DE FENOL	0,080	0,070	0,094	0,057	0,081	0,077	0,095	0,095		
MANGANESO TOTAL	0,060	0,060	0,080	0,065	0,080	0,075	0,100	0,095	0,080	0,080
MERCURIO			0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
MOLIBDENO			0,070	0,038	0,070	0,040	0,030	0,025		
NIQUEL	0,020	0,020	0,050	0,035	0,050	0,035	0,050	0,030	0,010	0,010
NITROGENO TOTAL KJELDAHL							71,000	71,000		
PENTAFLUOROFENOL							1,000	1,000		
PH	8,290	7,790	8,410	7,967	8,690	7,952	8,400	7,805	8,550	7,716
PLOMO	0,030	0,030	0,050	0,031	0,050	0,035	0,030	0,025	0,020	0,020
SAAM	16,000	7,012	16,700	7,565	18,500	4,449	8,200	4,457	6,640	3,946
SELENIO			0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
SOLIDOS SEDIMENTABLES	14,000	3,123	14,000	4,802	17,000	5,154	6,500	2,165	7,000	2,785
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	496,000	203,861	428,570	221,090	363,070	200,257	291,500	149,111	300,000	154,265
SULFATOS							188,900	188,900		
SULFUROS	0,100	0,100	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
TEMPERATURA	24,600	18,436	24,100	18,090	26,000	18,268	24,600	18,434	26,500	20,090
TETRAFLUOROETENO							0,000	0,000		
TOLUENO							0,005	0,005		
TRICLOROMETANO							0,003	0,003		
XILENO							0,005	0,005		
ZINC	0,203	0,203	0,148	0,134	0,160	0,147	0,150	0,115	0,090	0,090

Anexo 26: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino Loma Larga

	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio								
ACEITES Y GRASAS	77,000	32,583	63,000	25,245	69,000	25,354	30,000	19,176	25,270	13,075
ALUMINIO	1,600	1,250	1,200	0,750	0,700	0,655	0,110	0,067	0,410	0,320
ARSENICO	0,019	0,011	0,019	0,011	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002
CADMIO	0,002	0,002	0,003	0,003	0,010	0,005	0,010	0,007	0,010	0,006
CIANURO	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,013	0,020	0,020
COBRE TOTAL	0,040	0,035	0,070	0,045	0,050	0,045	0,030	0,020	0,050	0,045
COLIFORMES FECALES	24000000,000	4630104,167	24000000,000	5294680,851	90000000,000	7852555,556	30000000,000	5201958,763	90000000,000	6039157,895
CROMO HEXAVALENTE	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,025	0,030	0,020	0,030	0,020
CROMO TOTAL	0,010	0,010	0,010	0,006	0,050	0,035	0,050	0,033	0,050	0,035
DBO5	302,000	174,146	411,000	197,923	394,000	212,271	254,000	138,745	303,000	156,720
DQO	596,400	337,363	859,000	413,124	726,870	387,337	628,000	298,529	1058,000	338,620
ESTAÑO	0,200	0,200	0,200	0,190	0,180	0,130	0,500	0,333	0,150	0,080
FLUORURO	0,600	0,600	0,800	0,700	0,600	0,550	0,700	0,434	0,700	0,650
FOSFORO									4,310	4,310
HIDROCARBURO VOLATIL	1,120	0,180	4,580	0,456	2,370	0,330	0,950	0,223	0,200	0,197
HIDROCARBUROS FIJOS	6,000	4,146	5,000	5,000	9,100	5,238	5,000	2,696	1,400	1,400
HIDROCARBUROS TOTALES	5,000	4,792	5,000	5,000	9,200	5,247	5,000	5,000	5,000	4,928
INDICE DE FENOL	0,311	0,039	0,198	0,032	0,094	0,044	0,082	0,040	0,216	0,048
MANGANESO TOTAL	0,060	0,055	0,060	0,050	0,060	0,050	0,050	0,030	0,110	0,065
MERCURIO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001
MOLIBDENO	0,100	0,100	0,100	0,085	0,070	0,038	0,020	0,013	0,030	0,025
NIQUEL	0,020	0,020	0,020	0,020	0,050	0,035	0,050	0,033	0,050	0,030
PH	8,000	7,739	8,920	7,784	8,570	7,736	8,080	7,540	7,980	7,539
PLOMO	0,100	0,060	0,020	0,020	0,030	0,025	0,030	0,020	0,090	0,055
PODER ESPUMOGENO									1,000	1,000
SAAM	12,500	5,671	18,900	6,716	10,330	5,095	9,630	5,786	7,610	4,518
SELENIO	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
SOLIDOS SEDIMENTABLES	7,000	2,671	10,000	3,084	8,000	2,428	6,500	1,356	1,500	1,402
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	273,000	131,063	335,000	137,673	342,850	147,601	282,500	87,316	208,600	88,362
SULFUROS	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,133	0,200	0,200
TEMPERATURA	23,300	14,203	28,600	17,538	23,700	14,872	24,100	18,565	24,900	20,277
ZINC	0,141	0,130	0,152	0,097	0,150	0,110	0,060	0,030	0,306	0,203

Anexo 27: Calidad de agua en descargas de Emisario Submarino Dos Norte

	2015		2016		2017		2018		2019	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
ACEITES Y GRASAS	93,000	39,571	76,000	24,286	27,000	17,857	31,000	20,000	24,640	12,552
ALUMINIO	0,800	0,650	1,100	0,700	0,300	0,265	0,000	0,000	0,640	0,585
ARSENICO	0,013	0,010	0,004	0,004	0,001	0,001	0,000	0,000	0,002	0,002
CADMIO	0,002	0,002	0,003	0,003	0,010	0,005	0,000	0,000	0,002	0,002
CIANURO	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,000	0,000	0,020	0,020
COBRE TOTAL	0,030	0,030	0,050	0,035	0,030	0,030	0,000	0,000	0,040	0,040
COLIFORMES FECALES	16000000,000	4914285,714	22000000,000	6434482,828	50000000,000	8183793,172	9000000,000	2952000,100	90000000,000	6673766,800
CROMO HEXAVALENTE	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,025	0,000	0,000	0,030	0,020
CROMO TOTAL	0,010	0,010	0,010	0,006	0,050	0,030	0,000	0,000	0,020	0,020
DBO5	383,000	203,821	413,000	185,571	270,000	186,750	332,000	156,690	276,000	163,679
DQO	582,100	364,575	715,000	417,718	707,000	341,429	714,000	334,586	550,000	297,500
ESTAÑO	0,200	0,200	0,200	0,190	0,180	0,105	0,000	0,000	0,500	0,325
FLUORURO	0,700	0,600	0,900	0,800	0,700	0,700	0,001	0,001	0,700	0,650
HIDROCARBURO VOLATIL	0,750	0,179	4,150	0,462	8,970	0,606	0,890	0,240	1,210	0,269
HIDROCARBUROS FIJOS	5,000	3,679	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	2,393	1,400	1,400
HIDROCARBUROS TOTALES	5,000	4,821	5,000	5,000	9,900	5,175	5,000	5,000	5,000	5,000
INDICE DE FENOL	0,097	0,037	0,052	0,021	0,109	0,055	0,056	0,029	0,107	0,042
MANGANESO TOTAL	0,060	0,050	0,060	0,045	0,060	0,055	0,000	0,000	0,060	0,055
MERCURIO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
MOLIBDENO	0,100	0,100	0,100	0,085	0,070	0,038	0,000	0,000	0,030	0,030
NIQUEL	0,020	0,020	0,020	0,020	0,050	0,035	0,000	0,000	0,010	0,010
PH	7,900	7,650	8,100	7,696	8,120	7,637	7,800	7,456	8,120	7,713
PLOMO	0,160	0,090	0,020	0,020	0,030	0,025	0,000	0,000	0,020	0,020
SAAM	8,590	5,047	12,000	6,751	7,940	6,115	7,820	5,241	6,960	4,760
SELENIO	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
SOLIDOS SEDIMENTABLES	22,000	3,248	8,000	2,925	8,000	2,043	6,500	1,455	5,000	1,550
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	307,000	133,034	235,000	115,786	280,000	98,407	252,000	80,259	207,500	79,971
SULFUROS	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,000	0,000	0,200	0,200
TEMPERATURA	18,600	10,772	22,500	15,230	23,400	12,204	21,800	16,245	23,800	19,143
ZINC	0,165	0,112	0,124	0,084	0,090	0,070	0,000	0,000	0,112	0,110

Fuente: Elaboración propia en base a información de SISS, 2020.

Anexo 28: Precios Unitarios en bases asociadas a HYDRO IC

Descripción de partida en ítemizado	Unidad	Valor Unitario
Excavación en Zanja, de 0 a 4 m de profundidad	M3	\$ 6.257
Cama de Apoyo	M3	\$ 28.000
Relleno lateral de tuberías con arena compactada	M3	\$ 24.398
Rellenos/Material común de la excavación	M3	\$ 12.099
Relleno estructural empréstito	M3	\$ 16.698
Retiro y Transporte de Excedentes	M3	\$ 14.201
Hormigón grado G25 H30	M3	\$ 138.498
Hormigón H-5 para emplantillado	M3	\$ 83.820
Acero redondo para armaduras A63 - 42H	KG	\$ 1.430
Moldajes cilíndricos lisos tipo t2	M2	\$ 35.130
Moldajes lisos para pilares, losa y fundaciones	M2	\$ 19.451

Fuente: elaboración propia en base a información de HYDRO IC, 2021.

Anexo 29: Valor de metro cuadrado en comunas de estudio

Región	Comuna	Valor [UF/m2]
V	Viña del Mar	0,25
V	Quintero	0,21
V	Nogales	0,21
IV	La Serena	0,2
IV	Vicuña	0,25
IV	Coquimbo	0,21

Fuente: Elaboración propia en base a información de informes tarifarios SISS, 2021.

Anexo 30: Vector de Precios Unitario Aguas del Valle

Descripción Partida	un	PU (UF)
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=419 mm	m	4.477
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=470 mm	m	5.006
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=521 mm	m	5.728
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=622 mm	m	8.920
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=711 mm	m	10.426
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=812 mm	m	12.309
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=914 mm	m	14.134
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=1016 mm	m	14.169
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=1219 mm	m	14.203
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=419 mm	m	1.205
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=470 mm	m	1.365
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=521 mm	m	1.525
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=622 mm	m	1.841
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=711 mm	m	2.120
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=812 mm	m	2.436
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=914 mm	m	2.755
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=1016 mm	m	3.075
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=1219 mm	m	3.711

Fuente: Elaboración propia en base a información de informes tarifarios (Aguas del Valle S.A, 2016).

Anexo 31: Vector de Precios Unitarios ESVAL

Descripción Partida	un	PU (UF)
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=419 mm	m	3.596
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=470 mm	m	4.111
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=521 mm	m	4.654
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con juntas Acople K10 D=622 mm	m	6.032
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=711 mm	m	9.265
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=812 mm	m	10.879
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=914 mm	m	12.377
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=1016 mm	m	13.761
Tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, con uniones brida D=1219 mm	m	16.972
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=419 mm	m	1.428
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=470 mm	m	1.591
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=521 mm	m	1.754
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=622 mm	m	2.077
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=711 mm	m	2.362
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=812 mm	m	2.685
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=914 mm	m	3.011
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=1016 mm	m	3.337
Colocación y Prueba de tuberías de acero con costura helicoidal revestido con HDPE, D=1219 mm	m	3.986

Fuente: Elaboración propia en base a información de informes tarifarios (ESVAL S.A., 2017).

Anexo 32: Capacidad estanques de succión plantas elevadoras Sistema La Serena

Planta Elevadora	Caudal [LT/min]	Tiempo Bombeo Mínimo [min]	Estanque Succión [m3]	Capacidad [m3]
PEAS	616	20	E1	739
PTAS-PE2 [2]	616	20	E2A-E2B [2]	739
PE3	350	20	E3	420
PE4	150	20	E4	180

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 33: Capacidad estanques de almacenamiento Sistema La Serena

Estanques	Caudal [LT/min]	Tiempo Almacenamiento máximo [días]	Estanque Almacenamiento [m3]
EA1-EA2	266	1	22982
EA3	200	1	17280

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 34: Diseño de estanques y obras asociadas, Sistema La Serena

Estanque	Capacidad [m3]	Altura [m]	Radio Int [m]	Radio Ext [m]	Volumen Hormigon [m3]	Emplantillado [m3]	Área Estanques [m2]	Enfierradura [kg]	Moldajes [m2]	Moldajes Liso[m2]
E1	800	6	6,5	6,8	63	29	165	11416	1001	288
E2A-E2B	800	6	6,5	6,8	125	58	165	22833	2002	575
E3	500	6	5,2	5,4	50	18	105	8505	795	183
E4	200	6	3,3	3,5	32	8	44	4951	510	77
EA1-EA2	12000	10	19,5	19,8	618	492	1416	138785	9887	4924
EA3	18000	10	23,9	24,2	378	368	2113	93190	6047	3676

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 35: Capacidad estanques de succión plantas elevadoras Sistema Coquimbo

Planta Elevadora	Caudal [LT/min]	Tiempo Bombeo Mínimo [min]	Estanque Succión [m3]	Capacidad [m3]
PEAS	575	20	ES1	690
PE1 - PTAS [2]	575	20	ES2 - ES3 [2]	690
PE2	575	20	ES4	690
PE3	450	20	ES5	540
PE4	340	20	ES6	408
PE5	340	20	ES7	408
PE6	340	20	ES8	408
PE7	340	20	ES9	408

Fuente: Elaboración propia

Anexo 36: Capacidad estanques de almacenamiento Sistema Coquimbo

Estanque	Caudal [lt/min]	Tiempo almacenamiento máximo [días]	Estanque almacenamiento [m3]
EA1	125	2	21600
EA2	110	1	9504

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 37: Diseño de estanques y obras asociadas, Sistema Coquimbo

Estanque	Capacidad [m3]	Altura [m]	Radio Int [m]	Radio Ext [m]	Volumen Hormigón [m3]	Emplantillado [m3]	Área Estanques [m2]	Enfieradura [kg]	Moldajes [m2]	Moldajes Lisos [m2]
ES1	700	5	6,7	6,9	53	30	173	6676	855	301
ES2 - ES3	700	5	6,7	6,9	85	59	342	10643	1703	594
ES4	700	5	6,7	6,9	43	30	171	5322	851	297
ES5	600	5	6,2	6,4	39	26	147	4933	789	256
ES6	500	5	5,6	5,8	36	21	123	4510	722	214
ES7	500	5	5,6	5,8	36	21	123	4510	722	214
ES8	500	5	5,6	5,8	36	21	123	4510	722	214
ES9	500	5	5,6	5,8	36	21	123	4510	722	214
EA1	22000	8	29,6	29,8	298	557	3205	37305	5969	5575
EA2	10000	12	16,3	16,5	247	171	982	30888	4942	1708

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 38: Capacidad estanques de succión plantas elevadoras Sistema Dos Norte

Planta Elevadora	Caudal [LT/min]	Tiempo Bombeo Mínimo [min]	Estanque Succión [m3]	Capacidad [m3]
PEAS	1296	20	E1	1555
PTAS-PE2 [2]	1296	20	E2A-E2B [2]	1555
PE3	850	20	E3	1020
PE4	450	20	E4	540
PE5	160	60	E5	576

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 39: Capacidad estanques de almacenamiento Sistema Dos Norte

Planta Elevadora	Caudal [LT/min]	Tiempo Almacenamiento máximo [días]	Estanque Almacenamiento [m3]
EA1	300	1	25920
EA2-EA3	400	1	34560
EA4-EA5	290	1	25056

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 40: Diseño de estanques y obras asociadas, Sistema Dos Norte

Estanque	Capacidad [m3]	Altura [m]	Radio Int [m]	Radio Ext [m]	Volumen Hormigón [m3]	Emplantillado [m3]	Área Estanques [m2]	Enfieradura [kg]	Moldajes [m2]	Moldajes Liso[m2]
E1	1600	6	9,2	9,5	88	56	324	11001	1408	563
E2A-E2B [2]	1600	6	9,2	9,5	176	113	647	22003	2816	1125
E3	1100	6	7,6	7,9	73	39	225	9147	1171	391
E4	600	6	5,6	5,9	54	22	125	6794	870	218
E5	600	10	4,4	4,6	71	13	77	8826	1130	134
EA1	26000	10	28,8	29,0	454	529	3042	56732	7262	5291
EA2-EA3 [2]	18000	10	23,9	24,2	756	735	4227	94489	12095	7351
EA4-EA5 [2]	13000	10	20,3	20,6	643	533	3064	80374	10288	5329

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 41: Precios unitarios de tarifas de potencia contratada

Comuna	CF [\$/mes]	CST [\$/kWh]	CSP [\$/kWh]	CE [\$/kWh]	CP [\$/kWh/mes]
La Serena	1324.40	24.205	0.487	82.879	7587.4
Coquimbo	1324.40	24.205	0.487	82.879	7598.3
Viña del Mar	1324.40	19.154	0.487	82.582	8981.2

Fuente: Elaboración propia en base a información de (Compañía General de Electricidad S.A., 2021).

Anexo 42: Resumen de costos de inversión y datos de diseño PTAS de referencia

PROCESO: LODOS ACTIVADOS		SAN FERNANDO	RANCAGUA	LOS ÁNGELES	CHILLÁN	LOS ANDES	SAN FELIPE	QUILLOTA	TREBAL
ANTECEDENTES GENERALES									
Población de Diseño	habitantes	64,284	373,625	163,456	218,251	74,073	75,321	208,533	2,203,568
Caudal de Diseño	L/s	104.71	607.70	244.25	298.90	109.41	113.20	298.64	6,600.00
Caudal máximo horario	L/s	229.07	983.33	453.44	531.56	231.00	238.00	525.80	10,900.00
Carga de Diseño	KgDBO5/d	2,511	14,597	6,386	8,534	-	-	-	143,700
Tipo de suelo		Semi-duro							
Área Requerida	m2	20,618	69,920	34,884	41,164	13,851	13,200	26,303	478,200
RESUMEN DE COSTOS									
Costos Directos Totales (\$)									
		\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
Suministro Equipos, Montaje y Puesta en Marcha	\$	798,691,515	2,371,460,064	1,303,311,596	1,603,292,212	849,701	910,344	1,591,610	-
OCC, Urbanización y Edificaciones	\$	778,113,828	2,581,861,723	1,598,163,561	1,862,197,119	1,011,644	1,173,094	1,897,573	-
Interconexiones Hidráulicas	\$	173,632,230	813,471,702	345,595,317	427,091,392	169,910	165,739	399,530	-
Obras Eléctricas	\$	266,106,949	717,267,933	425,341,754	485,925,857	320,018	325,310	484,793	-
SUB-TOTAL		2,016,544,521	6,484,061,422	3,672,412,228	4,378,506,580	1,782,264,512	1,951,461,146	3,315,117,703	90,176,742,393

Anexo 43: Resumen de costos de O&M y datos de diseño PTAS lodos activados de referencia

ANTECEDENTES GENERALES		Los Andes MC	Quillota	San Felipe MC	SAN FERNANDO	RANCAGUA	LOS ÁNGELES	CHILLÁN	Concepción
Población Doméstica Media Ponderada	Habitantes	73,798	207,528	75,034	64,284	373,625	163,456	218,251	521,893
Caudal Medio Diseño Anual	L/s	109.41	298.64	113.21	104.71	607.70	244.25	298.90	766.80
Carga Media Diseño Anual	L/s	3,125.87	8,487.29	2,854.68	2,426	13,912	6,098	7,824	19,229
GASTOS Y CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA									
		\$ 149,609,699	\$ 349,774,532	\$ 131,906,294	\$ 118,447,539	\$ 715,729,912	\$ 288,576,668	\$ 397,523,956	\$ 722,156,674
GASTOS Y CONSUMOS DE PRODUCTOS QUÍMICOS									
		\$ 68,190,423	\$ 160,346,313	\$ 79,438,660	\$ 51,216,079	\$ 297,633,692	\$ 127,128,606	\$ 165,923,754	\$ 232,859,164
GASTOS TOTALES DE TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS									
		\$ 72,724,512	\$ 218,220,482	\$ 79,867,492	\$ 76,836,836	\$ 443,276,976	\$ 175,134,447	\$ 232,516,417	\$ 479,647,219
GASTOS DE SERVICIO DE LABORATORIO									
		\$ 8,268,624	\$ 11,010,312	\$ 8,268,624	\$ 33,632,064	\$ 33,632,064	\$ 33,632,064	\$ 33,632,064	\$ 33,632,064
MANTENIMIENTO									
		\$ 34,065,581	\$ 37,602,210	\$ 39,526,183	\$ 26,202,533	\$ 60,283,404	\$ 37,377,615	\$ 43,088,819	\$ 69,283,543
TOTAL GASTOS DE OPERACIÓN									
		\$ 332,858,838	\$ 776,953,849	\$ 339,007,253	\$ 306,335,051	\$ 1,550,556,048	\$ 661,849,399	\$ 872,685,010	\$ 1,537,578,664

Fuente: Elaboración propia en base a información de informes tarifarios SISS, 2021.

Anexo 44: Planilla de cálculo Sistema reúso La Serena

INSTALACIONES	Parcial	Acumulada	Cota Terreno	Caudal	Material	Dext	Espesor	Dinterior	Velocidad	Perdida Friccionales	Perdida Singulares	Otra Perdidas	Perdida Total	Perfil Piezométr	Presión	Presión Transiente	Presión Estática
	(m)	(m)	(m)	(l/s)	[-]	(mm)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
PEAS 1	0	0	8	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	27,6	19,6	23,5	16,0
TRAMO 1	1000	1000	13	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	25,8	12,8	15,4	11,0
PTAS / PE2	1000	2000	19	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	24,0	5,0	6,0	5,0
	1000	2000	19	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	0,00	172,4	153,4	184,1	130,0
TRAMO 2	1000	3000	32	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	170,6	138,6	166,4	117,0
	1000	4000	36	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	168,8	132,8	159,4	113,0
	1000	5000	42	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	167,0	125,0	150,0	107,0
	1000	6000	47	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	165,2	118,2	141,9	102,0
	1000	7000	56	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	163,4	107,4	128,9	93,0
	1000	8000	66	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	161,6	95,6	114,7	83,0
	1000	9000	75	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	159,8	84,8	101,8	74,0
	1000	10000	89	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	158,0	69,0	82,8	60,0
	1000	11000	104	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	156,2	52,2	62,7	45,0
	1000	12000	110	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	154,4	44,4	53,3	39,0
	1000	13000	116	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	152,6	36,6	43,9	33,0
	1000	14000	128	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	150,8	22,8	27,4	21,0
PE3 / EA1 / EA2	1000	15000	144	616	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,42	1,71	0,09	0,01	1,80	149,0	5,0	6,0	5,0
	1000	15000	144	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,71	0,09	0,01	0,00	342,0	198,0	237,6	169,0
TRAMO 3	1000	16000	166	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	340,1	174,1	208,9	147,0
	1500	17500	177	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	2,75	0,14	0,01	2,90	337,2	160,2	192,2	136,0
	500	18000	179	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	0,92	0,05	0,00	0,97	336,2	157,2	188,7	134,0
	1000	19000	191	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	334,3	143,3	171,9	122,0
	1000	20000	199	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	332,4	133,4	160,0	114,0
	1000	21000	209	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	330,4	121,4	145,7	104,0
	1000	22000	210	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	328,5	118,5	142,2	103,0
	1000	23000	228	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	326,5	98,5	118,3	85,0
	1000	24000	236	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	324,6	88,6	106,3	77,0
	1000	25000	250	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	322,7	72,7	87,2	63,0
	1000	26000	265	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	320,7	55,7	66,9	48,0
	1000	27000	266	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	318,8	52,8	63,4	47,0
	1000	28000	275	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	316,9	41,9	50,2	38,0
	1000	29000	287	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	314,9	27,9	33,5	26,0
	PE4 / EA3	1000	30000	308	350	ACERO ASTM A53	609,6	9,52	590,56	1,28	1,83	0,09	0,01	1,94	313,0	5,0	6,0
1000		30000	308	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	1,83	0,09	0,01	0,00	520,0	212,0	254,4	168,0
TRAMO 4	1000	31000	314	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	516,9	202,9	243,4	162,0
	1000	32000	328	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	513,7	185,7	222,9	148,0
	1000	33000	348	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	510,6	162,6	195,1	128,0
	1000	34000	347	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	507,4	160,4	192,5	129,0
	1000	35000	365	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	504,3	139,3	167,1	111,0
	1000	36000	363	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	501,1	138,1	165,8	113,0
	1000	37000	370	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	498,0	128,0	153,6	106,0
	1000	38000	381	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	494,9	113,9	136,6	95,0
	1000	39000	394	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	491,7	97,7	117,3	82,0
	1000	40000	401	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	488,6	87,6	105,1	75,0
	1000	41000	409	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	485,4	76,4	91,7	67,0
	1000	42000	422	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	482,3	60,3	72,3	54,0
1000	43000	451	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	479,1	28,1	33,8	25,0	
EMB PUCLARO	1000	44000	471	150	ACERO ASTM A53	406,4	9,52	387,36	1,27	2,98	0,15	0,01	3,14	476,0	5,0	6,0	5,0

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 45: Planilla de cálculo Sistema reúso Coquimbo

INSTALACIONES	Parcial	Acumulada	Cota Terreno	Caudal	Material	Dext	Espesor	Dinterior	Velocidad	Perdida Friccionales	Perdida Singulares	Otra Perdidas	Perdida Total	Perfil Piezométrico	Presión	Presión Transiente	Presión Estática
	(m)	(m)	(m)	(l/s)	-	(mm)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
PEAS	0	0	13	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	22,2	9,2	11,0	9,0
PTAS / PE1	100	100	17	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	0,15	0,01	0,00	0,16	22,0	5,0	6,0	5,0
	100	100	17	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	0,15	0,01	0,00		177,0	160,0	192,0	130,0
TRAMO 1	2900	3000	36	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	4,36	0,22	0,02	4,60	172,4	136,4	163,7	111,0
	2000	5000	35	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	169,2	134,2	161,1	112,0
	2000	7000	63	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	166,0	103,0	123,6	84,0
	2000	9000	74	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	162,9	88,9	106,6	73,0
	2000	11000	120	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	159,7	39,7	47,6	27,0
	2000	13000	105	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	156,5	51,5	61,8	42,0
	2000	15000	119	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	153,3	34,3	41,2	28,0
	2000	17000	141	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	150,2	9,2	11,0	6,0
PE 2 / EA1	2000	19000	142	575	ACERO ASTM A53	762	9,52	742,96	1,33	3,01	0,15	0,02	3,17	147,0	5,0	6,0	5,0
	2000	19000	142	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,01	0,15	0,02		297,2	155,2	186,3	114,0
TRAMO 2	2000	21000	143	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	293,1	150,1	180,1	113,0
	2000	21000	145	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	289,0	144,0	172,8	111,0
	2000	23000	116	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	284,9	168,9	202,6	140,0
	2000	25000	144	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	280,7	136,7	164,1	112,0
	2000	27000	140	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	276,6	136,6	163,9	116,0
	2000	29000	147	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	272,5	125,5	150,6	109,0
	2000	31000	150	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	268,4	118,4	142,0	106,0
	2000	33000	171	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	264,2	93,2	111,9	85,0
PE 3 / EA2	2000	35000	207	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	260,1	53,1	63,7	49,0
	2000	37000	251	450	ACERO ASTM A53	660,4	9,52	641,36	1,39	3,91	0,20	0,02	4,12	256,0	5,0	6,0	5,0
TRAMO 3	2000	37000	251	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	3,91	0,20	0,02		430,1	179,1	214,9	162,0
	2000	39000	296	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	5,39	0,27	0,03	5,68	424,4	128,4	154,0	117,0
	2000	41000	344	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	5,39	0,27	0,03	5,68	418,7	74,7	89,6	69,0
PE 4	1000	42000	376	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	2,69	0,13	0,01	2,84	415,8	39,8	47,8	37,0
	1000	43000	408	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	2,69	0,13	0,01	2,84	413,0	5,0	6,0	5,0
TRAMO 4	1000	43000	408	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	2,69	0,13	0,01	2,84	413,0	5,0	6,0	5,0
	700	43700	426	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	596,0	170,0	204,0	162,0
	700	44400	448	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	594,0	146,0	175,2	140,0
	700	45100	486	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	592,0	106,0	127,2	102,0
PE 5	700	45800	516	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	590,0	74,0	88,8	72,0
	700	46500	583	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	588,0	5,0	6,0	5,0
TRAMO 5	700	46500	583	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	588,0	5,0	6,0	5,0
	500	47000	636	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	801,4	165,4	198,5	162,0
PE 6	500	47500	739	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	800,0	61,0	73,2	59,0
	700	48200	793	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	798,0	5,0	6,0	5,0
TRAMO 6	700	48200	793	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,89	0,09	0,01	1,99	798,0	5,0	6,0	5,0
	500	49200	925	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	991,6	124,6	149,5	122,0
PE 7	500	49200	925	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	990,1	65,1	78,2	64,0
	400	49600	984	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,08	0,05	0,01	1,14	989,0	5,0	6,0	5,0
TRAMO 7	400	49600	984	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,08	0,05	0,01	1,14	989,0	5,0	6,0	5,0
	400	50000	1039	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,08	0,05	0,01	1,14	1103,2	119,2	143,1	111,0
	500	50500	1041	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	1102,1	63,1	75,7	56,0
	500	51000	1090	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	1099,3	9,3	11,1	5,0
	500	51500	1064	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	1097,8	33,8	40,6	31,0
MINERA ANDACOLLO	500	52000	1047	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	1096,4	49,4	59,3	48,0
MINERA ANDACOLLO	500	52500	1062	340	ACERO ASTM A53	558,8	9,52	539,76	1,49	1,35	0,07	0,01	1,42	1095,0	33,0	39,6	33,0

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 46: Planilla de cálculo Sistema reúso Dos Norte

INSTALACIONES	Parcial	Acumulada	Cota Terreno	Caudal	Material	Dext	Espesor	Dinterior	Velocidad	Perdida Friccionales	Perdida Singulares	Otra Perdidas	Perdida Total	Perfil Piezométrico	Presión	Presión Transiente	Presión Estática	
	(m)	(m)	(m)	(l/s)		(mm)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)	
PEAS 1	0	0	13	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	46,6	33,6	40,3	26,0	
TRAMO 1	2000	2000	16	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	44,4	28,4	34,1	23,0	
	2000	4000	22	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	42,2	20,2	24,3	17,0	
	2000	6000	28	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	40,1	12,1	14,5	11,0	
PTAS / PEAS 2	1000	7000	34	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	1,03	0,05	0,01	1,08	39,0	5,0	6,0	5,0	
	1000	7000	34	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,6	1,38	1,03	0,05	0,01		204,8	170,8	205,0	153,0	
TRAMO 2	1000	8000	56	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	1,03	0,05	0,01	1,08	203,8	147,8	177,3	131,0	
	2000	10000	86	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	201,6	115,6	138,7	101,0	
	2000	12000	98	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	199,4	101,4	121,7	89,0	
	2000	14000	111	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	197,3	86,3	103,5	76,0	
	2000	16000	115	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	195,1	80,1	96,1	72,0	
	2000	18000	122	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	192,9	70,9	85,1	65,0	
	2000	20000	147	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	190,8	43,8	52,5	40,0	
	2000	22000	150	1296	ANSI 44"	1120	12,7	1094,60	1,38	2,05	0,10	0,01	2,16	188,6	38,6	46,3	37,0	
	1500	23500	182	1150	ASTM A53 SCH STD	1067	9,52	1047,96	1,33	1,52	0,08	0,01	1,61	187,0	5,0	6,0	5,0	
	500	24000	157	1150	ASTM A53 SCH STD	1067	9,52	1047,96	1,33	0,51	0,03	0,00	0,54	186,5	29,5	35,4	30,0	
	2000	26000	128	1150	ASTM A53 SCH STD	1067	9,52	1047,96	1,33	2,03	0,10	0,01	2,14	184,3	56,3	67,6	59,0	
	2000	28000	95	1150	ASTM A53 SCH STD	1067	9,52	1047,96	1,33	2,03	0,10	0,01	2,14	182,2	87,2	104,6	92,0	
2000	30000	82	1150	ASTM A53 SCH STD	1067	9,52	1047,96	1,33	2,03	0,10	0,01	2,14	180,0	98,0	117,6	105,0		
PEAS 3 / EA1	1000	31000	65	1150	ASTM A53 SCH STD	1067	9,52	1047,96	1,33	1,02	0,05	0,01	1,07	179,0	114,0	136,7	122,0	
	1000	31000	65	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,02	0,05	0,01		211,3	146,3	175,5	110,0	
TRAMO 3	500	31500	86	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	0,62	0,03	0,00	0,66	210,6	124,6	149,5	89,0	
	500	32000	101	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	0,62	0,03	0,00	0,66	209,9	108,9	130,7	74,0	
	2000	34000	125	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	2,50	0,12	0,01	2,64	207,3	82,3	98,8	50,0	
	1000	35000	113	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	206,0	93,0	111,6	62,0	
	1000	36000	119	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	204,7	85,7	102,8	56,0	
	1000	37000	74	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	203,3	129,3	155,2	101,0	
	1000	38000	77	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	202,0	125,0	150,0	98,0	
	1000	39000	81	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	200,7	119,7	143,7	94,0	
	1000	40000	94	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	199,4	105,4	126,5	81,0	
	1000	41000	71	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	198,1	127,1	152,5	104,0	
	1000	42000	75	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	1,25	0,06	0,01	1,32	196,8	121,8	146,1	100,0	
	2000	44000	83	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	2,50	0,12	0,01	2,64	194,1	111,1	133,3	92,0	
	2000	46000	93	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	2,50	0,12	0,01	2,64	191,5	98,5	118,2	82,0	
	2000	48000	106	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	2,50	0,12	0,01	2,64	188,8	82,8	99,4	69,0	
	2000	50000	116	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	2,50	0,12	0,01	2,64	186,2	70,2	84,2	59,0	
	3000	53000	130	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	3,75	0,19	0,02	3,96	182,3	52,3	62,7	45,0	
	3000	56000	148	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	3,75	0,19	0,02	3,96	178,3	30,3	36,4	27,0	
	EAS 4 / EA2 / EA	2500	58500	170	850	ASTM A53 SCH STD	914,4	9,52	895,36	1,35	3,12	0,16	0,02	3,30	175,0	5,0	6,0	5,0
2500		58500	170	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,12	0,16	0,02		309,5	139,5	167,4	95,0	
TRAMO 4	1500	60000	189	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	2,94	0,15	0,01	3,10	306,4	117,4	140,8	76,0	
	2000	62000	199	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	302,2	103,2	123,9	66,0	
	2000	64000	218	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	298,1	80,1	96,1	47,0	
	2000	66000	218	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	294,0	76,0	91,1	47,0	
	2000	68000	213	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	289,8	76,8	92,2	52,0	
	2000	70000	222	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	285,7	63,7	76,4	43,0	
	2000	72000	235	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	281,5	46,5	55,9	30,0	
	2000	74000	235	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	277,4	42,4	50,9	30,0	
	2000	76000	242	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	273,3	31,3	37,5	23,0	
	2000	78000	251	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	269,1	18,1	21,8	14,0	
	EAS 5 / EA4 / EA	2000	80000	260	450	ASTM A53 SCH STD	660	9,52	640,96	1,39	3,92	0,20	0,02	4,14	265,0	5,0	6,0	5,0
		2000	80000	260	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,92	0,20	0,02		454,4	194,4	233,3	165,0
TRAMO 5	2000	82000	272	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	6,71	0,34	0,03	7,08	447,3	175,3	210,4	153,0	
	1000	83000	285	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,36	0,17	0,02	3,54	443,8	158,8	190,5	140,0	
	1000	84000	304	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,36	0,17	0,02	3,54	440,2	136,2	163,5	121,0	
	1000	85000	320	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,36	0,17	0,02	3,54	436,7	116,7	140,0	105,0	
	1000	86000	336	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,36	0,17	0,02	3,54	433,1	97,1	116,6	89,0	
	1000	87000	359	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,36	0,17	0,02	3,54	429,6	70,6	84,7	66,0	
	1000	88000	399	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	3,36	0,17	0,02	3,54	426,1	27,1	32,5	26,0	
	FINA EL SOLDAD	300	88300	420	160	ASTM A53 SCH STD	406,4	9,52	387,36	1,36	1,01	0,05	0,01	1,06	425,0	5,0	6,0	5,0

Anexo 47: Itemizado Sistema de reúso La Serena

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO LA SERENA					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio Total	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR	Humedales artificiales
A	CONDUCCION Y ELEVACION				\$19.690.748.658	\$19.690.748.658	\$19.690.748.658
1	MOVIMIENTO DE TIERRAS						
1.1	Excavaciones	m3	173.223	\$6.257	\$1.083.859.408	\$1.083.859.408	\$1.083.859.408
1.2	Relleno cama de arena	m3	10.178	\$28.000	\$284.996.968	\$284.996.968	\$284.996.968
1.3	Relleno lateral e inicial	m3	60.492	\$24.398	\$1.475.884.697	\$1.475.884.697	\$1.475.884.697
1.4	Relleno material de excavación	m3	44.528	\$12.099	\$538.739.006	\$538.739.006	\$538.739.006
1.5	Relleno material empréstito	m3	29.685	\$16.698	\$495.680.851	\$495.680.851	\$495.680.851
1.6	Retiro de excedentes	m3	68.255	\$14.201	\$969.288.096	\$969.288.096	\$969.288.096
2	OOC [Estanques Succión]						
2,1	Hormigón G25	m3	269	\$138.498	\$37.301.564	\$37.301.564	\$37.301.564
2,2	Emplantillado	m3	112	\$83.820	\$9.413.907	\$9.413.907	\$9.413.907
2,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	47.705	\$1.430	\$68.223.052	\$68.223.052	\$68.223.052
2,4	Moldajes	m2	4.309	\$35.130	\$151.386.294	\$151.386.294	\$151.386.294
2,5	Moldajes Lisos	m2	1.123	\$19.451	\$21.845.556	\$21.845.556	\$21.845.556
3	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE TUBERIAS						
3,1	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 30"	ml	15.000	\$405.995	\$6.089.928.888	\$6.089.928.888	\$6.089.928.888
3,2	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 24"	ml	15.000	\$320.176	\$4.802.637.241	\$4.802.637.241	\$4.802.637.241
3,3	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 16"	ml	14.000	\$169.062	\$2.366.871.192	\$2.366.871.192	\$2.366.871.192
4	TERRENO Y EXPROPIACIONES						
4,1	Uso de suelo Conducción / PEAS / Estanques Succión	m2	26.880,50	\$6.695	\$179.955.277	\$179.955.277	\$179.955.277
4	EQUIPOS						
4,1	Bomba PE 200 - 300 KW	un	12	\$51.929.822	\$623.157.864	\$623.157.864	\$623.157.864
4,2	Bomba PEAS 40 KW	un	6	\$12.152.256	\$72.913.536	\$72.913.536	\$72.913.536

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO LA SERENA					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio Total	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR	Humedales artificiales
4,3	Otros Equipos y Piezas Especiales	gl	1	\$418.665.262	\$418.665.262	\$418.665.262	\$418.665.262
B	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS				\$7.986.360.492	\$22.544.592.749	\$12.409.317.115
1	PTAS Humedal Construido						
1,1	Tratamiento LA/ MBR/ HC	un	1	\$5.483.574.568	\$7.590.603.775	\$22.425.865.734	\$5.483.574.568
1,2	Uso de suelo PTAS LA	m2	66.505	\$5.951	\$395.756.717		
1,2	Uso de suelo PTAS MBR	m2	19.951	\$5.951		\$118.727.015	
1,2	Uso de suelo PTAS HC	m2	1.163.834	\$5.951			\$6.925.742.546
C	OBRAS COMPLEMENTARIAS				\$1.292.410.186	\$1.292.410.186	\$1.292.410.186
1	OOC [Estanques Almacenamiento]						
1,1	Hormigón G25	m3	996	\$138.498	\$137.927.245	\$137.927.245	\$137.927.245
1,2	Emplantillado	m3	860	\$83.820	\$72.078.294	\$72.078.294	\$72.078.294
1,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	231.975	\$1.430	\$331.747.156	\$331.747.156	\$331.747.156
1,4	Moldajes	m2	15.934	\$35.130	\$559.769.948	\$559.769.948	\$559.769.948
1,5	Moldajes Lisos	m2	8.599	\$19.451	\$167.262.152	\$167.262.152	\$167.262.152
2	TERRENO Y EXPROPIACIONES						
2,1	Uso de suelo Estanques Almacenamiento	m2	3.529,00	\$6.695	\$23.625.391	\$23.625.391	\$23.625.391
[0]	COSTO DIRECTO				\$28.969.519.336	\$43.527.751.593	\$33.392.475.958
				USD	\$38.218.363	\$57.424.474	\$44.053.398

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 48: Itemizado Sistema de reúso Coquimbo

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO COQUIMBO					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precios unitarios	Precio Total	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR	Humedales artificiales
A	CONDUCCION Y ELEVACION				\$31.297.727.945	\$31.297.727.945	\$31.297.727.945
1	MOVIMIENTO DE TIERRAS						
1.1	Excavaciones	m3	212.355	\$6.257	\$1.328.703.482	\$1.328.703.482	\$1.328.703.482
1.2	Relleno cama de arena	m3	12.762	\$28.000	\$357.338.653	\$357.338.653	\$357.338.653
1.3	Relleno lateral e inicial	m3	76.289	\$24.398	\$1.861.303.668	\$1.861.303.668	\$1.861.303.668
1.4	Relleno material de excavación	m3	57.541	\$12.099	\$696.186.890	\$696.186.890	\$696.186.890
1.5	Relleno material emprestito	m3	38.361	\$16.698	\$640.544.876	\$640.544.876	\$640.544.876
1.6	Retiro de excedentes	m3	89.657	\$14.201	\$1.273.221.547	\$1.273.221.547	\$1.273.221.547
2	OOC [Estanques Succión]						
2,1	Hormigón G25	m3	365	\$138.498	\$50.537.657	\$50.537.657	\$50.537.657
2,2	Emplantillado	m3	231	\$83.820	\$19.328.553	\$19.328.553	\$19.328.553
2,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	45.612	\$1.430	\$65.230.214	\$65.230.214	\$65.230.214
2,4	Moldajes Cilíndricos	m2	7.084	\$35.130	\$248.874.816	\$248.874.816	\$248.874.816
2,5	Moldajes Lisos	m2	2.306	\$19.451	\$44.853.105	\$44.853.105	\$44.853.105
3	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE TUBERIAS						
3,1	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 30"	ml	19.000	\$405.995	\$7.713.909.925	\$7.713.909.925	\$7.713.909.925
3,2	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 26"	ml	18.000	\$346.723	\$6.241.020.516	\$6.241.020.516	\$6.241.020.516
3,3	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 22"	ml	15.500	\$267.994	\$4.153.911.309	\$4.153.911.309	\$4.153.911.309
4	TERRENO Y EXPROPIACIONES						
4,1	Uso de suelo Conducción / PEAS / Estanques Succión	m2	23.525,90	\$6.248	\$146.997.989	\$146.997.989	\$146.997.989
4	EQUIPOS						
4,1	Bomba PE 150 KW	un	4	\$31.157.893	\$124.631.573	\$124.631.573	\$124.631.573
4,2	Bomba PE 250 KW	un	9	\$52.968.418	\$476.715.766	\$476.715.766	\$476.715.766
5,2	Bomba PE 300 KW	un	17	\$87.761.399	\$1.491.943.786	\$1.491.943.786	\$1.491.943.786

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO COQUIMBO					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precios unitarios	Precio Total	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR	Humedales artificiales
6,2	Bomba PEAS 40 KW	un	9	\$418.665.262	\$3.767.987.355	\$3.767.987.355	\$3.767.987.355
4,3	Otros Equipos y Piezas Especiales	gl	1	\$594.486.268	\$594.486.268	\$594.486.268	\$594.486.268
B	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS				\$7.514.486.540	\$21.969.754.003	\$12.132.861.692
1	PTAS Lodos Activados						
1,1	Tratamientos LA/ MBR/ HC	un	1	\$7.122.277.403	\$7.122.277.403	\$21.852.091.262	\$5.269.201.800
1,2	Uso de suelo PTAS LA	m2	62.770	\$6.248	\$392.209.137		
1,2	Uso de suelo PTAS MBR		18.831	\$6.248		\$117.662.741	
1,2	Uso de suelo PTAS HA		1.098.477	\$6.248			\$6.863.659.892
C	OBRAS COMPLEMENTARIAS				\$785.241.210	\$785.241.210	\$785.241.210
1	OCC [Estanques Almacenamiento]						
1,1	Hormigón G25	m3	546	\$138.498	\$75.556.912	\$75.556.912	\$75.556.912
1,2	Emplantillado	m3	728	\$83.820	\$61.041.588	\$61.041.588	\$61.041.588
1,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	68.193	\$1.430	\$97.523.190	\$97.523.190	\$97.523.190
1,4	Moldajes Cilíndricos	m2	10.911	\$35.130	\$383.304.336	\$383.304.336	\$383.304.336
1,5	Moldajes Lisos	m2	7.282	\$19.451	\$141.650.790	\$141.650.790	\$141.650.790
2	TERRENO Y EXPROPIACIONES						
2,1	Uso de suelo Estanques Almacenamiento	m2	4.187,40	\$6.248	\$26.164.393	\$26.164.393	\$26.164.393
[0]	COSTO DIRECTO				\$39.597.455.695	\$54.052.723.158	\$44.215.830.847
			USD		\$52.239.387	\$71.309.661	\$58.332.231

Fuente: Elaboración propia

Anexo 49: Itemizado Sistema de reúso Dos Norte

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO DOS NORTE					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precios unitarios	Precio Total	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR	Humedales artificiales
A	CONDUCCION Y ELEVACION				\$51.283.623.114	\$51.283.623.114	\$51.283.623.114
1	MOVIMIENTO DE TIERRAS						
1.1	Excavaciones	m3	454.412	\$6.257	\$2.843.255.779	\$2.843.255.779	\$2.843.255.779
1.2	Relleno cama de arena	m3	25.151	\$28.000	\$704.238.846	\$704.238.846	\$704.238.846
1.3	Relleno lateral e inicial	m3	151.680	\$24.398	\$3.700.684.210	\$3.700.684.210	\$3.700.684.210
1.4	Relleno material de excavación	m3	126.511	\$12.099	\$1.530.656.584	\$1.530.656.584	\$1.530.656.584
1.5	Relleno material empréstito	m3	84.341	\$16.698	\$1.408.320.447	\$1.408.320.447	\$1.408.320.447
1.6	Excedentes	m3	209.998	\$14.201	\$2.982.181.069	\$2.982.181.069	\$2.982.181.069
2	OOC [Estanques Succión]						
2,1	Hormigón G25	m3	462	\$138.498	\$64.009.271	\$64.009.271	\$64.009.271
2,2	Emplantillado	m3	243	\$83.820	\$20.379.224	\$20.379.224	\$20.379.224
2,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	57.771	\$1.430	\$82.618.362	\$82.618.362	\$82.618.362
2,4	Moldajes Cilíndricos	m2	7.395	\$35.130	\$259.778.019	\$259.778.019	\$259.778.019
2,5	Moldajes Lisos	m2	2.431	\$19.451	\$47.291.253	\$47.291.253	\$47.291.253
3	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE TUBERIAS						
3,1	Cañería Acero revestida en HDPE 44"	ml	22.000	\$566.129	\$12.454.845.876	\$12.454.845.876	\$12.454.845.876
3,2	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 42"	ml	9.000	\$537.417	\$4.836.750.732	\$4.836.750.732	\$4.836.750.732
3,3	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 36"	ml	27.500	\$457.855	\$12.591.000.180	\$12.591.000.180	\$12.591.000.180
3,4	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 20"	ml	21.500	\$190.664	\$4.099.268.088	\$4.099.268.088	\$4.099.268.088
3,5	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 16"	ml	8.300	\$149.484	\$1.240.717.997	\$1.240.717.997	\$1.240.717.997
4	TERRENO Y EXPROPIACIONES						
4,1	Uso de suelo Conducción / PEAS / Estanques Succión	m2	54.378,00	\$6.248	\$339.772.246	\$339.772.246	\$339.772.246
5	EQUIPOS						

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS EMISARIO SUBMARINO DOS NORTE					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precios unitarios	Precio Total	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR	Humedales artificiales
5,1	Bomba PE 200 KW	un	6	\$41.543.858	\$249.263.146	\$249.263.146	\$249.263.146
5,2	Bomba PE 300 KW	un	7	\$67.508.769	\$472.561.380	\$472.561.380	\$472.561.380
5,3	Bomba PE 350 KW	un	9	\$87.761.399	\$789.852.593	\$789.852.593	\$789.852.593
5,4	Bomba PEAS 80 KW	un	9	\$21.874.061	\$196.866.547	\$196.866.547	\$196.866.547
5,5	Otros Equipos y Piezas Especiales	gl	1	\$369.311.265	\$369.311.265	\$369.311.265	\$369.311.265
B	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS				\$11.020.721.592	\$29.946.042.653	\$32.256.445.170
1	PTAS						
1,1	Tratamiento LA / MBR/ HC	un	1	\$16.097.015.174	\$10.097.325.592	\$29.669.023.853	\$16.097.015.174
1,2	Uso de suelo PTAS LA	m2	124.137	\$7.439	\$923.396.000		
1,2	Uso de suelo PTAS MBR	m2	37.241	\$7.439		\$277.018.800	
1,2	Uso de suelo PTAS HC	m2	2.172.404	\$7.439			\$16.159.429.996
C	OBRAS COMPLEMENTARIAS				\$2.193.956.181	\$2.193.956.181	\$2.193.956.181
1	OCC [Estanques Almacenamiento]						
1,1	Hormigón G25	m3	1.853	\$138.498	\$256.603.387	\$256.603.387	\$256.603.387
1,2	Emplantillado	m3	1.797	\$83.820	\$150.629.170	\$150.629.170	\$150.629.170
1,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	231.595	\$1.430	\$331.204.389	\$331.204.389	\$331.204.389
1,4	Moldajes Cilíndricos	m2	29.644	\$35.130	\$1.041.410.385	\$1.041.410.385	\$1.041.410.385
1,5	Moldajes Lisos	m2	17.971	\$19.451	\$349.544.330	\$349.544.330	\$349.544.330
2	TERRENO Y EXPROPIACIONES						
2,1	Uso de suelo Estanques Almacenamiento	m2	10.333,10	\$6.248	\$64.564.520	\$64.564.520	\$64.564.520
[0]	COSTO DIRECTO				\$64.498.300.888	\$83.423.621.949	\$85.734.024.465
			USD		\$85.090.107	110.057.548,75	113.105.573,17

Fuente: Elaboración propia