UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAISO - CHILE

"PROPUESTA DE REUTILIZACIÓN DE AGUA SERVIDA TRATADA PARA RIEGO DE CULTIVOS DE LA REGIÓN METROPOLITANA, CONSIDERANDO NORMATIVAS DE CALIDAD DE AGUA Y CALIDADES ACTUALES DE LAS AGUAS DEL RÍO MAIPO"

ALEJANDRA SOFÍA BRAVO VIGUERA

MEMORIA DE PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL AMBIENTAL

PROFESOR GUÍA:

DANIEL RAMIREZ LIVINGSTON

PROFESOR CORREFERENTE:

ALEJANDRO VILLA VIDAL

DICIEMBRE 2022

En primer lugar, agradezco a mis padres

por ser mi apoyo constante, y los pilares de mi vida,

a mis abuelos por ser una fuente de amor y aliento.

Agradezco a mi mejor amiga por motivarme cada vez que lo necesitaba,

y a mi pareja por acompañarme en estos 6 años de vida universitaria.

También a mis amigos y compañeros que pronto serán futuros colegas.

Y finalmente a los profesores que me entregaron

sus conocimientos y me formaron para ser una buena profesional.

Resumen Ejecutivo

La calidad del agua para riego es un tópico que en chile es regulado por la Norma Chilena 1.333, la cual data del año 1987, por lo tanto, ha pasado un largo tiempo y la normativa no se ha actualizado, y tampoco han salido nuevas normativas asociadas al uso del agua para riego. Y debido al contexto mundial de escasez hídrica, que ha afectado a la zona centro de nuestro país, es que han cambiado las condiciones hídricas y se ha visto afectada la disponibilidad del recurso. Sumado a la mayor demanda de agua en la región Metropolitana debido a la expansión y desarrollo urbano, es que, se deben actualizar las normativas asociadas al uso del recurso hídrico. Y se deben desarrollar nuevas estrategias para aliviar la demanda y así no limitar el recurso, tales como, el aumento de la eficiencia en el uso de aguas, las tecnologías de desalinización y de reutilización de aguas servidas.

Esta memoria tiene como principal objetivo entregar una propuesta para la reutilización de agua servida tratada en riego de cultivos en la región Metropolitana. Tomando en consideración la calidad actual de las aguas de la cuenca del río Maipo, y también considerando las normativas vigentes de calidad de agua para riego.

El principal río que abastece a la región Metropolitana es la cuenca del río Maipo, el cual se divide en cinco subcuencas, las que se distribuyen por todo el territorio.

Para la realización de esta memoria en primer lugar, se realiza una recopilación de antecedentes, para establecer las bases del estudio, asociadas a la demanda de agua para riego en la región Metropolitana, y los principales cultivos plantados. Posteriormente, se investigan las normativas chilenas vigentes asociadas al riego y a la calidad del agua en la zona, con la finalidad de que sirvan como referencia para el análisis de los datos de monitoreo. Una vez establecido este contexto general, se continúa con el desarrollo del análisis para establecer como es la calidad del agua actualmente en la zona. Para esto se evalúan datos de estaciones de monitoreo en la cuenca del río Maipo, los cuales son medidos por la Dirección General de Aguas, y la empresa sanitaria Aguas Andinas. Estos datos son comparados con los límites establecidos en la Norma Chilena 1.333, y se obtiene que los parámetros que se encuentran en mayor concentración y por ende excediendo el límite en el agua superficial de la cuenca del río Maipo son: cloruros, sulfatos y conductividad eléctrica. Del mismo modo se realiza el análisis de la calidad del agua servida tratada que sale de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Mapocho-Trebal; y se obtiene que

los niveles de los tres parámetros críticos también son altos, pero específicamente la conductividad eléctrica en el agua servida trata es mayor a la del agua superficial de la cuenca.

Continuando con el desarrollo del estudio, se realizó una revisión de estándares internacionales sobre calidad de agua para riego y sobre la reutilización de agua servida tratada en riego, con la finalidad de tener variadas referencias al momento de plantear los límites de la normativa. Los países que se usaron de referencia fueron los siguientes, de Latinoamérica: México, Ecuador y Perú, y del resto del mundo se tomaron en consideración las normativas de: Canadá, Estados Unidos, Australia, y también se consideraron los estándares recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Y con respecto a los estándares internacionales existentes para el rehúso de agua servida tratada se tomaron como referencia los estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), y por el Reglamento de la Unión Europea.

Posteriormente, se analizan alternativas para mejorar la calidad del agua de la cuenca del río Maipo, es decir, se buscaron tratamientos que sirvieran para reducir la concentración de sales en el agua, y se estableció que el tratamiento más conveniente para el caso es la Osmosis Inversa.

Y, por último, se realiza un diseño de una planta de Osmosis Inversa mediante una simulación en el software IMS Design Hydranautics. Donde se utilizó un caudal de diseño de 3 m^3/s, el cual corresponde a una parte del caudal que sale da la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Mapocho-Trebal, y que pretende ser entregado por la empresa sanitaria Aguas Andinas a los canalistas de la primera sección del río Maipo para ser usado en riego de cultivos.

Con todas estas etapas del estudio desarrolladas se logra entregar como resultado una propuesta de reutilización de agua servida tratada para riego de cultivos en la región Metropolitana.

Tabla de contenido

Resumen Ejecutivo 3

Índice de Tablas 8

Índice de Figuras 10

Capítulo 1: Introducción y Objetivos 12

1. Introducción 12

1.2 Objetivos 14

Objetivo General 14

Objetivos Específicos 14

Capítulo 2: Antecedentes y Recopilación de Información 15

2.1 Antecedentes 15

2.2 Cuencas de la región Metropolitana 15

2.3 Demanda Hídrica en la región Metropolitana 16

2.4 Cultivos principales de la región Metropolitana 19

i. Frutales 19

ii. Hortalizas 20

iii. Cereales y otros 21

iv. Vitivinícolas 21

Capítulo 3: Marco Regulatorio Vigente 22

3. Normativa Chilena 22

3.1 Norma Chilena 1333: 22

3.2 Norma secundaria de calidad ambiental 24

Capítulo 4: Revisión de la Calidad del agua superficial en la cuenca del río Maipo 25

4.1 Calidad del agua superficial en la cuenca del río Maipo 25

4.2 Parámetros críticos en el agua para riego de la zona 26

4.2.1 Calcio 26

4.2.2 Cloruro 27

4.2.3 Sulfatos 29

4.2.4 Salinidad 29

Capítulo 5: Metodología 32

5.1 Análisis de datos de estaciones de monitoreo en la cuenca hidrográfica del río Maipo 32

- Cloruros 45
- Sulfato 45
- Conductividad: 46

5.2 Calidad del Agua Servida Tratada en la región Metropolitana 47

- Cloruros 48
- Sulfato: 49
- Conductividad: 50

Capítulo 6: Análisis de estándares internacionales 51

6.1 Análisis de estándares internacionales para calidad de agua de riego. 51

6.1.1 Latino américa 51

6.1.2 Otros países 52

6.2 Estándares internacionales de rehúso de agua servida tratada para riego de cultivos.... 56

6.2.1 Reglamento Europeo relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del AST. 57

6.2.2 Directrices para la reutilización del agua según la Agencia de Protección Ambiental EPA, Estados Unidos. 59

6.3 Métodos de riego para utilizar Agua Servida Tratada 61

Capítulo 7: Mejoramiento de la calidad de agua de riego en la cuenca del río Maipo 63

7.1 Alternativas de tratamientos para mejorar la calidad del agua para riego de cultivos... 63

7.1.1 Tecnologías de Membrana 63

7.1.2 Tecnologías Térmicas 64

7.2 Diseño de una Planta de Tratamiento de Osmosis Inversa para reutilizar Agua Servida Tratada para riego de cultivos en la Región Metropolitana. 65

7.2.1 Simulación del diseño de la planta de Osmosis Inversa en el software IMS Design Hydranautics. 66

7.2.2 Ubicación de la planta de Osmosis Inversa 71

7.2.3 Análisis de Costos de la Planta de Osmosis Inversa. 72

Capítulo 8: Resultados, Conclusiones y Recomendaciones 75

8.1 Resultados 75

8.2 Conclusiones 78

8.3 Recomendaciones 80

Referencias 81

Anexos 83

1. Anexo 1 83
2. Anexo 2 83
3. Anexo 3 84
4. Anexo 4: 85
5. Anexo 5: Hojas de datos resultados simulación en software IMS Design Hydranautics, . 87
6. Anexo 6: Especificaciones de membranas seleccionadas 89
7. Anexo 7: Cálculo de potencia de las bombas del proceso de Osmosis Inversa. 90
8. Anexo 8: Flujo de caja planta de Osmosis Inversa. 90

Índice de Tablas

Tabla 1: Demanda de agua potable urbana para la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017.... 17
Tabla 2: Demanda agua de riego en uso agrícola de las subcuencas de la región Metropolitana. Fuente: DGA 2017 18
Tabla 3: Estimación demanda de riego en Uso Agrícola actual por grupo de cultivo. Fuente: DGA 2017..... 18
Tabla 4: Superficie utilizada por rubro silvoagropecuario en la región Metropolitana, Fuente Odepa, 2018 19
Tabla 5: Superficie frutícola plantada en la región Metropolitana. Fuente Odepa 2018. 20
Tabla 6: Superficie hortícola por especie en la región Metropolitana, Fuente Odepa 2018..... 20
Tabla 7: Superficie regional de cultivos anuales en hectáreas, Fuente: Odepa 2018 21
Tabla 8:Superficie regional vitivinícola por variedad (ha). Fuente: Odepa 2018..... 22
Tabla 9: Concentraciones máximas de parámetros químicos para el agua de riego. Fuente: NCh 1333..... 23
Tabla 10: Conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales establecidos en la NCh 1333..... 24
Tabla 11: Concentración de cloruros en las aguas de riego por aspersión causante de daños foliares (mg/l). Fuente: Flores, 2020..... 28
Tabla 12: Concentraciones máximas en la solución del suelo, a partir de las cuales aparecen síntomas de toxicidad por cloruro. Fuente: (Texas Agricultural Extension Service, 1996) 28
Tabla 13: Relación entre Sulfato y Conductividad Eléctrica. Fuente: SAG..... 29
Tabla 14: Clasificación de aguas según su conductividad. Fuente: (van der Aa, 2003)..... 30
Tabla 15: Tolerancia de cultivos a la conductividad eléctrica en e agua de riego. Fuente: (Grattan, 2018) 31
Tabla 16: Comparación Normativas para Calidad de Agua de Riego en países de Latinoamérica. Fuente:..... 51
Tabla 17: Comparación Normativas para Calidad de Agua de Riego en países distintos países. Fuente: (IRMA Standar, 2018). 52
Tabla 18: Clasificación de agua de riego acorde a su Conductividad Eléctrica. Fuente: (Philip Myburgh, 2018) 54
Tabla 19: Problema potencial en el agua de riego por la presencia de distintos parámetros. Fuente: (Agriculture and Agri-Food Canada, 2000)..... 56

Tabla 20: Clases de calidad de las aguas regeneradas y uso agrícola y método de riego permitidos. Fuente: Reglamento Unión Europea. 57
Tabla 21: Requisitos especiales de calidad de las aguas regeneradas para el riego agrícola. Fuente: Reglamento Unión Europea. 59
Tabla 22:Categorías de reúso de agua y sus aplicaciones más comunes 60
Tabla 23: Concentraciones máximas permisibles de metales para aguas residuales tratadas de uso agrícola. Fuente: EPA, 2018 60
Tabla 24: Guías de la EPA para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola. 61
Tabla 25: Factores influyentes en el método de riego con agua regenerada. Fuente: FAO, 2013 62
Tabla 26: Concentración de sales en agua de alimentación 67
Tabla 27: Características requeridas para el diseño 67
Tabla 28: Resultados iniciales y finales de parámetros críticos. 69
Tabla 29: Número de equipos necesarios para la planta de Osmosis inversa. 71
Tabla 30: Capex de la planta de Osmosis Inversa. 73
Tabla 31: Costos operacionales. 74
Tabla 32: Costo total del agua producida 74
Tabla 33: Límites para concentraciones de Metales en la Propuesta de Normativa 76
Tabla 34: Límites propuestos para concentraciones de iones críticos para el agua de riego de cultivos. 76
Tabla 35: Límites propuestos para Conductividad eléctrica y SDT en agua de riego de cultivos. 77
Tabla 36: Calidad sugerida de parámetros biológicos para el rehúso de agua depurada. 77
Tabla 37: Niveles de calidad ambiental según DS 53 83
Tabla 38: Coordenadas de estaciones de monitoreo del río Maipo. 83
Tabla 39: Comparación entre AST y NCh 1333 86
Tabla 40: Características membranas seleccionadas 89
Tabla 41: Precios asociados al flujo de caja. 90
Tabla 42: Costos de Inversión 91
Tabla 43: Costos Operacionales 91
Tabla 44: Extracto de Flujo de caja 92

Índice de Figuras

Figura 1: Distribución de demanda consuntiva de agua por sector año 2015. Fuente: DGA 2017 13

Figura 2: División de subcuencas hidrográficas re la región Metropolitana. Fuente: Fundación Plantae..... 16

Figura 3: Demanda hídrica de agua potable urbana, cuencas región Metropolitana. Fuente: DGA 2017..... 17

Figura 4: Concentración de Cloruros en dos estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Alto 33

Figura 5: Concentración de Sulfato en dos estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Alto 34

Figura 6: Conductividad eléctrica en dos estaciones de monitoreo de la subcuenca Maipo Alto 35

Figura 7: Concentración de Cloruro en tres estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Medio 36

Figura 8: Concentración de Sulfato en tres estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Medio 36

Figura 9: Conductividad eléctrica del agua en tres estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Medio..... 37

Figura 10: Concentración de cloruro en el agua de tres estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Bajo. 38

Figura 11: Concentración de sulfato en el agua de tres estaciones de monitoreo de la subcuenca río Maipo Bajo..... 39

Figura 12: Conductividad eléctrica del agua en dos estacione de monitoreo de la subcuenca río Mapocho Alto. 40

Figura 13: Concentración de cloruro presente en dos estaciones de monitoreo de la subcuenca río Mapocho Alto. 41

Figura 14: Concentración de sulfato en dos estaciones de monitoreo de la subcuenca río Mapocho Alto. 41

Figura 15: Conductividad eléctrica del agua en Subcuenca río Mapocho Alto..... 42

Figura 16: Concentración de cloruro en agua de la subcuenca río Mapocho Bajo..... 43
Figura 17: Concentración de Sulfato en agua de la subcuenca río Mapocho Bajo..... 43
Figura 18: Conductividad eléctrica en agua de la subcuenca río Mapocho Bajo 44
Figura 19: Gráfico comparativo de Cloruro presente en agua de tres estaciones de la cuenca del Maipo. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022..... 45
Figura 20: Concentración de Sulfato en agua de tres estaciones de monitoreo de la cuenca del Maipo. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022..... 45
Figura 21: Conductividad eléctrica del agua en tres estaciones de monitoreo de la cuenca del Maipo. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022..... 46
Figura 22: Gráfico comparativo para cloruro en agua servida tratada. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022. 48
Figura 23: Gráfico comparativo para sulfato en agua servida tratada. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022. 49
Figura 24: Conductividad eléctrica del agua servida tratada. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022. 50
Figura 25: Diagrama de flujo simulación planta de osmosis inversa en IMS Design Hydranautics 69
Figura 26: Imagen Google Maps, ubicación estimada planta de Osmosis Inversa 71
Figura 27: Imagen Google earth terreno de ubicación planta de osmosis inversa..... 72
Figura 28: Distribución de gastos operacionales. Fuente: (Minería Chilena, 2016) 73
Figura 29: Gráfico de cajas para Arsénico total (mg/l), para las aguas superficiales de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017. 84
Figura 30: Gráfico de cajas para Cobre total (mg/l), para las aguas superficiales de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017. 85
Figura 31: gráfico de cajas para Cromo total (mg/l), para las aguas superficiales de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017. 85
Figura 32: Cálculo potencia específica de bombeo 90

Capítulo 1: Introducción y Objetivos

1. Introducción

Durante las últimas décadas se ha observado un gran cambio en la realidad hídrica de nuestro país, debido principalmente al cambio climático que afecta a todo el mundo y a sus problemáticas asociadas, tales como, el déficit de precipitaciones, periodos de temperaturas extremas, el deshielo de glaciares, entre otros. Las consecuencias de estas problemáticas han afectado fuertemente a la zona norte y centro del país, donde se ha presenciado en los últimos años un fenómeno que ha sido denominado por expertos como una "Megasequía", la cual se ha caracterizado porque la disminución de la precipitación ha sido muy acentuada en una secuencia ininterrumpida de años secos desde 2010 hasta la actualidad, con déficits anuales de precipitaciones que oscilan entre el 25 y el 45%, lo que ha provocado la disminución del manto de nieve andino, la disminución de los volúmenes de los embalses y de los niveles de agua subterránea en toda la zona central de Chile. (Garreaud et al., 2020).

Otro punto importante es la creciente demanda por agua debido al aumento de la población y de la producción, incluida la demanda por alimentos, que, combinada con las problemáticas mencionadas anteriormente han llevado a que el agua sea uno de los principales desafíos actuales en nuestro país y en el mundo.

Si bien esta situación afecta al uso de agua en todos sus sectores, es fundamental para la agricultura en Chile, ya que, según el último censo Nacional Agropecuario y Forestal, el sector agropecuario es el mayor consumidor del recurso agua, con alrededor de un 73%, lo cual permite regar 902.158 hectáreas a nivel nacional.

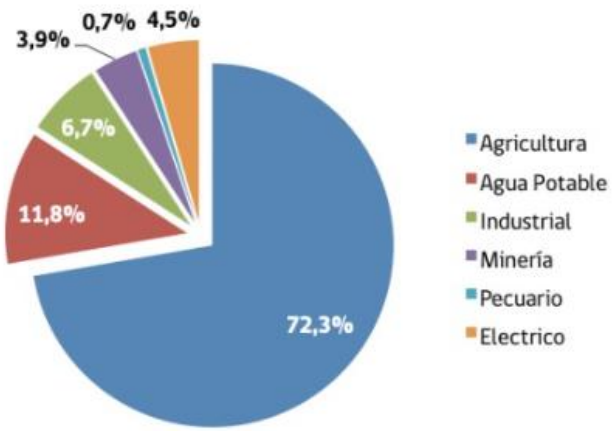


Figura 1: Distribución de demanda consuntiva de agua por sector año 2015. Fuente: DGA 2017

La agricultura de la región Metropolitana es una región por relevancia agrícola para el país, tiene una demanda de 1.030 millones de m^3, de lo que aportarían las aguas superficiales unos 910 millones, los 120 millones faltantes serían aportados por las aguas subterráneas. (DGA, 2017)

Al tener en cuenta que el porcentaje de uso de agua para la agricultura es tan alto con respecto a los otros usos, es posible intuir que la eficiencia en el uso del agua para el riego de los cultivos debe estar asociada a prácticas de manejo que permitan reducir la demanda y, con ello, la presión sobre la oferta de agua de recursos superficiales o subterráneos, lo cual es válido en especial en cuencas desbalanceadas entre la oferta y demanda.

Esta situación se ha visto reflejada en la región Metropolitana, la cual tiene dos principales fuentes de las cuales se extrae el agua para potabilizar; la cuenca del río Maipo y la cuenca del río Mapocho; ambas han disminuido su caudal en los últimos años, y sumando que el crecimiento de la población ha ido en aumento, se ha provocado en la zona un desbalance entre la oferta y la demanda. Es por esto que la principal empresa sanitaria que provee de agua potable a la población en la región Metropolitana (Aguas Andinas), es consciente de esta problemática y ha estado en busca de posibles medidas que se puedan tomar para seguir suministrando agua potable de manera óptima a toda la población, y no concurrir a medidas drásticas como posibles racionamientos de agua.

Una opción que ha sido estudiada recientemente en varios países para abordar este problema es la utilización de agua servida tratada (AST), como agua de riego para cultivos, ya que, al reutilizarla ayudaría a disminuir el gran porcentaje de uso de agua en la agricultura y se lograría una

acumulación mayor neta de agua para consumo humano. Con el fin de lograr que el uso de agua sea más eficiente y circular, dándole un uso estratégico al agua servida tratada que sale de las plantas de tratamiento.

Para lograr que el rehúso de agua servida tratada sea efectivo, y funcione de manera adecuada sin tener problemas asociados a la contaminación, se debe contar con una normativa que regule la calidad del AST, tomando en consideración como afectan los parámetros fisicoquímicos y biológicos de esta agua a los cultivos principales de la zona. Es importante que esta normativa que regule la calidad del agua de riego sea especifica, ya que, a lo largo del país el agua tiene diferentes calidades asociadas a condiciones geográficas y a las distintas actividades que se desarrollan en el territorio.

1.2 Objetivos

Objetivo General

El objetivo general de este estudio es presentar una propuesta para la reutilización de agua servida tratada en riego de cultivos en la región Metropolitana, tomando en consideración la calidad actual de las aguas de la cuenca del río Maipo, y también considerando las normativas vigentes de calidad de agua para riego.

Objetivos Específicos

- Establecer cuáles son los principales cultivos de la zona y sus requerimientos.
- Buscar como se relaciona la calidad de las aguas utilizadas para riego en el sector agrícola en la región Metropolitana con los requerimientos según tipos de cultivos, considerando los parámetros críticos que se presentan en el agua de la zona.
- Conocer y establecer como es la calidad actual del agua con la que se riegan cultivos en la región Metropolitana.
- Establecer cuáles son los parámetros críticos de la calidad del agua servida tratada de la región Metropolitana y comparar con la calidad actual de riego de cultivos en la zona.
- Analizar estándares internacionales de calidad de agua para el riego de cultivos y estándares internacionales para el rehúso de agua servida tratada.
- Plantear alternativas para mejorar la calidad del agua para riego de cultivos, según los principales componentes que se establezcan previamente.2

Capítulo 2: Antecedentes y Recopilación de Información

2.1 Antecedentes

A continuación, se presentan los antecedentes referidos al uso de agua para riego de cultivos en la región Metropolitana. Primero, se señalan las cuencas y subcuencas que se ubican en la región, con el fin de conocer el aspecto geográfico; luego se especifican las demandas de recurso hídrico en la región, en particular, se presenta la demanda de agua potable urbana, y la demanda de agua para riego según la subcuenca y según los tipos de cultivos. Posteriormente, se presentan en detalle los principales tipos de cultivos plantados en la región, especificando la cantidad de hectáreas planteadas para cada especie. Después, se presenta la normativa chilena vigente para calidad de agua de riego, donde se especifican los límites para los parámetros físicos, químicos y biológicos.

2.2 Cuencas de la región Metropolitana

La Cuenca del Río Maipo, ubicada en la región Metropolitana está dividida en las siguientes cinco subcuencas:

i. Río Maipo Alto: corresponde a la cuenca alta del río Maipo desde su nacimiento hasta la junta con el río Colorado. En su trayecto, el río fluye en dirección norponiente y sus principales afluentes corresponden a los ríos Volcán y El Yeso.
ii. Río Mapocho Alto: corresponde a la cuenca alta del río Mapocho, considerando su cierre aguas abajo de la junta con el estero Arrayán, y considerando además la cuenca del estero Las Gualtatas. El río Mapocho fluye principalmente en dirección poniente, recibiendo los aportes del río San Francisco y el estero Arrayán, que fluyen en dirección sur-poniente.
iii. Mapocho Bajo: corresponde a la cuenca aportante al río Mapocho desde la junta con el estero Arrayán hasta su junta con el río Maipo. En su recorrido, el río fluye principalmente en dirección poniente hasta Pudahuel, donde orienta su flujo en dirección sur y recibe el aporte del estero Colina. Luego, a la altura de Padre Hurtado, el río toma una dirección principalmente sur-poniente hasta desembocar en el río Maipo.
iv. Río Maipo Medio: corresponde a la cuenca aportante al río Maipo entre su junta con el río Colorado y su junta con el río Mapocho. Su trayecto es principalmente en dirección sur-poniente, recibiendo los aportes del río Clarillo y el río Angostura, para luego cambiar su dirección hacia el nor-poniente.

v. Río Maipo Bajo: corresponde a la cuenca aportante al río Maipo entre su junta con el río Mapocho hasta la desembocadura en el océano Pacífico. El principal aporte en este trayecto corresponde al estero Puangue. El río Maipo en este tramo fluye inicialmente en dirección poniente, para luego finalizar su recorrido en dirección nor-poniente.
(Molina, 2014).

En la siguiente figura se puede apreciar la distribución geográfica de estas subcuencas.

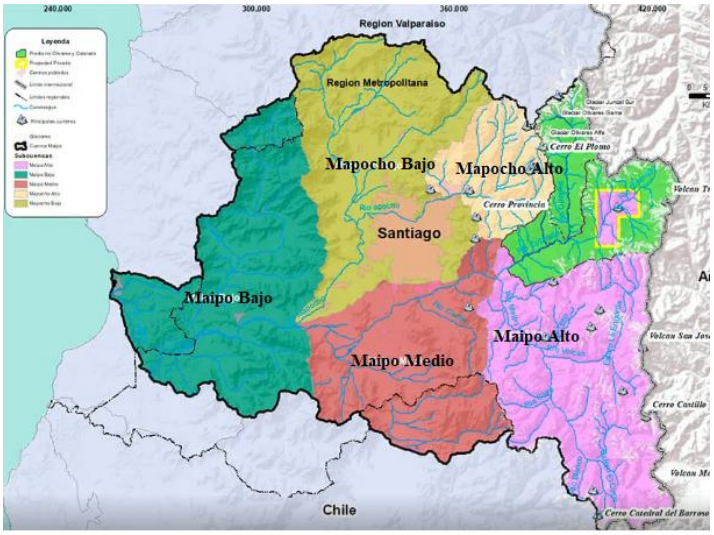


Figura 2: División de subcuencas hidrográficas re la región Metropolitana. Fuente: Fundación Plantae

2.3 Demanda Hídrica en la región Metropolitana

En primer lugar, con respecto a la demanda de agua potable; en la región existen 51 localidades urbanas que son abastecidas con agua potable a través de las empresas Sanitarias: Aguas Andinas, Aguas Cordillera, Aguas Manquehue, Aguas San Pedro, Aguas Chacabuco, Aguas Lampa, Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA), las cuales abastecen a un total de clientes (residenciales, industriales, comerciales) que asciende a 2.030.492 en el año 2015. (Dirección General de Aguas, 2017)

A continuación, se presenta una tabla con la demanda total de agua potable urbana para el año 2015, para la cuenta del río Maipo. Y continuamente se muestra un gráfico sobre la demanda de agua potable, comparado con la demanda hídrica de producción de agua potable.

Tabla 1: Demanda de agua potable urbana para la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017

CÓDIGO CUENCA	CUENCAS XIII REGIÓN METROPOLITANA	DDA HÍDRICA CONSUMO AGUA POTABLE ACTUAL (2015)			DDA HÍDRICA PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE ACTUAL (2015)		
		Mm³/año	m³/s	l/s	Mm³/año	m³/s	l/s
057	Rio Maipo	659.893	20,93	20.925,1	958.243	30,39	30.385,7
TOTAL DDA AGUAS CONTINENTALES PARA AGUA POTABLE IX REGIÓN		659.893	20,93	20.925,1	958.243	30,39	30.385,7

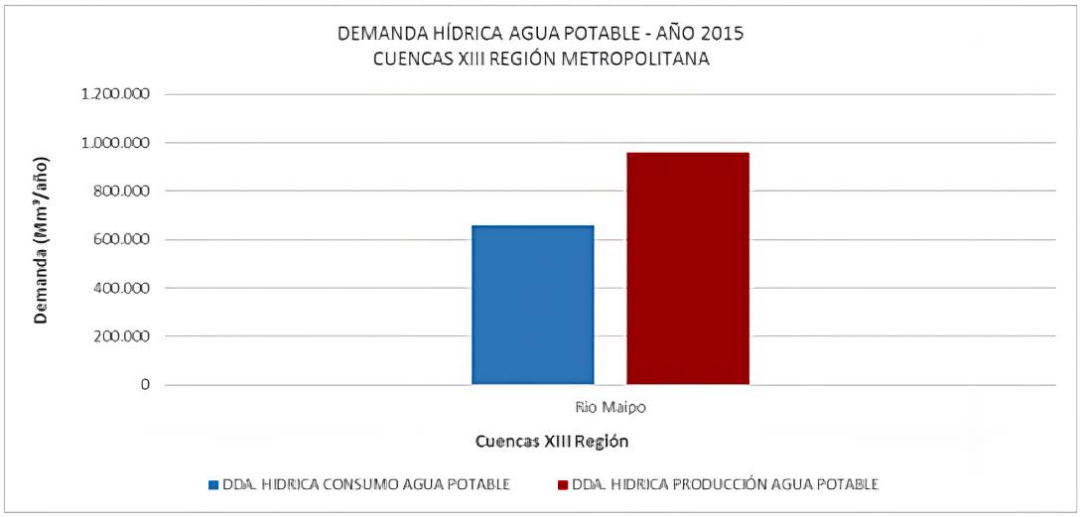


Figura 3: Demanda hídrica de agua potable urbana, cuencas región Metropolitana. Fuente: DGA 2017

Como se aprecia, a nivel regional, la demanda de Agua Potable Urbana total actual (año base 2015) es de 659.892.761 m3 /año (nivel consumo y/o clientes) y de 358.243.338 m^3/año (nivel producción y/o fuente).

En segundo lugar, se presenta la demanda de riego actual a nivel de subcuenca y región, asociada al sector agrícola. Esta demanda corresponde a los requerimientos evapotranspirativos de los cultivos bajo riego, incluyendo el aporte de precipitación y las eficiencias de los sistemas de riego. Los valores se indican en términos de volumen anual demandado (mm^3/año) y caudal medio anual (m^3/s y l/s).

Tabla 2: Demanda agua de riego en uso agrícola de las subcuencas de la región Metropolitana. Fuente: DGA 2017

CÓDIGO SUBCUENCA	SUBCUENCAS XIII REGIÓN METROPOLITANA	DDA RIEGO ACTUAL (2015)		
		Mm³/año	m³/s	l/s
0570	Rio Maipo Alto	6.628,71	0,210	210,20
0571	Rio Maipo Medio	463.656,43	14,702	14.702,45
0572	R. Mapocho Alto	594,75	0,019	18,86
0573	Mapocho Bajo	335.173,49	10,628	10.628,28
0574	Rio Maipo Bajo (Entre Rio Mapocho y Desembocadura)	420.667,74	13,339	13.339,29
0580	Estero Yali	43.103,26	1,367	1.366,80
TOTAL DDA RIEGO XIII REGIÓN		**1.269.824,39**	**40,266**	**40.265,87**

La demanda estimada total de agua de riego en uso agrícola fue de 1.269.824,4 mm^3/año, para el año 2015. (Dirección General de Aguas, 2017). Se puede apreciar también, que la subcuenca Río Maipo Medio es la que más demanda agua de riego en uso agrícola, seguido por la subcuenca Río Maipo Bajo.

También se presenta el desglose para los grupos de cultivo: cultivos y forrajeras anuales, forrajeras permanentes, hortalizas, flores y semilleros, viñas y parronales y frutales, las demandas de riego anuales por subcuenca.

Tabla 3: Estimación demanda de riego en Uso Agrícola actual por grupo de cultivo. Fuente: DGA 2017

CÓDIGO SUBCUENCA	SUBCUENCAS XIII REGIÓN METROPOLITANA	CULT. Y FORRAJ. ANUALES	FORRAJ. PERMANENTES	HORTALIZ., FLOR. Y SEMILL.	VIÑAS Y PARRONALES	FRUTALES
		Mm³/año				
0570	Rio Maipo Alto	252	3.953	101	26	2.297
0571	Rio Maipo Medio	64.669	47.548	26.915	80.124	244.400
0572	R. Mapocho Alto	4	554	24	4	10
0573	Mapocho Bajo	35.190	98.235	57.127	17.160	127.463
0574	Rio Maipo Bajo (Entre Rio Mapocho y Desembocadura)	107.276	79.477	32.313	40.954	160.648
0580	Estero Yali	4.650	1.400	569	8.905	27.580
TOTAL DDA RIEGO XIII REGIÓN		**212.040**	**231.167**	**117.049**	**147.172**	**562.397**

En particular, se observa de la tabla anterior que los cultivos frutales son el grupo de cultivos que más agua demanda, con un total de 562.397 mm^3/año. Lo que es concordante con el total de hectáreas plantadas para este rubro en la región. Y también se observa que los frutales de la subcuenca Río Maipo Medio son los que presentan mayor demanda para agua de riego, con un total de 244.400 mm^3/año.

2.4 Cultivos principales de la región Metropolitana

Según la información extraída del Censo Agropecuario y Forestal de 2007, la región Metropolitana de Santiago abarca el 3,4% de la superficie nacional dedicada a los distintos rubros silvoagropecuarios. Donde los principales usos corresponden a frutales (35,7% del total), seguidos por hortalizas (16,9%), plantas forrajeras (14,3%), cereales (10,7%) y viñas y parronales (8,2%). (Yáñez, 2018)

A continuación, se presenta una tabla con los principales rubros silvoagropecuarios que contiene la superficie de la región Metropolitana, según la cantidad de hectáreas plantadas, y su respectivo porcentaje cultivado en un alcance regional y nacional.

Tabla 4: Superficie utilizada por rubro silvoagropecuario en la región Metropolitana, Fuente Odepa, 2018

Rubro	Región (ha)	Cultivo/Región	País (ha)	Región/País
Frutales	53.551,9	35,7%	310.046,5	17,3%
Hortalizas	25.416,9	16,9%	95.953,7	26,5%
Forrajeras	21.491,2	14,3%	513.190,8	4,2%
Cereales	16.018,1	10,7%	480.602,6	3,3%
Viñas y parronales	12.326,3	8,2%	130.440,8	9,4%
Plantaciones forestales	9.172,3	6,1%	2.706.038,8	0,3%
Leguminosas y tubérculos	5.721,1	3,8%	71.389,6	8,0%
Semilleros y almácigos	4.650,1	3,1%	42.511,1	10,9%
Viveros	834,5	0,6%	3.103,1	26,9%
Cultivos industriales	396,8	0,3%	69.998,0	0,6%
Huertos caseros	244,9	0,2%	16.138,2	1,5%
Flores	167,3	0,1%	2.176,4	7,7%
Total	**149.991,3**	**100,0%**	**4.441.589,7**	**3,4%**

Los cinco primeros usos de la tabla concentran el 85,8% de los suelos cultivados de la región. Entonces, a continuación, se presentan en detalle los principales tipos de cultivos de estos rubros, para conocer con mayor especificidad las plantaciones de la región.

i. **Frutales**: se presentan las principales especies frutales plantadas en la Región Metropolitana. Cabe mencionar que el 33,8% de la superficie frutal de la región se encuentra en la provincia del Maipo. Otro 32,2% de la superficie frutal regional se ubica en la provincia de Melipilla, y luego le siguen la provincia de Talagante (12,8%) y la provincia de Chacabuco (10,6%).

Tabla 5: Superficie frutícola plantada en la región Metropolitana. Fuente Odepa 2018.

Especie	Región (ha)	Especie/Región	País (ha)	Región/País
Uva de mesa	12.453,1	23,3%	62.462,6	19,9%
Palto	7.214,3	13,5%	39.887,5	18,1%
Nogal	6.161,8	11,5%	14.719,6	41,9%
Ciruelo europeo	3.722,9	7,0%	12.169,3	30,6%
Almendro	3.398,7	6,3%	7.892,1	43,1%
Limonero	3.070,4	5,7%	7.974,0	38,5%
Naranjo	2.395,5	4,5%	9.290,6	25,8%
Ciruelo japonés	2.376,4	4,4%	6.878,4	34,5%
Duraznero consumo fresco	1.892,9	3,5%	6.496,0	29,1%
Damasco	638,8	1,2%	2.106,9	30,3%
Frutilla	464,5	0,9%	1.887,0	24,6%
Membrillo	103,2	0,2%	434,6	23,7%
Otros	9.659,4	18,0%	137.848,0	7,0%
Total	**53.551,9**	**100,0%**	**310.046,5**	**17,3%**

Las especies resaltadas de color amarillo, nogal, almendro y limonero se destacan por su importancia relativa a nivel país, ya que, aportan un gran porcentaje del cultivo de la especie a nivel nacional.

ii. **Hortalizas**: la superficie plantada con hortalizas en la región Metropolitana representa el 26,5% de superficie de hortalizas a nivel nacional. Esto da cuenta de la importancia de la región, con respecto al total nacional en este tipo de cultivos. El detalle de las especies más importantes se puede observar en la tabla siguiente de superficie hortícola regional por especie.

Tabla 6: Superficie hortícola por especie en la región Metropolitana, Fuente Odepa 2018

Especie	Región (ha)	Especie/Región	País(ha)	Región/País
Choclo	3.324,3	13,1%	10.591,6	31,4%
Lechuga	3.250,5	12,8%	7.039,6	46,2%
Zapallo temprano y de guarda	2.471,2	9,7%	5.229,5	47,3%
Cebolla de guarda	1.493,1	5,9%	4.132,7	36,1%
Tomate consumo fresco	1.086,8	4,3%	6.364,4	17,1%
Cebolla temprana	1.071,6	4,2%	2.026,9	52,9%
Zanahoria	1.031,5	4,1%	3.988,4	25,9%
Poroto granado	938,9	3,7%	2.815,9	33,3%
Poroto verde	861,0	3,4%	2.956,7	29,1%
Haba	836,7	3,3%	1.978,1	42,3%
Coliflor	814,6	3,2%	1.369,4	59,5%
Alcachofa	763,0	3,0%	5.153,1	14,8%
Melón	721,2	2,8%	3.115,7	23,1%
Betarraga	665,7	2,6%	1.202,2	55,4%
Espinaca	664,1	2,6%	816,2	81,4%
Brócoli	517,5	2,0%	822,8	62,9%
Otros	4.905,1	19,3%	36.350,6	13,5%
Total	**25.416,9**	**100,0%**	**95.953,7**	**26,5%**

De la tabla anterior se observa que la región Metropolitana aporta al país porcentajes mayores al 50% para los cultivos: cebolla, coliflor, betarraga, espinaca y brócoli. Y el resto de las especies también aporta un alto porcentaje al total del país, por lo tanto, la región se caracteriza por ser una zona de cultivo de hortalizas. Por otra parte, se observa, que las especies: choclo, lechuga, zapallo, cebolla y tomate son las que abarcan la mayor cantidad de hectáreas plantadas.

iii. **Cereales y otros**:

Tabla 7: Superficie regional de cultivos anuales en hectáreas, Fuente: Odepa 2018

Especie	Región 2017/2018	País 2017/2018	Región/País
Maíz Consumo	5.900	81.598	7,2%
Papa	3.197	41.268	7,7%
Trigo Candeal	2.374	28.178	8,4%
Trigo Harinero	1.061	208.237	0,5%
Maíz Semilla	968	7.460	13,0%
Maravilla	898	6.444	13,9%
Avena	295	107.528	0,3%
Poroto	202	9.723	2,1%
Otros		155.580	
Total País	14.895	696.341	2,1%

Al observar la tabla anterior se puede concluir que la región Metropolitana no se caracteriza dentro del país por este tipo de cultivos, ya que, la tabla muestra que los porcentajes respectivos son bajos en referencia al total del país.

iv. **Vitivinícolas**: a continuación, se muestra una tabla con la superficie ocupada por el rubro vitivinícola en la región Metropolitana, en la cual se puede apreciar las hectáreas plantadas por viñedos de diferentes variedades.

Tabla 8:Superficie regional vitivinícola por variedad (ha). Fuente: Odepa 2018

Variedades	Región	País	Región/País
Total País	12.908	137.375	9,4%
Variedades tintas			
Cabernet Sauvignon - Cabernet	6.719	42.409	15,8%
Syrah - Sirah, Shiraz	1.179	7.994	14,7%
Merlot	1.137	12.057	9,4%
Otras	2.291	38.810	5,9%
Total	11.325	101.270	11,2%
Variedades blancas			
Chardonnay - Pinot Chardonnay	756	11.435	6,6%
Sauvignon Blanc	702	14.999	4,7%
Viognier	24	839	2,9%
Otras	101	8.832	1,1%
Total	1.583	36.105	4,4%

Es preciso señalar sobre la tabla anterior, que la región no se caracteriza como una de las principales regiones vitivinícolas del país, ya que, solo aporta un 9,4% del total nacional, pero sí, en conjunto todas las variedades suman una cantidad de hectáreas importantes a nivel regional.

Capítulo 3: Marco Regulatorio Vigente

3. Normativa Chilena

En esta sección se presentan las normativas vigentes actualmente en el territorio nacional, asociadas a la calidad de agua de riego.

3.1 Norma Chilena 1333:

Actualmente en Chile está vigente desde el año 1978 la Norma Chilena 1333 sobre Requisitos de calidad del agua para diferentes usos, la cual fue modificada en el año 1987 y contempla los requerimientos físicos, químicos y biológicos para el agua de riego. La siguiente tabla contiene los límites máximos de concentraciones de los elementos químicos en el agua para riego normados en la misma, además del valor límite definido con respecto al porcentaje relativo de sodio presente en el agua (35%), que se determina a partir de la razón entre la concentración de sodio y los otros cationes presentes. (Instituto Nacional de Normalización , 1987)

Tabla 9: Concentraciones máximas de parámetros químicos para el agua de riego. Fuente: NCh 1333

Elemento	Unidad	Límite Máximo
Aluminio (Al)	mg/l	5,00
Arsénico (As)	mg/l	0,10
Bario (Ba)	mg/l	4,00
Berilio (Be)	mg/l	0,10
Boro (B)	mg/l	0,75
Cadmio (Cd)	mg/l	0,010
Cianuro (CN^-)	mg/l	0,20
Cloruro (Cl^-)	mg/l	200,00
Cobalto (Co)	mg/l	0,050
Cobre (Cu)	mg/l	0,20
Cromo (Cr)	mg/l	0,10
Fluoruro (F^-)	mg/l	1,00
Hierro (Fe)	mg/l	5,00
Litio (Li)	mg/l	2,50
Litio (cítricos) (Li)	mg/l	0,075
Manganeso (Mn)	mg/l	0,20
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,010
Níquel (Ni)	mg/l	0,20
Plata (Ag)	mg/l	0,20
Plomo (Pb)	mg/l	5,00
Selenio (Se)	mg/l	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (SO_4^-)	mg/l	250,00
Vanadio (V)	mg/l	0,10
Zinc (Zn)	mg/l	2,00

Por otra parte, se presentan las categorías según la salinidad y su efecto en las plantas (clasificada por su conductividad especifica o la cantidad de solidos disueltos totales (SDT),

Tabla 10: Conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales establecidos en la NCh 1333.

Clasificación	**Conductividad específica, c, µmhos/cm a 25ºC**	**Sólidos disueltos totales, s, mg/l a 105ºC**
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1500$	$500 < s \leq 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita métodos de manejo cuidadosos	$1500 < c \leq 3000$	$1000 < s \leq 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos.	$3000 < c \leq 7500$	$2000 < s \leq 5000$

La norma presenta también requisitos bacteriológicos, donde se considera que el contenido de coliformes fecales en aguas de riego destinadas al cultivo de verduras y frutas que se desarrollen a ras de suelo y que habitualmente se consumen en estado crudo, debe ser menor o igual a 1000 coliformes fecales / 100 ml.

3.2 Norma secundaria de calidad ambiental

También la cuenca del río Maipo cuenta con un Decreto Supremo 53/2014, el cual establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Maipo. Esta norma cuenta con 11 áreas de vigilancia, en las cuales se deben considerar límites específicos. Los parámetros considerados en la red de control son: oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, cloruro, sulfato, demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrato, ortofosfato, plomo disuelto, níquel disuelto, zinc disuelto y cromo total. Cada uno

de estos parámetros tiene un límite asociado a cada zona de vigilancia; en el **Anexo 2** se presenta la tabla de esta normativa.

Capítulo 4: Revisión de la Calidad del agua superficial en la cuenca del río Maipo

En la siguiente sección se presenta un análisis general de la calidad del agua superficial de la cuenca del río Maipo, donde se especifica la composición de los dos ríos principales de la cuenca (Maipo y Mapocho), según lo establecido por la Dirección General de Aguas.

4.1 Calidad del agua superficial en la cuenca del río Maipo

La calidad ambiental de los cuerpos de agua naturales se categoriza en cuanto a los riesgos que evita. De esta forma, se habla de calidad primaria al referirse a límites de concentración para evitar riesgos para la vida o salud de la población (recreación o contacto directo); mientras que se hace referencia a la calidad secundaria, al indicar los límites de concentración para la protección o conservación del medio ambiente o la naturaleza.

Los cuerpos de agua superficiales presentan problemas de calidad de agua de distinta índole dependiendo de las características naturales del territorio, de los usos específicos del agua y de las actividades productivas que puedan generar contaminación en el territorio. En Chile, el tipo de contaminación del agua varía según las macrozonas. En general, en la macrozona centro de Chile, la agricultura y la expansión urbana han generado contaminación, sobre todo la generada por nutrientes (fertilizantes) y contaminación difusa agroquímica de nitrógeno, en especial para la contaminación del agua subterránea con nitratos. (Stehr A et al., 2019)

Los productos químicos agrícolas son una fuente de contaminación en la zona (principalmente fertilizantes y pesticidas) y estos son difíciles de controlar debido a que los propios productos químicos pueden ser perjudiciales para el medio ambiente o la salud humana y con frecuencia no se evalúan antes de su liberación comercial. La escorrentía procedente de las tierras agrícolas ha sido implicada como causa de “zonas muertas” encontradas en aguas donde la eutrofización es especialmente severa.

Como se mencionó anteriormente, la cuenca del río Maipo se divide en cinco subcuencas, en las cuales se registran un total de 70 estaciones de medición de la DGA, de las cuales 53 son para el monitoreo de aguas superficiales y 17 para aguas subterráneas. A nivel general, la cuenca del río Maipo posee una composición en sus aguas que se mantiene en toda la cuenca y en todos los cauces. De este modo, las aguas del río Maipo y la zona baja del Mapocho poseen aguas de tipo **sulfatadas cálcica**, con una importante componente **clorurada** explicada principalmente por un efecto de estacionalidad. El caso del río Mapocho Alto destaca por una composición sulfatada cálcica que es mucho más notoria que la del río Maipo, es decir, la componente clorurada no es relevante. Este hecho cambia al recibir las aguas del río Maipo a través del canal San Carlos, el cual proporciona casi la totalidad de las aguas del río Mapocho en la parte alta de la subcuenca Mapocho Bajo. (Dirección General de Aguas, 2017). Por lo tanto, los parámetros sulfato, calcio y cloruro están presentes en mayor medida y se deben estudiar.

4.2 Parámetros críticos en el agua para riego de la zona

En la sección anterior se mencionó que los parámetros predominantes en el agua superficial de la cuenca del río Maipo son los iones: sulfatos (SO_4^-), cloruro (Cl^-) y calcio (Ca^+). Estos tres parámetros corresponden a sales disueltas, los cuales aportan a la salinidad total del agua, y la forma de cuantificar la salinidad total del agua es mediante el parámetro conductividad. A continuación, se exponen las problemáticas asociadas a cada uno de estos parámetros para el agua de riego, y también se especifica como la conductividad afecta a diferentes especies de cultivos.

4.2.1 Calcio

En la zona central de Chile se han realizado variados análisis de agua de riego que muestran niveles altos de calcio soluble en el agua. El calcio interactúa ante la presencia de otros elementos tales como carbonatos, bicarbonatos y fosfatos, los cuales al unirse al catión de calcio tienen la capacidad de formar sales insolubles. Y por este motivo se presenta un alto contenido de calcio, tanto en los análisis de suelo como de agua, sin embargo, la mayor fracción de éste se encontrará precipitado y no disponible para las plantas. (AMecological, 2018). El calcio y el magnesio son sustancias nutrientes imprescindibles para el desarrollo de nuestras plantas, sin embargo, un exceso o desequilibrio de estos nutrientes puede producir alteraciones, ya que, ambos están asociados a la dureza del agua, y cuando la dureza del agua es demasiado elevada, en el sistema de riego podrían producirse precipitaciones de sales, de calcio y de magnesio.

Con respecto a cómo afecta el calcio a las plantas, este es considerado como un nutriente, ya que, es muy importante para la planta en la mantención de la firmeza de la pared celular y los tejidos de la planta. Esta condición en la planta está estrechamente relacionada tanto con la resistencia mecánica de los frutos, como con la resistencia de los tejidos al ataque de patógenos. El calcio estabiliza la membrana celular al actuar como puente entre los grupos fosfato y carboxilo de los fosfolípidos y proteínas ubicados en la superficie de la membrana. Esta capacidad le permite disminuir el efecto generado por diferentes condiciones de estrés, como heladas, además de reducir la tasa respiratoria de los tejidos frutales y sus pérdidas asociadas.

Tomando en consideración los aspectos mencionados anteriormente, es que, el calcio no se considera un parámetro adverso en la calidad de agua de riego, y, por ende, no se incluye en la normativa de manera directa (sólo se incluye en la medición de sodio porcentual), y **no se va a considerar como componente crítico** para los análisis de más adelante.

4.2.2 Cloruro

El cloro es uno de los elementos más presentes en el agua de riego, el cual aparece como anión cloruro (Cl^-). El cloruro es indispensable para el desarrollo de la planta, pero es necesario en pequeñas cantidades, y cuando su concentración es muy alta, el cloruro puede convertirse en un elemento tóxico. Las plantas absorben el cloruro de la solución del suelo como ión Cl-. El cloruro desempeña un papel importante en algunas plantas, incluyendo en la fotosíntesis, el ajuste osmótico y la supresión de enfermedades de las plantas. Es uno de los iones con mayor movilidad y fácilmente removido por procesos de lixiviación. El ión que permanece libre en la solución de suelo, es absorbido por la planta, donde se mueve en dirección a las hojas (parte de la planta donde se acumula Cl^-) (García Á. , 2012). Si en las hojas la concentración de cloruro es muy alta, se presentan los síntomas de toxicidad, los cuales pueden ser quemazón o secamiento de los tejidos foliares. Por lo tanto, el cloruro es un parámetro que afecta el rendimiento del cultivo, de dos maneras, primero es afectado por la sensibilidad del cultivo al consumo a través de sus raíces; y también el rendimiento del cultivo es afectado por la sensibilidad del cultivo al consumo a través del follaje. Algunas especies se comportan de manera más tolerante que otras a las concentraciones de cloruro; la siguiente tabla muestran concentraciones de Cl- en el agua de riego, para las cuales los cultivos presentan riesgos de daños foliares. (Flores, 2020)

Tabla 11: Concentración de cloruros en las aguas de riego por aspersión causante de daños foliares (mg/l). Fuente: Flores, 2020

Cultivo	**Concentración de Cloruro en agua de riego causante de daños foliares. (mg/l)**
Almendro	< 180
Ciruelas	< 180
Cítricos	< 180
Vid	180-360
Tomates	180-360
Papas	180-360
Maíz	360-710
Alfalfa	360-710

También, se consideran los niveles de tolerancia al cloruro una vez que está presente en la solución de suelo. (Flores, 2020)

Tabla 12: Concentraciones máximas en la solución del suelo, a partir de las cuales aparecen síntomas de toxicidad por cloruro. Fuente: *(Texas Agricultural Extension Service, 1996)*

Cultivo	**Tolerancia al Cloruro en la solución de suelo (mg/l)**
Cebolla	350
Zanahoria	350
Fresa	350
Lechuga	350
Papa	525
Apio	525
Espinaca	700
Tomate	875
Brócoli	875

4.2.3 Sulfatos

El azufre es un elemento químico que pertenece al grupo de los macronutrientes esenciales de las plantas. Se encuentra de manera natural en numerosos minerales (barita epsomita, tiza, etc.). Además, tiene un origen antrópico, ya que, los sulfatos se utilizan en la industria química (fertilizantes, pesticidas, colorantes, jabón, papel, vidrio, fármacos, etc.); como agentes de sedimentación (sulfato de aluminio) o para controlar las algas (sulfato de cobre) en las redes de agua y, por último, como aditivos en los alimentos. Debido a que los sulfatos están presentes en los productos químicos utilizados en la agricultura, se debe tener cuidado con las aguas de riego que contengan altas concentraciones de este parámetro, ya que, se puede acumular un exceso en la solución del suelo, lo que puede traer consecuencias para los cultivos. El sulfato contribuye también a la salinidad del agua de riego, junto con los iones de Na, Ca, Mg, Cl y HCO_3. Específicamente el sulfato aporta a la salinidad potencial, ya que, una vez que precipitan las sales menos solubles, quedan en solución cloruros y sulfatos, los cuales aumentan la presión osmótica.

Según el Servicio Agrícola y Ganadero SAG, se puede establecer una relación entre el sulfato (anión predominante en el agua de riego) con el parámetro conductividad eléctrica (CE). A continuación, se muestra la tabla elaborada por el SAG, para esta correlación.

Tabla 13: Relación entre Sulfato y Conductividad Eléctrica. Fuente: SAG

Concentración de Sulfato (mg/l)	Conductividad eléctrica (µmhos/cm)
500 – 800	770 – 1200
800 – 1000	1200 – 1500
1000 – 1500	1500 – 2300
1500 – 2000	2300 – 3100
2000 – 2500	3100 - 4000

4.2.4 Salinidad

La salinidad se refiere a la cantidad de sales presentes en solución. Y como se ha mencionado en puntos anteriores, las principales sales disueltas presentes en el agua son los cationes de sodio, calcio y magnesio, y los aniones de cloruro, sulfato y bicarbonato. Regar con agua con niveles altos de salinidad provoca que se acumulen altas concentraciones de sólidos disueltos totales en

los suelos, lo que repercute de manera que se genera un efecto osmótico que reprime en cierta medida que las plantas logren absorber agua, lo que perjudica su crecimiento. Explicado de otra manera, a medida que aumenta el contenido de sales en la solución del suelo, se incrementa la tensión osmótica y, por tanto, la planta tiene que hacer mayor esfuerzo para absorber el agua por las raíces, o sea, disminuye la cantidad de agua disponible para las plantas. (García Y. , 2015)

La tolerancia de los cultivos a los niveles de salinidad altos se basa en la habilidad que tienen para mantener su producción y calidad. Y la respuesta más común de la planta al estrés por salinidad es la falta de crecimiento. La salinidad actualmente se puede medir mediante dos parámetros distintos, la Conductividad Eléctrica (CE), y los Sólidos Disueltos totales.

4.2.4.1 Conductividad eléctrica CE

Expresa la concentración total de sales solubles contenidas en las aguas de riego. La medida la conductividad eléctrica se realiza mediante un conductímetro provisto de célula de conductividad apropiada. La conductividad eléctrica se puede expresar en diferentes unidades (Siemens/cm, mhos/cm) y sus equivalencias son las siguientes: 1 dS/m =1 milimhos/cm = 1000 µS/cm. Pero la forma más actualizada de expresar la conductividad es en dS/m o µS/cm.

Según su nivel de conductividad, las aguas pueden clasificarse como se muestra en la tabla

Tabla 14: Clasificación de aguas según su conductividad. Fuente: *(van der Aa, 2003)*

Conductividad Eléctrica µS/cm	**Clasificación**
< 77	Concentración mineral muy baja
77 - 769	Concentración mineral baja
769 - 2308	Concentración mineral intermedia
>2308	Concentración mineral alta

Con respecto al efecto de la alta Conductividad eléctrica del agua en la productividad de los cultivos, lo que ocurre es que la planta sufre una incapacidad para competir con los iones en la solución del suelo por agua. Entonces, cuanto mayor sea la CE, menos agua estará disponible para las plantas, aunque el suelo parezca húmedo. Por lo tanto, se ve afectado el potencial rendimiento de la especie. (Land and Water Division, 2006)

Para conocer cómo afecta este parámetro a los cultivos, en la siguiente tabla se presenta la tolerancia de diferentes especies de cultivos a los niveles de conductividad en el agua de riego.

Tabla 15: Tolerancia de cultivos a la conductividad eléctrica en e agua de riego. Fuente: *(Grattan, 2018)*

Rubro	**Cultivo**	**Nivel de tolerancia**
Frutales	Fresas	Sensible
	Durazno	Sensible
	Palto	Sensible
	Almendro	Sensible
	Naranjo	Sensible
	Uva	Moderadamente sensible
	Ciruelo	Moderadamente sensible
	Limonero	Moderadamente sensible
Hortícolas	Cebolla	Sensible
	Zanahoria	Sensible
	Choclo	Moderadamente Sensible
	Lechuga	Moderadamente Sensible
	Tomate	Moderadamente Sensible
	Papas	Moderadamente Sensible
	Coliflor	Moderadamente Sensible
	Porotos	Moderadamente Tolerantes
	Habas	Moderadamente Tolerantes
Forrajes	Alfalfa	Moderadamente Sensible
	Alpiste	Moderadamente Tolerante
	Cebada	Moderadamente Tolerante

Por lo tanto, los cultivos con mayores hectáreas plantadas en la región Metropolitana: uva, palto, nogal, almendro, limón, naranjo, choclo, lechuga, cebolla y tomate, son sensibles o moderadamente sensibles a los niveles altos de conductividad eléctrica en el agua de riego.

4.2.4.2 Sólidos Disueltos Totales

Son el peso de las sales disueltas del agua de riego obtenidas por evaporación de un volumen de agua previamente filtrada. Los sólidos disueltos totales (SDT, o TDS por sus siglas en inglés) son el residuo que queda después de evaporar una muestra de agua previamente filtrada a través de un elemento de fibra de vidrio con abertura de 1.5 micras. El agua se evapora y el residuo se lleva hasta 180°C. El resultado se reporta en mg/L.

Los SDT incluyen las sales, los minerales, los metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico que se encuentra disuelto en el agua, o que haya pasado a través del filtro con abertura de 1.5 micras. (Carbotecnia , 2021) .

Capítulo 5: Metodología

En esta memoria se realizará un análisis específico sobre la calidad de agua de la cuenca del río Maipo y sobre la calidad del agua servida tratada AST que sale de una Planta de Tratamiento de Aguas Servida ubicada en el sur de la región Metropolitana, mediante el estudio de datos de estaciones de monitoreo pertenecientes a la Dirección General de Aguas, y a la empresa sanitaria Aguas Andinas. Una vez que se establezcan los parámetros críticos del agua superficial, se va a analizar el AST, con la finalidad de comparar los parámetros importantes con los valores medidos por Aguas Andina a la altura de la subcuenca Maipo Medio, para así concluir si el agua servida tratada tiene calidad cercana o diferente al agua superficial utilizada para riego.

5.1 Análisis de datos de estaciones de monitoreo en la cuenca hidrográfica del río Maipo

Con la finalidad de conocer y establecer, como es la calidad actual de agua de riego en la región Metropolitana, se analizan datos de monitoreo de los años: 2019, 2020 y 2021 tomados en estaciones de monitoreo pertenecientes a la Dirección General de Aguas. Para realizar el estudio se seleccionaron estaciones de monitorio pertenecientes a cada una de las cinco subcuencas del río Maipo (Maipo alto, Maipo medio, Maipo Bajo, Mapocho alto y Mapocho bajo) con el fin de conocer la variación existente entre la calidad de agua de toda la cuenca principal, (ver **Anexo 2** coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo seleccionadas) de estos datos se seleccionaron los parámetros críticos establecidos en la sección anterior, y se compararon con su

respectivo límite establecido por la normativa actual, NCh 1333. Cabe mencionar también que en el **Anexo 3** se presentan gráficos asociados a otros parámetros medidos previamente por la DGA, pero que se encuentran en concentraciones irrelevantes.

En los siguientes gráficos se representan valores mensuales, pertenecientes a los datos de monitoreo de la DGA, en los cuales, las barras de color celeste representan los datos medidos en el año 2019, las barras de color amarillo representan a los datos medidos en el año 2020, las barras de color verde a los datos medidos en el año 2021, y la línea roja corresponde al límite de la Norma Chilena 1333.

- Subcuenca Río Maipo Alto: en los siguientes gráficos se muestra la calidad de agua según los parámetros: cloruro, sulfatos y conductividad eléctrica, presentes en una estación de monitoreo de la DGA: río Maipo en San José de Maipo.
    - Cloruros:

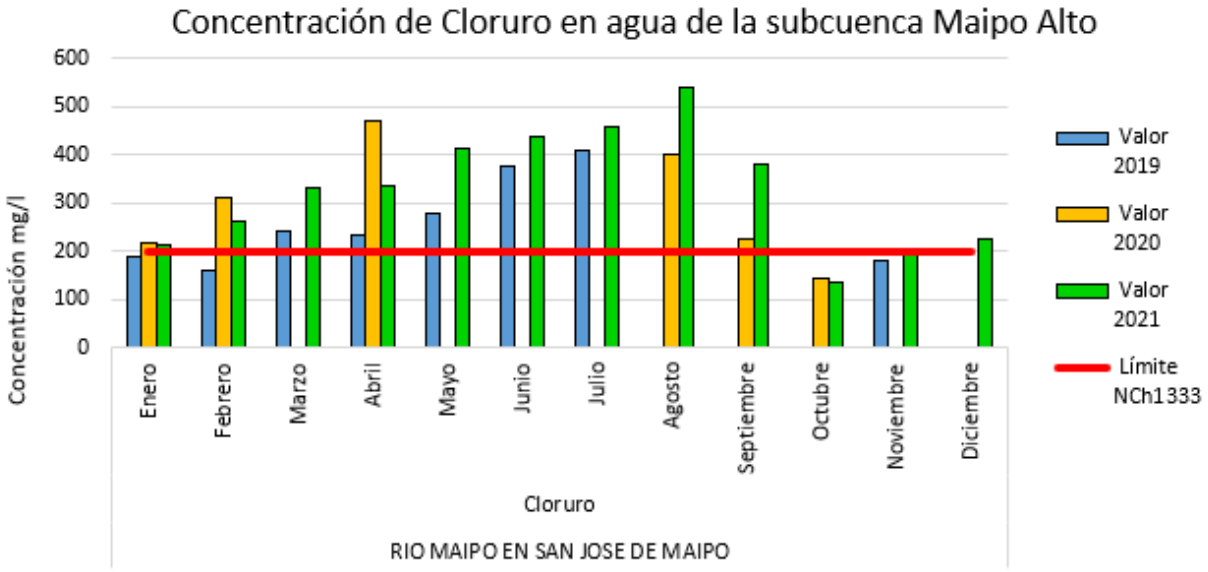


Figura 4: Concentración de Cloruros en estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Alto

Se observa que, del total de mediciones realizadas en el año 2019, en los meses de mayo, junio, y julio fueron donde se superó el límite de 200 mg/l en las dos estaciones, y los meses de enero, febrero, marzo, abril y noviembre las mediciones de cloruros estuvieron más cercanas al límite de la norma. Por otra parte, para el año 2021, donde se tienen mediciones de enero a diciembre, se observa que los meses desde mayo a septiembre presentan una concentración mayor de cloruros que sobrepasa aproximadamente el doble del límite de la norma. Entonces, se puede

concluir que, en esta sección de la cuenca, los cloruros tienen concentraciones altas en las estaciones otoño e invierno.

- Sulfato:

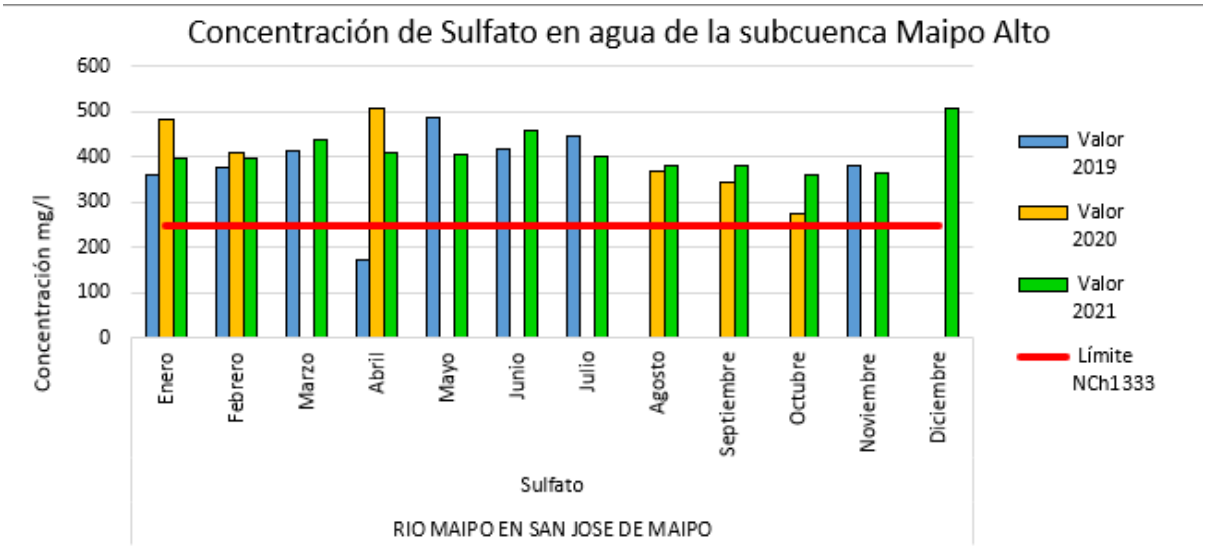


Figura 5: Concentración de Sulfato en estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Alto

Del gráfico previo se observa en primer lugar que la mayoría de los meses, en los tres años que se realizaron mediciones, los valores medidos superan al límite de la NCh1333. En el año 2019 la medición más alta se da en el mes de mayo; mientras que en el año 2020 la medición más alta se da en el mes de abril, y en el año 2021 ya medición más alta corresponde al mes de diciembre. Entonces, se puede concluir que en la subcuenca Maipo Alto, no se cumple con los niveles de sulfato establecidos para agua de riego.

- Conductividad:

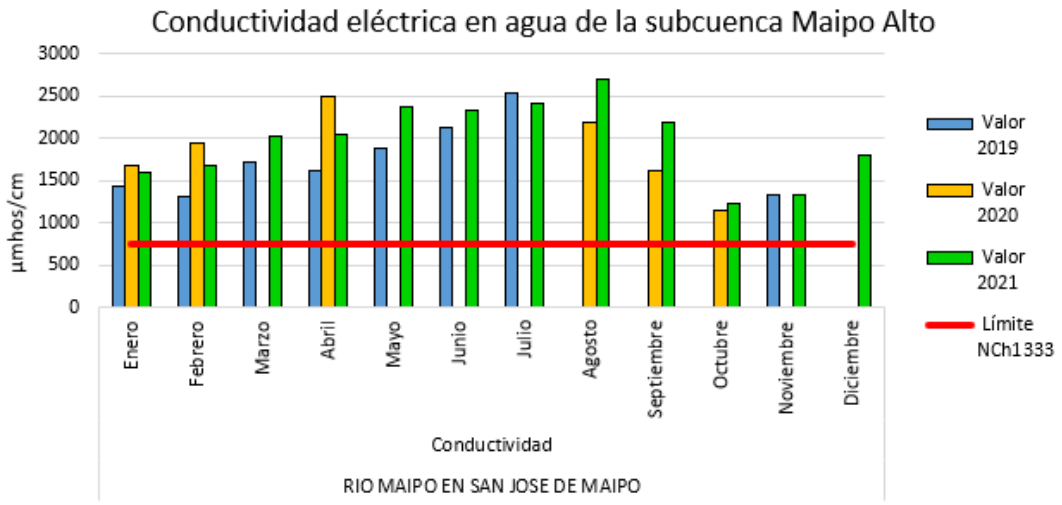


Figura 6: Conductividad eléctrica en estación de monitoreo de la subcuenca Maipo Alto

En la estación de monitoreo del río Maipo en San José de Maipo, en el año 2019 la conductividad alcanza el valor máximo en el mes de julio, mientras que, en el año 2020, el máximo valor se observa en el mes de abril, y en el año 2021 esto ocurre en el mes de agosto. A modo general, se observa que en esta sección de la cuenca se sobrepasa ampliamente el nivel de conductividad eléctrica establecido en la normativa, 750 µmhos/cm, el cual representa el límite que puede tener el agua de riego para que no presente efectos adversos en ningún cultivo.

- Subcuenca Río Maipo Medio: en los siguientes gráficos se muestra la calidad de agua según los parámetros: cloruro, sulfatos y conductividad eléctrica, en una estación de monitoreo representativa perteneciente a la subcuenca río Maipo Medio: río Maipo antes de junta con río Clarillo.
    - Cloruros:

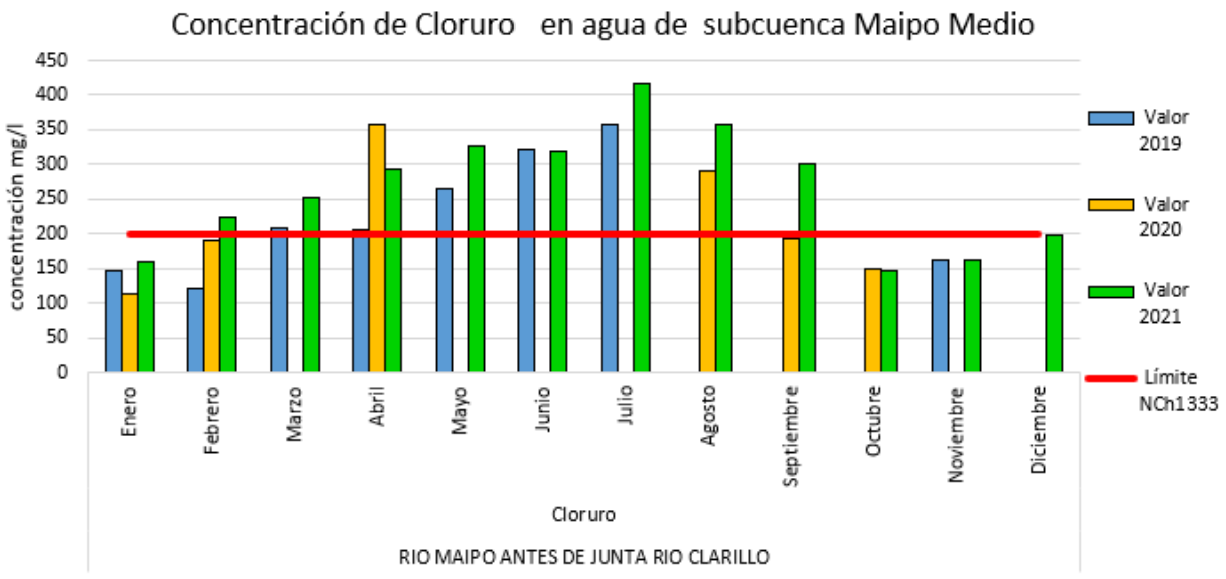


Figura 7: Concentración de Cloruro en estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Medio

Para la estación de monitoreo río Maipo antes de junta con río Clarillo, se tienen mediciones del año 2019, 2020 y 2021. En el gráfico se puede observar, que las concentraciones de cloruro más altas y que superan el límite de la norma, en los tres años medidos, se encuentran entre los meses de abril a septiembre, y por el contrario, en los meses de octubre a marzo las concentraciones de cloruro en el agua bajan, y se encuentran cumpliendo la normativa.

- Sulfato:

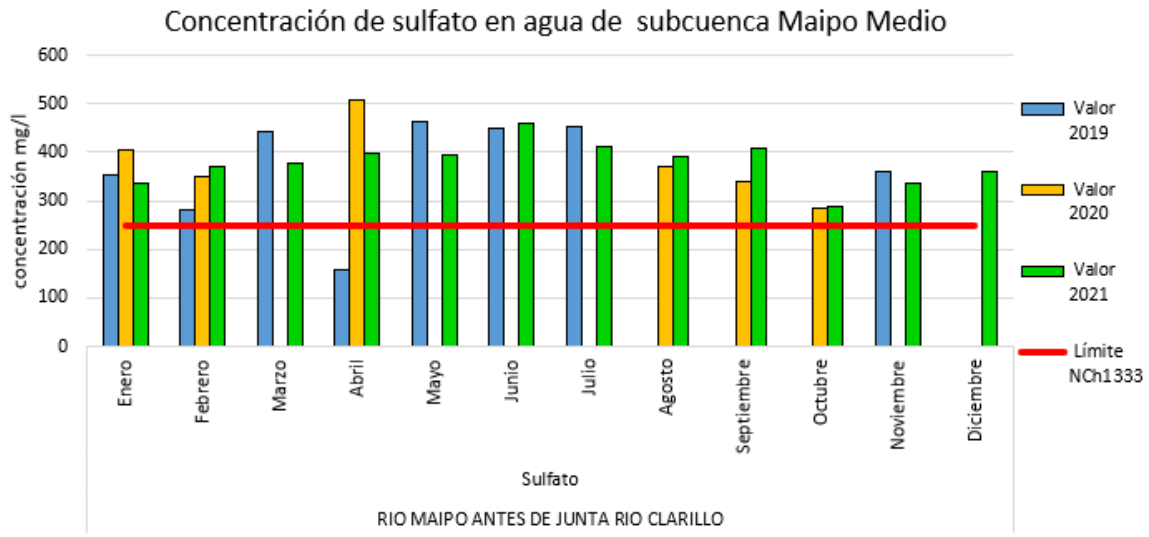


Figura 8: Concentración de Sulfato en estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Medio

El gráfico anterior, muestra los valores de sulfato medidos en la estación de monitoreo que se encuentran en la subcuenca Maipo medio. Al observar de manera general se tiene que, dentro de los tres años de mediciones, solo una se encuentra por debajo del límite de la norma. Y de forma más precisa, se tiene que en el año 2019. Luego, en el año 2020 se alcanzó el máximo valor de 500 mg/l en el mes de abril, lo que corresponde al doble del límite permitido. Y con respecto al año 2021, las mediciones mensuales se encuentran entre los 300 y 400 mg/l.

- Conductividad:

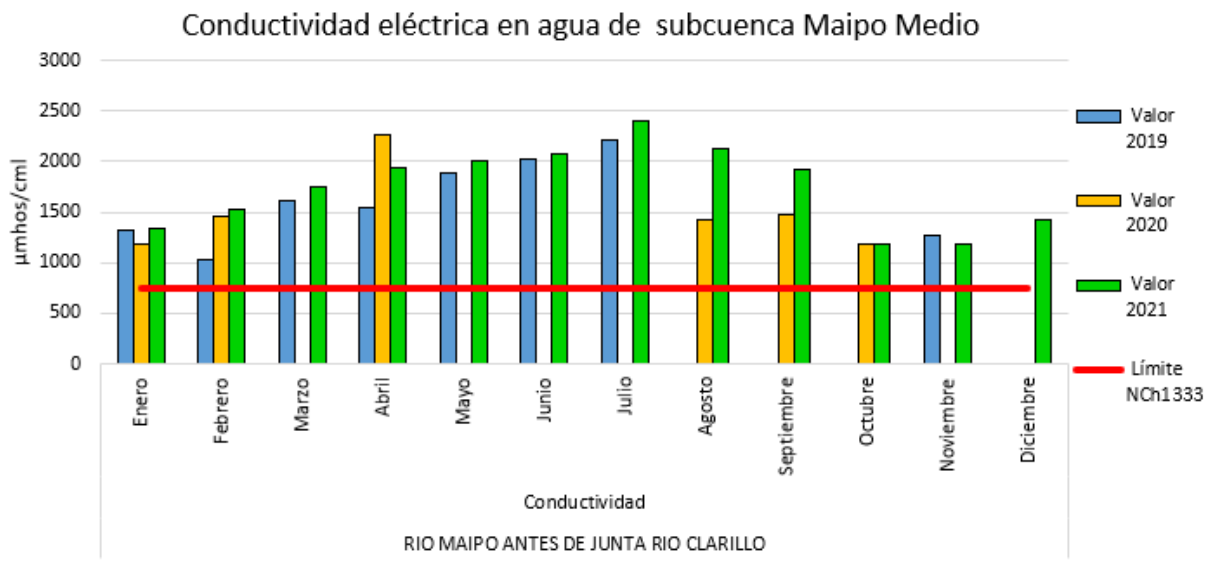


Figura 9: Conductividad eléctrica del agua en estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Medio

Analizar la conductividad eléctrica en esta subcuenca es importante, ya que, según lo mencionado en el punto 3.2, la subcuenca Maipo Medio es donde se tienen mayor cantidad de cultivos plantados. Entonces, del gráfico anterior se observa que en todas las mediciones realizadas en los años 2019, 2020 y 2021, en las tres estaciones de monitoreo que pertenecen a esta subcuenca, se sobrepasó el límite de conductividad eléctrica de 750 µmhos/cm, por lo tanto, los niveles que presenta el agua actualmente puede tener efectos perjudiciales en los cultivos sensibles. Y, por ende, la principal zona cultivada de la región debe presentar problemas asociados a la disponibilidad de agua para los cultivos

- Subcuenca Río Maipo Bajo: en los siguientes gráficos se muestra la calidad de agua según los parámetros: cloruro, sulfatos y conductividad eléctrica, en una estación de monitoreo representativa pertenecientes a la subcuenca río Maipo Bajo: Estero Puangue en ruta 78.
    - Cloruro:

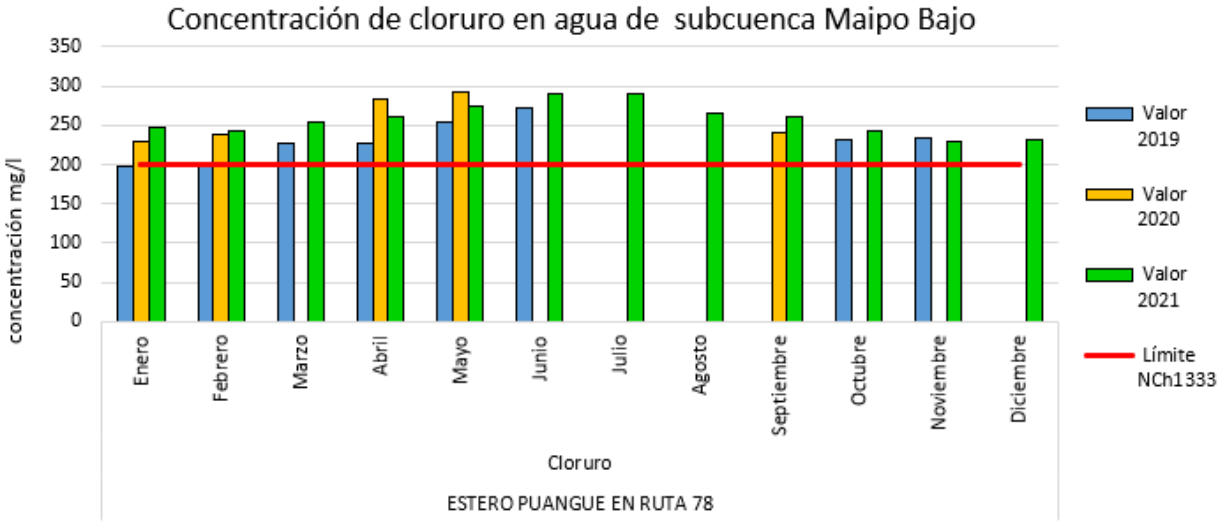


Figura 10: Concentración de cloruro en el agua de una estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Bajo.

En la estación de monitoreo ubicada en estero Puangue en ruta 78, se realizaron más mediciones. En el año 2019, las concentraciones más altas se encontraron en los meses de mayo y junio; en el año 2020, no se tomaron datos en todos los meses, pero de todas formas, se logra apreciar que las concentraciones fueron subiendo de enero hasta mayo, y en septiembre bajaron. Y por último, en el 2021 se tomaron mediciones durante todo el año, y se observa que en los meses de junio y julio fueron las concentraciones más altas. Y por ende, se logra observar también que durante el invierno se alcanzan las mayores concentraciones de cloruro en el agua.

- Sulfato:

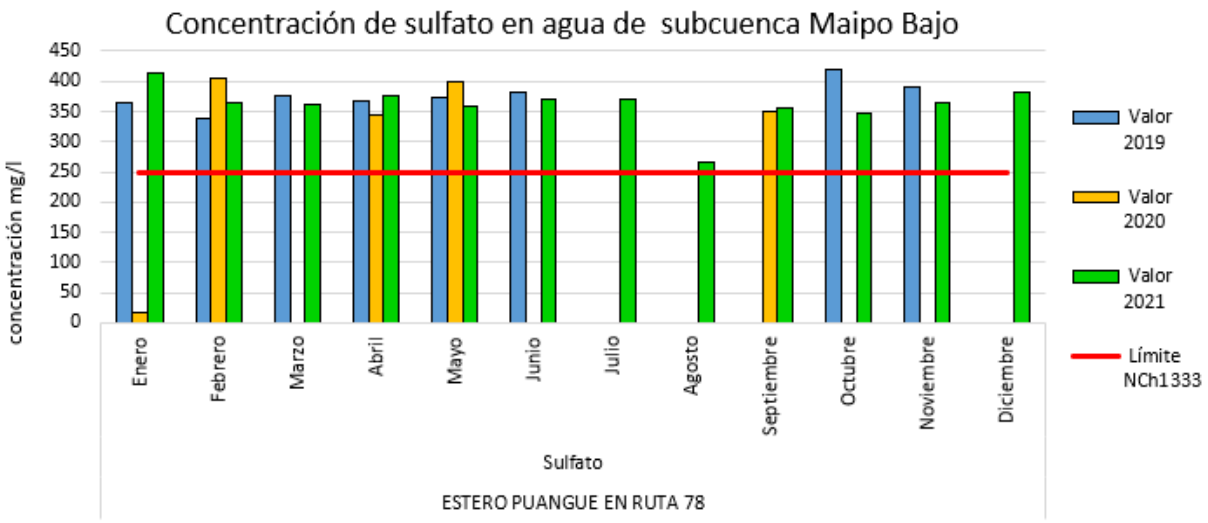


Figura 11: Concentración de sulfato en el agua de una estación de monitoreo de la subcuenca río Maipo Bajo.

En primer lugar, a modo general se observa que en las dos estaciones de monitoreo de la subcuenca Maipo Bajo, todas las mediciones se encuentran superando el límite de la norma NCh 1333. En el año 2019, para la estación de monitoreo se tienen mediciones en los meses de enero a junio, más octubre y noviembre, donde las concentraciones más altas se alcanzaron en estos últimos nombrados. Luego, en el año 2020 se tienen menos meses medidos, y el mayor valor se alcanzó en el mes de febrero. Finalmente, en las mediciones realizadas en el año 2021, los valores mensuales se encontraron bastante cercanos entre sí, la mayor concentración se alcanzó en enero, y la menor concentración se registró en agosto.

- Conductividad:

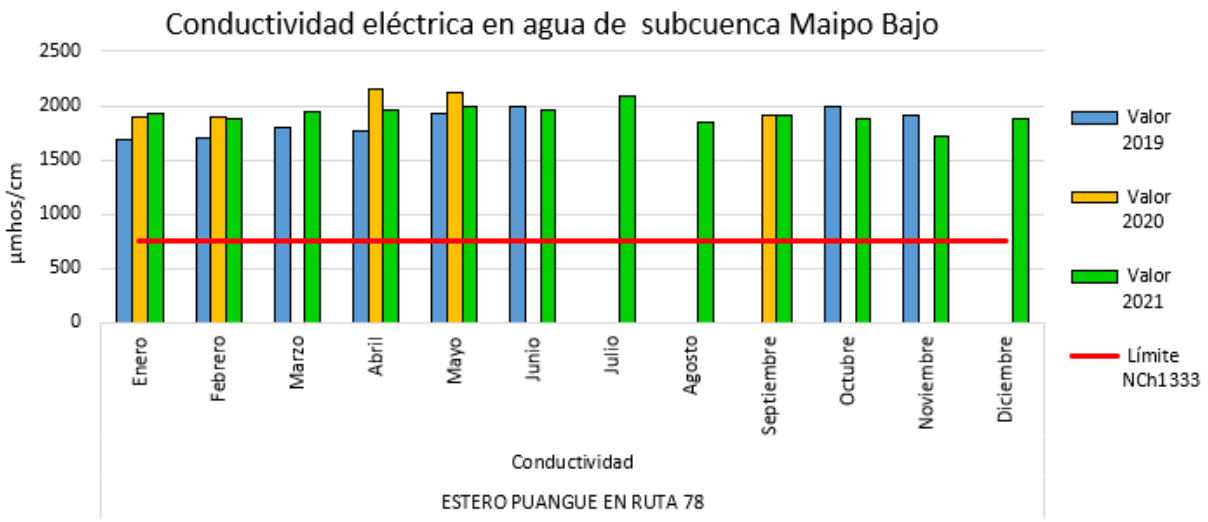


Figura 12: Conductividad eléctrica del agua en estación de monitoreo de la subcuenca río Mapocho Alto.

Al igual que en las subcuencas anteriores, los valores registrados para conductividad son elevados, y sobrepasan al límite establecido en la norma chilena de 750 µmhos/cm. Además, considerando que la subcuenca río Maipo bajo es la segunda con mayor demanda de agua para riego de cultivos agrícolas, los niveles de conductividad altos son perjudiciales para los cultivos sensibles.

- Subcuenca Río Mapocho Alto: en los siguientes gráficos se muestra la calidad de agua según los parámetros: cloruro, sulfatos y conductividad eléctrica, en una estación de monitoreo representativa perteneciente a la subcuenca río Mapocho Alto: río Mapocho en Los Almendros.
    - Cloruro:

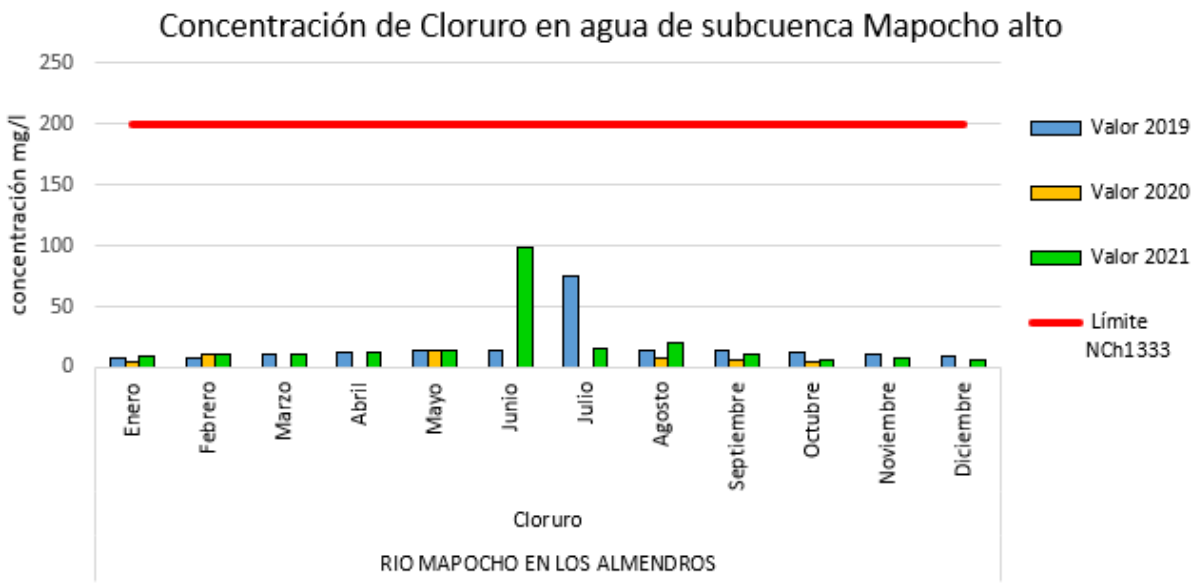


Figura 13: Concentración de cloruro presente en estación de monitoreo de la subcuenca río Mapocho Alto.

Del gráfico previo se aprecia que las concentraciones de cloruro en esta subcuenca son bastante pequeñas, en su mayoría se encuentran por debajo de los 20 mg/l, y todas se encuentran cumpliendo el límite de la normativa actual, por lo tanto, se puede decir que el río Mapocho cercano a sus inicios no presenta concentraciones elevadas de cloruro.

- Sulfato:

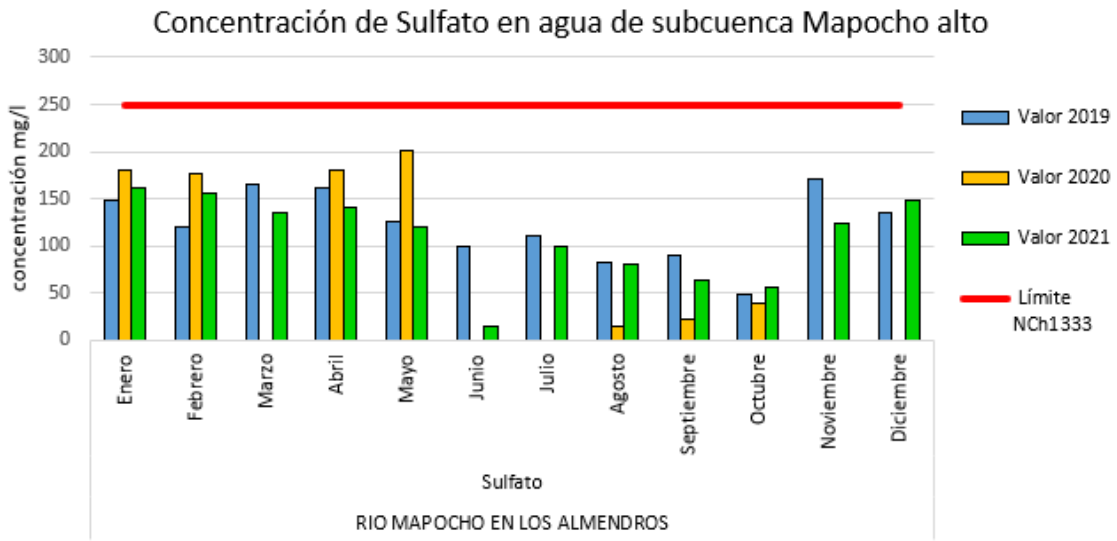


Figura 14: Concentración de sulfato en estación de monitoreo de la subcuenca río Mapocho Alto.

Al observar el gráfico anterior se aprecia que en la estación de monitoreo los niveles de sulfato están por debajo del límite de la normativa en los tres años anteriores.

- Conductividad:

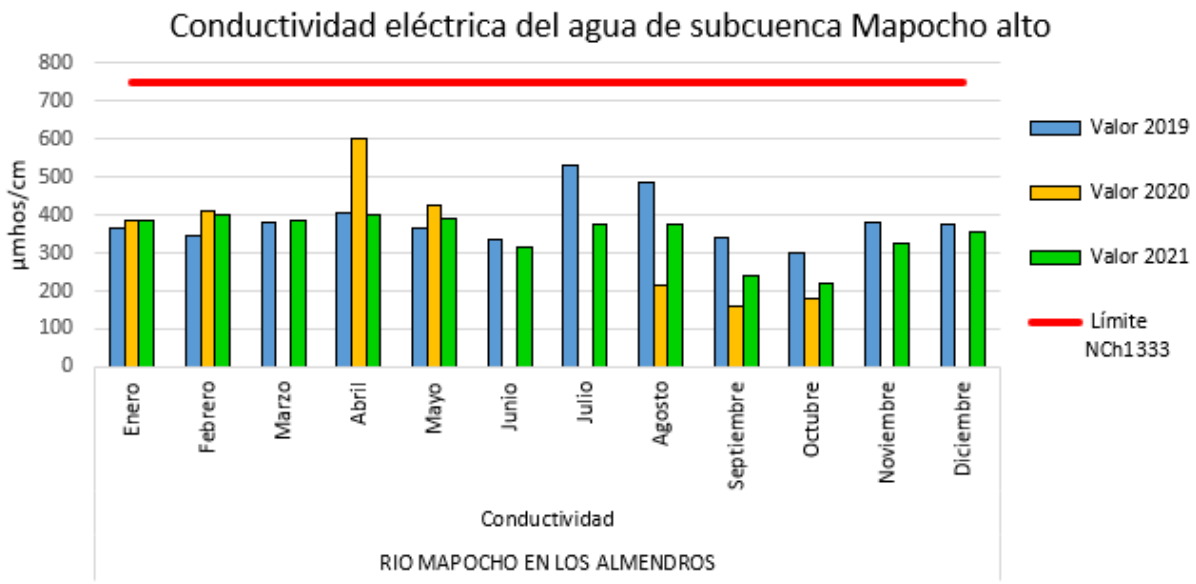


Figura 15: Conductividad eléctrica del agua en Subcuenca río Mapocho Alto.

Al igual que con los parámetros anteriores, los valores medidos de conductividad eléctrica del agua en la subcuenca río Mapocho Alto, son inferiores al límite de la norma. Pero la demanda de agua para uso agrícola de esta sección es la menor de todas las subcuencas del río, por lo tanto, no es una subcuenca que se caracterice por la plantación de cultivos.

- Subcuenca Río Mapocho Bajo: en los siguientes gráficos se muestra la calidad de agua según los parámetros: cloruro, sulfatos y conductividad eléctrica, en una estación de monitoreo representativa pertenecientes a la subcuenca río Mapocho: Río Mapocho en el monte.

- Cloruro:

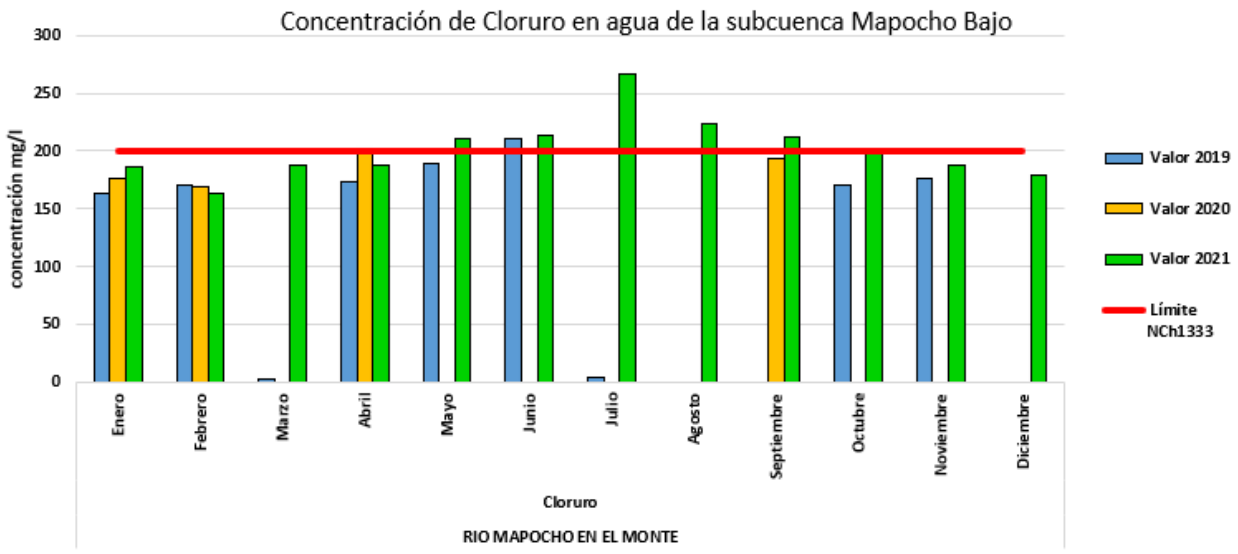


Figura 16: Concentración de cloruro en agua de la subcuenca río Mapocho Bajo

En esta subcuenca se tienen datos de enero a diciembre. En la estación de monitoreo ubicada en río Mapocho en El monte, en el año 2019 la mayor concentración se alcanzó en junio; en el 2020 fue en el mes de abril, y en el 2021 fue en junio. Por lo tanto, se vuelve a dar la situación de estacionalidad en el parámetro cloruro, donde en los meses de invierno se alcanzas mayores concentraciones.

- Sulfato:

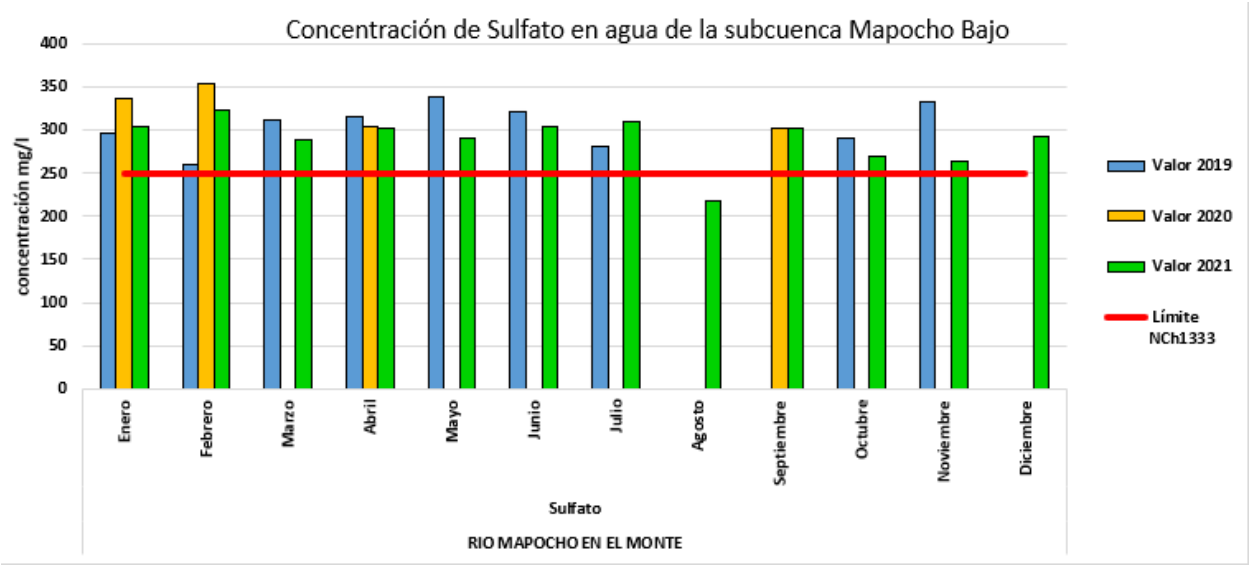


Figura 17: Concentración de Sulfato en agua de la subcuenca río Mapocho Bajo

En la estación de monitoreo ubicada en río Mapocho en el Monte, los valores medidos estuvieron bastante cercanos entre sí, y variaron entre 218 y 353 mg/l. También se observa que solo una medición no superó el límite de la normativa chilena.

- Conductividad:

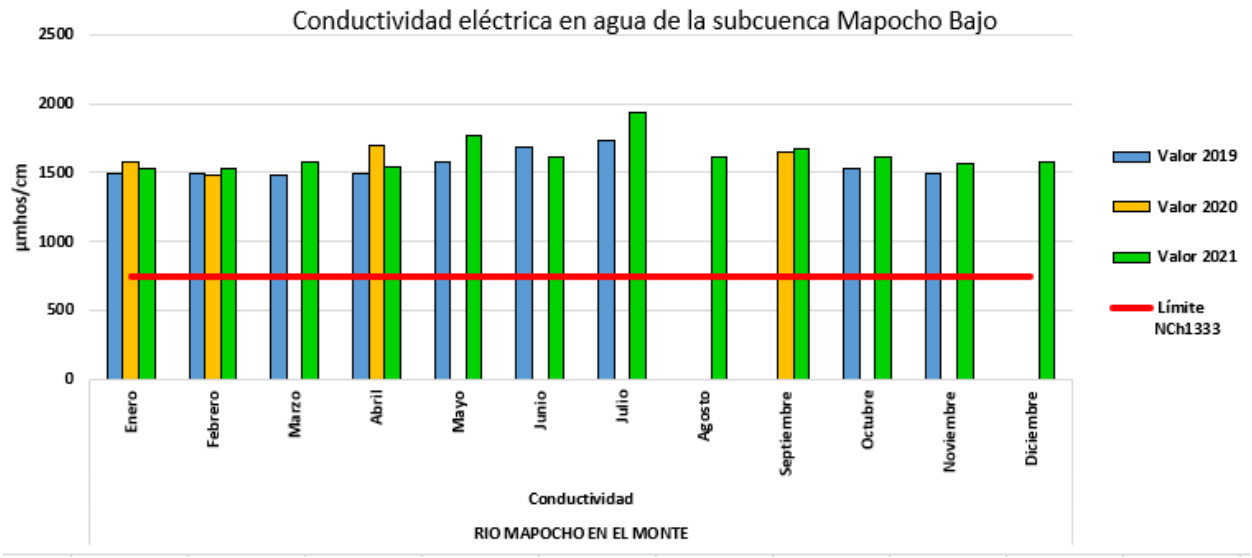


Figura 18: Conductividad eléctrica en agua de la subcuenca río Mapocho Bajo

Del gráfico anterior se observa que la conductividad eléctrica del agua de la subcuenca río Mapocho Bajo, también está por sobre el límite establecido por la norma.

Ahora, para realizar un contraste con datos que no pertenezcan a la DGA, se presentan a continuación gráficos elaborados en base a datos de monitoreo de la empresa sanitaria Aguas Andinas. Para estos gráficos se seleccionaron los parámetros que no cumplen la norma NCh 1333, ya que, se realizó un análisis previo donde se comparó cada parámetro medido con la normativa. Los parámetros seleccionados son: cloruro, sulfato, sólidos disueltos y conductividad eléctrica.

En los gráficos que se presentan a continuación se muestran datos medidos en el año 2021 por Aguas Andinas, en tres estaciones de monitoreo presentes en la cuenca del río Maipo, las mediciones se realizaron entre los meses de julio a diciembre. Las barras de color naranja representan los datos medidos en río Clarillo, las barras verdes correspondes a las mediciones en el río Maipo, las barras amarillas a las mediciones realizadas donde se mezcla el río Maipo y el estero Carbonera, y la línea roja representa el límite establecido en la Norma Chilena 1333.

- **Cloruros**

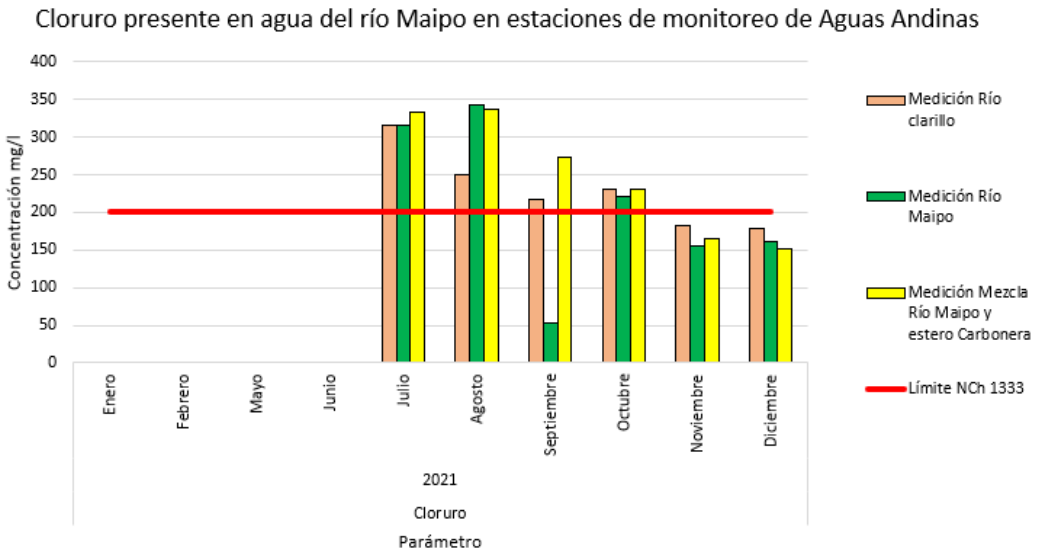


Figura 19: Gráfico comparativo de Cloruro presente en agua de tres estaciones de la cuenca del Maipo. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022.

Del gráfico anterior se observa que, en los meses julio y agosto, la concentración de cloruro fue más alta que en los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre, en las tres estaciones de monitoreo analizadas.

- **Sulfato**

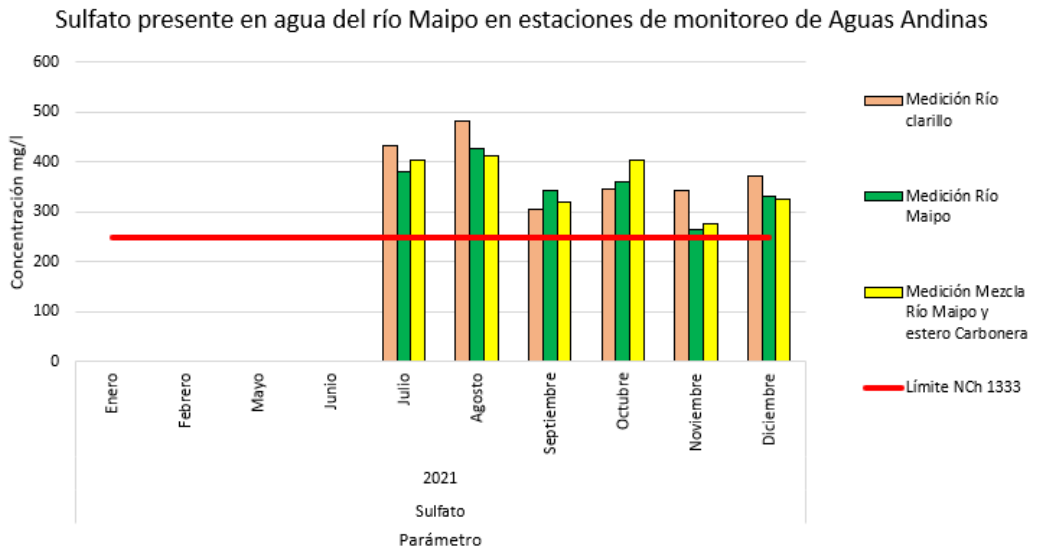


Figura 20: Concentración de Sulfato en agua en estación de monitoreo de la cuenca del Maipo. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022

Se observa que para el año 2021, en los meses de julio y agosto se midieron mayores concentraciones de sulfato en el agua de las tres estaciones de monitoreo estudiadas. También se aprecia que en el río Clarillo las concentraciones de sulfato son más altas que en cuatro de los seis meses monitoreados. Y a modo general, se tiene que todas las mediciones superaron el límite de sulfatos establecido por la normativa.

- **Conductividad:**

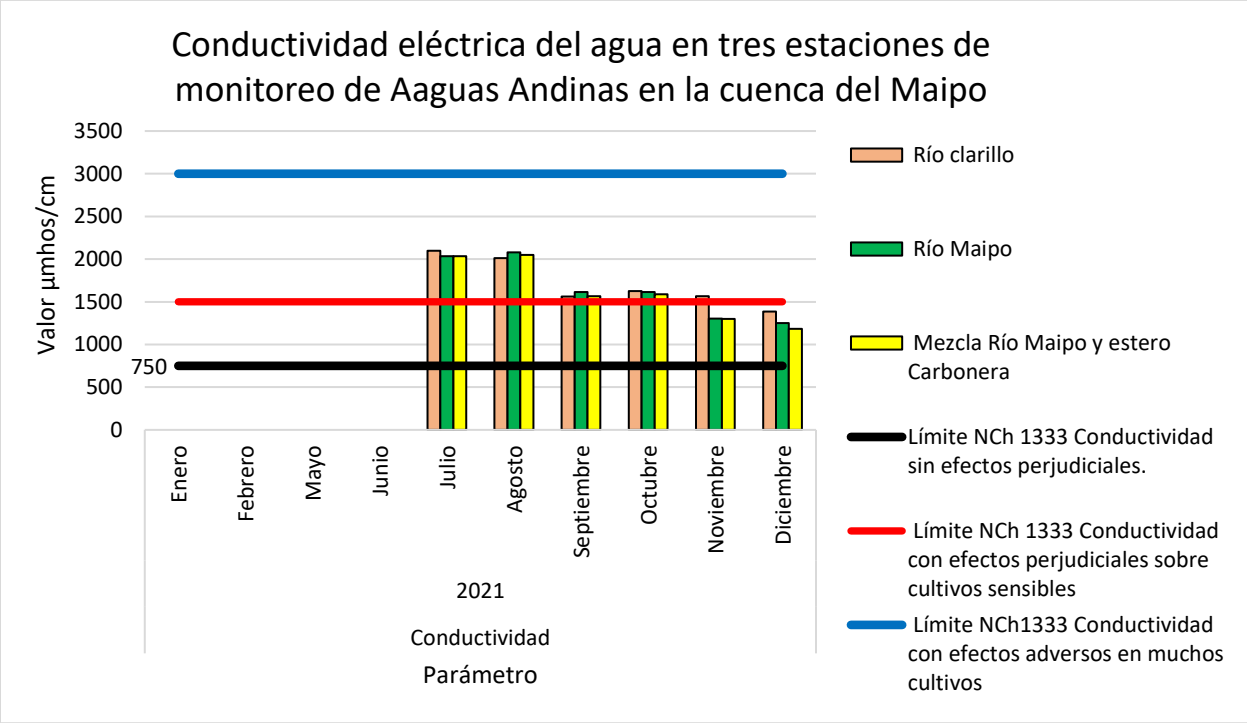


Figura 21: Conductividad eléctrica del agua en tres estaciones de monitoreo de la cuenca del Maipo. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022.

Del gráfico se observa que la conductividad eléctrica del agua en las tres estaciones medidas es bastante similar, y sus niveles se encuentran por sobre el límite establecido en la norma, con el cual no se tendrían efectos perjudiciales. En los meses de julio y agosto, los valores de conductividad medidos demuestran que el agua tiene efectos perjudiciales sobre cultivos sensibles, y en los meses de septiembre a diciembre también están sobre el límite en el cual el agua no tendría efectos en los cultivos. Por lo tanto, el problema de la salinidad del agua en la cuenca del Maipo es alto, y se ve reflejado en los altos niveles de conductividad eléctrica.

Con toda esta recopilación de gráficos que muestran la situación de la calidad del agua en la cuenca del río Maipo, se puede concluir que los mayores problemas, es decir, los parámetros que se encuentran pasando la normativa en mayor medida son sulfato, y conductividad, luego le sigue la concentración de cloruro. Específicamente, para la concentración de cloruro, se logró visualizar que están relacionados con la estacionalidad, ya que, en los meses de invierno se presentaban concentraciones más altas que en los otros meses. Estos tres parámetros están relacionados entre sí, ya que, hacen referencia a la salinidad o composición de sales que presenta el agua. Para el sulfato los datos actualizados varían entre 300 a 400 mg/l. y su límite según la NCh 1333 es de 250 mg/l. Luego, para el cloruro la norma establece un límite de 200 mg/l, y las concentraciones de los datos de monitoreo de Aguas Andinas van desde 150 a 380 mg/l. Por consiguiente, es importante que se tomen medidas para que estos parámetros no sigan trayendo consecuencias en la productividad de los cultivos agrícolas de la región.

5.2 Calidad del Agua Servida Tratada en la región Metropolitana

Las aguas servidas son el efluente del uso de agua domiciliaria, comercial o industrial y otras. Estas aguas están compuestas generalmente por un 99,9 % de agua y un 0,1 % de contaminantes, de los cuales, alrededor de 60 a 80 % se disuelven y el resto queda como materia en suspensión. Los principales contaminantes corresponden a elementos tóxicos, materia orgánica e inorgánica, organismos vivos. Debido a la presencia de estos contaminantes es necesario que estas aguas se recolecten para el posterior tratamiento y finalmente, su disposición o reutilización. (Orozco-Jaramillo, 2012)

Las aguas servidas tratadas son aquellas aguas que ya han sido utilizadas, recolectadas y tratadas por la empresa sanitaria antes de su restitución al medio ambiente.

En la región Metropolitana la principal empresa sanitaria es Aguas Andinas que abastece a un 80,51% de la población, en segundo lugar, está el Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA) que abastece a un 8,82% de la población y en tercer lugar se está Aguas Cordillera que abastece a un 6,86%. Estas tres empresas abarcan un 96,19% de la población urbana abastecida de agua potable. Y con respecto al agua servida tratada, Aguas Andinas posee un total de doce plantas de tratamiento de agua servida, de las cuales dos son las que tratan el agua del sector residencial del Gran Santiago; la primera es la Planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) El Trebal, y la segunda es la Planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) La Farfana.

A continuación, se presentan gráficos de calidad del agua servida tratada que sale de las plantas de tratamiento antes mencionadas, donde se consideran los principales parámetros que se estudian en la calidad de agua de la cuenca del río Maipo. En el Anexo 5 se presenta una tabla comparativa entre todos los parámetros físico químicos de la norma NCh 1333, y la concentración promedio anual para al gua servida tratada; en la cual se destacan los parámetros que están sobrepasando el límite de la norma, los cuales corresponden a cloruro, sulfato, conductividad, sólidos disueltos, y sodio porcentual, todos asociados a la salinidad del agua.

En los gráficos, las barras de color naranjo representan los valores medidos en una estación de monitoreo perteneciente a Aguas Andinas, que está ubicada a la salida de la planta de tratamiento de aguas La Farfana; y la línea azul representa el límite establecido por la norma NCh 1333.

- **Cloruros**

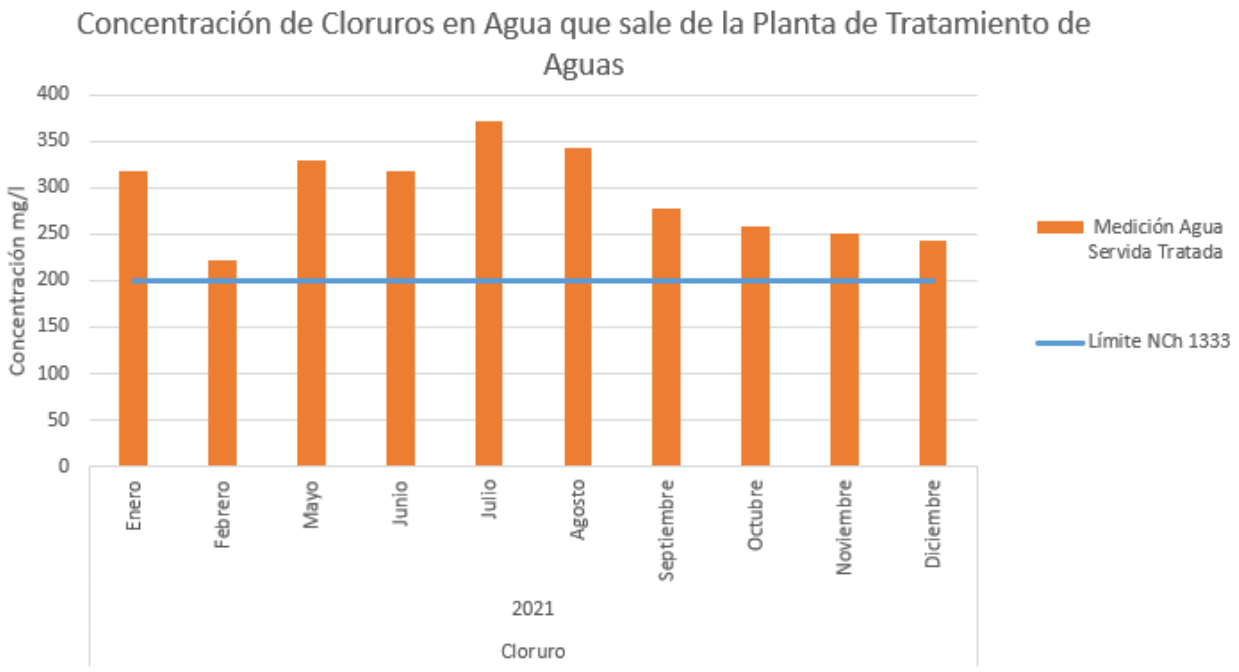


Figura 22: Gráfico comparativo para cloruro en agua servida tratada. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022.

Del gráfico se aprecia que la concentración de cloruro en la medición realizada en el agua servida tratada se encuentra por sobre el límite de la norma, además se aprecia que en los meses de julio y agosto se obtuvieron las mayores concentraciones de cloruro, lo cual es concordante con los

gráficos analizados anteriormente. Además, es posible notar que el rango de valores es similar a los valores medidos en el agua superficial de la cuenca del río Maipo.

- **Sulfato:**

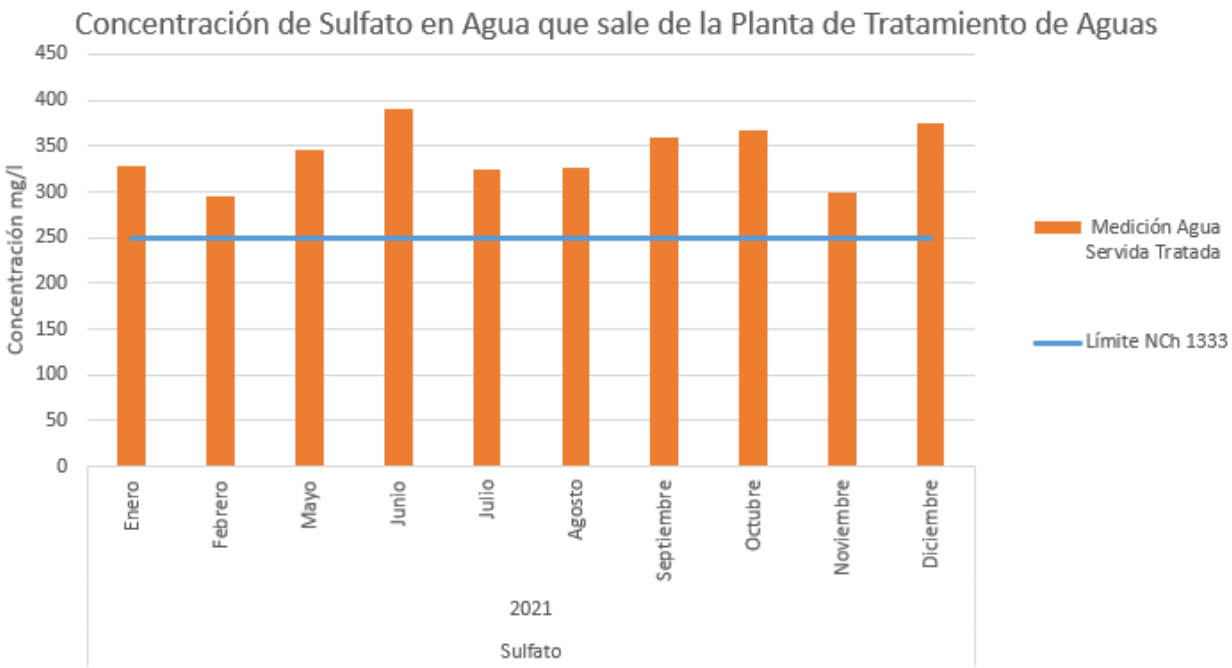


Figura 23: Gráfico comparativo para sulfato en agua servida tratada. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022.

Los sulfatos en el agua servida tratada se encuentran sobrepasando por un estrecho margen el límite de la norma, pero en general se observa que las concentraciones mensuales medidas, son parecidas a los valores medidos en el agua superficial de la cuenca del Maipo, los cuales se muestran en los gráficos anteriores.

- **Conductividad:**

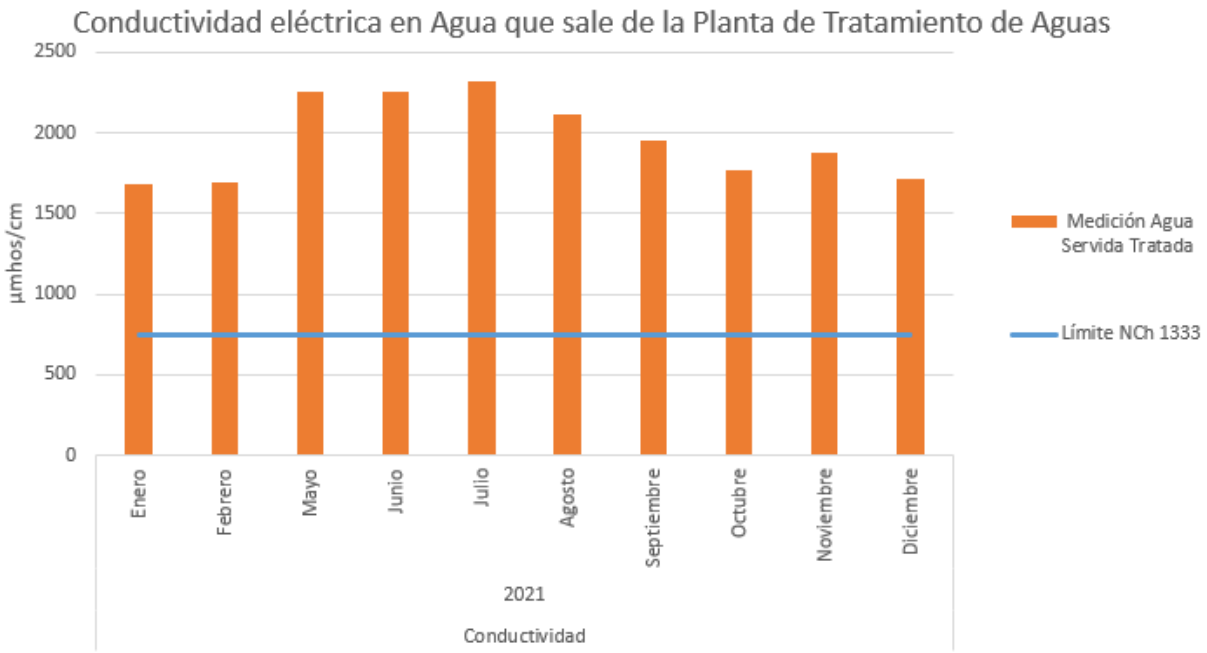


Figura 24: Conductividad eléctrica del agua servida tratada. Fuente: elaboración propia para Aguas Andinas, 2022.

La conductividad eléctrica del agua servida tratada presenta valores por sobre el primer límite de la norma NCh 1333, con el cual no se producen efectos en cultivos, y se encuentra en un nivel sobre 1500 µmhos/cm, por lo tanto, el agua puede generar efectos adversos en muchos cultivos y necesita métodos de manejo.

De los gráficos anteriores es posible observar que, a nivel general, la calidad del agua servida trata es similar a la calidad del agua superficial en la cuenca del río Maipo. Específicamente para el cloruro, el agua servida tratada presenta mayores concentraciones, esto debido a la aplicación de cloro que se realiza en la planta de tratamiento. Por otro lado, la conductividad y los sólidos disueltos también son levemente mayores que el agua monitoreada en la cuenca del río Maipo, pero ambas se encuentran sobre pasando la normativa actual vigente para agua de riego, NCh 1333. La conductividad del agua también es mayor que en el agua superficial de la cuenca, debido al aporte de materia orgánica.

Y finalmente, con respecto a los sulfatos, se observa que para el agua servida tratada la concentración disminuye.

Capítulo 6: Análisis de estándares internacionales

6.1 Análisis de estándares internacionales para calidad de agua de riego.

A continuación, se van a presentar estándares de calidad de agua para riego de diferentes países, tomando en consideración parámetros físicos y químicos. Primero se compara la normativa chilena con otras normativas de países de Latinoamérica, y luego se compara con los límites permisibles de otros países, los cuales son: Canadá, Estados Unidos, Australia

6.1.1 Latino américa

En la siguiente tabla se presentan los límites permisibles para agua de riego de tres países (México, Ecuador y Perú), además de Chile. En la tabla se destacan los parámetros críticos para agua de riego en la región Metropolitana identificados anteriormente.

Tabla 16: Comparación Normativas para Calidad de Agua de Riego en países de Latinoamérica. Fuente:

Parámetro	Unidad	Norma Chilena 1333	Límite permisible en México	Límite permisible Ecuador	Límite permisible Perú
Aluminio	mg/l	5	0,2	5	5
Arsénico	mg/l	0,1	0,01	0,1	0,1
Bario	mg/l	4	0,7	1	
Berilio	mg/l	0,1	-		0,1
Boro	mg/l	0,75	-	1	
Cadmio	mg/l	0,01	0,005	0,01	0,01
Cianuro	mg/l	0,2	0,07	0,2	
Cloruro	mg/l	200	250		500
Cobalto		0,05	-		0,05
Cobre	mg/l	0,2	2	2	0,2
Conductividad	µmhos/cm	750-3000			2500
Cromo	mg/l	0,1	0,05	0,1	0,1
Fierro	mg/l	5	0,3	-	5
Fluoruros	mg/l	1	1,5	1	1
Litio	mg/l	2,5	-	2,5	-

Manganeso	mg/l	0,2	0,15	0,2	0,2
Mercurio	mg/l	0,001	0,001	0,001	-
Molibdeno	mg/l	0,01	-	0,01	-
Níquel	mg/l	0,2	-	0,2	0,2
Nitratos	mg/l	-	10	-	10
Plata	mg/l	0,2		0,05	-
Plomo	mg/l	5	0,01	0,05	-
Sodio	mg/l	35%	200	-	-
Sólidos disueltos totales	mg/l	-	1000	3000	-
Sulfato	mg/l	250	400	-	1000
Vanadio	mg/l	0,1	-	0,1	
Zinc	mg/l	2	5	2	2

En la tabla anterior se aprecia que los límites para cada parámetro son parecidos entre los cuatro países analizados; y específicamente, para los parámetros, cloruro, sulfato, y conductividad los otros países tienen límites más permisibles, y por lo tanto, no consideran las problemáticas asociadas a los afectos perjudiciales que se pueden generar en los cultivos.

6.1.2 Otros países

La tabla siguiente contiene normativas para calidad de agua de riego, para tres países distintos: Canadá, Estados Unidos y Australia, y también incluye los límites recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Tabla 17: Comparación Normativas para Calidad de Agua de Riego en países distintos países. Fuente: *(IRMA Standar, 2018)*.

Parámetro	Unidad	Norma Chilena 1333	Límite permisible Canada	Límite permisible USA (California)	Límite permisible Australia	Límite FAO

Aluminio	mg/l	5	5	5	5	5
Arsénico	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Bario	mg/l	4	-	-	-	-
Berilio	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Boro	mg/l	0,75	0,75	0,75	-	0,8
Cadmio	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cianuro	mg/l	0,2	-	-	-	-
Cloruro	mg/l	200	100	142-355	150	200
Cobalto		0,05	0,05	0,05	0,05	-
Cobre	mg/l	0,2	0,2	0,2	0,2	-
Conductividad	µmhos/cm	750-3000	200-3000	200-3000	-	-
Cromo	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Fierro	mg/l	5	5	5	-	5
Fluoruros	mg/l	1	1	1	-	1
Litio	mg/l	2,5	-	-	-	-
Manganeso	mg/l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mercurio	mg/l	0,001	0,002	0,002	-	-
Molibdeno	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Níquel	mg/l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Plata	mg/l	0,2	-	-	-	-
Plomo	mg/l	5	0,2	5	-	-
Sodio	mg/l	35%	-	-	-	-
Sólidos disueltos totales	mg/l	500 - 5000	500-3500	-	-	-
Sulfato	mg/l	250	200	250	1000	250
Vanadio	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Zinc	mg/l	2	2	2	2	2

De la tabla anterior se aprecia, que a nivel general los parámetros fisicoquímicos de la calidad de agua para uso de riego son casi los mismos en los tres países, esto se debe a que, los países siguen las recomendaciones por ejemplo de la FAO, y elaboran sus normativas en baje a eso. Por lo tanto, se comprende que los parámetros físico-químicos del agua de riego están normados bajo recomendaciones internacionales, mediante las cuales se guían la mayoría de los países.

También hay países que tienen manuales de riego para cultivos específicos, los cuales presentan énfasis en el efecto que tiene la conductividad eléctrica del agua sobre los cultivos.

Por ejemplo, según el Manual para riego de uvas productoras de vino, de Sudáfrica, se establecen clasificaciones del agua de riego según su conductividad. Como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 18: Clasificación de agua de riego acorde a su Conductividad Eléctrica. Fuente: *(Philip Myburgh, 2018)*

Límite de Conductividad eléctrica del agua µS/cm	**Peligro**	**Implicancias para el riego**
< 250	Bajo	Puede utilizarse para el riego de la mayoría de los cultivos con poca probabilidad de que se produzca salinidad en el suelo. Se requiere cierta lixiviación, pero ésta se produce con las prácticas normales de riego, excepto en suelos de permeabilidad extremadamente baja
250 < CE ≤ 750	Medio	Puede utilizarse si se produce una cantidad moderada de lixiviación. Las plantas con tolerancia moderada a la sal pueden cultivarse en la mayoría de los casos sin prácticas especiales para el control de la salinidad
750< CE ≤ 2250	Alto	No puede utilizarse en suelos con drenaje restringido. Incluso con un drenaje adecuado,

		puede ser necesario un manejo especial para el control de la salinidad de la salinidad y deben seleccionarse plantas con buena tolerancia a la sal.
2250 < CE	Muy Alto	No es adecuado para el riego en condiciones ordinarias, pero puede utilizarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje debe ser adecuado, el agua de riego debe aplicarse en exceso para para que se produzca una lixiviación considerable, y deben utilizarse cultivos muy tolerantes a la sal. y deben utilizarse cultivos muy tolerantes a la sal.

De la tabla se aprecia que la conductividad eléctrica en el agua de riego es un factor importante, que está asociado con la salinidad que se produce en la solución de suelo, y según su valor se puede asociar un nivel de peligrosidad que tendrá en los cultivos agrícolas. A partir de la tabla anterior, se puede decir que un nivel recomendado de conductividad eléctrica en el agua de riego de los cultivos agrícolas que son sensibles sería entre los 250 µS/cm hasta máximo 750 µS/cm, más allá de ese valor se producen riesgos asociados a la disponibilidad de agua que realmente tendrá el cultivo.

Otro país que tiene una guía para la interpretación de agua de riego para cultivos es Canadá, y a continuación se presenta un adaptado de una de las tablas presentes en la guía, donde se contempla el riesgo potencial de algunos parámetros importantes en el agua, y especialmente se incluye la conductividad eléctrica y el anión cloruro.

Tabla 19: Problema potencial en el agua de riego por la presencia de distintos parámetros. Fuente: *(Agriculture and Agri-Food Canada, 2000)*

Problema pontencial en el riego	Unidad	Grado de restricción de uso		
		Ninguno	Leve o Moderado	Severo
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)				
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	<700	700 - 2,000	>2,000
Conductividad Eléctrica (CE)	dS/m	<1	1 to 2.5	>3
Razón de Absorción de Sodio		0 - 4	4 - 9	>9
Toxicidad iónica especifica (afecta a los cultivos sensibles)				
Sodio (Na)	mg/L	<70	>70	
Cloruro (Cl-)	mg/L	<100	>100	
Borno (B)	mg/L	<0.7	0.7 - 3.0	>3.0
Efectos diversos (afecta a los cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO3-N)	mg/L	<5	5 - 30	>30
Bicarbonato (HCO3)	mg/L	<90	90 - 500	>500

De la tabla anterior se observan los valores para conductividad eléctrica que deberían tener un grado de restricción de uso en Canadá.

6.2 Estándares internacionales de rehúso de agua servida tratada para riego de cultivos.

En esta sección se presentan estándares o reglamentos internacionales que han salido durante los últimos años para reutilizar el agua servida tratada con fines de riego. Esta estrategia ha aparecido como una opción importante en el último tiempo, debido al contexto mundial de sequía que enfrentan varios países del mundo, y también debido a la intencionalidad de los países de tener un procedo más circular en el uso del agua.

La calidad química de las aguas residuales es el resultado de la composición química del agua dulce de suministro y cualquier adición durante el uso del agua en el hogar o por la industria. Varias sustancias se agregan al agua en el curso de su tratamiento y uso, las cuales determinan la composición de las aguas residuales, así como sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Los principales componentes químicos de las aguas residuales se clasifican en sustancias orgánicas e inorgánicas. Las sustancias orgánicas pueden contener hormonas, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, proteínas, carbohidratos, aceites, combustibles y lubricantes, surfactantes, incluidos pesticidas y otros productos químicos domésticos y agrícolas. Las

sustancias inorgánicas pueden contener cloruro, sodio, boro, nitrógeno (parte del nitrógeno y el fósforo también se incluyen como parte de las sustancias orgánicas), fósforo, potasio, azufre y otros elementos químicos, incluidos los metales pesados (por ejemplo, zinc, manganeso, cobre, mercurio, plata, cromo, níquel, plomo, cadmio) y flúor. (Orozco-Jaramillo, 2012)

6.2.1 Reglamento Europeo relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del AST.

En primer lugar, este reglamento establece que la reutilización para el riego agrícola con aguas servidas tratadas es una medida determinada por el mercado y basada en las demandas y necesidades del sector agrícola, en especial en algunos Estados miembros que se enfrentan a una escasez de recursos hídricos. También menciona que las empresas sanitarias y los usuarios finales deben cooperar para garantizar que las aguas regeneradas satisfagan las necesidades de los usuarios finales en lo que se refiere a cada categoría de cultivos. En aquellos casos en que las clases de calidad de las aguas producidas por las platas de agua servida tratada no sean compatibles con la categoría de cultivo y el método de riego ya existentes en la zona servida, por ejemplo, en una red de abastecimiento colectivo, los requisitos de calidad del agua podrían cumplirse utilizando, en una fase posterior, diversas opciones de tratamiento del agua, ya sea de manera aislada o en combinación con opciones sin tratamiento de las aguas regeneradas, de conformidad con el enfoque multibarrera. (Parlamento europeo y Consejo de la Unión Europea , 2020)

Luego, este reglamento establece que las aguas regeneradas deben clasificarse según las siguientes clases en relación con el tipo de cultivo que se va a regar. A continuación, se presenta la tabla estipulada en el reglamento.

Tabla 20: Clases de calidad de las aguas regeneradas y uso agrícola y método de riego permitidos. Fuente: Reglamento Unión Europea.

Clase de calidad mínima de las aguas regeneradas	Categoría de Cultivo (*)	Método de Riego
A	Todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas	Todos los métodos de riego

	regeneradas, y los tubérculos que se consumen crudos	
B	Cultivos de alimentos que se consumen transformados, esto es, aquellos destinados al consumo humano después de un proceso de tratamiento (es decir, cocción o tratamiento industrial posterior)	Todos los métodos de riego
C	Los cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche.	Riego por goteo (**) u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo
D	Cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas	Todos los métodos de riego (***)
(*) En caso de que un tipo determinado de cultivo regado corresponda a varias categorías del cuadro 1, se le aplicarán los requisitos de la categoría más estricta. (**) El riego por goteo es un sistema de micro riego capaz de suministrar el agua en gotas o pequeños chorros a los vegetales y consiste en un goteo de agua sobre el suelo o directamente bajo la superficie en cantidades muy pequeñas (2-20 litros/hora) con un sistema de tubos de plástico de pequeño diámetro provistos de unos orificios denominados goteros de riego. (***) En el caso de métodos de riego que imitan la lluvia, debe prestarse especial atención a la protección de la salud de los trabajadores o los transeúntes. A tal efecto, se aplicarán las medidas preventivas adecuadas.		

Con respecto a los parámetros de calidad del agua servida tratada, en general los físico químicos deben ser los mismos establecidos en las normas respectivas de calidad de agua de riego. Pero también, este reglamento presenta los requisitos específicos de calidad de aguas regeneradas para el riego agrícola. Los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 21: Requisitos especiales de calidad de las aguas regeneradas para el riego agrícola. Fuente: Reglamento Unión Europea.

		Requisitos de calidad				
Clase de calidad de las aguas regeneradas	Tratamiento indicativo	E. coli (número/100 ml)	DBO5 (mg/l)	STS (mg/l)	Turbidez (UNT)	Otros
A	Tratamiento secundario, filtración y desinfección	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	Legionella spp.: < 1 000 UFC/l cuando exis ta un riesgo de aerosolización Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤ 1 huevo/l para el riego de pastos o forraje
B	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 100	-	-	-	
C	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 1000			-	
D	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 10000			-	

6.2.2 Directrices para la reutilización del agua según la Agencia de Protección Ambiental EPA, Estados Unidos.

En Estados unidos la EPA elabora guías de normativas para que cada uno de los Estados las use para su legislación, y también sirve de guía para ser utilizada por otros países subdesarrollados.

En primer lugar, la EPA establece categorías de reúso de agua según sus aplicaciones, lo cual se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 22:Categorías de reúso de agua y sus aplicaciones más comunes

Categoría	Aplicación típica
Reúso urbano	Riego de jardines, parques, patios de escuelas, campos de golf, cementerios, riego residencial
Reúso agrícola	Riego de cultivos o viveros comerciales
Reúso de almacenamiento	Usos recreacionales y ambientales, para contacto corporal restringido o no, como en lagos y estanques, mejora de pantanos, aumento de caudales y nieve artificial
Reciclaje y reúso industrial	Aguas de enfriamiento, alimentación de calderas, aguas de procesos
Reúso no potable - Recargas de aguas subterráneas	Reposición de aguas subterráneas, control de intrusiones salinas
Reúsos potables	Mezclada en embalses de abastecimiento de agua y en aguas subterráneas, suministro directo en tuberías

También, la EPA establece que las concentraciones de metales máximas permisibles en las aguas residuales tratadas para uso agrícola son las siguientes:

Tabla 23: Concentraciones máximas permisibles de metales para aguas residuales tratadas de uso agrícola. Fuente: EPA, 2018

Metal	Concentración máxima (mg/L)
Aluminio	5
Arsénico	0.1
Berilio	0.1
Boro	0.75
Cadmio	0.01
Cinc	2.0
Cromo (hexavalente)	0.1
Cobalto	0.05
Cobre	0.2
Fluoruro	1
Hierro	5
Litio	2.5
Manganeso	0.2
Molibdeno	0.01
Níquel	0.2
Plomo	5
Selenio	0.02
Vanadio	0.1

En tercer lugar, establece calidad de agua requerida en el sector agrícola según el uso que se le quiera dar, es decir, según el tipo de cultivo y el tipo de riego que se utilice. La siguiente tabla muestra los parámetros establecidos por esta guía.

Tabla 24: Guías de la EPA para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola.

Uso	Tratamiento	Calidad requerida
En riego superficial o por asperjado de cultivos de alimentos para consumo humano se ingiere crudo	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6-9 DBO ≤ 10 mg/L Turbiedad ≤ 2 UNT Coliformes fecales = no detectable Cloro residual = 1 mg/L
Riego superficial para cultivos de alimento para consumo humano y que se procesan comercialmente	Secundario y desinfección	pH = 6-9 DBO ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Coliformes fecales ≤ 200/100mL Cloro residual = 1 mg/L
Riego de cosechas que no se consumen por humanos incluyendo fibras, semillas y pasto	Igual	Igual

De la tabla anterior se observa que un parámetro importante son los coliformes fecales, los cuales deben ser no detectables, para el agua de riego de cultivos que se consumen crudos.

6.3 Métodos de riego para utilizar Agua Servida Tratada.

Un aspecto importante al hablar de la vialidad de la utilización del agua servida tratada para riego de cultivos es el método de riego, ya que, existen métodos de riego que pueden reducir la exposición de los cultivos a los agentes patógenos, mientras que otros no resultan adecuados. El riego por aspersión, por ejemplo, no es aconsejable para el riego de lechugas, debido a la capacidad del cultivo de mantener agua entre sus hojas y, de esta manera, mejorar la supervivencia de los agentes patógenos. Otros cultivos necesitan métodos de riego específicos, por ejemplo, el pasto para forraje generalmente es regado por aspersión y es difícil hacerlo por goteo a menos que el suelo sea pesado. Las prácticas y dispositivos de riego (por goteo o tuberías porosas) que limitan el contacto con partes vulnerables del medio ambiente o partes de plantas, tienen menos riesgos para la salud que otros (aspersión, pulverizadores) que reparten el agua regenerada de manera difusa. (Winpenny et al., 2013) En la siguiente tabla se presentan algunos factores que influyen al momento de seleccionar un método de riego, con medidas respectivas para la aplicación de agua regenerada.

Tabla 25: Factores influyentes en el método de riego con agua regenerada. Fuente: FAO, 2013

Método de Riego	**Factores que influyen en la selección**	**Medidas especiales para el riego con agua servida tratada**
Riego por inundación	El de menor costo. No se requiere una nivelación exacta. Baja eficiencia del uso del agua Bajo nivel de protección sanitaria.	Rigurosa protección de los trabajadores en el campo, manipuladores de cultivos y consumidores (por ej., equipos de protección)
Riego por surcos	Bajo costo. Se puede necesitar nivelación. Baja eficiencia del uso del agua. Nivel medio de protección sanitaria	Protección de los trabajadores en el campo, posiblemente de los manipuladores de cultivos y consumidores (por ej., equipos de protección)
Riego por aspersión	Costo medio a alto Eficiencia media del uso del agua. No se requiere nivelación. Bajo nivel de protección sanitaria (debido a los pulverizadores)	Distancia mínima de 50-100 m desde casas y caminos. Restricciones de la calidad del agua (eliminación de agentes patógenos). No se deben utilizar desechos anaeróbicos, debido a los malos olores. Uso de mini aspersores.
Riego subterráneo y por goteo	Alto costo. Alta eficiencia del uso del agua. Mayores rendimientos. Mayor nivel de protección sanitaria.	No se requieren medidas de protección. Restricciones de la calidad del agua (filtración) para evitar que los dispositivos se obstruyan.

De la tabla anterior se desprende que es importante seleccionar el método de riego con agua servida tratada según las medidas especiales que se deben tomar. De todos los métodos señalados, el que presenta un mayor nivel de protección sanitaria es el riego por goteo, y también con este método no se requieren medidas de protección adicionales.

Capítulo 7: Mejoramiento de la calidad de agua de riego en la cuenca del río Maipo

7.1 Alternativas de tratamientos para mejorar la calidad del agua para riego de cultivos.

Como se estudió en los puntos anteriores, el problema principal de la calidad de agua de riego en la cuenca del río Maipo, es la concentración de sales, específicamente sulfato, calcio y cloruro, las cuales generan niveles altos de conductividad eléctrica. Lo que genera que el agua servida tratada también tenga niveles altos de estos parámetros.

Por lo tanto, en esta sección se presentarán alternativas de tratamientos para reducir la concentración de sales en el agua.

7.1.1 Tecnologías de Membrana

7.1.1.1 Osmosis Inversa:

Esta técnica de desalación consiste en aplicar una presión mecánica para contrarrestar la presión osmótica natural, y lograr así filtrar el agua a través de membranas semipermeables que permiten el paso de las moléculas de agua, pero no el de las sales disueltas en ella. Se obtienen dos corrientes, primero el permeado, que es la corriente de agua desalada, con menor concentración de sales, y otra corriente con mayor concentración salina, se denomina concentrado o rechazo. La tecnología de Osmosis inversa se ha desarrollado tanto para **aguas salobres** (agua que está entre agua dulce y agua de mar) como para agua de mar, ya que, se ha desarrollado una gran variedad de membranas para diferentes objetivos. Las membranas para aguas salobres típicamente tienen un mayor flujo de agua, menor rechazo de sal y requieren presiones operativas más bajas; y por otro lado, las membranas diseñadas para el agua de mar requieren un mayor rechazo de sal, tienen flujos de permeado más bajos, debido a la compensación entre la selectividad de membrana (rechazo de sal) y la permeabilidad de la membrana (flujo de permeado). Además, las membranas

de osmosis inversa de agua de mar deben operar a presiones más altas para compensar la presión osmótica. (Fritzmann, 2007)

7.1.1.2 Electrodiálisis:

La Electrodiálisis (ED) es un proceso de membrana, durante el cual los iones son transportados a través de una membrana semipermeable, bajo la influencia de un potencial eléctrico. Las membranas son catiónicas o aniónicas, lo cual básicamente indica qué iones, ya sean positivos o negativos, fluirán a través. Las membranas selectivas de cationes son polielectrolitos con materia negativamente cargada, que rechaza los iones con carga negativa y permite fluir a los iones con carga positiva. Esta técnica puede ser aplicada para remover iones del agua. Las partículas que no llevan una carga eléctrica no son removidas. (Comisión Nacional de Riego, 2007).

7.1.1.3 Nanofiltración:

La nanofiltración es un proceso de filtración por medio de una membrana nanoporosa que se utiliza en aguas de bajos sólidos disueltos totales. El propósito es quitar los iones polivalentes, además de desinfectarla mediante la retención de materia orgánica. El proceso utiliza una membrana controlada por presión, cuya capacidad para repeler moléculas iónicas o moleculares es una filtración intermedia entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa. Las membranas son específicas para ciertos iones (A Fauzi, 2022), por lo que las hace ser más selectivas y tener un costo menor. Este tipo de membranas se usa mayormente para flujos de alimentación pequeños.

7.1.2 Tecnologías Térmicas

7.1.2.1 Destilación Multiefecto (MED):

El proceso consiste en calentar el agua hasta llevarla a evaporación, y posteriormente condensarla para obtener agua dulce. Este procedimiento de desalinización se lleva a cabo en varias etapas, la temperatura y la presión van descendiendo en cada etapa hasta conseguir el resultado deseado. Además, el calor obtenido de la condensación sirve también para volver a destilar el agua.

7.1.2.2 Compresión Mecánica de Vapor (MVC):

Se obtiene una presión de vapor media desde una planta de generación eléctrica, y se succiona parte del vapor de baja presión obtenida de la última etapa del ciclo. La combinación

genera un vapor de presión intermedia que permite reiniciar el ciclo mediante la condensación de este, y su generación de energía por el calor latente desprendido.

7.1.2.3 Destilación 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 utiliza el vapor producido 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 (sobre todo en el medio oriente), pero también es uno de los que utiliza más energía, por lo que es solo factible para países con bajos costos en energía.

7.1.2.4 Compresión térmica de vapor (MED-TVC):

Proceso parecido a una destilación multiefecto, pero la fuente de energía es un termocompresor. Se obtiene una presión de vapor media desde una planta de generación eléctrica, y se succiona parte del vapor de baja presión obtenida de la última etapa del ciclo. La combinación genera un vapor de presión intermedia que permite reiniciar el ciclo mediante la condensación de este, y su generación de energía por el calor latente desprendido. (Flores T, 2020)

De todas las tecnologías mencionadas previamente, la ósmosis inversa es la técnica que más se utiliza en la actualidad para la desalación de agua, ya que permite la eliminación de sales, así como de compuestos orgánicos de bajo peso molecular, permitiendo producir un agua potable de una gran calidad.

7.2 Diseño de una Planta de Tratamiento de Osmosis Inversa para reutilizar Agua Servida Tratada para riego de cultivos en la Región Metropolitana.

Debido al contexto de escasez hídrica existente en la región, y al aumento de la demanda para la generación de agua potable para el abastecimiento de población. Es que la empresa sanitaria Aguas Andinas, junto con las Asociaciones de Regantes de la Primera Sección del Río Maipo firmaron en agosto del año 2021 un acuerdo que tiene como objetivo impulsar el desarrollo de un proyecto para reusar parte de las aguas depuradas que se generan en las Biofactorías. Específicamente, el proyecto consiste en una conducción que tendrá una longitud entre 30 a 40 kilómetros y que conectará la Biofactoría Mapocho-Trebal en la comuna de Padre Hurtado con la captación de los regantes en el río Maipo. La obra tendrá una capacidad de **3 m^3/s** (de un caudal promedio de depuración total de 16,1 m^3/s), aportando anualmente entre 60 a 90 Hm^3 de agua

depurada. De esta manera, se llevaría a cabo el intercambio de agua con los canalistas, quienes aportarán el volumen equivalente de agua cruda directamente desde el río a Aguas Andinas para abastecer, en primera instancia, a la ciudad y aumentar así la disponibilidad de ésta para el consumo humano. (InduAmbiente, 2021)

Entonces, como el objetivo del acuerdo entre Aguas Andinas y la Asociaciones de Regantes de la Primera Sección del Río Maipo, es reutilizar agua servida tratada con fines de riego de cultivos agrícolas, se debe tomar en consideración la calidad del agua superficial de río, con la que se riega actualmente, y la calidad del AST.

Con el análisis realizado previamente, sobre la calidad de aguas superficiales de la cuenca y la calidad del AST, se concluye que, para utilizar el Agua Servida Tratada con fines de riego, se deben controlar los parámetros con mayor concentración, que producen efectos adversos en los principales cultivos de la región. Estos parámetros son: sulfato, cloruro, calcio, y conductividad eléctrica, los cuales representan a la salinidad del agua.

Por lo tanto, como se requiere disminuir la concentración de sales presentes en al agua, se presenta a continuación una opción para tratar la concentración de sales, mediante el diseño de una planta de Osmosis Inversa. Ya que, esta tecnología es capaz de eliminar hasta el 99% de las sales disueltas (iones), partículas, coloides, orgánicos, bacterias y pirógenos del agua con que se alimenta el sistema. Y también es la más tecnología más desarrollada y utilizada actualmente para desalinizar agua.

7.2.1 Simulación del diseño de la planta de Osmosis Inversa en el software IMS Design Hydranautics.

Para realizar el diseño de una planta de tratamiento de osmosis inversa se utiliza el programa IMS Design Hydranautics. A continuación, se mostrarán los pasos a seguir para diseñar la planta de osmosis en el software.

En primer lugar, se presentan las características y condiciones del agua de alimentación:

Tabla 26: Concentración de sales en agua de alimentación

Elemento	**Concentración mg/l**
Calcio	144,76
Magnesio	21,35
Sodio	187,5
Potasio	19,64
Sulfato	462,4
Cloruro	283,6
Boro	0,48

Estos datos se obtuvieron como promedio anual del año 2021 de mediciones realizadas por la empresa Aguas Andinas, del AST que sale de la planta de tratamiento Mapocho-Trebal.

Tabla 27: Características requeridas para el diseño

Parámetro	Valor
pH	7,37
Temperatura (ºC)	25
Conversión %	75
Flujo entregado por PTAS (m^3/s)	3
Tipo de agua	Agua residual convencional

Luego de ingresar los datos asociados al agua de alimentación, se pasa a la etapa de dimensionamiento de la planta, donde se deben especificar, los caudales requeridos, la conversión, el tipo de membranas acorde con el tipo de agua de alimentación, y algunos equipos adicionales para disminuir el consumo energético. Entonces, en los siguientes puntos se presentan los parámetros asociados al dimensionamiento de la planta.

Caudales:

Debido a que se desea tratar el caudal que sale de la PTAS, y que Aguas Andinas planea entregar a los canalistas de la primera sección del río Maipo, es que el caudal de alimentación requerido va a ser de 3 m^3/s, pero al programa se deben ingresar datos en m^3/día. Entonces, al

realizar la conversión el caudal que entrega la PTAS es de **259.200 m^3/día**, el cual será el caudal de alimentación a la planta de osmosis inversa. Debido a que este caudal es grande, para dimensionar de manera más efectiva en el software se divide este caudal en 5, y por ende se requerirán 5 de las plantas diseñadas. De este modo, el **caudal de alimentación es de 51.840 m^3/día**, para cada una de las cinco configuraciones.

Tipo de Membranas:

La selección del tipo de membrana está asociado al agua de alimentación, y como en este caso el agua de alimentación es agua residual convencional, se seleccionó la membrana CPA5-LD. Luego para el segundo paso, el agua corresponde al permeado del primer paso, por lo tanto, tiene una concentración de sales mucho menor, y la membrana seleccionada es del tipo ESPA 1. En el Anexo 6, se presenta una tabla sobre las especificaciones de cada membrana.

Conversión:

Para que el proceso alcance lo máximo posible de remoción de sales se elige una configuración de 2 pasos. Para el primer paso, la conversión es de un 70%, y para el segundo paso se logra un 90% de conversión.

Con los valores explicitados en las tablas anteriores, se ejecuta el diseño en el programa y se obtiene que la configuración para lograr bajar lo máximo posible la concentración de sales debe tener dos pasos (veces que se trata el permeado); el primer paso cuenta con dos etapas (veces que se trata el concentrado), y el segundo paso cuenta con tres etapas. Y también el sistema contempla una bomba interpaso. El primer paso tendrá una conversión del 70%, y el segundo paso alcanza una conversión del 90%.

Los resultados totales obtenidos con la simulación se presentan detalladamente en el Anexo 5, donde se específica las concentraciones de cada una de las corrientes. Pero lo más importante, es que las concentraciones de los iones bajan considerablemente, en la siguiente tabla se muestra como disminuye la concentración de sulfato, cloruro y por ende como disminuye la conductividad eléctrica del agua.

Tabla 28: Resultados iniciales y finales de parámetros críticos.

Parámetro	Valor en corriente de alimentación	Valor en corriente de permeado final
Sulfato SO_4^- (mg/l)	462	0,054
Cloruro Cl^-(mg/l)	283,6	0,361
Conductividad eléctrica (µS/cm)	2214	2,80

Anexo 5

El diagrama de flujo obtenido con el simulador se presenta en la Figura 25, en el cual las líneas de color azul corresponden al agua de alimentación, las líneas de color verde corresponden a las corrientes de concentrado o rechazo, y las líneas de color celeste corresponden a las corrientes de permeado.

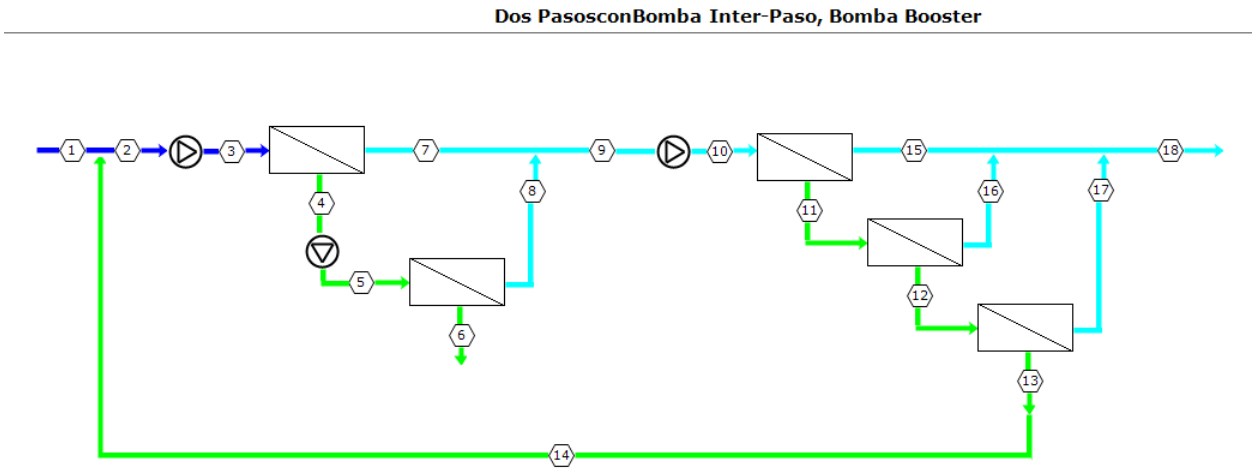


Figura 25: Diagrama de flujo simulación planta de osmosis inversa en IMS Design Hydranautics

El diagrama de flujo permite observar los equipos requeridos para configuración, los cuales son: bombas de alta presión, bomba booster, y cada cuadrado representa a un bastidor de membranas. A continuación, se describen los equipos, y se calcula cuantos serán necesarios para el dimensionamiento total.

Lista de equipos:

- **Bombas de alta presión**:

  Las bombas de alta presión son las encargadas de impulsar la solución a tratar hacia las membranas a la presión requerida por estas. En este bombeo es donde se consume la mayor parte de la energía que se necesita una planta de Osmosis Inversa, debido a que el consumo eléctrico de estas bombas es un punto crítico en la operación de la planta. Por esta razón se busca maximizar la eficiencia de estas bombas, y así lograr el menor consumo energético posible. Las bombas que se usarán para alta presión serán de cámara partida, ya que son las más utilizadas porque presentan rendimientos aceptables, su mantenimiento es bastante simple, aunque su coste de inversión es elevado. Al tratarse de una planta con doble paso de ósmosis, es necesario instalar bombeos intermedios entre el primer paso y el segundo.

  Se requieren dos bombas de altas presión en cada configuración, para el bombeo del caudal de alimentación en cada paso. La primera bomba tiene una presión de alimentación de 5,5 [bar] y un caudal de bomba de 3085,4 m^3/h, y la segunda tiene una presión de alimentación de 9,1 [bar] y un caudal de bomba de 2161,5 m^3/h. Además, en el Anexo 7 se presenta el cálculo de la potencia de bombeo, donde se obtiene que la potencia de la bomba del primer paso es de 644 kW, y la potencia de bombeo del segundo paso es de 714,5 kW.

- **Bomba Booster**:

  Es un tipo de bomba que se como bomba de refuerzo, se encarga de igualar la presión de fluido con la existente en el flujo de alimentación procedente de la bomba de alta presión. Se requiere una boba de este tipo por configuración. La potencia de bombeo de la etapa donde se ocupa la bomba booster es de 197 kW.

- **Membranas**:

  Las membranas se agrupan en lo que se denomina bastidor de membranas, que está formado por una serie de tubos porta membranas en los que se alojan las membranas.

  Loa tipos de membrana seleccionados son CPA5-LD para el primer paso de agua que corresponde a agua residual convencional, y ESPA 1, para el segundo paso. En cada paso hay 6 bastidores. Y la cantidad de tubos varía según cada paso.

  Etapa 1-1: Cantidad de elementos: 6*364 = 2184 tubos de presión.

  Etapa 1-2: Cantidad de elementos: 6*188 = 1128 tubos de presión.

  Etapa 2-1: Cantidad de elementos: 6*136 = 816 tubos de presión.

  Etapa 2-2: Cantidad de elementos: 6*67 = 402 tubos de presión.

Etapa 2-3: Cantidad de elementos: 6*36 = 216 tubos de presión.

Entonces el total de tubos de presión son 4.746 elementos, es decir, membranas.

En la siguiente tabla se presenta un resumen con la cantidad total de equipos por cada configuración, y para el total de la planta.

Tabla 29: Número de equipos necesarios para la planta de Osmosis inversa.

Equipo	Cantidad en 1 Estructura	Cantidad Total (5 Estructuras)
Bomba de alta presión	2	10
Bomba Booster	1	5
Membranas	4.746	23.730

7.2.2 Ubicación de la planta de Osmosis Inversa

La localización de la planta de osmosis inversa será en la comuna de Padre Hurtado, la cual pertenece a la provincia de Talagante al sur de la Región Metropolitana. A una altura de 406 metros sobre el nivel del mar.

La planta estará en cercanías de la planta de tratamiento de aguas servidas Biofactoría Mapocho-Trebal, ya que, se utilizará el agua que sale de esta última como agua de alimentación a la planta de osmosis inversa. A continuación, se muestran imágenes 23de Google Maps y Google Earth para tener una georreferencia de donde se encontrará la planta y como es el sitio.

Figura 26: Imagen Google Maps, ubicación estimada planta de Osmosis Inversa

Figura 27: Imagen Google earth terreno de ubicación planta de osmosis inversa.

En la Figura 27 , el rectángulo de color rojo representa el sitio posible de localización de la planta. Este terreno cumple con las condiciones necesarias para la instalación de la planta, pero sería necesario encontrar al dueño para poder acceder a él.

Es importante mencionar, que desde la planta de osmosis inversa saldrá una corriente de rechazo con alto contenido de sales concentradas, por lo que, se tiene que evaluar la posibilidad de realizar esta descarga directamente en el mar, para lo que se necesitaría conectar una tubería de desde la salida de la planta de osmosis, o buscar otras alternativas para reusar la salmuera.

7.2.3 Análisis de Costos de la Planta de Osmosis Inversa.

Capex:

Los costos de inversión están asociados a la instalación de la planta, y a los equipos requeridos para el funcionamiento; las bombas de alta presión, las bombas booster y la totalidad de membranas de osmosis inversa necesarias. En la siguiente tabla se muestran un resumen de la inversión total que sería necesaria para implementar la planta de con las dimensiones especificadas previamente.

Tabla 30: Capex de la planta de Osmosis Inversa.

	Unidad	Diseño Planta Base	Planta Total
Capacidad de la planta como permeado	m^3/día	46.656	233.280
Inversión específica	USD/m^3/día	922,90	922,90
Inversión	USD	43.058.740	**215.293.700**

Opex:

El componente mayor en los costos operacionales corresponde al costo de energía, ya que, como se mencionó previamente, las bombas de alta presión requieren de alto consumo de energía para superar la presión osmótica. En la Figura 28 se muestra un gráfico sobre la distribución estándar de los costos operacionales asociados al funcionamiento de una planta de Osmosis Inversa.

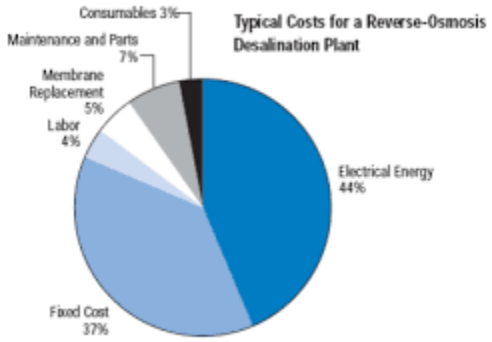


Figura 28: Distribución de gastos operacionales. Fuente: *(Minería Chilena, 2016)*

En la siguiente tabla, se muestran los parámetros utilizados para calcular los costos operacionales. Con ellos se realiza un flujo de caja.

Tabla 31: Costos operacionales.

	Unidad	Diseño Planta Base	Planta Total
Tasa de interés	%	4,5	4,5
Factor de Planta	%	90	90
Mantenimiento	%	2	2
Costo energético	USD/kWh	0,08	0,08
Costo Membraba	USD/elemento	650	650
Costo del antiincrustante	USD/kg	0,2	0,2
Consumo energético	kWh/m^3	0,86	4,3
Dosificación de antiincrustante	mg/l	0,1	0,5
Vida útil planta	año	15	15
Vida útil membrana	año	5	5
Número de membranas	unidades	4746	23730

Con los datos descritos en la tabla anterior se realiza el flujo de caja, y se obtiene el costo anual del m^3 de agua permeada.

Tabla 32: Costo total del agua producida

Costo total del agua	**USD/m^3**	**0,726**

Finalmente, el costo total del agua es **0,726 USD/m^3**, el cual es un valor que está dentro del rango esperado. En el **Anexo 8** se presentan las hojas de cálculo del flujo de caja asociado. El cual se realiza considerando que la vida útil de la planta es de 15 años.

Como la planta tiene un alto costo de inversión, se deberían buscar inversionistas privados como por ejemplo, la empresa sanitaria Aguas Andinas, ya que, les serviría para entregar un agua de mayor calidad a los canalistas de la primera sección del río Maipo. O bien, podría venderse el agua producida directamente a los agricultores.

Capítulo 8: Resultados, Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Resultados

Tomando en consideración los siguientes puntos:

- Los principales cultivos de la zona corresponden a Frutales: uva, palto, nogal, ciruelo, almendro y cítricos; y Hortalizas: choclo, lechuga, zapallo, cebolla y tomate. Los cuales, en su mayoría son sensibles a los altos niveles de conductividad eléctrica en el agua de riego.
- La calidad del agua de las subcuencas Maipo Medio, y Maipo Bajo, las cuales son en las que se tiene una mayor demanda de agua para riego de cultivos; se caracterizan por tener concentraciones altas de sulfato, cloruro y conductividad eléctrica. Por lo tanto, actualmente los agricultores de ambas subcuencas están regando sus cultivos con una calidad de agua que genera efectos adversos en sus cultivos, lo que se reproduce en una disminución del rendimiento.
- La normativa actual que regula la calidad de agua para riego en Chile es la NCh 1333, no contempla los posibles efectos sobre los cultivos que puede traer un margen de superación a los límites de la norma.
- La calidad del agua servida tratada que sale de la planta de tratamiento de aguas servidas, también se caracteriza por altos niveles de conductividad eléctrica, sulfatos, y cloruros.
- Los países más desarrollados del mundo están implementando normativas para el rehúso de agua residual en diferentes usos.

Considerando los puntos anteriores, los cuales se pudieron concluir con todo el trabajo realizado en esta memoria, se plantean a continuación límites asociados a distintos parámetros, con los cuales se disminuirían los efectos adversos en los cultivos de la región.

En primer lugar, se presenta en la siguiente Tabla 33 los niveles de concentración de metales que se proponen establecer, en base a las normativas internacionales revisadas (EPA, y Unión Europea). Cabe mencionar que estos límites también contemplan la calidad que debe tener el AST que quiera ser usada para riego de cultivos.

Tabla 33: Límites para concentraciones de Metales en la Propuesta de Normativa

Metal	Concentración Máxima (mg/l)
Aluminio	5
Arsénico	0,1
Berilio	0,1
Cadmio	0,01
Cromo	0,1
Cobalto	0,05
Hierro	5
Litio	2,5
Manganeso	0,2
Molibdeno	0,01
Níquel	0,2
Plata	0,2
Plomo	5
Selenio	0,02
Vanadio	0,1
Zinc	2,0

En segundo lugar, se presentan los límites que se proponen para los iones presentes en el agua, con los que no se tengan efectos adversos en los cultivos de la región Metropolitana. Estos límites se establecen en base a las normativas internacionales, y específicamente para el Cloruro se tomó como referencia lo presentado en la Tabla 11.

Tabla 34: Límites propuestos para concentraciones de iones críticos para el agua de riego de cultivos.

Iones	Concentración Máxima permitida (mg/l)
Sodio (Na^+)	70
Boro (B)	0,7
Cloruro (Cl^-)	180

Sulfato ($SO4^-$)	200

En tercer lugar, se presentan límites que se proponen para los niveles de Conductividad eléctrica del agua para riego de cultivos, y los sólidos disueltos totales. Esto se realizó tomando en consideración la alta sensibilidad de los principales cultivos de la región, a estos parámetros.

Tabla 35: Límites propuestos para Conductividad eléctrica y SDT en agua de riego de cultivos.

Parámetro	**Límite**
Conductividad eléctrica (CE)	250 µS/cm
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	500 mg/l

Este nivel de conductividad eléctrica aplica para todo tipo de agua que se desee utilizar para el riego de cultivos, ya sea agua proveniente de la cuenca del río, o agua residual tratada.

Con respecto al rehúso de agua servida tratada además de los parámetros especificados previamente, se debe tener en consideración la materia orgánica presenta, y también se debe considerar el tipo de riego y el tipo de cultivos, en la siguiente tabla se muestran los parámetros propuestos específicos para el riego con agua depurada.

Tabla 36: Calidad sugerida de parámetros biológicos para el rehúso de agua depurada.

Categoría	**Calidad del agua regenerada**	**DBO (mg/l)**	**Coliformes termotolerantes (nº/100 ml)**	**Posibles usos de riego y restricciones**
A	Agua regenerada de muy alta calidad	10	≤10	Riego agrícola de cultivos que se consumen crudos, riego urbano sin restricciones
B	Agua regenerada de alta calidad	20	≤ 200	Riego agrícola de cultivos que se consumen procesados, y riego urbano restringido
C	Agua regenerada de buena calidad	35	≤1000	Riego agrícola de cultivos no alimentarios.

8.2 Conclusiones

Mediante el estudio realizado se logró establecer en primera instancia, como se distribuye la demanda hídrica para uso de riego agrícola en las subcuencas de la región Metropolitana, luego se establecieron cuáles son los principales cultivos con mayores hectáreas plantadas en la región, los cuales son: Frutales: uva, palto, nogal, ciruelo, almendro y cítricos; y Hortalizas: choclo, lechuga, zapallo, cebolla y tomate, de esta forma se cumplió el primer objetivo específico planteado. Posteriormente, se establecieron los parámetros que se encuentran en mayor concentración en el agua superficial de la cuenca, los cuales fueron: sulfato, cloruro, y conductividad eléctrica. Estos parámetros están asociados a la salinidad del agua, y se demostró que altos niveles de estos parámetros traen efectos adversos en los cultivos plantados en la región, ya que, la mayoría son cultivos sensibles a los niveles de conductividad eléctrica y por ende sensibles a niveles de salinidad en el agua de riego. Por lo tanto, se puede concluir que actualmente los agricultores de la región están regando sus cultivos con agua de riego que trae efectos adversos en los cultivos, lo que se ve reflejado en el rendimiento del cultivo y por ende al tener un agua de mayor calidad se pueden alcanzar niveles de producción.

Con respecto a la calidad del Agua Servida Tratada que se produce en la PTAS Mapocho-Trebal, se logró establecer que los parámetros críticos son concordantes con los parámetros críticos del agua superficial de la cuenca. Específicamente el agua servida tratada presenta niveles más altos de conductividad eléctrica, ya que, el promedio en las mediciones del año 2021 fue de 1.740 µS/cm en el agua superficial de la subcuenca Maipo Medio y en el agua servida tratada fue de 1.950 µS/cm, lo que se puede deber al aporte de la materia orgánica, y al aporte de químicos que se agreguen en la planta depuradora. Por otra parte, el sulfato en el año 2021 tuvo una concentración promedio de 377,8 mg/l en el agua superficial de la subcuenca Maipo Medio, y una concentración promedio de 341,2 mg/l en el agua servida tratada, por lo tanto, la concentración de sulfato disminuye en el agua servida tratada, pero sigue estando por encima del límite permitido por la norma NCh 1333. En cuanto a cloruro, la concentración en el agua superficial de la subcuenca Maipo medio, fue en promedio 263,5 mg/l, y en al agua servida tratada la concentración promedio fue de 293,2 mg/l. Es por esto, que, si se plantea el escenario de rehusar esta agua servida tratada en riego de cultivos, se debe realizar un tratamiento previo para disminuir la concentración de sales presentes en el agua, y así disminuir la conductividad eléctrica.

En referencia a los estándares internacionales revisados, se puede concluir a modo general que, para la calidad del agua de riego, los países de Latinoamérica contemplados tienen límites bastante similares a la NCh 1333. De la misma manera ocurre al comparar la NCh 1333 con otros países como Australia, Estados Unidos (Estado de California), y Canadá. Solo la normativa canadiense presenta límites más restrictivos para los parámetros: cloruro y sulfato con valores de 100 y 200 mg/l respectivamente. Por otra parte, con respecto a los estándares internacionales sobre el rehúso de agua servida tratada, se puede concluir que los países desarrollados ya se encuentran contemplando el rehúso de las aguas residuales, debido al contexto de escasez del recurso agua. En específico, las dos normativas analizadas: las normas para el rehúso de la Unión Europea, y las establecidas por la EPA, se definen clases de calidad del agua regenerada asociadas al consumo del cultivo y al método de riego. La normativa europea establece cinco clases de calidad de agua regenerada, donde la clase más restrictiva (Clase A) corresponde al agua que se usará para el riego de cultivos de alimentos que se consumen crudos. También se establecen requisitos de calidad asociados a la demanda bioquímica de oxígeno DBO, y a los tratamientos asociados.

Por último, con respecto a los posibles tratamientos para reducir los altos niveles de conductividad eléctrica, sulfatos, y cloruros presentes en el agua servida tratada, el más efectivo y utilizado actualmente es la Osmosis Inversa. Por este motivo se planteó una simulación de diseño de una posible planta de Osmosis Inversa, para disminuir la concentración de sales del agua servida tratada que sale de una planta de tratamiento de aguas servidas, y que así pueda ser utilizada para el riego de los cultivos de la primera sección del río Maipo. Esta planta es simulada con un caudal de alimentación de 3 m^3/s, es decir, 259.200 m^3/día, el cual es bastante alto, y por lo tanto el diseño de planta requiere de una alta inversión de 215.293.700 millones de dólares, asociada a la compra de equipos, instalación, instrumentación, sistemas eléctricos, tuberías de transporte del agua, gastos de construcción, entre otros. Y los costos operacionales alcanzan la cifra de 65.090.304 millones de dólares, asociados los costos de mantenimiento, energía eléctrica, mano de obra, reemplazo de membranas, entre otros. Y al realizar el flujo de caja se obtiene que el costo del agua recuperada es de 0,726 USD/m^3. Pero, el aspecto más significativo es mediante el uso de la tecnología de Osmosis Inversa se logra disminuir en más de un 95% la concentración de iones, y la conductividad eléctrica de agua, por lo tanto, es un método con alta eficacia para el caso de estudio.

8.3 Recomendaciones

La calidad del agua con la que se riegan los cultivos es un tema importante, que se debe abordar de manera especializada según los parámetros críticos que presente, y las consecuencias que estos tienen sobre los cultivos plantados. El análisis y planteamiento de regulaciones no debe ser generalizado para todo el país, ya que, cada región tiene parámetros críticos distintos, debido a las diversas condiciones geográficas del país, y también debido a las distintas actividades económicas que presenta nuestro país, las cuales descargan efluentes a las cuencas del país.

Los agricultores deberían tener conocimiento de los efectos adversos que generan los parámetros críticos de la calidad del agua sobre los cultivos. Y se recomienda que realicen proyectos para mejorar la calidad como por ejemplo la instalación de plantas de osmosis inversa, para disminuir los niveles de salinidad.

Referencias

A Fauzi, T. M. (2022). Nanofiltration. *Membrane Separation Processes*, 61-68.

Agriculture and Agri-Food Canada. (Junio de 2000). Irrigation and Salinity. Canada.

AMecological. (26 de Agosto de 2018). Red Agrícola. Obtenido de Red Agrícola: https://www.redagricola.com/cl/calcio-un-elemento-clave-en-la-agricultura-de-exportacion/

Carbotecnia. (13 de Octubre de 2021). Obtenido de https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/solidos-disueltos-totales-tds/

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

Dirección General de Aguas. (2017). Estimanción de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Santiago: Dirección general de aguas DGA.

Flores T. (2020). Propuesta para el manejo y tratamiento de aguas de uso agrícola: aplicación en la zona norte de Chile. Santiago: Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad de Chile.

Flores, T. (2020). Propuesta para el manejo y tratamiento de aguas de uso agrícola: Aplicación en la zona norte de Chile. Santiago de Chile.

Fritzmann, L. W. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination , 1-76.

García, Á. (2012). Criterios moderno para evaluación de la calidad del agua para riego. IAH.

García, Y. (2015). Calidad de Agua con Fines de Riego. Cuba: Revista digital de Medio Ambiente.

Garreaud et al. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. International, 1-19.

Grattan, S. (2018). Consejo sobre la sequía: La tolerancia de los cultivos a la sal. Universidad de California.

InduAmbiente. (Noviembre-Diciembre de 2021). Apuesta por el Reúso: Ante la sequía en la RM, Aguas Andinas desarrolla proyecto con regantes para reutilizar las aguas depuradas. *InduAmbiente*, págs. 42-43.

Instituto Nacional de Normalización . (1987). Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

IRMA Standar. (2018). *Water Quality Criteria by End-Use Tables.*

Land and Water Division. (2006). Evapotranspiración del Cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO.

Minería Chilena. (14 de Enero de 2016). *Minería Chilena.* Obtenido de https://www.mch.cl/informes-tecnicos/agua-de-mar-y-desalinizacion-una-solucion-mas-amigable-pero-a-mayores-costos/

Molina, G. T. (2014). Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile. Santiago: Dirección General de Aguas.

Orozco-Jaramillo, M. L. (2012). Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater. Londres: IWA.

Parlamento europeo y Consejo de la Unión Europea . (25 de Mayo de 2020). Requisitos mínimos para la reutilización del agua. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. 34-55.

Philip Myburgh. (2018). Handbook for irrigation of wine grapes in South Africa. South Africa: Agricultural Research Council.

Stehr A et al. (2019). Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático. Santiago: Mesa del Agua.

Texas Agricultural Extension Service. (1996). Irrigation Water Quality Standars and Salinity Management Strategies. Texas: The Texas A&M University System.

van der Aa, M. (2003). Classification of Mineral Water Types and Comparison with Drinking Water Standars. Environmental Earth Sciences, 554-563.

Winpenny et al. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Roma: FAO.

Yáñez, L. (2018). Información Regional Región Metropolitana. Santiago: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.

Anexos

1. **Anexo 1**: Niveles de calidad ambiental, según el Decreto Supremo 53.

Tabla 37: Niveles de calidad ambiental según DS 53

N°	Parámetro	Unidad	MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MP-1	MP-2	AN-1	LA-1	PU-1	PU-2
1	Oxígeno disuelto	mg/l	8	8	8	8	6	8	6	6	5	8	5
2	Conductividad eléctrica	µS/cm	1900	1900	1900	1600	1600	400	1600	1600	1900	400	1750
3	pH	-	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,7	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5
4	Cloruro	mg/l	300	240	240	180	180	30	240	180	240	30	240
5	Sulfato	mg/l	430	380	380	380	380	150	380	380	480	150	380
6	Demanda biológica de oxígeno	mg/l	8	8	8	8	8	5	10	10	10	5	10
7	Nitrato	mg/l $N\text{-}NO_3^-$	0,5	0,5	0,5	4	8	1,5	10	4	4	1,5	10
8	Ortofosfato	mg/l $P\text{-}PO_4^-$	0,08	0,08	0,08	0,15	1	0,08	2,5	0,15	0,6	0,6	2,5
9	Plomo disuelto	mg/l	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
10	Níquel disuelto	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
11	Zinc disuelto	mg/l	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
12	Cromo total	mg/l	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

2. **Anexo 2**: Coordenadas de las estaciones de monitoreo de la cuenca del río Maipo.

Tabla 38: Coordenadas de estaciones de monitoreo del río Maipo.

Nombre Estación	Subcuenca	Comuna	Latitud	Longitud	Altitud msnm
Río Maipo en San José de Maipo	Rio Maipo Alto	San José de Maipo	33° 37' 55"	70° 21' 12"	930
Río Maipo después de Estero Manzanito	Rio Maipo Alto	San José de Maipo	33° 44' 26"	70° 17' 50"	1127
Río Clarillo antes junta Río Maipo	Rio Maipo Medio	Pirque	33° 38' 50"	70° 37' 50"	604
Río Maipo antes junta Río Clarillo	Rio Maipo Medio	Pirque	33° 38' 31"	70° 37' 34"	615
Río Maipo antes Canal San Carlos	Rio Maipo Medio	San José de Maipo	33° 35' 29"	70° 28' 12"	760

Río Maipo después de junta con E. Cholqui	Rio Maipo Bajo	Melipilla	33° 44' 15"	71° 15' 47"	122
Estero Pungue en ruta 78	Rio Maipo Bajo	Melipilla	33° 39' 41"	71° 20' 13"	93
Río Mapocho en Los Almendros	Río Mapocho Alto	Lo Barnechea	33° 22' 14"	70° 27' 04"	966
Estero Arrayan en la Montosa	Río Mapocho Alto	Lo Barnechea	33° 19' 44"	70° 27' 34"	880
Estero Lampa antes de Río Mapocho	Río Mapocho Bajo	Pudahuel	33° 26' 12"	70° 49' 44"	450
Río Mapocho en el Monte	Río Mapocho Bajo	El Monte	33° 40' 54"	70° 58' 29"	

3. **Anexo 3**: Gráficos de calidad de agua de la Dirección General de Aguas, de diferentes parámetros.

   a) Arsénico

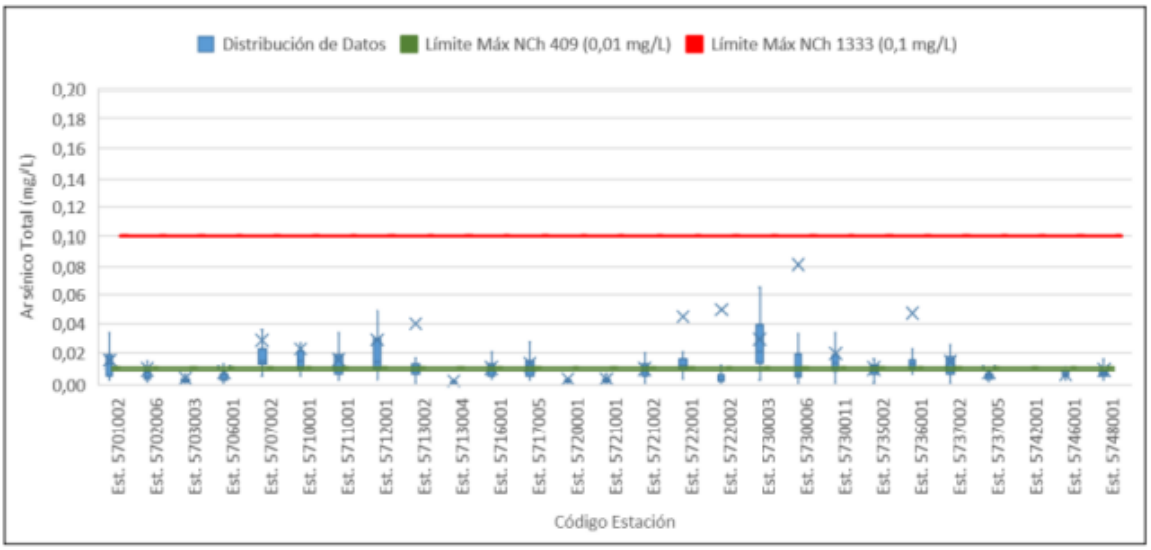


Figura 29: Gráfico de cajas para Arsénico total (mg/l), para las aguas superficiales de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017.

   b) Cobre

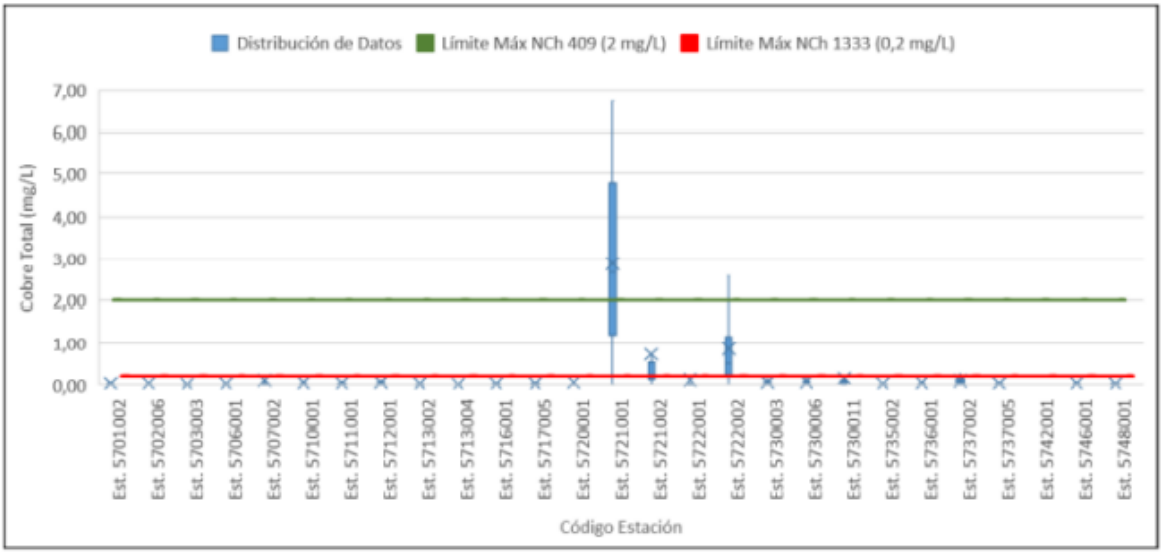


Figura 30: Gráfico de cajas para Cobre total (mg/l), para las aguas superficiales de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017.

c) Cromo

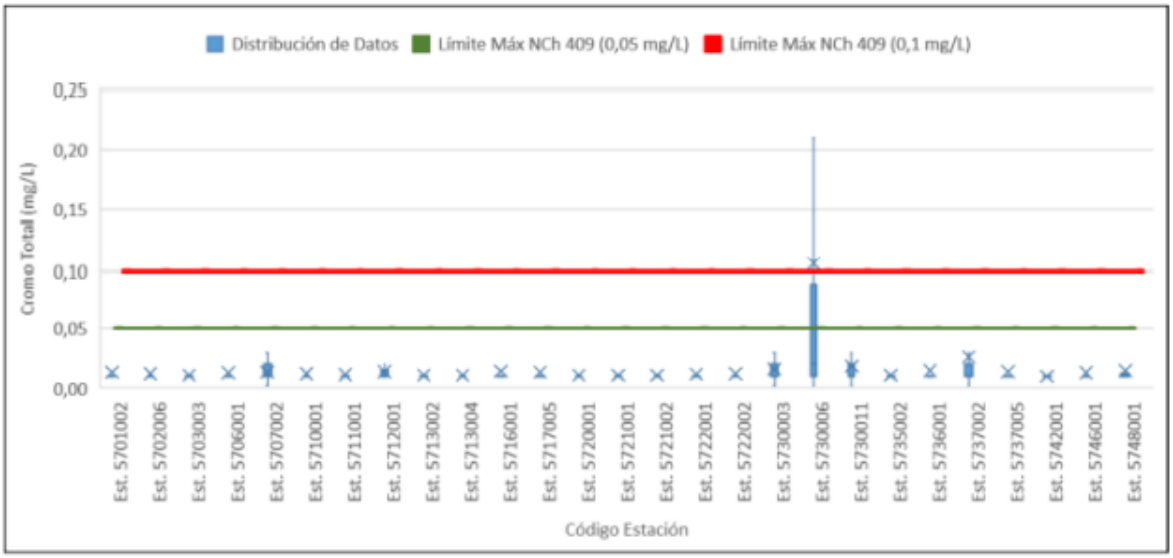


Figura 31: gráfico de cajas para Cromo total (mg/l), para las aguas superficiales de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA 2017.

4. **Anexo 4:** Tabla comparativa calidad de agua servida tratada AST para el año 2021, con NCh 1333

Tabla 39: Comparación entre AST y NCh 1333

Parámetro	Unidad	NCh 1333 para agua de riego	Valor Promedio en AST 2021
Aluminio	mg/l	5,000	**0,395**
Arsénico	mg/l	0,100	**0,050**
Bario	mg/l	4,000	**0,280**
Berilio	mg/l	0,100	**0,023**
Boro	mg/l	0,750	**0,352**
Cadmio	mg/l	0,010	**0,057**
Cianuro	mg/l	0,200	**0,058**
Cloruro	mg/l	200,000	**283,593**
Cobalto	mg/l	0,050	**0,015**
Cobre	mg/l	0,200	**0,029**
Conductividad	µS/cm	750,000	**1877,837**
Cromo	mg/l	0,100	**0,267**
Fluoruro	mg/l	1,000	**0,409**
Hierro	mg/l	5,000	**0,488**
Litio	mg/l	2,500	**0,317**
Litio cítrico	mg/l	0,075	**0,051**
Manganeso	mg/l	0,200	**0,059**
Mercurio	mg/l	0,001	**0,0003**
Molibdeno	mg/l	0,010	**0,010**
Níquel	mg/l	0,200	**0,030**
pH		5,5 - 9	**7,370**
Plata	mg/l	0,200	**0,028**
Plomo	mg/l	5,000	**0,345**
Selenio	mg/l	0,020	**0,011**
Sodio porcentual	%	35,000	**46,37**
Sólidos Disueltos	mg/l	500,000	**1066,90**
Sulfato	mg/l	250,000	**334,28**
Vanadio	mg/l	0,100	**0,017**

Zinc	mg/l	2,000	**0,194**

5. **Anexo 5:** Hojas de datos resultados simulación en software IMS Design Hydranautics,

Dos PasosconBomba Inter-Paso, Turbo (83,1 %), Bomba Booster

Nombre del proyecto	AST2						página : 1/5
Calculado por	Alejandra Bravo			Caudal de permeado	51840,0	46656,0	m3/d
Caudal bomba alta presión	3085,39	2161,90	m3/h	Caudal agua bruta	68872,8		m3/d
Presión de alimentación	5,5	9,1	bar	Conversión	70,00	90,00	%
Temperatura de alimentación		25,0	°C(77,0°F)	Conversión total del sistema		67,7	%
pH agua alimentación	7,37	5,82		Edad elemento	0,0	0,0	años
Dosis quimico,mg/l, - / -	None	None		Disminución de flujo %, por año	15,0	3,0	
Presión de escape de la turbina		0,30	bar				
Turbo boost pressure		3,05	bar	Factor de ensuciamiento	1,00	1,00	%
Energía específica		0,71	kwh/m3	Aumento de SP, per año	12,0	5,0	%
NDP paso	5,5	6,8	bar	Perdida de carga entre etapas		0,2	bar
Flujo promedio	17,5	36,5	lmh				

Paso - Etapa	Perm. Caudal m3/h	Caudal / Tubo Alimentación m3/h	Caudal / Tubo Conc m3/h	Flujo lmh	DP bar	Flujo Max lmh	Beta	Presión de alimentación Perm. bar	Presión de alimentación Boost bar	Presión de alimentación Conc bar	Perm. TDS mg/l	Agua residual convencional Elemento Tipo	Agua residual convencional Elemento Cantidad	Agua residual convencional PV# x Elem #
1-1	1230,8	8,5	5,1	15,1	0,6	16,5	1,09	0	0	5	6,2	CPA5-LD	2184	364 x 6
1-2	931,1	9,9	4,9	22,2	0,6	24,3	1,13	0	3,3	7,7	9,6	CPA5-LD	1128	188 x 6
2-1	1332,8	15,9	6,1	44	2,5	50,8	1,21	0	0	6,6	0,6	ESPA1	816	136 x 6
2-2	455,2	12,3	5,5	30,6	1,9	35,5	1,16	0	0	4,5	1,6	ESPA1	402	67 x 6
2-3	155,1	10,3	6	19,4	1,6	23,6	1,1	0	0	2,6	3,4	ESPA1	216	36 x 6

Ion (mg/l)	Agua bruta	Agua de alimentación	Permear agua	Rechazo
Dureza, como CaCO3	449,40	418,65	0,025	1396,3
Ca	144,76	134,85	0,008	449,8
Mg	21,35	19,89	0,001	66,3
Na	187,50	175,68	0,230	582,1
K	19,64	18,43	0,037	60,9
NH4	0,00	0,00	0,000	0,0
Ba	0,000	0,000	0,000	0,0
Sr	0,000	0,000	0,000	0,0
CO3	0,00	0,00	0,000	0,0
HCO3	0,10	0,09	0,001	0,3
SO4	462,44	430,95	0,054	1436,7
Cl	283,60	265,76	0,361	880,4
F	0,33	0,31	0,002	1,0
NO3	0,00	0,00	0,000	0,0
PO4	0,00	0,00	0,000	0,0
SiO2	0,00	0,00	0,000	0,0
B	0,48	0,49	0,326	0,8
CO2	0,01	0,01	0,01	0,01
TDS	**1120,20**	**1046,45**	**1,02**	**3478,36**
pH	**7,37**	**7,35**	**5,42**	**7,82**

Saturaciones	**Agua bruta**	**Agua de alimentación**	**Rechazo**	**Límites**
CaSO4 / ksp * 100, %	15	13	60	400
SrSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	1200
BaSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	10000
Saturación de SiO2,%	0	0	0	140
CaF2 / ksp * 100, %	2	1	33	50000
Indice de saturación Ca3 (PO4) 2	0,0	0,0	0,0	2,4
Índice de saturación Langelier	-3,06	-3,14	-1,69	2,5
Fuerza ionica	0,03	0,03	0,08	
Presión osmotica, bar	0,6	0,5	1,7	

Dos PasosconBomba Inter-Paso, Turbo (83,1 %), Bomba Booster

Nombre del proyecto	AST2						página : 2/5
Calculado por	Alejandra Bravo						
Caudal bomba alta presión	3085,39	2161,90	m3/h	Caudal de permeado	51840,0	46656,0	m3/d
Presión de alimentación	5,5	9,1	bar	Caudal agua bruta	68872,8		m3/d
Temperatura de alimentación		25,0	°C(77,0°F)	Conversión	70,00	90,00	%
pH agua alimentación	7,37	5,82		Conversión total del sistema		67,7	%
Dosis químico,mg/l, - / -	None	None		Edad elemento	0,0	0,0	años
Presión de escape de la turbina		0,30	bar	Disminución de flujo %, por año	15,0	3,0	
Turbo boost pressure		3,05	bar	Factor de ensuciamiento	1,00	1,00	%
Energía específica		0,71	kwh/m3	Aumento de SP, per año	12,0	5,0	%
NDP paso	5,5	6,8	bar	Perdida de carga entre etapas		0,2	bar
Flujo promedio	17,5	36,5	lmh				

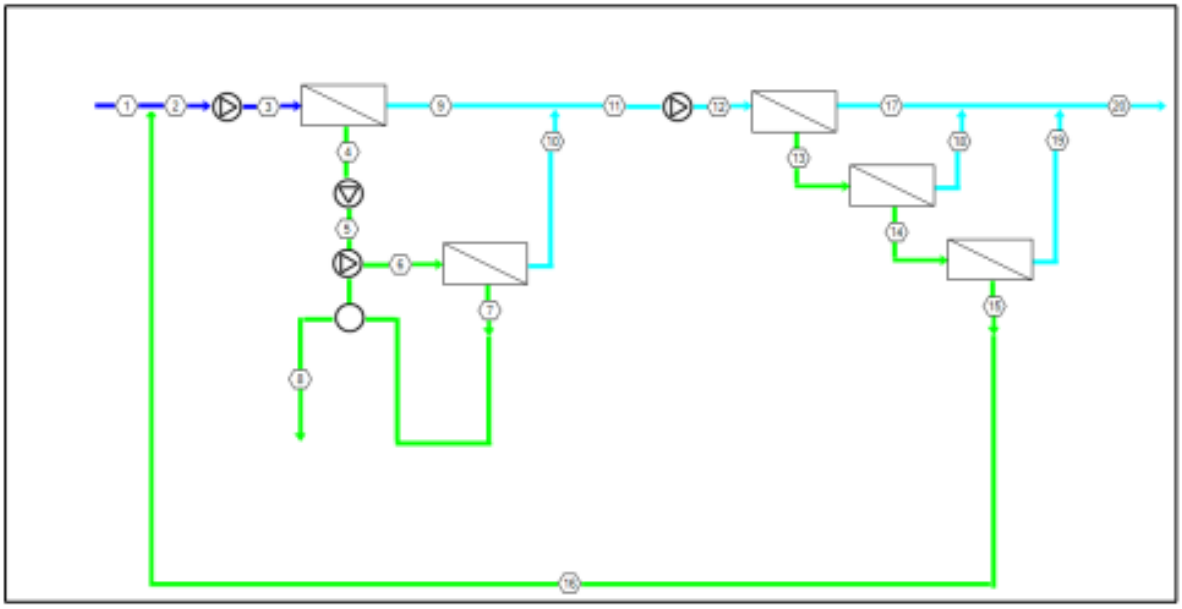
Paso - Etapa	Perm. Caudal m3/h	Caudal / Tubo Alimentación m3/h	Caudal / Tubo Conc m3/h	Flujo lmh	DP bar	Flujo Max lmh	Beta	Presión Perm. bar	Tipo de Alimentación Boost bar	Conc bar	Perm. TDS mg/l	Agua residual convencional Elemento Tipo	Elemento Cantidad	PV# x Elem #
1-1	1230,8	8,5	5,1	15,1	0,6	16,5	1,09	0	0	5	6,2	CPA5-LD	2184	364 x 6
1-2	931,1	9,9	4,9	22,2	0,6	24,3	1,13	0	3,3	7,7	9,6	CPA5-LD	1128	188 x 6
2-1	1332,8	15,9	6,1	44	2,5	50,8	1,21	0	0	6,6	0,6	ESPA1	816	136 x 6
2-2	455,2	12,3	5,5	30,6	1,9	35,5	1,16	0	0	4,5	1,6	ESPA1	402	67 x 6
2-3	155,1	10,3	6	19,4	1,6	23,6	1,1	0	0	2,6	3,4	ESPA1	216	36 x 6

Paso - Etapa	Elemento no.	Alimentación Presión bar	Presión Caída bar	Conc Osmo. bar	NDP bar	Permear agua Caudal m3/h	Permear agua Flujo lmh	Beta	Permeado (Elemento individual) TDS	Ca	Na	SO4	Cl
1-1	1	5,5	0,12	0,6	5	0,6	16,5	1,07	4,3	0,183	1,141	0,714	1,76
1-1	2	5,4	0,11	0,6	4,8	0,6	16	1,07	4,9	0,209	1,305	0,817	2,013
1-1	3	5,3	0,1	0,7	4,6	0,6	15,4	1,08	5,6	0,24	1,5	0,939	2,313
1-1	4	5,2	0,09	0,7	4,5	0,6	14,9	1,08	6,4	0,278	1,735	1,087	2,676
1-1	5	5,1	0,08	0,8	4,3	0,5	14,4	1,09	7,5	0,324	2,023	1,268	3,121
1-1	6	5	0,07	0,9	4,2	0,5	13,9	1,09	8,8	0,382	2,383	1,495	3,676
1-2	1	8,3	0,15	1	7,3	0,9	24,3	1,09	5,7	0,25	1,56	0,979	2,406
1-2	2	8,2	0,13	1,1	7,1	0,9	23,4	1,1	6,8	0,298	1,856	1,165	2,863
1-2	3	8	0,11	1,2	6,9	0,8	22,7	1,1	8,1	0,36	2,239	1,407	3,454
1-2	4	7,9	0,1	1,3	6,6	0,8	21,9	1,11	9,9	0,442	2,747	1,727	4,237
1-2	5	7,8	0,08	1,5	6,4	0,8	20,9	1,12	12,4	0,554	3,441	2,164	5,307
1-2	6	7,7	0,07	1,7	6,1	0,7	20	1,13	15,9	0,713	4,424	2,785	6,823
2-1	1	9,1	0,65	0	8,8	1,9	50,8	1,12	0,4	0,002	0,062	0,014	0,098
2-1	2	8,4	0,54	0	8,2	1,8	47,4	1,13	0,4	0,003	0,076	0,017	0,119
2-1	3	7,9	0,45	0	7,7	1,7	44,5	1,14	0,5	0,003	0,092	0,021	0,145
2-1	4	7,4	0,36	0	7,3	1,6	42,1	1,15	0,6	0,004	0,113	0,026	0,177
2-1	5	7,1	0,29	0	6,9	1,5	40,2	1,18	0,7	0,005	0,139	0,032	0,218
2-1	6	6,8	0,22	0	6,7	1,4	38,7	1,21	0,8	0,006	0,174	0,04	0,272
2-2	1	6,4	0,46	0	6,1	1,3	35,5	1,11	1,1	0,008	0,224	0,052	0,351
2-2	2	5,9	0,39	0	5,7	1,2	33,1	1,11	1,3	0,009	0,269	0,062	0,422
2-2	3	5,5	0,33	0	5,3	1,1	30,9	1,12	1,5	0,011	0,323	0,075	0,506
2-2	4	5,2	0,28	0	5	1,1	29,2	1,13	1,7	0,013	0,387	0,09	0,607
2-2	5	4,9	0,23	0	4,8	1	27,7	1,14	1,9	0,016	0,465	0,109	0,729
2-2	6	4,7	0,18	0	4,6	1	26,5	1,16	2,3	0,02	0,563	0,132	0,882
2-3	1	4,3	0,37	0	4,1	0,9	23,6	1,08	2,7	0,024	0,682	0,161	1,069
2-3	2	3,9	0,32	0	3,7	0,8	21,6	1,1	3	0,028	0,78	0,184	1,222
2-3	3	3,6	0,28	0	3,4	0,7	19,9	1,1	3,3	0,031	0,884	0,209	1,385
2-3	4	3,3	0,25	0	3,1	0,7	18,3	1,1	3,6	0,035	0,993	0,236	1,556
2-3	5	3,1	0,22	0	2,9	0,6	16,8	1,09	3,9	0,04	1,104	0,263	1,729
2-3	6	2,8	0,2	0	2,7	0,6	15,6	1,09	4,3	0,044	1,211	0,29	1,897

Dos PasosconBomba Inter-Paso, Turbo (83,1 %), Bomba Booster

Nombre del proyecto AST2 página : 5/5

Temperatura : 25,0 °C Edad elemento, P1/P2 : 0,0/0,0 años



Corriente n °	Caudal (m3/h)	Presión (bar)	TDS	SO4	Conductividad
1	2869	0	1120	462	2214
2	3085	0	1046	431	2085
3	3085	5,55	1046	431	2085
4	1855	4,97	1737	716	3267
5	1855	5,47	1737	716	3267
6	1855	8,32	1737	716	3267
7	923	7,67	3478	1437	6113
8	923	0,300	3478	1437	6113
9	1231	0	6,16	1,04	12,9
10	931	0	9,57	1,66	20,0
11	2162	0	7,63	1,31	15,9
12	2162	9,09	7,63	1,31	15,9
13	827	6,58	19,0	3,38	39,3
14	372	4,49	40,4	7,41	84,3
15	216	2,64	66,9	12,6	140
16	216	0	66,9	12,6	140
17	1333	0	0,562	0,024	3,30
18	455	0	1,58	0,084	3,20
19	155	0	3,38	0,218	6,20
20	1943	0	1,02	0,054	2,80

6. **Anexo 6:** Especificaciones de membranas seleccionadas

Tabla 40: Características membranas seleccionadas

Modelo	Producción nominal (gpd)	% Rechazo de sal	Tamaño in*in
CPA5-LD	11000	99,7	8*40
ESPA 1	12000	99,4	8*40

7. **Anexo 7:** Cálculo de potencia de las bombas del proceso de Osmosis Inversa.

Cálculo de potencia

		Paso1	Bomba boo Etapa 2	Paso2
Bomba / incremento de presión	bar	5,7	3,0	9,1
Caudal de producto	m3/h	2159,8		1943,8
Caudal bomba	m3/h	3085,4	1805,4	2161,3
Rendimiento bomba	%	83,0	83,0	83,0
Rendimiento motor	%	93,0	93,0	93,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	644,0	197,0	714,5
	BHP	863,2	264,1	957,8
Potencia total de bombeo	**kw**	1555,5		
Potencia especifica de bombeo	**kwh/m3**	0,80		

Figura 32: Cálculo potencia específica de bombeo

8. **Anexo 8:** Flujo de caja planta de Osmosis Inversa.

Tabla 41: Precios asociados al flujo de caja.

Precio del Agua en Chile	
USD/m3	1,45
Caudal permeado	
m3/día	259.200
m3/año	94608000
Costo Anual del Agua	
USD/año	$ 137.181.600
Precio Membranas	
USD	650
Membranas Totales	23730
Costo total membranas	
USD	$ 15.424.500,00
Precio electricidad	
USD/kWh	0,08
Consumo energético	
kWh/m3	4,3
Días operacionales al año	365
Costo Anual de Electricidad	
USD/año	$ 32.545.152

Tabla 42: Costos de Inversión

Costos de Inversión	% Del total de la inversión		
Inversión Total	100%	USD	$ 215.293.700
Costos Directos			
Compra de equipos	30%	USD	$ 64.588.110
Inatalación de equipos	6%	USD	$ 12.917.622
Instrumentación y control	3%	USD	$ 6.458.811
Cañerías	18%	USD	$ 38.752.866
Sistemas eléctricos	5%	USD	$ 10.764.685
Edificaciones	10%	USD	$ 21.529.370
instalaciones de servicio	5%	USD	$ 10.764.685
Terrenos	3%	USD	$ 6.458.811
Costos Indirectos			
Ingeniería y supervisión	6%	USD	$ 12.917.622
Gastos de construcción	7%	USD	$ 15.070.559
Gastos Legales	2%	USD	$ 4.305.874
Imprevistos	5%	USD	$ 10.764.685

Tabla 43: Costos Operacionales

Costos Operacionales		
	% del Opex Típico	Costos USD
Reemplazo de membranas	5%	$ 3.254.515
Mano de Obra	5%	$ 3.254.515
Productos químicos	3%	$ 1.952.709
Energía eléctrica	50%	$ 32.545.152
Cargos fijos	35%	$ 22.781.606
Mantenimiento	2%	$ 1.301.806
Total	100%	$ 65.090.304

Tabla 44: Extracto de Flujo de caja

Año		0	1	2	3	4	5
Ahorros							
Costo del agua	USD		$ 137.181.600	$ 137.181.600	$ 137.181.600	$ 137.181.600	$ 137.181.600
Costos op							
Electricidad	USD		$ -32.545.152	$ -32.545.152	$ -32.545.152	$ -32.545.152	$ -32.545.152
reemplazo de membrana	USD		$ -3.254.515	$ -3.254.515	$ -3.254.515	$ -3.254.515	$ -3.254.515
fijos			$ -26.036.122	$ -26.036.122	$ -26.036.122	$ -26.036.122	$ -26.036.122
Depreciación			$ -6.615.717	$ -6.615.717	$ -6.615.717	$ -6.615.717	$ -6.615.717
Ganancias sin impuestos			$ 68.730.095	$ 68.730.095	$ 68.730.095	$ 68.730.095	$ 68.730.095
Impuestos	27%		$ 18.557.126	$ 18.557.126	$ 18.557.126	$ 18.557.126	$ 18.557.126
Ganancias con impuestos			$ 50.172.969	$ 50.172.969	$ 50.172.969	$ 50.172.969	$ 50.172.969
Inversión	USD	$ -215.293.700					
Flujo de caja	USD	$ -215.293.700	$ 68.730.095	$ 68.730.095	$ 68.730.095	$ 68.730.095	$ 68.730.095

m3/año	94608000
Costo del agua	
UDS/m3	0,726