



# Evaluación de los impactos ambientales de diferentes tecnologías de abatimiento de nitrato implementadas en un sistema de agua potable



Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Ambiental

POR

Cecilia Belén Muñoz Fernández

Profesor Guía: Dra. Ana Carolina Baeza Freer

Co-Guía: Dra. Yannay Casas Ledón

19 de abril 2023

**“Evaluación de los impactos ambientales de diferentes tecnologías de abatimiento de nitrato implementadas en un sistema de agua potable rural.”**

**Profesor Guía: Dra. Carolina Baeza Freer**



**Profesor Co-Guía: Dra. Yannay Casas Ledón**



**Profesor Comisión: Dr. Ricardo Figueroa Jara**



**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima ( En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, abril 2023**

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1. Sistema de agua potable en Chile .....	3
2.1.1 Tipos de sistemas de abastecimiento de agua potable .....	3
2.2. Ley N°20998: Regulación de los servicios sanitarios rurales.....	4
2.3. Agua potable rural .....	10
2.3.1. La calidad del agua y sus contaminantes.....	11
2.4. La presencia de nitrato en el agua potable .....	14
2.4.1. El nitrato en la salud humana .....	15
2.4.2. Problemas en Chile .....	15
2.5. Tecnologías de abatimiento para el nitrato en el agua potable.....	16
2.5.1. Intercambiador iónico.....	22
2.5.2. Osmosis Inversa.....	23
2.5.3. Electrodialisis .....	24
2.5.4. Aplicación en los sistemas de agua potable rural en Chile .....	27
2.6. Metodología de análisis de ciclo de vida.....	31
2.6.1. Aplicación del ACV en sistemas de tratamiento de agua potable .	34
2.7.Pregunta de Investigación .....	39
2.8.Objetivos.....	39
2.8.1. Objetivo General.....	39
2.8.2. Objetivos Específicos .....	39

3. Metodología.....	39
3.1. Establecer área de estudio .....	39
3.1.1. Área de estudio seleccionada .....	40
3.2. Selección de las tecnologías de abatimiento .....	43
3.3. Establecer los escenarios .....	44
3.3.1. Insumos y recursos necesarios para el funcionamiento de los escenarios .....	46
3.3.2. Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida .....	49
3.3.3. Consideración del inventario .....	50
4. Resultados y discusión .....	51
4.1. Análisis de inventario .....	51
4.2. Perfil Ambiental.....	52
4.2.1. Salmuera.....	53
4.2.2. Electricidad.....	54
4.2.3. Tratamiento de aguas servidas .....	54
4.3. Perfil de Daño .....	55
4.4. Impactos totales de cada escenario para diferentes unidades funcionales.....	55
4.5. Contribución de la investigación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	56
5. Conclusiones .....	57
6. Referencias .....	59
7. Anexos.....	63



7.1. Anexo n°1 .....	63
7.2. Anexo n°2 .....	64
7.3. Anexo N°3.....	66
7.4. Anexo N°4.....	80
7.5. Anexo N°5.....	81
7.6. Anexo n°6 .....	81
7.6.1. Resultados de los cálculos realizados.....	85
7.8. Anexo N°8.....	88
7.9. Anexo N°9.....	88
7.9.1. Dosificación de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	89
7.9.2. Resultados de los cálculos realizados.....	89
7.10. Anexo N°10.....	90
7.11. Anexo N°11.....	91
7.12. Anexo n°12 .....	93

### Índice de tablas

Tabla 2.1: Cambios efectuados ante la promulgación de la Ley 20.998 .....	6
Tabla 2.2: Cambios efectuados ante la promulgación de la Ley 20.998 (Continuación).....	7
Tabla 2.3: Cambios efectuados ante la promulgación de la Ley 20.998 (Continuación).....	8

Tabla 2.4: Requerimientos para la conservación de las licencias en los comités y/o cooperativas.....	9
Tabla 2.5: Parámetros de contaminantes frecuentes encontrados en los APR´s según fuente de captación.....	12
Tabla 2.6: Implementación de las técnicas de separación para abatir el nitrato en sistemas de agua potable .....	19
Tabla 2.7: Implementación de las técnicas de separación para abatir el nitrato en sistemas de agua potable (Continuación).....	20
Tabla 2.8: Ventajas y desventajas de las tecnologías de abatimiento de nitrato. ....	26
Tabla 2.9: Evaluación de la experiencia nacional .....	27
Tabla 2.10: Ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento a la implementación de las nuevas tecnologías en los APR´s.....	29
Tabla 2.11: Ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento a la implementación de las nuevas tecnologías en los APR´s. (Continuación) .....	30
Tabla 2.12: Aplicación del ACV en investigaciones científicas .....	35
Tabla 2.13: Aplicación del ACV en investigaciones científicas (Continuación)..	36
Tabla 2.14: Aplicación del ACV en investigaciones científicas (Continuación)..	37
Tabla 3.1: Fuentes de información de los insumos y recursos de cada escenario .....	48
Tabla 3.2: Entradas de los escenarios, calculados en base a 1 m <sup>3</sup> de agua extraída.....	51
Tabla 3.3: Salidas de los escenarios, calculados en base a 1 m <sup>3</sup> de agua extraída.....	52
Tabla 7.1: Entrevista al operador sobre el funcionamiento del APR Tomeco ....	63
Tabla 7.2: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de enero.....	66

Tabla 7.3: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de febrero. ....	67
Tabla 7.4: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de marzo.....	68
Tabla 7.5: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de abril. ....	69
Tabla 7.6: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de mayo. ....	70
Tabla 7.7: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de junio. ....	71
Tabla 7.8: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de julio. ....	72
Tabla 7.9: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de agosto. ....	73
Tabla 7.10: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de septiembre.....	74
Tabla 7.11: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de octubre.....	75
Tabla 7.12: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de noviembre. ....	77
Tabla 7.13: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de diciembre. ....	78
Tabla 7.14: Promedio mensual de los datos tabulados del año 2019 en el APR de Tomeco.....	80
Tabla 7.15: Promedios mensuales con el máximo rendimiento del APR.....	80
Tabla 7.16: Características del intercambiador iónico OPADEN 820 .....	81
Tabla 7.17: Características resina aniónica .....	82
Tabla 7.18: Peso equivalente de los aniones presentes en el agua cruda .....	83

Tabla 7.19: Relación de afinidad de los aniones presentes en el agua con la resina aniónica.....	85
Tabla 7.20: Consumos y recursos utilizados en el funcionamiento mensual del intercambiador iónico y filtro seleccionados.....	86
Tabla 7.21: Características Modelo Ecosoft MO-6 de Osmosis inversa .....	87
Tabla 7.22: Resultados del procedimiento del lecho de calcita.....	89
Tabla 7.23: Características filtro de profundidad a presión.....	90

### Índice de figuras

Figura 2.1: Distribución de la población rural en Chile.....	11
Figura 2.2: Técnicas de eliminación del nitrato.....	17
Figura 2.3: Esquema del tratamiento de intercambio iónico .....	23
Figura 2.4: Afinidad iónica de la resina.....	23
Figura 2.5: Esquema del tratamiento de osmosis inversa .....	24
Figura 2.6: Esquema de la electrodiálisis .....	25
Figura 2.7: Etapas del análisis de ciclo de vida .....	32
Figura 2.8: Esquema de los límites del sistema.....	33
Figura 2.9: Perfil ambiental obtenido del análisis de ciclo de vida .....	34
Figura 3.1: Red hídrica de Tomeco.....	41
Figura 3.2: Usos de suelo de la localidad de Tomeco. ....	42
Figura 3.3: Concentración de nitrato del APR Tomeco.....	43
Figura 3.4: Escenario N°1, APR de Tomeco.....	44
Figura 3.5: Escenario n°2, intercambio iónico.....	45
Figura 3.6: Escenario n°3, osmosis inversa.....	46
Figura 3.7: Relación de algunas categorías de impacto, con las categorías de daño.....	50
Figura 3.8: Perfil Ambiental.....	53

Figura 3.9: Perfil de daño.....	55
Figura 3.10: Comparación de las UF .....	56
Figura 7.1: Interior de la caseta de desinfección de la APR de Tomeco. a) Bomba inyectora, b) Desinfectante, c) Tubos y d) Zona de mezcla para el desinfectante.....	64
Figura 7.2: Sistema de agua potable de la localidad de Tomeco. a) Caseta de desinfección, b) Sistema de captación, c) Tanque de almacenamiento y d) Filtro en desuso. ....	65
Figura 7.3: Modelo OPADEN 820 .....	81
Figura 7.4: Modelo Ecosoft MO-6 .....	87
Figura 7.5: Datos tabulados por la seremi de salud de la calidad del agua en el APR de Tomeco.....	91



## **Agradecimientos**

En primera instancia, quiero agradecer el apoyo que me dieron mis padres en este proceso universitario, mi madre Cecilia y mi padre Claudio, que de una u otra forma tuvieron que soportar todos mis cambios de humor, estrés, desesperación, alegrías y metas cumplidas a lo largo de este proceso universitarios.

De igual forma, a mis hermanos, quienes me brindaban su apoyo a su manera para superar los momentos difíciles dentro de todo este periodo.

A mis suegros, quienes me brindaron su apoyo, asilo, comprensión ante todas las dificultades que me presentaron. A mi pareja Ignacio, quien me apoyo en mis momentos de mayor oscuridad. Él fue quien mas evidencio mi proceso de estrés, alegrías, bromas, en fin, si no fuera por tu ayuda estoy segura de que no hubiera llegado cuerda en esta etapa de mi vida.

A todos mis amigos que estuvieron en este proceso, los centralasos, certámenes, carretes y todas esas actividades, que hicieron que formara un vínculo, que estoy segura de que prevalecerá mas allá de la universidad. En especial, agradezco a mi amiga Javiera, quien me apoyo en varias etapas y estuvo hasta el final para no solo apoyarme en los momentos de desesperación, si no también alegrarse por mis logros. A Gabriela, con nuestro modo hipopótamo, quien me ayudo profundamente en mi periodo de habilitación profesional, por esas sonrisas que me causante en la universidad, las bromas y salidas. A la Jo, quien también estuvo en la ultimas conmigo apoyándome en todo lo que necesite, y siempre esta ahí, aunque este en este momento a la distancia. Finalmente, un agradecimiento profundo a mis profesoras, Carolina Baeza y Yannay Casas, quienes las hice sufrir en este periodo de tesis. Ellas me aconsejaron, apoyaron, retaron, guiaron y a que esta instancia allá sido posible. Les estoy profundamente agredida por su paciencia y conocimiento adquirido. También, doy un cordial agradecimiento por el apoyo brindado al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería ANID/FONDAP/151200015 por el apoyo y espacio brindado. Y sin menospreciar, al Centro EULA donde realice toda mi carrera, gracias a todos los profesores que fueron parte de mi proceso profesional.

## Resumen

La nueva Ley n°20998 que regula los servicios sanitarios rurales, establece que se debe garantizar la calidad del agua potable y para ello, debe cumplir con lo establecido en el Decreto Supremo N°735. Dentro de las principales actividades rurales, la agricultura y el uso de fertilizantes en el suelo, hace propensa a la zona a elevar las concentraciones de nitrato en las fuentes de agua. La presencia de nitrato sobre el límite máximo establecido en la normativa vigente causa diversas enfermedades, una de las más mencionadas es la metahemoglobina, la cual evita el transporte óptimo de oxígeno en la sangre. Por ello, es necesario incorporar tecnologías de abatimiento que sean eficientes en la remoción de este compuesto, siendo pertinente que causen el menor impacto ambiental en su funcionamiento. Las tecnologías seleccionadas para la investigación fueron el intercambiador iónico y la osmosis inversa, los cuales junto con el sistema de Agua Potable Rural (APR) de la localidad de Tomeco, se formaron los 3 escenarios a evaluar: escenario n°1, APR de Tomeco; escenario n°2, intercambiador iónico; escenario n°3, osmosis inversa.

Al evaluar los potenciales impactos ambientales mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se destacan los procesos del uso de salmuera, debido a la extracción de sal en las salineras; la electricidad, a causa de la generación de energía no renovables dentro de su sistema y por último, el tratamiento de aguas servidas, en el cual, el sistema de lodos activados es quien provoca el daño mediante la producción de lodo residual en su funcionamiento. Estos procesos son los más relevantes a la hora de estimar la magnitud de los impactos y del daño de cada escenario.

En la categoría de salud humana, se destaca que el escenario n°3 es quien causa mayores daños, debido a la cantidad de concentración que va al tratamiento de aguas servidas, siendo el 37% del agua captada.

En las categorías de ecosistemas y recursos, existe predominancia en el escenario n°2, pero no existe una mayor diferencia de magnitud con el escenario n°3. Por ende, si se suman todas las categorías de daño, la implementación de un tratamiento de osmosis inversa resultaría más dañino en el ámbito ambiental en un 85% del total, mientras que la implementación del intercambiador iónico posee un 14% de daño en comparación, siendo este último, el más factible que causa menores impactos ambientales. El escenario n°1, que es el escenario base de la investigación, no presenta mayores impactos debido a la simpleza en su funcionamiento, siendo la electricidad el factor más relevante en los impactos que este provoca, aunque solo aporta un 1% al daño total.

Al convertir los resultados obtenidos en la Unidad Funcional (UF) de un 1mg de nitrato removido, se observa variaciones principalmente en la osmosis inversa, esto se justifica ya que esta tecnología posee una mayor eficiencia de remoción, de un 98%, mientras que el intercambiador iónico seleccionado, posee un 28%. Aun así, se conservan los resultados generales, teniendo variaciones leves en la magnitud de estas.

## **1. Introducción**

En Chile existen dos tipos de sistema de abastecimiento, el agua potable urbano que está regulada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y el sistema de agua potable rural, el cual está regulado por el Ministerio de Obras Públicas (Ministerio de desarrollo social, 2015). Desde su creación en 1960, los APR han tenido muchas carencias con respecto a sus instalaciones de agua potable, impidiendo la correcta distribución del servicio a los locatarios. Además, los sistemas rurales no poseían un reglamento regulatorio propio, siendo mencionados solamente en un artículo de la Ley General de Servicios Sanitarios, refiriéndose a las operaciones sanitarias de los sectores rurales, siendo incapaz de dar una solución legislativa eficiente ante las necesidades que presentan estos sistemas.

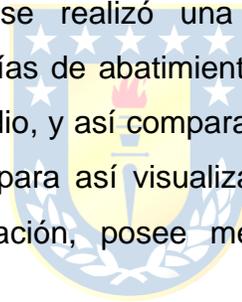
En base a lo anterior, entro en vigor el año 2020 la Ley N°20998, la cual regula los servicios sanitarios rurales, dejando en claro que dichas plantas deben cumplir con ciertos estándares para ofrecer un buen servicio. Dentro de esos estándares se destacan la calidad, cantidad y continuidad del servicio de agua potable, siendo en la actualidad uno de los desafíos de este sector (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022), siendo la calidad uno de los factores más importantes, ya que el consumo contaminado de este producto puede llevar a los lugareños a contraer diferentes enfermedades, que dañarían la salud de las personas.

Teniendo en cuenta, que en Chile las fuentes de captación de aguas subterráneas corresponden a un 76% del total en las zonas rurales (Dirección general de aguas, 2021), y la susceptibilidad que tienen estos a ser contaminados por concentraciones altas de nitrato, puesto que comúnmente en las zonas

rurales se practican actividades agrícolas de gran envergadura (Ministerio de desarrollo social, 2015), se hace necesario la implementación de nuevas tecnologías de abatimiento para prevenir las enfermedades que causa el ingerir elevadas concentraciones de nitrato, tales como la metahemoglobina, mareos, malformaciones o cáncer. (Isidora Victoria, 2015)

En Chile ya se han registrado APR's que han presentado problemas por las elevadas concentraciones de nitrato (Ministerio de obras públicas, 2021), y sumado a las exigencias de la nueva ley, se hace necesario la implementación de estas nuevas tecnologías, y que sean acorde a pequeños sistemas de agua potable, como son los APR's.

Por ello, en este estudio se realizó una evaluación ambiental, en la implementación de 2 tecnologías de abatimiento para el nitrato en un APR en específico cómo caso de estudio, y así compararlos entre si con la metodología de análisis de ciclo de vida, para así visualizar cual, de las dos tecnologías modeladas en esta investigación, posee menor impacto al momento de implementarlo.



## **2. Antecedentes**

### **2.1. Sistema de agua potable en Chile**

Se le denomina sistema de agua potable, a un conjunto de obras compuestas por la captación, tratamiento, regulación, distribución y suministro intradomiciliario (Ministerio de desarrollo social, 2015). En Chile, gran parte del agua es ocupada para la agricultura, ocupando el 72% de los recursos hídricos que se consumen en un año. Actualmente, se ocupa solo el 11% del agua para el consumo humano, potabilizadas por las empresas sanitarias, de las cuales aproximadamente el 59% proviene de fuentes subterráneas y el 41% de fuentes superficiales, y en menor medida por medio de la desalinización del mar (Andess chile, 2020)

#### **2.1.1 Tipos de sistemas de abastecimiento de agua potable**

Hay dos tipos de sistemas de agua potable predominantes en Chile, éstos se distinguen en sistemas urbanos y rurales, los cuales se describen a continuación:

- Agua Potable Urbano: Este sistema se encuentra administrado por empresas sanitarias concesionadas, responsables del servicio de distribución agua potable, recolección y disposición de las aguas servidas. La entidad gubernamental que regula y supervisa el correcto funcionamiento de estas es la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), aprobando todos los planes de desarrollo de las empresas sanitarias y con ello, fija las tarifas del sector (Ministerio de desarrollo social, 2015). La cobertura a nivel nacional que fue registrada entre los años 2018 al 2021, abarcan un 99,9% para el servicio de agua potable y un 97,3% para alcantarillado (Ministerio de obras públicas, 2021), siendo una de las más completas en América latina. El marco legal principal que regula este servicio está compuesto por: La ley general de Servicios Sanitarios (DFL N° 382/88), Ley de Tarifas de Servicios Sanitarios (DFL MOP N° 70/88), Ley de Subsidio al pago de consumo de agua potable y

servicios de alcantarillado (Ley N° 18.778) y la Ley que crea la Superintendencia de Servicios Sanitarios (Ley 18.902) (Ministerio de desarrollo social, 2015).

- Agua potable rural: A diferencia de las poblaciones urbanas, los sistemas de agua potable rural (APR), son administradas por los mismos locatarios del sector, denominados como “Comités y/o Cooperativas”, responsables de la operación y mantención de estas. Estos comités son asesorados y controlados por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), entidad gubernamental que debe asegurar la calidad y correcto funcionamiento de estas (Ministerio de obras públicas, 2020). Antes de la Ley N°20.998, la cual entro en vigor el 20 de noviembre del año 2020, los sistemas de APR no contaban con un marco normativo propio, siendo mencionando solo en un artículo de la Ley General de Servicios Sanitarios, refiriéndose a las operaciones sanitarias de los sectores rurales. Pese a estos progresos, estos continúan presentando deficiencias en la capacidad de garantizar la calidad y continuidad del servicio a largo plazo (Elisa Blanco, 2016).

Considerando lo anterior, se muestra evidente que los sistemas potables rurales son el sector con mayores problemas tanto legislativos como de calidad y continuidad del servicio, en base a la entrada en vigor de la Ley N°20.998, el cual hace referencia a garantizar la solución de dichos problemas, es necesario una actualización de estos sistemas para poder cumplir con el marco legal actual.

## **2.2. Ley N°20998: Regulación de los servicios sanitarios rurales**

La creación de la nueva ley de servicios sanitarios busca solucionar las carencias existentes en los APR's, en términos de calidad del servicio, administración financiera, tratamiento de aguas servidas, información, entre otras carencias (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018). Los principales cambios ocasionados bajo esta normativa, es la creación de la Subdirección de

Servicios de Saneamiento rural (SSR), responsable de brindar asistencia técnica a los comités y/o cooperativas, regulación de las tarifas, otorgamiento de licencias de los comités, entre otros (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022), todas ellas se encuentran resumidas en la Tabla 2.1, Tabla 2.2 y Tabla 2.3. Dentro de las normativas destacables, son las condiciones que debe cumplir APR´s para obtener y conservar las licencias otorgadas, garantizando la calidad, cantidad y continuidad del servicio del agua potable (Tabla 2.4), ya que, además de la accesibilidad del servicio de agua potable en las áreas rurales, éstas serían una las principales carencias que poseen estos servicios.



Tabla 2.1: Cambios efectuados ante la promulgación de la Ley 20.998

Arreglos	Antes de la Ley 20.998	Después de la Ley 20.998
Marco legal	Existía solo un artículo de la Ley 382 del MOP, mencionando los servicios de agua rural.	Marco legal exclusivamente enfocado en la necesidad del servicio de agua, saneamiento y tratamiento de aguas residuales.
Políticas	La Subdirección de Agua de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP, era la encargada de implementar el programa de APR, con autoridad sobre el agua.	Se crea el SSR en la DOH del MOP con responsabilidades integrales. Está recibe responsabilidades de agua y saneamiento, brindar asistencia técnica a las organizaciones comunales, entre otros. Junto con ello, se crea un catastro de licencias de proveedores
Licencia	Las licencias que e otorgaban eran renovable, dándoles derechos de agua por un determinado periodo de tiempo.	Las licencias son otorgadas a perpetuidad a los comités y/o cooperativas, para la previsión del servicio en el territorio en el cual operan. No obstante, estos serán evaluados cada cinco años para determinar que el servicio cumpla con los términos de calidad, cantidad, eficiencia, entro otros.

Fuente: (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018)

Tabla 2.2: Cambios efectuados ante la promulgación de la Ley 20.998 (Continuación)

Arreglos	Antes de la Ley 20.998	Después de la Ley 20.998
Financiamiento	<p>El presupuesto asignado a la unidad de planificación de la DOH es delegado a las regiones. Igualmente, otras entidades públicas como la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), entre otras, aporta el financiamiento del agua y saneamiento de las localidades rurales.</p>	<p>El presupuesto para la expansión y mejoras de los sistemas rurales dependerá exclusivamente de la SSR.</p>
Regulación	<p>No existe una norma en específico que regule el correcto funcionamiento de los servicios rurales.</p>	<p>Ley creada para atender la necesidad de los APR, para la mejora de sus servicios a la comunidad.</p>
Tarifas	<p>Las empresas de agua potable urbano, junto con el Gobierno Regional (GORE), proveían asistencia para fijar las tarifas de las cooperativas y/o comités. Estas solo cubren parte de los costos de operación, mantenimiento y administración, sin recuperar el capital invertido en el sistema.</p>	<p>La fijación de las tarifas es responsabilidad de la agencia de regulación del sector (SISS) para cada APR. Estas tarifas serán fijadas enfocándose en la recuperación de los costos de operación de la planta.</p>

Fuente: (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018)

Tabla 2.3: Cambios efectuados ante la promulgación de la Ley 20.998 (Continuación)

Arreglos	Antes de la Ley 20.998	Después de la Ley 20.998
Calidad del agua	Se debe dar cumplimiento a la norma chilena N°409.	Se debe dar cumplimiento a la norma chilena N°409.
Provisión del servicio	Los comités y/o cooperativas administran y proveen el servicio de agua de los sistemas construidos por el MOP-DOH y saneamientos construidos por los GORE y municipalidades.	Los comités y/o cooperativas tienen la obligación de gestionar la planta de agua y saneamiento.
Asistencia Técnica	Se otorga asistencia técnica a los operadores de APR a través de “convenios” con los GORE para el diseño, construcción, mejoramiento y expansión de los sistemas.	La asistencia técnica será responsabilidad de la SSR y de un comité consultivo nacional que debe aprobar el programa de AT (asistencia técnica) para los proveedores rurales.

Fuente: (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018)

Tabla 2.4: Requerimientos para la conservación de las licencias en los comités y/o cooperativas

Requisitos para la conservación de la licencia otorgada a los comités y/o cooperativas, revisadas cada 5 años.	Calidad del agua.
	Cantidad.
	Continuidad del servicio.
	La existencia de un fondo de reserva para garantía del servicio.
	La existencia de un plan de inversiones aprobado por la subdirección, cuando corresponda (exceptuando los sistemas que en sus tarifas sólo contemplen la operación y mantención de las operaciones e infraestructura).
	Algún título para el uso o dominio de derechos de aprovechamiento de aguas
	La aprobación de los estados financieros por la subdirección.
	La comunicación de la gestión administrativa la subdirección, siendo favorable.
	Cálculo tarifario aprobado.
	Nivel tarifario.

Fuente: (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022)

### **2.3. Agua potable rural**

La aparición de los APR se encuentra enmarcada aproximadamente en 1960, con el fin de abarcar la escasa cobertura de agua potable, llegando solamente a 6% a nivel nacional, lo cual ha cambiado drásticamente a través de los años, llegando a una cobertura del 94% en la actualidad (Banco Mundial, 2021). La cobertura de los APR's se mide según la concentración de su población, separadas en poblaciones concentradas, las semiconcentradas y dispersas. Se refiere a poblaciones concentradas a las que habitan más de 150 habitantes, con una densidad mayor a 15 viviendas por kilómetro de red de agua potable, las semiconcentradas poseen una densidad menor de al menos 8 viviendas por kilómetro, y, por último, la dispersa, la cual posee una densidad aún menor. En las localidades concentradas, la cobertura de agua potable es de aproximadamente un 100%, por lo que el mayor desafío, se concentra en las localidades semiconcentradas y dispersas (Ministerio de desarrollo social, 2015) (Elisa Blanco, 2016). En Chile, el 12% de la población habitaba en zonas rurales en el 2017, de las cuales la mitad de ellas eran de zonas concentradas, y la otra mitad estaba distribuida en localidades semiconcentradas y dispersas (Figura 2.1), por lo que el 6% de la población aún posee problemas con el acceso al agua potable (Banco Mundial, 2021)

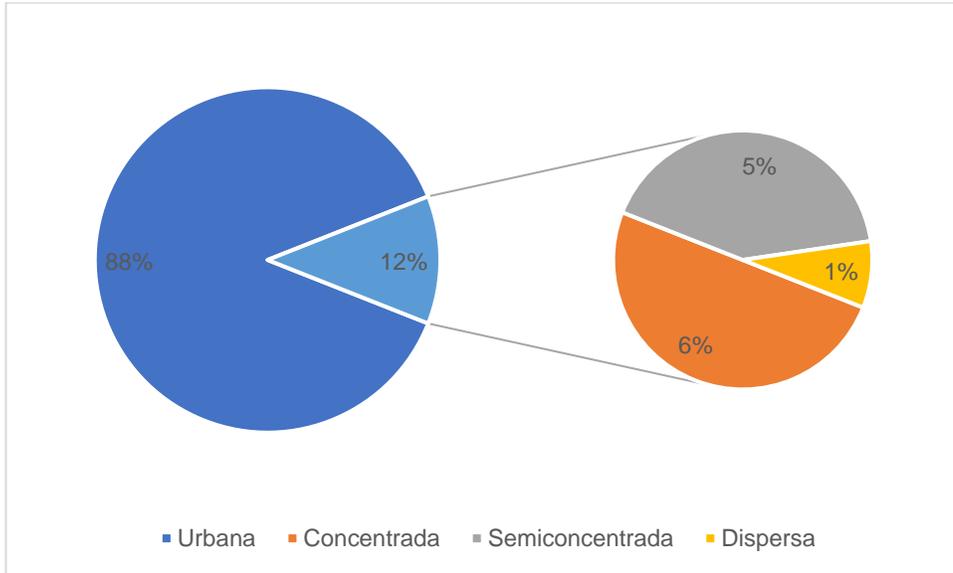


Figura 2.1: Distribución de la población rural en Chile

Fuente: (Banco Mundial, 2021)

### 2.3.1. La calidad del agua y sus contaminantes

Además de los problemas de acceso al agua potable, los APR's sufren constantes problemas en la calidad del agua que distribuyen a los habitantes, ya que sus instalaciones no son lo suficientemente modernas para realizar un correcto tratamiento (Banco Mundial, 2021). En base a esto, según la SUBDERE, existen antecedentes tanto históricos como estadísticos, para identificar cuáles son los contaminantes más frecuentes en los APR's dependiendo de la fuente de captación y los efectos que estos pueden provocar (Tabla n°3).

Tabla 2.5: Parámetros de contaminantes frecuentes encontrados en los APR's según fuente de captación

Parámetros frecuentes de contaminación	Tipo de contaminación	Efectos	Aguas superficiales	Aguas subterráneas
Turbiedad	Física	Apariencia del agua	X	
Color verdadero	Física	Apariencia del agua	X	X
Ph	Química	Corrosividad	X	X
Hierro	Química	Apariencia, sabor y olor	X	X
Manganeso	Química	Apariencia, sabor y olor		X
Arsénico	Química	Salud	X	X
Nitratos	Química	Salud		X
Amoniaco	Química	Salud, olor	X	X
Boro	Química	Salud y cultivos	X	X
Cloruros	Química	Sabor		X
Sulfatos	Química	Salud y sabor	X	X
Sólidos disueltos totales	Química	Salud y sabor	X	X
Coliformes totales	Microbiológica	Salud	X	X
Escherichia Coli	Microbiológica	Salud	X	X

Fuente: (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018)



En Chile, la utilización de fuentes de captación de aguas subterráneas corresponde más del 40% del consumo en áreas urbanas y un 76% en las zonas rurales (Dirección general de aguas, 2021). Teniendo en cuenta que, en el sector rural, poseen actividades laborales predominantes de carácter agrícola., extractivas, pecuarias o pequeñas industrias rudimentarias (Ministerio de desarrollo social, 2015), se le da mayor enfoque a la presencia de nitrato en el agua, ya que es propensa a producirse en sectores que predomina la actividad agrícola, debido a que se utilizan fertilizantes nitrogenados, descarga de efluentes sin el saneamiento adecuado, descargas de efluentes industriales, entre otras actividades, provocando por medio de escorrentía la contaminación de nitratos en el agua subterránea (Dirección general de aguas, 2021).

#### **2.4. La presencia de nitrato en el agua potable**

El nitrato ( $NO_3^-$ ), es un compuesto de óxidos de nitrógeno, siendo sales incoloras e inodoras que se agregan al agua subterránea por procesos naturales y exposición directa o indirecta a la actividad humana. Este componente está presente en todos los seres vivos, produciéndose de forma natural, tanto en el suelo como en el agua (Departamento de Calidad Medioambiental del Estado de Oregón, 2020), por medio de la meteorización de rocas ígneas, precipitaciones, de forma natural en alimentos, entre otros (Pacheco, 2003). No obstante, se ha incrementado de forma significativa la presencia de este compuesto por las actividades antropológicas, tales como la fertilización excesiva con nitrógeno, la deforestación, el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de los cultivos, efluentes de lagunas y tanques sépticos (Dirección general de aguas, 2021). Debido a este incremento, por medio del consumo de agua y alimentos, se han detectado diversas reacciones adversas ante la ingesta de este compuesto en grandes cantidades, siendo denominado actualmente un riesgo para la salud de las personas.

#### **2.4.1. El nitrato en la salud humana**

La presencia de 3 partes por millón (ppm) o 3 mg/l de nitrato en aguas para uso doméstico, es considerado como concentraciones de origen natural o que indica niveles bajos de contaminación, por lo que no se califica como un posible riesgo a la salud humana (Departamento de Calidad Medioambiental del Estado de Oregón, 2020). Sin embargo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), una concentración superior a los 50 mg/l es propensa a provocar efectos tóxicos a corto plazo por la producción de metahemoglobinemia (Isidro Vitoria, 2015), mientras que la Agencia de Protección Ambiental (EPA en sus siglas en inglés), establece una concentración más baja, dando un máximo de 44,3 mg/l (Dirección general de aguas, 2021).

Se ha comprobado que bebés, menores de 6 meses, son especialmente sensibles a la ingesta de este compuesto, ya que afecta directamente a la hemoglobina, causando la reducción de la capacidad de la sangre para transportar oxígeno a los tejidos, provocando la enfermedad llamada metahemoglobina (Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2015). Aun cuando el nivel de 50 mg/l de nitrato en agua es el máximo aceptable para prevenir la metahemoglobinemia, existen estudios de malformaciones congénitas como paladar hundido, labio leporino y malformaciones en los brazos, que han sido provocados por niveles más bajos. Del mismo modo, estudios epidemiológicos demuestran una relación directa entre los nitratos en el agua y el desarrollo de cáncer, cuyos valores de nitrato están por debajo de los 25 mg/l (Isidora Victoria, 2015) (Nadia Espejo-Herrera, 2016).

#### **2.4.2. Problemas en Chile**

En Chile, la concentración de nitrato está delimitado por el Decreto Supremo N°735, dejando como 50 mg/l el máximo permitido para el consumo del agua potable. La Dirección General de Aguas (DGA), es el ente gubernamental

encargado de la gestión y administración de los recursos hídricos, monitoreando la calidad por medio de estaciones de calidad instaladas desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Lagos, para así detectar los posibles cambios químicos temporales y espaciales presentes en los diferentes sistemas de agua potable. Teniendo en cuenta lo anterior, en el último tiempo, estos monitoreos han detectado en sistemas de APR's, una presencia significativa de nitrato en las aguas subterráneas (Dirección general de aguas, 2021).

Asimismo, se han hecho diversas investigaciones sobre los efectos que este nutriente afecta a las personas en el país. Se realizó un estudio, midiendo los niveles de nitrato tanto en el agua como en la saliva de las personas de la población rural en la región del Biobío, cuyos resultados demostraron la existencia de concentraciones superiores a las permitidas en el agua, además de niveles altos en la saliva de la población, provocando el riesgo de favorecer la carcinogénesis oral (Thomas Schmidt P, 2012). Una investigación realizada por el departamento de recursos hídricos de la Universidad de Concepción el año 2016, evaluaron el riesgo en la salud de las personas por el consumo de nitrato presente en el agua, en los pozos de noria en Parral. En este estudio se identificó que la preparación de fórmulas lácteas estaba realizada con altas concentraciones de nitrato, generando el peligro de enfermar a los lactantes con metahemoglobina (José Luis Arumi, 2006). Por esto, es necesario la implementación de tecnologías para abatir el nitrato en estos sistemas, y así evitar estos posibles problemas a la salud de las personas.

### **2.5. Tecnologías de abatimiento para el nitrato en el agua potable**

Existen varias técnicas para eliminar el nitrato en el agua potable (Figura 2.2), las cuales se encuentran catalogadas en dos grupos (Palomares, 2015):

- Separación: Separa los nitratos de la corriente de agua a tratar, concentrándolos en un segundo desecho, el cual se debe tratar o almacenar según corresponda. Las tecnologías que ocupan esta técnica son: La osmosis inversa, electrodiálisis y el intercambiador iónico.
- Transformación: Como su nombre lo indica, transforma los nitratos presentes en el agua en otro compuesto químico inocuo por medio de vías biológicas o catalíticas.

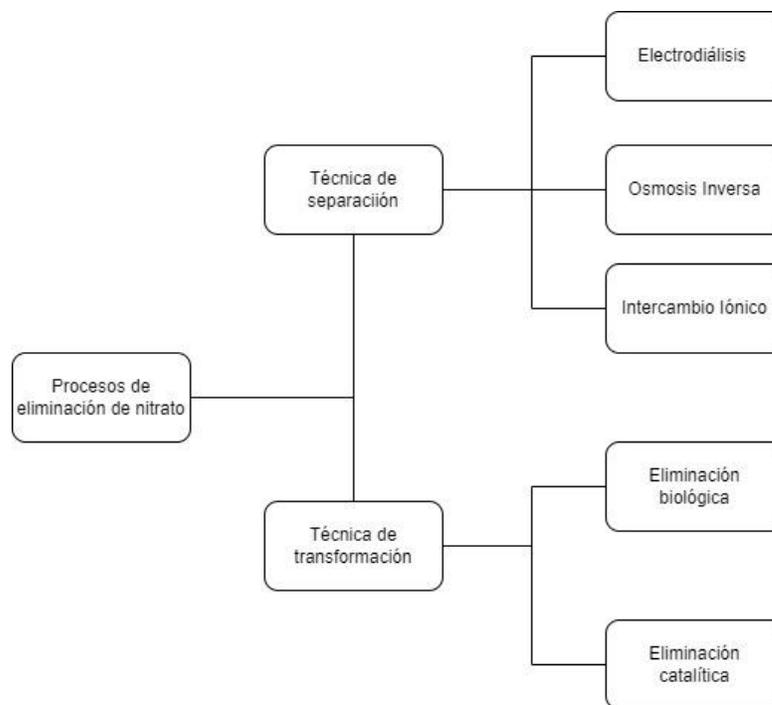


Figura 2.2: Técnicas de eliminación del nitrato

Fuente: (Palomares, 2015)

Las tecnologías más ocupadas para abatir el nitrato son las correspondientes a la técnica de separación (Zhi-Qi Lin, 2017). Aunque todas ellas provengan del mismo método, el tipo de funcionamiento de cada una es completamente diferente. En la Tabla 2.6 se pueden visualizar solo algunos ejemplos de la

implementación de estas tecnologías en sistemas de agua potable, donde se destaca que dichas tecnologías se han implementado mayoritariamente en sistemas de agua potable urbanos.



Tabla 2.6: Implementación de las técnicas de separación para abatir el nitrato en sistemas de agua potable

Técnica de separación	Título	País /Ciudad	Tipo de sistema	Fuente
Intercambio iónico	Caso n°1	EE. UU./California	Urbana	(Viviana B. Jensen, 2012)
	Caso n°3	EE. UU./Distrito Indian Hills	Rural	(Viviana B. Jensen, 2012)
	Un estudio sobre la mejora de la calidad del agua de las obras hidráulicas de las aldeas utilizando resina de intercambio iónico y desinfección sin sal	Corea	Rural	(Bag-Sou Moon, 2016)
	Eficiencia de la ósmosis inversa y el intercambio iónico en la purificación del agua a partir de nitratos	Ucrania	Urbano	(Mykola Gomelya, 2022)

Osmosis inversa	Comparación del coste operativo y evaluación de rendimiento de los sistemas de electrodiálisis y osmosis inversa en la eliminación de nitratos del agua potable en Golshahr, Mashhad	Irán/ Golshahr	Urbano	(M. Pirsaeheb, 2015)
-----------------	--	-------------------	--------	----------------------

Tabla 2.7: Implementación de las técnicas de separación para abatir el nitrato en sistemas de agua potable (Continuación)

Osmosis inversa	Consideraciones de selección y diseño de membranas para cumplir con los requisitos europeos de agua potable en función de las diferentes condiciones del agua de alimentación	Italia /Lombardía	Urbano	(J.A. Redondo, 1997)
	Caso N°6: Sistema de agua potable comunitario	EE. UU./California	Urbano	(Viviana B. Jensen, 2012)
	Purificación de agua de nitratos por método de ósmosis inversa de baja presión	Ucrania	Urbano	(V.V.Goncharuk, 2013)
Electrodiálisis	Reducción electrocatalítica de nitrato: fundamentos para aplicaciones de tratamiento de agua a gran escala	EE. UU.	Urbano	(Sergi García-Segura, 2018)

	Eliminación de nitratos en aguas subterráneas mediante ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis: rendimiento y comparación de costos	África/Marruecos	Urbano	(Sakina Belhamidi, 2022)
	Inversión de electrodiálisis	España	Urbano	(Viviana B. Jensen, 2012)



### 2.5.1. Intercambiador iónico

El agua cruda debe pasar por un pretratamiento, con el fin de eliminar todos los sólidos en suspensión u otra obstrucción que pueda dañar la resina. Luego entra al intercambiador iónico, haciendo contacto con la resina de base fuerte, desplazando el nitrato eliminándolo del agua. Lo que realiza la resina una vez entrando en contacto con el agua, es un intercambio iones, en el caso del nitrato, un intercambio de aniones en el agua cruda, dejando generalmente  $Cl^-$  y desplazando  $NO_3^-$ . La resina está contenida en un recipiente de presión y es necesario su regeneración periódica con nuevos iones cloruro mediante la adición de una solución salina concentrada. Como resultado de esa regeneración, queda un concentrado de salmuera con un alto contenido de nitrato y otros iones para su deposición. La resina posee una afinidad relativa con los aniones, tal como se ve en la Figura 2.4, por lo que, al momento de implementar la tecnología en la planta de tratamiento, hay que fijarse de las concentraciones y tipo de aniones que este presenta, para calcular posibles obstáculos al momento de abatir el nitrato por la afinidad de la resina (Viviana B. Jensen, 2012). La eficiencia de remoción de esta tecnología varía según los requerimientos de la planta, pero según bibliografía puede llegar a un 90% de eficiencia (Pure Aqua, 2018). El sistema de abatimiento de intercambio iónico es ilustrado por la Figura 2.3.

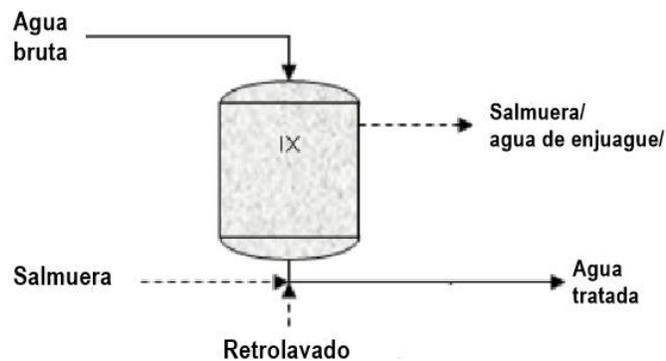


Figura 2.3: Esquema del tratamiento de intercambio iónico

Fuente: (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018)

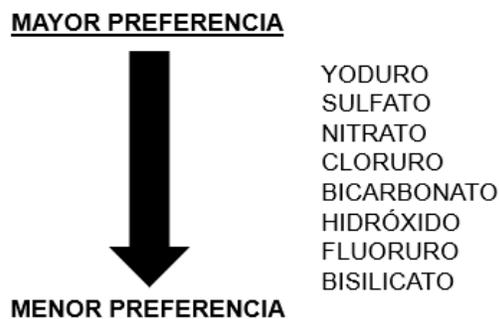


Figura 2.4: Afinidad iónica de la resina

Fuente: (EPA, 1983)

### 2.5.2. Osmosis Inversa

La ósmosis inversa es el proceso físico de eliminación de contaminantes al pasar agua sin tratar bajo presión a través de una membrana semipermeable que permite el paso de moléculas de agua y retiene la mayoría de los minerales disueltos, eliminando así múltiples contaminantes a la vez (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018). Puede utilizarse para tratar simultáneamente múltiples contaminantes, incluidos los iónicos, los particulados y los constituyentes orgánicos. El concentrado recogido del proceso tiene un alto contenido de nitrato y otros constituyentes rechazados (sales), el cual requiere un tratamiento adecuado para su desuso. La tasa de rechazo para el nitrato en la membrana puede llegar hasta el 98%. La eficiencia del tratamiento puede verse comprometida, por ende, es necesario un tratamiento previo para evitar obstrucciones en la membrana. Asimismo, el agua que sale tratada de esta tecnología posee deficiencia de minerales, por ello es necesario un

postratamiento de mineralización para que este pueda ser potable (Viviana B. Jensen, 2012).

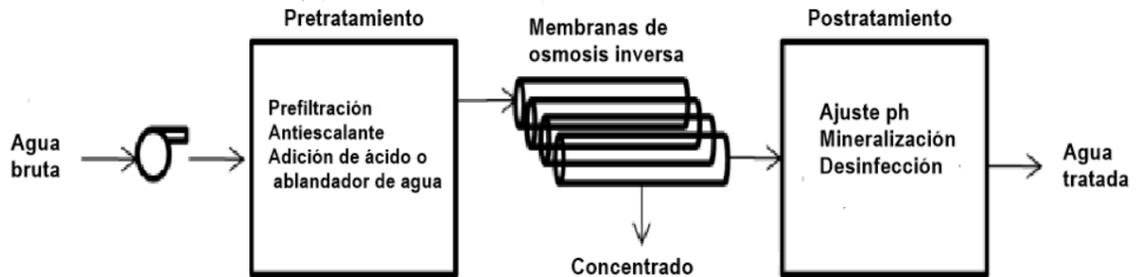


Figura 2.5: Esquema del tratamiento de osmosis inversa

Fuente: (Viviana B. Jensen, 2012)

### 2.5.3. Electrodialisis

En la electrodialisis, los iones pasan a través de una membrana semipermeable selectiva de iones como resultado de la carga de la superficie de la membrana. Se utilizan un electrodo positivo (cátodo) y un electrodo negativo (ánodo) para cargar la superficie de la membrana y atraer iones de carga opuesta. Elimina iones como el nitrato del agua cruda. En la electrodialisis inversa, la carga de la membrana se invierte periódicamente para minimizar la formación de depósitos. Generalmente requiere menos pretratamiento que otros procesos de membrana. El único pretratamiento comúnmente utilizado en los sistemas de aguas subterráneas es la prefiltración con filtros de cartucho de 10 micras para eliminar los sólidos. La deposición de sólidos en la superficie de la membrana puede ser un problema operativo. A medida que el agua fluye a través del sistema, los minerales se pueden eliminar y concentrar en la corriente de salmuera, formando incrustaciones dentro del sistema de proceso. Si el total de sólidos disueltos en el agua es alto y el proceso opera con una alta recuperación de agua, el potencial

de formación de incrustaciones es alto. La membrana del proceso de electrodiálisis se puede limpiar en el sitio con una solución de ácido diluido para restaurar el rendimiento del sistema (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018). La eficiencia de remoción de esta tecnología varía entre un 30% a un 80%, dependiendo de la concentración de nitrato que posea el agua cruda. (Antonio Montes Rojas, 2009)

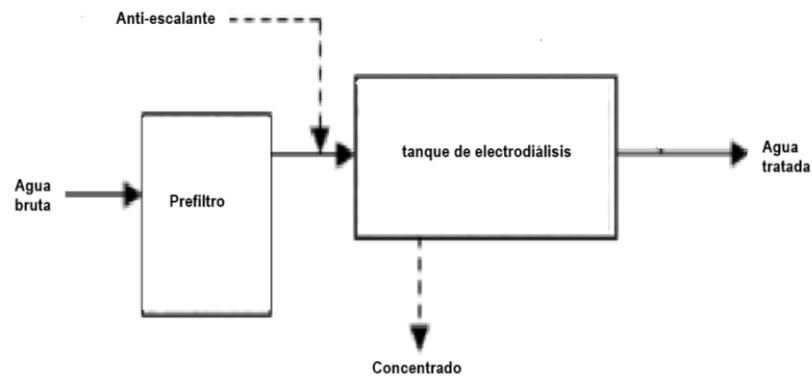


Figura 2.6: Esquema de la electrodiálisis

Fuente: (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018)

Tabla 2.8: Ventajas y desventajas de las tecnologías de abatimiento de nitrato.

Tecnología de abatimiento	Ventajas	Desventajas
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere uso de químicos en su operación.</li> <li>- Resina selectiva de nitrato, con una eficiencia del 90% dependiendo del modelo utilizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eliminación de salmueras salinas.</li> <li>- Se debe diseñar la tecnología según los requerimientos específicos de la planta.</li> </ul>
Ósmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficiencia de remoción de un 98% aproximadamente</li> <li>- Produce agua de alta calidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta demanda de energía para su funcionamiento</li> <li>- Alta producción de RILES</li> </ul>
Electrodialisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere uso de químicos para su operación</li> <li>- Buena selectividad de remoción según las concentraciones de nitrato presentes (30 % a 80%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta demanda de energía para su funcionamiento.</li> <li>- El agua cruda debe tener características específicas para</li> </ul>

		que la tecnología funcione de manera adecuada.
--	--	--

Fuente: (Viviana B. Jensen, 2012) (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018) (Pure Aqua, 2018) (EPA, 1983)

#### **2.5.4. Aplicación en los sistemas de agua potable rural en Chile**

Según un informe realizado por la SUBDERE el año 2018, en donde evaluó soluciones sanitarias para el sector rural, determina la necesidad de implementar nuevas tecnologías para la remoción de contaminantes que no son afectados por las tecnologías tradicionales que se cuentan actualmente. Para el problema del nitrato, se mencionan dos tecnologías aplicables en el país, el intercambiador iónico y la osmosis inversa, ya que solo requieren modificaciones del equipamiento modular utilizado a escala de los causales y los volúmenes de operación del sistema.

Además, existen registros de experiencias en sistemas de agua potable urbana de tamaño medio y menos, por lo que se toma como viable la aplicación de estas tecnologías a los APR del territorio nacional. En la Tabla 2.9 sacado del mismo informe, se aprecia la evaluación de la experiencia de dichos sistemas, calificándolas dentro del rango 1 a 5. El intercambiador iónico fue calificado con puntaje 3, mientras que la osmosis inversa con un 2,7, esto quiere decir, que ambas tecnologías cumplen de forma adecuada con su funcionamiento (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018)

Tabla 2.9: Evaluación de la experiencia nacional

Aspecto evaluado	Intercambio iónico	Osmosis inversa
------------------	--------------------	-----------------

Tecnología establecida en el sector	2,0	2,0
Experiencia nacional en el diseño	3,0	3,0
Experiencia en montaje y construcción	4,0	3,0
Calificación promedio	3,0	2,7

Fuente: (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018)

Asimismo, se destacan todas las ventajas y desventajas de la implementación de estas tecnologías en los sectores rurales (Tabla 2.10), dentro de las más destacables, es la nula experiencia en la instalación de estos sistemas en APR y la dificultad de manejo, ya que, para mantener y operar ambas tecnologías, es necesario tener previo conocimiento para su correcta manipulación. Además, en la osmosis inversa se requiere bastante energía para su funcionamiento, un impedimento para los sectores rurales, por las carencias que estas suelen presentar (Viviana B. Jensen, 2012).

Tabla 2.10: Ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento a la implementación de las nuevas tecnologías en los APR's.

Tecnología	Ventaja	Desventaja
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación flexible</li> <li>• Tecnología con excelente operatividad porque no requiere el uso de productos químicos durante la operación y solo se realizan operaciones de regeneración por lotes</li> <li>• Funcionamiento automatizado</li> <li>• Bajo coste inicial</li> <li>• Más adecuada para instalaciones pequeñas</li> <li>• Resina selectiva de nitrato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control frecuente</li> <li>• Almacenamiento de grandes volúmenes de sal</li> <li>• Resinas susceptibles a ensuciamiento orgánico</li> <li>• Eliminación de las salmueras salinas</li> <li>• Potencial para la formación de subproductos de desinfección</li> <li>• Nunca instalado en APR's</li> <li>• Requiere personal técnico con conocimiento y presencia en la planta</li> <li>• Debe ser diseñada 100% según el caudal de la planta</li> </ul>

Fuente: (Ministerio de desarrollo social, 2015), (Viviana B. Jensen, 2012), (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018)

Tabla 2.11: Ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento a la implementación de las nuevas tecnologías en los APR's. (Continuación)

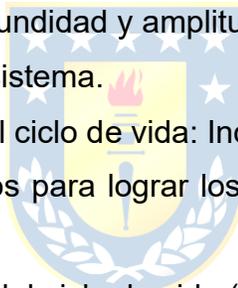
<p>Osmosis inversa</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funcionamiento automatizado</li> <li>• No es requerido dosificar</li> <li>• Posee excelentes índices de remoción</li> <li>• Produce agua de alta calidad</li> <li>• Existen unidades compactas de baja presión para unidades pequeñas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de instalación</li> <li>• Los tratamientos previos y posteriores pueden complicar el proceso</li> <li>• Susceptible a ensuciamiento de la membrana</li> <li>• Nunca instalado en APR's</li> <li>• Intensiva en consumo de energía y producción de RILES</li> <li>• Se requiere un control y conocimiento técnico</li> </ul>
------------------------	---	---

Fuente: (Ministerio de desarrollo social, 2015) (Viviana B. Jensen, 2012) (Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington, 2018)

## 2.6. Metodología de análisis de ciclo de vida

Una evaluación del ciclo de vida (ACV) es una herramienta que se puede utilizar para generar información sobre el impacto ambiental de los sistemas de tratamiento de agua. ACV se utiliza para evaluar el daño ambiental global potencial causado por un producto, proceso o servicio (Alexandre Bonton, 2012). Por lo tanto, ayuda a identificar posibles impactos ambientales y sienta las bases para la toma de decisiones y facilitar el mejoramiento de futuras investigaciones (Marianna Garfí, 2016). Esta metodología está regulada en base a la Norma ISO 14040:2006 (Organización internacional de normalización, 2006), la cual describe todas las fases del análisis de ciclo de vida (Figura 2.7), de la siguiente manera:

- Definición del objetivo y alcance: Se debe establecer el objetivo del ACV, el cual determina la profundidad y amplitud de la investigación, los límites y el nivel de detalle del sistema.
- Análisis de inventario del ciclo de vida: Incluye la recopilación de datos de entrada/salida necesarios para lograr los objetivos definidos del sistema de investigación.
- Evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA): evaluar los resultados de un inventario del ciclo de vida del sistema para estimar el impacto ambiental del sistema, teniendo en cuenta la magnitud y la importancia de los posibles impactos ambientales del ciclo de vida del producto. consiste en una mejor comprensión de la materialidad.
- Interpretación del ciclo de vida: en esta etapa, los resultados de análisis de inventario y/o evaluación de los impactos, estos se resumen y discuten para producir conclusiones, recomendaciones y decisiones de acuerdo con el propósito y el alcance definidos.



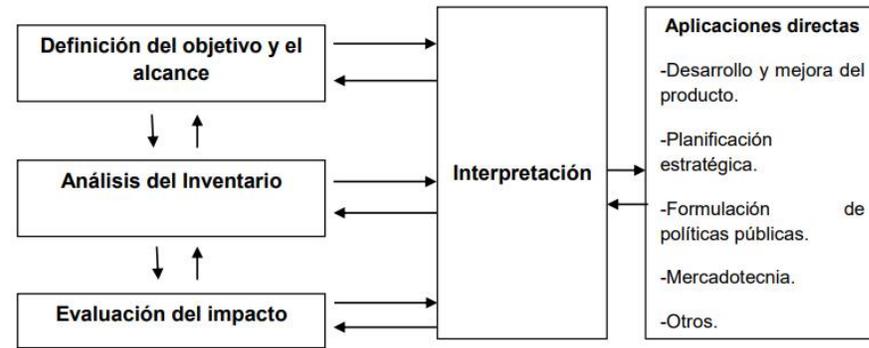


Figura 2.7: Etapas del análisis de ciclo de vida

Fuente: (Hoyos, 2015)

La definición de la unidad funcional es un punto importante para la comparación de los sistemas en el ACV. Asumiendo que todos los sistemas de tratamiento de agua bajo estudio tienen una unidad funcional (por ejemplo, proporcionar 1 m<sup>3</sup> de agua de cierta calidad), se garantiza que los impactos de estos sistemas pueden compararse entre sí. (Alexandre Bonton, 2012). Las entradas (materias primas, energía, otros procesos, etc.) y las salidas (emisiones, aguas residuales, etc.) se enumeran para todos los procesos relevantes y se encuentran delimitados según se puede apreciar en la Figura 2.8, estos límites se establecen dependiendo el objetivo de la investigación. ACV transforma las entradas y salidas en diversos impactos ambientales (cambio climático, agotamiento de recursos, etc.). Se utilizan diferentes softwares para modelar los sistemas, tales como el SimaPro o GaBi para realizar evaluaciones del ciclo de vida. Estos productos de software suelen incluir varias bases de datos de inventario (Sistema de datos de referencia del ciclo de vida europeo, Base de datos de inventario del ciclo de vida de EE. UU., Ecoinvent, etc.) y métodos de evaluación de impacto (Impact2002, Traci, Ecoindicator, etc.). La base de datos se desarrolló principalmente en un contexto europeo, por lo que normalmente tiene que

adaptarse para otros usos. Otro desafío importante es que algunos procesos en el tratamiento del agua no están incluidos en las bases de datos existentes (Alexandre Bonton, 2012).

Lo que se obtendrá al aplicar esta metodología es un perfil ambiental del proceso estudiado, como se visualiza en la Figura 2.9, en ella se representarán la magnitud de los daños ambiental que causan los insumos y recursos que utiliza el proceso para su funcionamiento, estas categorías de impacto serán seleccionando según el método de evaluación que se elija (Alexandre Bonton, 2012).

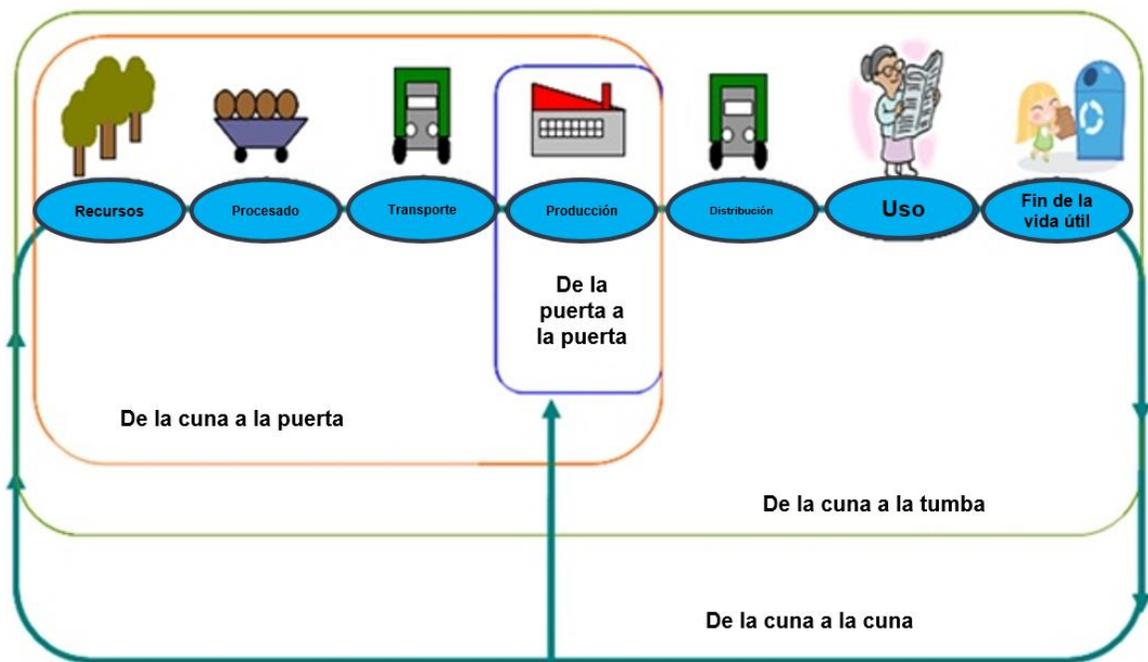


Figura 2.8: Esquema de los límites del sistema

Fuente: (Gencat, 2014)

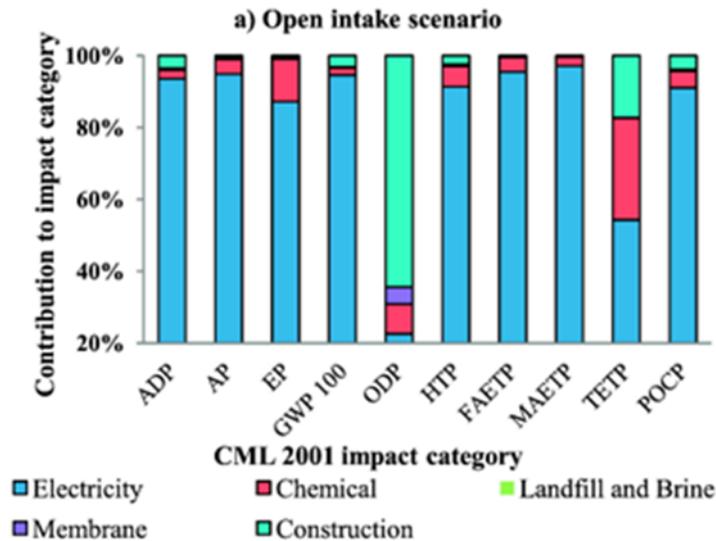


Figura 2.9: Perfil ambiental obtenido del análisis de ciclo de vida

Fuente: (Alexandre Bonton, 2012)

### 2.6.1. Aplicación del ACV en sistemas de tratamiento de agua potable

Existen diversos estudios de las tecnologías de agua potable, que se han realizado en base a esta metodología, algunos descritos en las Tabla 2.10 y Tabla 2.11. Como se mencionó anteriormente, el análisis de los impactos ambientales se realiza en base al objetivo de la investigación, no obstante, se puede destacar que el uso de electricidad es un factor importante a la hora de evaluar los sistemas, y es uno de los mayores contribuyentes a la magnitud de los impactos. Además, la implementación de esta herramienta ha sido utilizada para evaluar mayoritariamente sistemas de agua potable urbano, y dentro de la bibliografía revisada, no se encontraron evaluaciones a sistemas de agua potable que tengan fuentes de captación de agua subterránea.

Tabla 2.12: Aplicación del ACV en investigaciones científicas

N°	Título de la investigación	País	Tipo de sistema	Unidad funcional	Resultados	Fuentes
1	Evaluación comparativa del ciclo de vida de las plantas de tratamiento de agua	Canadá	Urbano/ Superficial	1 m <sup>3</sup>	COV-CAG impacto 12 veces mayor en agotamiento de recursos naturales, salud humana y cambio climático.	(Alexandre Bonton, 2012)
2	Análisis Holístico de los sistemas de agua potable urbano de la región de gran Cinnati	EE.UU.	Urbano/ superficial	1 m <sup>3</sup>	El sistema de bombeo (21%) y el de distribución del agua potable (43%) son los principales contribuyentes al agotamiento de combustibles fósiles.	(Xiaobo Xue, 2019)
3	Comparación del tratamiento convencional del agua, la ósmosis inversa y el agua mineral en botellas de vidrio y plástico	España	Urbano/ superficial	1 m <sup>3</sup>	Los resultados obtenidos muestran que el agua embotellada requiere muchos más materiales (130 y 154 kg/m <sup>3</sup> ) y energía (1000 y 4900 MJ/m <sup>3</sup> ) que el agua del grifo	(Marianna Garfí, 2016)

Tabla 2.13: Aplicación del ACV en investigaciones científicas (Continuación)

4	Implicaciones ambientales y económicas del ciclo de vida de las actualizaciones de los sistemas de agua potable pequeños para reducir los subproductos de la desinfección	EE.UU.	Rural/ superficial	1 año	<p>Escenario UV186 el peor de todos, carbono activado con Uv30 con menores impactos.</p> <p>GAC: Capacidad de remoción de 35 a 40% de TOC. Posee menor huella de carbono (21 MG <math>Co_2/año</math>)</p> <p>Ozono: Capacidad de remoción de 42 a 53% de TOC. Mayor costo energético (665 <math>GJ/año</math>)</p> <p>UV30 y UV186: Reducción de formación de DBP en un 20%. UV186 posee un costo energético (2529 <math>GJ/año</math>) 6 veces mayor al UV30 (417 <math>GJ/año</math>).</p>	(Weiwei Mo, 2018)
---	---	--------	-----------------------	-------	---	-------------------

Tabla 2.14: Aplicación del ACV en investigaciones científicas (Continuación)

5	Evaluación ambiental y económica de toma de pozo de playa versus toma abierta para desalinización de agua de mar por ósmosis inversa	EE.UU.	Urbano/ superficial	1 m <sup>3</sup>	Los resultados indican que las cargas ambientales del ciclo de vida de la planta de toma de pozos de playa fueron hasta un 31 % y un 13 % más bajos, respectivamente, en comparación con la planta de toma abierta. Un análisis detallado de la contribución reveló que el mejor desempeño ambiental de la planta de toma de pozos de la playa se vio significativamente influenciado por su uso de electricidad comparativamente bajo en el proceso de pretratamiento simplificado.	(Maedeh P. Shahabi, 2015)
---	--	--------	------------------------	------------------	--	---------------------------



## **2.7. Pregunta de Investigación**

Los APR's en Chile poseen constantes dificultades en sus instalaciones, provocando diversos problemas, tales como la continuidad, calidad del agua, entre otros. Con la Ley°20998, se deben solucionar dichos problemas para cumplir con su marco legal. Dentro de los desafíos posibles que presentan estos servicios, son el aumento del nitrato en sus centros de captación, debido a las actividades que predominan en estos sectores, tales como la agricultura, instalación de fosas sépticas, entre otras. La alta ingesta de este compuesto en el agua potable provoca muchos tipos de enfermedades, la más conocida es la metahemoglobina, la cual impide el correcto flujo de oxígeno en la sangre, poniendo en peligro la salud de la población. Por ello, es necesaria una actualización de sus instalaciones, colocando tecnologías modernas que posean la eficiencia suficiente para abatir el nitrato presente.

Al momento de instalar estas tecnologías, se desconoce cuál de ellas será más efectiva y la que menos impacto ambiental provoque en su funcionamiento, por ende la pregunta es:

¿Cuál tecnología de abatimiento para el nitrato, causa el menor impacto ambiental al momento de implementarlo en un APR?

## **2.8. Objetivos**

### **2.8.1. Objetivo General**

Evaluar los impactos ambientales desde un sistema de APR considerando diferentes escenarios posibles para abatir el nitrato en el agua potable

### **2.8.2. Objetivos Específicos**

- 1) Establecer diferentes escenarios tecnológicos a implementar en APR  
caso de estudio
- 2) Estimar los consumos y recursos necesarios para los escenarios  
establecidos
- 3) Determinar los impactos ambientales de cada escenario estudiado en el  
APR
- 4) Comparar los escenarios para determinar los que posean menores  
impactos y mayor abatimiento de nitrato

## **3. Metodología**

### **3.1. Establecer área de estudio**

Como primera instancia, se estableció el área de estudio en el cual se implementarán las tecnologías de abatimiento, para ello se definieron 3 criterios:

I. La región que posea mayor superficie de actividad agrícola

Este criterio fue establecido en base a la vulnerabilidad que sufren estos territorios en poseer grandes concentraciones de nitrato en sus aguas, por la utilización de fertilizantes nitrogenados en la actividad agrícola. Según un estudio realizado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) el año 2019, la región del Biobío/Ñuble son las regiones con mayor superficie silvoagropecuaria con 1948737 (ha), teniendo un total de 62797 predios a lo largo de estas regiones (ODEPA, 2019).

II. Identificar APR's que posean concentraciones mayores a los 30 mg/l

Según el informe realizado por la Dirección General de Aguas (DGA) en la región del Biobío/Ñuble, se identificaron 3 APR's que hayan obtenido una concentración superior a los 30 mg/l, el APR de Tomeco, APR de Puente Ñuble y el APR Cocharcas Pozo n°1 (Ministerio de obras públicas, 2019).

III. Seleccionar el APR que tenga mayor facilidad de acceso a la información requerida

Según la factibilidad de acceder a la información necesaria para realizar la investigación, se seleccionó el APR de Tomeco como área de estudio, esto es debido a que ya se han realizado previamente investigaciones de la Universidad de Concepción en el APR (Almuna, 2019), teniendo conexiones previas con la comunidad. Además, debido a la cercanía geográfica de éste, es factible la realización de salidas a terreno, para identificar el funcionamiento del sistema.

### 3.1.1. Área de estudio seleccionada

La localidad de Tomeco, pertenece a la comuna de Yumbel, región del Bio-Bio. Está ubicada al sur de la capital regional, en la depresión central, entre la cordillera de la Costa y el valle del Bio-Bio. Se encuentra a 18 Km de Yumbel y se estima que la cantidad de población es de 189 habitantes (Municipalidad de Yumbel, 2018-2021).

El principal curso de agua que abastece el APR de la localidad, es la Subcuenca de río Claro, por medio del estero Tomeco, como se puede ilustrar en la Figura 3.1. Posee un régimen pluvial, presentando diferencias significativas de caudal entre invierno y verano, siendo de mayo a septiembre los meses que presentan mayor cantidad de caudal.

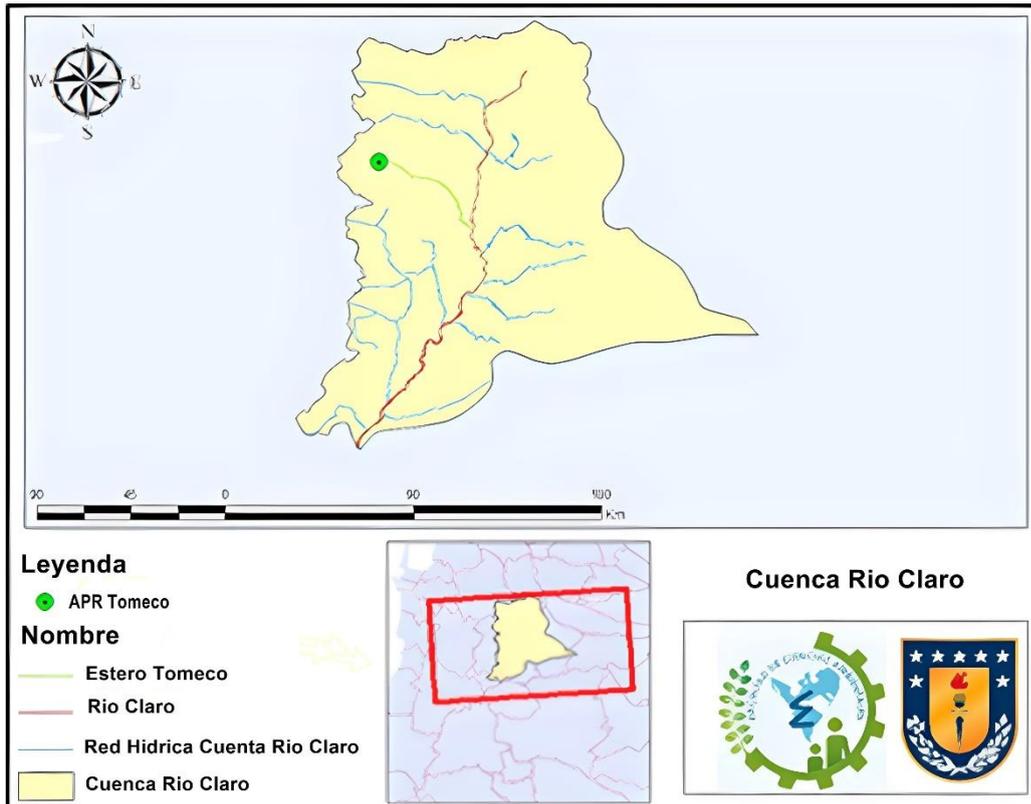


Figura 3.1: Red hídrica de Tomeco

Fuente: Elaboración propia

Las principales actividades laborales realizadas en la zona son la agrícola, forestal, comercio, hoteles y restaurantes, de los cuales, en su mayoría se ubican a orilla de carretera. Como muestra la Figura 3.2, en la zona el mayor uso de suelo proviene de la actividad agrícola, ocupando una mayor densidad geográfica, siendo una posible causa de que la zona sea propensa de elevados niveles de nitrato en el agua.

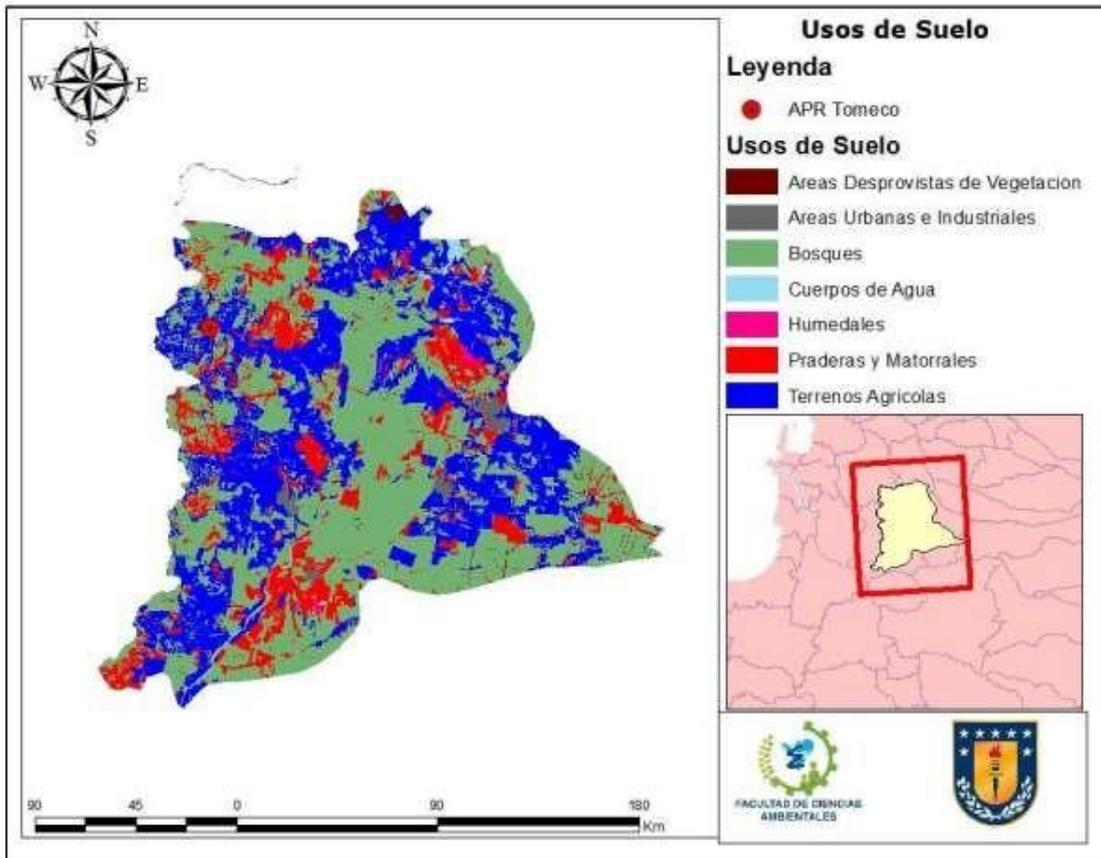


Figura 3.2: Usos de suelo de la localidad de Tomeco.

Fuente: (Almuna, 2019)

Dentro de la información proporcionada por la Seremi de Salud del Bio-Bio por medio de la ley de transparencia mostrada en la Figura 3.3, en agosto del 2017, el APR obtuvo una concentración 44,8 mg/l, sin embargo, en abril del mismo año obtuvo una concentración de 37,2 mg/l, teniendo una considerable diferencia entre ambas muestras.

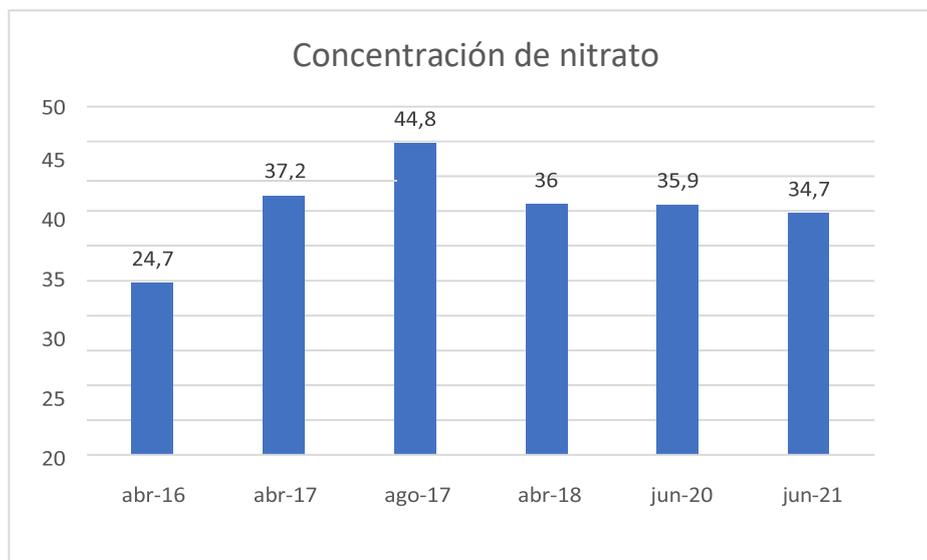


Figura 3.3: Concentración de nitrato del APR Tomeco

Fuente: Anexo nº6

Según Almuna 2019, el cambio significativo de la concentración en agosto del 2017 a abril del 2018 puede ser producido por el cambio del pozo de captación. Igualmente, hay que considerar las fechas en las que se realizó el muestreo, puesto que en los meses mayo a septiembre, la zona presenta un mayor caudal, lo cual produce mayor infiltración en el suelo, dando pie a la llegada de mayor cantidad de fertilizantes u otros químicos que se trabajen en la zona para aumentar la concentración de nitrato (Gobierno de Oragón, 2006).

### 3.2. Selección de las tecnologías de abatimiento

Se establecieron dos criterios para seleccionar las tecnologías de abatimiento que fueron implementadas en la investigación. El primer criterio abarca a las tecnologías que sean mayor recomendadas para abatir el nitrato en el agua potable, las cuales, según la bibliografía revisada, son las que ocupan las técnicas de separación, correspondientes a la osmosis inversa, intercambio iónico y la electrodiálisis (Zhi-Qi Lin, 2017) (Viviana B. Jensen, 2012) (Sakina Belhamidi, 2022) (Palomares, 2015).

El segundo criterio establecido, fue seleccionar las tecnologías que hayan sido aplicadas anteriormente en sistemas urbanos de menor envergadura, con el fin de tomarlos viables a implementar en sistemas de agua potable rural. Este criterio fue analizado en fase a las investigaciones estudiadas en la Tabla 2.5, y el informe realizado por la SUBDERE, donde establece la posibilidad de la implementación de las tecnologías de abatimiento de osmosis inversa e intercambio iónico en el territorio nacional, recalando además la comparación de

registros, donde se visualizan experiencias de estas tecnologías al a ver sido implementadas en sistemas urbanos de baja envergadura (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, 2018). Por ello, en base a todo lo anterior, se eligieron las tecnologías de abatimiento de intercambio iónico y osmosis inversa para esta investigación.

### 3.3. Establecer los escenarios

Al haber seleccionado el área de estudio, con las tecnologías de abatimiento a utilizar, se establecieron los escenarios que se evaluaron en la investigación. En primera instancia se define el escenario n°1, correspondiente al APR de Tomeco, visualizado en la Figura 3.4. La información de la composición del sistema del APR, fue extraída de la investigación realiza por Almuna el año 2019 en la zona, donde se identifica la implementación de una bomba sumergible (Stair modelo ST-3520) para extraer el agua cruda, para luego ir a un tanque de desinfección donde, por medio de una bomba inyectora (D-69123 Heidelberg-Germany) se suministra el desinfectante identificado como hipoclorito de sodio, para así almacenarla en un tanque para su distribución. El uso de energía principal de la planta es la electricidad proveniente del sistema eléctrico nacional (Almuna, 2019).

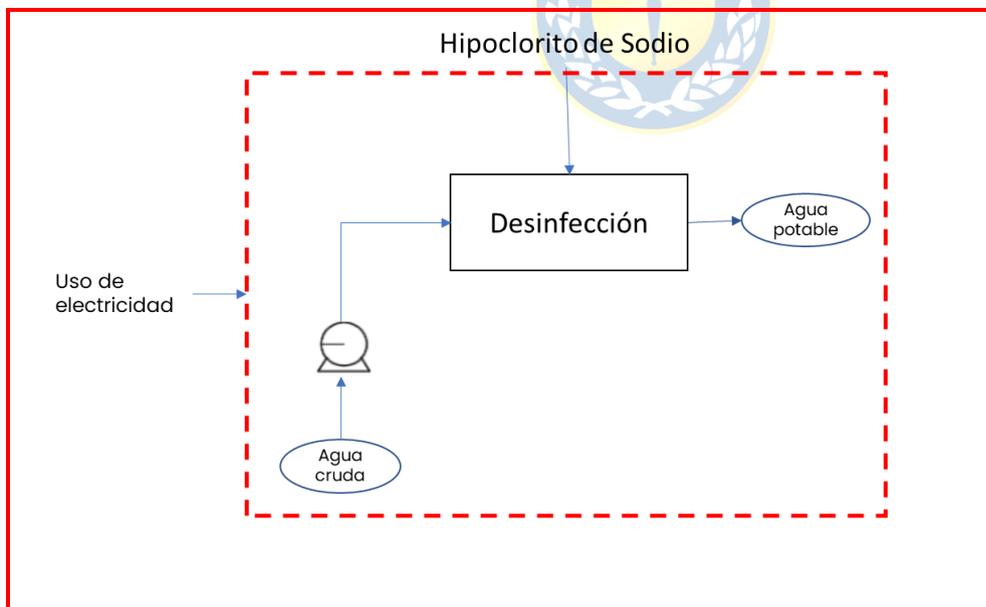


Figura 3.4: Escenario N°1, APR de Tomeco.

Fuente: (Almuna, 2019)

En el escenario n°2, se implementó en el APR de Tomeco la primera tecnología de abatimiento seleccionada, el intercambiador iónico, visualizada en la Figura 3.5. En esta

tecnología de abatimiento, es necesario la implementación de un pretratamiento, para evitar que los sólidos disueltos presentes en el agua cruda sean un impedimento al momento de la interacción de la resina aniónica con las partículas de nitrato, presentes en el agua a tratar, es por ello se implementa un filtro (Weiwei Mo, 2018) (Viviana B. Jensen, 2012). El tipo de resina fue elegida por medio de un informe realizado por la EPA el año 1983, el cual describe el proceso de interacción de la resina con el agua cruda. Además de seleccionar el tipo de regenerante a utilizar, siendo la salmuera la más utilizada (EPA, 1983). Existen dos tipos de residuos generados en este escenario, la salmuera utilizada en la regeneración de la resina, y el agua de lavado utilizada en el filtro, estos se tratarán en el sistema de tratamiento de aguas servidas que posee la planta, el cual según lo mencionado en Almuna (2019), la planta de Tomeco cuenta con un tratamiento de Lodos activados.

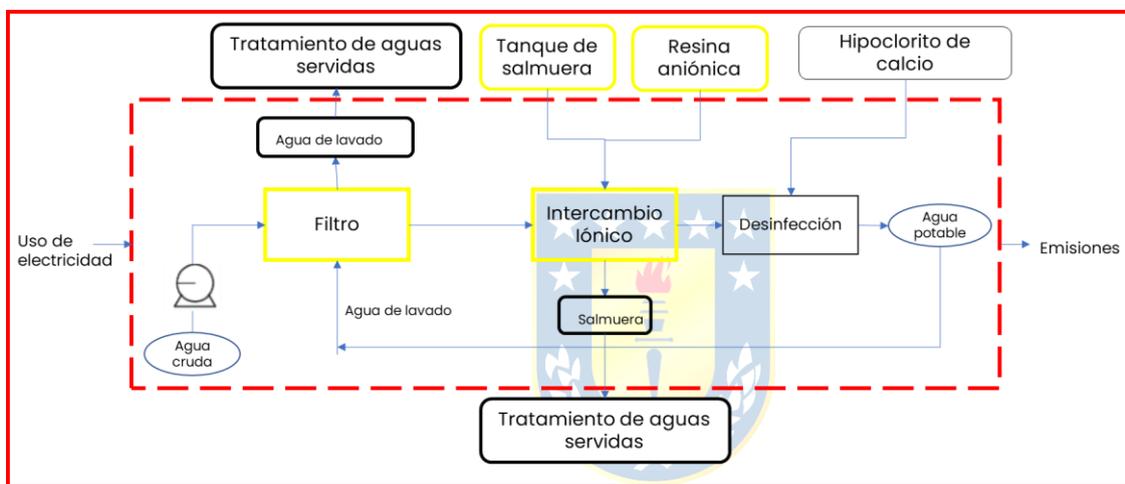


Figura 3.5: Escenario n°2, intercambio iónico.

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 1983) (Viviana B. Jensen, 2012) (Universidad de Caruña, 2015).

En el escenario n°3, se implementó en el APR de Tomeco la segunda tecnología de abatimiento seleccionada, la osmosis inversa, visualizada en la figura n°x. Esta tecnología además de necesitar un sistema de pretratamiento para evitar obstrucciones en la membrana (Mykola Gomelya, 2022), también es necesario un sistema de re-mineralización, puesto que la membrana no solo reduce el nitrato presente en el agua, si no la gran mayoría de los minerales que este presenta, dejando el agua tratada calificada como agua pura, no apta para el consumo humano (Montalva, 2016). Es por ello que, en base al informe descrito por Montalva el año 2016, se seleccionó un lecho calcita como un sistema de re-mineralización, necesitando calcita y dióxido de carbono gaseoso para su funcionamiento (Montalva, 2016). Cuando el agua cruda entra a la osmosis, solo pasa la membrana un 60%

a 70% del total del agua cruda a la membrana, dejando el porcentaje restante como un residuo llamado concentrado, este está compuesto por las concentraciones de todos los minerales rechazados por la membrana, incluyendo el nitrato (V.V.Goncharuk, 2013). Los residuos generados en este escenario son el concentrado y el agua de lavado, el cual son tratados por el sistema de lodos activados (Almuna, 2019).

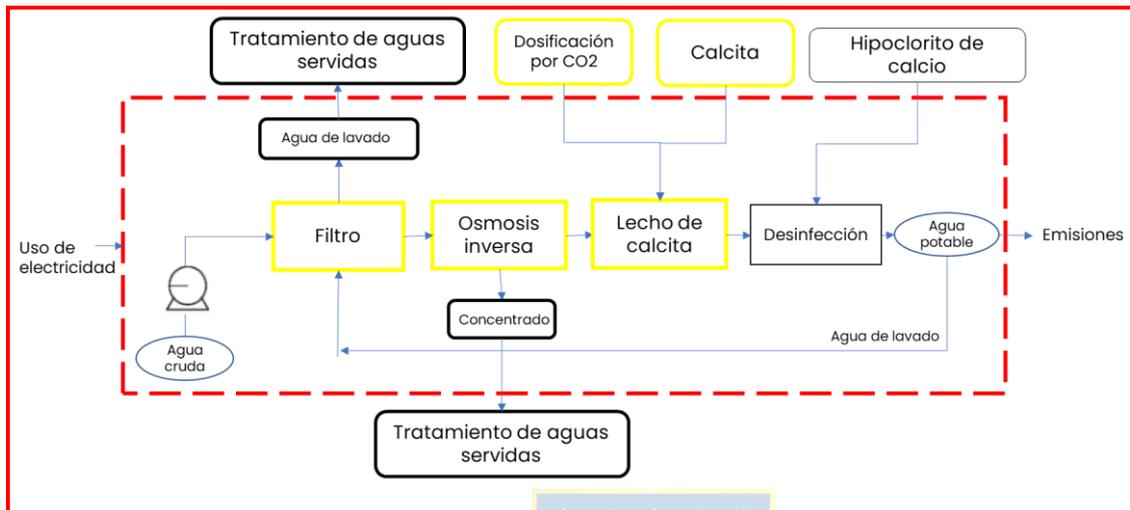


Figura 3.6: Escenario n°3, osmosis inversa

Fuente: (Montalva, 2016) (Mykola Gomelya, 2022) (V.V.Goncharuk, 2013) (Almuna, 2019)

### 3.3.1. Insumos y recursos necesarios para el funcionamiento de los escenarios

Para el escenario n°1, los insumos y recursos necesarios para el funcionamiento de la planta fueron extraídas principalmente por la entrevista realizada al operador (Anexo n°1), donde, mediante una visita a terreno realizada en febrero del año 2020 (Anexo n°2) se obtuvieron la cantidad de desinfectante, horas de trabajo y el caudal que produce la planta durante el año 2019 (Anexo n°3), por ende, esos fueron los datos considerados para realizar los cálculos necesarios para la investigación. Los cálculos realizados para determinar el promedio mensual del escenario fueron en base a lo presentado por el operador de la planta (Anexo n°4).

En el escenario n°2, los insumos y recursos necesarios para el correcto funcionamiento del intercambiador iónico fueron extraídas principalmente de fuentes bibliográficas, visualizadas en la Tabla 3.1. Lo cálculos para determinar la cantidad de salmuera, resina, y otros recursos, fueron extraídas principalmente del informe realizado por la EPA el año 1983

(Anexo N°6). El modelo seleccionado implementado en el escenario fue el OPADEN 820, distribuida por la empresa Veolia Water (Veolia water, 2022), ya que es congruente con las especificaciones que presenta el APR en estudio, cuyas características se encuentran visualizadas en el anexo n°5.

El cálculo de los insumos y recursos necesarios para el escenario n°3, también fueron extraídas principalmente por fuentes bibliográficas. El modelo implementado fue el Ecosoft MO-6, distribuida por la empresa Ecosoft (Ecosoft, 2022), cuyas características están visualizadas en el anexo n°7, el cálculo de los insumos utilizados en la osmosis inversa, se encuentran visualizados en el anexo n°8. Para determinar las cantidades necesarias para los insumos utilizados en la re-mineralización en base a un lecho de calcita, se calcularon en base a la investigación de Montalva el año 2016 (Anexo N°9).

Por último, la selección del filtro, el cual es ocupado como pretratamiento para el escenario n°2 y n°3, fue en base a lo mencionado en la entrevista realizada al operador y la salida a terreno realizada, ya que se identificó un filtro instalado en la planta en desuso (Anexo n°10). El cálculo de la cantidad de agua de lavado que necesita la planta para su funcionamiento fue proporcionado por un funcionario del proveedor del modelo, Aguasin. Este menciona que según las características fisicoquímicas que presenta la planta en base al análisis realizado por la Seremi de Salud (Anexo n°11), esta debe ser lavada 2 veces por semana como máximo.

Tabla 3.1: Fuentes de información de los insumos y recursos de cada escenario

Escenario	Proceso	Recursos	Fuente
Escenario N°1: APR Tomeco	Extracción de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energía</li> </ul>	Entrevista al operador; (Generadores Chile, 2022); (SEA Ingeniería, 2021)
	Desinfección	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energía</li> </ul>	Entrevista al operador; (Generadores Chile, 2022); (Prominent, 1993)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Desinfectante</li> </ul>	Entrevista al operador
Escenario N°2: Intercambiador Iónico	Filtro (Pretratamiento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Agua</li> </ul>	(Aguasin, 2012); (Almuna, 2019)
	Intercambiador Iónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energía</li> </ul>	(Generadores Chile, 2022); (Veolia water, 2022); (EPA, 1983)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Resina aniónica</li> </ul>	(EPA, 1983); (Viviana B. Jensen, 2012); (Veolia water, 2022); (Universidad de Caruña, 2015)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Salmuera</li> </ul>	(EPA, 1983); (Universidad de Caruña, 2015); (Marija Stjepanovic, 2017)	
Escenario N°3: Osmosis Inversa	Filtro (Pretratamiento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Agua</li> </ul>	(Aguasin, 2012); (Almuna, 2019)
	Osmosis inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energía</li> </ul>	(Generadores Chile, 2022); (Ecosoft, 2022); (Shoeman, 2003)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Agua</li> </ul>	(Ecosoft, 2022); (Viviana B. Jensen, 2012); (V.V.Goncharuk, 2013)
	Lecho de calcita (postratamiento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energía</li> </ul>	(Montalva, 2016)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Químicos</li> </ul>		(Montalva, 2016)	

### 3.3.2. Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida

La UF tiene como objetivo proporcionar un nivel de referencia para la comparación de los escenarios propuestos (Romeiko, 2019), por ello se estableció en base al objetivo del estudio, en este caso se definieron 2 unidades funcionales. La primera se estableció en base a la UF funcional mayormente utilizada para evaluar los sistemas de tratamiento de agua potable, siendo 1 m<sup>3</sup> de agua extraída. La segunda UF fue establecida considerando la finalidad del estudio, atribuyéndolo a la eficiencia de remoción de nitrato que poseen las tecnologías de abatimiento seleccionadas, siendo 1 mg de nitrato removido. Los alcances del sistema abarcarán todos los insumos y recursos que cada escenario necesite para su funcionamiento (electricidad, químicos, etc), y el sistema de tratamiento al que se someten los residuos generados. Los límites del sistema son la obtención del agua cruda, hasta la distribución del agua potable en la zona.

Los escenarios propuestos fueron modelados por medio del software SimaPro 8.0.5013, mediante el método ReCiPe Endpoint, jerarquía H, excluyendo los procesos de infraestructura y emisiones a largo plazo. La característica principal que posee el método seleccionado es la obtención de magnitud de los impactos, separados en 2 categorías diferentes. La primera es la categoría de impacto, o también llamado indicadores de punto medio, donde se calcula la magnitud de los impactos ambientales de cada escenario, obteniendo el perfil ambiental. La segunda es la categoría de daño, o también llamado indicadores de punto final, se calcula la magnitud de los daños que los escenarios podrían causar, dividida en 3 categorías; Salud humana, Recursos y Ecosistemas. Estas se encuentran ilustradas en la Figura 3.7. Se visualiza que la magnitud de algunas categorías de impacto contribuye al daño que este proceso puede causar, siendo directamente relacionadas entre sí.

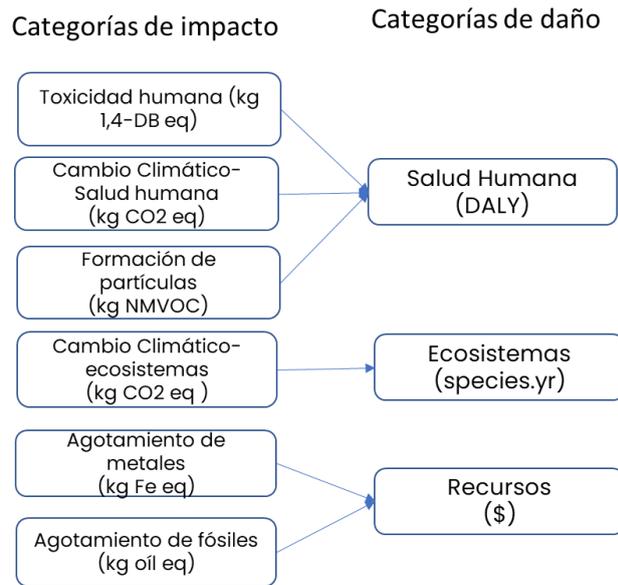


Figura 3.7: Relación de algunas categorías de impacto, con las categorías de daño.

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3. Consideración del inventario

Para el cálculo del inventario de cada escenario, se realizaron 4 consideraciones. La primera es que utilización de la primera unidad funcional definida, 1 m<sup>3</sup> de agua extraída, para calcular el inventario. Luego, se define una concentración inicial de 90 mg/l y una concentración final de 25 mg/l, según lo descrito por las características de los modelos obtenidos de los proveedores (Veolia water, 2022) (Ecosoft, 2022). Para efectos de la investigación, se simuló un tiempo de trabajo de la planta continuo, es decir, 24 horas, 7 días de la semana. Y finalmente, se considera que todos los escenarios propuestos poseen la misma cantidad de extracción de agua cruda, dejando las diferencias solo para calcular los mantenimientos de cada escenario según corresponda.

#### 4. Resultados y discusión

##### 4.1. Análisis de inventario

Luego de realizar el cálculo de inventario de cada uno de los escenarios, se analizaron las entradas y salidas de cada uno de ellos. En base a lo ilustrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se destaca que en todos los escenarios definidos se ocupa prácticamente la misma cantidad de desinfectante. No obstante, en el uso de electricidad se visualiza un cambio significativo en cada escenario. El escenario n°1 es quien consume menos electricidad con  $0,2 \text{ Kwh/mes}$ , mientras que el escenario n°3 es quien posee le mayor consumo con  $0,9 \text{ Kwh/mes}$ , seguido del escenario n°2, con un consumo de  $0,7 \text{ Kwh/mes}$ .

Tabla 3.2: Entradas de los escenarios, calculados en base a  $1 \text{ m}^3$  de agua extraída

Entradas			
Material	Escenario n°1: APR	Escenario N°2: Intercambio iónico	Escenario N°3: Osmosis Inversa
Hipoclorito de Sodio (Kg/mes)	$0,47 \times 10^{-9}$	$0,46 \times 10^{-9}$	$0,46 \times 10^{-9}$
Calcita (kg/mes)	-	-	0,04
Electricidad (Kwh/ mes)	0,2	0,7	0,9
Dióxido de carbono (kg/mes)	-	-	0,017
Resina aniónica (kg/ mes)	-	$1,22 \times 10^{-3}$	-
Salmuera ( $\text{m}^3/\text{mes}$ )	-	$8,25 \times 10^{-3}$	-

Fuente: Elaboración propia

Para las salidas de estos, ilustrados en la Tabla 3.3, se destaca que el escenario n°1 no genera ningún residuo en su funcionamiento. El escenario n°3 genera 44 veces más residuos que el escenario n°2, esto se explica debido a la concentración que la osmosis inversa genera, obteniendo un concentrado de un 37% del total del agua tratada, mientras

que el intercambiador iónico, solo genera un residuo en base a la cantidad de regenerante que este ocupa, siendo insignificante en comparación. Esto también explica por qué el escenario n°3 genera casi un 40% menos de agua potable que el resto de los escenarios.

Tabla 3.3: Salidas de los escenarios, calculados en base a 1 *m*<sup>3</sup> de agua extraída

Salidas			
Material	Escenario n°1: APR	Escenario N°2: Intercambio iónico	Escenario N°3: Osmosis Inversa
Salmuera ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>mes</i> )	-	8,25x10 <sup>-3</sup>	-
Concentrado ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>mes</i> )	-	-	0,37
Agua de lavado ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>mes</i> )	-	0,015	0.015
Agua potable ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>mes</i> )	1	1	0,6

Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Perfil Ambiental

En la Figura 3.8 se presentan las categorías de impacto (punto medio) más relevantes al momento de comparar todos los escenarios. Estos fueron calculados por normalización, ya que ayuda a entender mejor la relación, importancia y la magnitud de los resultados de los impactos ambientales para el sistema, además de visualizar la magnitud de los resultados de las categorías de impactos en relación con la información de referencia entregada por la base de datos. El proceso que posee mayor contribución en la magnitud de los impactos para el escenario n°2, es el uso de la salmuera, seguida del uso de electricidad para las categorías de impacto de Cambio climático-Salud humana, Formación de partículas, Cambio climático-Ecosistemas, Agotamiento de metales y Agotamiento de fósiles. Mientras tanto, en el escenario n°3, se atribuye la magnitud de los impactos principalmente al uso de

electricidad, para las categorías de impacto antes mencionadas. Para la última categoría de impacto, denominada Toxicidad humana, se ve mayor contribución a la magnitud de los impactos al tratamiento de los residuos generados en los escenarios n°3, por medio del sistema de Lodos activados.

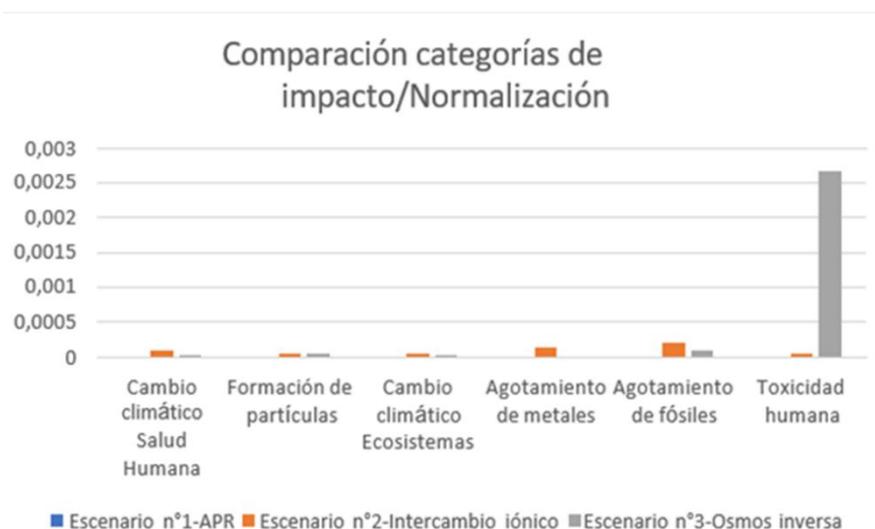


Figura 3.8: Perfil Ambiental

Fuente: Elaboración propia



A continuación, se desglosarán los 3 principales procesos que contribuyen a la magnitud de los impactos de todos los escenarios, el uso de la salmuera, electricidad y tratamiento de aguas servidas, a las categorías de impacto seleccionada

#### 4.2.1. Salmuera

El impacto ambiental provocado por la salmuera está directamente asociada a la extracción de esta mediante salineras. La contribución de las categorías de impacto de Agotamiento de metales y Agotamiento de fósiles se explica por la extracción de minerales que causa esta actividad (Maya, 2021).

En la categoría de Cambio climático-Ecosistemas, la contribución se explica por la modificación de las líneas costeras, alteración y/o eliminación de hábitat en las zonas de extracción, la acumulación de sedimentos, entre otros (Naseem, 2020) (Maya, 2021).

En las categorías de Cambio climático-Salud humana y Formación de partículas, se debe principalmente por el transporte de la sal a los lugares de acopio y distribución, generando emisiones de polvo con el tránsito de vehículos en la mina (SEA, 2020). Además de la

combustión de petróleo y Diesel para el funcionamiento de los equipos y maquinarias, provocando gases de efecto invernadero tales como el dióxido de carbono, siendo estas causantes de aumentar de forma gradual la temperatura del planeta por medio del calentamiento global (Maya, 2021) (SEA, 2020).

#### **4.2.2. Electricidad**

El impacto que genere el uso de electricidad depende del tipo de generación de energías se modele en el software. Para efectos de este estudio, se modelo el Sistema eléctrico Nacional (SEN), ingresando los datos obtenidos en diciembre del 2022 (Generadores Chile, 2022). Según la bibliografía, el SEN está compuesto por la generación de un 38% de energías no renovables (13,0% carbón, 15,1% gas natural y 9,8% petróleo). La combustión de combustibles fósiles genera los ya mencionados gases de efecto invernadero tales como el dióxido de carbono y le metano, siendo los responsables del calentamiento global (Maya, 2021). Este punto explicaría la contribución que este proceso tiene con las categorías de Agotamiento de fósiles, Agotamiento de metales, Formación de partículas y Cambio climático-Salud humana.

Para la categoría de Cambio climático-ecosistemas, su contribución se atribuye al cambio geográfico que representa esta actividad en la zona aplicada (Pastén, 2012).

#### **4.2.3. Tratamiento de aguas servidas**

La contribución de este proceso depende del tipo de tratamiento se sometan los residuos generados. El APR de Tomeco posee un sistema de tratamiento de lodos activados, la particularidad de este proceso es la generación de lodo residual, el cual contiene un 95% de agua, y el resto está compuesto por nitrógeno, fosforo, potasio y en menos envergadura, magnesio y calcio, además de poseer un porcentaje menos de metales pesados tales como el cadmio, cromo, níquel, entre otros (Ministerio para la transición ecológica y el reto demografico-España, 2013). El impacto que este provoque será proporcional a la disposición que se le de este lodo residual, teniendo alternativas de incineración, otras de traslado a un relleno sanitario o implementarlo como posible fertilizante en los cultivos. Este último es una propuesta reciente, donde también se destaca el posible riesgo de aumentar las concentraciones de nitrato en la zona, ya que este lodo posee nitrógeno en su composición (CRHIAM, 2022). (Zabotto, 2019) (Ronco, 2005). La mayor contribución del escenario n°3 se explica por lo ya antes mencionado porcentaje de concentrado que este

produce al tratar el agua cruda, llegando en esta investigación, a un 37% del total del agua tratada.

### 4.3. Perfil de Daño

Según la contribución que le da las categorías de impacto a las categorías de daño, se visualiza en la Figura 3.9 una mayor contribución en la categoría de daño Salud humana, siendo esta más afectada en la implementación de los escenarios propuestos. En términos generales, se ilustra que el escenario n°2-Intercambio iónico, es el escenario con la tecnología de abatimiento que posee menor magnitud en los impactos generados en su funcionamiento, siendo este la tecnología viable en un punto de vista ambiental.

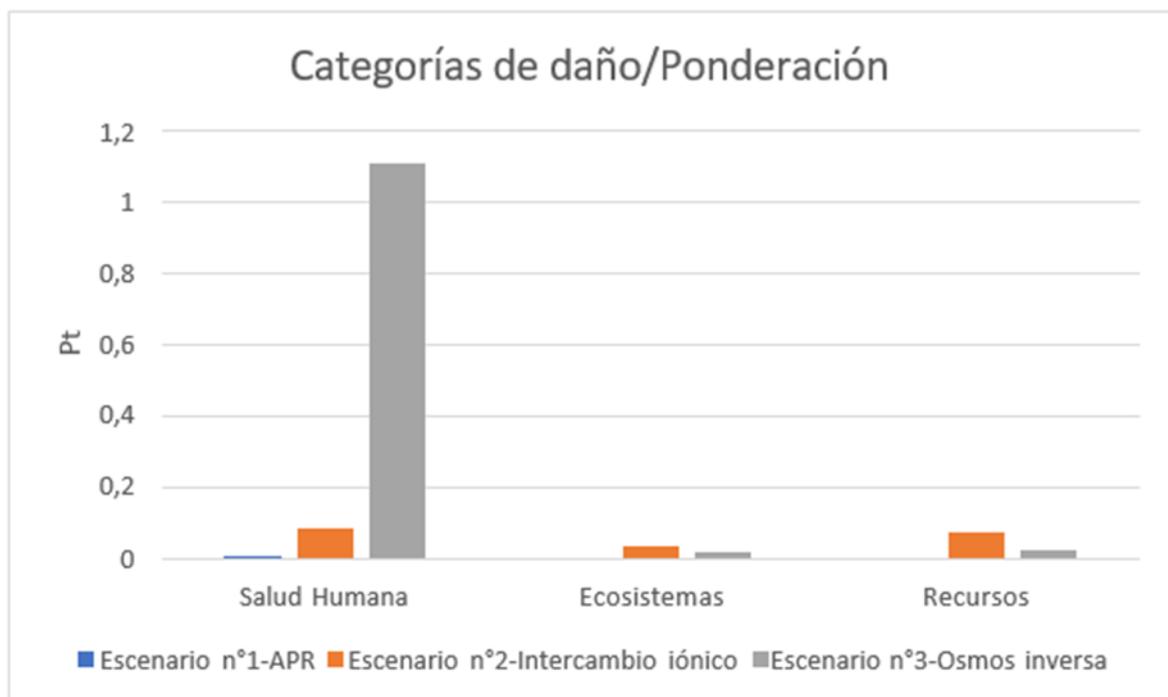


Figura 3.9: Perfil de daño

Fuente: Elaboración propia

### 4.4. Impactos totales de cada escenario para diferentes unidades funcionales

Basándose a los resultados obtenidos en las categorías de daño que se encuentran en función, a  $1m^3$  de agua potable, estos fueron convertidos por categoría de daño en función a 1 mg de nitrato removido, para visualizar si existe alguna diferencia en la magnitud de los

impactos obtenidos (Anexo n°12). En esta conversión se dejó excluido al escenario n°1, puesto que no posee remoción de nitrato en su sistema.

Al comparar ambas unidades funcionales, se visualiza que en la UF de 1 m<sup>3</sup> de agua extraída, la magnitud de los daños totales del escenario n°3 es 6 veces mayor al escenario n°2. Mientras tanto, al realizar la conversión de la UF de 1 mg de nitrato removido, esta magnitud cambia considerablemente, dejando al escenario n°3 una magnitud 200, en comparación al escenario n°2. Esta diferencia se explica por la eficiencia de remoción que presentan las tecnologías de abatimiento seleccionadas, siendo el intercambio iónico el que menor eficiencia presenta con un 28%, mientras que la osmosis inversa presenta un 98% de remoción. Cabe recalcar que esta estimación es realizada exclusivamente del tratamiento directo del agua cruda en estas tecnologías de abatimiento, excluyendo sus pre y postratamiento.

Independiente de la diferencia de magnitud que posean ambas unidades funcionales, el intercambio iónico sigue siendo la tecnología que presenta menos magnitud en los daños causados en su funcionamiento, por ende, este seguiría siendo la implementación más viable.

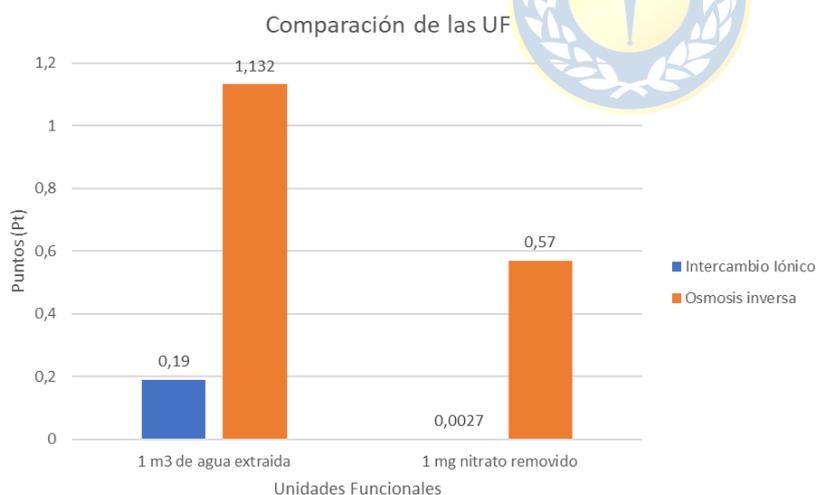


Figura 3.10: Comparación de las UF

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. Contribución de la investigación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible fue admitida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el año 2015. En este mismo evento, se desarrollaron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el cual incluyen metas para combatir el cambio climático, la equidad en la educación, la eliminación de la pobreza, la igualdad de la mujer, el diseño de ciudades sostenibles, la defensa del medio ambiente, entre otros (Naciones Unidas, 2022).

Esta investigación contribuye al cumplimiento del objetivo n°6: Agua limpia y saneamiento /Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos. Al evaluar la implementación de nuevas tecnologías en los APR, para garantizar uno el cumplimiento de la Ley n°20998/2017: Regulación de los servicios sanitarios rurales, donde establece la garantía de la obtención de agua limpia, en este caso en particular, enfocado en la liberación de las concentraciones nocivas de nitrato, para así evitar el posible daño a la salud de las personas. Considerando lo anterior, hay 2 metas que están relacionadas con la investigación realizada:

- De aquí al 2030, mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos
- De aquí al 2030, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

## 5. Conclusiones

Existe una necesidad de implementar nuevas tecnologías de abatimiento de nitrato en los sectores rurales, ya que está son propensas a elevar sus concentraciones debido a que una actividad predominante es la actividad agrícola. En esta investigación se seleccionando el Intercambio Iónico y Osmosis inversa por poseer mayores estudios en su aplicación.

Según los resultados obtenidos, se es más factible la implementación de un intercambiador iónico en el punto de vista ambiental, ya que posee menores impactos ambientales al momento de implementarlo en un APR.

El APR Tomeco no posee mayores impactos ambientales en su funcionamiento, pero presenta riesgo para superar las concentraciones de nitrato permitidas, provocando posibles daños a la salud humana.

Los procesos que dieron mayor aporte a la magnitud de los impactos son el uso de la salmuera, electricidad y el tratamiento de aguas servidas.

La unidad funcional de 1 mg nitrato removido no presenta mayores cambios en los resultados generales, pero hay mayor variación en el sistema de osmosis inversa debido a su mayor eficiencia de remoción.

No solo la actividad agrícola es precursora de elevar las concentraciones de nitrato en el agua, por lo que no se descarta un aumento de las concentraciones en otras actividades en la zona.



## 6. Referencias

- Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (9 de 2015). *Resumen de salud pública nitrato y nitrito*. Obtenido de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs204.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs204.pdf)
- Aguasin. (2012). *Filtros de profundidad a presión (series QMA/QAA)*.
- Alexandre Bonton, C. B. (4 de 1 de 2012). *Evaluación comparativa del ciclo de vida de las plantas de tratamiento de agua*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916411007375?via%3Dihub#bb0080>
- Almuna, C. (2019). *Peligros y eventos peligrosos para el sistema de saneamiento rural en un contexto de planes de seguridad de agua (PSA) y planes de seguridad de saneamiento (PSS) en un caso de estudio*. Universidad de Concepción.
- Andess chile. (2020). *Estadísticas*. Obtenido de <https://www.andess.cl/estadisticas/#:~:text=Los%20chilenos%20que%20habitan%20fuera,el%2041%25%20de%20fuentes%20superficiales.>
- Bag-Sou Moon, C.-y. P.-M.-W. (25 de 10 de 2016). *Un estudio sobre la mejora de la calidad del agua de las obras hidráulicas de las aldeas utilizando resina de intercambio iónico y desinfección sin sal*. Obtenido de <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART002160068>
- Banco Mundial. (2021). *Chile rural brief 2021*.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2022). *Ley Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1100197&idParte=9770935>
- Carbotecnia. (30 de 9 de 2019). *Limpieza de las membranas de ósmosis inversa – Mantenimiento*. Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/proceso-de-limpieza-de-membranas-de-osmosis-inversa/>
- CRHIAM. (2022). *Sustentabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas servidad: una mirada desde el análisis de ciclo de vida*.
- Departamento de Calidad Medioambiental del Estado de Oregón. (5 de 12 de 2020). *Nitratos en agua potable*. Obtenido de <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/NitrateSpanishVersion.pdf>
- Departamento de salud pública medio ambiental del estado de Washington. (2018). *Tratamiento y remediación de nitratos para pequeños sistemas de abastecimiento de agua*.
- Dirección general de aguas. (2021). *Estudio de la relación entre concentraciones de nitrato y el nivel de agua subterránea en fuentes APR, regiones de Coquimbo a los Lados (2014-2020) Chile*.
- Ecosoft. (2022). *Sistema de osmosis inversa industrial*. Obtenido de <https://es.ecosoft.com/product/ecosoft-mo6>
- Elisa Blanco, G. D. (2016). *Agua potable rural: desafíos para la provisión sustentable del recurso*.
- EPA. (1983). *Eliminación de nitratos en pequeños sistemas públicos de abastecimiento de agua*.

- Gencat. (11 de 03 de 2014). *Medio ambiente y sostenibilidad*. Obtenido de [https://mediambient.gencat.cat/es/05\\_ambits\\_dactuacio/empresa\\_i\\_produccio\\_sostenible/estrategia\\_ecodisseny/ecodisseny/eines/eines\\_av/acv/](https://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/estrategia_ecodisseny/ecodisseny/eines/eines_av/acv/)
- Generadores Chile. (12 de 2022). *Generación eléctrica en Chile*. Obtenido de <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- Gobierno de Aragón. (2006). *Fertilización nitrogenada*. Obtenido de [https://citarea.citaraaron.es/citarea/bitstream/10532/868/1/10532-105\\_11.pdf](https://citarea.citaraaron.es/citarea/bitstream/10532/868/1/10532-105_11.pdf)
- Hoyos, M. A. (2015). *Agua para uso domestico en la ciudad de pereira: Analisis de ciclo de vida y escenarios de manejo ambientla*.
- Instituto mexicano de tecnología del agua. (2020). *Re mineralización de agua osmotizada mediante una tecnología y ciencias del agua*.
- Isidora Victoria, F. M.-V. (20 de 10 de 2015). *Contenido en nitratos de aguas de consumo público españolas*. Obtenido de [https://scielo.isciii.es/pdf/gsv29n3/original\\_breve4.pdf](https://scielo.isciii.es/pdf/gsv29n3/original_breve4.pdf)
- Isidro Vitoria, F. M. (3 de 5 de 2015). *Contenido en nitratos de aguas de consumo público españolas*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911115000023#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20Organizaci%C3%B3n%20Mundial%20de,la%20producci%C3%B3n%20de%20metahemoglobinemia%204>
- J.A. Redondo, F. L. (30 de 11 de 1997). *Consideraciones de selección y diseño de membranas para satisfacer las necesidades europeas de agua potable en función de las diferentes condiciones del agua de alimentación*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916497001471?via%3Dihub>
- José Luis Arumi, J. N. (2006). *Evaluación del riesgo de contaminación con nitrato de pozos de suministro de agua potable rural en Chile*. Obtenido de <https://www.scielosp.org/article/rpsp/2006.v20n6/385-392/>
- M. Pirsahab, T. K. (2015). *Comparación del coste operativo y el rendimiento de los sistemas de electrodiálisis y ósmosis inversa en la eliminación de nitratos del agua potable en Golshahr, Mashhad*.
- Maedeh P. Shahabi, A. M. (2 de 2 de 2015). *Evaluación ambiental y económica de la toma de pozos de playa versus la ingesta abierta para la desalinización por ósmosis inversa de agua de mar*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916414006407?via%3Dihub>
- Marianna Garfí, E. C.-R. (20 de 11 de 2016). *Análisis del ciclo de vida del agua potable: comparación del tratamiento convencional del agua, la ósmosis inversa y el agua mineral en botellas de vidrio y plástico*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616311234?via%3Dihub>
- Marija Stjepanovic, D. M. (12 de 2017). *Eliminación de nitratos del agua por intercambio iónico*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/322133526\\_Nitrate\\_removal\\_from\\_water\\_by\\_ion\\_exchange](https://www.researchgate.net/publication/322133526_Nitrate_removal_from_water_by_ion_exchange)
- Maya, R. (2021). *Análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de ablandamiento de agua*. Obtenido de <https://idus.us.es/handle/11441/126545>

- Ministerio de desarrollo social. (2015). *Metodología de formulación y evaluación de proyectos de agua potable rural (APR)*.
- Ministerio de obras públicas. (2015). *Diagnostico de calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O´higgins*.
- Ministerio de obras públicas. (2016). *Diagnostico de calidad de agua subterránea en la región Metropolitana*.
- Ministerio de obras públicas. (2017). *Diagnostico de calidad de agua subterránea de la región de Coquimbo*.
- Ministerio de obras públicas. (2017). *Diagnostico de calidad de aguas subterráneas de la región de Valparaíso*.
- Ministerio de obras públicas. (2018). *Diagnostico de calidad de aguas subterráneas de la región del Maule*.
- Ministerio de obras públicas. (2019). *Diagnostico de calidad de agua subterránea de las regiones del Ñuble y Bio-Bio*.
- Ministerio de obras públicas. (6 de 10 de 2020). *Fiscalía*. Obtenido de <https://fiscalia.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=75#:~:text=As%C3%AD%20a%20partir%20de%20noviembre,bajo%20la%20tutela%20del%20MOP>
- Ministerio de obras públicas. (2021). *Balance de gestión integral*.
- Montalva, J. C. (2016). *Diseño de una planta desalinizadora con sistema de osmosis inversa para producir 20000 m3/día*. Pontificie universidad de Valencia.
- Municipalidad de Yumbel. (2018-2021). *PLan estratégico de desarrollo comunal (PLADECO) Yumbel*.
- Mykola Gomelya, T. S. (2022). *Eficacia de la ósmosis inversa y el intercambio iónico en la purificación del agua a partir de nitratos*. journal of ecological engineering.
- Nadia Espejo-Herrera, E. G.-L.-G.-T. (8 de 3 de 2016). *Riesgo de cáncer colorrectal y exposición a nitratos a través del agua potable y la dieta*. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ijc.30083>
- Naseem, S. (2020). *Evaluación semicuantitativa del impacto ambiental de la mina de sal de Khewra, Pakistán: una aplicación del enfoque matemático de la sostenibilidad ambiental*. Minería, Metalurgia y Exploración.
- Organización internacional de normalización. (2006). *ISO 14040:2006* . Obtenido de Gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Pacheco, J. (2003). *Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas*. ResearchGate.
- Palomares, A. E. (2015). *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*. Obtenido de <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>
- Pastén, C. (2012). *Chile, energía y desarrollo*. Scielo.
- Prominent. (1993). *Instrucciones del servicio de bomba dosificadora ProMinent gamma G/4b*.

- Romeiko, X. (2019). *Una evaluación comparativa del ciclo de vida de los sistemas de cultivo regados con agua subterránea y agua recuperada en el norte de China*.
- Ronco, A. (2005). *La aplicación de esquemas de evaluación de peligros utilizando la bateía de pruebas de toxicidad Watertox*. Springer.
- Sakina Belhamidi, S. E.-G. (28 de 5 de 2022). *Eliminación de nitratos en aguas subterráneas mediante ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis: rendimiento y comparación de costos*. Obtenido de [https://www.deswater.com/DWT\\_abstracts/vol\\_262/262\\_2022\\_338.pdf](https://www.deswater.com/DWT_abstracts/vol_262/262_2022_338.pdf)
- SEA Ingeniería. (2021). *Stairs ST-3520T PM Technology*. Obtenido de <https://seaing.cl/bombas-para-pozo/1356-bombas-para-pozo-stairs-st-3520-t-pm-technology.html>
- Sergi García-Segura, M. L.-L. (15 de 11 de 2018). *Reducción electrocatalítica de nitratos: fundamentos para aplicaciones de tratamiento de agua a gran escala*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337318304715?via%3Dihub>
- Shoeman, J. (2003). *Eliminación de nitratos mediante ósmosis inversa en una zona rural*. ELSEVIER.
- Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo. (2018). *Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural*. Obtenido de [https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/estudio\\_de\\_soluciones\\_sanitarias\\_para\\_el\\_sector\\_rural\\_1.pdf](https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/estudio_de_soluciones_sanitarias_para_el_sector_rural_1.pdf)
- SurQuímica. (2022). Obtenido de <https://surquimica.cl/productos/detalle/hipoclorito-de-calcio-65-45kg-granulado-179780>
- Thomas Schmidt P, S. S. (8 de 2012). *Medición de nitratos y nitritos en agua y saliva de población rural precordillerana de la VIII región*. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-48162012000200003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-48162012000200003)
- Universidad de Caruña. (2015). *Intercambio iónico (FT-TER-006)*.
- V.V.Goncharuk, V. (8 de 5 de 2013). *Purificación de nitratos por agua por el método de ósmosis inversa a baja presión*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063455X13020045>
- Veolia water. (2022). *La unidad compacta Opaden elimina nitratos para producir agua potable para ciudades de tamaño pequeño*. Obtenido de <https://www.anz.veoliawatertechnologies.com/solutions/products/opaden>
- Viviana B. Jensen, J. L. (7 de 2012). *Informe técnico número 6: tratamiento de aguas potables a partir de nitratos*. Obtenido de <https://ucanr.edu/sites/groundwaternitrate/files/139107.pdf>
- Weiwei Mo, P. K. (15 de 10 de 2018). *Implicaciones ambientales y económicas del ciclo de vida de las pequeñas actualizaciones del sistema de agua potable para reducir los subproductos de desinfección*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135418304974?via%3Dihub#sec2.4>
- Xiaobo Xue, S. C. (1 de 2 de 2019). *Análisis holístico de los sistemas urbanos de agua en la región del Gran Cincinnati: (1) evaluación del ciclo de vida e implicaciones de costos*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S258991471830015X>

Zabotto, A. (2019). *Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto - diagnóstico de investigación*. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292019000200103&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292019000200103&script=sci_arttext)

Zhi-Qi Lin, S. Y.-W.-P.-Q. (1 de 2 de 2017). *Desnitrificación en un sistema bioelectro-fotocatalítico integrado*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135416308879?via%3Dihub>

## 7. Anexos

### 7.1. Anexo n°1

Tabla 7.1: Entrevista al operador sobre el funcionamiento del APR Tomeco

Preguntas	Respuestas
¿Posee los datos tabulados del caudal de la planta?	Si, en un cuaderno que solo manipulo yo
¿Qué tipo de desinfectante ocupan?	Hipoclorito de Calcio
¿En que se compone la planta?	Poseemos una bomba sumergible que extrae el agua subterránea, esta pasa pro la caseta de desinfección, donde la bomba dosificadora le inyecta el desinfectante, para así pasar por el tanque y distribuirlo a la comunidad
¿Han identificado problemas con el nitrato en algún momento?	Tuvimos que hacer un cambio de pozo una vez, pero desde ese momento no hemos tenido inconvenientes.
Los filtros que se encuentran instalados en la planta ¿Se han utilizado alguna vez?	No, desde el momento que se instalaron.
Si se le dieran puesta en marcha ¿Funcionaría?	Debería, puesto que nosotros nunca lo hemos manipulado
¿Se le a echo mantención a la planta de tratamiento?	Sí, regularmente solo lo que ocupamos para que funcione
¿Revisan regularmente las muestras que realiza la Seremi de Salud al agua?	Sí, al momento que se entrega es expuesta en la pizarra de la sede para que todos lo vean.
¿Han tenido problemas con el suministro de agua?	En ocasiones, pero anda que no sea solucionable
¿Cuáles son los periodos donde presentan mayores problemas con el suministro de agua?	En el periodo escolar, ya que la escuela consume un gran porcentaje de agua.

Fuente: Elaboración propia

## 7.2. Anexo n°2

Identificación de las instalaciones presentes en el APR de Tomeco mediante visita a terreno



Figura 7.1: Interior de la caseta de desinfección de la APR de Tomeco. a) Bomba inyectora, b) Desinfectante, c) Tubos y d) Zona de mezcla para el desinfectante

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7.2: Sistema de agua potable de la localidad de Tomeco. a) Caseta de desinfección, b) Sistema de captación, c) Tanque de almacenamiento y d) Filtro en desuso.

Fuente: Elaboración propia complementada por (Almuna, 2019)



### 7.3. Anexo N°3

Tabla 7.2: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de enero.

Enero											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-01-2019	21	62	0,7	17-01-2019	15	55	0,6				
02-01-2019	18	54	0,7	18-01-2019	18	57	0,8				
03-01-2019	20	59	0,9	19-01-2019	18	59	0,9				
04-01-2019	17	51	1	20-01-2019	17	55	0,8				
05-01-2019	20	60	0,9	21-01-2019	16	52	0,4				
06-01-2019	21	60	0,7	22-01-2019	17	56	0,2				
07-01-2019	19	57	0,8	23-01-2019	14	48	0,4				
08-01-2019	18	53	0,6	24-01-2019	18	60	0,5				
09-01-2019	14	41	0,5	25-01-2019	15	50	0,5				
10-01-2019	16	47	0,7	26-01-2019	17	57	0,3				
11-01-2019	24	71	0,4	27-01-2019	22	70	0,3				
12-01-2019	20	63	0,7	28-01-2019	19	62	0,3				
13-01-2019	20	66	0,5	29-01-2019	21	64	0,6				
14-01-2019	18	61	0,7	30-01-2019	20	62	0,9				
15-01-2019	16	56	0,5	31-01-2019	16	52	0,7				
16-01-2019	19	60	1								

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador

Tabla 7.3: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de febrero.

Febrero							
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-02-2019	20	63	0,5	16-02-2019	21	56	0,6
02-02-2019	18	54	0,6	17-02-2019	18	49	0,6
03-02-2019	17	55	0,4	18-02-2019	20	54	0,7
04-02-2019	24	67	0,7	19-02-2019	21	57	0,7
05-02-2019	22	58	0,5	20-02-2019	18	49	0,8
06-02-2019	23	65	0,6	21-02-2019	20	55	0,6
07-02-2019	19	50	0,3	22-02-2019	18	47	0,5
08-02-2019	23	61	0,3	23-02-2019	20	55	0,6
09-02-2019	18	50	0,2	24-02-2019	14	37	0,4
10-02-2019	23	66	0,9	25-02-2019	23	63	0,6
11-02-2019	20	53	0,8	26-02-2019	19	48	0,5
12-02-2019	19	50	0,6	27-02-2019	19	50	0,4
13-02-2019	16	46	0,7	28-02-2019	17	47	0,4
14-02-2019	24	65	0,5				
15-02-2019	18	52	0,7				

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador

Tabla 7.4: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de marzo.

Marzo											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-03-2019	20	56	0,7	17-03-2019	22	52	0,6				
02-03-2019	20	52	0,8	18-03-2019	22	54	0,5				
03-03-2019	22	63	0,7	19-03-2019	23	57	0,6				
04-03-2019	21	56	0,6	20-03-2019	20	46	0,7				
05-03-2019	20	52	0,6	21-03-2019	16	41	0,7				
06-03-2019	22	59	0,5	22-03-2019	23	58	0,5				
07-03-2019	17	42	0,5	23-03-2019	15	37	0,6				
08-03-2019	19	50	0,6	24-03-2019	24	58	0,4				
09-03-2019	22	56	0,4	25-03-2019	19	49	0,4				
10-03-2019	22	56	0,5	26-03-2019	22	56	0,5				
11-03-2019	24	59	0,6	27-03-2019	15	38	0,4				
12-03-2019	23	58	0,4	28-03-2019	18	44	0,4				
13-03-2019	22	54	0,4	29-03-2019	17	41	0,4				
14-03-2019	20	50	0,5	30-03-2019	17	42	0,5				
15-03-2019	23	59	0,5	31-03-2019	21	54	0,4				
16-03-2019	24	60	0,5								

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.

Tabla 7.5: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de abril.

Abril											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-04-2019	18	44	0,4	16-04-2019	16	38	0,5				
02-04-2019	15	40	0,4	17-04-2019	13	35	0,6				
03-04-2019	23	46	0,4	18-04-2019	15	39	0,5				
04-04-2019	17	41	0,4	19-04-2019	16	39	0,4				
05-04-2019	15	37	0,4	20-04-2019	13	34	0,3				
06-04-2019	18	47	0,5	21-04-2019	16	37	0,5				
07-04-2019	17	42	0,4	22-04-2019	15	40	0,7				
08-04-2019	19	49	0,5	23-04-2019	13	31	0,5				
09-04-2019	15	36	0,5	24-04-2019	14	34	0,4				
10-04-2019	14	36	0,5	25-04-2019	18	45	0,6				
11-04-2019	15	39	0,6	26-04-2019	14	37	0,7				
12-04-2019	13	33	0,6	27-04-2019	17	40	0,6				
13-04-2019	13	34	0,5	28-04-2019	16	41	0,7				
14-04-2019	16	38	0,6	29-04-2019	15	36	0,6				
15-04-2019	15	40	0,5	30-04-2019	17	43	0,5				

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.

Tabla 7.6: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de mayo.

Mayo											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-05-2019	15	38	0,6	17-05-2019	15	40	0,7				
02-05-2019	16	40	0,6	18-05-2019	13	36	0,8				
03-05-2019	10	27	0,4	19-05-2019	16	44	0,6				
04-05-2019	14	35	0,6	20-05-2019	15	39	0,7				
05-05-2019	17	41	0,7	21-05-2019	14	39	0,6				
06-05-2019	15	37	1	22-05-2019	18	48	0,8				
07-05-2019	12	34	0,7	23-05-2019	22	57	0,8				
08-05-2019	13	35	0,6	24-05-2019	24	62	0,9				
09-05-2019	11	30	0,8	25-05-2019	14	38	0,8				
10-05-2019	13	35	0,7	26-05-2019	14	38	0,8				
11-05-2019	10	29	0,8	27-05-2019	14	37	0,7				
12-05-2019	18	47	0,6	28-05-2019	13	35	0,7				
13-05-2019	15	39	0,8	29-05-2019	14	38	0,8				
14-05-2019	13	37	0,7	30-05-2019	12	36	0,7				
15-05-2019	13	33	0,8	31-05-2019	10	25	0,6				

16-05-2019	13	36	0,8				
------------	----	----	-----	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.

Tabla 7.7: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de junio.

Junio										
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Cúbicos	Desinfectante (mg/l)		
01-06-2019	11	33	0,7	16-06-2019	13	37		0,6		
02-06-2019	14	37	0,6	17-06-2019	12	37		0,8		
03-06-2019	13	34	0,5	18-06-2019	13	37		0,7		
04-06-2019	13	36	0,7	19-06-2019	13	36		0,7		
05-06-2019	12	34	0,8	20-06-2019	10	31		0,7		
06-06-2019	15	40	0,7	21-06-2019	11	32		0,8		
07-06-2019	11	33	0,6	22-06-2019	12	34		0,7		
08-06-2019	13	35	0,7	23-06-2019	13	38		0,7		
09-06-2019	14	40	0,7	24-06-2019	12	35		0,7		
10-06-2019	12	33	0,7	25-06-2019	8	27		0,8		
11-06-2019	12	36	0,6	26-06-2019	10	27		0,6		
12-06-2019	10	29	0,6	27-06-2019	8	26		0,7		

13-06-2019	11	30	0,8	28-06-2019	8	29	0,8
14-06-2019	11	31	0,8	29-06-2019	9	32	0,8
15-06-2019	12	35	0,7	30-06-2019	9	31	0,7

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.



Tabla 7.8: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de julio.

Julio											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-07-2019	12	38	0,6	17-07-2019	6	21	0,7				
02-07-2019	7	24	0,7	18-07-2019	9	27	0,7				
03-07-2019	10	31	0,8	19-07-2019	10	31	0,8				
04-07-2019	8	28	0,7	20-07-2019	8	24	0,5				
05-07-2019	11	33	0,6	21-07-2019	11	37	0,7				
06-07-2019	9	28	0,5	22-07-2019	9	28	0,8				
07-07-2019	8	28	0,6	23-07-2019	10	31	0,7				
08-07-2019	12	37	0,7	24-07-2019	10	32	0,8				
09-07-2019	9	30	0,8	25-07-2019	11	34	0,7				
10-07-2019	10	30	0,8	26-07-2019	10	32	0,6				

11-07-2019	9	30	0,7	27-07-2019	9	30	0,7
12-07-2019	9	29	0,6	28-07-2019	9	29	0,6
13-07-2019	9	27	0,7	29-07-2019	14	44	0,7
14-07-2019	8	24	0,7	30-07-2019	15	39	0,6
15-07-2019	22	64	0,6	31-07-2019	14	43	0,8
16-07-2019	15	43	0,5				

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.



Tabla 7.9: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de agosto.

Agosto											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-08-2019	11	34	0,9	17-08-2019	11	36	0,7				
02-08-2019	9	29	0,9	18-08-2019	11	31	0,8				
03-08-2019	13	39	0,8	19-08-2019	14	43	0,8				
04-08-2019	13	40	0,6	20-08-2019	11	34	0,6				
05-08-2019	13	42	0,8	21-08-2019	11	36	0,7				
06-08-2019	10	29	0,8	22-08-2019	13	40	0,6				
07-08-2019	11	37	0,7	23-08-2019	9	27	0,5				

08-08-2019	10	29	0,7	24-08-2019	12	36	0,7
09-08-2019	11	36	0,5	25-08-2019	11	33	0,7
10-08-2019	10	31	0,7	26-08-2019	11	34	0,8
11-08-2019	12	36	0,8	27-08-2019	14	45	0,8
12-08-2019	9	27	0,8	28-08-2019	10	28	0,6
13-08-2019	12	35	0,7	29-08-2019	12	38	0,6
14-08-2019	12	40	0,8	30-08-2019	12	38	0,7
15-08-2019	11	35	0,7	31-08-2019	13	40	0,6
16-08-2019	12	31	0,8				

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.



Tabla 7.10: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de septiembre.

Septiembre											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-09-2019	12	36	0,9	16-09-2019	14	42	0,5				
02-09-2019	15	45	0,7	17-09-2019	13	40	0,7				
03-09-2019	13	40	0,8	18-09-2019	13	40	0,5				
04-09-2019	16	43	0,9	19-09-2019	15	44	0,7				

05-09-2019	10	32	0,8	20-09-2019	14	43	0,7
06-09-2019	14	40	0,7	21-09-2019	16	46	0,6
07-09-2019	12	35	0,8	22-09-2019	17	53	0,7
08-09-2019	11	33	0,6	23-09-2019	17	49	0,7
09-09-2019	10	30	0,7	24-09-2019	14	43	0,8
10-09-2019	15	45	0,6	25-09-2019	16	47	0,8
11-09-2019	12	37	0,7	26-09-2019	14	43	0,7
12-09-2019	13	40	0,7	27-09-2019	14	42	0,6
13-09-2019	12	37	0,8	28-09-2019	16	51	0,7
14-09-2019	14	42	0,7	29-09-2019	12	34	0,7
15-09-2019	11	33	0,4	30-09-2019	12	36	0,8

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.



Tabla 7.11: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de octubre.

Octubre											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-10-2019	14	43	0,8	17-10-2019	12	37	0,5				
02-10-2019	12	37	0,9	18-10-2019	13	43	0,7				

03-10-2019	13	40	0,7	19-10-2019	11	44	0,7
04-10-2019	14	40	0,7	20-10-2019	9	40	0,6
05-10-2019	14	43	0,8	21-10-2019	9	33	0,5
06-10-2019	12	37	0,6	22-10-2019	10	42	0,6
07-10-2019	13	40	0,8	23-10-2019	10	38	0,5
08-10-2019	13	39	0,9	24-10-2019	17	62	0,4
09-10-2019	13	40	0,8	25-10-2019	10	41	0,6
10-10-2019	14	44	0,7	26-10-2019	10	39	0,7
11-10-2019	11	36	0,8	27-10-2019	9	36	0,6
12-10-2019	13	37	0,6	28-10-2019	9	37	0,5
13-10-2019	14	44	0,7	29-10-2019	8	34	0,6
14-10-2019	15	46	0,8	30-10-2019	9	36	0,7
15-10-2019	8	26	0,6	31-10-2019	8	35	0,7
16-10-2019	12	36	0,8				

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.

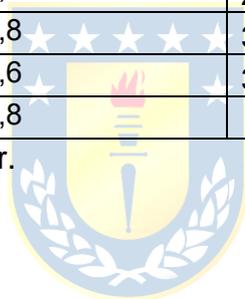


Tabla 7.12: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de noviembre.

Noviembre											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-11-2019	10	40	0,6	16-11-2019	11	42	0,8				
02-11-2019	9	35	0,7	17-11-2019	12	48	0,7				
03-11-2019	9	36	0,6	18-11-2019	11	41	0,7				
04-11-2019	11	46	0,6	19-11-2019	13	50	0,6				
05-11-2019	11	44	0,7	20-11-2019	13	48	0,8				
06-11-2019	10	32	0,6	21-11-2019	13	50	0,6				
07-11-2019	10	41	0,7	22-11-2019	12	46	0,7				
08-11-2019	12	48	0,5	23-11-2019	13	47	0,6				
09-11-2019	12	47	0,7	24-11-2019	10	42	0,7				
10-11-2019	12	47	0,6	25-11-2019	11	41	0,8				
11-11-2019	12	46	0,8	26-11-2019	12	43	0,8				
12-11-2019	11	44	0,7	27-11-2019	12	47	0,8				
13-11-2019	11	40	0,6	28-11-2019	12	46	0,8				
14-11-2019	11	45	0,5	29-11-2019	12	44	0,7				
15-11-2019	12	46	0,7	30-11-2019	10	39	0,8				

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.

Tabla 7.13: Datos tabulados del APR de Tomeco tomados el año 2019, mes de diciembre.

Diciembre											
Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)	Fecha	Horas Trabajadas (H)	Metros Cúbicos (m3)	Desinfectante (mg/l)
01-12-2019	13	47	0,7	17-12-2019	16	53	0,9				
02-12-2019	13	48	0,8	18-12-2019	11	44	0,7				
03-12-2019	14	53	0,8	19-12-2019	13	47	0,9				
04-12-2019	14	52	0,7	20-12-2019	16	53	0,8				
05-12-2019	16	59	0,8	21-12-2019	11	43	0,9				
06-12-2019	14	52	0,9	22-12-2019	12	44	0,8				
07-12-2019	15	54	0,9	23-12-2019	14	47	0,8				
08-12-2019	16	56	0,8	24-12-2019	11	43	0,9				
09-12-2019	14	53	0,9	25-12-2019	12	42	0,7				
10-12-2019	14	59	0,8	26-12-2019	12	43	0,9				
11-12-2019	14	50	0,8	27-12-2019	12	45	0,8				
12-12-2019	15	52	0,8	28-12-2019	11	39	0,9				
13-12-2019	12	48	0,9	29-12-2019	12	40	0,9				
14-12-2019	14	49	0,9	30-12-2019	9	35	0,8				
15-12-2019	13	46	0,9	31-12-2019	21	68	1				
16-12-2019	15	53	0,8								

Fuente: Elaboración propia en base a la encuesta al operador.



#### 7.4. Anexo N°4

Se consideraron los datos tabulados del año 2019 mostrados en el anexo n°1, para calcular un promedio mensual del agua utilizada, horas de desempeño de la planta, la electricidad utilizada, cantidad de desinfectante, entre otros. Todos estos datos se encuentran tabulados en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14: Promedio mensual de los datos tabulados del año 2019 en el APR de Tomeco

Agua Tratada ( $m^3$ )	1303
Horas de trabajo ( $h$ )	435
Desinfectante ( $kg$ )	$6 \times 10^{-7}$
Caudal ( $m^3/h$ )	3
Electricidad ( $KwH$ )	964

Fuente: Elaboración propia

Para poder reflejar el máximo daño ambiental que puede llegar a generar el funcionamiento de la planta y así obtener mejores resultados, se trabajó en base a un rendimiento de 24 horas por los 7 días de la semana. Por ende, los promedios mensuales con su máximo rendimiento están presentados en la Tabla 7.15.

Tabla 7.15: Promedios mensuales con el máximo rendimiento del APR

Agua Tratada ( $m^3$ )	7200
Horas de trabajo ( $h$ )	720
Desinfectante ( $kg$ )	$3,32 \times 10^{-6}$
Caudal ( $m^3/h$ )	10
Electricidad ( $KwH$ )	15595,5

Fuente: Elaboración propia

El desinfectante que se emplea en la planta de tratamiento es el hipoclorito de calcio ( $Ca(ClO)_2$ ), de concentración 65%*min* (SurQuímica, 2022), pero dado que la base de datos Ecoinvet no posee información de este desinfectante en específico, para efectos de la modelación del sistema en el software SimaPro, se reemplazó el desinfectante por el hipoclorito de sodio ( $NaClO$ ), el cual igualmente cumple la función de potabilizar el agua (Lenntech, 2022).

## 7.5. Anexo N°5

Tabla 7.16: Características del intercambiador iónico OPADEN 820

Diámetro del intercambiador ( <i>mm</i> )	800
Altura de la carcasa ( <i>mm</i> )	2000
Zona ( <i>m</i> <sup>2</sup> )	0,5 0,5
Agua tratada por unidad ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>h</i> )	10
NO <sub>3</sub> en agua cruda ( <i>mg/l</i> )	90
NO <sub>3</sub> en agua tratada ( <i>mg/l</i> )	25
By pass flowrate ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>h</i> )	3
Capacidad de resina ( <i>eq/l</i> )	0,3
Volúmenes de resina ( <i>l</i> )	880
Volumen del IX ( <i>ft</i> <sup>3</sup> )	35,5
Altura mínima del Lecho ( <i>mm</i> )	1750,7
Electricidad ( <i>KwH</i> )	5,3

Fuente: (Veolia water, 2022)



Figura 7.3: Modelo OPADEN 820

Fuente: (Veolia water, 2022)

## 7.6. Anexo n°6

Las fórmulas matemáticas utilizadas para la determinación de los resultados de este ítem, fueron extraídas del informe de la EPA (1983).

Como primera instancia, se seleccionó un tipo de resina aniónica para aplicarla en el sistema. Se escogió la propuesta por la EPA para los cálculos, puesto que posee toda la información necesaria, cuyas características estas tabuladas en la Tabla 7.17.

Tabla 7.17: Características resina aniónica

Nombre	A-104
Concentración del regenerante	15 a 18 <i>lbs</i> cloruro de Sodio ( <i>NaCl</i> )/ <i>ft</i> <sup>3</sup> de resina entre un 10 a 12 %
Tasa de flujo del regenerante	0,5 <i>gmp/ft</i> <sup>3</sup>
Capacidad	0,3 <i>eq/l</i>
Tasa de flujo máxima	1,39 <i>gpm/ft</i> <sup>3</sup>

Fuente: (EPA, 1983)

Luego, se analizaron los aniones presentes en el agua cruda (Tabla N°x) para identificar los que tendrán mayor interacción con la resina aniónica. Según el análisis emitido por la SEREMI de Salud (Anexo n°10), se identificaron 4 aniones en el agua que puedan poseer mayor afinidad con la resina (figura n°4), nitrato, sulfato, cloruro y nitrito. En el caso específico del nitrito, su presencia no fue considerada por tener muy bajas concentraciones. Para obtener la relación de estos con la resina, se debe calcular la concentración de iones totales, sumando las concentraciones individuales de aniones, expresadas en una base común (*meq/l*), formuladas en la ecuación n°1 y n° 2. Para ello, se debe tener el peso equivalente de cada anión, mostradas en la tabla n°10.

Ecuación n°1: Expresar en anión a una base común

$$Base\ Común\ \left(\frac{meq}{l}\right) = \frac{Concentración\ del\ anión\ en\ el\ agua\ cruda\ \left(\frac{mg}{l}\right)}{Peso\ equivalente\ del\ anión\ \left(\frac{mg}{meq}\right)}$$

Ecuación n°2: Calcular la relación de interacción con la resina aniónica

$$Relación\ (\%) = \frac{Concentración\ del\ anión}{Concentración\ total\ de\ aniones} * 100$$

Tabla 7.18: Peso equivalente de los aniones presentes en el agua cruda

Anión	Peso Equivalente ( <i>mg/meq</i> )
Nitrato ( $NO_3^-$ )	62,05
Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )	48,031
Cloruro ( $Cl^-$ )	35,453

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 1983)

Considerando que la concentración de nitrato que se espera obtener por medio de este modelo es de  $25 \text{ mg/l}$ , se calculó la cantidad que se debe remover diario para llegar a dicha concentración. Para ello, se debe considerar el volumen de agua cruda a tratar por día, la concentración inicial de nitrato y la concentración de nitrato final esperada, todo expresado en *meq/l*, según lo indicado en la ecuación n°3.

Ecuación n°3: Concentración de nitrato removido diariamente

$$NO_3^- \text{ Removido } \left(\frac{meq}{día}\right) = \text{Concentración inicial } \left(\frac{meq}{l}\right) - \text{Concentración final } \left(\frac{meq}{l}\right) * \text{Volumen tratado} \left(\frac{l}{día}\right)$$

Luego de obtener el nitrato removido diario necesario, se calcula la cantidad de resina precisa para ello (*BV*) en la ecuación n°4.

Ecuación n°4: Cantidad de resina necesaria para el intercambiador iónico

$$BV = \frac{\text{Nitrato removido } \left(\frac{meq}{día}\right)}{\text{Capacidad de la resina} \left(\frac{meq}{ft^3}\right)}$$

Para verificar que la cantidad de resina obtenida es la correcta, se calculó la tasa de flujo máxima de la resina, y se comparó con la de fabricación.

Ecuación n°5: Tasa de flujo máxima calculada

$$\text{Tasa de flujo} = \frac{\text{Volumen tratado } (gpm)}{BV (ft^3)}$$

En el caso que la tasa de flujo máxima superé la permitida por fabrica, se debe reajustar el lecho de la resina tomando en consideración el *BV* calculado, la tasa de flujo máximo calculado y el permitido.

Ecuación n°6: *BV* ajustado

$$BV \text{ ajustado} = \frac{BV \text{ calculado} * Tasa \text{ de flujo máxima calculado}}{Tasa \text{ de flujo de fabrica}}$$

Por consiguiente, se debe calcular el tiempo de regeneración de la resina aniónica por ciclo y la cantidad de salmuera a utilizar. La sal requerida, se encuentra dentro de las características de la resina dadas por fabrica. Por lo tanto, para obtener la cantidad de sal requerida por ciclo, se debe tomar en consideración el BV calculado y la cantidad de sal mencionada por el fabricante, demostrada en la ecuación n°7.

Ecuación n°7: Sal requerida para la regeneración de la resina

$$Sal \text{ por ciclo} = Sal \text{ por fabrica} * BV$$

Luego de obtener la cantidad de sal necesaria por ciclo de regeneración, se debe calcular el volumen de la salmuera a utilizar. Para ello, se debe considerar el porcentaje de concentración de sal necesaria (dada por el fabricante) y junto con la sal requerida para la regeneración, se obtendrá el peso total de la salmuera a utilizar, expresada en la ecuación n°8.

Ecuación N°8:

$$Peso \text{ total salmuera} = \frac{Concentración \text{ de sal por fabrica} (\%)}{Sal \text{ requerida por ciclo} (lbs)} * 100$$

Para obtener el peso del agua, solo se necesita restar el peso total de la salmuera junto con el peso total de la sal utilizada, expresada en la ecuación n°9

Ecuación n°9:

$$Peso \text{ del agua} = Peso \text{ total salmuera} - Peso \text{ total de la sal}$$

Con la información conseguida, para llevar todos los resultados a volúmenes, solo se necesita dividir cada concentración por su densidad (ecuación n°10 y n°11).

Ecuación n°10: Volumen del agua

$$Volumen \text{ del agua} = \frac{Concentración \text{ del agua}}{Densidad \text{ del agua}}$$

Ecuación n°11: Volumen de la sal

$$Volumen \text{ de sal} = \frac{Concentración \text{ de la sal}}{Densidad \text{ del agua} * Densidad \text{ de la sal}}$$

Con la suma de ambos volúmenes, se consigue así el total de salmuera requerida para el ciclo de regeneración de la resina. Para conocer el tiempo que esta regeneración se demorará, es necesario conocer la tasa de flujo del regenerante (dada por el fabricante), en este caso es de  $0,5 \text{ gpm / ft}^3$ . Y junto al BV, se obtiene el caudal de la salmuera (ecuación n°12. Y así, teniendo el caudal de la salmuera y su volumen, se calcula el tiempo necesario en el que necesita actuar el regenerante en la resina (ecuación n°13)

Ecuación n°12: Caudal de la salmuera ( $Q_s$ )

$$Q_s = \frac{\text{Flujo del regenerante}}{BV}$$

Ecuación n°13: Tiempo de regeneración ( $T_r$ )

$$T_r = \frac{Q_s}{\text{Volumen de la salmuera}}$$

### 7.6.1. Resultados de los cálculos realizados

Se calculo la interacción de los aniones que poseían mayor afinidad y pudieran interferir en la interacción de la resina con el nitrato. Dentro de las características del modelo de intercambiador iónico seleccionado, se menciona que este trata un agua bruta con concentraciones de  $90 \text{ mg/l}$  de nitrato, para llegar a una concentración de  $25 \text{ mg/l}$  (Veolia water, 2022).

Teniendo en cuenta la concentración de nitrato del agua bruta no causaría mayores cambios dentro del cálculo de los impactos ambientales de los escenarios, se supuso una concentración de  $90 \text{ mg/l}$  de nitrato en el agua bruta para seguir con las características del modelo. Las demás concentraciones de los aniones fueron calculadas sacando los promedios de los informes de la Seremi de Salud desde el año 2016 al 2021, y con ello sacando su afinidad con la resina selecciona, tabulada en la Tabla n°19.

Tabla 7.19: Relación de afinidad de los aniones presentes en el agua con la resina aniónica

Aniones presentes en el Agua cruda	Concentraciones ( $\text{mg/l}$ )	Peso Equivalente ( $\text{meq/mg}$ )	Concentración ( $\text{meq/l}$ )	Relación (%)
$\text{NO}_3^-$	90	62,05	1,45	56
$\text{SO}_4^-$	20	48,03	0,42	16
$\text{Cl}^-$	26,4	35,45	0,74	28

Fuente: (EPA, 1983)

Si estas relaciones se comparan con la jerarquía de afinidad mostrada por la figura n°4, se observa que el anión que hubiera podido competir con la interacción de la resina con el nitrato es el sulfato, pero como su relación esta puesta en un 16% y la del nitrato un 56%, se descarta una mayor intervención de está en el proceso.

Posterior a esto, se realizó el cálculo mensual del funcionamiento del intercambiador iónico junto con la del filtro del APR, logrando obtener la cantidad de salmuera necesaria para su mantenimiento, el tiempo que esto conlleva, la cantidad de resina necesaria para la concentración de nitrato a abatir, agua de lavado, entre otros. Todos estos datos fueron tabulados en la tabla n°20. Se observa que el tiempo de mantención del intercambiador iónico es de 17 horas, sumando el agua utilizada para las mantenciones del escenario, se estima una producción de agua potable menor a la del escenario n°1. Por ende, la producción de agua potable se reduce un 3%, llegando a  $7003\text{m}^3$ . Toda la salmuera ocupada para la mantención del sistema es desechada al sistema de aguas servidas.

Tabla 7.20: Consumos y recursos utilizados en el funcionamiento mensual del intercambiador iónico y filtro seleccionados

Tecnología	Recurso	Cantidad
Intercambiador iónico	Salmuera ★ ★ ★	$59,4\text{ m}^3$
	Resina	$0,88\text{ m}^3$
	Tiempo de mantención	$17\text{ h}$
	Electricidad	$3800\text{ Kw}$
Filtro	Agua de lavado	$111\text{ m}^3$
	Tiempo de mantención	$4\text{ h}$

Fuente: (Veolia water, 2022) (EPA, 1983) (Aguasin, 2012)

## 7.7. Anexo N°7

Tabla 7.21: Características Modelo Ecosoft MO-6 de Osmosis inversa

Capacidad de flujo ( $m^3/h$ )	6-8
Tipo de membrana	Poliamida de película fina (TF)
Porcentaje de rechazo $NO_3^-$ (%)	93-96
Porcentaje de concentrado (%)	37
Porcentaje de permeado (%)	63
Consumo de Electricidad ( $Kw/h$ )	7,5
Agua de lavado ( $l$ )	270
Tiempo de limpieza ( $h$ )	4 a 8 h

Fuente: Elaboración propia en base (Ecosoft, 2022) (Carbotecnia, 2019)

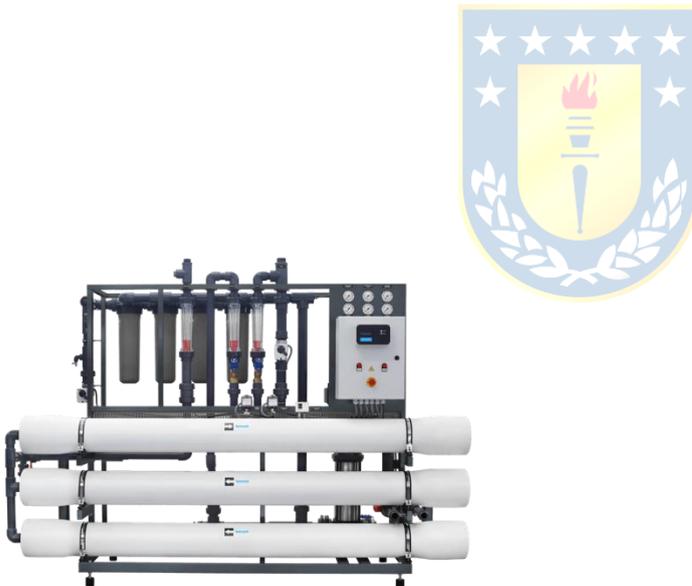


Figura 7.4: Modelo Ecosoft MO-6

Fuente: (Ecosoft, 2022)

## 7.8. Anexo N°8

Primero se consideró el tiempo de mantenimiento de la osmosis, el cual, tomando en cuenta el tamaño del APR, la calidad del agua bruta que no presenta mayores problemas y su producción, se toman 4 horas de limpieza mensual (Carbotecnia, 2019). Considerando el tiempo de mantención, se reducen las horas de trabajo a 716 al mes, sumado al porcentaje de concentrado mencionado en la tabla n°21 y el agua necesaria para el lavado de este junto con el filtro, el agua potable producida se reduce considerablemente en un 38,5%, produciendo 4399,95  $m^3/mes$ , dejando un concentrado de 26949,25  $m^3/mes$ , el cual es desechado el sistema de aguas servidas.

## 7.9. Anexo N°9

La mineralización por medio de calcita consiste en pasar el agua a tratar por un lecho de calcita que consta con una celda de carbonato cálcico. Según Colomina (2016), este proceso produce una serie de cambios en el agua, que permite el cumplimiento del DS735. Entre los cambios que destacan, es el incremento de pH de 6.11 a 8, la concentración de calcio pasa de 0.44 mg/l a 4.5 mg/l y la concentración de  $HCO_3$  pasa de 0.95 mg/l a 8 mg/l (Montalva, 2016). Luego de pasar por el lecho, este se dosifica con  $CO_2$  directamente de la tubería, terminando así el proceso de re-mineralización.

Para efectos de esta investigación, los datos de velocidad de filtrado ( $V_f$ ), superficie unitaria por cada lecho ( $S_u$ ) y el *Tiempo de contacto*, se tomarán de la investigación de Colomina, dando como supuesto que los mínimos presentados en su investigación son aplicables para el escenario en estudio, y así calcular la cantidad y el número de lechos de calcita necesario para el proceso:

$$Q_p = 10 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Velocidad de filtrado}_{(V_f)} = 8 \frac{m}{h}$$

$$\text{Superficie unitaria por cada lecho}_{(S_u)} = 3 m^2$$

$$\text{Tiempo de contacto} = 8 \text{ min}$$

Con la información presentada, se calculó la superficie filtrante:

$$S_f = \frac{Q_p}{V_f}$$

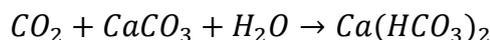
Y con ello, se obtendrá el número de lechos y la altura que posean estos:

$$N^\circ \text{ de lechos} = \frac{S_f}{S_u}$$

$$\text{Altura de cada lecho}_{(H)} = V_f * \text{tiempo de contacto}$$

### 7.9.1. Dosificación de CO<sub>2</sub>

En el proceso se produce esta reacción química:



Esta se disuelve con el agua sin exceder el reactivo necesario para equilibrar el índice de Langelier, haciendo inexistente el riesgo de sobredosificación.

Para calcular la cantidad de reactivo necesario, se debe tener en cuenta el caudal de permeado del APR y la dosis de CaCO<sub>3</sub> a utilizar, dicha dosis fue obtenida de la investigación de Colomina (2016), asumiendo que la dosis necesaria para el escenario es la menor presentada en la investigación, de 60 mg/l. Con ello, se calcula el flujo másico de CaCO<sub>3</sub>:

$$\text{Flujo másico de CaCO}_3 = \text{Dosis} * Q_p$$

Donde, el flujo másico es expresado en Kg/h.

Así, para calcular la cantidad necesaria de CO<sub>2</sub> para el dosificador se debe considerar que, por cada mol de CaCO<sub>3</sub>, hay un mol de CO<sub>2</sub>, y teniendo en cuenta que los pesos moleculares son 100 g/mol y 44 g/mol, el flujo másico será:

$$\text{Flujo másico de CO}_2 = \text{Flujo másico de CaCO}_3 * \text{Factor estequiométrico}$$

### 7.9.2. Resultados de los cálculos realizados

Se seleccionó un lecho de calcita como llegar a las concentraciones óptimas para considerar al agua como potable, según dicte la Norma DS735. En el caso del nitrato, se supondrá que, en dicho proceso de mineralización, dejará al agua potable una concentración de 25 mg/l, igualando la calidad dejada por el intercambiador iónico. Teniendo esto en consideración, y el procedimiento mencionado en la metodología, los resultados se encuentran tabulados en la tabla n°21.

Tabla 7.22: Resultados del procedimiento del lecho de calcita

Superficie filtrante ( <i>Sf</i> )	1,25 m <sup>2</sup>
N° de lechos	0,42*
Altura del lecho	1,07 m
Volumen ( <i>Vol</i> )	1,3 m <sup>3</sup>
Volumen ocupado por la calcita	0,7 m <sup>3</sup> *
Dosis media	0,06 kg/m <sup>3</sup>

Flujo másico del $CaCO_3$	0,4 <i>kg/h</i>
Flujo másico $CO_2$	0,17 <i>kg/h</i>

\*Como el número de lechos es 0,42, su supondrá que es necesario que la calcita cubra la mitad del volumen del lecho.

Fuente: (Montalva, 2016)

### 7.10. Anexo N°10

La finalidad del filtro es impedir que partículas de gran tamaño dañen los sistemas de tratamiento. Las características de dicho filtro se presentan mediante la tabla n°16

Tabla 7.23: Características filtro de profundidad a presión

Modelo	QMA / QAA-105
Material filtrante	Grava, gravilla, arena de sílice y se puede igual agregar carbón activado
Caudal de retro lavado	27,7 <i>m<sup>3</sup>/h</i>
Tiempo de mantención	15 a 30 <i>min</i>

Fuente: (Aguasin, 2012)

## 7.11. Anexo N°11

Parámetro	Fecha análisis de agua potable									NCh 409
	2005	2007	Abril 2013	Abril 2014	2015	Abril 2016	Abril 2017	Agosto 2017	2018	
Turbiedad (NTU)	0,5	0,15	1	0,45	0,4	0,3	0,6	0,75	<0,1	20
Conductividad (Us/cm)	SI	SI	335	337	368	335	34,1	365	SI	
Olor	inodora	inodora	inodora	inodora	inodora	inodora	inodora	inodora	SI	inodora
Sabor	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	SI	insípida
pH	6,8	6,52	6,59	6,96	6,7	7,41	6,74	7,02	6,5	6,5-8,5
Cloruros (mg/l)	SI	19,6	20,8	21,98	21,4	25,4	26,4	24,2	22,2	400
Sulfatos (mg/l)	SI	<12	<20	<20	<20	<20	<20	<20	9,0	500
Sólidos disueltos totales (mg/l)	SI	256	243	225	268	265	279	326	259	1500
Cobre (mg/l)	SI	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	3,76	0,41	<0,05	<0,8	2,0
Cromo total (mg/l)	SI	<0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,05	0,05
Fluoruro (mg/l)	SI	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,1	1,5
Magnesio(mg/L)	SI	13,7	10,45	11,65	12,15	19,6	11,4	12,75	11,8	125
Hierro (mg/l)	SI	<0,05	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,3	0,3
Manganeso (mg/l)	SI	<0,5	<0,05	<0,05	0,1	<0,05	0,05	<0,05	<0,1	0,1
Selenio (mg/l)	SI	<0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Zinc (mg/l)	SI	0,432	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,2	3,0
Arsénico (mg/l)	SI	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,01	0,01
Cadmio(mg/l)	SI	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	0,01
Mercurio (mg/l)	SI	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	SI	<0,001	0,001
Nitrato( mg/l)	SI	SI	SI	SI	SI	24,7	37,2	44,8	36	50
Nitrito (mg/l)	SI	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
Plomo(mg/l)	SI	SI	<0,05	<0,05	<0,02	<0,05	0,14	SI	<0,05	0,05

Figura 7.5: Datos tabulados por la seremi de salud de la calidad del agua en el APR de Tomeco.

Fuente: Obtenida mediante la ley de transparencia.



## 7.12. Anexo n°12

### Conversión de los resultados en UF de 1 mg de nitrato removido

$$\frac{x \text{ Pt categoria de daño}}{1 \text{ m}^3 \text{ de agua potable}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ de agua potable}}{(CNO_3^0 - CNO_3^f)} = \frac{Pt}{\text{mgNO}_3 \text{ removido}}$$

Donde

$CNO_3^0$  = Nitrato inicial presente en el agua expresado en mg

$CNO_3^f$  = Nitrato final presente en el agua expresado en mg.

