



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**SEGURIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOAPA:
UN ANÁLISIS DE LA DESALINIZACIÓN EN EL CONTEXTO
DE CAMBIO CLIMÁTICO, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

TRABAJO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

ESTUDIANTE: J. ALEJANDRO BILBAO CORTÉS

PROFESOR GUÍA: JOAO CERQUEIRA

PROFESOR INFORMANTE: DAVID POBLETE

PROFESORA INFORMANTE: ROMINA ÁLVAREZ

Valparaíso, 2024

AGRADECIMIENTOS

Ha sido un proceso largo llegar hasta aquí y estuvo lleno de emociones, de alegrías y tristezas, de amistades y familia que hicieron de mis años en la Universidad y en Valparaíso una parte importante de mi vida y de mi crecimiento como persona.

Este trabajo con el cual obtendré mi Título de Ingeniero Ambiental lo he realizado sobre un lugar al que le guardo mucho cariño y que es la tierra que me vio crecer. Canela, una comuna pequeña de la región de Coquimbo escondida entre valles a la que le estaré siempre agradecido por todo lo que me ha dado y a la que espero poder retribuir desde mi profesión.

Agradezco a mis profesores y funcionarios de la Escuela de Ingeniería de Medioambiente por toda la amabilidad y apoyo en mi proceso formativo. A mis profesores guías, el profesor Joao, David y la profesora Romina que con sus recomendaciones y consejos este trabajo fue tomando solidez. A los profesionales de Ecotecnos, el profesor Matías, Diego y Fernanda que me recibieron para realizar mi práctica profesional y que me continuaron apoyando durante el año con este proyecto en las ciencias de la modelación. A la profesora Julia por sus recomendaciones para adentrarme en el mundo de la investigación. A las coordinadoras del proyecto Nodo CIV-VAL, Priscilla y Kinga, que gestionaron valiosas reuniones con los centros de investigación, Ceaza y Cazalac, que enriquecieron este trabajo.

También quiero agradecer a las amistades que hice en Valparaíso y que hicieron de este proceso universitario, que muchas veces fue estresante y agotador, fuese mucho más ameno y lleno de buenos momentos, a mis amigos y amigas de la Universidad, a mis compañeros de los viernes de Fútbol Proletario, y a mis compañeros y compañeras de la Jota y el Partido que compartimos esa lucha por una sociedad que sea más justa y equitativa.

Mis últimas palabras de agradecimiento son para mi familia, el pilar base que ha permitido que hoy esté por terminar mis estudios de pregrado. A mi madre, Jael, que sin su esfuerzo, amor y dedicación no podría haber estudiado y tener las posibilidades de seguir mis sueños, a mi papá, el Pepo, que desde que pequeño me compartió ese sentimiento de querer ayudar a construir un mundo mejor, a mi compañera de vida Catalina que constantemente con su amor y ternura me ha regalado momentos preciosos en estos últimos años, y a mis hermanos y hermanas, el Beto, la Sofi, la Flor y el Pablito, que el solo pensar en ellos me da alegría.

RESUMEN

La sequía y la escasez hídrica han afectado en las últimas décadas a la cuarta región de Coquimbo y particularmente a la cuenca del Choapa. Esta cuenca abarca una de las siete provincias en Chile declaradas en estado de Escases Hídrica, y a su vez posee en su desembocadura uno de los dieciséis sitios Ramsar de Chile, humedales de importancia internacional dado su alto valor en biodiversidad y funciones ecosistémicas que también son afectados por la sequía. Esta situación, por consecuencia del cambio climático y el sobreconsumo del agua, ha generado la necesidad de analizar nuevas alternativas que permitan propender a la seguridad hídrica de la cuenca. Bajo este contexto, se analizó el potencial aporte de la desalinización a la seguridad hídrica de la cuenca mediante un modelo hidrológico que incorpora una proyección de cambio climático. Este modelo se empleó para generar un escenario de gestión con la desalinización para el período 2030-2050, en el cual se aporta directamente con agua desalinizada a nodos de demanda. Se cuantificó la reducción del déficit hídrico en función de la demanda no cubierta y el almacenamiento disponible de los acuíferos, y se analizó el efecto sobre el caudal disponible para el humedal Ramsar. Posteriormente, se realizó una simulación del vertimiento de la salmuera en función del caudal de agua desalinizada requerida para generar un efecto beneficioso en la seguridad hídrica de la cuenca. Los resultados mostraron un impacto positivo en la reducción del déficit hídrico con una producción de agua desalinizada de 750 L/s. Se podría reducir en aproximadamente 1 millón de m³ la demanda no cubierta durante los meses de verano (los más críticos del año), aumentar en promedio 15 millones m³ el almacenamiento total de los acuíferos de la cuenca y aumentar en 0,5 m³ el caudal disponible para el humedal Ramsar, un aumento del 6% aproximadamente. Sin embargo, es importante considerar la incertidumbre inherente de los modelos hidrológicos con proyecciones de cambio climático y los desafíos que implicará para las autoridades y la institucionalidad del agua para promover un uso sostenible de esta nueva fuente y evitar un aumento excesivo de la demanda. Finalmente se identificó un lugar adecuado para la ubicación de una planta desalinizadora y su punto de captación y vertido, según el proyecto de Plan Regulador Intercomunal y la interpolación de áreas de manejo y protegidas marinas de la zona, para realizar la simulación del vertimiento de la salmuera según los resultados de la modelación hidrológica de la cuenca. Los resultados mostraron un rápido decrecimiento de las concentraciones salinas de vertido para los primeros 5 metros de distancia, estando bajo los límites normativos que se utilizaron de referencia para este estudio. La desalinización puede contribuir de manera importante a la seguridad hídrica, sin embargo, es imprescindible para ello realizar todos los estudios previos necesarios para que el impacto que pueda generar la desalinización sean los mínimos posibles. Este trabajo busca ser un aporte a estos estudios que permitan propender a la seguridad hídrica de la Cuenca del Río Choapa, en un marco de sostenibilidad y cuidado con nuestro medio natural.

ÍNDICES

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Agua y Cambio Climático en Chile	1
1.2	Situación Cuenca del Choapa.....	4
1.3	Modelación Hidrológica para la Gestión y Planificación del Recurso Hídrico.....	5
1.4	Desalinización como Alternativa para la Seguridad Hídrica	6
2	PROBLEMA	9
3	OBJETIVOS.....	10
3.1	General.....	10
3.2	Específicos	10
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
4.1	Cuenca del Choapa.....	11
4.1.1	Clima.....	12
4.1.2	Geomorfología	12
4.1.3	Principales usos del recurso hídrico	14
4.1.4	Caudal ecológico y Humedal Ramsar Las Salinas de Huentelauquén.....	21
4.2	Softwares para la Modelación Hidrológica e Integración del Cambio Climático.....	22
4.2.1	WEAP.....	22
4.2.2	MODFLOW	25
4.2.3	Indicadores de Calidad de Calibración	26
4.2.4	Escenarios de Cambio Climático en los Modelos Hidrológicos.....	28
4.3	Modelo Hidrológico en la Cuenca del Choapa	29
4.4	Desalinización en Chile e Impactos Ambientales.....	33
4.4.1	Plantas Desalinizadoras en Chile	33
4.4.2	Principales Impactos Ambientales	35
4.4.3	Simulación del Vertimiento de Salmuera	35
4.4.4	Legislación sobre Desalinizadoras	39
5	METODOLOGÍA	40
5.1	Sectorización de las Proyecciones (2030-2050) del Modelo Hidrológico DGA 2020 ...	40
5.2	Determinación de la Producción de Agua Desalinizada.....	40

5.3	Determinación de Zonas para la Planta Desalinizadora.....	41
5.4	Modelo de Dispersión de Salmuera	41
6	RESULTADOS.....	44
6.1	Sectorización Proyecciones del Modelo Hidrológico DGA 2020	44
6.1.1	Demandas de Agua	44
6.1.2	Demanda No Cubierta	49
6.1.3	Almacenamiento de los Acuíferos	50
6.1.4	Caudal de Protección Ambiental Ramsar	51
6.2	Producción de Agua Desalinizada	52
6.2.1	Demanda No Cubierta	53
6.2.2	Almacenamiento de los Acuíferos	55
6.2.3	Caudal de Reserva de Protección Ambiental Ramsar	56
6.3	Ubicación para una Planta Desalinizadora	57
6.4	Modelo de Dispersión de la Salmuera	60
7	DISCUSIÓN.....	66
7.1	Demanda de Agua de la Cuenca	66
7.2	Demanda No Cubierta.....	66
7.3	Almacenamiento de los Acuíferos.....	67
7.4	Caudal de Reserva de Protección Ambiental Ramsar.....	67
7.5	Ubicación para la Planta Desalinizadora	68
7.6	Simulación Vertimiento de Salmuera	68
8	CONCLUSIÓN	69
9	BILIOGRAFÍA	70
10	ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Gráfico del cambio en la temperatura global en superficie (media anual) observado y simulado utilizando factores humanos y naturales, y solo factores naturales (ambos 1850 – 2020).	1
Figura 1.2: Extracto mapa de precipitaciones acumuladas a marzo 2020, en comparación con el promedio.	2
Figura 1.3: Mapa de variación de caudales para el mes de marzo 2020, con respecto al promedio histórico para el mismo mes en el periodo 1981-2010.....	3
Figura 1.4: Evolución del PIB y de los derechos de aguas subterráneas para la Región de Coquimbo, Chile.	3
Figura 1.5: Análisis de tendencias climáticas y de caudal en las cuencas río Maipo y Choapa.....	4
Figura 1.6: Interfaz del Software WEAP.....	6
Figura 1.7: Plantas desalinizadoras y capacidad a nivel mundial, con recuadro según tecnología.	7
Figura 4.1: Mapa de la hidrografía de la cuenca del río Choapa.....	11
Figura 4.2: Climograma Estación Illapel (izquierda), Climograma Estación La Tranquilla (derecha)..	12
Figura 4.3: Mapa de elevaciones y unidades geomorfológicas.....	13
Figura 4.4: SHAC de la cuenca del Choapa.....	16
Figura 4.5: Población proyectada para la cuenca al año 2050.	16
Figura 4.6: Mapa zonas de riego modeladas.	18
Figura 4.7: Demanda agrícola mensual para el año 2019.	19
Figura 4.8: Demanda agrícola para el año 2030.....	19
Figura 4.9: Demanda agrícola para el año 2050.....	19
Figura 4.10: Serie en el tiempo de derechos de agua para uso minero.	20
Figura 4.11: Caudal (Q) de reserva para protección ambiental y caudal (Q) ecológico mínimo (en m ³ /s).	21
Figura 4.12: Esquema del método de humedad del suelo de WEAP.....	23
Figura 4.13: Esquema de discretización espacial de un acuífero.	26
Figura 4.14: Modelo esquemático en WEAP del PEGH del Choapa.....	29
Figura 4.15: Extracto del modelo esquemático en WEAP del PEGH del Choapa.....	30
Figura 4.16: Resultados calibración estero las camisas en desembocadura.	31
Figura 4.17: Resultados calibración embalse Corrales.	32
Figura 4.18: Esquema a) Pluma de flotabilidad positiva, b) Pluma de flotabilidad negativa.	36
Figura 4.19: Ejemplo de error de no detección del fondo.	37
Figura 4.20: Datos de entrada al Modelo UM3 de Visual Plumes.	38
Figura 5.1: Elemento “Other Supply” en el interfaz de WEAP.....	41
Figura 6.1: Demanda Total de los acuíferos asociados a los SHACs Canela y Choapa Bajo.	44
Figura 6.2: Demanda Total asociadas al riego por canales de los SHACs Canela y Choapa Bajo.	45
Figura 6.3: Demanda Total asociada a los acuíferos del SHAC Illapel.	45
Figura 6.4: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Illapel.....	46
Figura 6.5: Demanda Total asociadas a los acuíferos del SHAC Choapa Medio.....	46
Figura 6.6: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Choapa Medio.	47
Figura 6.7: Demanda Total asociada a los acuíferos del SHAC Chalinga.	47
Figura 6.8: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Chalinga.....	48
Figura 6.9: Demanda Total asociada al SHAC Choapa Alto del Modelo del Hidrológico.	48

Figura 6.10: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Choapa Alto.	49
Figura 6.11: Demanda no cubierta mensual de la cuenca estimada por el modelo hidrológico.....	49
Figura 6.12: Demanda no cubierta en curva de variación estacional estimada por el modelo hidrológico.	50
Figura 6.13: Almacenamiento de los acuíferos mensual.	50
Figura 6.14: Almacenamiento de los acuíferos en curva de variación estacional.	51
Figura 6.15: Comparación caudales simulados por el modelo con el caudal RPA para el humedal Ramsar.....	51
Figura 6.16: Modelo esquemático de WEAP con la simulación del aporte de la desalinización.....	52
Figura 6.17: Demanda no cubierta comparada con escenario de gestión con la desalinización.	54
Figura 6.18: Curva de variación estacional de la demanda no cubierta comparada con escenario de gestión con la desalinización.....	54
Figura 6.19: Almacenamiento total de los acuíferos comparado con el escenario de gestión con la desalinización.	55
Figura 6.20: Almacenamiento total de los acuíferos en curva de variación estacional comparado con el escenario de gestión con la desalinización.	55
Figura 6.21: Comparación caudales simulados por el modelo con la desalinización y respecto al caudal RPA para el humedal Ramsar.	56
Figura 6.22: Comparación caudales simulados por el modelo para el humedal Ramsar.	56
Figura 6.23: Mapa Áreas Marinas Protegidas Región de Coquimbo.....	57
Figura 6.24: Mapa Áreas de Manejo de Recursos Bentónicos comuna de Canela.	58
Figura 6.25: Extracto Plano Regulador Intercomunal Provincia del Choapa.	58
Figura 6.26: Mapa ubicación propuesta para planta desalinizadora y punto de captación y descarga...	59
Figura 6.27: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 0° y velocidad en 0,02 m/s.	60
Figura 6.28: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 0° y velocidad en 0,12 m/s.	61
Figura 6.29: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 0° y velocidad en 0,47 m/s.	61
Figura 6.30: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 90° y velocidad en 0,02 m/s.	62
Figura 6.31: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 90° y velocidad en 0,12 m/s.	62
Figura 6.32: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 90° y velocidad en 0,47 m/s.	63
Figura 6.33: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 270° y velocidad en 0,02 m/s.	63
Figura 6.34: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 270° y velocidad en 0,12 m/s.	64
Figura 6.35: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 270° y velocidad en 0,47 m/s.	64
Figura 6.36: Gráfico comparativo de las simulaciones con la normativa australiana.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Demanda hídrica APU para el año 2019 por localidad.	14
Tabla 4.2: Demanda hídrica APR para el año 2019 por comuna.....	15
Tabla 4.3: Demanda hídrica APR para el año 2019 por SHAC.....	15
Tabla 4.4: Demanda hídrica APU futura por localidad.	17
Tabla 4.5: Demanda hídrica APR futura por comuna.....	17
Tabla 4.6: Demanda hídrica APR futura por SHAC.....	17
Tabla 4.7: Demanda estimada para la minería en m ³ /año.	20
Tabla 4.8: Caudal de reserva para protección ambiental en m ³ /s.	21
Tabla 4.9: Caudales (Q) ecológicos para subcuencas del Choapa.....	22
Tabla 4.10: Variables meteorológicas de entrada al modelo en WEAP para el método de humedad del suelo.	24
Tabla 4.11: Valores de referencia del índice Nash-Sutcliffe (NSE).	27
Tabla 4.12: Resultados indicadores de calidad de calibración del modelo acoplado WEAP-MODFLOW.	30
Tabla 4.13: Descripción escenario de caso base del modelo hidrológico del Choapa.	32
Tabla 4.14: Proyecto de desalinización con capacidad mayor o igual a 20 L/s en operación.	34
Tabla 5.1: Condiciones Ambientales en el Medio Receptor.....	42
Tabla 5.2: Parámetros de descarga de la salmuera.	42
Tabla 6.1: Demandas con aporte de agua desalinizada.	53
Tabla 6.2: Abreviaturas por casos de simulación.	65

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Agua y Cambio Climático en Chile

El agua es un recurso natural indispensable para la vida y la sociedad como la conocemos hoy en día (UNESCO, 2021). Sin embargo, debido al cambio climático y el aumento de la demanda para los procesos productivos y de servicios sanitarios, se ha generado la necesidad de un mayor control y gestión sobre el agua, de forma de mitigar, en cierta medida, los efectos del cambio climático y el sobreconsumo (UCC, 2021).

La ONU (2024) describe al cambio climático como los cambios a largo plazo de las temperaturas (Figura 1.1) y patrones climáticos, cambios que pueden ser naturales. Sin embargo, desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y el gas. El Ministerio de Medio Ambiente (MMA) de Chile (MMA, 2024), lo describe como la variación climática que se está registrando en el planeta, atribuido directa o indirectamente por la actividad humana, y que altera la composición de la atmósfera.

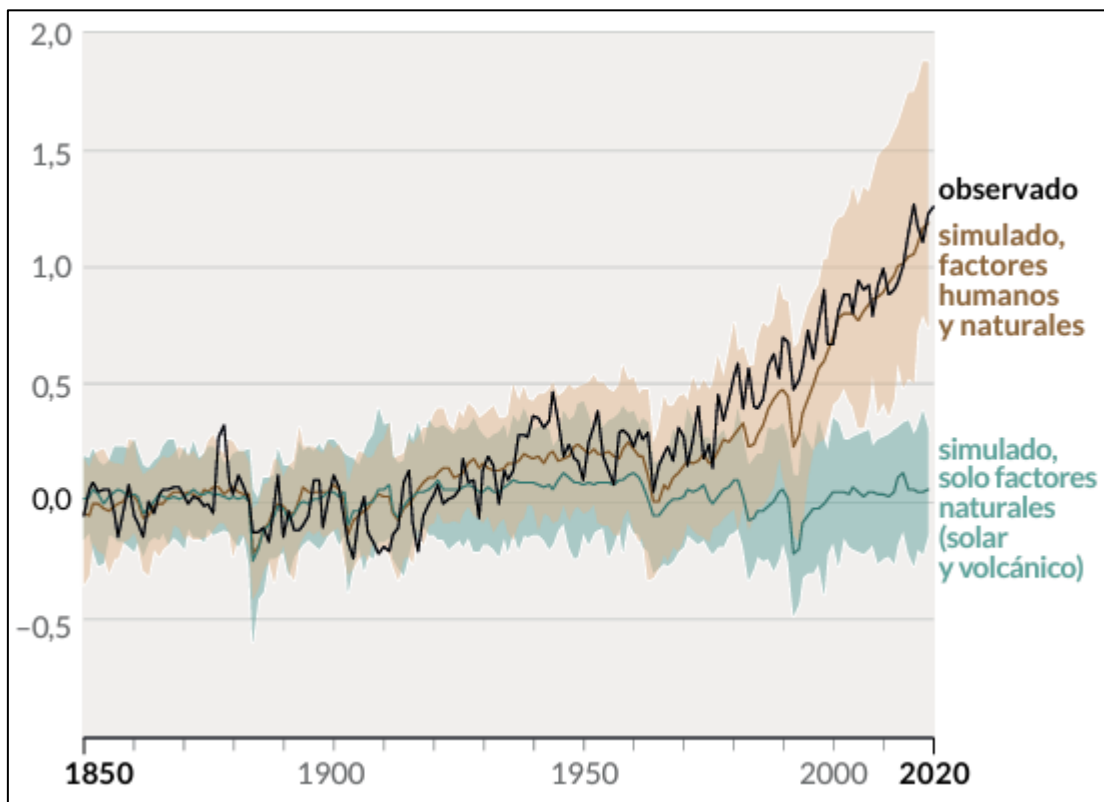


Figura 1.1: Gráfico del cambio en la temperatura global en superficie (media anual) observado y simulado utilizando factores humanos y naturales, y solo factores naturales (ambos 1850 – 2020).

Fuente: Extraído del Informe del IPCC 2021.

En Chile los efectos del cambio climático se han observado en progresivas disminuciones de las precipitaciones y aumentos de la temperatura, principalmente en la zona norte y centro del país, generando una situación de escasez hídrica en estos territorios (SNU, 2021).

A nivel regional, las regiones entre Atacama y Ñuble mantienen un déficit de precipitación (Figura 1.2) cercano al 100% con respecto al promedio histórico 1981- 2010 (DGA, 2020). Además, desde 1976 las temperaturas en las montañas han aumentado cada decenio entre 0,2 y 0,3 °C, y los glaciares han experimentado un rápido retroceso (UNESCO, 2018). Respecto a los acuíferos estos muestran una tendencia a la disminución entre la región de Coquimbo y la región del Maule, al igual que los caudales (Figura 1.3) de los ríos (DGA, 2020).

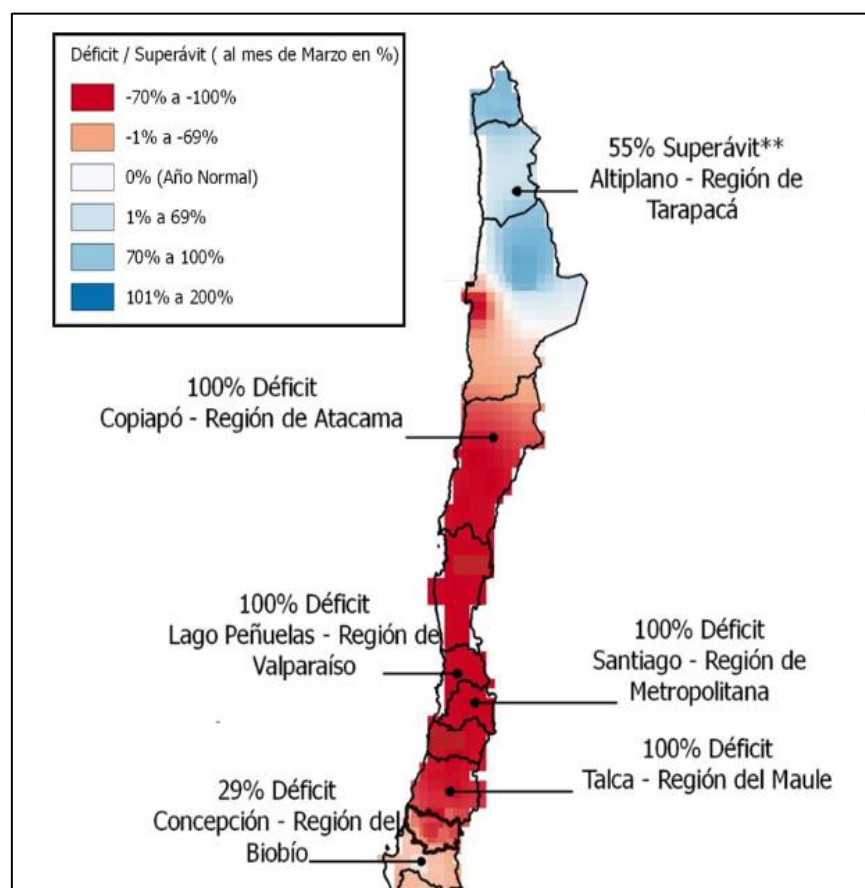


Figura 1.2: Extracto mapa de precipitaciones acumuladas a marzo 2020, en comparación con el promedio.
Fuente: DGA, 2020.

Un factor relevante en cuanto a la disminución de los acuíferos y la escorrentía superficial en algunas cuencas es el crecimiento económico y el uso intensivo del agua (Figura 1.4). Sectores tales como la minería, agricultura, silvicultura y acuicultura, impulsaron la demanda hídrica nacional (OCDE, 2017). Casi el 80% de las extracciones consultivas totales para el 2017 pertenecen a la agricultura, minería e industria manufacturera (DGA, 2017).

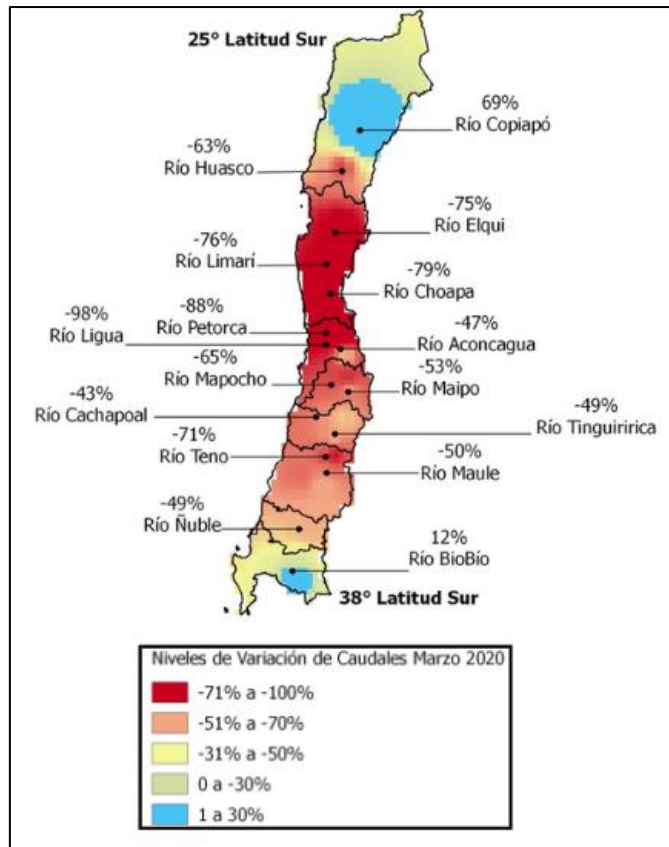


Figura 1.3: Mapa de variación de caudales para el mes de marzo 2020, con respecto al promedio histórico para el mismo mes en el periodo 1981-2010.
Fuente: Modificado de DGA, 2020.

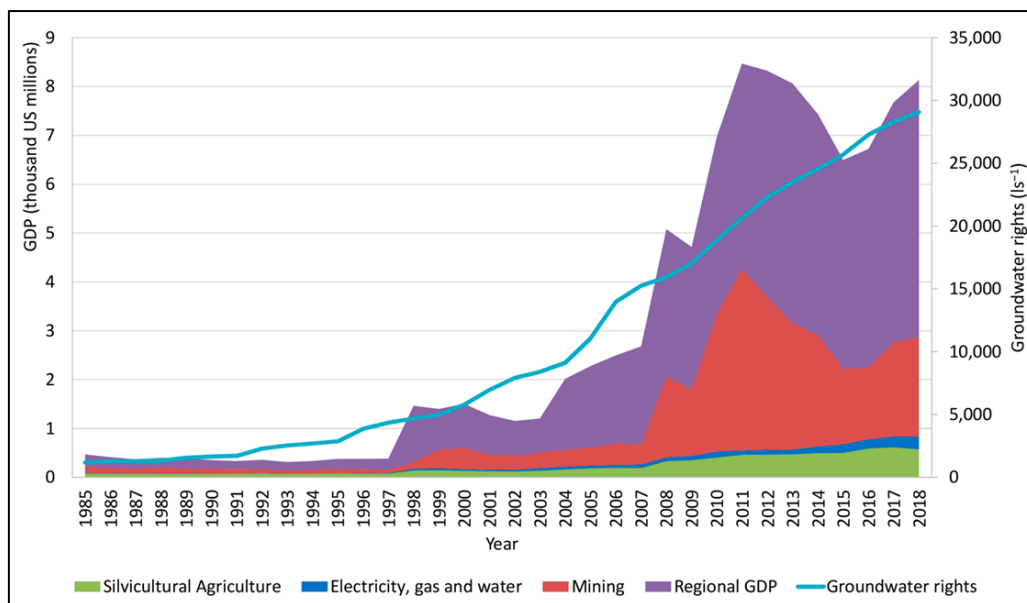


Figura 1.4: Evolución del PIB y de los derechos de aguas subterráneas para la Región de Coquimbo, Chile.
Fuente: Extraído de Pizarro et al., 2022.

1.2 Situación Cuenca del Choapa

Una de las cuencas afectadas por la escasez hídrica en la región de Coquimbo es la Cuenca del Choapa (DGA, 2017). Esta es una cuenca ubicada en la provincia del Choapa, una de las 7 provincias a nivel nacional que actualmente se encuentra declarada en estado de escasez hídrica (MOP, 2023).

En la Figura 1.5 se ilustran las tendencias decadales de precipitación, temperatura y caudal para las cuencas del río Maipo y la cuenca del Choapa (cuenca en la parte superior de la figura marcadas con elipse negra), en la cual se aprecia una disminución generalizada entre un 5 y 20 % de las precipitaciones y un aumento de también un 20 % de la temperatura en ambas cuencas en comparación con el periodo decadal 1985-2015 (DGA, 2017).

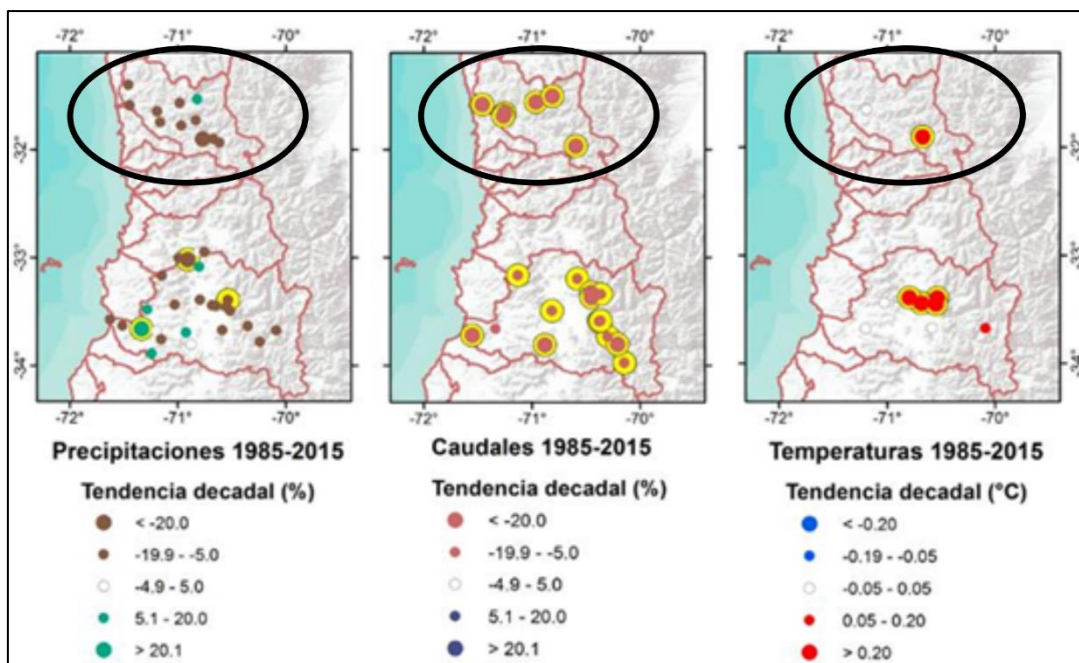


Figura 1.5: Análisis de tendencias climáticas y de caudal en las cuencas río Maipo y Choapa.

Fuente: Modificado de DGA, 2017.

La Cuenca del Choapa abarca 3 comunas, Canela, Illapel y Salamanca (DGA, 2004) . En la desembocadura de la cuenca se encuentra 1 de los 16 Sitios Ramsar (Humedales de Importancia Internacional) declarados en Chile, el Humedal Las Salinas de Huentelauquén, Comuna de Canela (Ramsar, 2015). Estos Humedales destacan y se busca su protección por su importancia internacional en termino ecológicos, botánicos, zoológicos, limnológicos o hidrológicos (Carrasco *et al.*, 2015). Esto realza la necesidad de generar acciones respecto a la situación hídrica de esta cuenca que permita asegurar la disponibilidad de agua, de manera prioritaria, para el consumo humano y para los ecosistemas de la cuenca.

1.3 Modelación Hidrológica para la Gestión y Planificación del Recurso Hídrico

Una de las herramientas que tiene Chile para hacer frente a la escasez hídrica, es lo que se denominan Planes Estratégicos de Recursos Hídricos por Cuencas (PERHC), una figura de planificación que se establece en la última reforma al Código de Aguas (MOP, 2023) y que busca propiciar una tendencia a la Seguridad Hídrica en las cuencas. (DGA, 2024).

La Seguridad Hídrica se describe como la posibilidad de acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas, considerando las particularidades naturales de cada cuenca, esto según lo que indica la Ley Marco de Cambio Climático (MMA, 2022) y el reglamento de elaboración de los PERHC (MOP, 2024).

El reglamento de elaboración de estos planes estratégicos demanda de manera explícita la modelación hidrológica como una herramienta fundamental para la gestión y planificación adecuada de recursos hídricos por cuencas (MOP, 2024).

La modelación hidrológica se puede utilizar para diversos fines; se puede determinar la disponibilidad o flujo de agua en los acuíferos (Gutiérrez *et al.*, 2004), realizar estudios de inundaciones (DGA, 2018), dispersión de contaminantes desde un afluente (Munar *et al.*, 2021) y/o realizar el balance hídrico de una cuenca e integrar escenarios de cambio climático para el balance hídrico futuro (DGA 2020b). Para esto existen diversos softwares con los que se puede trabajar para realizar una modelación hidrológica (Gidahatari, 2014).

Uno de los softwares más utilizados en Chile para la modelación en cuencas es WEAP (Water Evaluation and Planning) (DGA, 2019). WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos. Funciona usando el principio básico del balance hídrico, pudiendo ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas de cuencas. Puede simular una amplia gama de componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo la escorrentía por precipitación, recarga de aguas subterráneas; análisis de las demandas sectoriales; derechos de agua y prioridades de asignación, operaciones de los embalses y requisitos de los ecosistemas (SEI, 2024).

La Figura 1.6 presenta el interfaz de WEAP con su modelo esquemático de la simulación de la hidrología de una cuenca.

Una de las ventajas que tiene WEAP es que puede trabajar acoplado con otra herramienta de modelación, MODFLOW. Logrando, con el primero, simular los fenómenos hidrológicos que ocurren en la superficie terrestre y, con el segundo, los fenómenos a nivel subterráneo (Sanzana *et al.*, 2021).

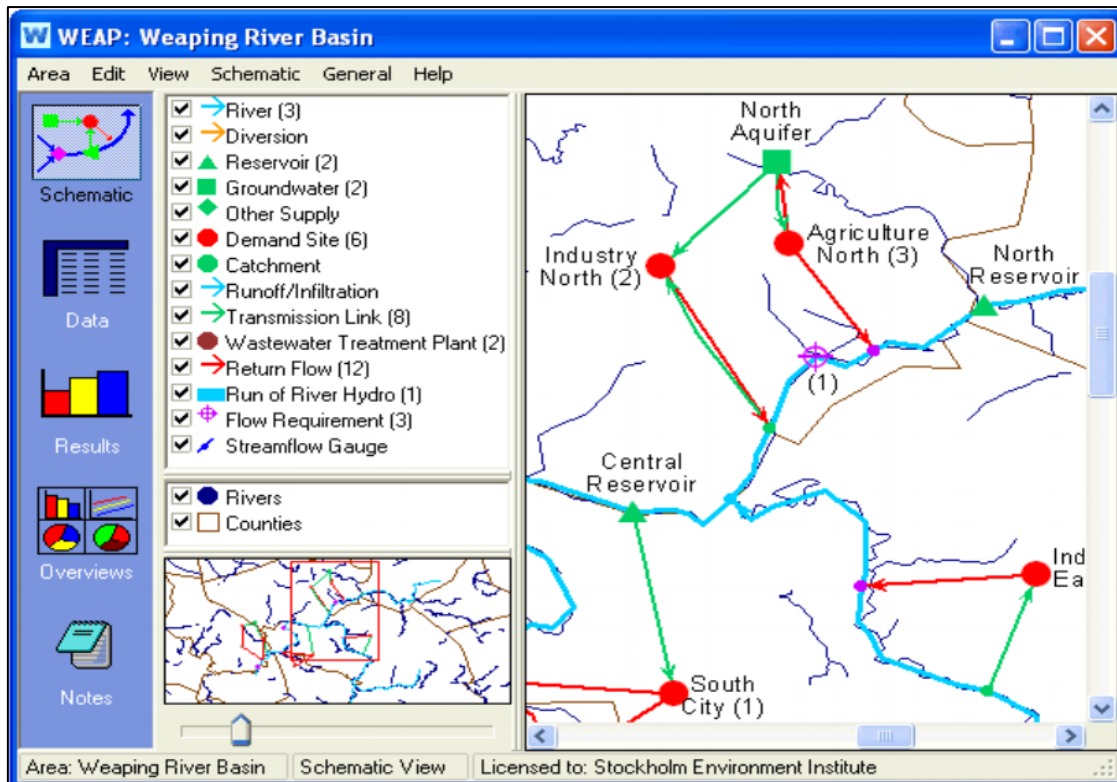


Figura 1.6: Interfaz del Software WEAP.
Fuente: Extraído de Guía de Usuario de WEAP.

MODFLOW es un programa modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el cual resuelve mediante interacciones la ecuación de flujo del agua subterránea. Se usa en hidrogeología para simular el flujo subterráneo de cualquier acuífero, encontrándose en la sexta versión del programa, MODFLOW 6 (USGS, 2024).

Cabe destacar que actualmente la mayoría de las modelaciones hidrológicas en cuencas que han sido publicadas por la DGA son realizadas con WEAP – MODFLOW (DGA, 2019).

La cuenca del Choapa cuenta con un modelo publicado por la DGA el 2020, que incorpora escenarios de cambio climático y dos escenarios de gestión, uno para la tecnificación del riego y otro para la recarga de acuíferos. Además de presentar la demanda y oferta hídrica futura a nivel de comunas y por uso del agua (DGA, 2020b).

1.4 Desalinización como Alternativa para la Seguridad Hídrica

La desalinización en las últimas décadas ha tomado mucha fuerza como alternativa para enfrentar la escasez hídrica en distintos lugares del mundo como una nueva fuente de agua. Existen países como Arabia Saudita o Emiratos Árabes Unidos en los que el 60% – 80% de su agua para consumo municipal proviene de la desalinización (Muhammad *et al*, 2022).

En la Figura 1.7 se muestra el aumento en la utilización de plantas desalinizadoras en el mundo desde 1960, con un recuadro más pequeño de los tipos de tecnología de desalinización más utilizadas, siendo RO : Osmosis Inversa, MSF : Flash Multi Etapa, MED : Destilación Multi Efecto, y ED Electrodesionización.

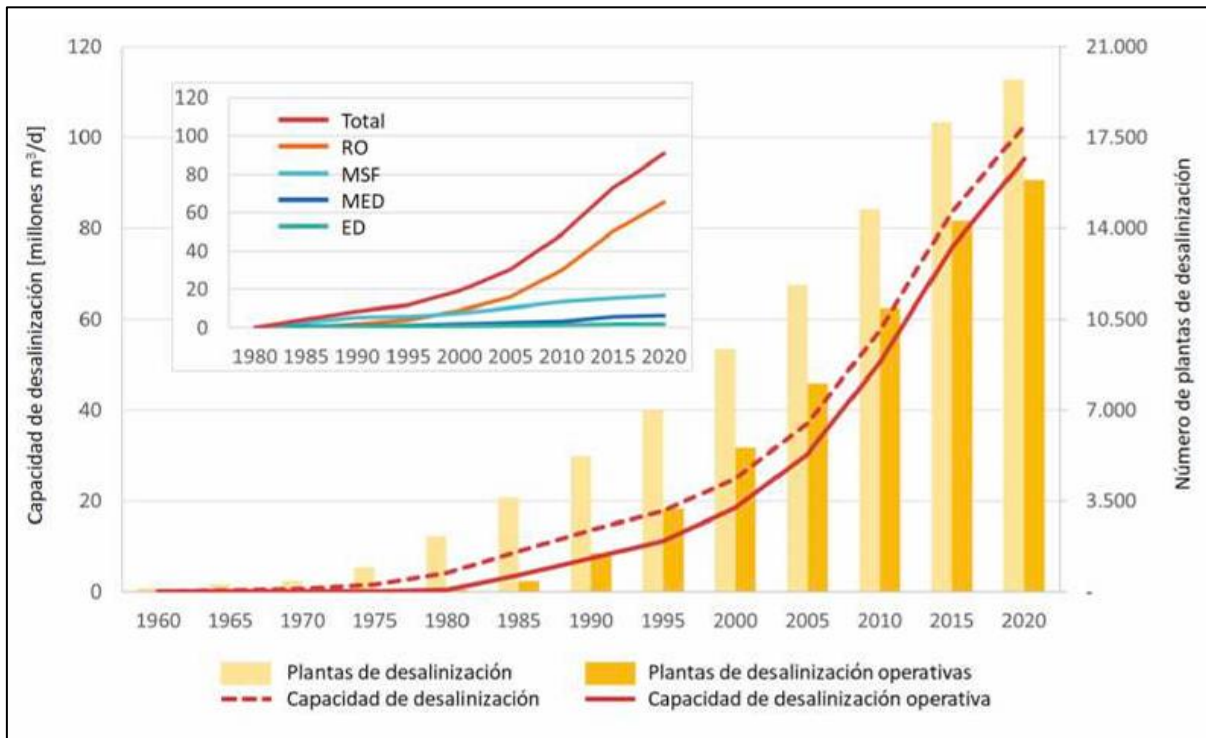


Figura 1.7: Plantas desalinizadoras y capacidad a nivel mundial, con recuadro según tecnología.
Fuente: Jones *et al*, 2019.

La desalinización constituye una oportunidad y un desafío en especial para la política pública y la inversión de infraestructura hídrica en Chile, para hacer frente a la Inseguridad Hídrica que afecta al territorio nacional. Así lo demuestra un proyecto liderado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile (MICITEC), junto a investigadores de distintas universidades a nivel nacional del Comité Científico de Cambio Climático, el cual culminó en el documento “Desalinización: Oportunidades y Desafíos para abordar la Inseguridad Hídrica en Chile” (MICITEC, 2022).

La desalinización se explica como el proceso por el cual el agua de mar (o agua salobre) disminuye su concentración de sales o se separa de éstas, hasta convertirse en agua dulce, apta para el consumo de agua potable y/o para otros usos (WEF, 2024).

Una planta desalinizadora incluye diferentes etapas para la obtención de agua dulce, desde la impulsión de agua de mar o salobre, hasta la descarga de los residuos de salmuera:

- Toma de agua (de mar o salobre) de alimentación.
- Pretratamiento.

- Unidad de desalinización.
- Postratamiento.
- Impulsión y conducción hasta puntos de consumo.

La unidad de desalinización que desde el punto de vista energético es la etapa más importante, es donde se realiza el proceso de separación de las sales disueltas en el agua de mar o salobre generando un volumen (mayoritario) de agua dulce y otro volumen de agua de rechazo o salmuera (MICITEC, 2022).

De las tecnologías existentes para la unidad de desalinización, la más utilizada a nivel mundial (Figura 1.7) es la de Osmosis Inversa (RO). El 69% del agua desalinizada a nivel mundial es producida por RO debido a su alta eficiencia y bajo coste energético (Jones *et al.*, 2019).

La osmosis inversa consiste en bombear el agua de mar o salobre a un módulo separado en dos volúmenes por una membrana semipermeable. La membrana deja pasar el agua, pero bloquea el transporte de las sales por lo que el agua del volumen situado más allá de la membrana, llamado permeado, se desaliniza, y la sal se queda en el volumen situado delante de la membrana. El agua salada concentrada en este volumen sale del módulo a través de una válvula de control de presión (Lachish, 2002).

Se le denomina ósmosis inversa porque el transporte de moléculas de aguas ocurre de forma opuesta a la ósmosis convencional, que consiste en dos soluciones de diferente concentración separadas por una membrana semipermeable, donde el solvente (generalmente agua) se mueve a través de la membrana desde la solución de menor concentración hacia la de mayor concentración hasta que las concentraciones en ambos lados de la membrana se igualan. En la osmosis inversa justamente se “invierte” este proceso y se emplea una mayor presión en el lado en el que la concentración de impurezas y salinidad es mayor (AQUAE, 2021).

Sin embargo, este proceso (y de todas las tecnologías de desalinización) también trae consigo algunos impactos, principalmente debido a la salmuera generada en el proceso de desalinización que generalmente se vierte en el mar, y en el punto de captación del agua salina que afecta al fitoplancton y otros organismos marinos esenciales para sus ecosistemas (MICITEC, 2022). Por lo que uno de los desafíos de la desalinización como alternativa para la seguridad hídrica es identificar los lugares adecuados de captación y vertimiento que produzcan un mínimo impacto en los ecosistemas marinos.

2 PROBLEMA

La sequía y la escasez hídrica han afectado en las últimas décadas a la cuarta Región de Coquimbo y particularmente a la cuenca del Choapa. Esta cuenca abarca una de las siete provincias en Chile declaradas en Estado de Escases Hídrica, y a su vez posee en su desembocadura uno de los dieciséis sitios Ramsar de Chile, humedales de importancia internacional dado su alto valor en biodiversidad y funciones ecosistémicas, que también son afectados por la sequía. Esta situación de inseguridad hídrica, por consecuencia del cambio climático y el sobreconsumo del agua, ha generado la necesidad de analizar nuevas alternativas que permitan propender a la seguridad hídrica de la cuenca.

En este contexto, la desalinización se posiciona como una alternativa interesante de nueva fuente de agua, sin perjuicio de ello, es necesario estimar los requerimientos hídricos para el futuro considerando escenarios de cambio climático y en miras de la seguridad hídrica de las cuencas.

La modelación hidrológica resulta ser fundamental para realizar dicha estimación y análisis con lo que permitiría determinar el caudal necesario que debiera aportar la desalinización para propender a la seguridad hídrica y con ello analizar, además, el impacto de la extracción y vertimiento de la salmuera en los ecosistemas marinos, en función del caudal que se requeriría. El modelo hidrológico publicado por la Dirección General de Aguas 2020 es una herramienta disponible y actualizada idónea para aquello.

3 OBJETIVOS

3.1 General

Analizar la desalinización como alternativa para la seguridad hídrica en la Cuenca del Río Choapa mediante el modelo hidrológico con escenarios de cambio climático publicado por la Dirección General de Aguas el 2020 y estimando el área de influencia del vertido de la salmuera en los ecosistemas marinos de la zona.

3.2 Específicos

- Sectorizar las proyecciones futuras estimadas por el modelo hidrológico según aspectos físicos y socioambientales, de manera que permita comparar un escenario futuro de cambio climático con la desalinización.
- Determinar la producción de agua desalinizada que permitía aportar a la seguridad hídrica de la cuenca del Choapa.
- Proponer una zona para la instalación de una planta desalinizadora de acuerdo con la legislación y aspectos técnicos-ambientales.
- Simular la dispersión de la salmuera y su área de influencia para el campo cercano, según la producción necesaria de agua desalinizada para aportar a la seguridad hídrica de la cuenca.

4.1.1 Clima

La cuenca del río Choapa presenta tres tipos climáticos, estos son Clima Templado Frío de Altura, Clima de Estepa Cálido con precipitaciones Invernales y Clima Estepárico Costero o Nuboso (DGA, 2004):

- Clima Templado Frío de Altura: este clima se localiza en la Cordillera de Los Andes sobre los 3.000 metros de altitud con características de altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival.
- Clima de Estepa Cálido con precipitaciones Invernales: este tipo climático se ubica en la parte interior de la cuenca, por sobre los 800 m. Se caracteriza por ausencia de nubosidad y sequedad del aire, sus temperaturas son mayores que en la costa, las precipitaciones no son tan abundantes y los períodos de sequía son característicos.
- Clima Estepárico costero o Nuboso: se presenta a lo largo de toda la costa. Su influencia llega hasta el interior hasta 40 km, por medio de los valles transversales y quebradas. Su mayor característica es la abundante nubosidad, humedad, temperaturas moderadas, con un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de 8 a 9 meses.

En la Figura 4.2 se presentan los climogramas de las estaciones meteorológicas de Illapel DGA y La Tranquilla, ubicadas en diferentes alturas de la cuenca del río Choapa.

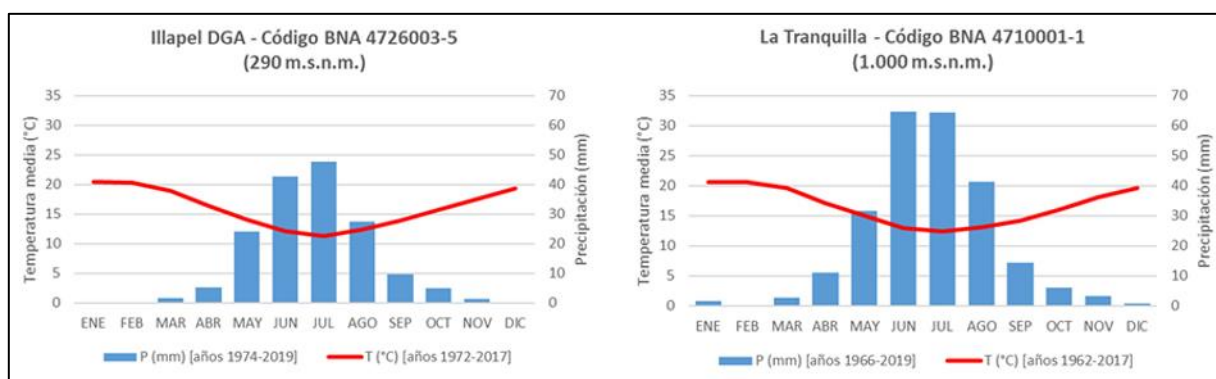


Figura 4.2: Climograma Estación Illapel (izquierda), Climograma Estación La Tranquilla (derecha).
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

4.1.2 Geomorfología

La cuenca del río Choapa constituye el último de los valles transversales de la región de Coquimbo, ubicado en su extremo sur. En términos generales, los rasgos geomorfológicos no difieren mucho a los de las cuencas del río Elqui y Limarí, presentando una cuenca de

sedimentación fluvial en su curso medio y bajo. El valle del río Choapa es el más estrecho con respecto a los otros valles transversales existentes en la región (DGA, 2004).

El cauce del río Choapa desemboca en el mar en el sector de Huentelauquén, después de recibir las aguas aportadas por un ancho árbol de escurrimientos cordilleranos, que conforman dos ejes: uno en sentido N-E dado por el río Illapel, y el otro en sentido E-W que corresponde al río Choapa, los que se unen al oeste de la ciudad de Illapel, para formar un río caudaloso y encajonado aguas abajo (DGA, 2007).

El río Choapa, aguas arriba de la junta con el río Illapel, se caracteriza por presentar un cauce encajonado por cerros del ambiente netamente andino, los que se presentan con laderas escarpadas, con afloramientos de roca, que aportan material derrubial al cauce a través de conos y quebradas. Desde la junta con el río Illapel hasta su desembocadura, el río se presenta rodeado por cadenas de cerros de la costa, a tal punto que sólo en algunos sectores se establecen pequeñas terrazas de sedimentación fluvial, aprovechadas para la actividad agrícola y el asentamiento de pequeños poblados (DGA, 2004).

En la Figura 4.3 se presenta un mapa de elevaciones y unidades geomorfológicas de la cuenca.

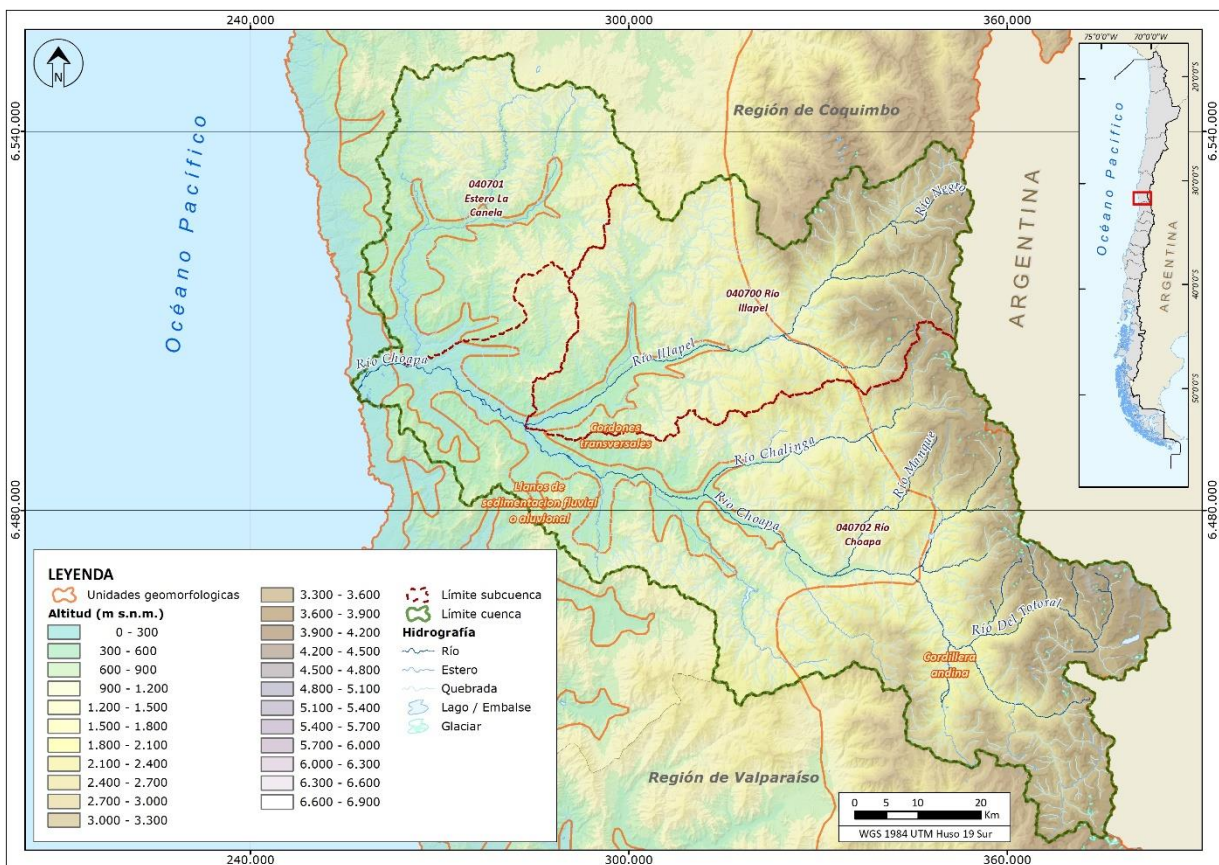


Figura 4.3: Mapa de elevaciones y unidades geomorfológicas.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

4.1.3 Principales usos del recurso hídrico

Los principales usos del recurso en la cuenca son para la actividad minera, agrícola y para consumo humano. A continuación, se describe la demanda del recurso para estas distintas actividades hasta el año 2019 y sus proyecciones hasta el año 2050, según lo publicado en el Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuenca del Choapa (DGA, 2020b).

4.1.3.1 Consumo Humano

En términos generales, la población urbana se abastece de agua potable desde la red de distribución de una empresa sanitaria (Aguas del Valle), mientras que la población rural lo hace mediante los sistemas de agua potable rural (APR), actualmente llamados “Servicios Sanitarios Rurales” (DGA, 2020b). Así, se puede clasificar la demanda de agua para consumo humano en Agua Potable Urbana (APU) y Agua Potable Rural (APR).

La demanda de APU (Tabla 4.1) en la cuenca del río Choapa está determinada por las fuentes de extracción que se localizan al interior de los límites definidos de la cuenca y que abastecen localidades con áreas urbanas dentro y fuera de la cuenca mediante empresas sanitarias.

Por otro lado, para el agua potable rural (Tabla 4.2 y 4.3), está determinada su demanda por las localidades rurales que cuentan con un sistema de APR establecido. Su demanda en el PEGH se clasifica por comuna, o por Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC, Figura 4.4), figura que establece la DGA para la clasificación de posibles acuíferos compartidos por unidad territorial (MOP, 2014). Para el 2019 existían 44 localidades al interior de la cuenca con APRs establecidos (DGA, 2020b).

Tabla 4.1: Demanda hídrica APU para el año 2019 por localidad.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Localidad	Demanda (m³) año 2019
Canela Alta	75.732
Canela Baja	126.089
Illapel	1.439.033
Salamanca	1.028.491
Total	2.669.345

Tabla 4.2: Demanda hídrica APR para el año 2019 por comuna.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Comuna	Demanda (m³) año 2019
Canela	275.836
Illapel	637.132
Salamanca	1.335.015
Total	2.247.983

Tabla 4.3: Demanda hídrica APR para el año 2019 por SHAC.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

SHAC	Demanda (m³) año 2019
Canela	88.951
Chalinga	169.613
Choapa Bajo	267.552
Choapa Medio	756.336
Choapa Alto	715.965
Illapel	249.564
Total	2.247.983

Los SHAC son una figura de delimitación de acuíferos. El reglamento de Aguas Subterránea aprobado en el Decreto 203 del MOP publicado el 2014, los declara como:

“Acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente”

Así los SHAC son una de las unidades territoriales recomendadas por la DGA para la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Su distribución espacial y geográfica en la cuenca se presenta en la Figura 4.4.

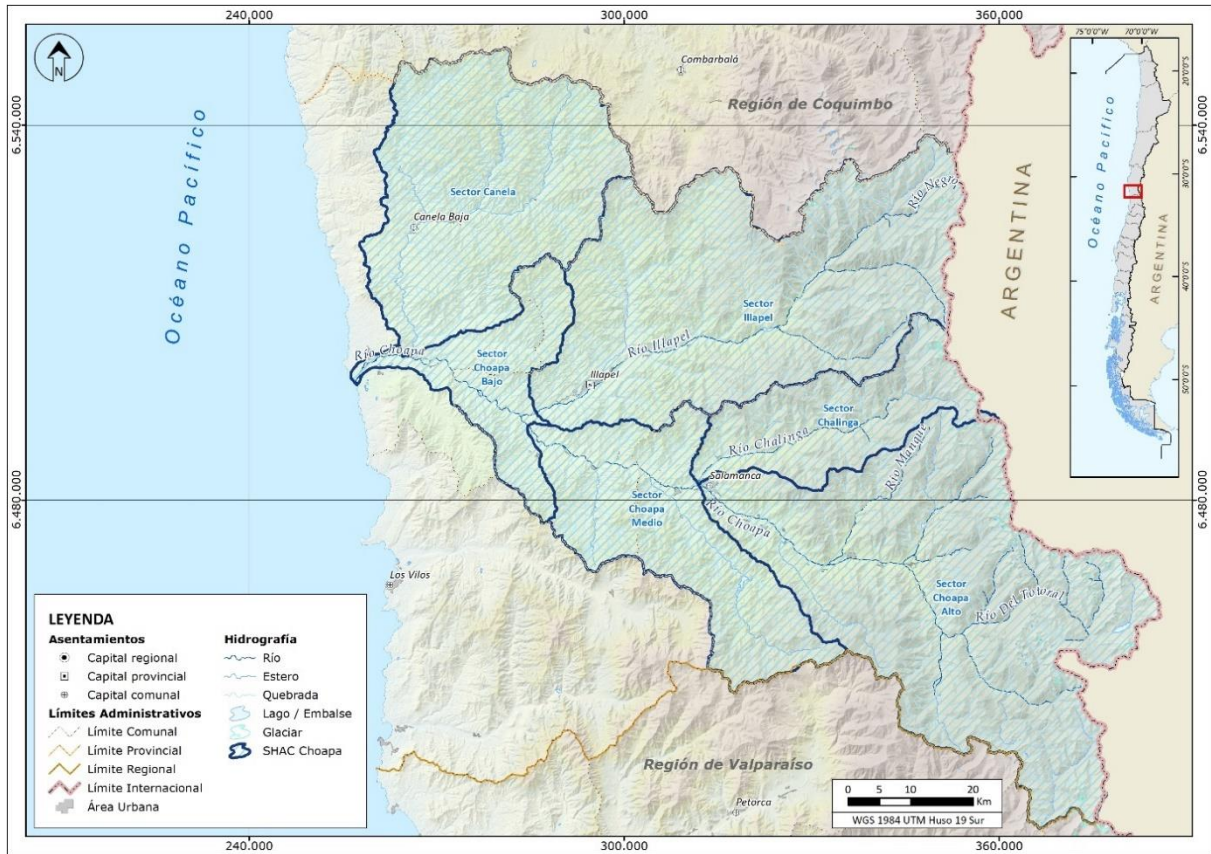


Figura 4.4: SHAC de la cuenca del Choapa.
 Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

En cuanto a la demanda proyectada para el consumo humano el PEGH la estima en función del crecimiento demográfico de la cuenca (Figura 4.5).

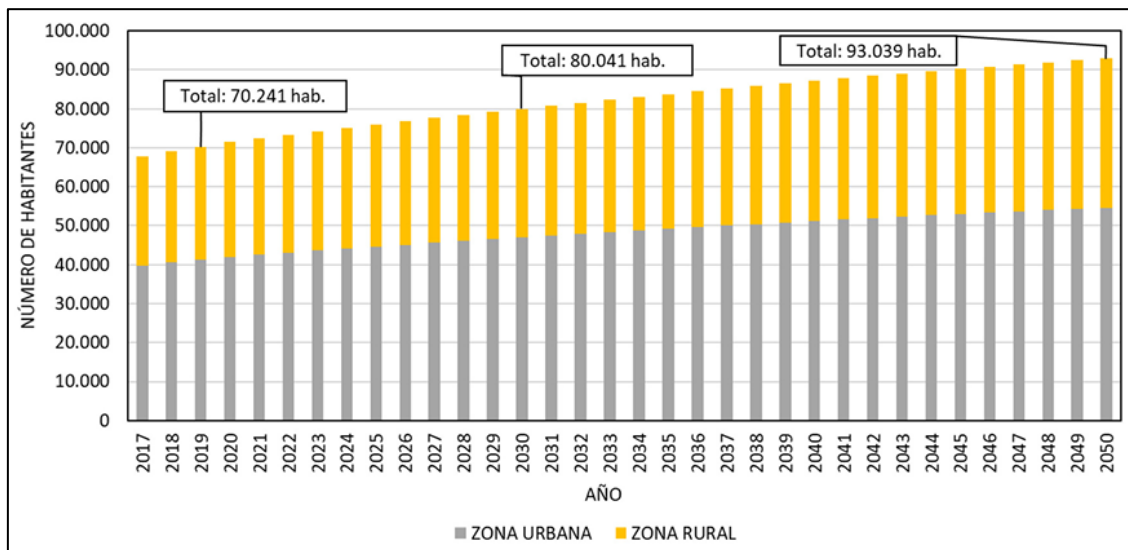


Figura 4.5: Población proyectada para la cuenca al año 2050.
 Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Con la información anterior, la demanda proyectada tanto para APU como APR estimada en el PEGH se presentan en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6.

Tabla 4.4: Demanda hídrica APU futura por localidad.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Localidad	Demanda anual (m^3 /año)	
	2030	2050
Canela Alta	86.726	98.770
Canela Baja	131.112	149.954
Illapel	1.379.880	1.587.480
Salamanca	744.453	864.218
Total	2.342.170	2.700.422

Tabla 4.5: Demanda hídrica APR futura por comuna.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Comuna	Demanda anual (m^3 /año)	
	2030	2050
Canela	333.636	492.235
Illapel	809.696	1.338.409
Salamanca	1.629.648	2.421.102
Total	2.772.979	4.251.747

Tabla 4.6: Demanda hídrica APR futura por SHAC.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

SHAC	Demanda anual (m^3 /año)	
	2030	2050
Canela	121.319	224.413
Chalinga	189.232	230.899
Choapa Bajo	297.348	377.639
Choapa Medio	926.729	1.400.672
Choapa Alto	901.232	1.428.006
Illapel	332.150	590.118
Total	2.772.979	4.251.747

4.1.3.2 Consumo Agrícola

La demanda agrícola en el PEGH ha sido estimada mediante el modelo hidrológico determinando un área potencial de riego según información geográfica disponible y otorgando

algunos valores de eficiencia, para canales, por ejemplo, obtenidos del estudio “Análisis para el Desarrollo de un Plan de GIRH en la cuenca el Choapa”, DGA-Rodhos (2017).

El total potencial de áreas de riego fue estimado en 17.078 ha, el cual se asumió constante desde 2014 hasta 2050. En la Figura 4.6 se presentan las zonas de riego modeladas para la estimación de la demanda agrícola.

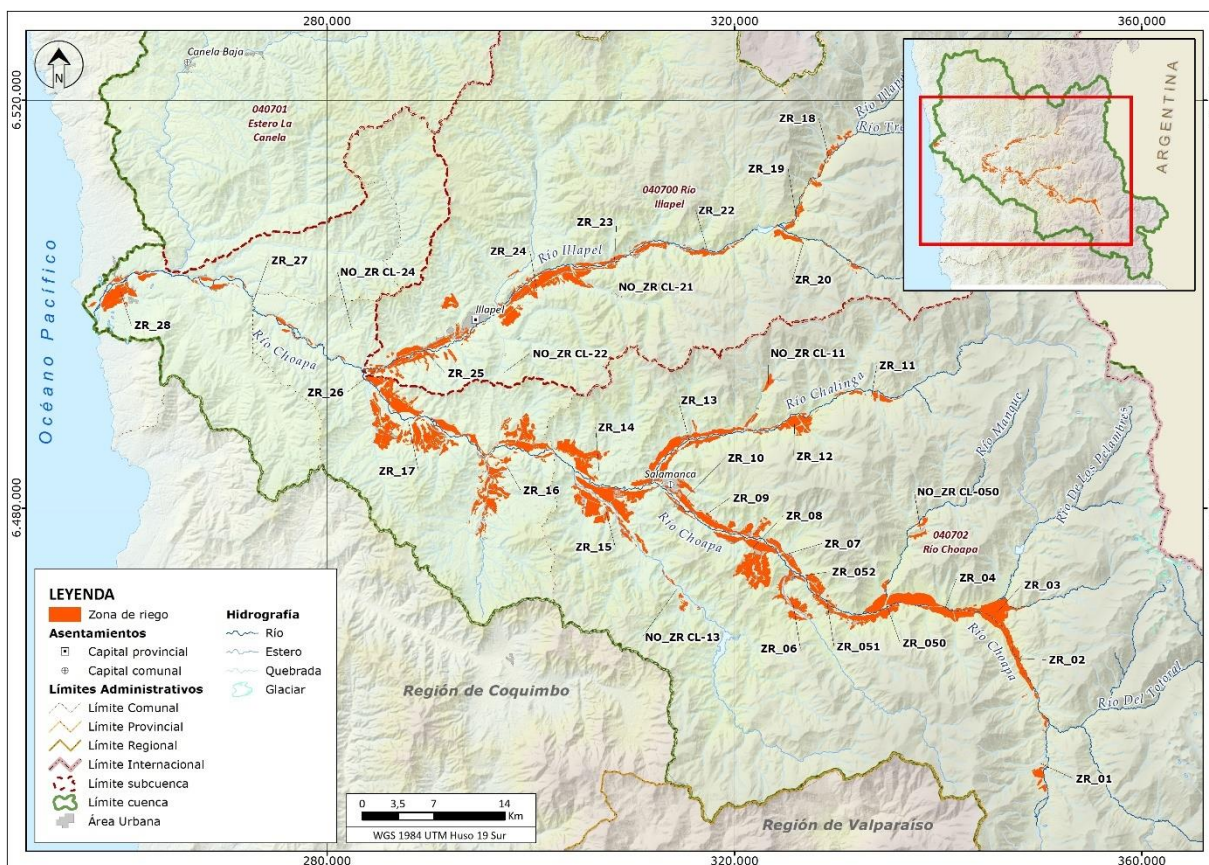


Figura 4.6: Mapa zonas de riego modeladas.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

A partir de ello, se estimó una demanda agrícola mensual para los años 2019, 2030 y 2050 que se muestran en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9.

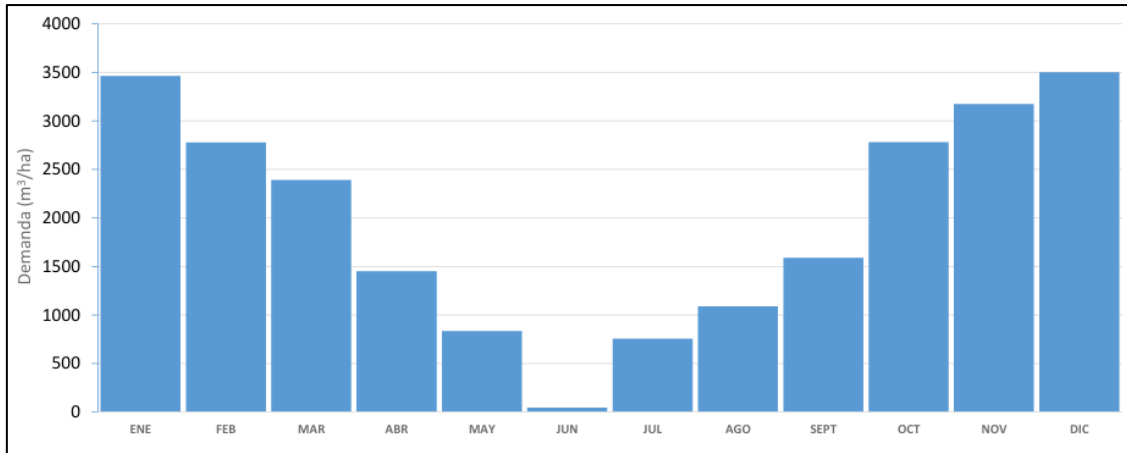


Figura 4.7: Demanda agrícola mensual para el año 2019.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

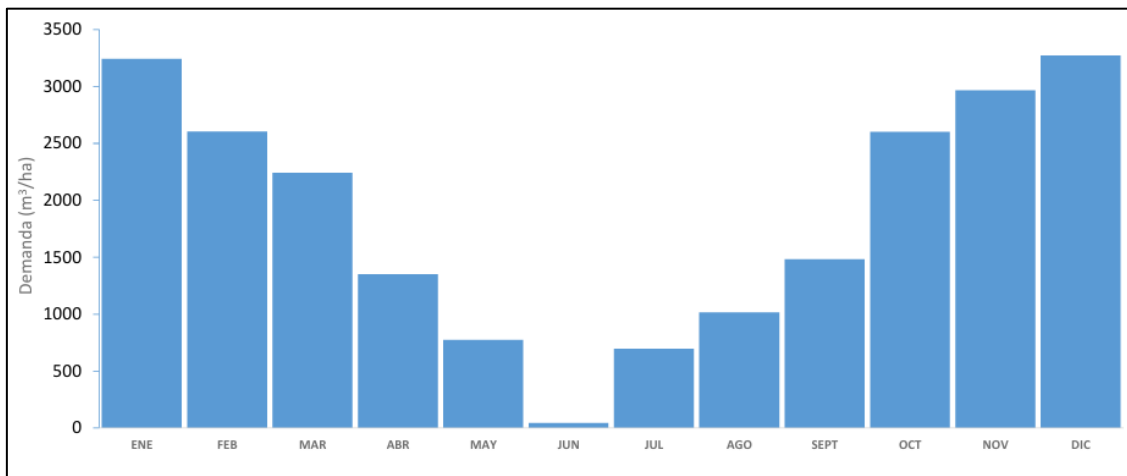


Figura 4.8: Demanda agrícola para el año 2030.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

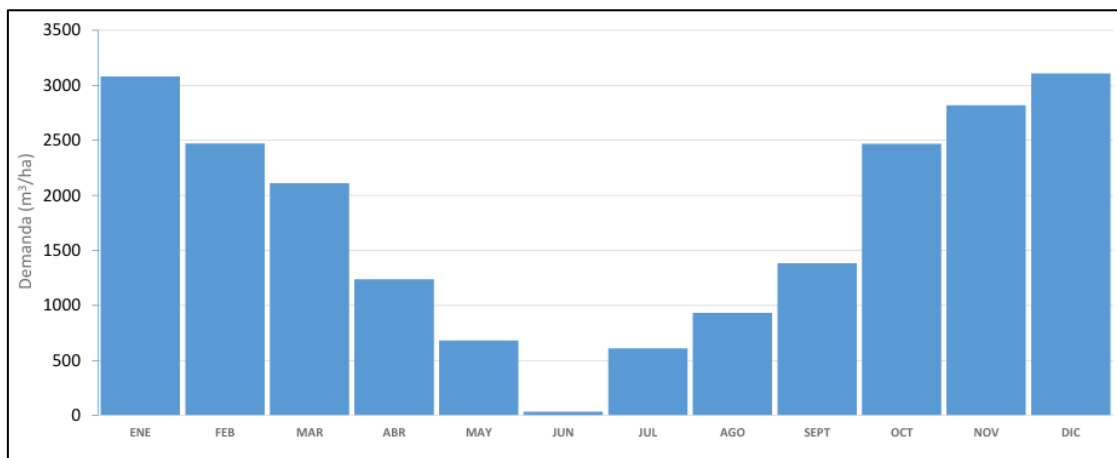


Figura 4.9: Demanda agrícola para el año 2050.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

4.1.3.3 Consumo Minero

En cuanto a esta demanda o consumo, el PEGH estimó la demanda para el año 2019, 2030 y 2050 a partir de la producción anual declarada en el Anuario de la Minería en Chile (SERNAGEOMIN, 2018).

En la Tabla 4.7 se presentan los valores de la demanda estimada en el PEGH, además de un gráfico (Figura 4.10) con los valores de caudal entregados en los derechos de agua para la minería.

Tabla 4.7: Demanda estimada para la minería en m³/año.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Subcuenca	Demanda hídrica (m ³ /año)		
	2019	2030	2050
Río Choapa Medio	144.006	123.351	48.556
Río Choapa Alto	21.269.749	19.914.047	13.228.197
Total	42.320.984	37.031.345	34.320.246

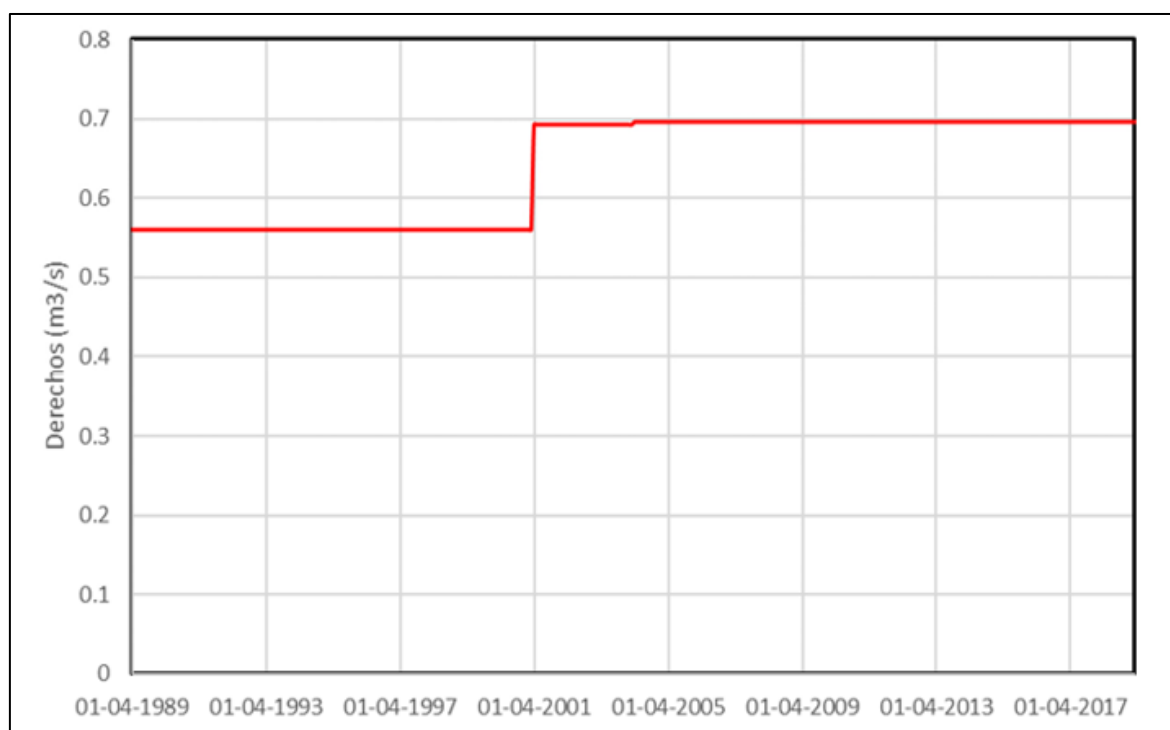


Figura 4.10: Serie en el tiempo de derechos de agua para uso minero.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

4.1.4 Caudal ecológico y Humedal Ramsar Las Salinas de Huentelauquén

Sobre la información referente a los valores de demanda y potencialmente representativas del flujo de agua mínimo asociado al área de conservación Humedal Ramsar Las Salinas de Huentelauquén, en el PEGH del Choapa se estimó un Caudal de Reserva para Protección Ambiental (RPA), para específicamente la zona en el “Río Choapa aguas arriba del Estero Canela”. El Caudal RPA es una figura distinta a la de caudal ecológico mínimo (MOP, 2023), este último se establece de manera general para todos los meses del año en función de un caudal medio anual, en cambio el primero si varía según los meses del año considerando los cambios estacionales naturales del caudal del río.

En la Tabla 4.8 y la Figura 4.11 se presenta la distribución gráfica de estos caudales (Q) para los distintos meses del año, y en la Tabla 4.9 se presentan los valores de caudal ecológico mínimo para el río Choapa como tal, el río Illapel y el Estero La Canela.

Tabla 4.8: Caudal de reserva para protección ambiental en m³/s.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
12,05	4,27	3,13	5,13	9,07	17,92	21,21	18,90	17,27	28,38	52,25	36,85

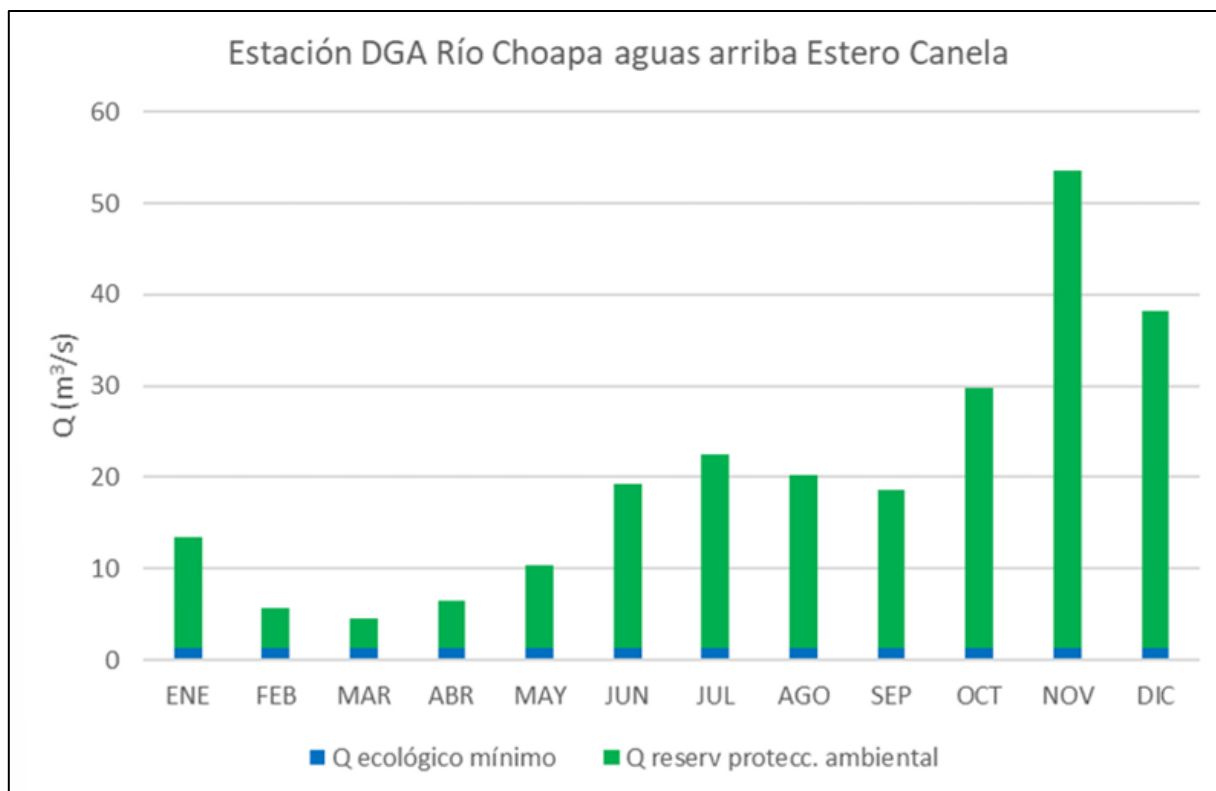


Figura 4.11: Caudal (Q) de reserva para protección ambiental y caudal (Q) ecológico mínimo (en m³/s).
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Tabla 4.9: Caudales (Q) ecológicos para subcuencas del Choapa.
Fuente: Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca del Choapa, 2020.

Cuenca	Q ecológico (m^3/s)
Estero La Canela	0,06
Río Illapel	0,48
Río Chopa	1,57

4.2 Softwares para la Modelación Hidrológica e Integración del Cambio Climático

La Dirección General de Aguas (DGA), el organismo del Estado encargado de promover la gestión y administración del recurso hídrico y levantar toda la información necesaria para esto, ha publicado en conjunto a empresas consultoras modelos hidrológicos en diversas cuencas del país (DGA, 2020b; DGA 2020c; DGA, 2020d). Esto en el marco de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) por cuencas, una figura de planificación que existía antes de la reforma al código de aguas del 2023 (DGA, 2020e).

Los modelos hidrológicos construidos para estos Planes Estratégicos fueron realizados con los softwares WEAP y MODFLOW (DGA, 2019). Dado lo anterior, en esta sección se presenta una descripción de estos softwares, con las metodologías que utilizan para la simulación de los fenómenos hidrológicos, la integración de escenarios de cambio climático, como también los parámetros de calibración y sus unidades de medida para estimar el grado de correlación entre lo simulado con lo medido en las estaciones de monitoreo.

4.2.1 WEAP

Este software fue creado por el Stockholm Environment Institute (SEI) y es ampliamente utilizado por la DGA y consultoras. Se han realizado proyectos de apoyo para la modelación hidrológica en las cuencas de Chile, en conjunto con la DGA y el SEI como lo es el proyecto “Desarrollo de herramientas para el análisis de gestión en el marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos” del 2019. En este documento se realiza una descripción de cómo utilizar WEAP para la modelación hidrológica de cuenca y se generan bases y antecedentes para algunas cuencas pilotos del territorio nacional (DGA, 2019).

WEAP funciona usando el principio básico del balance hídrico, puede ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas de cuencas. Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo: la escorrentía por precipitación, flujos base, y recarga de aguas subterráneas; análisis de las demandas sectoriales; derechos de agua y prioridades de

asignación; seguimiento de la contaminación y calidad del agua; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas (SEI, 2024).

WEAP posee 5 formas o algoritmos para resolver el balance hídrico que difieren en cuanto a los supuestos utilizados (UC y SEI, 2009). Debido a la mayor cercanía con la realidad física el método que más se utiliza, al menos para las modelaciones en Chile, es el Método de Humedal del Suelo (DGA, 2020b; DGA 2020c; DGA, 2020d).

El método de humedad del suelo consiste en dos capas (o baldes) de suelo que interactúan entre sí mediante los flujos que se esquematizan en la Figura 4.12.

Los componentes que se simulan del balance hidrológico de este método son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial y flujo base (flujo de agua subterránea). Estos flujos están determinados por variables meteorológicas de entrada (Tabla 4.10) y parámetros propios del método (UC y SEI, 2009).

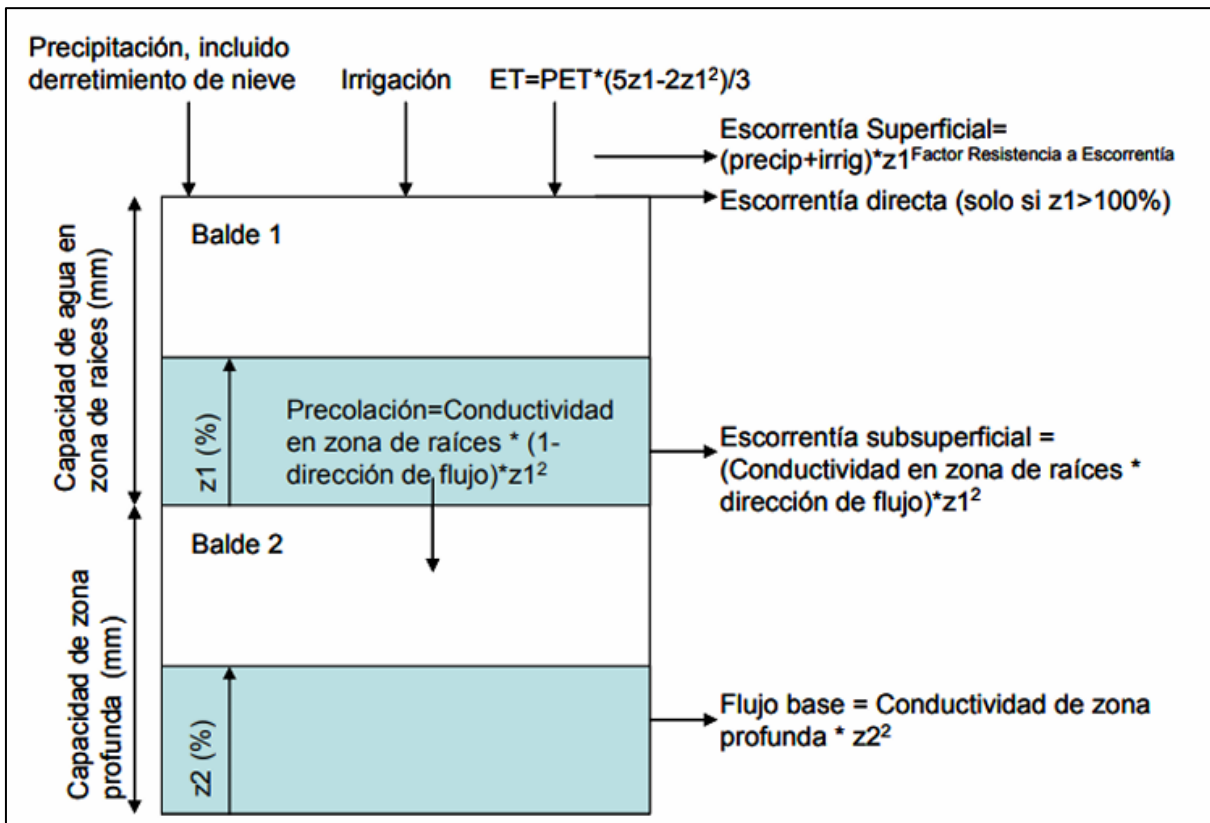


Figura 4.12: Esquema del método de humedad del suelo de WEAP.

Fuente: Guía Metodológica para la Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos en WEAP (UC y SEI, 2009).

Tabla 4.10: Variables meteorológicas de entrada al modelo en WEAP para el método de humedad del suelo.
Fuente: Adaptado a partir de UC y SEI (2009).

Variable	Observación
Precipitación	De estas variables de las que se requieren de manera fundamental una serie de tiempo de manera mensual para el periodo de modelación son los de temperatura y precipitación. El resto se puede considerar un valor promedio fijo para el periodo de modelación.
Temperatura	
Humedad relativa	
Viento	
Coberturas de nubes	

En cuanto a los parámetros propios del modelo, estos corresponden a:

- Kc: Coeficiente de cultivo
- Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (mm)
- Dw: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (mm)
- Kd: Conductividad de la zona profunda (mm/mes)
- Ks: Conductividad de la zona de raíces (mm/mes)
- f: Dirección preferencial del flujo de agua
- Z1 Nivel inicial de humedad en la zona de raíces (%)
- Z2 Nivel inicial de humedad en la zona profunda (%)

Estos parámetros son con los que posteriormente se calibra el modelo, algunos valores se pueden encontrar en la literatura en rangos según cobertura de suelo. Los valores de cada parámetro serán distintos según la cobertura del suelo, por ejemplo, el valor de Kc para una pradera será distinto al de un área de cultivo.

En cuanto a las ecuaciones que resuelven el balance hídrico para este método que se esquematiza en la Figura 4.12, son:

Para el Balde o Capa Superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1j} - 2z_{1j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1j}^2 - f_j k_s z_{1j}^2 - (1 - f_j) k_s z_{1j}^2$$

Donde:

- $Sw_j \frac{dz_{1j}}{dt}$: Cambio en humedad del suelo
- $P_e(t)$: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)
- $PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1j} - 2z_{1j}^2}{3} \right)$: Evapotranspiración
- $P_e(t)z_{1j}^2$: Escorrentía superficial
- $f_j k_s z_{1j}^2$: Flujo intermedio

- $(1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$: Percolación

Para el Balde o Capa Inferior:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$$

Donde:

- $Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt}$: Cambio en la humedad del suelo
- $k_d z_{1,j}^2$: Flujo base (de agua subterránea)
- $(1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$: Percolación

4.2.2 MODFLOW

MODFLOW es un programa modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), el cual consiste en resolver mediante interacciones la ecuación de flujo de agua subterránea (USGS, 2024).

El modelamiento numérico es capaz de simular el flujo de agua subterránea en tres dimensiones, y se basa en el enfoque de diferencias finitas de volumen de control generalizado, utilizando celdas, en el que cada una se puede conectar hidráulicamente a un número indeterminado (depende de la grilla que defina el modelador) de celdas (Gidahatari, 2016).

El movimiento en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante a través del medio poroso en el suelo puede ser descrito por la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

- K_{xx} : Valor de conductividad hidráulica en el eje x (L/T)
- K_{yy} : Valor de conductividad hidráulica en el eje y (L/T)
- K_{zz} : Valor de conductividad hidráulica en el eje z (L/T)
- h : Es la carga hidráulica (L)
- W es el flujo volumétrico por unidad de volumen representada por las fuentes o sumideros del agua, con $W < 0.0$ para el flujo entrante al sistema (1/T)
- SS : Es el almacenamiento específico del material poroso (1/L)
- t es el tiempo (T)

Esta ecuación describe el flujo de agua subterránea bajo condiciones de no equilibrio en un medio heterogéneo anisotrópico siempre que los ejes principales de conductividad hidráulica estén alineados con la dirección de las coordenadas (Gidahatari, 2016). En la Figura 4.13 se muestra una discretización espacial de un acuífero con una malla de celdas o bloques, donde las localizaciones de cada una se describen en términos de filas, columnas y capas y se emplean en el sistema de subíndices i, j, k .

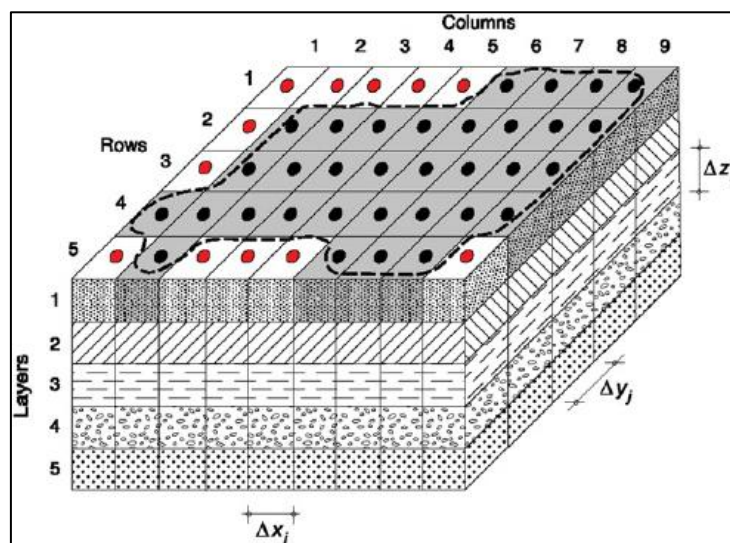


Figura 4.13: Esquema de discretización espacial de un acuífero.
Fuente: Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW.

El desarrollo de la ecuación del flujo de agua subterránea con la ecuación de diferencias finitas está basado en la ecuación de continuidad, donde la suma de todos los flujos de entrada y salida en la celda debe ser igual al cambio en el almacenamiento dentro de la celda (Gidahatari, 2016).

4.2.3 Indicadores de Calidad de Calibración

La calibración de modelos hidrológicos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, mediante indicadores estadísticos entre los valores de caudal registrados de un tramo del río medidos en estaciones de medición, con los valores simulados por el modelo (UC y SEI, 2009). A continuación, se presentan 4 indicadores utilizados comúnmente para medir el grado de similitud entre los valores observados en estaciones de medición con los valores simulados en el modelo hidrológico (DGA, 2020b; DGA, 2020c, DGA, 2019).

4.2.3.1 Índice de Nash-Sutcliffe (NSE)

El índice de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología (DGA, 2019; UC y SEI, 2009; Molnar, 2011). Se define como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde:

- $Q_{sim,i}$ = Valor simulado para un tiempo dado.
- Q_i = Valor observado para un tiempo dado.
- \bar{Q} = Valor medio observado para todo el periodo de tiempo.

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $NSE=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $NSE=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 4.11 (Molnar, 2011).

Tabla 4.11: Valores de referencia del índice Nash-Sutcliffe (NSE).
Fuente: Molnar, 2011.

Nash-Sutcliffe	Valoración
< 0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

4.2.3.2 Índice de Eficiencia de Kling (KGE)

El índice KGE (Kling-Gupta Efficiency) es una métrica que se basa en tres componentes: la correlación, la variabilidad relativa y el sesgo relativo. La fórmula del índice KGE es la siguiente:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Donde:

- r = Correlación entre los flujos observados y simulados.
- α = Relación entre las desviaciones estándar de los flujos simulados y de los observados.
- β = Relación entre los promedios de los flujos simulados y el de los observados.

Un valor de KGE cercano a 1 indica un buen ajuste entre los flujos observados y simulados, mientras que un valor cercano a 0 o negativo indica un mal ajuste y se puede valorar los resultados del índice de manera similar a lo presentado en la Tabla 11 (Muñoz, 2022).

4.2.3.3 Índice de Sesgo Porcentual (PBIAS)

Es una medida de la capacidad del modelo para igualar el volumen total de flujo. Un valor ideal es cero, pero se considera aceptable un PBIAS de más o menos el 25 % del caudal observado (Finger, 2011). Se define como:

$$PBIAS = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right]$$

Donde:

- Q_i^{obs} = Caudal observado durante un periodo de tiempo determinado.
- Q_i^{sim} = Caudal simulado durante un tiempo determinado.

4.2.3.4 Coeficiente de Determinación (R^2)

El coeficiente de determinación, también conocido como R^2 , es una medida estadística que para la hidrología representa la proporción de la varianza total explicada por los valores simulados por el modelo hidrológico a partir de los valores observados en estaciones de medición. Este coeficiente puede variar entre 0 y 1. Un R^2 de 0,8 indicaría que el 80 % de la variabilidad en el flujo de agua de la cuenca puede ser explicada por el modelo (Pizarro y Novoa, 1986).

4.2.4 Escenarios de Cambio Climático en los Modelos Hidrológicos

En cuanto a la integración de escenarios de cambio climático en los modelos hidrológicos, esto se hace principalmente mediante la incorporación de modelos climáticos de precipitación y temperatura futura según escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI). La precipitación y temperatura son uno de los principales datos que requieren los modelos hidrológicos (Romero *et al.*, 2018; Stehr *et al.*, 2022).

Los escenarios más recientes de cambio climático son los que incluyen la denominadas Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés), integradas a lo que se denominan forzamiento radiativo asociados (RCP; trayectorias de concentraciones representativas, por sus siglas en inglés), publicados en el reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) al Sexto Informe de Evaluación (IPCC, 2021).

Los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) son los que simulan el clima pasado y futuro global en diferentes resoluciones espaciales, considerando las indicaciones de los informes del IPCC en cuanto a emisiones de los GEI y los factores mencionados en el párrafo anterior. Existen muchos GCMs a nivel mundial, por lo que un esfuerzo internacional para compilar y comparar los resultados de cada GCM lo realiza el

Proyecto de Intercomparación de Modelos (CMIP, por sus siglas en inglés), el cual actualmente se encuentra en su sexta versión, CMIP6, que considera las indicaciones del sexto informe del IPCC (Ruiz *et al.*, 2022). Sin embargo, los GCMs son de escala global, con una baja resolución espacial, por lo general de 100 a 250 km, por lo que es necesario realizar una reducción de escala (Downscaling) de estos modelos climáticos para que puedan ser utilizados a nivel de una cuenca. Existen varios métodos de reducción de escala de un GCM, estos se clasifican en métodos dinámicos y métodos estadísticos. La utilización de algún método específico depende de caso particular (Lala 2020).

4.3 Modelo Hidrológico en la Cuenca del Choapa

La Cuenca del Río Choapa cuenta con modelo hidrológico actualizado al 2019, realizado en el marco del PEGH de la cuenca. Este modelo fue construido por la DGA y las empresas consultoras UTP HÍDRICA y ERIDANUS. Los softwares utilizados para la modelación fueron WEAP y MODFLOW de manera acoplada para la simulación integrada de los fenómenos hidrológicos superficiales y subterráneos de la cuenca (DGA, 2020b).

Este modelo hidrológico de la cuenca distribuye la demanda en 124 nodos de demanda (Figura 4.14, puntos rojos) y los clasifica según el uso destinado hacia Agua Potable (AP), Riego (RIEG) o Minería (MIN).

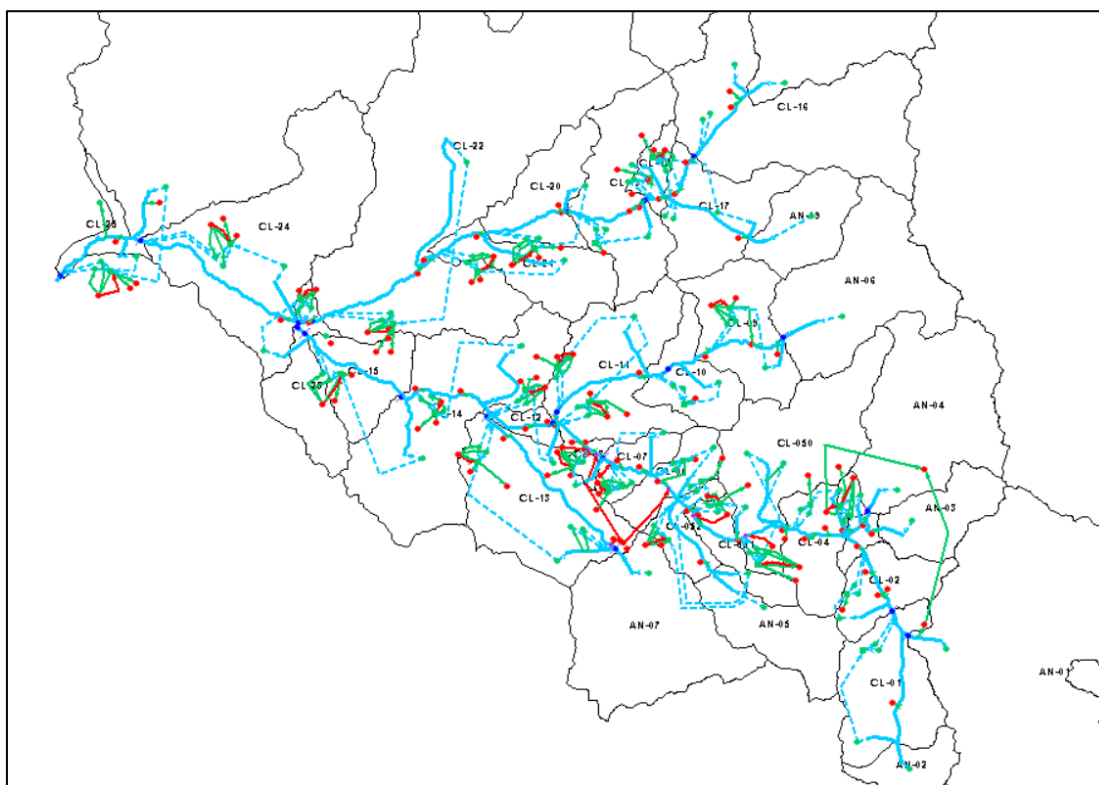


Figura 4.14: Modelo esquemático en WEAP del PEGH del Choapa.
Fuente: Extraído del modelo en WEAP del PEGH del Choapa.

La oferta hídrica como tal, se determina mediante lo que en el modelo WEAP se denomina Unidad Hidrológica o Catchment (Figura 4.15, puntos verdes), y además los Acuíferos o Groundwater (Figura 4.15, cuadrados verdes) (UC y SEI, 2009).

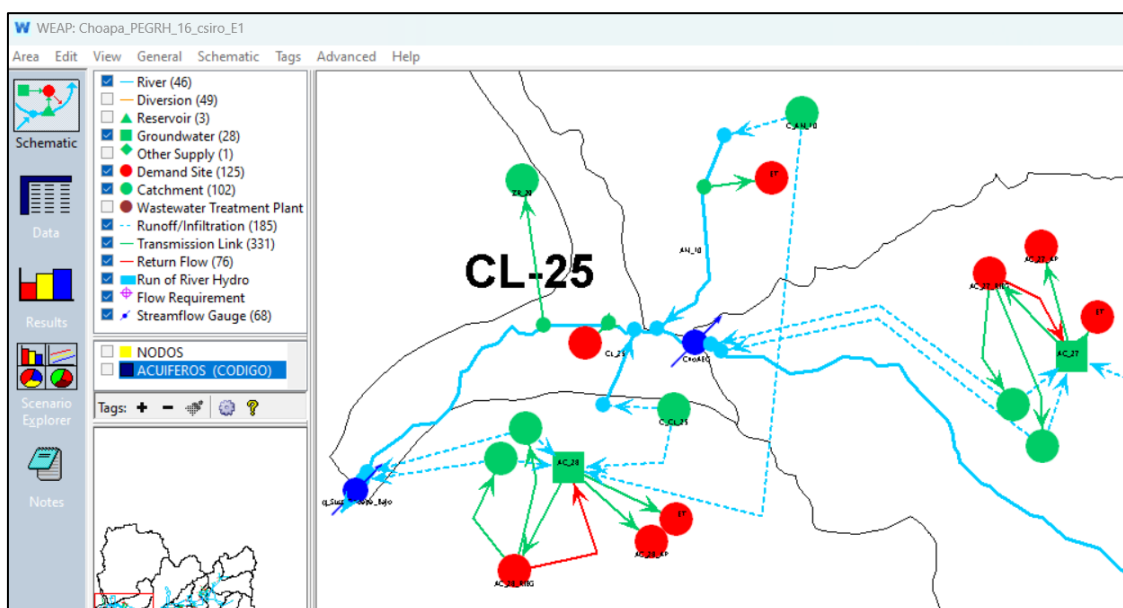


Figura 4.15: Extracto del modelo esquemático en WEAP del PEGH del Choapa.

Fuente: Extraído del modelo en WEAP del PEGH del Choapa.

Respecto a los resultados de la calibración del modelo acoplado WEAP-MODLFLOW, estos se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Resultados indicadores de calidad de calibración del modelo acoplado WEAP-MODFLOW.

Fuente: Extraído de Anexo H del PEGH del Choapa.

Sub-cuenca	Estación	KGE	NSE	R ²	PBIAS
Estero Camisas	Camisas desembocadura	0,33	0,40	0,46	-22,14
Río Chalinga	Chalinga en La Palmilla	0,55	0,48	0,49	-6,31
	Chalinga San Agustín	0,34	-0,50	0,34	21,04
Río Illapel	Río Illapel en Las Burras	0,53	0,62	0,67	25,36
	Río Illapel en Huintil	0,55	0,54	0,56	15,89
	Río Illapel en El Peral	0,55	0,61	0,64	22,31
Río Cuncumén	Cuncumén antes de bocatoma canales	0,74	0,48	0,55	5,28
Río Choapa	Choapa en Batuco	0,66	0,68	0,70	2,51
	Choapa en Salamanca	0,53	0,63	0,72	-1,10
	Choapa en Puerto Negro	0,67	0,68	0,69	12,88
	Choapa antes de Estero La Canela	0,66	0,68	0,70	11,08
PROMEDIO		0,56	0,48	0,59	7,98

De la tabla anterior se observa que se obtuvieron valores aceptables o “buenos”, según la tabla de valoración del Molnar (2011), de la cuenca modelada. En general tanto para KGE y NSE se obtuvieron valores mayores a 0,4. Para el R^2 resultaron en valores similares a los de KGE y NSE, y en cuanto al PBIAS se observa que solo en un caso el sesgo es mayor a un 25%, pero solo con una superación de 0,36%, en el río Illapel en Las Burras.

En las figuras 4.16 y 4.17, se presentan algunos de los resultados gráficos de flujos simulados por el modelo frente a lo registrado por las estaciones de medición.

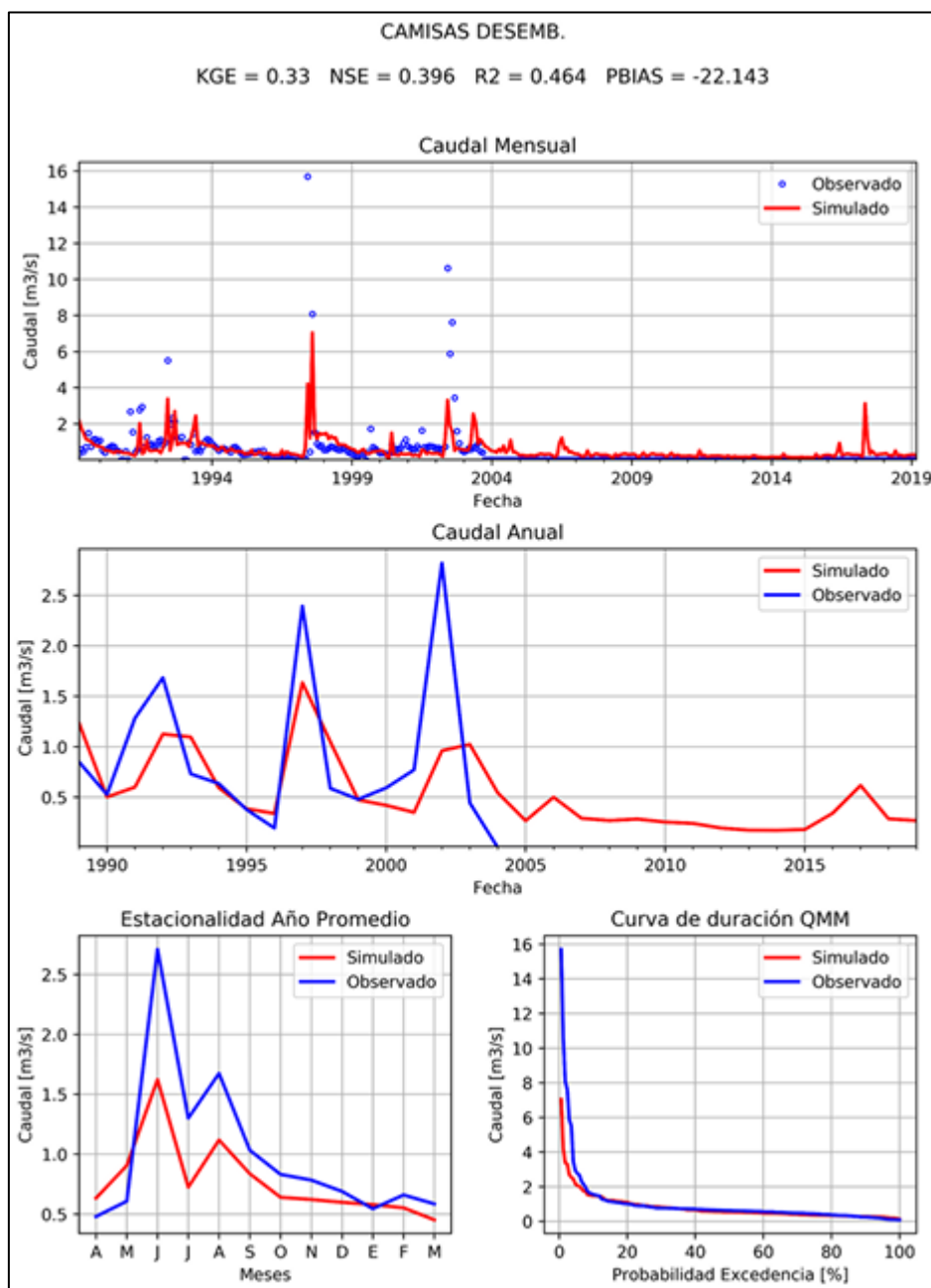


Figura 4.16: Resultados calibración estero las camisas en desembocadura.

Fuente: Extraído de Anexo H del PEGH del Choapa.

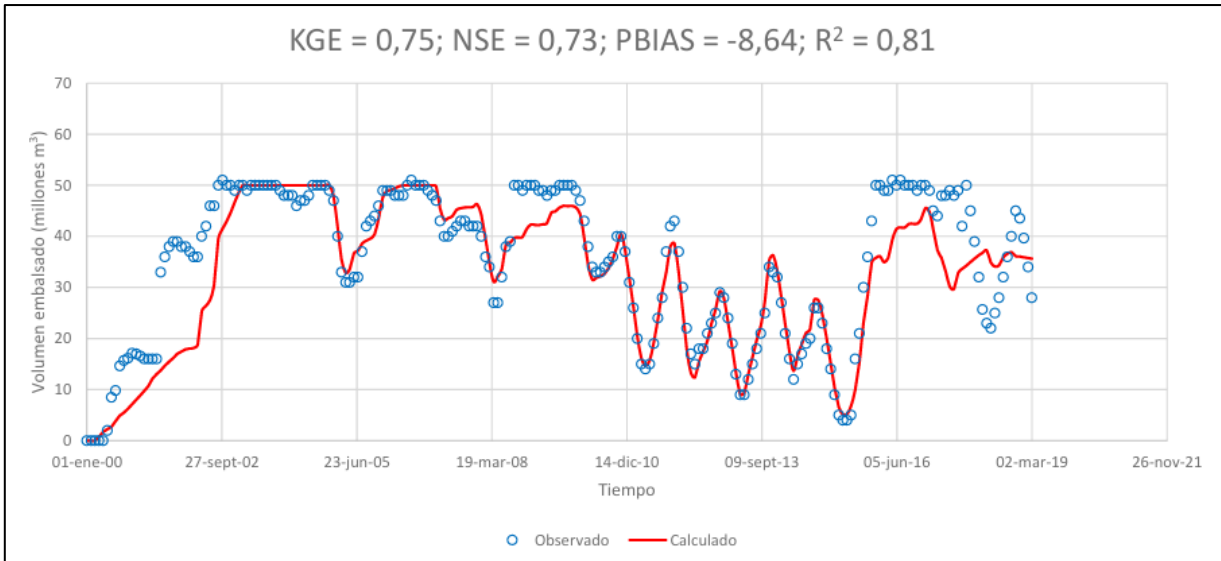


Figura 4.17: Resultados calibración embalse Corrales.
Fuente: Extraído de Anexo H de PEGH del Choapa.

En cuanto a los escenarios de cambio climático, este modelo, evalúa e integra al modelo hidrológico, de manera preliminar, dos modelos de circulación general recomendados por la DGA, el MCG CSIRO y el CSM4, según lo especificado en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017).

Así, se integran los modelos climáticos MCG CSIRO y CCSM4 mediante las variables climáticas de precipitación y temperatura (forzantes) al modelo acoplado WEAP-MODFLOW (1989-2019) para evaluar escenarios climáticos en la cuenca para el periodo (2019-2050).

De estos dos modelos climáticos integrados como forzantes al modelo hidrológico de la cuenca, el que presentó escenarios más desfavorables en termino subterráneos y superficiales de la cuenca fue el MCG CSIRO. Conforme a esto, se escogió este modelo como representativo del cambio climático para la evaluación de escenarios del PEGH del Choapa (DGA, 2020b).

Por lo tanto, el caso base del modelo hidrológico para la evaluación de distintos escenarios de gestión hídrica futuros realizados en el PEGH del Choapa se resume en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Descripción escenario de caso base del modelo hidrológico del Choapa.
Fuente: Extraído de Anexo H del PEGH del Choapa.

Escenarios	Periodos	OBS
Forzantes	Abril 2019 – marzo 2050	MCG CSIRO
Demandas	Abril 2019 – marzo 2050	Proyecciones de demanda a 2050
Iniciativa Base	-	Implementación desaladora MLP desde abril del 2021, para cubrir incremento de demanda minera a 2050

La desaladora mencionada en Iniciativa Base de la tabla anterior corresponde a un proyecto de Minera Los Pelambres, enfocada a suplir futuras expansiones y contar con una seguridad de abastecimiento de agua. Cabe destacar que no beneficia a otros actores de la cuenca, por cuanto su implementación en el modelo no impacta en las captaciones existentes de la minera y opera como sistema independiente (DGA, 2020b).

Volviendo al Caso Base del modelo hidrológico de la cuenca del Choapa, este se utilizó para evaluar dos escenarios de gestión futuros:

- Recarga artificial de acuíferos en sector Panguecillo (SHAC Choapa Alto).
- Embalse Canelillo, ubicado justo aguas arriba de la confluencia entre el río Choapa y el río Illapel.

Estos escenarios se definieron en conjunto con las empresas consultoras y la DGA, sin embargo, no evaluaron la desalinización como una nueva fuente agua, sin perjuicio que integraron al caso base el proyecto de Desalación específicamente para la Minera Los Pelambres, proyecto que hoy en día ya se encuentra en operación (Los Pelambres, 2024).

4.4 Desalinización en Chile e Impactos Ambientales

4.4.1 Plantas Desalinizadoras en Chile

En los últimos años ha habido un aumento de las iniciativas asociadas a las tecnologías de desalinización y se espera que estas sigan aumentando a futuro (UChile, 2023). El primer Catastro Nacional de Plantas Procesadoras de Agua de Mar generado por la Asociación Chilena de Desalación y Rehúso (ACADES, 2023), indicó que existen 31 plantas con la capacidad de producir agua dulce sobre 20 L/s: 22 operando, 6 en construcción y 3 con aprobación ambiental (InvestChile, 2023).

Según el informe del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MICITEC, 2022), existen 8 proyecto de gran escala en el norte del país, que en total aportan con un caudal de agua dulce de 8.558 L/s, donde aproximadamente el 72 % es utilizada para la industria minera, proyectándose para el futuro que este caudal aumente a 38.766 L/s.

Por otro lado, la desalinización para consumo humano también está adquiriendo relevancia en el país. En el 2003 inicio sus operaciones la Planta Desaladora Norte, en Antofagasta, siendo esta la primera planta desaladora en producir agua para el consumo humano en Chile y Latinoamérica, abasteciendo el 85 % de la demanda de Antofagasta y el 100% de Mejillones. Así mismo, recientemente en el año 2021 entró en operación la Planta Desaladora de Atacama en Caldera, con la capacidad de producir agua para el consumo humano para más de 200 mil habitantes, provenientes de las comunas de Chañaral, Caldera, Copiapó y Tierra Amarilla (UChile, 2023).

Para la región de Coquimbo, solo existe una (1) planta desaladora mayor a 20 L/s en operación, que entró en marcha en marzo del 2024, siendo esta planta exclusivamente para el uso de la Minera Los Pelambres con una capacidad de 400 L/s. Esta planta se encuentra ubicada en la comuna de Los Vilos y el agua es dirigida a la Mina Los Pelambres ubicada en la zona cordillerana de la cuenca del Choapa (Los Pelambres, 2024). Además, en el mismo catastro ya mencionado, exponen que existen 3 posibles proyectos en la región de Coquimbo, uno de ellos para la cuenca del Choapa, pero que están en evaluación preliminar de manera interna por empresas de ingeniería y consultoría.

En la Tabla 4.14 se presentan los proyectos de desalinización en Chile recopilados en el Catastro Nacional de Plantas Procesadoras de Agua de Mar que se encuentran en operación, con los respectivos caudales de agua dulce generados.

Tabla 4.14: Proyecto de desalinización con capacidad mayor o igual a 20 L/s en operación.
Fuente: ACADES, 2023.

Proyecto	Sector	Capacidad (L/s)
Desaladora Tocopilla (Grupo EPM)	Agua Potable	75
Tocopilla (Norgener – AES Andes)	Industrial	25
Spence Growth Option (BHP)	Minería	1000
CTT Tocopilla (Engie)	Industrial	22
Mejillones (Gasatacama)	Industrial	30
Angamos (EE Angamos – AES Chile)	Industrial	56
Minera Antucoya (Antofagasta Minerals)	Minería	30
Michilla (Haldeman Mining Company)	Minería	70
Desaladora Norte Antofagasta (Grupo EPM)	Agua Potable	1.053
Minera Sierra Gorda (KGHM International)	Minería	63
Distrito Centinela (Antofagasta Minerals)	Minería	50
Plantas 0, EWS y EWSE (BHP)	Minería	3.858
Mejillones (EE Cochrane / AES Chile)	Industriales	56
Minería Monteverde (Mantos Copper)	Minería	120
Minera Candelaria (Lunden Mining Corp.)	Minería	500
Desaladora Atacama (ECONSSA)	Agua Potable	450
Huasco (Guacolda)	Industrial	70
Aguas CAP (AGUASCAP)	Minería	600
Minera Los Pelambres (MLP)	Minería	400
Unidad 3 Ventanas (EE Ventanas / AES Chile)	Industrial	28
Unidad 4 Ventanas (EE Ventanas / AES Chile)	Industrial	30
Aconcagua	Multipropósito	1000
Central Térmica Santa María (Colbún)	Industrial	33

De la tabla anterior se puede observar que la planta de máxima capacidad en Chile es del orden es de 3858 L/s, pero esta capacidad corresponde la sumatoria de 3 plantas (0, EWS y EWSE), siendo la de mayor capacidad de 2500 L/s, que corresponde también a la planta de mayor producción en Latinoamérica (BHP, 2018). Sin embargo, la mayoría de las plantas en Chile, no superan la capacidad de 1000 L/s.

4.4.2 Principales Impactos Ambientales

Los principales impactos asociados a las plantas desalinizadoras, según MICITEC (2022), BCN (2017) y BCN (2021) corresponden a:

- Impacto fisicoquímico de la descarga de salmuera al medio marino
- Impactos sobre microorganismos marino por la captación de agua de mar

Algunos estudios publicados sobre los impactos de la desalinización se han enfocado en la influencia de la salmuera sobre los atributos fisicoquímicos de los ecosistemas receptores (Loya-Fernández, 2018; Roberts *et al.*, 2010; Manríquez *et al.*, 2024; Morton *et al.*, 1997). Roberts *et al.* (2010), por ejemplo, indica que los efectos de la pluma salina pueden percibirse desde metros alrededor de la descarga, hasta incluso kilómetros en casos extremos. Las variaciones en esto se suelen dar por la capacidad y tecnología de la planta, el diseño de los difusores al final de los emisarios de descarga y los aspectos hidrológicos del ecosistema. Manríquez *et al.* (2024) evaluaron el efecto de los cambios de salinidad en el crecimiento de algunas larvas como la del Loco (*Concholepas concholepas*) organismos icónicos de las costas chilenas y de gran importancia ecológica y económica, y de los cuales se evidencio un cambio en la movilidad de las larvas y un aumento en el consumo de oxígeno.

Una de las estrategias de mitigación, es estudiar y simular el vertimiento de la salmuera previo a la instalación de planta, además del monitoreo durante la operación, las condiciones oceanográficas del lugar (profundidad, temperatura, recarga natural de agua, entre otras) como también la calidad, cantidad y frecuencia del vertido (BCN, 2021).

4.4.3 Simulación del Vertimiento de Salmuera

Para la modelación o simulación del vertimiento de salmuera en el mar, la Dirección General de Territorio Marítimo y Marina Mercante, mediante el Departamento de Protección de Medio Ambiente Acuático, Respuesta a la Contaminación y Cambio Climático, publicó una Guía para el Modelado de la Hidrodinámica y del Proceso de Mezcla de Descargas Salinas y Térmicas. (Winckler, 2021). En esta guía se mencionan algunos de los softwares que se utilizan para la modelación de plumas salinas, entre los cuales se encuentra Visual PLUMES.

Visual Plumes es un programa de la Agencia de Protección Ambiental Americana (United States Environmental Protection Agency, USEPA). El programa incluye distintos módulos para la simulación de vertidos mediante chorros sumergidos individuales o múltiples, considerando las condiciones ambientales del medio receptor. Algunos de sus módulos han extendido su ámbito de aplicación al vertido de efluentes de flotabilidad negativa, como la salmuera. (MITECO, 2010). Dentro de los módulos y sus aproximaciones numéricas que posee Visual Plumes, el único aplicable a la simulación de efluentes de flotabilidad negativa, como la salmuera, es el UM3, realizando esta simulación en lo que se denomina campo cercano.

Respecto a la simulación de campo lejano Visual Plumes estima la dilución de la pluma mediante la ecuación de Brooks:

$$C_{cl} = C_{mz} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{U_a b^2}{16 \varepsilon X}}$$

Donde:

- C_{cl} : Concentración en el centro de la pluma (eje) en el punto deseado del campo lejano.
- C_{mz} : Concentración del contaminante al final de la zona de mezcla (campo cercano) obtenida de modelado UM3
- U_a : Velocidad de corriente en el medio receptor.
- b : Ancho de la pluma correspondiente a todos los orificios.
- ε : Coeficiente de viscosidad.
- X : Distancia recorrida por la pluma desde el final de la zona de mezcla hasta el punto de interés en campo lejano.

En la Figura 4.18 se presentan esquemas del campo cercano y campo lejano, además de la diferencia entre efluentes de flotabilidad negativa (salmuera) y flotabilidad positiva.

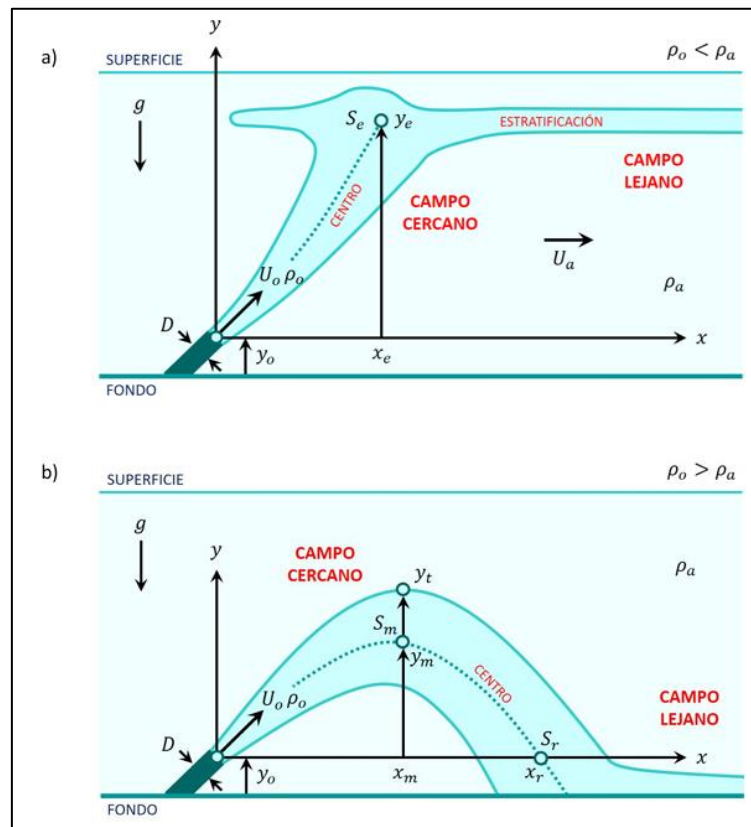


Figura 4.18: Esquema a) Pluma de flotabilidad positiva, b) Pluma de flotabilidad negativa.

Fuente: Winckler, 2021.

Algunas de las limitaciones que presenta Visual Plumes cuando se aplica el modelo UM3 para la simulación de vertimiento de salmuera, es que el modelo no es capaz de detectar la presencia del fondo y continúa ejecutándose, sin simular el efecto del impacto, aplicando para estimar la dilución en campo lejano, la ecuación de Brooks. Por lo tanto, el usuario debe detectar este impacto y desechar todos los resultados posteriores que son erróneos, para la correcta simulación posterior del campo lejano (MITECO, 2010).

En la Figura 4.19 se presenta el error que comete este módulo de Visual Plumes en el vertido mediante chorro individual, con una profundidad aproximada de fondo, desde el chorro de 0,4 m. Se observa que el modelo continúa ejecutándose, sin considerar el fondo.

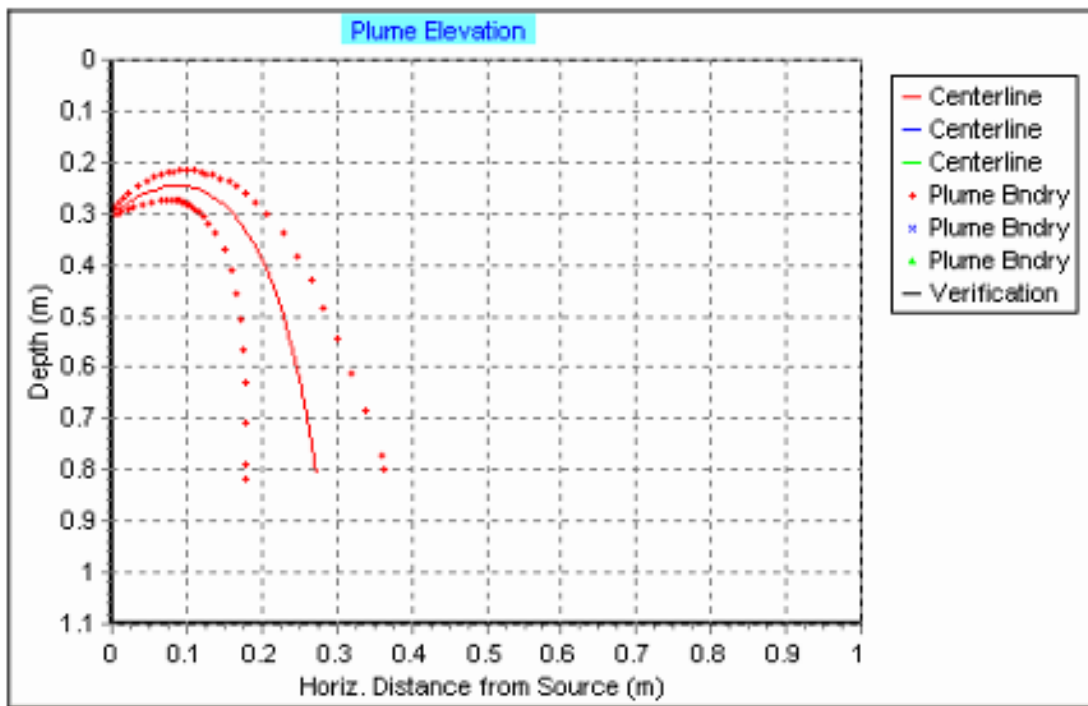


Figura 4.19: Ejemplo de error de no detección del fondo.
Fuente: Extraído de MITECO, 2010.

En cuanto a la entrada de datos al modelo, estos se introducen desde la propia interfaz con la opción de introducir archivos ASCII para definir las series temporales de los datos de entrada.

De los datos requeridos, como la velocidad y sentido de las corrientes en el medio receptor, estos datos se pueden obtener mediante la base de datos disponibles del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) o de los Anexos de Estudios de Impacto Ambiental con alcances al medio marino.

En la Figura 4.20 se presenta un resumen de los datos requeridos para la simulación en Visual Plumes del modelo UM3.

DATOS DE ENTRADA DEL MODELO UM3 de VISUAL PLUMES							
Parámetros de descarga y del efluente (salmuera) (DIFFUSER)	<p>Características de la boquilla: Diámetro (<i>Port diameter</i>), altura de la boquilla con respecto al fondo (<i>Port elevation</i>), ángulo de inclinación del chorro (<i>Vertical angle</i>), número de boquillas (<i>Num. of ports</i>), distancia entre boquillas (<i>Port spacing</i>), distancia de la boquilla a la superficie (<i>Port depth</i>), caudal total del efluente (<i>Effluent flow</i>), concentración salina del efluente (<i>effluent salinity</i>), temperatura del efluente (<i>effluent temperature</i>), concentración de contaminante (<i>effluent concentration</i>).</p> <p>Otros: Ángulo horizontal del chorro con respecto al eje "x" (<i>Horizontal. Angle</i>) Longitud de la zona de límites críticos por contaminación aguda (<i>Acute mix zone</i>) Longitud de la zona de límites críticos por contaminación crónica (<i>Chronic mix zone</i>)</p>						
Condiciones ambientales, en el medio receptor (AMBIENT)	Los parámetros del medio receptor se insertan por filas , correspondientes a su valor a distintas profundidades. Se discretiza, por tanto, la columna de agua en el medio receptor. Posibilidad de introducir series temporales (<i>Time series files</i>)						
	<table border="1"> <tr> <td>Condiciones geométricas</td> <td>Profundidad media de la columna de agua en la zona de vertido (calado) (<i>measurement depth or height</i>).</td> </tr> <tr> <td>Parámetros físicos</td> <td>Salinidad del medio receptor (<i>ambient salinity</i>). Temperatura del medio receptor (<i>Ambient Temp</i>). Concentración de fondo, en el M. Receptor (<i>Background concentration</i>). Coeficiente de decaimiento del contaminante (<i>Pollutant decay rate</i>). Coeficiente de difusión en campo lejano (<i>Far-field difusión coeficient</i>)</td> </tr> <tr> <td>Condiciones hidrodinámicas</td> <td>Velocidad de la corriente en el medio receptor (<i>Current speed</i>). Angulo de la corriente receptor respecto al eje x (<i>Current direction</i>)</td> </tr> </table>	Condiciones geométricas	Profundidad media de la columna de agua en la zona de vertido (calado) (<i>measurement depth or height</i>).	Parámetros físicos	Salinidad del medio receptor (<i>ambient salinity</i>). Temperatura del medio receptor (<i>Ambient Temp</i>). Concentración de fondo, en el M. Receptor (<i>Background concentration</i>). Coeficiente de decaimiento del contaminante (<i>Pollutant decay rate</i>). Coeficiente de difusión en campo lejano (<i>Far-field difusión coeficient</i>)	Condiciones hidrodinámicas	Velocidad de la corriente en el medio receptor (<i>Current speed</i>). Angulo de la corriente receptor respecto al eje x (<i>Current direction</i>)
	Condiciones geométricas	Profundidad media de la columna de agua en la zona de vertido (calado) (<i>measurement depth or height</i>).					
	Parámetros físicos	Salinidad del medio receptor (<i>ambient salinity</i>). Temperatura del medio receptor (<i>Ambient Temp</i>). Concentración de fondo, en el M. Receptor (<i>Background concentration</i>). Coeficiente de decaimiento del contaminante (<i>Pollutant decay rate</i>). Coeficiente de difusión en campo lejano (<i>Far-field difusión coeficient</i>)					
Condiciones hidrodinámicas	Velocidad de la corriente en el medio receptor (<i>Current speed</i>). Angulo de la corriente receptor respecto al eje x (<i>Current direction</i>)						
Parámetros del ciclo de marea (<i>UM3 tidal pollutant buildup parameters</i>)							
Opciones de gráficos (<i>Graphic settings</i>)							
Otros parámetros de modelización (SPECIAL SETTINGS)	<table border="1"> <tr> <td>Datos adicionales (<i>Additional model input</i>)</td> <td>Coeficiente de contracción de boquilla (<i>diffuser port contraction coef</i>), coef. Absorción de luz (<i>Light absorption coeffic</i>); incremento en campo lejano (<i>Far fiel increment</i>), Coeficiente de aspiración UM3 (<i>UM3 aspiration coef</i>), modelo de influencia solar en bacterias (<i>Bacteria model...</i>), modelo transferencia calor (<i>PDS heat transfer</i>).</td> </tr> <tr> <td>Opciones de resultados analíticos (<i>Output settings</i>)</td> <td>Lista de variables a representar (<i>Selected variables</i>) Número de pasos hasta representación (<i>UM3 output each steps</i>) Máxima dilución representada (<i>Maximum dilution reported</i>) UM3 max. Vertical reversals</td> </tr> </table>	Datos adicionales (<i>Additional model input</i>)	Coeficiente de contracción de boquilla (<i>diffuser port contraction coef</i>), coef. Absorción de luz (<i>Light absorption coeffic</i>); incremento en campo lejano (<i>Far fiel increment</i>), Coeficiente de aspiración UM3 (<i>UM3 aspiration coef</i>), modelo de influencia solar en bacterias (<i>Bacteria model...</i>), modelo transferencia calor (<i>PDS heat transfer</i>).	Opciones de resultados analíticos (<i>Output settings</i>)	Lista de variables a representar (<i>Selected variables</i>) Número de pasos hasta representación (<i>UM3 output each steps</i>) Máxima dilución representada (<i>Maximum dilution reported</i>) UM3 max. Vertical reversals		
	Datos adicionales (<i>Additional model input</i>)	Coeficiente de contracción de boquilla (<i>diffuser port contraction coef</i>), coef. Absorción de luz (<i>Light absorption coeffic</i>); incremento en campo lejano (<i>Far fiel increment</i>), Coeficiente de aspiración UM3 (<i>UM3 aspiration coef</i>), modelo de influencia solar en bacterias (<i>Bacteria model...</i>), modelo transferencia calor (<i>PDS heat transfer</i>).					
Opciones de resultados analíticos (<i>Output settings</i>)	Lista de variables a representar (<i>Selected variables</i>) Número de pasos hasta representación (<i>UM3 output each steps</i>) Máxima dilución representada (<i>Maximum dilution reported</i>) UM3 max. Vertical reversals						

Figura 4.20: Datos de entrada al Modelo UM3 de Visual Plumes.
Fuente: Extraído de MITECO, 2010.

En cuanto a las concentraciones máximas de salinidad que se permiten de vertido, según la Guía para la predicción y evaluación de impactos en el ecosistema marino del SEA (2024), se deriva a normas extranjeras como la australiana debido a que en Chile no existe normativa para este elemento. La normativa australiana establece como estándar ambiental aceptable un incremento no mayor al 5% de la salinidad base en el medio marino receptor (ANZECC, 1992). En la Guía del SEA hacen el alcance a dos normas internacionales de aumento de la salinidad, la normativa australiana mencionada y una norma española, el Real Decreto 927/1998 que establece un incremento no mayor a un 10% de la salinidad base del medio marino receptor, siendo entonces, la normativa australiana, la más conservadora.

4.4.4 Legislación sobre Desalinizadoras

Actualmente en Chile no existe una normativa que regule aspectos de la instalación o implementación de una Planta Desalinizadora ni tampoco del uso de agua desalada. Sin embargo, existe un Proyecto de Ley “Sobre el Uso de Agua de Mar para Desalinización” que se encuentra en su primer trámite constitucional en el Senado y que fue ingresado el 2018 (Senado de Chile, 2024).

Este proyecto contempla:

- Establecer que las aguas resultantes del proceso de desalinización constituyen un bien nacional de uso público.
- Crear la Estrategia Nacional de Desalación con la finalidad de lineamientos y prioridades en el uso de agua de mar y la instalación de plantas desalinizadoras.
- Modificar el procedimiento de solicitud y caducidad de las concesiones marítimas y establecer la prevalencia del uso de las aguas para el consumo humano, doméstico, y el saneamiento.
- Disponer que los proyectos sobre instalación de plantas desalinizadoras deberán someterse siempre al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Sin perjuicio de lo anteriormente señalado, existe una normativa aprobada actualmente, del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que hace alusión a la desalinización, pero con el fin de integrar a los proyectos desalinización dentro de las obras de infraestructura hídrica con las cuales el ministerio debe velar por la disponibilidad de agua para los diversos fines. Esta norma descrita es la Ley 21639 promulgada el 2023.

5 METODOLOGÍA

5.1 Sectorización de las Proyecciones (2030-2050) del Modelo Hidrológico DGA 2020

De las proyecciones futuras que ya estima el modelo, los aspectos físicos y socioambientales que se analizaron para comparar un escenario de cambio climático con la desalinización son los siguientes:

- Demandas sectorizadas por SHACs
- Demanda No Cubierta
- Almacenamiento de los Acuíferos
- Caudal de Reserva Protección Ambiental para el Humedal Ramsar

Cada uno de estos elementos se analizó para un periodo mensual desde abril del año 2030 hasta marzo del 2050. Las Demandas Sectorizadas por SHACs son datos de entradas al modelo que se obtuvieron interpolando cada uno de los puntos de demandas según su SHAC correspondiente. En cuanto a la Demanda No Cubierta, Almacenamiento de los Acuíferos y Caudal de Reserva de Protección Ambiental para el Humedal Ramsar, estos son resultados que el modelo entrega de manera general para toda la cuenca. Además, para los aspectos de Demanda No Cubierta y Almacenamiento de los Acuíferos, se analizó también su curva de variación estacional para el mismo periodo de análisis (2030-2050). Para el caso del Caudal de Reserva de Protección Ambiental y el caudal disponible simulado por el modelo en esta misma zona, se analizó únicamente según la curva de variación estacional dado que el caudal de protección está planificado según los meses del año.

5.2 Determinación de la Producción de Agua Desalinizada

En consideración que la mayoría de las plantas desalinizadoras (sobre 20 L/s) actualmente operativas en Chile, no superan los 1000 L/s, esta capacidad fue el límite de evaluación en el modelo hidrológico, entregando agua directamente a nodos de demanda, desde los nodos de costa hasta cordillera de manera secuencial mediante la función “Other Supply” de WEAP (Figura 5.1) y/o hasta que haya un impacto positivo en los aspectos físicos y socioambientales de Demanda no cubierta, Almacenamiento de los Acuíferos, y un aumento en el caudal disponible para el Humedal Ramsar comparando a su vez con el Caudal RPA. Se dio un especial énfasis a la demanda de consumo humano, en tanto esta es una prioridad a nivel constitucional como también internacional plasmado en la Declaración Universal de los Derechos Humanos. Es por ello que, del porcentaje total para cada nodo de demanda a cubrir, se definió que será de un 40% para las demandas de agua potable y un 20 % para las

demandas de riego, ya sea desde extracción de los acuíferos o de la correspondiente a los canales.

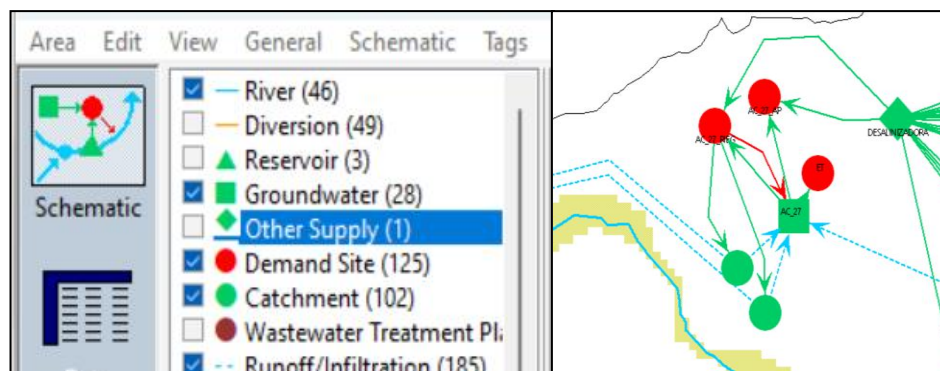


Figura 5.1: Elemento “Other Supply” en el interfaz de WEAP.

Fuente: Obtenido del software WEAP.

5.3 Determinación de Zonas para la Planta Desalinizadora

Se analizaron las zonas costeras que abarca la comuna de Canela, siendo esta la única comuna de la cuenca del Choapa con administración territorial en la costa. El análisis consistió en investigar las zonas costeras en el territorio descrito anteriormente, que no abarquen las siguientes figuras territoriales:

- Áreas Marinas Protegidas (AMP)
- Áreas de manejo de Recursos Bentónicos (AMERB)
- Plan Regulador Intercomunal – Provincia del Choapa

La información resultante de este análisis se presenta mediante la creación de mapas utilizando el software QGIS. De esta información, se seleccionarán la ubicación más cercana a las formaciones geomorfológicas de menor elevación de la cuenca, para realizar la simulación de dispersión de la salmuera.

5.4 Modelo de Dispersión de Salmuera

La simulación de la dispersión de la salmuera se realizó mediante el programa Visual Plumes con el módulo UM3 para la simulación de campo cercano. Se obtuvo la concentración inicial de vertido a partir de la capacidad de producción de agua desalinizada, considerando un factor de eficiencia de la planta de un 45%. Se consideró una profundidad de vertido de 15 m bajo el nivel del mar y además se simuló distintos escenarios según variaciones en la velocidad de corriente para valores de 0,002 m/s (mínima), 0,12 m/s (mediana) y 0,47 m/s (corriente máxima), estos son valores de corrientes registrados en una zona marina para la bahía de los vilos, ubicación cercana al área de estudio, según la base de datos del Estudio de Impacto Ambiental del “Proyecto de Adaptación Operacional” de Minera Los Pelambres (SEA, 2021).

Los datos de entrada al modelo de las condiciones ambientales en el medio receptor según la base de datos ya mencionada se presentan en la Tabla 5.1, y en la Tabla 5.2 se presentan las configuraciones del difusor utilizadas para la simulación.

Tabla 5.1: Condiciones Ambientales en el Medio Receptor.

Parámetro	Valor
Velocidad de corriente (m/s)	0,002 – 0,12 - 0,47
Angulo Horizontal entre Chorro y Corriente	0
Salinidad (psu)	34,5
Temperatura (°C)	14

Tabla 5.2: Parámetros de descarga de la salmuera.

Parámetro	Valor
Profundidad de vertido	15 metros
Diámetro de boquilla	0,2 metros
Altura de boquilla con respecto al fondo	1,5 metros
Ángulo de inclinación de descarga	45°
Caudal de vertido	1,364 m ³ /s
Concentración salina del vertido	62.7 psu
Temperatura del vertido	14°C
Numero de boquillas	10
Separación entre boquillas	5 metros

La simulación del vertido de salmuera se realizó considerando el comportamiento de la primera boquilla de difusión, que se encuentra ubicada más cercana a la costa, por cuanto esta es la boquilla más somera y que podría eventualmente llegar hasta la superficie el chorro de dispersión.

Es importante señalar que este modelo no posee la capacidad de realizar un análisis dinámico del comportamiento de la dispersión de la salmuera, proporciona solamente el comportamiento para condiciones estáticas del medio, para una dirección de corriente dada. Es por ello que los resultados se presentaron en función de distintas direcciones de corrientes, específicamente una dirección de corriente que alternó en 0°, 90° y 270° respecto a la orientación del vertido y posteriormente se presentó un gráfico resumen estos.

En cuanto al caudal de la salmuera, este se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{salmuera} = \frac{Q_{producción}}{1 - E}$$

Donde:

- $Q_{salmuera}$: Caudal de vertido de la salmuera
- $Q_{producción}$: Caudal de producción de agua desalinizada
- E : Eficiencia de la planta desalinizadora.

Respecto a la concentración salina se calculó según la misma fórmula anterior reemplazando $Q_{salmuera}$ por $C_{salmuera}$ (concentración de salinidad de la salmuera) y $Q_{producción}$ por C_{mar} (salinidad del agua de mar en la zona).

Los resultados de la simulación se compararon con los valores normativos de la referencia australiana (ANZECC, 1992) la cual indica que la salinidad no debe ser mayor al 5% respecto al medio receptor en la dilución del campo cercano, decir no debe ser mayor a 36,6225 psu.

6 RESULTADOS

6.1 Sectorización Proyecciones del Modelo Hidrológico DGA 2020

6.1.1 Demandas de Agua

A continuación, se presentan los resultados gráficos de la segregación de la demanda de la cuenca del Choapa según los SHACs. Las demandas tanto para Agua Potable, Riego y Minería se simulan principalmente en el modelo mediante extracción de acuíferos. Las únicas demandas de agua superficial representadas en el modelo hidrológico corresponden a las del riego por canales las cuales también se presentan de manera sectorizadas por SHAC.

6.1.1.1 SHACs Canela y Choapa Bajo

Se presentan los resultados de estos SHACs juntos, dado que comparten acuíferos importantes, y por qué la modelación del SHAC de Canela se limitó a acoplarse al del Choapa Bajo. Estos SHACs tienen un total de 3 acuíferos modelados. En la Figura 6.1 se presenta la demanda total (sumatoria de las demanda de los acuíferos) para Agua Potable, Riego y Evapotranspiración de los SHACs Canela y Choapa Bajo.

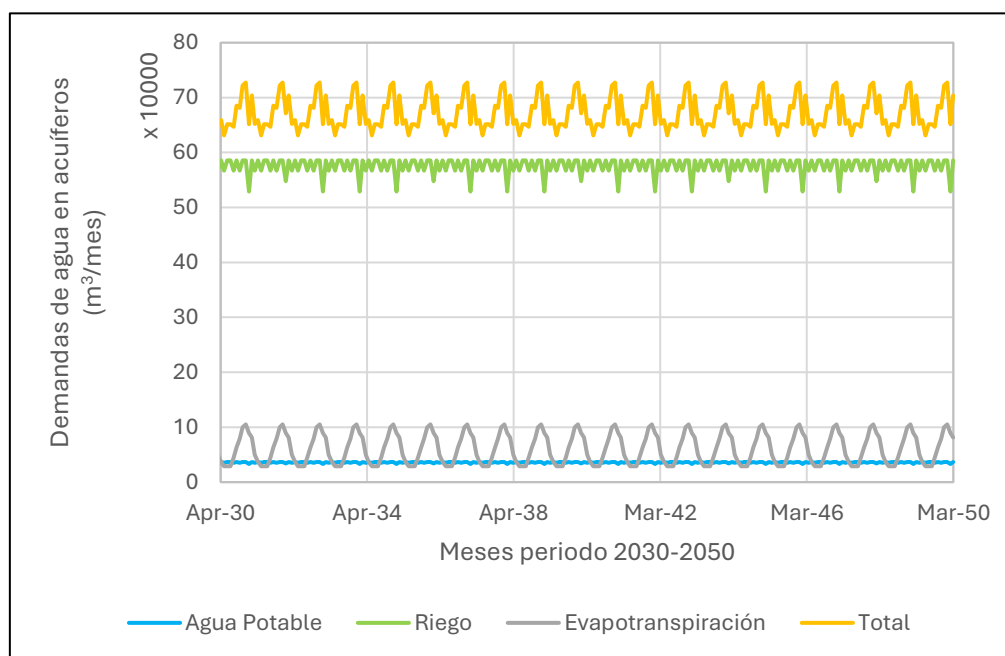


Figura 6.1: Demanda Total de los acuíferos asociados a los SHACs Canela y Choapa Bajo.

En la Figura 6.2 se presenta la demanda total del riego mediante canales de estos SHACs juntos.

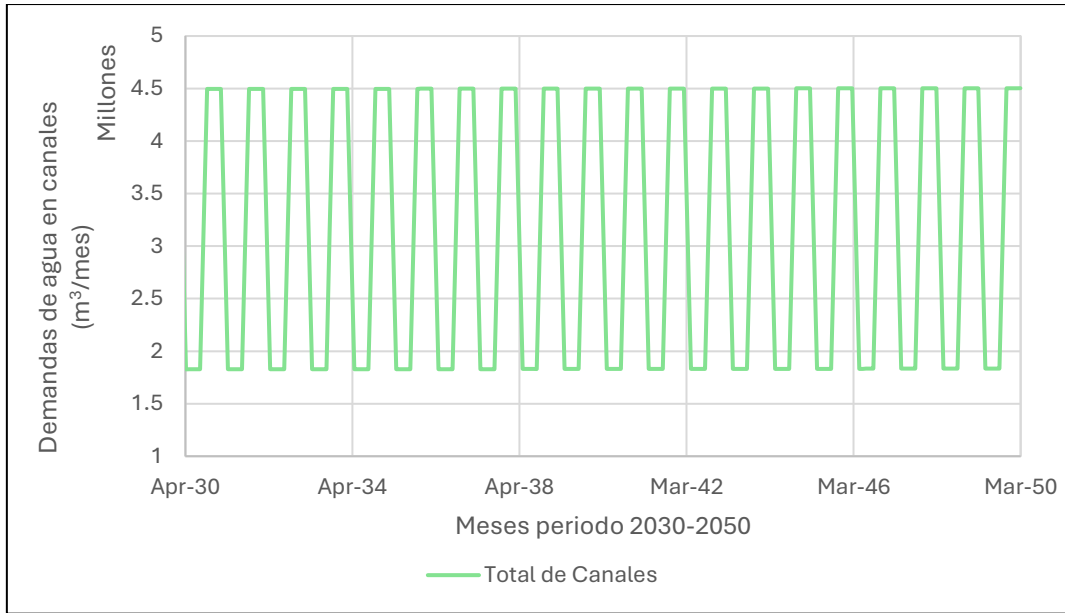


Figura 6.2: Demanda Total asociadas al riego por canales de los SHACs Canela y Choapa Bajo.

6.1.1.2 SHAC Illapel

Este SHAC tiene asociado 6 acuíferos en el Modelo Hidrológico del Choapa de los cuales se les extrae agua para las demandas de Agua Potable, Riego y Minería. En la Figura 6.3 se presenta la sumatoria de estas demandas y en la Figura 6.4 la demanda de los canales.

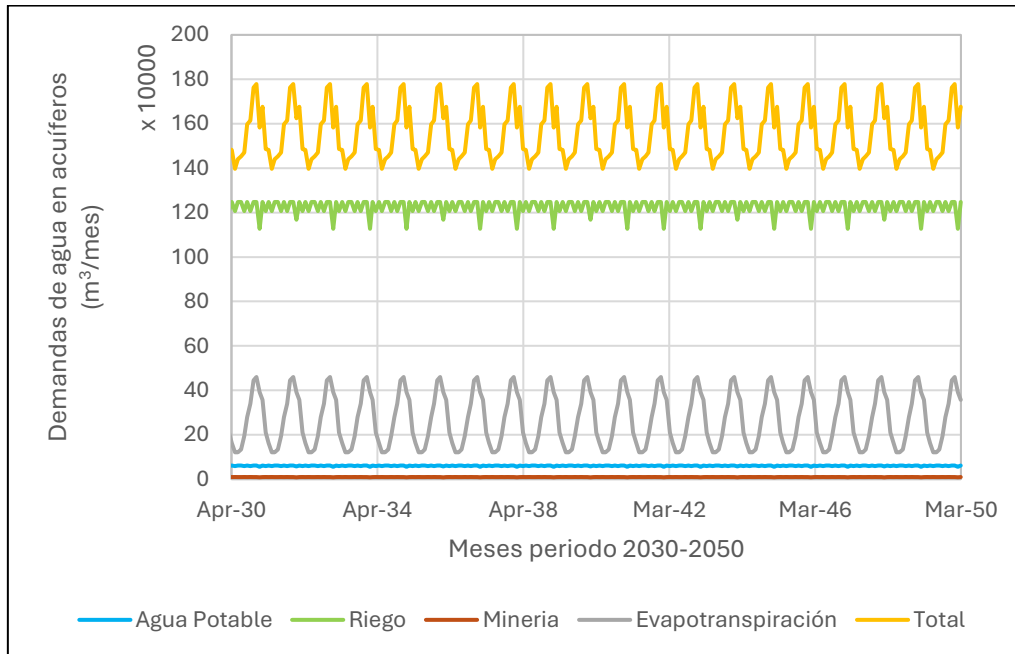


Figura 6.3: Demanda Total asociada a los acuíferos del SHAC Illapel.

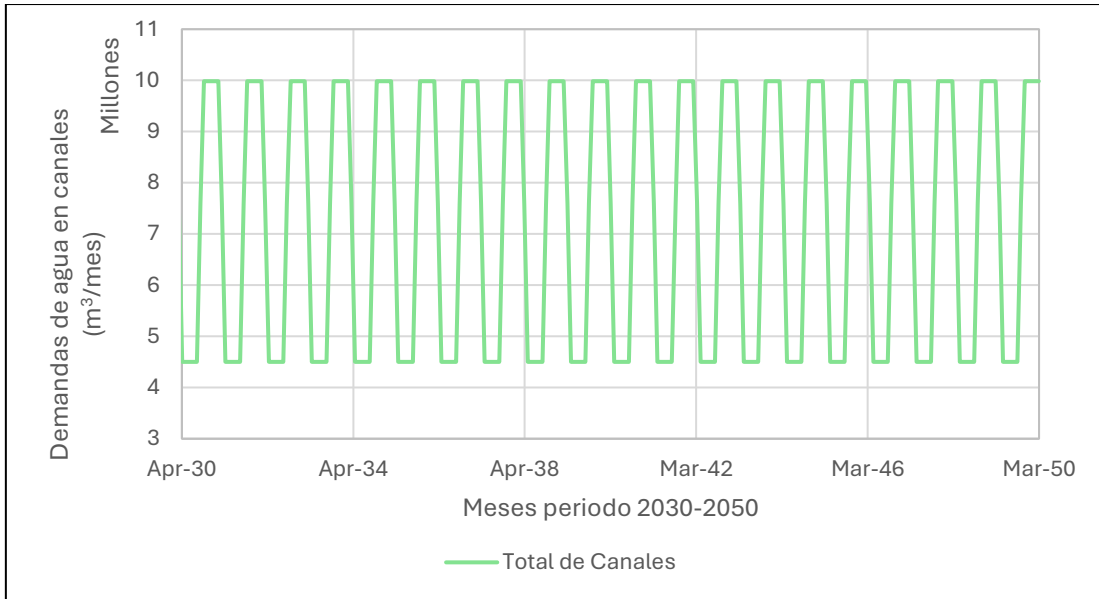


Figura 6.4: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Illapel.

6.1.1.3 SHAC Choapa Medio

Este SHAC tiene asociado 4 acuíferos en el modelo hidrológico. En la Figura 6.5 se presenta la demanda total para todos los acuíferos y en la Figura 6.6 la demanda de los canales.

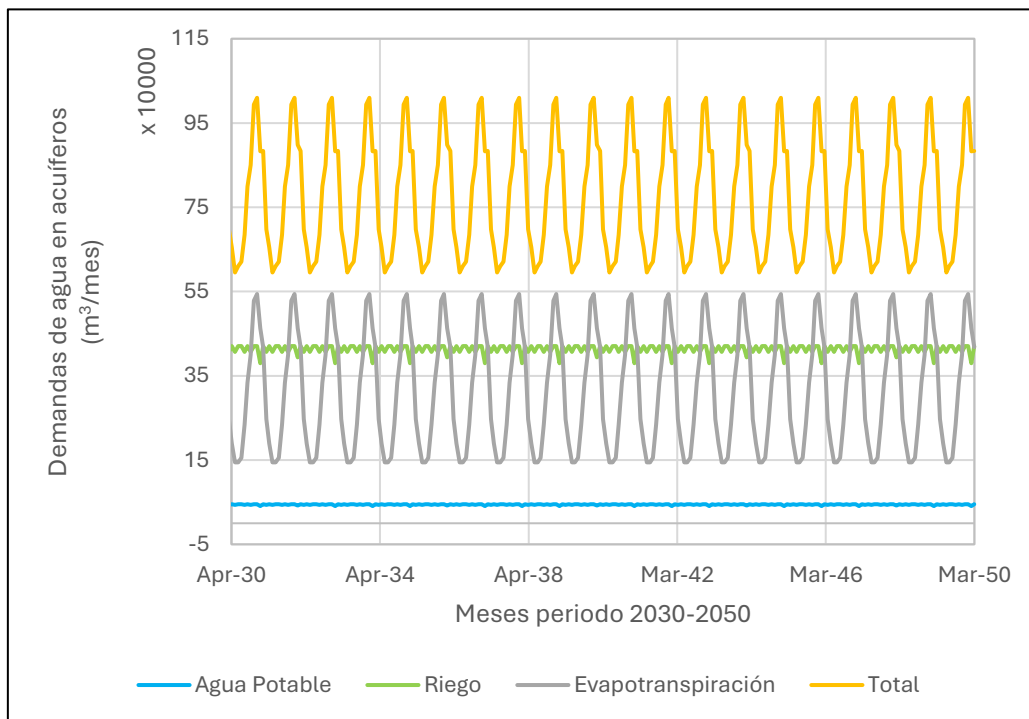


Figura 6.5: Demanda Total asociadas a los acuíferos del SHAC Choapa Medio.

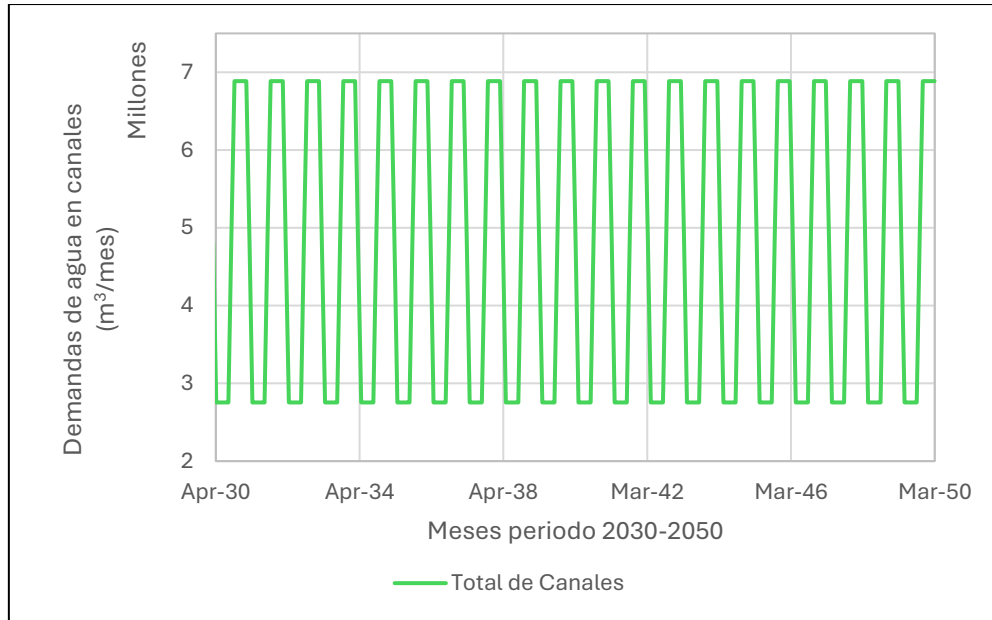


Figura 6.6: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Choapa Medio.

6.1.1.4 SHAC Chalinga

Este SHAC tiene asociado 3 acuíferos en el modelo hidrológico. En la Figura 6.7 se presenta la demanda total para todos los acuíferos del SHAC Chalinga y en la Figura 6.8 la del riego por canales.

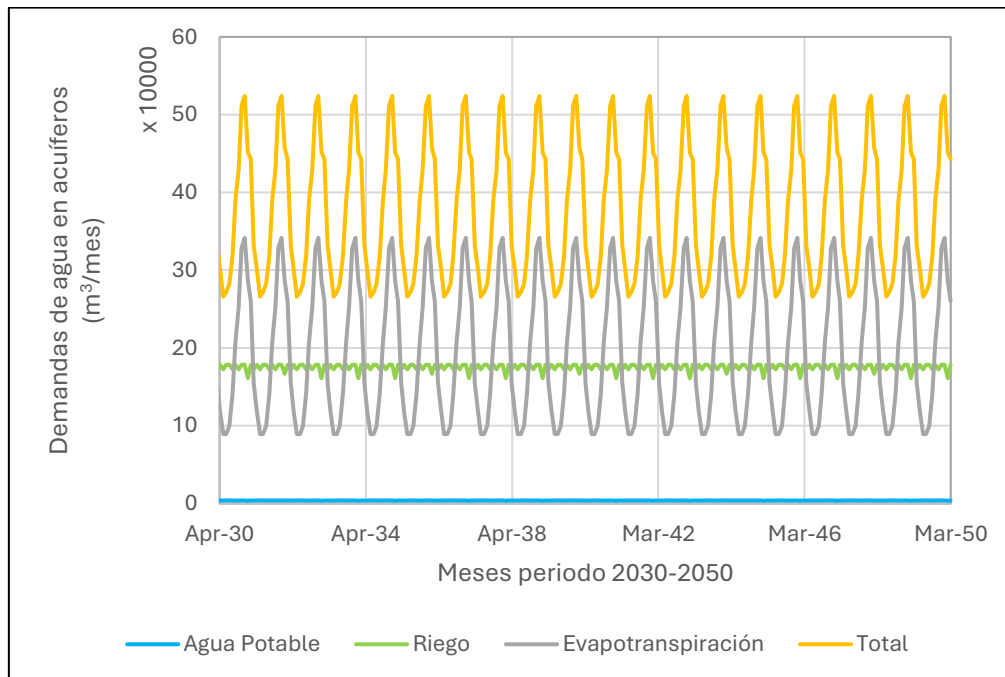


Figura 6.7: Demanda Total asociada a los acuíferos del SHAC Chalinga.

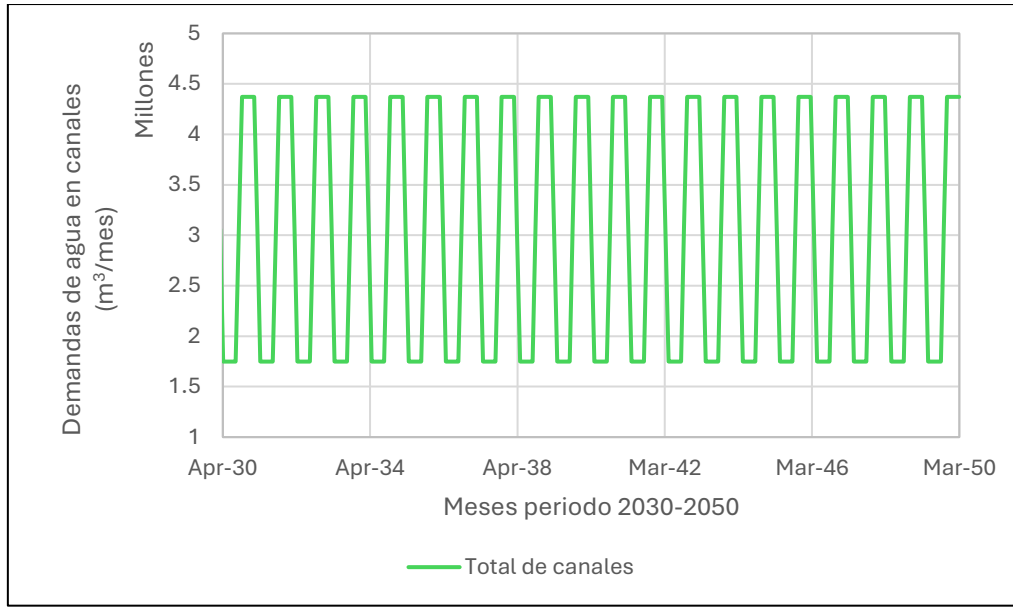


Figura 6.8: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Chalinga.

6.1.1.5 SHAC Choapa Alto

El SHAC del Choapa Alto es el que tiene la mayor cantidad de acuíferos asociados en el modelo hidrológico, en total se simulan 12 acuíferos. En la Figura 6.9 se presenta la demanda total para todos los acuíferos del SHAC Choapa Alto y en la 6.10 la demanda de los canales.

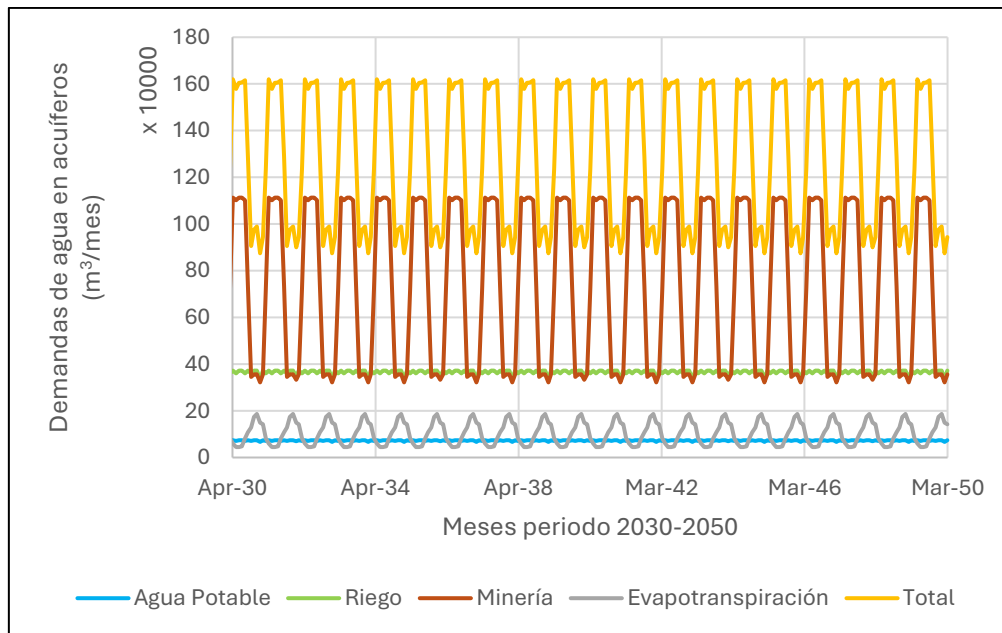


Figura 6.9: Demanda Total asociada al SHAC Choapa Alto del Modelo del Hidrológico.

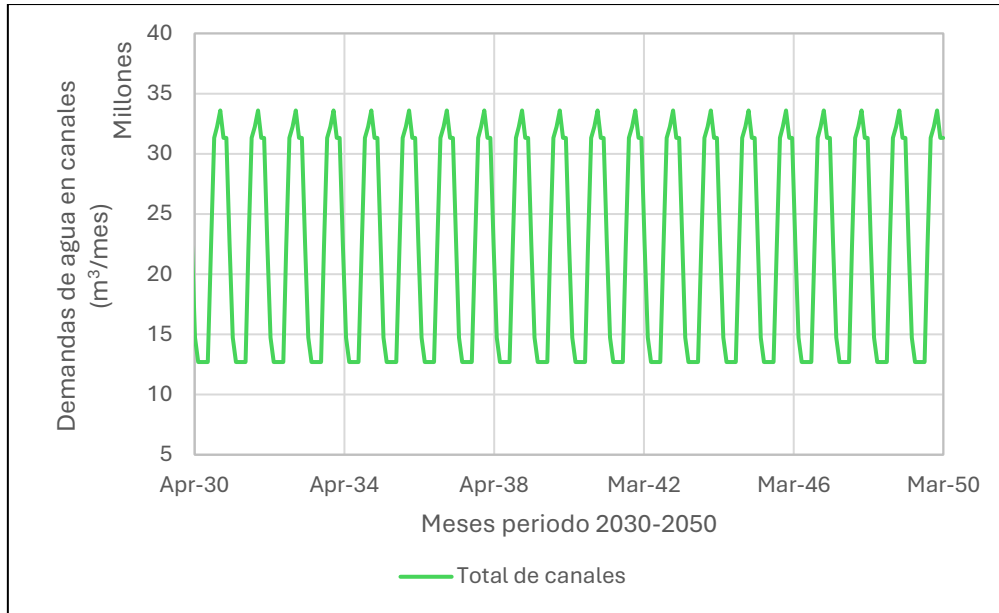


Figura 6.10: Demanda Total asociadas al riego por canales del SHAC Choapa Alto.

6.1.2 Demanda No Cubierta

En las figuras 6.11 y 6.12 se presentan los gráficos de la demanda no cubierta total de la cuenca de manera mensual y de la curva de variación estacional, respectivamente, ambos para para el periodo 2030-2050.

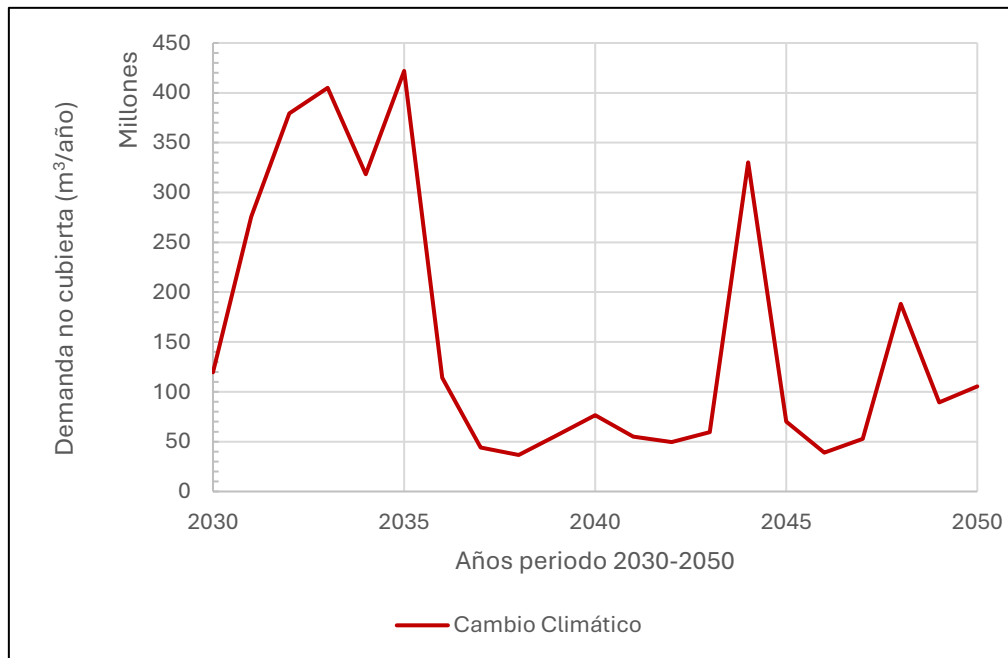


Figura 6.11: Demanda no cubierta mensual de la cuenca estimada por el modelo hidrológico.

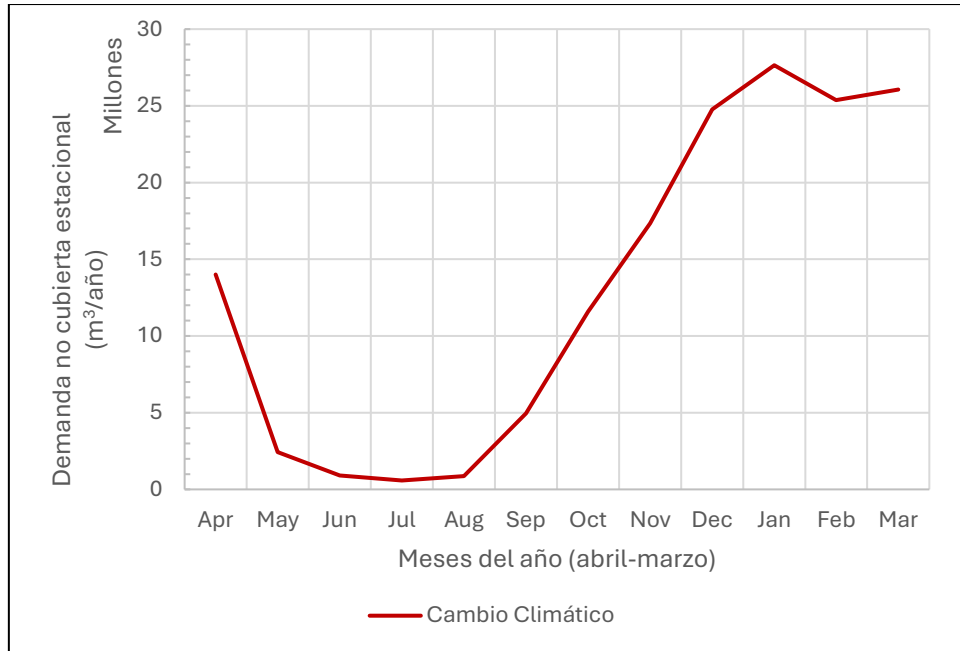


Figura 6.12: Demanda no cubierta en curva de variación estacional estimada por el modelo hidrológico.

6.1.3 Almacenamiento de los Acuíferos

En las figuras 6.13 y 6.14 se presentan las proyecciones del modelo hidrológico sobre el almacenamiento total de los acuíferos de la cuenca de manera mensual y de la curva de variación estacional, respectivamente, ambos para el periodo 2030-2050.

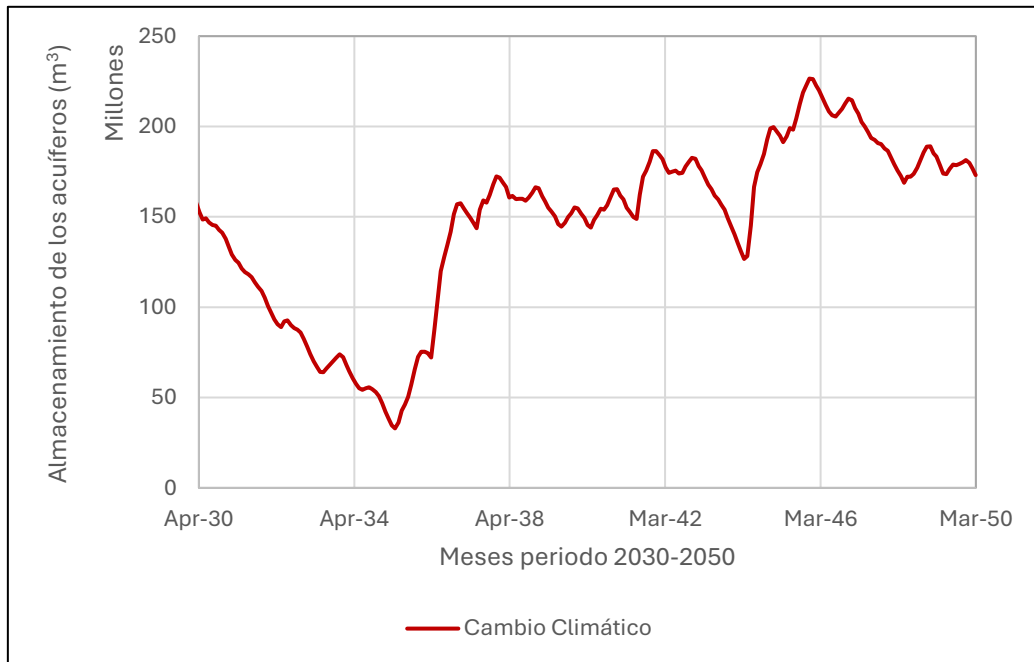


Figura 6.13: Almacenamiento de los acuíferos mensual.

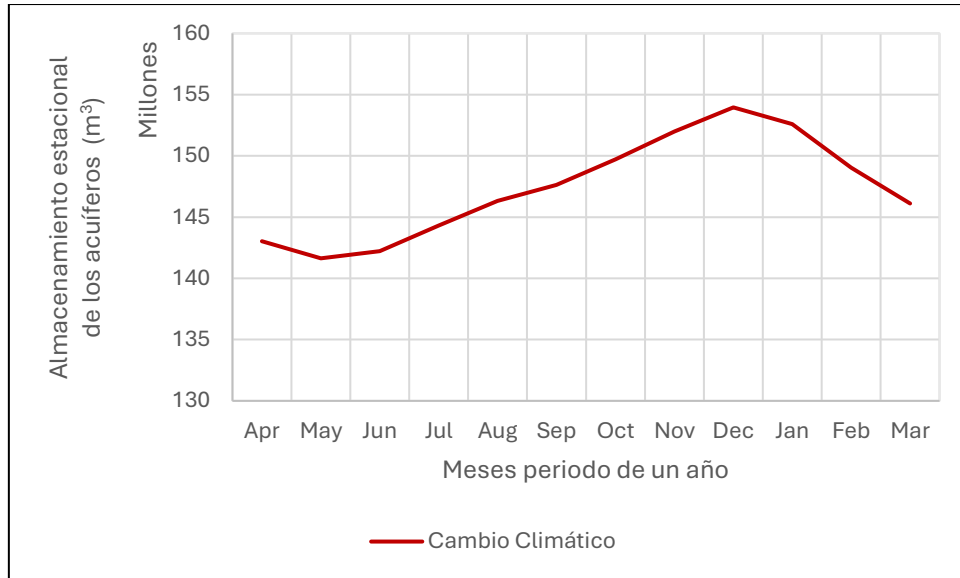


Figura 6.14: Almacenamiento de los acuíferos en curva de variación estacional.

6.1.4 Caudal de Protección Ambiental Ramsar

En la Figura 6.15 se presenta la comparación del caudal simulado por el modelo hidrológico aguas arriba del humedal Ramsar, con el Caudal de Reserva de Protección Ambiental (RPA) estimado en el PEGH para el humedal.

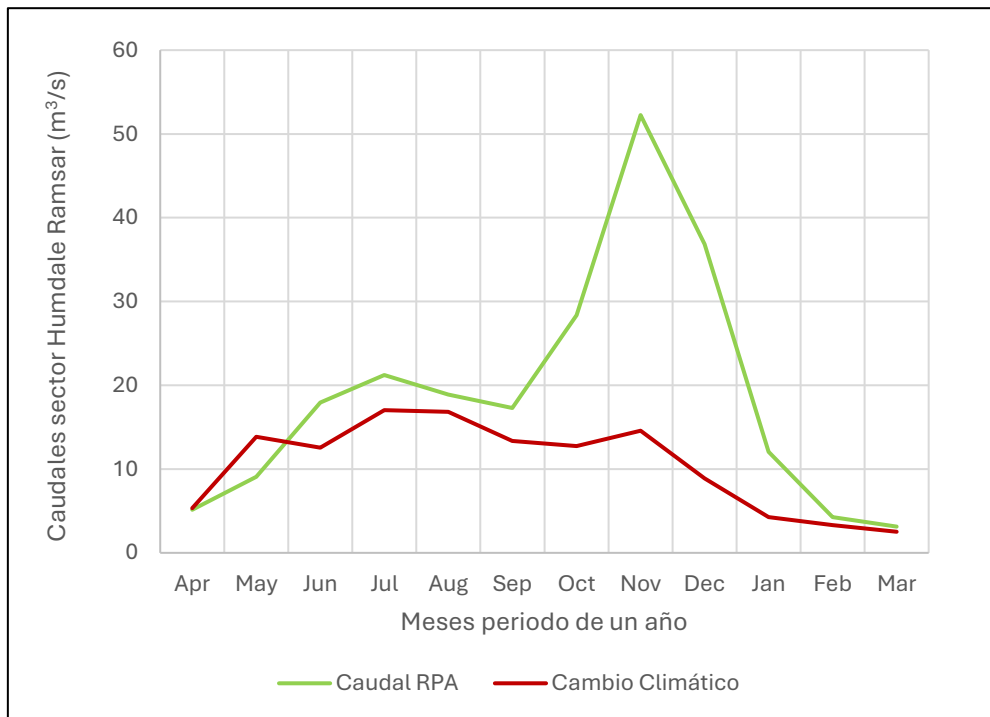


Figura 6.15: Comparación caudales simulados por el modelo con el caudal RPA para el humedal Ramsar.

6.2 Producción de Agua Desalinizada

El caudal aproximado de agua desalinizada del cual se empezó a evidenciar un impacto positivo en dichos aspectos mencionados en el capítulo 5.1 de la cuenca es de 750 L/s. Las demandas de agua que se fueron cubriendo con la desalinización corresponden a las de consumo humano (agua potable) y las de riego, específicamente para los SHACs de Canela y Choapa Bajo, y también el SHAC de Illapel (Figura 6.16). De estas demandas se fue cubriendo con la desalinización una proporción de 40% para el agua potable y 20% para el riego respecto a la demanda total de estos SHACs.

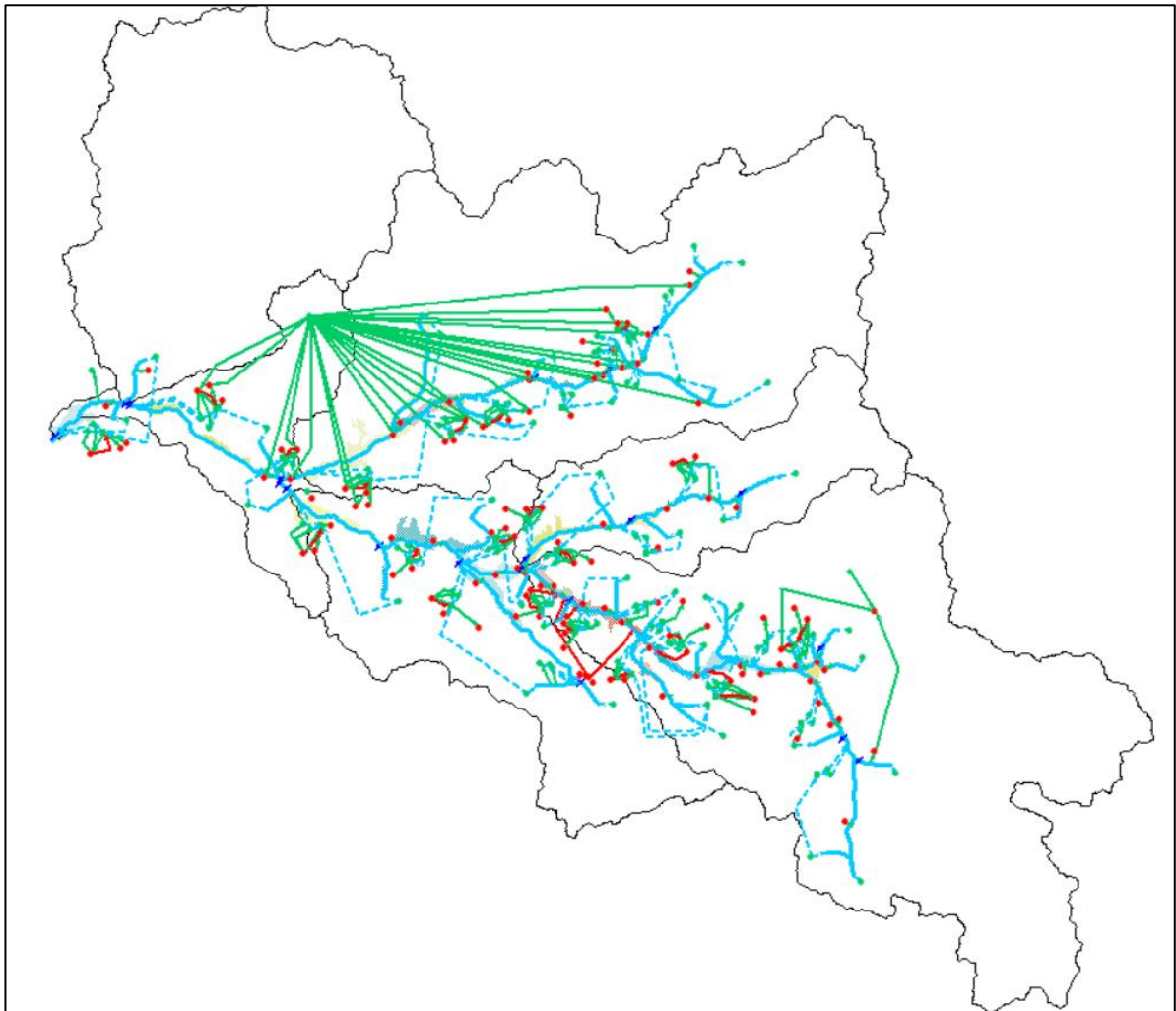


Figura 6.16: Modelo esquemático de WEAP con la simulación del aporte de la desalinización.

En la Tabla 6.1 se presenta las demandas que se cubrieron con la desalinización de los SHACs Canela, Choapa Bajo y Illapel.

Tabla 6.1: Demandas con aporte de agua desalinizada.

SHACs	Demanda	Caudal (m^3/mes)	% Desalinización	Caudal Desalinización (m^3/s)
Canela y Choapa Bajo	AC 27 AP	10.360	40 %	0,001599
	AC 27 RIEG	24.453	20 %	0,001887
	AC 26 RIEG	187.945	20 %	0,014502
	RQ 45	811.945	20 %	0,06265
	RQ 44	13.871	20 %	0,00107
Illapel	AC 25 AP	31.526	40 %	0,004865
	AC 25 RIEG	886.664	20 %	0,068415
	AC 24 AP	23.222	40 %	0,003584
	AC 24 RIEG	248.630	20 %	0,019184
	AC 23 AP	2.629	40 %	0,000406
	AC 23 RIEG	84.323	20 %	0,006506
	AC 19 AP	2.892	40 %	0,000446
	AC 19 RIEG	5.259	20 %	0,000406
	RQ 43	791.688	20 %	0,061087
	RQ 42	752.816	20 %	0,058088
	RQ 41	1.507.926	40 %	0,116352
	RQ 40	1.739.285	20 %	0,134204
	RQ 39	692.652	20 %	0,053445
	RQ 38	486.721	20 %	0,037556
	RQ 37	209.423	20 %	0,016159
	RQ 36	121.440	20 %	0,00937
	RQ 35	409.950	20 %	0,031632
	RQ 34	72.187	20 %	0,00557
RQ 33	370.906	20 %	0,028619	
RQ 32	178.387	20 %	0,013764	
TOTAL		9.667.100	-	0,75

6.2.1 Demanda No Cubierta

En las figuras 6.17 y 6.18 se presentan las proyecciones que realiza el modelo respecto a la demanda que no podrá ser cubierta de manera natural por la cuenca con las proyecciones de cambio climático comparado con el escenario con el aporte de la desalinización. En la Figura 6.17 se presenta el total anual de la demanda no cubierta, y en la Figura 6.18 la curva de variación estacional de esta misma demanda no cubierta.

Se observa una disminución de la demanda no cubierta principalmente para los primeros cinco años del periodo 2030-2050, y en la curva de variación estacional una disminución principalmente para los meses de verano, los más críticos del año.

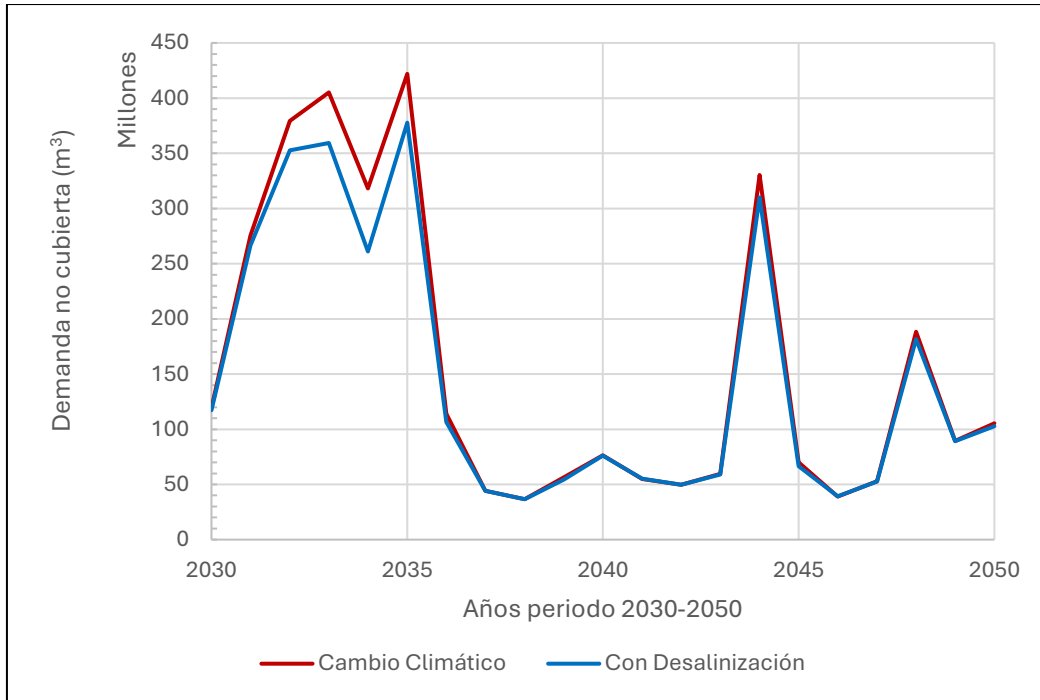


Figura 6.17: Demanda no cubierta comparada con escenario de gestión con la desalinización.

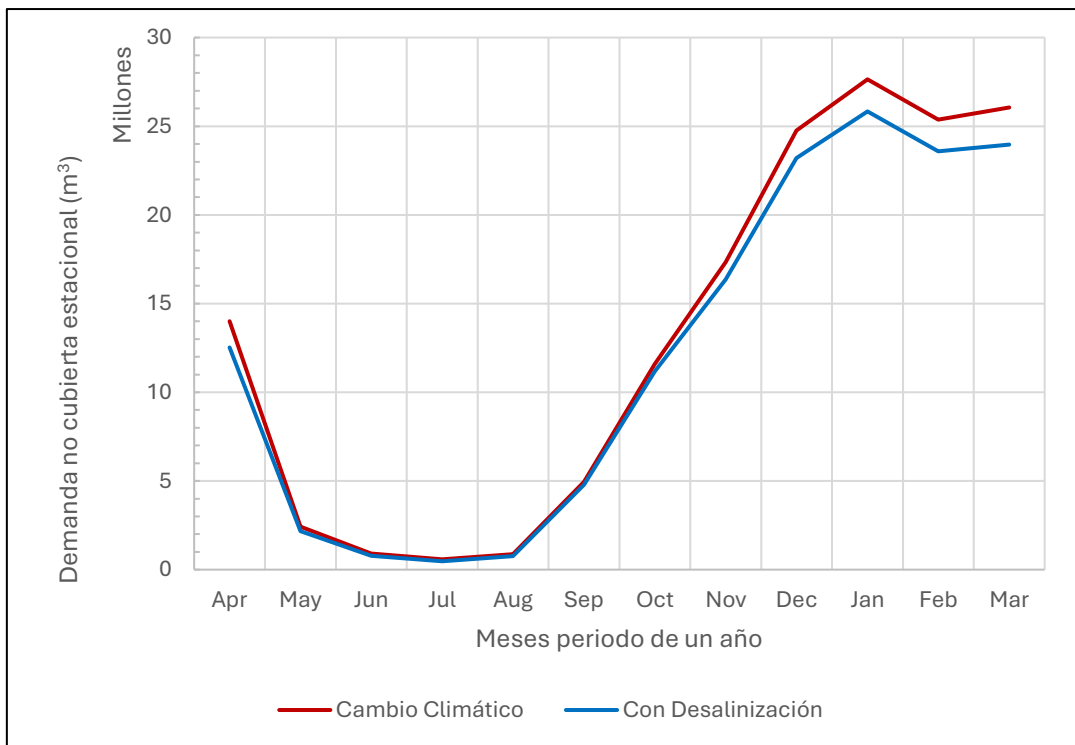


Figura 6.18: Curva de variación estacional de la demanda no cubierta comparada con escenario de gestión con la desalinización.

6.2.2 Almacenamiento de los Acuíferos

En las figuras 6.19 y 6.20 se presenta el almacenamiento general de los acuíferos (sumatoria de todos los acuíferos de la cuenca) en metros cúbicos para el periodo mensual del 2030 al 2050 y además su curva de variación estacional, respectivamente, para el mismo periodo.

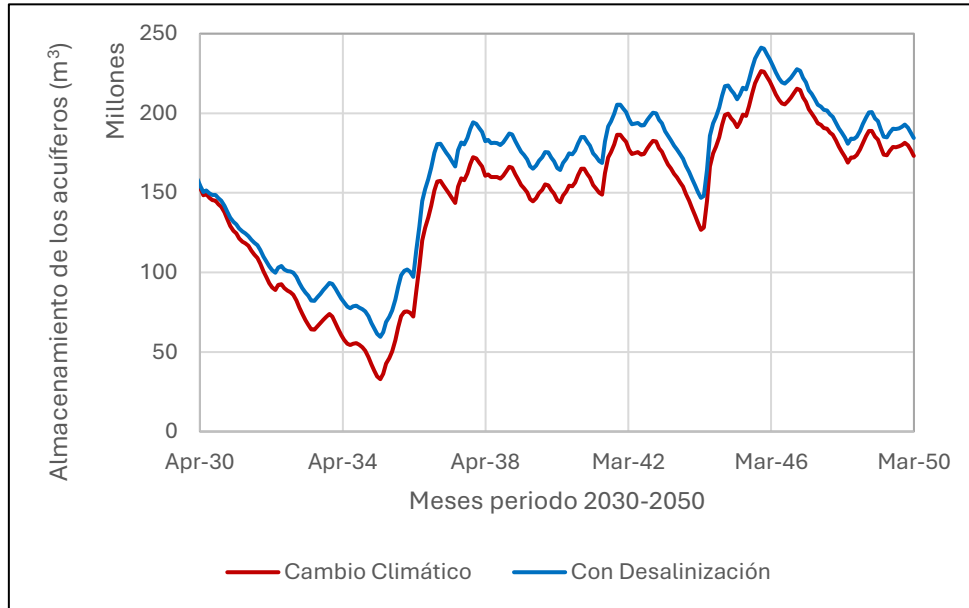


Figura 6.19: Almacenamiento total de los acuíferos comparado con el escenario de gestión con la desalinización.

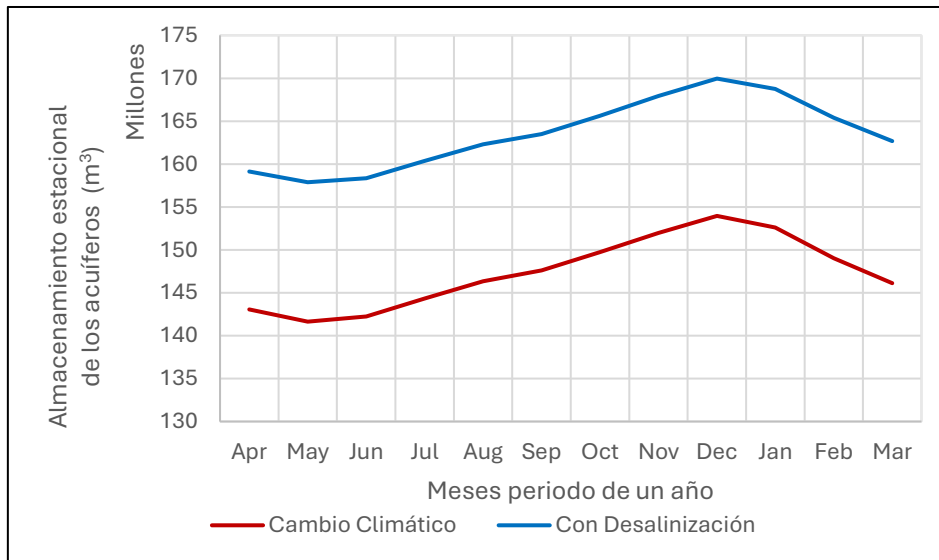


Figura 6.20: Almacenamiento total de los acuíferos en curva de variación estacional comparado con el escenario de gestión con la desalinización.

Aproximadamente el aumento en el almacenamiento de los acuíferos es de 15 millones de m³ de agua disponible.

6.2.3 Caudal de Reserva de Protección Ambiental Ramsar

En la Figura 6.21 se presenta la comparación del caudal simulado por el modelo hidrológico aguas arriba del humedal Ramsar, con la simulación del escenario con la desalinización respecto al caudal RPA estimado en el PEGH para el humedal. Además, en la Figura 6.22 se presenta únicamente la comparación entre el caudal simulado con las proyecciones de cambio climático con el escenario de la desalinización para una mejor apreciación del aumento en el caudal, el cual es de aproximadamente $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, un 6% más respecto al escenario base de cambio climático.

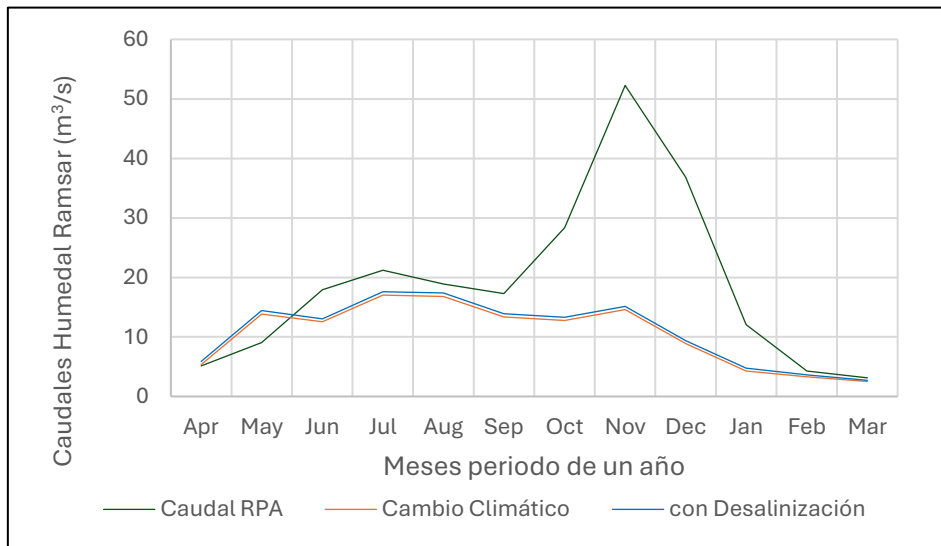


Figura 6.21: Comparación caudales simulados por el modelo con la desalinización y respecto al caudal RPA para el humedal Ramsar.

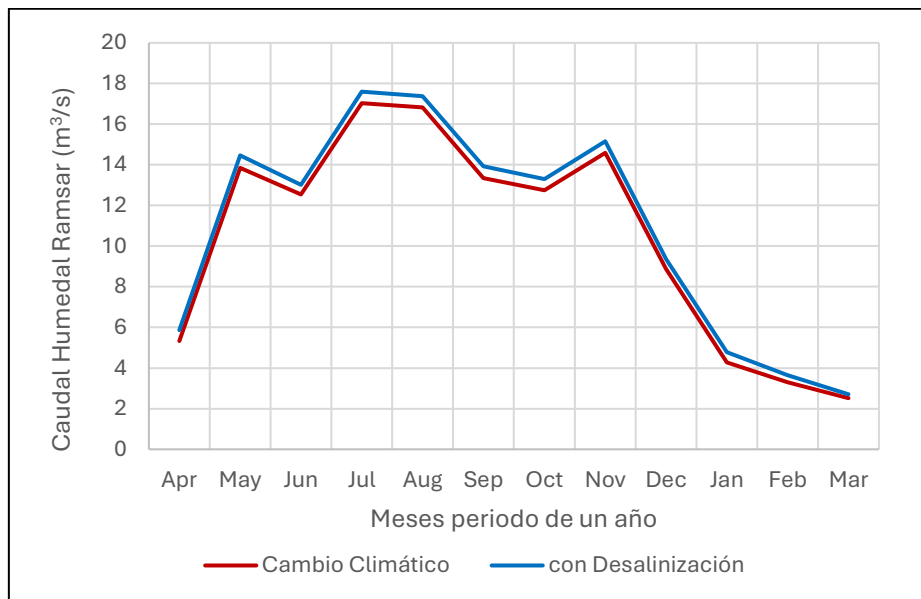


Figura 6.22: Comparación caudales simulados por el modelo para el humedal Ramsar.

6.3 Ubicación para una Planta Desalinizadora

En las figuras 6.23 y 6.24 se presentan los mapas con los resultados del análisis geográfico de las áreas marinas protegidas (AMP) y áreas de manejo de recursos bentónicos (AMERB) respectivamente, que se encuentran dentro o cercanas de la administración de la comuna de Canela. Comuna de la cuenca del Choapa con administración en la costa.

La única área marina protegida que se encuentra cercana a la zona costera es la correspondiente a el Área Marina Protegida – Archipiélago de Humboldt, ubicada al norte de la región de Coquimbo y al sur de la región de Atacama.

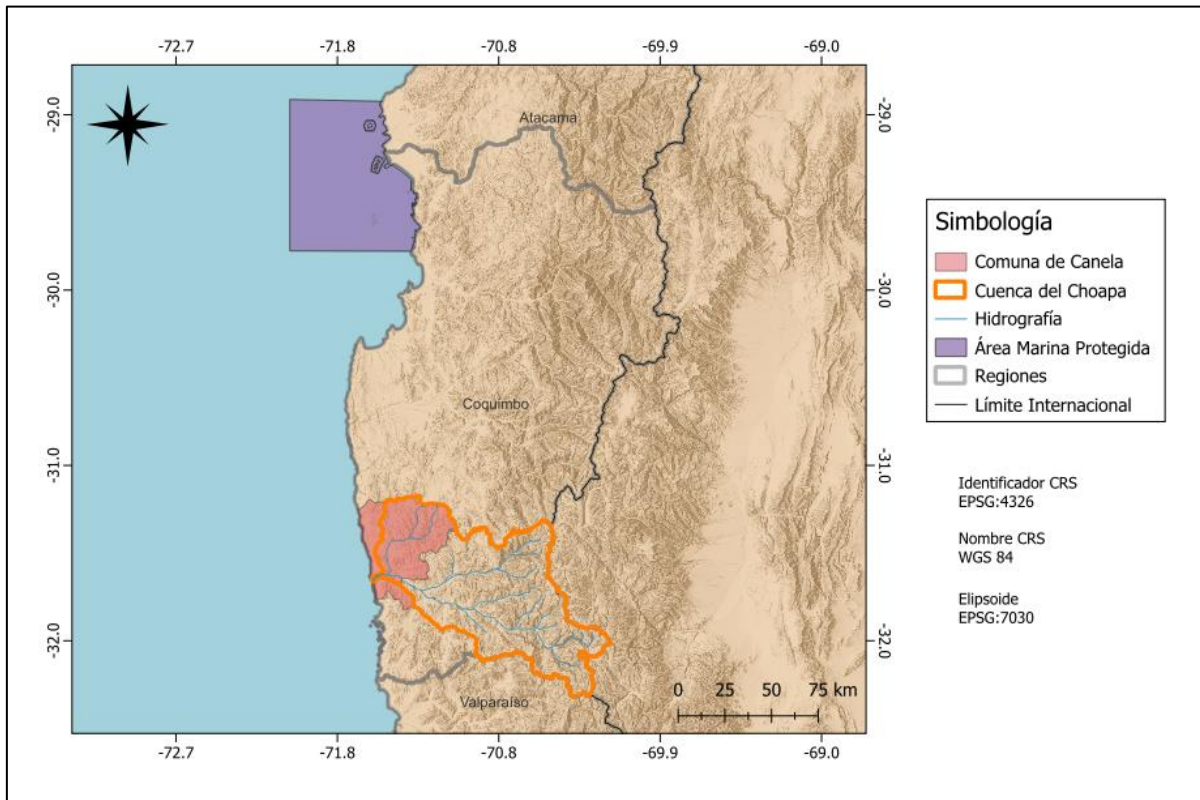


Figura 6.23: Mapa Áreas Marinas Protegidas Región de Coquimbo.

Fuente: Mapa elaborado a partir de datos geográficos de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile.

En la Figura 6.24 se muestra el mapa con el análisis de los AMERB y las caletas asociadas de la comuna de Canela. En total existen 4 caletas en la comuna que poseen AMERB. Caleta Puerto Oscuro, Caleta Puerto Manso, Caleta Maitencillo y Caleta Huentelauquén.

En la Figura 6.25 se presenta un extracto del anteproyecto de Plano Regulador Intercomunal de la Provincia del Choapa (que aprobó su Evaluación Ambiental Estratégica el 27 de febrero del 2024) con la única zona costera en la comuna de Canela que según su descripción permitiría la instalación de una planta desalinizadora de carácter provincial. Se presenta el Plano del PRI completo, para la sección costera de Canela en el Anexo 1.

Del Plano Regulador Intercomunal, la única zona que cumple con la normativa urbanística para la ubicación de una planta desalinizadora es la Zona de Extensión Urbana para Actividades Productivas (ZEAP). El uso de suelo permitido para esta zona es la siguiente:

- Industrias, talleres, grandes depósitos y bodegas industriales calificadas como insalubres o contaminantes. Terminales de transporte terrestre.
- Equipamientos en clase científico y servicios.
- Instalaciones de Infraestructura calificadas como inofensivas o molestas en: Infraestructura de transporte; Infraestructura Sanitaria destinado a plantas de captación o tratamiento de agua potable, Plantas de Tratamiento de aguas servidas; Infraestructura energética.

En la Figura 6.26 se presenta una interpolación aproximada del mapa con las AMERB y la zona ZEAP costera del Plano Regulador Intercomunal, en la cual se podría instalar una planta desalinizadora según la normativa urbanística y un punto ubicación aproximado como propuesta para el punto de captación y descarga de la desalinizadora.

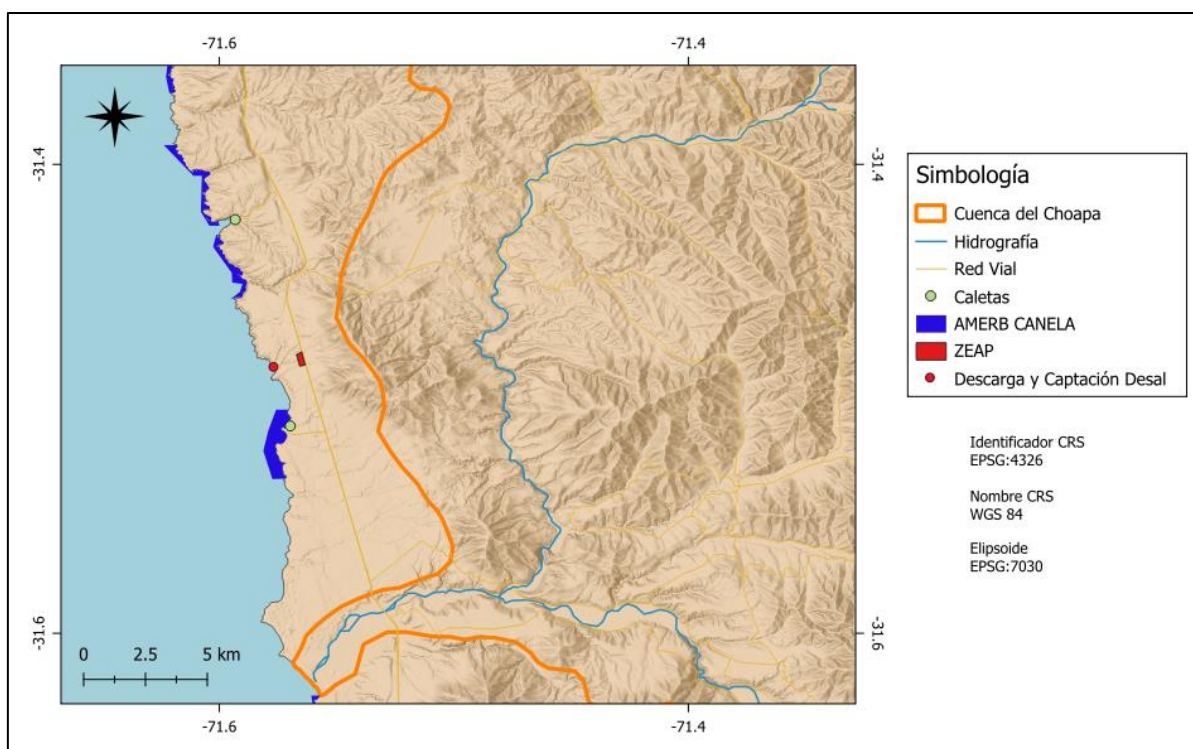


Figura 6.26: Mapa ubicación propuesta para planta desalinizadora y punto de captación y descarga.

6.4 Modelo de Dispersión de la Salmuera

En las figuras 6.27 hasta la 6.35 se presentan los resultados para las direcciones de corriente definidas para la modelación en Visual Plumes y para cada una de las velocidades de corrientes determinadas en la metodología.

En todos los casos simulados la distancia de la dispersión de la salmuera no supera los 60 metros hasta alcanzar los niveles normales de salinidad del medio. Los casos en los que la dispersión alcanza aproximadamente los 50 metros es en los que se simula la velocidad máxima (0,47 m/s). Para los valores de velocidad de corriente media (0,12 m/s) y mínima (0,01 m/s), la distancia máxima de dilución de la salmuera concentrada es de alrededor de los 20 metros.

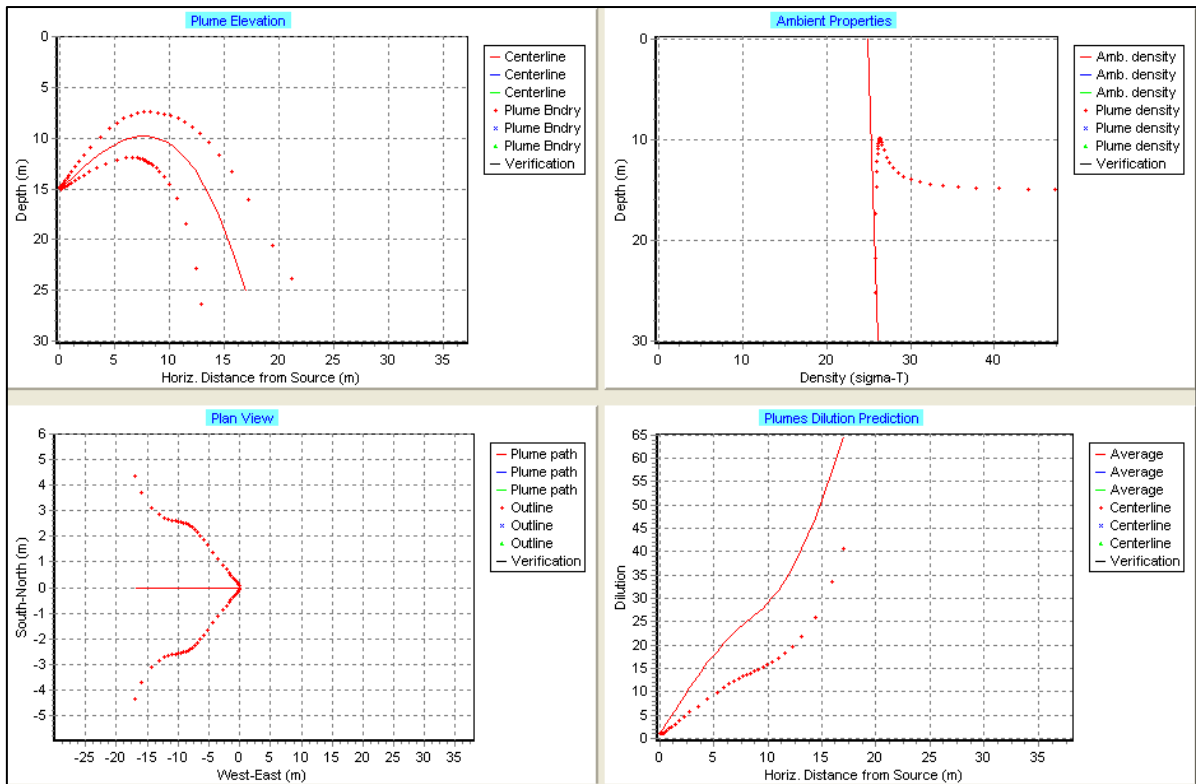


Figura 6.27: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 0° y velocidad en 0,02 m/s.

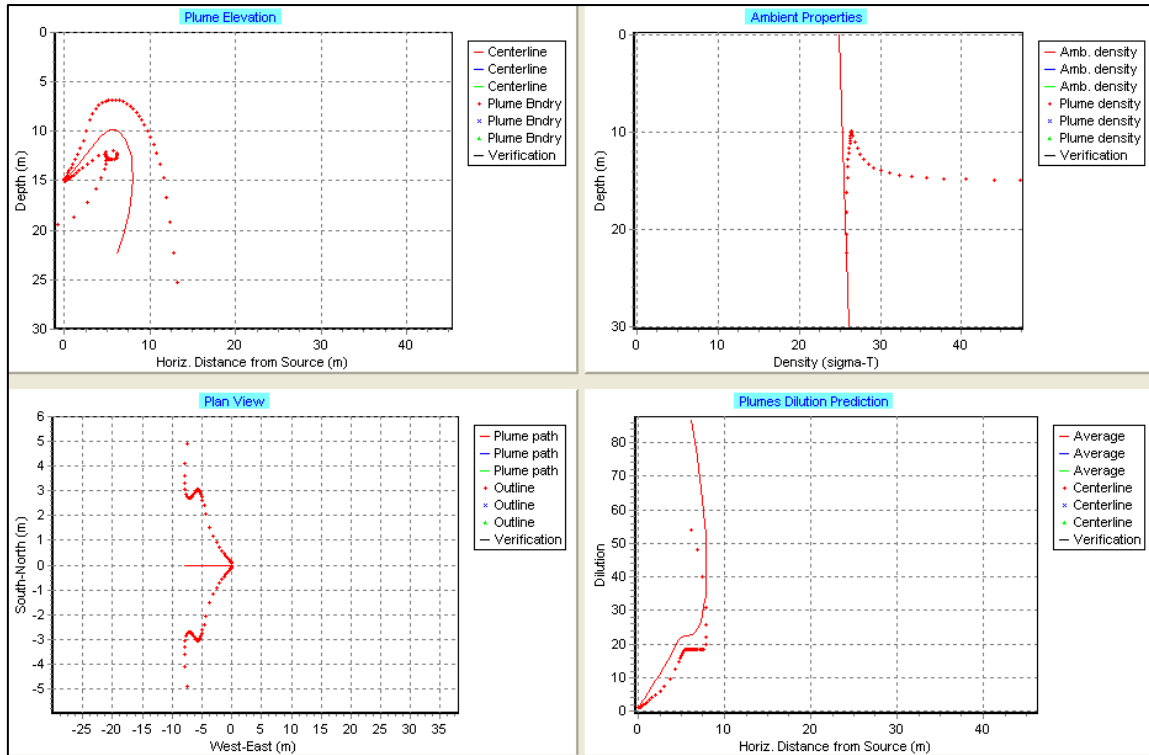


Figura 6.28: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 0° y velocidad en 0,12 m/s.

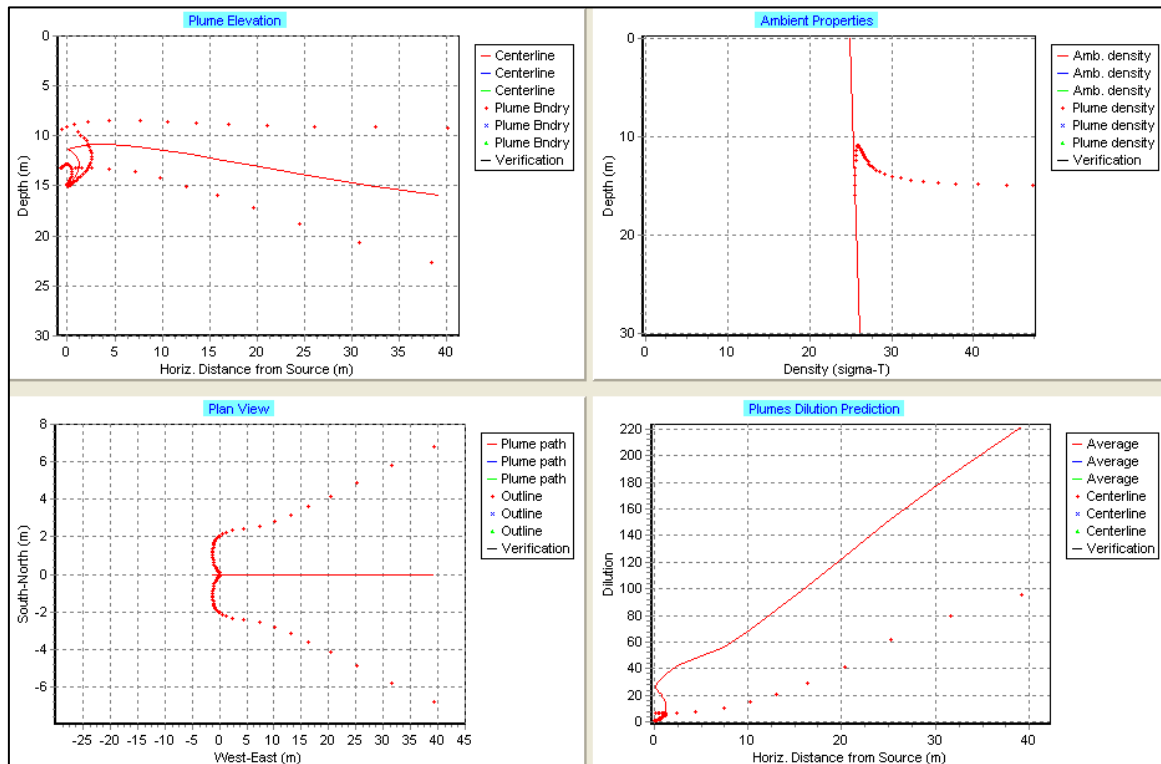


Figura 6.29: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 0° y velocidad en 0,47 m/s.

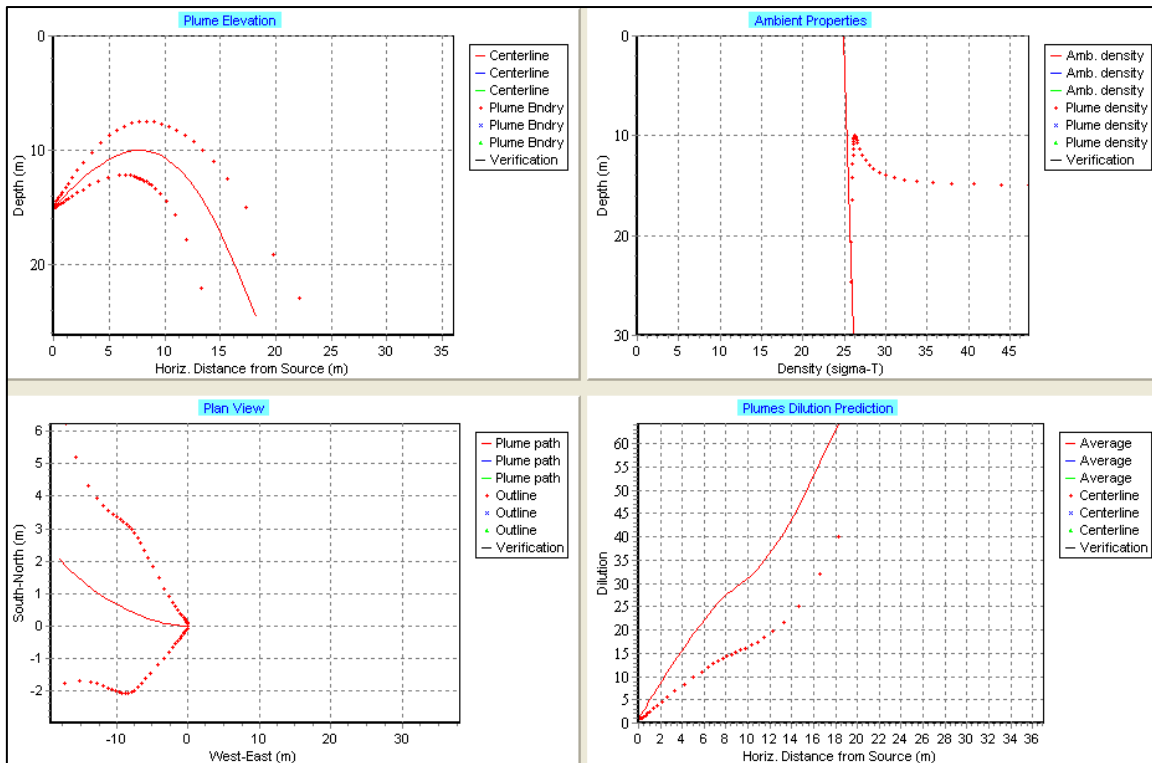


Figura 6.30: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 90° y velocidad en 0,02 m/s.

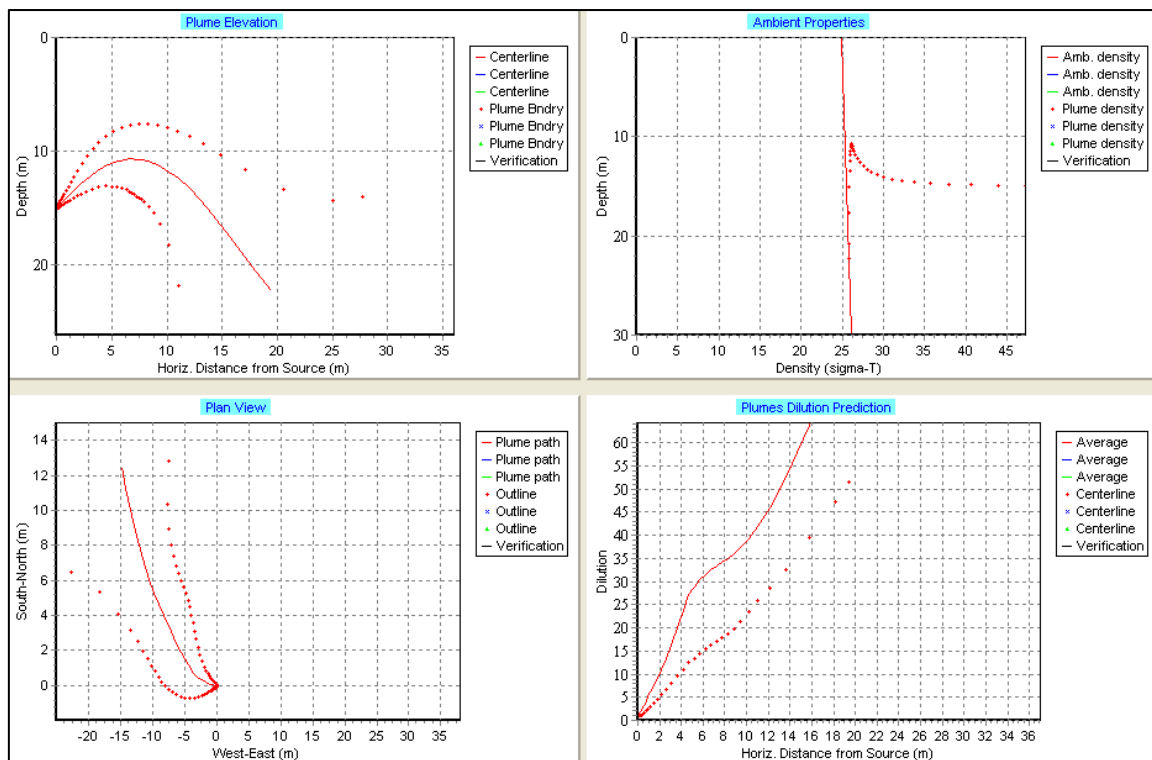


Figura 6.31: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 90° y velocidad en 0,12 m/s.

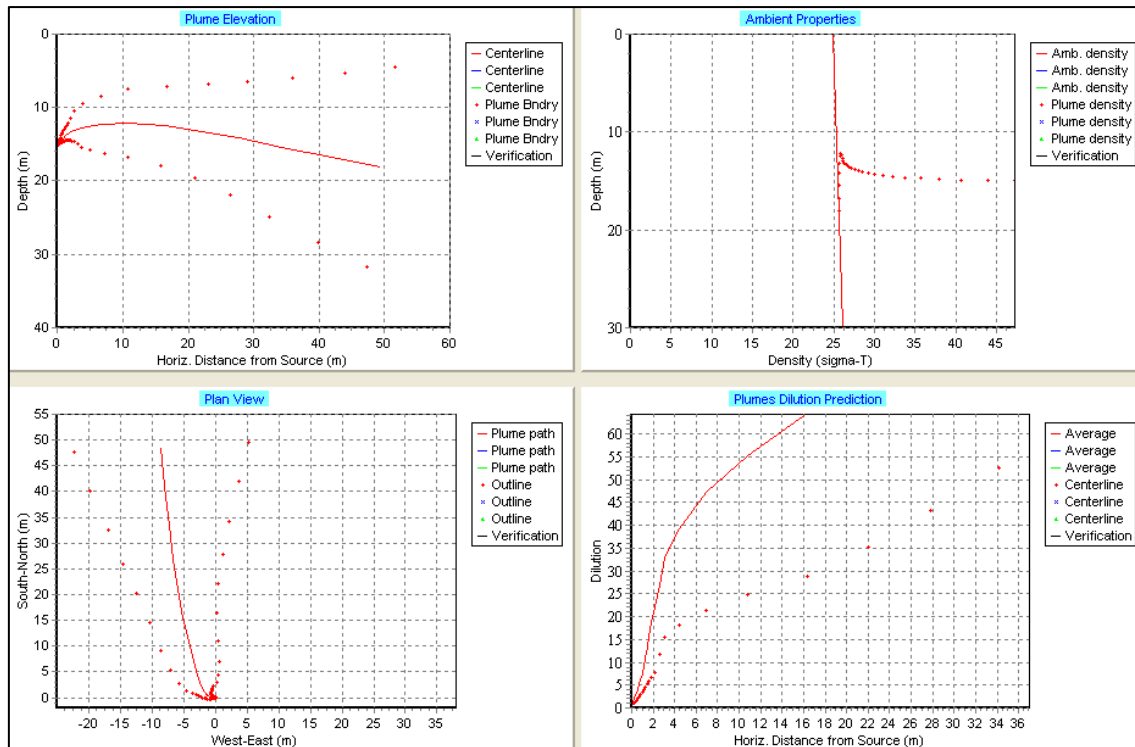


Figura 6.32: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 90° y velocidad en 0,47 m/s.

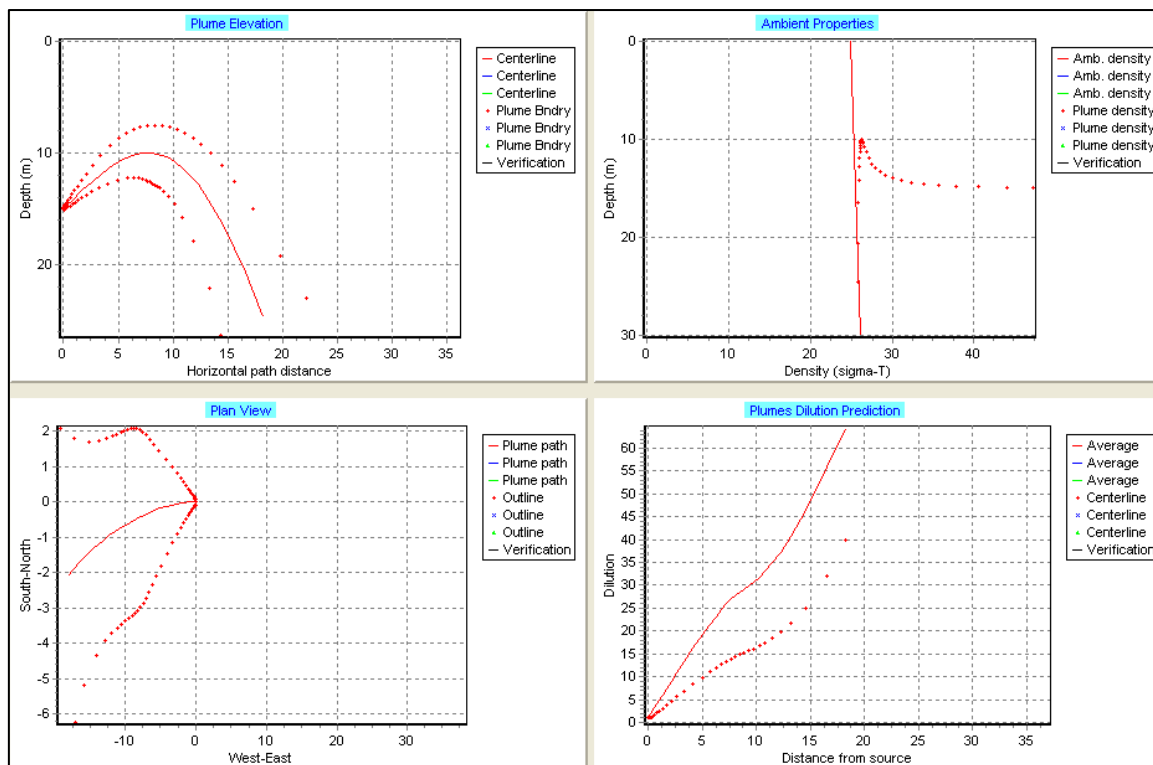


Figura 6.33: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 270° y velocidad en 0,02 m/s.

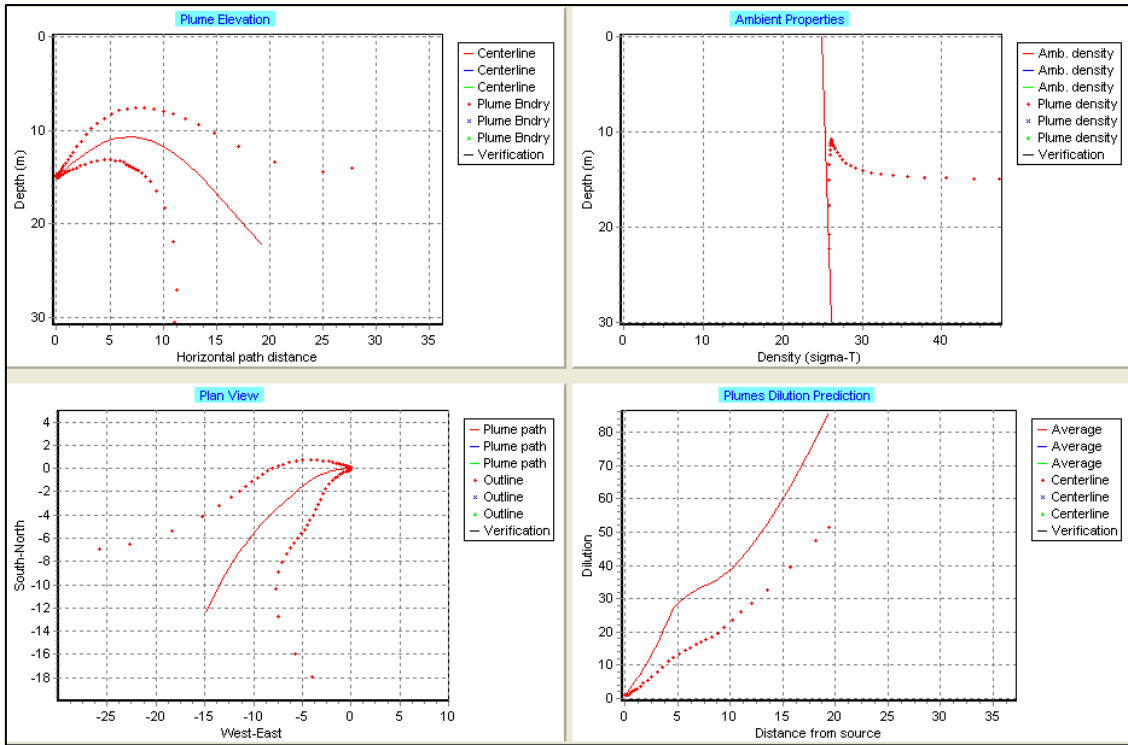


Figura 6.34: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 270° y velocidad en 0,12 m/s.

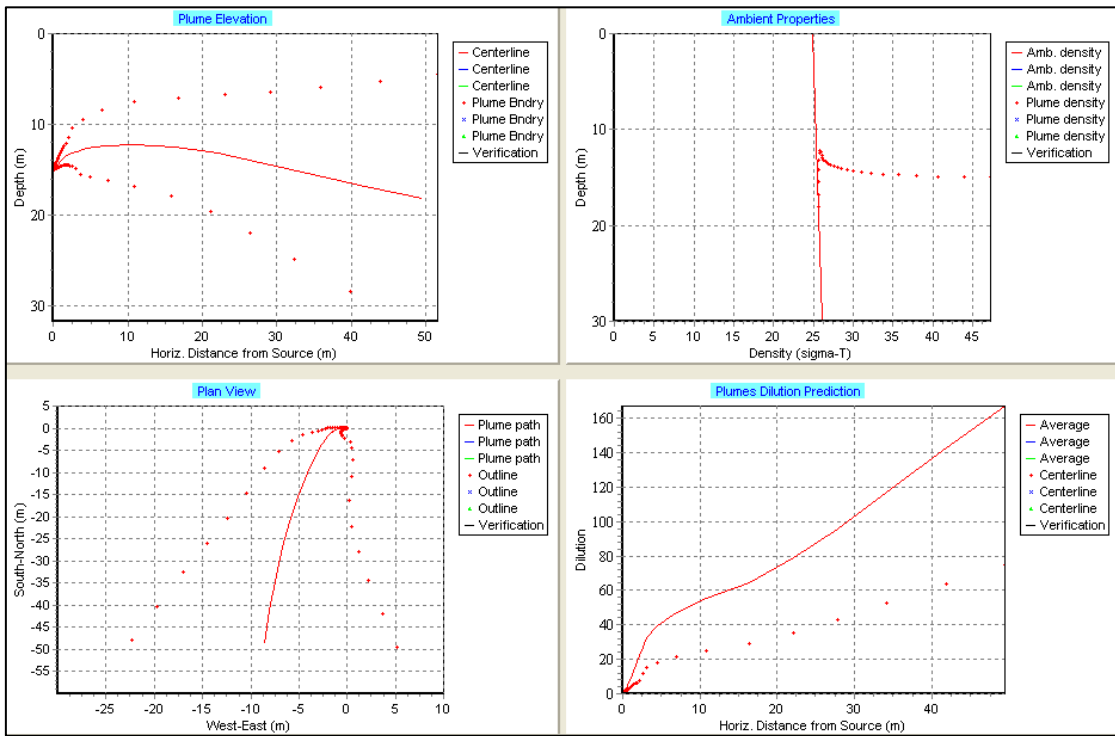


Figura 6.35: Elevación de la Pluma en dirección de corriente 270° y velocidad en 0,47 m/s.

Para un mejor análisis de los casos simulados y presentados anteriormente, se presenta un resumen de estos casos en un único gráfico para su comparación con la normativa australiana. En la Tabla 6.2 se presenta la abreviatura y código de color para cada caso simulado. En la Figura 6.36 se presenta el gráfico comparativo.

Tabla 6.2: Abreviaturas por casos de simulación.

Caso	Abreviatura
Dirección 0° - Velocidad 0,02 m/s	Dir_0_corr_02
Dirección 0° - Velocidad 0,12 m/s	Dir_0_corr_12
Dirección 0° - Velocidad 0,47 m/s	Dir_0_corr_47
Dirección 90° - Velocidad 0,02 m/s	Dir_90_corr_02
Dirección 90° - Velocidad 0,12 m/s	Dir_90_corr_12
Dirección 90° - Velocidad 0,47 m/s	Dir_90_corr_47
Dirección 270° - Velocidad 0,02 m/s	Dir_270_corr_02
Dirección 270° - Velocidad 0,12 m/s	Dir_270_corr_12
Dirección 270° - Velocidad 0,47 m/s	Dir_270_corr_47
Límite Norma Australiana	Lim_norma

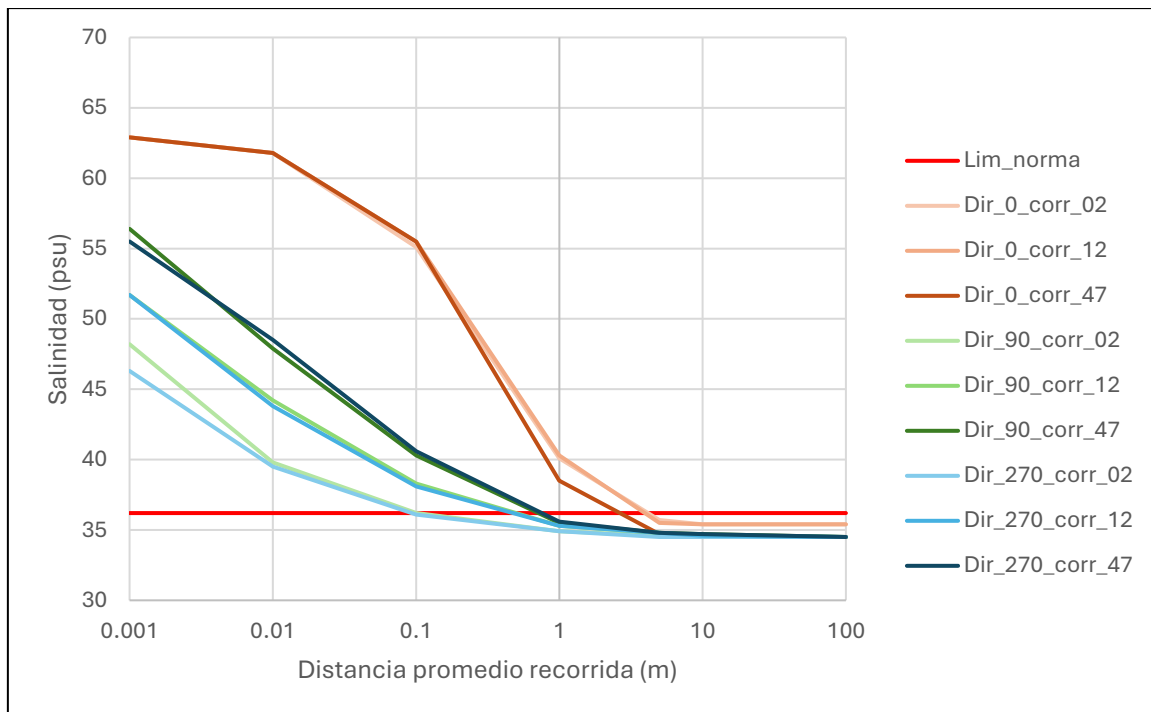


Figura 6.36: Gráfico comparativo de las simulaciones con la normativa australiana.

Se puede observar del gráfico que para la distancia promedio de la dispersión hasta aproximadamente los 5 metros de distancia, todos los casos simulados se encuentran dentro del límite normativo australiano.

7 DISCUSIÓN

7.1 Demanda de Agua de la Cuenca

Las demandas de aguas se observan constante para todo el periodo futuro de simulación del modelo publicado por la DGA, lo cual conlleva algunas incertidumbres al no considerar el crecimiento poblacional en la demanda de agua potable o los cambios en la evapotranspiración de los cultivos dado los aumentos de temperatura. Esto se debe a que la demanda en modelo la esquematizan en función de los derechos de aprovechamientos de aguas otorgados en la cuenca. Esto se entiende debido a que la DGA debe planificar y gestionar en función de los derechos de aprovechamientos de aguas. No obstante, dado la escasez hídrica que enfrenta la cuenca, es muy poco probable que sigan aumentando los derechos aprovechamientos, además, para el caso del consumo de agua potable, las empresas sanitarias encargadas de su producción y distribución poseen un caudal de extracción que está proyectado para el crecimiento poblacional en el futuro en miras de asegurar el acceso al agua potable. Sin embargo, es pertinente hacer el alcance sobre el debate que existe en el concepto de demanda de agua y que en realidad los derechos de aprovechamientos de aguas pueden considerarse más bien una restricción a la demanda real. Sobre los datos de demanda de agua obtenidos del modelo se pudo observar, en todos los SHACs, que el mayor consumo corresponde a la agricultura, superando en algunos casos, en más de 100 veces al consumo de agua potable como es el caso del SHAC de Illapel. Esto, considerando la escasez hídrica, supone un especial desafío para el futuro de la agricultura en la cuenca del Choapa.

7.2 Demanda No Cubierta

Se puede observar de las figuras 6.17 y 6.18 que, con el escenario de desalinización, existe una disminución de este aspecto del déficit hídrico, sin embargo, es principalmente solo en los primeros cinco años del periodo de análisis (2030-2050), los años posteriores al 2035 existe una disminución de la demanda no cubierta y solo con un aumento significativo para el año 2044. Esta disminución abrupta de la demanda no cubierta a partir del año 2035 se explica al analizar las proyecciones de cambio climático integradas al modelo hidrológico del Choapa, específicamente de las proyecciones de precipitación, de las cuales se presentan en el Anexo 2 de este trabajo. En este anexo se puede observar que para los años 2030 a 2035 el modelo climático de precipitación del CSIRO simula una bajada en las precipitaciones que luego aumenta considerablemente desde el 2035 hasta el 2050. Esto explica en cierta medida el cambio en las tendencias de la demanda no cubierta. Respecto a la curva de variación estacional es especialmente en los veranos donde existe un mayor déficit y en donde el aporte de la desalinización permite disminuir en aproximadamente un millón de metros cúbicos la demanda no cubierta.

7.3 Almacenamiento de los Acuíferos

De las figuras 6.19 y 6.20 se aprecia que se logra aumentar aproximadamente entre 15 millones de metros cúbicos el almacenamiento general de los acuíferos para el periodo mensual y también en la curva de variación estacional. Sin embargo, al igual que en los gráficos del capítulo 6.2.1, existe un cambio abrupto en las tendencias de los periodos mensuales. En los meses desde el año 2030 hasta el 2035, para el caso de los acuíferos, se evidencia una tendencia a la disminución del almacenamiento que luego aumenta de manera muy significativa desde el 2035 hasta el 2050. Esto también se explica mediante las proyecciones de precipitación del modelo de cambio climático del CSIRO integradas al modelo hidrológico del Choapa presentadas en el Anexo 2. Sin embargo, las proyecciones de cambio climático en los modelos hidrológicos tienen incertidumbres asociadas que son importantes a considerar. Uno de los desafíos que presentan los modelos de circulación general que simulan variables climáticas según las recomendaciones del IPCC es que estos son a escala global, y por lo tanto, para utilizarlos en modelos hidrológicos de cuencas, es necesario primero realizar una reducción de escala a estos modelos climáticos que muchas veces solo consisten en la eliminación del sesgo y mantener alguna tendencia estadística para el futuro, pero no representan con exactitud lo que pueda suceder en las variables climáticas futuras para un año o un mes específicos, por lo que el análisis de variables hidrológicas, también para un periodo mensual o anual, tiene mucha incertidumbre asociada.

7.4 Caudal de Reserva de Protección Ambiental Ramsar

Respecto al Caudal de Reserva de Protección Ambiental para el humedal Ramsar, el aumento debido al aporte de la desalinización no es significativo en cuanto a alcanzar el Caudal de RPA (Figura 6.21). Sin embargo, con la desalinización se logra aumentar en $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente respecto a la curva de variación estacional del escenario de cambio climático, siendo un aumento de un 6% aproximadamente. Este aumento es bastante positivo en la modelación puesto que el aporte de la desalinización a la oferta hídrica de la cuenca no es directo a la escorrentía superficial del río, sino que es mediante los nodos de demanda, logrando de manera indirecta el aumento del caudal disponible para el río como se evidenció en la sección aguas arriba del humedal Ramsar. No obstante, para que este aumento sea efectivo, es primordial que el flujo de agua que aporta la desaladora implique disminuir en la misma proporción de este flujo, el agua que se extrae de la hidrología natural de la cuenca.

7.5 Ubicación para la Planta Desalinizadora

La ubicación propuesta se realizó considerando la normativa urbanística del Plan Regulador Intercomunal de la provincia del Choapa que aprobó su Evaluación Ambiental Estratégica y que está *ad-portas* de su último proceso para su aprobación oficial. La única área marina protegida de la región de Coquimbo se encuentra a más de 100 kilómetros de distancia al norte de la comuna de Canela, por lo que no es esperable que el vertido de la salmuera de una planta desalinizadora en la ubicación propuesta afecte esta área. Por lo que la única figura de protección y/o manejo marino de la cual es importante tener precaución sobre su afectación, son las AMERB. Sin embargo, es importante tener en consideración que estas precauciones no implican que no exista una afectación a los organismos marinos que habitan en la zona de vertimiento o que hayan resquemores dentro de los pescadores de las caletas de Canela del posible impacto de la salmuera a sus áreas de manejo y su rubro en general, por lo que es importante que cualquier proyecto de esta índole sea realizado desde una perspectiva de participación ciudadana y que las distintas configuraciones ingenieriles respecto al emisario y/o los difusores sean con el objetivo de generar el mínimo impacto posible.

7.6 Simulación Vertimiento de Salmuera

La simulación se basó en una base de datos oceanográfica de una zona cercana, pero no exactamente en el lugar propuesto para este estudio. Para lograr una modelación más precisa, es necesario contar con una línea base oceanográfica y de datos fisicoquímicos específica del área de descarga de salmuera. No obstante, la simulación proporciona una estimación del decrecimiento de la salinidad del vertido, comparándola con la normativa australiana, que establece que la salinidad no debe exceder en más del 5% la salinidad del medio receptor. Los resultados indican que la dispersión de la salinidad en los casos simulados decae rápidamente hasta el límite normativo, aproximadamente a 5 metros (Figura 6.36), lo que sugiere la eficiencia de la configuración modelada para la dilución. Sin embargo, se observó cierta incertidumbre en la simulación de Visual Plumes, relacionada con los datos del medio receptor, como la salinidad. Estos valores se ingresaron al modelo estableciendo un punto de inicio y un punto final de referencia (0 y 30 metros, respectivamente), y el modelo calcula los valores intermedios y posteriores mediante interpolación. Esto puede generar estimaciones que no reflejan con precisión la realidad, subestimando para este caso los cambios de salinidad, cuando en realidad se mantienen alrededor de 34,5 psu (Anexo 3). Estas variaciones pueden en consecuencia haber sobreestimado el área de influencia presentados en las figuras 6.27 a 6.35. Sin perjuicio de las consideraciones antes expuestas, la simulación realizada permite un acercamiento sobre el área de dispersión en el campo cercano y su eficiencia de dilución, pero es necesario complementar con estudios de dispersión con un modelo dinámico para el proceso de dispersión en el campo lejano, y estudios sobre el efecto del cambio de salinidad en los organismos marinos de la zona, como los realizado por Manríquez *et al.* (2024).

8 CONCLUSIÓN

El modelo hidrológico simulado para la cuenca del río Choapa (2030-2050) indica que la desalinización puede contribuir a la seguridad hídrica de la cuenca. Se estima que podría reducir en aproximadamente 1 millón de metros cúbicos la demanda no cubierta durante los meses de verano, los más críticos del análisis de la curva de variación estacional. Además, el almacenamiento de acuíferos aumentaría en promedio 15 millones de metros cúbicos. El caudal disponible para el humedal Ramsar crecería un 6% en comparación con el escenario base de cambio climático, sin embargo, sobre este último aspecto, no se logra un aumento significativo para alcanzar el caudal de reserva de protección ambiental del humedal Ramsar estimado en el PEGH de la cuenca el 2020.

La ubicación adecuada para el emplazamiento de una planta desalinizadora resultar ser al norte de la caleta Puerto Manso al costado de la carretera cinco norte. Con esta ubicación se cumpliría con la normativa urbanística del PRI de la provincia del Choapa y además el punto de captación y vertimiento de la desalinizadora se encontraría a casi dos kilómetros de distancia de la AMERB más cercana.

Respecto a la simulación del vertimiento de la salmuera con la configuración ingenieril propuesta para el proceso de difusión, los resultados indicaron un proceso de dilución en el que a una distancia de 5 metros aproximadamente la concentración del vertido disminuye significativamente, hasta los valores normativos utilizados de referencia. Sin embargo, es necesario complementar estas simulaciones con modelos dinámico para el campo lejano.

Finalmente, es importante destacar que se requieren de más estudios sobre el impacto de la desalinización en los ecosistemas marinos locales antes de considerarla como una solución definitiva, si bien esta tecnología está en considerable aumento tanto en Chile como en el mundo, también existen otras alternativas, como el reúso de agua, la recarga artificial de acuíferos o los atrapanieblas que, combinadas con la desalinización podrían ser clave para lograr la seguridad hídrica de la cuenca del río Choapa, con un menor impacto ambiental.

9 BIBLIOGRAFÍA

ACADES. Proyectos de reúso y desalinización en Chile: Catastro Nacional de Plantas Procesadoras de Agua de Mar. [en línea] Proyectos – ACADES [consultado el 5 de junio 2024]

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council 1992, Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Canberra.

BHP. Instalación de 2500 L/s es la más grande de Latinoamérica. 2018. [en línea] INSTALACION DE 2500 LS ES LA MS GRANDE DE LATINOAMERICA | BHP [consultado el 7 de junio de 2024]

Biblioteca del Congreso Nacional. Asesoría Técnica Parlamentaría: Impacto Ambiental de Desalinización de Agua de Mar. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones. 2017.

Biblioteca del Congreso Nacional. Asesoría Técnica Parlamentaría: Principales usos del agua desalada a nivel global y estrategias de mitigación de impactos ambientales del proceso de desalinización. 2021.

Boletín 11608-09. Proyecto de Ley “Sobre el uso de agua de mar para desalinización” (en tramitación). Chile.
<http://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_ini=11608-09>
[consulta: 3 de enero de 2024]

Carrasco-Lagos P, RA Moreno, A Figueroa, C Espoz y C de la Maza (2015) Sitios Ramsar de Chile. Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana de Santiago, Universidad Santo Tomás, Universidad de Chile y CONAF. 56 pp.

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

Decreto 203. Ministerio de Obras Públicas. Aprueba Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas. Publicado 7 de marzo de 2014.

Decreto N° 123. Ministerio de Obras Públicas. Prorroga Decreto MOP N°109, de 6 de julio de 2022 que Declara Zona de Escasez Hídrica a la Región de Coquimbo. 2023.

Decreto N°58 de 2024. Ministerio de Obras Públicas. Aprueba reglamento que establece el procedimiento para la elaboración, revisión y actualización, así como el monitoreo y reporte de los planes estratégicos de recursos hídricos en cuencas. Promulgado el 3 de abril de 2023. Link: Ley Chile - Decreto 58 04-ENE-2024 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - Biblioteca del Congreso Nacional (bcn.cl)

DGA (2019), Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DICTUC S.A. & SEI.

DGA (2020) Boletín DGA marzo 2020.

Dirección General de Aguas (DGA), 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Realizado por: Cade-Idepe Consultores en Ingeniería.

Dirección General de Aguas (DGA), 2007. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Choapa. Informe técnico. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Santiago de Chile.

Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Acerca de la DGA [en línea]. Chile. Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas (mop.gob.cl) [consultado el 04 de mayo 2024]

Dirección General de Aguas. 7 DGA Noticias: Planes Estratégicos de Gestión Hídrica. [en línea] Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas (mop.gob.cl) [consultado el 6 de junio 2024]

Dirección General de Aguas. Actualización del Balance Hídrico Nacional. 2017.

ECOHYD, Universidad de Valparaíso y DGA. Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí. Informe Final. 2020.

Edward Jones, Manzoor Qadir, Michelle T.H. van Vliet, Vladimir Smakhtin, Seong-mu Kang. The state of desalination and brine production: A global outlook, Science of The Total Environment, Volume 657, 2019, Pages 1343-1356, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

Finger, D. (2011). "Calibration of Hydrological Models". Hydrological Processes and Modelling, SS 2011. Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland.

Foro Económico Mundial (WEF). Naturaleza y Biodiversidad. Desalinización: ¿Qué es y cómo puede hacer frente a la escasez de agua? [en línea] Desalinización: ¿Qué es y cómo puede hacer frente a la escasez de agua? | Foro Económico Mundial (weforum.org) [consultado: 12 de mayo 2024]

Fundación AQUAE, 2021. Ósmosis inversa: ¿qué es y por qué es importante? [en línea] ¿Qué es la ósmosis inversa?: definición y etapas | Fundación Aquae (fundacionaquae.org) [consultado: 12 de mayo de 2024]

Gidahatari. Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW. 2016 [en línea] Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW en Español — gidahatari [consultado el 4 de junio de 2024]

Grupo Intergubernamental de expertos del cambio climático (IPCC). Cambio climático 2021. Un resumen para todo el mundo. 2021

Grupo Medioambiental del Sistema de las Naciones Unidas (SNU) en Chile, liderado por FAO y PNUMA, junto a PNUD, PMA y UNESCO, 2021. Escasez Hídrica en Chile, desafíos pendientes.

Gutiérrez Enríquez, M. M., Márquez Molina, J. J., Materón Muñoz, H., & Rojas Palacios, H. (2004). MODELACIÓN DE ACUÍFEROS PARA EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, I(1), 38-49.

InvestChile. Blog: Chile ya tiene 28 plantas desalinizadoras en operación y construcción. [en línea] Chile ya tiene 28 plantas desalinizadoras en operación y construcción (investchile.gob.cl) [consultado el 2 de julio 2024]

Lachish, U., 2002. Optimizing the efficiency of reverse osmosis seawater. *Desalination* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12099.20003>.

Lala. (2020). Una Revisión de los Métodos de Downscaling para las Proyecciones de Cambio Climático Resiliencia Africana y Latinoamericana al Cambio Climático (ARCC). 2014.

Ley 21.435 de 2023. Reforma el Código de Aguas. Artículo 1, inciso 97. Promulgada el 25 de marzo de 2022 (Chile).
Link: Ley Chile - Ley 21435 - Biblioteca del Congreso Nacional (bcn.cl)

Ley 21639 de 2023. Modifica normas para el desarrollo de proyectos de infraestructura hídrica y desalinización, con el fin de destinar agua al cumplimiento de la función de subsistencia y de riego. Promulgada el 19 de diciembre 2023. Chile.

Los Pelambres. Noticias: Los Pelambres pone en marcha primera planta desalinizadora para la minería de la zona central. 2024 [en línea] Los Pelambres pone en marcha primera planta desalinizadora para la minería de la zona central [consultado el 3 de julio 2024]

Loya-Fernández, Angel. 2018. Tesis Doctoral. Análisis de la zona de mezcla de vertidos hipersalinos provenientes de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa. Universidad de Alicante. España.

MICITEC. Desalinización: Oportunidades y Desafíos para abordar la Inseguridad Hídrica en Chile. 2022. Sección C, Desafíos de la Desalinización.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (actual MITECO). Desarrollo e implementación de una metodología para la reducción del impacto ambiental de los vertidos de salmuera procedentes de las plantas desaladoras. 2010. Anexo 1.

Ministerio de Medio Ambiente. ¿Qué es el cambio climático? [en línea] Chile. ¿Qué es el Cambio Climático? – Cambio Climático (mma.gob.cl) [consultado: 09 de mayo 2024]

Ministerio del Medio Ambiente. Evaluación Ambiental Estratégica. Plan Regulador Intercomunal Provincia del Choapa. 2024. < <https://eae.mma.gob.cl/file/411> > [consultado: 09 de mayo 2024]

Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Morton, A. J., Callister, I. K., Wade, N. M. 1997. Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes. *Desalination* 108, 1-3, pp. 1-10.

Muhammad Ayaz, M.A. Namazi, M. Ammad ud Din, M.I. Mohamed Ershath, Ali Mansour, el-Hadi M. Aggoune. Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations. *Desalination*, Volume 540, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116022>.

Muñoz, Enrique, Gutiérrez-Vejar, Juan C., & Tume-Zapata, Pedro I.. (2018). Incertidumbre en los caudales de salida de un modelo hidrológico semidistribuido. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 150-174. Epub 24 de noviembre de 2020. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-06>

OCDE. (2017). Gaps and Governance Standards of Public Infrastructure in Chile: Infrastructure Governance Review.

ONU. ¿QUE ES EL CAMBIO CLIMÁTICO? [en línea]¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas [consultado el 15 de abril de 2024]

Patricio H. Manríquez, Claudio P. González, Alejandro Abarca, Katherine Jenó, Viviana Jofré, Orlando Astudillo, Victor M. Aguilera. (2024). Effects of brine discharges on newly hatched larvae of the rocky-shore keystone gastropod *Concholepas concholepas*, *Desalination*, Volume 581, 2024, 117579, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117579>.

Pizarro, R.; Garcia-Chevesich, P.A.; McCray, J.E.; Sharp, J.O.; Valdés-Pineda, R.; Sangüesa, C.; Jaque-Becerra, D.; Álvarez, P.; Norambuena, S.; Ibáñez, A.; et al. Climate Change and Overuse: Water Resource Challenges during Economic Growth in Coquimbo, Chile. *Sustainability* 2022, 14, 3440. <https://doi.org/10.3390/su14063440>

Pizarro, R. y Novoa, P., 1986, Instructivo N°5. Determinación de valores probabilísticos para variables hidrológicas. Elementos técnicos de Hidrología Corporación Nacional Forestal (CONAF). Chile. 78p.

Ramsar. Chile: Las Salinas de Huentelauquén (LSH). 2015. [en línea] CL2237RIS_1508_es.pdf (ramsar.org) [consultado el 20 de abril de 2024]

Richard Connor, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021. El Valor del Agua, resumen ejecutivo. 2021.

Roberts, D., Johnston, E., & Knott, N. (2010). Review: Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. *Water research* 44: 5117-5128.

Rodhos asesoría y DGA. Análisis para el Desarrollo de un Plan de GIRH en la Cuneca del Choapa. 2017.

Romero-Cuéllar, J., Buitrago-Vargas, A., Quintero-Ruiz, T., & Francés, F. (2018). Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Ribagua*, 5(1), 63–78. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574>

Ruiz-García, P., Monterroso-Rivas, A.I., Sánchez-Torres G., Vargas-Castilleja, R.C., Báez-Vásquez, J. & Conde-Álvarez, A.C (2022). Breve Guía para la Selección, Descarga y Aplicación de Escenarios de Cambio Climático para México. De acuerdo con los últimos escenarios del IPCC. UACH-UNAM BUAP-UAT-ISF-México, A.C. 98 p. <http://ciren.am.chapingo.mx/cambio-climatico/folletos/>

Sanzana, Moncada, Vicuña, Purkey, Suárez, Muñoz y Girona. Rutas Hidrológicas. Consideraciones Metodológicas para La Modelación Superficial y Subterránea Integrada Aplicada a Planes de Gestión Hídrica en Chile. 2021. Pag 53-62.

Servicio de Evaluación Ambiental, 2024. Guía para la predicción y evaluación de impactos en ecosistemas marinos. Primera edición, Santiago, Chile.

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Descripción General de MODFLOW 6. [en línea] EEUU.MODFLOW 6: Modelo Hidrológico Modular del USGS | Servicio Geológico de EE. UU. [consultado: 09 de mayo 2024]

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Anuario de la Minería de Chile. 2018.

Stehr, Alejandra, Debels, Patrick, Arumi, José Luis, Alcayaga, Hernán, & Romero, Francisco. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 37-58. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200724222010000400002&lng=es&tlng=es

Stockholm Environment Institute. ¿Por qué WEAP? [en línea] WEAP: Water Evaluation And Planning System (weap21.org) [consultado el 6 de junio 2024]

UNESCO (2018) El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos.

Unión de Científicos Conscientes. Causas de la Sequía ¿Cuál es la conexión con el cambio climático? 2021.

La conexión entre las sequías y el cambio climático | Unión de Científicos Conscientes (ucsusa.org) [Consultado: 07 de mayo 2024]

Universidad de Chile. Desalinización en Chile: desafíos y oportunidades para el aprovechamiento sustentable del agua de mar. 2023.

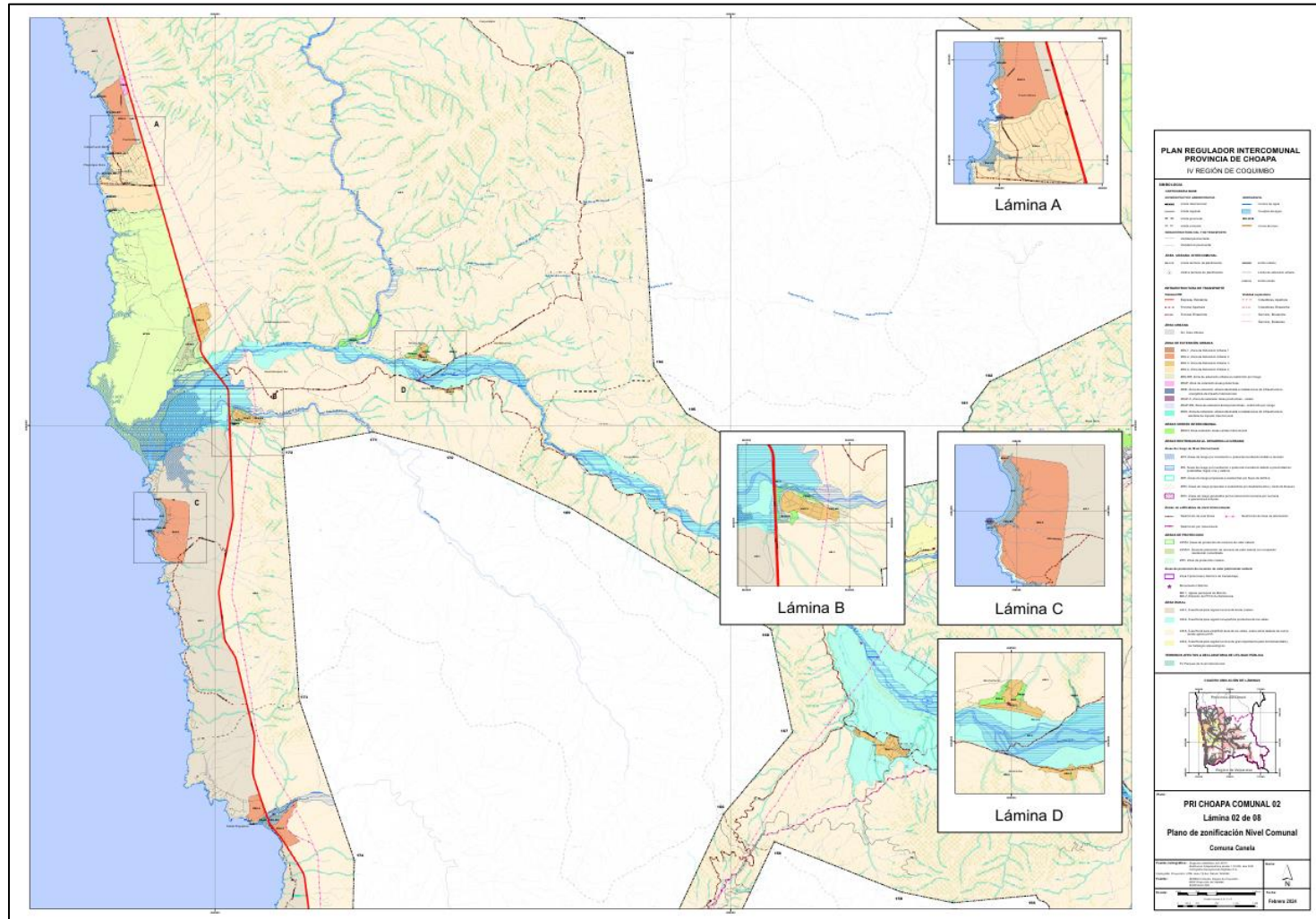
UTP HÍDRICA, ERANIDUS y DGA. Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuenca del Choapa. Informe Final. 2020.

UTP HÍDRICA, ERANIDUS y DGA. Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuenca del Aconcagua. Informe Final. 2020.

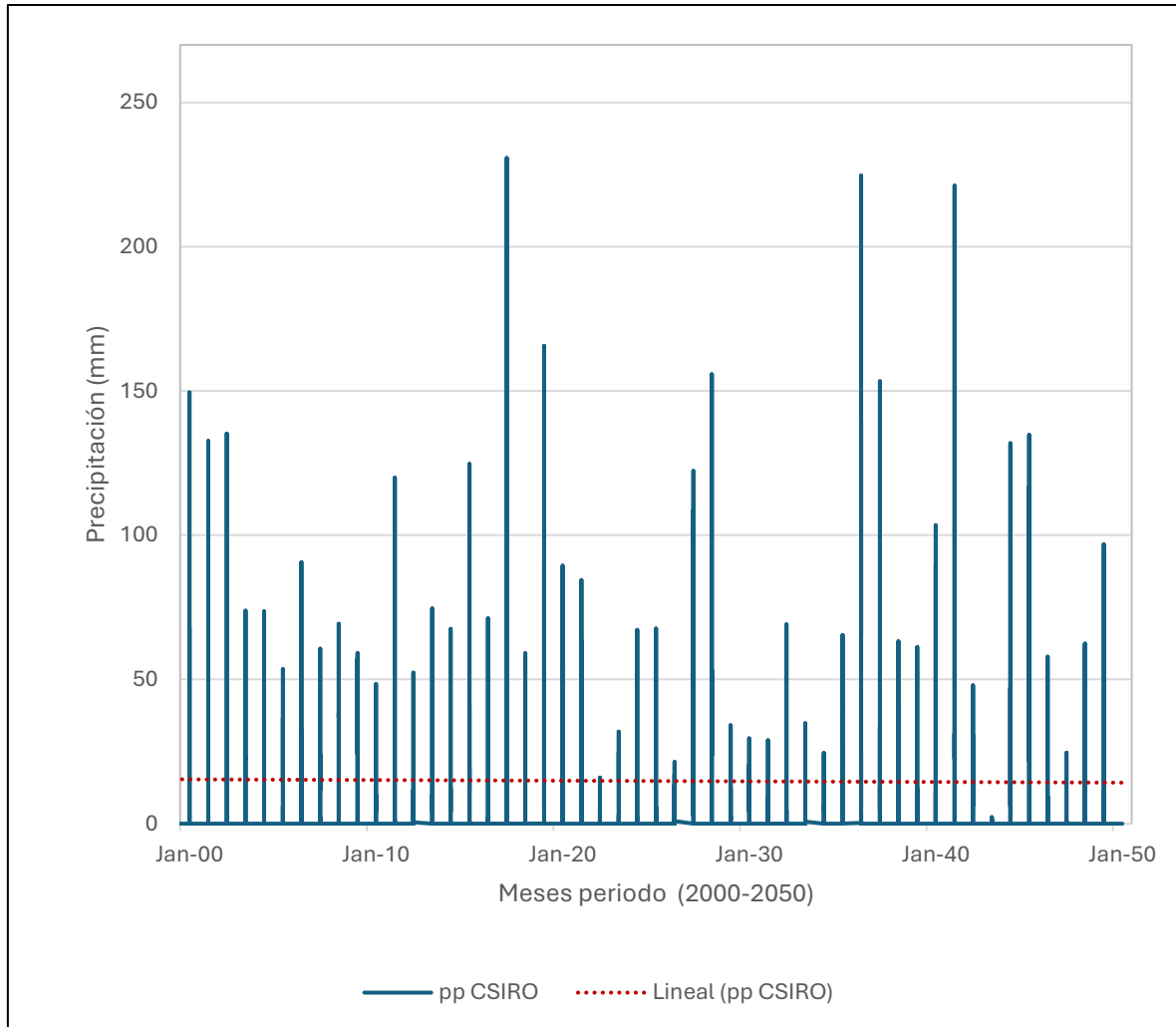
Winckler, Patricio. DIRECTEMAR. Guía para el Modelado de la Hidrodinámica y del Proceso de Mezcla de Descargas Salinas y Térmicas. 2021.

10 ANEXOS

Anexo 1. Plan Regulador Intercomunal Provincia del Choapa sección costera de Canela.



Anexo 2. Proyecciones de precipitación del CSIRO utilizados en el modelo hidrológico.



Anexo 3. Comparación valores de salinidad del medio simulados en Visual Plumes con los valores de la base datos del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Minera Los Pelambres.

