



Gobierno
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCAS ENDORREICAS SALAR DE ATACAMA-VERTIENTE DEL PACÍFICO

ANEXO F – ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL PLAN DE CUENCAS

REALIZADO POR:

HIDRICA CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 501

Santiago, marzo 2022

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES	1
1.3	ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO	1
1.3.1	Descripción de la cuenca. Localización geográfica	1
1.3.2	Diagnóstico de la cuenca	2
1.3.3	Modelación Hidrogeológica Conceptual	2
1.3.4	Modelación hidrológica	2
1.3.5	Participación ciudadana	2
1.3.6	Formulación del Plan de Acción	2
1.3.7	Generación del SIG	3
CAPÍTULO 2	REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	4
2.1	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	4
2.2	RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE	4
2.2.1	Antecedentes relativos a modelación	4
2.2.2	Antecedentes relativos a PAC	5
2.2.3	Antecedentes relativos a carteras de acciones	6
2.2.4	Otros antecedentes relevantes	7
CAPÍTULO 3	ENFOQUE METODOLÓGICO DEL ESTUDIO	8
3.1	INTRODUCCIÓN	8
3.2	METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	10
3.2.1	Dimensión física y económica	10
3.2.2	Clima	13
3.2.3	Dimensión ambiental	20
3.2.4	Infraestructura	26
3.2.5	Nuevas fuentes de agua	27
3.2.6	Gobernanza	28
3.2.7	Cartera de acciones	29
3.3	METODOLOGÍA APLICADA EN LA DEMANDA FÍSICA Y LEGAL DE RECURSOS HÍDRICOS PARA DIFERENTES USOS	31
3.3.1	Estimación de demanda hídrica actual y proyección futura	31
3.3.2	Análisis de DAA y mercado de DAA	35
3.4	METODOLOGÍA APLICADA EN LA OFERTA HÍDRICA	38
3.4.1	Fuentes	38
3.4.2	Oferta en la fuente (aguas superficiales)	40
3.4.3	Recarga de sistema superficial al subterráneo	41
3.4.4	Calidad de las aguas	41
3.4.5	Fuentes de contaminación	46
3.4.6	Derechos concedidos	46

3.5	METODOLOGÍA APLICADA EN LA MODELACIÓN Y EL BALANCE DE AGUA	47
3.5.1	Descripción de la plataforma WEAP	47
3.5.2	Forzantes meteorológicas utilizadas	58
3.5.3	Desarrollo del Modelo Hidrogeológico Conceptual	58
3.5.4	Programa QGIS para modelo hidrogeológico	59
3.5.5	Índice de precipitación estandarizado	59
3.5.6	Índice de Precipitación-Evaporación Estandarizado	64
3.6	METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS DE ACCIONES	67
3.6.1	Ejes del Plan de Acción	68
3.6.2	Árboles de problemas y soluciones	68
3.6.3	Medidas de intervención	70
3.6.4	Categorización de las acciones del Plan	71
3.7	METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARTERA DE INICIATIVAS PROPUESTAS	74
3.7.1	Síntesis de la selección de alternativas	74
3.7.2	Metodología para la evaluación y priorización de medidas	74
3.7.3	Valorización económica del PEGH	83
3.7.4	Metodología para la generación del cronograma de las soluciones	83
3.8	METODOLOGÍA APLICADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN	83
3.8.1	Hitos de referencia en la implementación del plan	83
3.8.2	Estrategia de implementación	83
3.8.3	Estrategia de comunicación	84
3.8.4	Identificación de fuentes de financiamiento del Plan	84
3.9	METODOLOGÍA APLICADA EN EL MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN	84
3.9.1	Programa de seguimiento y control del Plan	84

TABLAS

Tabla 2.2-1	Estudios realizados en cuenca.....	4
Tabla 2.2-2	Listado de antecedentes relevantes de PAC.....	5
Tabla 2.2-3	Listado de fuentes de información relevantes asociadas a carteras de acciones o medidas en materia hídrica.....	7
Tabla 3.2-1	Eventos y su definición	14
Tabla 3.2-2	MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en (DGA, 2017)	16
Tabla 3.2-3	Resumen de las variaciones porcentuales de precipitación y escorrentía para distintas cuencas estudiadas en DGA (2018a).....	19
Tabla 3.2-4	Escenarios de cambio climático modelados	19
Tabla 3.2-5	Clasificación de los Servicios Ecosistémicos según Potschin & Haines-Young (2011)	23
Tabla 3.3-1	Coeficientes de cultivo	34
Tabla 3.4-1	Parámetros considerados en el diagnóstico del estado de calidad	43
Tabla 3.4-2	Rangos límites de parámetros CE y SDT	45
Tabla 3.4-3	Clasificación de Tipo de Agua.....	46
Tabla 3.5-1	Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP	54
Tabla 3.5-2	Parámetros de acuífero en WEAP.....	56
Tabla 3.5-3	Valores del índice de precipitación estandarizado.	60
Tabla 3.5-4	Probabilidad de recurrencia.	60
Tabla 3.5-5	Valores del índice de precipitación evapotranspiración estandarizado....	64
Tabla 3.5-6	Probabilidad de recurrencia.	65
Tabla 3.6-1	Ejes de formulación del PEGH	68
Tabla 3.6-2	Ficha resumen identificativa de las acciones del plan.....	73
Tabla 3.7-1	Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado.....	76
Tabla 3.7-2	Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC	76
Tabla 3.7-3	Escala de puntuación para evaluación ambiental.....	77
Tabla 3.7-4	Escala de puntuación para evaluación estratégica	77

FIGURAS

Figura 3.1-1	Mapa conceptual de la metodología aplicada	9
Figura 3.2-1	Cambios en la precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 respecto de LB 1985-2015 para cada MCG	17
Figura 3.2-2	Cambio relativo en precipitación media anual proyectada para el período proyectado para el período futuro (2030-2060) respecto al período de línea base (1985-2105), promediado sobre un conjunto de cuencas con información fluviométrica (CAMELS-CL)	18
Figura 3.2-3	Cascada de los Servicios Ecosistémicos basada en Potschin & Haines-Young (2011)	21
Figura 3.4-1	Áreas protegidas chilenas y su grado de homologación de UICN	40
Figura 3.4-2	Ejemplo de Diagrama de Piper	42
Figura 3.4-3	Ejemplo de Diagrama de Stiff	43
Figura 3.4-4	Esquema de un Diagrama Box-Whiskers.....	45
Figura 3.5-1	Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea	51
Figura 3.5-2	Esquema gráfico modelo WEAP	53
Figura 3.5-3	Modelo Conceptual del acuífero en WEAP. Fuente: Manual WEAP	56
Figura 3.5-4	Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar....	61
Figura 3.5-5	Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar....	61
Figura 3.6-1	Esquema de árbol de problemas y soluciones	69
Figura 3.7-1	Esquema de priorización de las acciones.....	82

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

La DGA es el organismo del Estado en Chile encargado de promover la gestión y administración del recurso hídrico, en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente del agua para el consumo humano, producción de bienes y servicios y la conservación del medio ambiente. Actualmente, en un contexto en que la seguridad hídrica y la eficiencia en la gestión del recurso hídrico se imponen como menester, la planificación en esta materia debe tener un enfoque estratégico.

El PEGH cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, promovido por la DGA, compila un portafolio de acciones a diferentes horizontes (corto, mediano y largo plazo), dirigido a los diferentes servicios públicos y actores privados que participan de la gestión del agua, con énfasis en aquellas sobre las que recae la responsabilidad en la propia DGA. El PEGH es una hoja de ruta a través de la cual se aspira a hacer frente a la problemática hídrica de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, con una visión integrada de las relaciones entre los actores en torno al uso, consumo y gestión del recurso hídrico, teniendo presente los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua.

1.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES

El presente Anexo presenta las directrices metodológicas seguidas durante el estudio, abordando los siguientes aspectos y detallados en los capítulos sucesivos:

- Revisión y análisis de antecedentes compilados a lo largo del estudio (Capítulo 2).
- Enfoque metodológico del estudio, considerando aspectos relativos a la caracterización y diagnóstico de la cuenca, procesos aplicados en el modelo hidrogeológico conceptual y el modelo hidrológico superficial, metodología ejecutada en el desarrollo de las actividades PAC, descripción metodológica de evaluación de las iniciativas del Plan, y finalmente, bases seguidas en la generación del SIG (Capítulo 3).

1.3 ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO

A continuación, se especifican los alcances generales del estudio.

1.3.1 Descripción de la cuenca. Localización geográfica

Según lo establecido en las Bases Técnicas del estudio, la descripción de la cuenca consiste en una recopilación de antecedentes alrededor de la cuenca de estudio, con sus principales características geográficas, administrativas, económicas, sociales, y otros aspectos en torno al recurso hídrico y su gestión actual.

El presente estudio tiene alcance a nivel de cuenca; específicamente, se estudia las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, en la región de Antofagasta. El área de estudio se corresponde con la cuenca BNA N° 026 y con los

límites establecidos en la subcuenca DARH N° 0206 "cuencas endorreicas Salar de Atacama". En el acápite 3.2 del presente Anexo F se presenta mayor detalle de la metodología aplicada en la caracterización de la cuenca.

1.3.2 Diagnóstico de la cuenca

Atendiendo a los objetivos específicos del estudio, se elaboró el diagnóstico de la cuenca, atendiendo a los siguientes contenidos:

- Oferta y demanda de agua, actual (2020) y futura (años 2030 y 2050);
- Infraestructura en materia hídrica;
- Institucionalidad y gobernanza; y
- Cartera de acciones, tanto públicas como privadas.

En el presente Anexo F se expone la metodología aplicada para analizar cuantitativa y/o cualitativamente cada uno de los ítems expuestos anteriormente, de forma de tener una "radiografía" de la cuenca de estudio en los puntos indicados, en los acápites 3.2 (infraestructura, gobernanza, entre otros), 3.3 (demanda de agua), 3.4 (oferta de agua).

1.3.3 Modelación Hidrogeológica Conceptual

La modelación hidrogeológica conceptual corresponde a un análisis de la información hidrogeológica disponible en la cuenca de estudio, así como también de la generada en las actividades de terreno, el cual permitió describir la dinámica del flujo subterráneo. Mayor detalle del procedimiento de construcción del modelo se entrega en el acápite 3.5.

1.3.4 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica, en el presente estudio, pretende alcanzar una herramienta que permita visualizar la dinámica de los flujos superficiales de la cuenca de estudio. Mayor detalle del procedimiento de construcción del modelo se entrega en el acápite 3.5.

1.3.5 Participación ciudadana

La metodología aplicada antes, durante y después de la realización de las actividades PAC, las cuales consisten en entrevistas y reuniones con actores relevantes de la cuenca, y que pretenden retroalimentar el diagnóstico y brindar información sobre problemáticas reales; y talleres, con la finalidad, entre otras, de analizar potenciales soluciones en la zona de estudio, se compila en el Anexo I.9 del presente estudio.

1.3.6 Formulación del Plan de Acción

El Plan de Acción tiene como alcance la elaboración de un portafolio con acciones o iniciativas enfocadas en la resolución de las principales brechas y/o problemáticas detectadas en el diagnóstico y reuniones PAC, apoyándose, en caso posible, en el modelo numérico para establecer posibles escenarios de gestión. El PEGH está dirigido tanto a la DGA como a otras instituciones que tengan relación con la materia hídrica de la cuenca. La metodología se detalla en los acápites del 3.6 al 3.9.

1.3.7 Generación del SIG

El proyecto SIG tiene como principales objetivos el generar cartografía de apoyo y hacer análisis espaciales los cuales se ven reflejados en el informe principal y en las coberturas presentadas en la Geodatabase. Todo el detalle del SIG generado y su metodología se encuentra en el Anexo G del presente estudio.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes se enfocó en la búsqueda y el análisis de antecedentes de estudios bibliográficos y otros soportes digitales relativos al objetivo del estudio. Específicamente, lo anterior se aplicó a los antecedentes establecidos en las Bases Técnicas del estudio, complementándose con otros de interés, con foco en estudios propios de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico.

2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Los antecedentes revisados y que han sido consultados en el desarrollo del presente estudio son aquellos compilados en el Anexo E; a cada uno de ellos se le ha realizado una ficha resumen con los principales resultados de interés referentes al objetivo del estudio, las que pueden ser consultadas en el mencionado anexo.

2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE

A partir del análisis realizado durante la generación de las fichas resumen de los antecedentes, y de acuerdo a los objetivos del estudio, se establecieron los principales ejes de interés para la selección de la información relevante: modelación, participación ciudadana y cartera de acciones.

A continuación, se presenta un resumen de los principales antecedentes según la clasificación anterior.

2.2.1 Antecedentes relativos a modelación

Inicialmente se indica un breve resumen de los antecedentes clave para la actividad asociada a la modelación hidrológica e hidrogeológica conceptual. Lo anterior consiste, básicamente, en recopilar los estudios que puedan aportar información técnica relevante para la construcción de los modelos conceptual hidrogeológico e hidrológico.

Respecto a la componente superficial (modelo hidrológico), se elaboró un nuevo modelo implementado en el software WEAP, mientras que para la componente subterránea se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual, con una representación 3D implementada en QGIS.

Entre los estudios analizados se encuentran los presentados en la Tabla 2.2-1:

Tabla 2.2-1 Estudios realizados en cuenca.

Nombre de Estudio	Autor	Año
Servicio Hidrogeológico Integrado División Gabriela Mistral	Amphos 21	2018
Diagnóstico de Aguas Subterráneas en Acuíferos de la II y IV Región	Suez Medioambiente Chile	2017

Nombre de Estudio	Autor	Año
Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del SHAC de cuencas endorreicas Salar Aguas Calientes y Laguna de la Azufrera	DGA	2018
Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del SHAC de cuencas endorreicas Salar de Pajonales	DGA	2018

Fuente: Elaboración propia.

De estas fuentes de información se definieron valores de recarga referenciales para calibrar el modelo WEAP, considerando que no se tiene información fluviométrica en la cuenca.

2.2.2 Antecedentes relativos a PAC

Como conclusión al proceso de revisión de antecedentes relativos a procesos de participación ciudadana, cabe señalar que, de los informes de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, se destacan los listados de los actores sociales que han participado en las diversas iniciativas revisadas. Así mismo, también es de utilidad las metodologías utilizadas para el levantamiento de la información, tanto en talleres como entrevistas a directores y actores relevantes.

Respecto los antecedentes relevantes en aspectos de PAC, en la Tabla 2.2-2 se muestran los principales estudios con dicha componente. El número de referencia, corresponde al orden según Tabla N°1 del Anexo E del presente estudio, donde dichos antecedentes han sido recopilados, analizados y resumidos en fichas.

Tabla 2.2-2 Listado de antecedentes relevantes de PAC

Ref	Documento	Año	Elaborado por	Autor
13	Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta. SIT N° 291	2012	Arrau Ingeniería E.I.R.L	DGA
16	Plan estratégico para la Gestión de Recursos Hídricos Región de Antofagasta. SIT N° 379	2016	Arcadis	DGA
-	Proyecto "Lixiviación de Sulfuros"	2002	CH2M HILL	Minera Escondida
-	Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Gaby	2003	CODELCO	CODELCO
-	Proyecto "Ampliación de Capacidad de Extracción y Procesamiento de Mineral Sulfurado de Minera Escondida"	2008	MWH Chile	Minera Escondida
-	Estudio de Impacto Ambiental. "Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar"	2018	SGA	Compañía Minera Zaldívar

Fuente: Elaboración propia.

De los diferentes documentos revisados para las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, se destacan los listados de actores públicos, privados y comunidades presentes en la Región de Antofagasta en los PEGH-2012 y PEGH-2016 en la Región, así como también, las robustas actividades de participación ciudadana, con alta convocatoria, desarrollada en ambos planes, principalmente en el PEGH de la Región de Antofagasta durante el 2012.

Llama la atención que a pesar de que la Región de Antofagasta concentra una gran cantidad de población indígena, solo se incorporan estas comunidades en los planes de participación ciudadana en los documentos correspondientes al PEGH de la Región de Antofagasta 2012 y Estudio de Impacto Ambiental, de la Compañía Minera Zaldívar 2018.

Cabe mencionar que los proyectos, estudios y planes vinculados a recursos hídricos de la Región de Antofagasta, el componente de participación ciudadana - en general - es bastante escueto. Asimismo, mencionar que no se encontró documentación sobre proyectos, estudios y planes vinculados a recursos hídricos con componente PAC exclusivos en las cuencas de estudio.

En el Anexo I.1 se adjunta el análisis crítico de antecedentes respecto PAC en las cuencas endorreicas de Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico.

2.2.3 Antecedentes relativos a carteras de acciones

Dentro de la revisión de antecedentes, se ha prestado especial atención a aquellos Planes y Estudios existentes que plantearon iniciativas, acciones o medidas en materia hídrica en las cuencas de estudio. Ha sido considerada también la información que ha dispuesto el Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO) a través del portal del Banco Integrado de Proyectos (BIP). En la Tabla 2.2-3 se presenta un resumen de las principales fuentes consideradas. El número de referencia, corresponde al orden según Tabla N°1 del Anexo E del presente estudio, donde dichos antecedentes han sido recopilados, analizados y resumidos en fichas.

Tabla 2.2-3 Listado de fuentes de información relevantes asociadas a carteras de acciones o medidas en materia hídrica

Ref	Fuente de información	Año	Institución o Empresa
37	Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021. Región de Antofagasta	2012	DIRPLAN/MOP
n/a	Banco Integrado de Proyecto (BIP)	2021	MIDESO
n/a	Proyecto en evaluación ambiental (SEA)	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la información contenida en el BIP, esta considera las iniciativas de diversas instituciones formuladoras tales como: Comisión Nacional de Riego (CNR), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Servicio Nacional de Geología y Minería, entre otras.

Respecto a los proyectos mineros, han sido consideradas, aquellas condiciones o exigencias ambientales, relativas al recurso hídrico, fijadas en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) de los proyectos mineros que se vinculan a las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico. Lo anterior comprende las medidas de mitigaciones, reparación y/o compensación, planes de seguimiento y compromisos voluntarios.

2.2.4 Otros antecedentes relevantes

Respecto de otros antecedentes relevantes en la cuenca de estudio, se pueden señalar los siguientes:

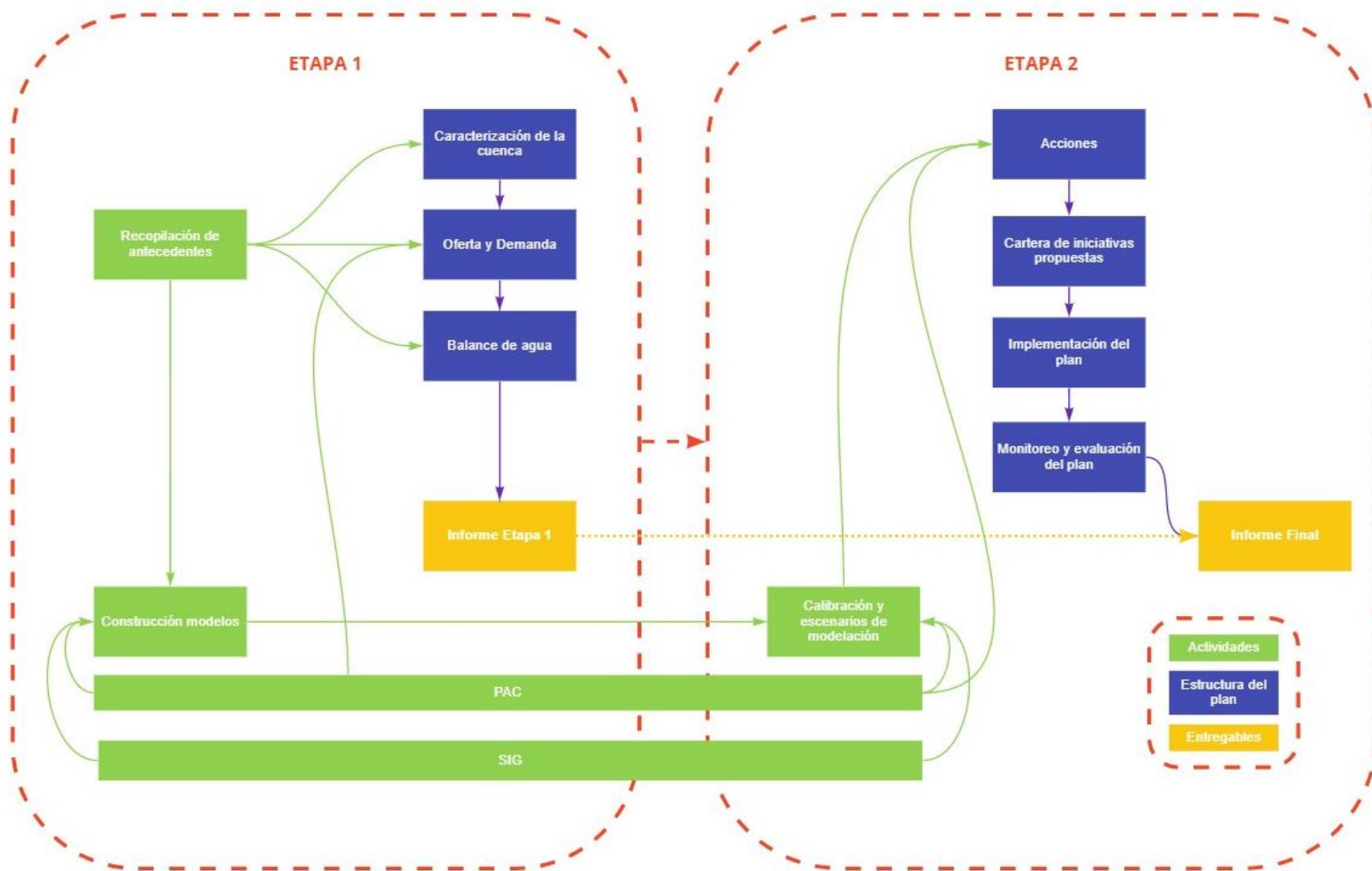
- Causa judicial “Consejo de Defensa del Estado con Minera Escondida”, Rol N.º D-6-2020, interpuesta por el Consejo de Defensa del Estado (CDE): Antecedentes asociados al conflicto socioambiental que provocó el descenso del acuífero del Salar de Punta Negra, resultado de la extracción de agua que efectuó la minera para sus procesos productivos desde 1990 hasta el 2017. En dicho documento se exponen los antecedentes de los aspectos que fundan el daño ambiental causado, correspondientes a la disminución severa de los niveles del acuífero del salar, lo que compromete su regeneración; el deterioro o menoscabo del sustrato salino; la pérdida total o parcial de los bofedales y su vegetación; la pérdida del ecosistema particular del salar; la modificación o pérdida del hábitat lo que afecta a la fauna; la pérdida de servicios ecosistémicos y la pérdida de biodiversidad.

CAPÍTULO 3 ENFOQUE METODOLÓGICO DEL ESTUDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

La base metodológica del presente estudio ha considerado el análisis de múltiples trabajos anteriores e información disponibles. En la Figura 3.1-1 se presenta un mapa conceptual de los temas abordados, con la finalidad de formular el Plan de Acción de la cuenca, presentando las relaciones metodológicas de las temáticas de análisis aplicadas en el estudio.

Seguidamente, se presentan los aspectos metodológicos aplicados en las diferentes componentes contempladas en el estudio según lo indicado en las Bases Técnicas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1-1 Mapa conceptual de la metodología aplicada

3.2 METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La metodología aplicada para elaborar la caracterización de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico se ha basado íntegramente en el análisis de los antecedentes de estudios disponibles. Mayor detalle sobre éstos se compila en el Anexo E, en el que se adjunta una serie de fichas resumen, las cuales han sido de utilidad al momento de compilar y sintetizar la información relativa a la caracterización de la cuenca. Las referencias bibliográficas que sustentan la información se presentan en el Anexo B.

3.2.1 Dimensión física y económica

3.2.1.1 Geomorfología

Con el objetivo de caracterizar la geomorfología de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico se utilizaron fuentes de información secundaria vinculada a la materia. Entre estas fuentes se encuentra la Dirección General de Aguas (DGA) y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

La información contenida en las fuentes antes señaladas fue complementada con la capa “unidades_geomorfológicas” en formato vectorial (SHP) desarrollado por la Universidad de la Frontera (UFRO). La información presentada considera una representación cartográfica de la geomorfología de la cuenca.

3.2.1.2 Geología

Con el objetivo de caracterizar la geología de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, se utilizaron fuentes de información secundaria vinculada a la materia. Entre estas fuentes se encuentra la Dirección General de Aguas (DGA), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Corporación del Cobre (CODELCO), POCH Ambiental y Sánchez & Veloso.

3.2.1.3 Suelos

Con el objetivo de caracterizar los suelos presentes en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico se utilizó la Base de Datos armonizada de Los Suelos del Mundo (HWSD, por sus siglas en inglés) disponible en el portal web de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) <http://www.fao.org/home/en/>.

La Base de Datos armonizada de Los Suelos del Mundo consiste en una base de celdas de 30 arcos segundos incluyendo más de 15.000 unidades cartográficas de suelo a lo que armoniza actualizaciones regionales y nacionales de información de suelos del mundo (SOTER, ESD, Mapa de Suelos de China, WISE) con la información contenida entre la escala de 1:5000 00 del Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO (FAO, 1971-1981).

La base de datos compilados de ráster consiste en 21.600 filas y 43.200 columnas, estas se entrelazan a datos de propiedades de suelo armonizados. El uso de esa estructura permite la asociación de los datos de atributo con el mapa ráster para su ilustración o consultar la estructura en términos de unidades de suelo y la caracterización propiedades del suelo seleccionadas.

Para la clasificación de los suelos presentes en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico se utilizó el área que comprende la cuenca DARH.

3.2.1.4 Drenaje

Con el objetivo de caracterizar la red de drenaje superficial, presente en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico, se utilizó la capa “fuentes_nacional” en formato vectorial (SHP) proporcionada por la DGA. Esta información fue complementada con fuentes secundarias vinculadas a Codelco, Dirección General de Aguas (DGA) y Google Earth. Lo anterior, a fin de reconocer los tributarios y cuerpos de agua más relevantes presentes en la cuenca.

3.2.1.5 División político-administrativa

La delimitación política-administrativa ha sido reconocida a partir de la capa “COMUNAS_2020” que ha dispuesto la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en el centro de descarga IDE Chile y la capa “Subcuencas_DARH” de la Dirección General de Aguas. A partir de ambas fuentes se identificó la comuna en la cual se inserta la cuenca y la superficie en porcentaje que abarca la cuenca respecto de las comunas de Antofagasta y Sierra Gorda.

3.2.1.6 Demografía

Con el objetivo de describir las características sociodemográficas de los habitantes de la cuenca, se realiza una identificación y caracterización de la población, a partir de los datos del Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2018).

Para lo anterior, se utilizan los registros *shapefile* proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) sobre la población efectivamente censada; a partir de estas, se realiza la selección de entidades rurales para cada comuna, dentro de los límites de la cuenca. En el caso de que parte de las entidades queden geográficamente fuera de la cuenca, se divide el objeto mediante la intersección con la cobertura de cuenca y, a continuación, se pondera la población total de la entidad con las nuevas áreas generadas. Finalmente, el número de habitantes estimado anteriormente, se modifica de acuerdo a la ubicación de asentamientos observados en imágenes satelitales, proporcionadas por el software Google Earth© (última visita: 01 de octubre de 2021) y según el tipo de localidad de acuerdo a su clasificación INE: asentamiento minero (zona de alta productividad) y otros. La identificación espacial y los datos poblacionales registrados por el censo, permiten determinar la distribución territorial y el número de habitantes por comuna que habita al interior de la cuenca.

La proyección de la tasa de crecimiento poblacional se basó en la metodología utilizada en el trabajo “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile” (DGA, 2017b). Las tasas registradas, se proyectan utilizando una tendencia exponencial hasta el año 2050, mediante la función “CRECIMIENTO” de Excel. Una vez obtenidas las tasas anuales de crecimiento proyectadas, estas son aplicadas al número de habitantes

por comuna estimados y así se obtiene el número de habitantes dentro de la cuenca a los años 2020, 2030 y 2050.

La información referente a densidad de población, distribución por edad y nivel educacional, se sintetizó directamente de la información comunal entregada por el Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2018).

3.2.1.7 Actividad económica

La identificación de las actividades económicas de interés para la cuenca y la gestión de recursos hídricos, se realizó a partir de los registros históricos del Producto Interno Bruto (PIB) regional, los que se obtuvieron desde la base de datos estadísticos en línea del Banco Central (BC, 2021). URL: [en línea] <<https://si3.bcentral.cl/>> [consulta: 30 de sept. 2021].

Asimismo, los niveles de empleabilidad regionales y por actividad económica se extrajeron desde el repositorio de datos estadísticos en línea, administrado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2021b). URL: [en línea] <<https://stat.ine.cl/>> [consulta: 30 sept. 2021].

La información pertinente a las exportaciones regionales, se obtuvo desde los boletines informativos "Exportaciones", generados por INE Regiones, correspondiente al periodo de ENERO 2021 (INE, 2021a). URL: [en línea] <<https://regiones.ine.cl/>> [consulta: 30 sept. 2021]

Para la caracterización de las actividades económicas de importancia se utilizaron los siguientes antecedentes:

- Actividad Minera:

- Ministerio de Minería (MINMINERIA), 2021. Mapa Faenas de Chile. [en línea] <<https://www.mineriaabierta.cl/mapa/es>> [consulta: 30 sept. 2021].
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2021. Mapa instalaciones mineras. [en línea] <<https://portalgeominbeta.sernageomin.cl/>> [consulta: 30 sept. 2021].
- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), 2021. Proyectos sector minería con información de localización validada para la región de Antofagasta e Interregional. [en línea] <<https://www.sea.gob.cl/>> [consulta: 30 sept. 2021].

- Actividad Industrial:
 - Boletín de exportaciones (INE), 2021. Región de Antofagasta, edición N°67. [en línea] <<https://www.regiones.ine.cl/https://www.regiones.ine.cl/>>
- Otras actividades de interés:
 - Zonas de Interés Turístico (ZOIT) (SERNATUR), 2020. ZOIT declaradas bajo Ley N°20.423, Decreto N°30. [en línea] <<http://www.subturismo.gob.cl/>>

3.2.2 Clima

3.2.2.1 Caracterización climática

Con el objetivo de caracterizar el clima en la cuenca se utilizó la capa "Koppen_30_nov_2016" en formato vectorial (SHP) escala 1:1.500.000 que el Departamento de Geografía de la Universidad de Chile ha dispuesto en el centro de descarga IDE Chile (<https://www.ide.cl/>). Dicho mapa, representa los 25 tipos de clima que posee Chile según Sarricolea et al. (2017) usando la clasificación climática de Köppen-Geiger, en formato *shapefile*, y realizado sobre cubiertas de temperatura y precipitación mensual de 1 km² de resolución. La precipitación (pp) representa el promedio de precipitación por el tipo en toda su distribución espacial, al igual que la temperatura. La altitud (min y máx) son los extremos altitudinales en que se sitúa el tipo climático. Para los fines de este estudio, el análisis fue limitado al área que comprende las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico.

Por otro lado, como explica la ejecución del Subanexo H-1 de Diagnóstico Meteorológico, la cuenca en estudio no posee registros de clima vigentes que puedan servir para efectos de caracterización climática, teniendo que ejecutarse la validación de los productos meteorológicos en estaciones fuera de la cuenca con elevaciones y regímenes climáticos similares.

Por ende, la caracterización se hizo en 2 fases: (i) mediante el análisis de la información meteorológica de la cuenca (quebrada guanaqueros), (ii) el análisis y aplicación de la metodología de CORFO (2018), para la construcción del índice de ubicación altura (IUA) para la cuenca en estudio, (iii) comparando el producto grillado de precipitación del balance (DGA, 2018) y (iv) mediante la validación del clima en estaciones cercanas pero fuera de la cuenca, sólo para propósitos comparativos.

En este sentido, las forzantes meteorológicas consideradas hasta el año 2015 corresponden a las forzantes de la Etapa II de la actualización del Balance Hídrico (DGA, 2018), y que fueron extendidas con el producto CR2MET 2.0 del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el período 2016-2020.

Con esta información completada se procedió a agregar espacialmente la precipitación y temperatura a nivel de subsubcuenca, para cada una de las subcuencas analizadas. Se describen los valores máximos y mínimos de las

variables y su correspondencia con la información levantada de los procesos PAC (Dirección Regional-Hidrología) donde también se ratificó el uso de dicha información. La razón de incluir distintas subsubcuencas fue resaltar la variabilidad de los resultados y la consistencia de las forzantes a nivel espacial.

3.2.2.2 Eventos extremos y variabilidad climática

i. Eventos extremos

Para el análisis de este punto es necesario establecer qué eventos se consideran dentro del análisis, seguido de la resolución espacial de los insumos a utilizar y el rango de tiempo a considerar, tal como se especifica más adelante.

1. Eventos extremos considerados

La base de datos de referencia empleada en este estudio (LA RED, 2014) posee una lista de 36 tipos de eventos predefinidos, cuya selección se basó en la consulta no exhaustiva de diversos diccionarios y glosarios técnicos. En el presente análisis se involucraron solo 4 tipos de eventos, cuya definición queda expuesta en la siguiente Tabla, de acuerdo a lo señalado por (Grupo de Investigación OSSO y La RED, 2009).

Los 4 tipos de eventos fueron seleccionados con el fin de servir como indicadores de lo que ha sido registrado históricamente en la cuenca en materia de exceso hídrico. Para que dichos eventos hayan sido parte de la base de datos, fue necesario que: (i) el desencadenante del evento haya superado un determinado umbral, (ii) exista(n) persona(s) afectada(s), y (iii) exista trabajo periodístico que informe dicha afectación.

Tabla 3.2-1 Eventos y su definición

Evento	Definición
Aluvión	Avenidas torrenciales con arrastre de grandes cantidades de material sólido (guijarros, gravas y bloques de rocas), aplicable a aquellas regiones secas o cauces secos en los que las lluvias ocasionales los producen.
Avenida Torrencial	Flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbito, rápido), o como torrente. Se aplica cuando en los reportes aparece como -avalancha-, cuando la avenida transporta troncos de árboles y/o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca. Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca. Excluye los aludes, porque éstos implican desprendimiento de hielo o nieve.
Inundación	Anegamiento o cubrimiento con agua de un terreno donde se localicen poblaciones, cultivos, bienes o infraestructura
Lluvias	Precipitación pluvial. Incluye lluvias puntuales, persistentes o torrenciales en una región específica, así como períodos largos de precipitaciones

Fuente: Grupo de Investigación OSSO y La RED, 2009.

2. Resolución espacial y periodo de análisis

La base de datos contiene 5 niveles a escala espacial para ubicar un evento determinado, los cuales se indican a continuación:

- Región: Mayor división política utilizada para caracterizar a un evento.
- Provincia: División política intermedia para caracterizar un evento.
- Comuna: División política menor utilizada.
- Sitio: Permite precisar una o varias zonas pobladas y/o infraestructuras que hayan sido afectadas.
- Coordenadas: Cuando el evento se produce en una localidad, pueblo o ciudad específica, es posible incluir coordenadas de referencia.

La información disponible en la base de datos de LA RED (LA RED, 2014) comprende el periodo 1973-2014. Para los fines del presente análisis, se revisó información de prensa en la Biblioteca Nacional de Chile, SERNAGEOMIN (2017), Urrutia & Lanza (1993) y noticias en los portales web de distintos medios de comunicación (escrita, radial, etc.), además de información nacional relacionada con desastres (SUBDERE, 2011). Además, para completar la recopilación de eventos ocurrido durante el año 2014 y extenderla hasta el año 2020, se buscó información de carácter periodístico, utilizando como fuente principal al periódico El Mercurio, el cual posee publicaciones diarias en línea. Esto permitió extender el registro de desastres hasta el periodo 1965-2020.

ii. Variabilidad climática

En este punto se busca representar de manera cuantitativa y gráfica la variabilidad asociada a la precipitación y temperatura bajo escenarios de cambio climático, en comparación con el periodo histórico.

1. Metodología empleada

El análisis se realiza sobre las variables de precipitación y temperatura. Para cada una se analiza el periodo histórico (1979-2015) y futuro (2030-2060), utilizando como registros las series ponderadas a escala de cuenca generadas a partir de los resultados del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). La escala espacial de la información es 5 x 5 km/pixel, mientras que la escala temporal es mensual. La agregación espacial se realiza sumando la información de cada pixel y dividiendo por el total de pixeles de la cuenca. La agregación temporal anual se realiza sumando los valores mensuales para la precipitación, mientras que para la temperatura se considera el promedio de los valores mensuales. Los resultados incluyen:

- Gráficos de las series anual histórica y futuras (para cada modelo de circulación general, o MCG).
- Distribución de los montos anuales para el periodo futuro.
- Distribución espacial de la variable analizada para el periodo histórico y para las diferencias porcentuales proyectadas para el periodo futuro.

Luego de los resultados, se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y coeficientes de variación para cada variable. Se incluye adicionalmente los resultados de la prueba de correlación de Mann-Kendall (*tau* y *p-valor*) para cuantificar la tendencia de la serie anual, así como también la significancia de esta. Cada sección finaliza con un resumen de los resultados presentados, enfocado principalmente en las proyecciones realizadas por los MCGs.

3.2.2.3 Escenarios de cambio climático. Selección de Modelos de Circulación General (MCG)

La selección de los modelos de circulación general (MCG) para este estudio se enmarca en la metodología empleada en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). De acuerdo con dicho documento los modelos que se seleccionaron para el estudio poseen 3 razones fundamentales:

1. Respuesta regional a ambos modos globales de variabilidad climática: Esto considera que también interpretan a las forzantes climáticas: El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio Sur (SAM), ambos asociados a la precipitación.
2. Sensibilidad Climática: El grado de respuesta de los modelos antes las variaciones de temperatura y de concentraciones de CO₂. Hay modelos con distintas sensibilidades.
3. Cambios regionales: Se evaluaron los cambios en las forzantes de precipitación y temperatura para el escenario RCP 8,5 en la ventana 2030-2060 respecto de la línea base. Se buscaron entonces modelos que cubrieran una gama de variaciones.

Siguiendo estos 3 criterios, 4 modelos fueron seleccionados para el estudio, los cuales se presentan en la Tabla 3.2-2. Como se puede ver, los modelos agrupan 4 condiciones de sensibilidad, desde una baja extrema hacia una alta extrema y son ejecutados por centros científicos de diversos lugares en el mundo (USA, Francia, Japón y Australia).

Tabla 3.2-2 MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en (DGA, 2017)

Modelo	Institución	Sensibilidad climática
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CMSA-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Alta extrema

Nota: Corresponde a la Tabla 5.8 de dicho informe.

Fuente: (DGA, 2017).

Dentro de los documentos generados en (DGA, 2018) se encuentra el Anexo F, que resume los cambios en precipitación, temperatura y escorrentía, entre otros, para todas las cuencas "DARH" solicitadas por DGA. Este análisis lo realiza para los 4 MCG, de manera que los tomadores de decisión sean los que evalúen que modelo utilizaron para la evaluación de políticas de gestión.

Dentro de esos resultados, se puede comentar que los cambios de precipitación más severos suelen ocurrir con los modelos IPSL y MIROC. Sin embargo, (DGA, 2017) y (DGA, 2018) también reconoce que los cambios son heterogéneos, habiendo más disparidad en el Norte Grande y Norte Chico. Sólo de la RM hacia el sur dominan las tendencias negativas. En la parte Central de Chile se prevé una disminución de precipitaciones que va desde 5-10% (CSIRO) hasta un 20-25% (IPSL) (Figura 3.2-1).

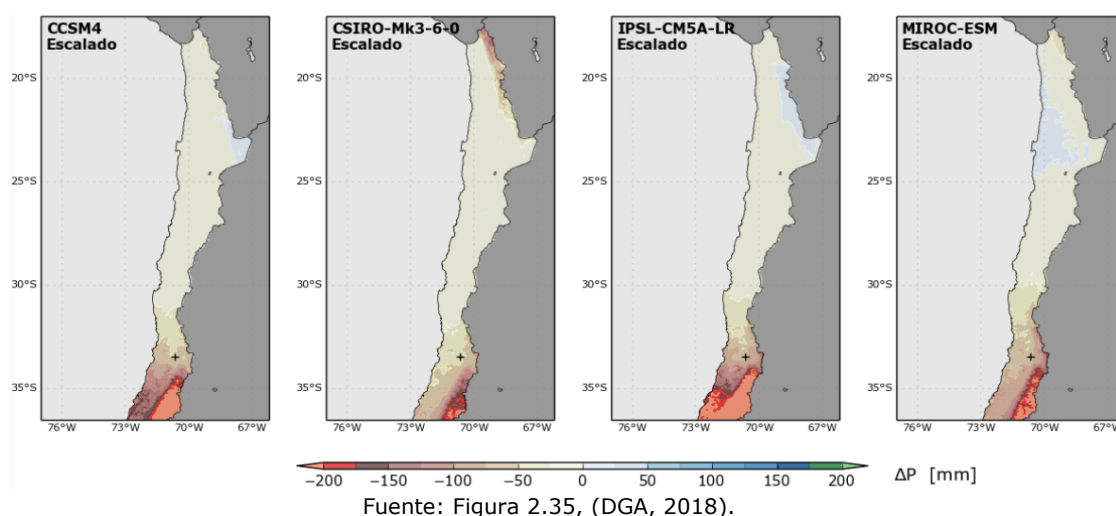
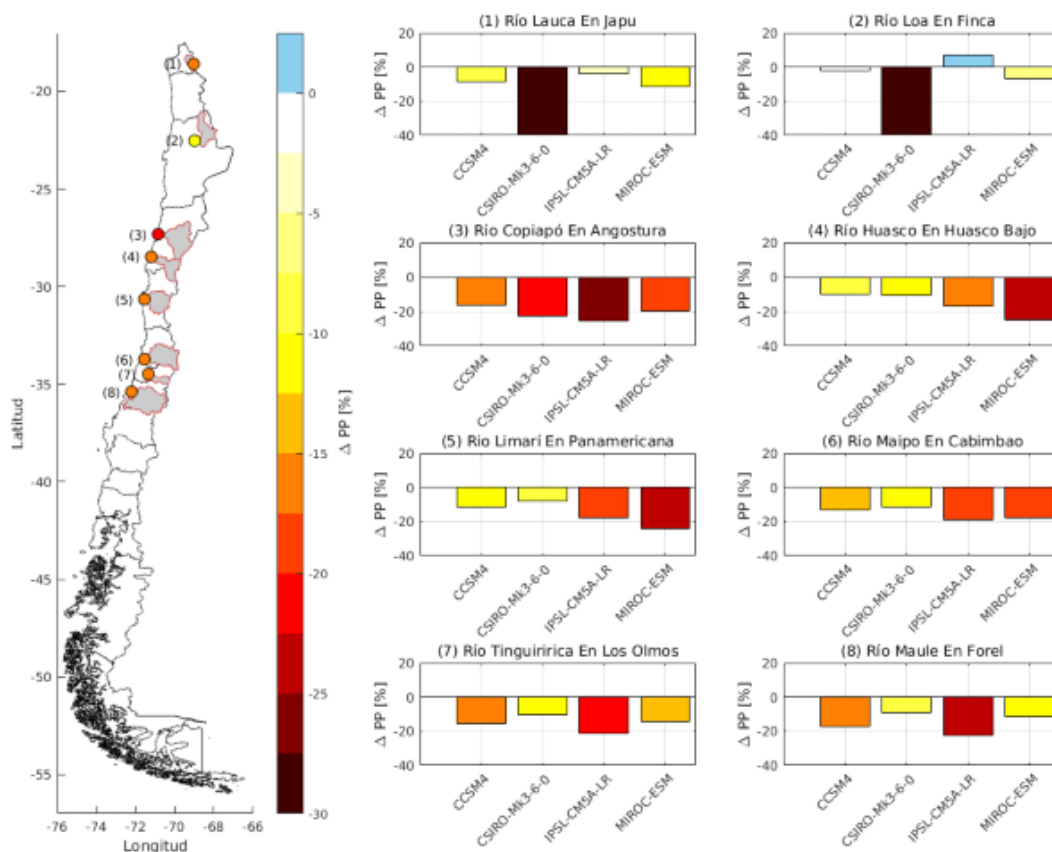


Figura 3.2-1 Cambios en la precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 respecto de LB 1985-2015 para cada MCG

Los cambios a nivel de cuenca son entonces variados conforme se aumenta la latitud no existiendo un único modelo que siempre muestre una tendencia marcada al ascenso o aumento, por ejemplo, de las precipitaciones. En la Figura 3.2-2, se puede ver como en el río Loa en la Finca el descenso más marcado ocurre para el modelo CSIRO, mientras que para el río Copiapó en Angostura, ocurre en el modelo IPSL.



Fuente: (DGA, 2018), Figura 2.37.

Figura 3.2-2 Cambio relativo en precipitación media anual proyectada para el período proyectado para el período futuro (2030-2060) respecto al período de línea base (1985-2105), promediado sobre un conjunto de cuencas con información fluviométrica (CAMELS-CL)

Por tanto, se debe entender que cada cuenca representa un sistema único donde el comportamiento de los modelos MCG escogidos por (DGA, 2017) pueden tener proyecciones muy distintas dependiendo de la ubicación geográfica en que éstos se encuentren. Adicionalmente a esto, se debe superponer el hecho de que la elección del MCG debe ser compatible con el modelo acoplado, particularmente, debe permitir operar el modelo hasta el año 2050, asegurando su convergencia numérica.

Por este motivo, se analizaron los resultados de la modelación hidrológica de la Actualización del Balance Hídrico Nacional; de acuerdo a lo indicado en esta metodología. Conforme al análisis, se seleccionaron dos escenarios de cambio climático a implementarse en el modelo numérico acoplado; considerando las menores variaciones de precipitación y escorrentía para la cuenca estudiada.

La Tabla 3.2-3 presenta un resumen de las variaciones estimadas de precipitación y escorrentía para las cuencas DARH que se presentan en el Anexo F de (DGA, 2018).

Tabla 3.2-3 Resumen de las variaciones porcentuales de precipitación y escorrentía para distintas cuencas estudiadas en DGA (2018a).

Modelo MCG	CSIRO-MK3.6		CCSM4		MIROC-ESM		IPSL-CM5A-LR	
DPp/DEsc	D Pp	D Esc	D Pp	D Esc	D Pp	D Esc	D Pp	D Esc
Cuenca/Ventana	30-60; 85-15	30-60; 85-15	30-60; 85-15	30-60; 85-15	30-60; 85-15	30-60; 85-15	30-60; 85-15	30-60; 85-15
Maricunga	-17%	-10%	-6%	-8%	-19%	-23%	-19%	-29%
Endorreicas Salar de Atacama	-22%	-17%	-12%	-26%	-5%	-5%	-14%	-18%

Fuente: Elaboración Propia en base a Anexo F (DGA, 2018).

De este resumen, se escogen entonces las menores variaciones de precipitación y escorrentía para cada cuenca estudiada, dejando como resultado los MCGs MIROC y IPSL. CSIRO puede ser también una alternativa, pero tiene un mayor descenso en las precipitaciones, lo que puede condicionar la recarga. Lo anterior se debe a que, en caso de escoger modelos que posean una variación mayor para la precipitación y escorrentía, podrían generar para un futuro modelo acoplado el fenómeno de "celdas secas" que tiene como resultado la no convergencia del modelo, debido a la falta de agua circulante a través de los sistemas superficiales y subterráneos acoplados. Sin embargo, dado que el modelo que se persigue es de carácter integrado, con una simplificación en la conceptualización del acuífero, se podrían probar sin mayor perjuicio otro modelo MCG.

A partir de los resultados anteriores, se propone realizar los dos escenarios de cambio climático en los modelos, considerando las forzantes de dichos MCG, y una situación de demanda 2019 replicada hasta 2050, de manera de evaluar las variaciones de la oferta hídrica en los modelos, y verificar el correcto funcionamiento de los modelos acoplados en la situación futura (identificar potenciales secados de celdas, variaciones bruscas de nivel, problemas de convergencia, propios de la eventual variación de la oferta hídrica en las cuencas). A partir de esta revisión se escogió el modelo MCG sobre el cual se evalúan dichos escenarios, tal como muestra la Tabla 3.2-4.

Tabla 3.2-4 Escenarios de cambio climático modelados

Escenarios CC	Periodo	OBS
E1 CC	Abr 1991 - Mar 2050	
Forzantes	Abr 1991 - Mar 2050	BH MCG MIROC
Demandas	Abr 2019 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento
E2 CC	Abr 1991 - Mar 2050	
Forzantes	Abr 1991 - Mar 2050	BH MCG IPSL o CSIRO
Demandas	Abr 2019 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: La elección de los dos modelos depende de aquellos que presenten las menores disminuciones de precipitación y escorrentía.

3.2.3 Dimensión ambiental

3.2.3.1 Unidades ecosistémicas

A continuación, se presenta la metodología aplicada en la caracterización de las principales unidades ecosistémicas identificadas en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico.

i. Ecosistemas terrestres

Con el objetivo de reconocer y definir las principales unidades ecosistémicas presentes en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertientes del Pacífico se consideró la cobertura cartográfica digital de los pisos de vegetación de Chile, provenientes de la Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile de Pliscoff del año 2017 y que el Ministerio del Medio Ambiente ha dispuesto en el centro de descarga IDE Chile (IDE, 2021).

ii. Ecosistemas de aguas continentales

La identificación de los cuerpos de agua presentes en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertientes del Pacífico se realizó a partir de la información contenida en el Inventario Nacional de Humedales que ha dispuesto el Ministerio del Medio Ambientes en su portal web (MMA, 2021b). A partir de esta información, se reconoció la ubicación, tipos de humedales y superficies. La información presentada consideró la identificación y representación cartográfica de los principales humedales presentes en la cuenca.

1. Flora y fauna de los humedales

La identificación de especies de flora y fauna vinculadas a los humedales de las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertientes del Pacífico se realizó a partir de la información que dispone el Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos (SITHA). Esta información permitió reconocer los sistemas vegetacionales, la clasificación de especies de acuerdo a la metodología de la carta de ocupación de tierras (COT), especies dominantes y categoría de conservación. Respecto a la componente fauna, se identificaron las principales especies y su estado de conservación.

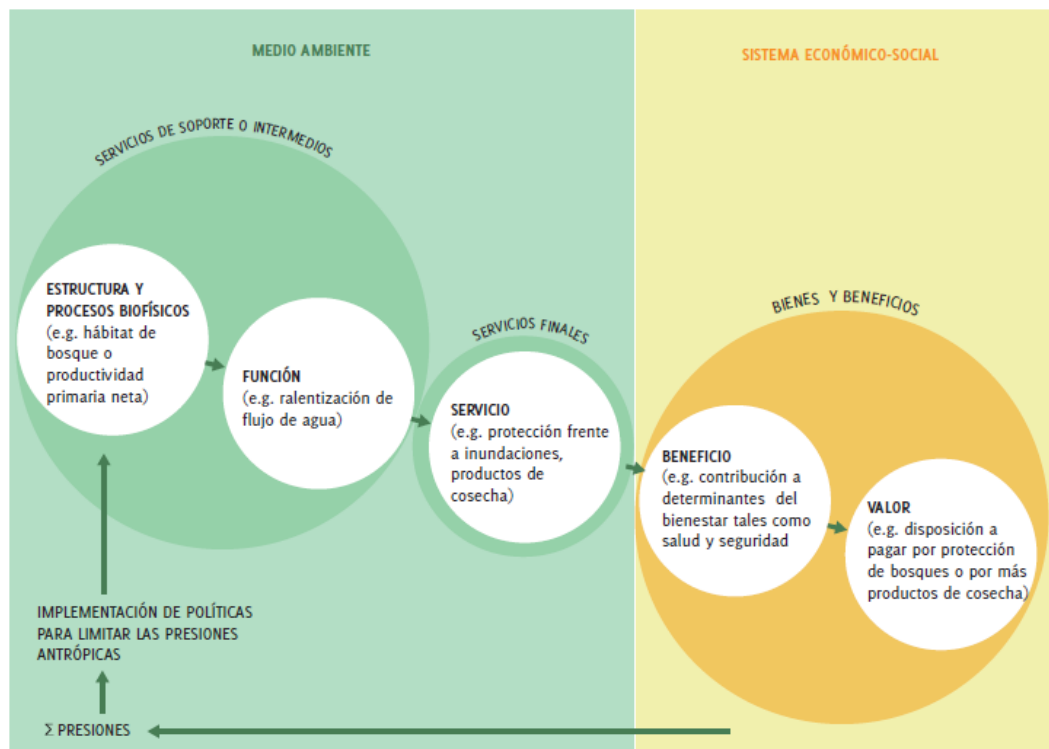
Adicionalmente, se revisó la plataforma web del Inventario Nacional de Especies (MMA, 2021a) y se extrajo la información sobre especies de flora y fauna (reino Plantae y Animalia) descritos para la región de Antofagasta. Luego, se filtraron aquellas especies con estado de conservación en categoría de amenaza, es decir, las categorías Vulnerable (VU), En peligro (EN) y En peligro crítico (CR), además de la revisión de la ficha de cada especie para determinar si su hábitat se encuentra en la cuenca en estudio.

2. Servicios ecosistémicos

• Definición

El concepto de Servicio Ecosistémico ha surgido debido a la preocupación del ser humano por entender el valor de la naturaleza que lo rodea, y de entender cómo el deterioro del entorno natural también afecta a los seres humanos en su vida cotidiana. De esta preocupación, algunos autores han elaborado definiciones con distintas perspectivas del término, a lo largo de los últimos 40 años aproximadamente (MMA, 2019), pero en los últimos 10 años se han incrementado de manera exponencial las publicaciones científicas al respecto (Fisher et al., 2009). Sin ahondar en los detalles de la evolución del concepto, se utilizó para objeto de este estudio la definición adoptada por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Se concibe, entonces, como “servicio ecosistémico” a la “contribución directa o indirecta de los ecosistemas al bienestar humano”. Aquellos de contribución directa son llamados servicios finales, mientras que los que contribuyen indirectamente se les denomina servicios intermedios. El uso de los SS. EE. proveen beneficios tales como nutrición, salud y placer (MMA, 2018).

A modo de entender de mejor manera la estructura y dinámica de los procesos ecosistémicos que ocurren en la naturaleza, el Ministerio del Medio Ambiente adopta como marco conceptual un concepto creado por Potschin & Haines-Young (2011) que se resume como “Cascada de Servicios Ecosistémicos” y se explica por medio de un diagrama (Figura 3.2-3).



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, (2018).

Figura 3.2-3 Cascada de los Servicios Ecosistémicos basada en Potschin & Haines-Young (2011)

La CSA (Cascada de Servicios Ecosistémicos) explica cómo la protección y conservación de los ecosistemas aseguran un flujo continuo de valores y beneficios en el sistema social y económico, revelando el carácter antropocéntrico de la definición, ya que supone que los servicios ecosistémicos toman sentido siempre y cuando exista un beneficiario (MMA, 2018).

- ***Clasificación***

Siguiendo la misma línea del MMA, se utilizó como clasificación de los servicios ecosistémicos la "Clasificación común internacional de Servicios Ecosistémicos" (Potschin & Haines-Young, 2011), el cual se considera el estado del arte en la materia, ya que corresponde a un esfuerzo internacional para acordar una clasificación común de SS.EE, permitiendo así que Chile también aporte en su clasificación (MMA, 2018). La Tabla 3.2-5 sintetiza los tres grupos de servicios ecosistémicos finales (o directos), sus divisiones y grupos involucrados.

Tabla 3.2-5 Clasificación de los Servicios Ecosistémicos según Potschin & Haines-Young (2011)

Sección	División	Grupo	Clase
Aprovisionamiento	Nutrición	Biomasa	Tierras para cultivos
			Crianza de animales y sus productos
			Plantas y algas silvestres y sus productos
			Animales silvestres y sus productos
			Plantas y algas de la acuicultura in situ
			Animales de la acuicultura in situ
	Agua		Agua superficial para beber
			Agua subterránea para beber
	Materiales	Biomasa, fibra	Fibras y materiales de las plantas y algas para uso directo o procesamiento
			Materiales de las plantas, algas y animales para el uso agrícola
			Material genético de toda la biota
		Agua	Aguas superficiales para fines no potables
			Aguas subterráneas para fines no potables
	Energía	Fuentes de energía a base de biomasa	Recursos basados en plantas
			Recursos basados en animales
		Energía mecánica	Energía basada en animales
Regulación y Mantenimiento	Mediación de desechos tóxicos y otros	Mediación por biota	Biorremediación por microorganismos, algas, plantas y animales
			Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación por microorganismos, plantas, algas y animales
		Mediación por los ecosistemas	Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación por ecosistemas
			Dilución por atmósfera, agua dulce y ecosistemas marinos
	Mediación de caudales	Flujos de masa	Mediación de olores / ruidos / impactos visuales
			Estabilización masiva y control de las tasas de erosión
		Flujos de líquido	Amortiguación y atenuación de flujos de masa
			Mantenimiento del ciclo hidrológico y del caudal de agua
		Flujos gaseosos	Protección ante inundaciones
			Protección ante tormentas
	Mantenimiento de las	Mantenimiento del ciclo de vida,	Ventilación y transpiración
			Polinización y dispersión de semillas

Sección	División	Grupo	Clase
	condiciones físicas, químicas y biológicas	protección del hábitat y del acervo genético	Mantener las poblaciones y los hábitats de los viveros
		Control de pestes y enfermedades	Control de pestes
			Control de enfermedades
		Formación y composición del suelo	Procesos de meteorización
			Procesos de descomposición y fijación
		Condiciones del agua	Condición química de las aguas dulces
			Estado químico de las aguas saladas
		Composición atmosférica y regulación climática	Regulación del clima global mediante la reducción de las concentraciones de gases de efecto invernadero
			Regulación climática micro y regional
Cultural	Interacciones físicas e intelectuales con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos [entornos ambientales]	Interacciones físicas y experimentales	Uso experimental de plantas, animales y paisajes terrestres / marinos en diferentes entornos ambientales
			Uso físico de paisajes terrestres / marinos en diferentes entornos ambientales
		Interacciones intelectuales y representativas	Científico
			Educacional
			Cultural y herencia
			Entretenimiento
			Estético
	Interacciones espirituales, simbólicas y de otro tipo con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos [entornos ambientales]	Espiritual y/o emblemático	Simbólico
			Religioso y/o sacro
		Otras interacciones culturales	Existencial
			Legado

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, (2018).

- **Valoración**

Para dar valor a los bienes y servicios que los ecosistemas nos proveen, es necesario relacionar esos bienes con la variación que su ausencia provocan en la sociedad o en las personas individualmente. En este sentido, el valor económico es aquella medición de la variación del bienestar, que puede ser individual o colectivo, en el contexto de escasez en que se desarrollan las actividades humanas. Es decir que, en contextos de escasez, se puede identificar cuánto valoran las personas que viven en determinado lugar un bien o servicio que depende de otro para sumar bienestar de las personas. Esto se puede ejemplificar con la variación de los productos agrícolas cuando hay períodos de sequía u otros factores ambientales que alteran la producción (Figueroa B. et al., 2010).

Existen variados métodos para valorar económicamente los SSEE, siendo el más utilizado el Valor Económico Total (VET) que es la sumatoria de los valores económicos de cada bien o servicio proporcionado por un ecosistema en particular. Este cálculo puede verse afectado por la dificultad en la búsqueda de metodologías e información que permitan saber el valor más acertado de un determinado bien o servicio. Por lo tanto, se debe tener en cuenta esta complicación y las limitaciones que implica. Por ejemplo, la subvaloración de ciertos servicios por la falta de información o por la incapacidad de valorarlos ya que no están sujetos a mercados (Figueroa B. et al., 2010).

Existen variadas técnicas de valoración de servicios ecosistémicos en la literatura internacional y nacional, y su uso depende del servicio que se pretende valorar, si tiene o no mercado, etc. Estos son: precios de mercado, costo de viaje, precios hedónicos, mercados sustitutos, función de producción, valoración contingente, elección contingente, costo de reemplazo, gastos preventivos, costo de oportunidad, y transferencia de beneficios (Figueroa B. et al., 2010).

3. Afecciones a ecosistemas acuáticos

A partir de la información recopilada en las instancias de Participación Ciudadana se identifica el principal conflicto ambiental asociado a la cuenca en estudio, y a partir de eso se acude a fuentes de información que describen el conflicto en cuestión. Los documentos utilizados en la descripción del conflicto corresponden a informes de fiscalización ambiental realizados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), la demanda del Estado a Minera Escondida y el Acta de Conciliación resultante del proceso judicial.

iii. Áreas bajo protección oficial

El reconocimiento de áreas bajo protección oficial y con otras categorías de conservación se realizó a partir del Registro Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) que ha dispuesto el Ministerio del Medio Ambiente en su portal web (<http://areasprotegidas.mma.gob.cl/>).

A partir de la información contenida en la fuente antes mencionada, se tiene que cada área protegida cuenta con un código que la identifica en el Registro Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) del Ministerio del Medio Ambiente. Cada código se

corresponde con una ficha que ha sido anexa al presente estudio (Anexo J.4). En este registro se puede revisar toda la información referente a las áreas protegidas, como su localización, tipo de ambiente, tipo de ecorregión presente, cuencas, categoría o designación, superficie, historia legal, divisiones administrativas, biodiversidad, gestión, categoría de manejo UICN y límites.

La información presentada consideró la identificación y representación cartográfica de las áreas de conservación presentes en la cuenca.

3.2.3.2 Glaciares

En este apartado se identifican los glaciares presentes en la cuenca, utilizando como referencia el Inventario Público de Glaciares (DGA, 2014). También se describen y clasifican los servicios ecosistémicos asociados, según la metodología propuesta en el acápite 3.2.3.1ii.2.

3.2.4 Infraestructura

La metodología seguida en el diagnóstico de la infraestructura hídrica depende en gran medida del nivel de detalle de la información disponible en cada ámbito, en relación con las obras que potencialmente podrían mejorarse y/o construirse en aras de optimizar la gestión del recurso hídrico.

La identificación y análisis de funcionamiento y estado relativo a la infraestructura se ha organizado en Obras Hidráulicas y Red Hidrométrica.

3.2.4.1 Obras hidráulicas

La identificación de las obras de infraestructura relativas al recurso hídrico que son relevantes para el propósito del estudio, se realizó a partir de la información pública que disponen los distintos organismos del Estado vinculados a la materia, entre los que se destaca la Dirección General de Aguas, la Comisión Nacional de Riego y la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

A partir de la acción antes señalada, se reconoció la existencia de las obras de infraestructura presentes en la cuenca sobre las cuales se realizó la caracterización y diagnóstico. Las obras hidráulicas identificadas corresponde a pozos de extracción de agua.

La caracterización de las obras hidráulicas identificadas, correspondientes a pozos de extracción, consideró el total de pozos presentes en la cuenca y su distribución según sector acuífero.

El diagnóstico de las obras hidráulicas consideró la búsqueda de iniciativas de inversión, tanto públicas como privadas, vinculadas a la temática, así como también los comentarios aportados durante las reuniones PAC del estudio con actores relevantes.

3.2.4.2 Red hidrométrica

El catastro y análisis de la red hidrométrica se dividió en tres secciones, las cuales se detallan a continuación. Adicionalmente, se incluyó una sección final donde se sintetizaron las brechas o barreras identificadas que impactan en la caracterización, organización de la información, interacción entre actores de la cuenca, accesibilidad y carencia de información de monitoreo hidrométrico.

El detalle de la información recopilada se presenta en el Anexo J.5 y se encuentra dividida en dos archivos Excel. Uno contiene la información de la red hidrométrica pública y otro resume las estaciones de la red hidrométrica privada.

i. Red hidrométrica de la DGA

Se accedió al sitio web de la DGA, desde donde se descargaron los *shapefile* que indican la ubicación de todas las estaciones administradas por la DGA. En base a esto, se identificaron las estaciones disponibles en la zona de estudio. A continuación, se descargó la estadística y se analizaron los registros disponibles, con especial énfasis en el periodo de monitoreo, número de registros disponibles, la vigencia de las estaciones, la elevación, las coordenadas de ubicación y el datum.

ii. Red hidrométrica pública de otras instituciones

En base a la experiencia del consultor, se consultaron las bases de datos de monitoreo de diferentes organismos públicos, con el fin de determinar la presencia de estaciones y realizar el mismo análisis realizado para la red hidrométrica de la DGA.

iii. Red hidrométrica privada

Se ingresó al Servicio de Evaluación Ambiental, donde se identificaron estudio y declaraciones de impacto ambiental en la zona de estudio. A continuación, se revisaron los documentos ingresados en cada proyecto, con el fin de recopilar y sintetizar la información disponible de monitoreo, considerando los mismos criterios de análisis que en el caso de la red hidrométrica de la DGA.

3.2.5 Nuevas fuentes de agua

La identificación de nuevas fuentes de agua, existentes en las cuencas endorreicas Salar Vertiente Pacífico, se realizó en base a la información primaria recabada en instancias PAC, y secundaria con contenido asociado a la temática. A partir de la acción antes señalada, se logró identificar lo relativo a:

- Obras o infraestructuras vinculadas a plantas de desalinización.

En cualquier caso, se realizó un diagnóstico con información secundaria sobre este tipo de iniciativas, presentando especial atención a la cartera de acciones existente, tanto a nivel público como privado, así como información proporcionada por los actores relevantes de la cuenca, a raíz de las reuniones PAC.

3.2.6 Gobernanza

A continuación, se presenta la metodología aplicada para el análisis de gobernanza hídrica para las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico.

3.2.6.1 Mapa de agentes

La metodología de desarrollo del mapa de actores se presenta en Anexo I.9 *Metodología PAC*, acápite 3.1.3.2.

3.2.6.2 Brechas de coordinación

Para la definición de brechas de coordinación se realizó una revisión de antecedentes desde fuentes primarias y secundarias; el análisis de dicho material se dividió en 4 temáticas:

- Análisis de Organizaciones de Usuarios de Agua: En este punto se revisó la existencia o ausencia de OUAs en la cuenca, su nivel de funcionalidad y condiciones de conformación.
- Estado actual de coordinación: Considerando la diversidad de actores identificados en el mapa de agentes, esta sección se subdividió en: i) Estado de relación entre usuarios de agua e instituciones públicas; ii) Estado de relación entre usuarios de agua titulares de DAA y usuarios de agua sin DAA; iii) Estado de relación de la DGA con usuarios de agua; iv) Instancias de relación entre actores; y v) Conflictos ambientales.
- Síntesis de brechas de coordinación: En este punto se presenta un resumen de las principales brechas identificadas en el desarrollo de los puntos anteriores.

3.2.6.3 Brechas de información

Al igual que en el apartado anterior, para la definición de brechas de información se realizó una revisión de antecedentes desde fuentes primarias y secundarias; el análisis de dicho material se dividió en 3 temáticas:

- Estado actual de información hídrica: Para este punto se identificaron 2 temas relevantes a analizar: i) Estado actual de información sobre Derechos de Aprovechamientos de Agua (DAA); y ii) Disponibilidad de información hídrica.
- Herramientas de información hídrica: Este apartado se centró en identificar las diferentes herramientas disponibles para el levantamiento de información de relevancia para la gestión del recurso hídrico; asimismo, también se señalaron algunos de los problemas relacionados al uso e implementación de dichas herramientas.
- Síntesis de brechas de información: En este punto se presenta un resumen de las principales brechas identificadas en el desarrollo de los puntos anteriores.

3.2.7 Cartera de acciones

A continuación, se presenta la metodología aplicada para la identificación de iniciativas, acciones o medidas en materia hídrica para las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico.

3.2.7.1 Identificación de acciones e iniciativas en materia hídrica

La cartera de acciones ha considerado iniciativas públicas identificadas en el portal web del Banco Integrado de Proyectos (BIP) y medidas, planes y compromisos voluntarios de proyectos mineros vinculados a la cuenca. El detalle se presenta a continuación.

i. Iniciativas en el Banco Integrado de Proyectos (BIP)

Para el diagnóstico de las acciones e iniciativas de inversión en las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico se consideró la información contenida en el Banco Integrado de Proyectos (BIP) del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO), disponible en línea en la página web del servicio www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl.

La información contenida en la base de datos considera la información de diversas instituciones formuladoras tales como: Comisión Nacional de Riego (CNR), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Servicio Nacional de Geología y Minería, entre otras.

La metodología empleada se basó en la identificación de iniciativas de Estudios, Proyectos y Programas vinculados a los recursos hídricos a nivel de cuenca y a nivel regional e interregional con incidencia en las cuencas en estudio, a fin de considerar iniciativas que, si bien no son exclusivas de la cuenca en estudio, tiene alguna incidencia sobre esta. Para esto se hizo una selección de iniciativas conforme a los siguientes criterios:

- Identificación de iniciativas a nivel de cuenca
- Iniciativas en periodo 2021-2030.
- Iniciativas vinculadas al recurso hídrico.
- Iniciativas vinculadas exclusivamente a las cuencas en estudio.

- Identificación de iniciativas a nivel regional e interregional
- Iniciativas en periodo 2021-2030.
- Iniciativas vinculadas al recurso hídrico.
- Iniciativas con incidencia en las cuencas en estudio.

Cabe mencionar que en ambos casos se debió revisar las fichas IDI, que resumen los antecedentes de la iniciativa de inversión postulada, a fin de identificar y corroborar la localización geográfica de estas.

El detalle de la información se presenta en el Anexo J.11, el cual contiene las bases de datos obtenidas y su sistematización. Se entrega en dicho anexo cada una de las fichas IDI de las iniciativas consideradas en el diagnóstico.

ii. Medidas, planes y compromisos voluntarios de proyectos mineros

Han sido consideradas, como parte de la cartera de acciones, aquellas condiciones o exigencias ambientales, relativas al recurso hídrico, fijadas en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) de los proyectos mineros que se vinculan a las cuencas endorreicas Salar de Atacama – Vertiente del Pacífico. Lo anterior comprende las Medidas de mitigaciones, reparación y/o compensación, planes de seguimiento y compromisos voluntarios. La información ha sido recopilada en el Anexo J.11 del presente estudio.

3.3 METODOLOGÍA APLICADA EN LA DEMANDA FÍSICA Y LEGAL DE RECURSOS HÍDRICOS PARA DIFERENTES USOS

En el presente acápite, en primer lugar, se presenta la metodología para estimar las demandas de agua para los diferentes sectores productivos, así como otros usos del agua; y seguidamente, se aborda el análisis de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) otorgados en la cuenca y su mercado de aguas.

Por su parte, los resultados de la estimación de la demanda de agua actual y proyección de demanda futura, para los diferentes usos y/o consumos productivos y otros, se presenta en el Capítulo 3 del Informe Final. Además, se incluyen los resultados del análisis de DAA por demanda y/o uso, y se complementa con el análisis del mercado de aguas realizado en la cuenca.

3.3.1 Estimación de demanda hídrica actual y proyección futura

Las demandas del sistema se componen principalmente por las requeridas por las mineras Gaby (CODELCO) y Minera Escondida Limitada y por los humedales presentes en la cuenca (demanda ambiental).

Para la demanda minera, se utilizó información histórica de operación de pozos de ambas mineras. En caso de no poder conseguir esa información, se adoptaron los supuestos correspondientes para obtener un valor razonable de extracciones.

En el caso de la demanda ambiental se calcula la evapotranspiración de acuerdo con las ecuaciones presentadas en el acápite 3.3.1.7i.

3.3.1.1 Agua potable urbana y/o rural

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda de agua potable urbana ni rural.

3.3.1.2 Agrícola

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda agrícola.

3.3.1.3 Pecuario

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda pecuaria.

3.3.1.4 Minería

A continuación, se describe la metodología aplicada para la estimación de la demanda hídrica actual y futura de la actividad minera que se vincula con la cuenca en estudio.

i. Identificación de las faenas mineras vinculadas a la cuenca

Para estimar la demanda actual y futura del sector minero en las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico fue necesario identificar las faenas mineras que actualmente extraen el recurso hídrico desde la cuenca, así como también, la existencia o no de futuros proyectos mineros que podrían considerar utilizar el agua disponible en ella.

Las faenas mineras consideradas en el análisis fueron reconocidas a partir del cruce de la información contenida en las siguientes referencias:

- Base de datos de DAA constituidos en la cuenca: Aplicado para reconocer los solicitantes de los DAA constituidos en la cuenca. Disponible en Anexo J.8.1 del presente estudio.
- Información catastral actualizada, aportada por el SERNAGEOMIN: Aplicado para efectuar la ubicación georreferenciada de las faenas mineras activas al año 2020.
- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): Aplicado para reconocer futuros proyectos a ejecutarse en la zona y que tengan vínculo respecto de la extracción del recurso hídrico en las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico.

A partir del cruce de la información contenida en las referencias antes mencionadas, se identificaron las actuales operaciones mineras y futuros proyectos mineros en la cuenca.

ii. Estimación de la demanda hídrica de las faenas mineras identificadas

La demanda hídrica actual y futura de las faenas mineras identificadas a partir de la acción antes señalada, fue estimada a partir del cruce de la información contenida en las siguientes fuentes:

- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): Aplicado para la obtención de información referida a consumos de agua de proyectos mineros que hayan ingresado al Sistema de Evaluación Ambiental.
- Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE): Aplicado para la obtención de información referida al consumo de agua actual (año 2020) de los proyectos mineros en operación.
- Reunión PAC realizadas en el marco del presente estudio: Proporciona información sobre los siguientes aspectos:
 - ✓ Estimación de periodos de extracción.
 - ✓ Estimación de inicios de operación y periodos de operación de proyectos actuales y futuros.

A partir del cruce de la información antes indicada se determinó la demanda actual de la operación y su proyección futura.

De acuerdo a la revisión de antecedentes, en el área de estudio actualmente existen 2 faenas mineras en operación que extraen aguas subterráneas desde la cuenca. Estas corresponden a las faenas mineras Gabriela mistral de CODELCO y Minera Escondida de BHP Group y otros.

La demanda hídrica actual de la faena minera Gabriela Mistral de CODELCO fue estimada a partir de la información contenida en los informes de monitoreo asociados al Plan de Alerta Temprana para los acuíferos de Elvira-Laguna Seca y Los Morros. Para esto, se consideró como periodo de demanda actual el año hidrológico que comprende el periodo abril del año 2020 a marzo del año 2021.

Respecto a la demanda hídrica actual de la faena minera Escondida de BHP Group y otros, esta fue estimada a partir de la información que dispone la DGA a través de su portal web, en el "Modulo de Consulta Pública de Extracciones". Para esto, se consideró como periodo de demanda actual el año hidrológico que comprende el periodo abril del año 2020 a marzo del año 2021.

Respecto a las demandas futuras (años 2030 y 2050), de la faena minera Gabriela Mistral, se estima nula, esto dado que, de acuerdo al Plan de Cierre Faenas Mineras (Ley N° 20.551) aprobado por SERNAGEOMIN, el término de la operación sería en el año 2026. Por su parte Minera Escondida declaró el cese de la extracción de agua para fines operacionales desde acuíferos alto andinos el 31 de diciembre de 2019. Actualmente opera solo con agua desalinizada.

La información antes mencionada fue confirmada y rectificada por los principales titulares de los proyectos que participaron en instancias PAC desarrolladas en el marco del presente estudio.

iii. Presentación de resultados de la demanda hídrica del sector minero

Los resultados de demanda hídrica del sector minero presentan la demanda actual 2020 (como año hidrológico) y la demanda futura a los años 2030 y 2050 distribuida por faena minera.

Los antecedentes en detalle del análisis de demanda minera son presentados en el Anexo J.7.1 del presente estudio.

3.3.1.5 Industrial

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda industrial.

3.3.1.6 Generación eléctrica

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda eléctrica.

3.3.1.7 Demanda ambiental y caudal de protección ambiental

En este punto se presenta la metodología aplicada para estimar la demanda evapotranspirativa de los humedales presentes en las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico, como aquella aplicada para determinar un caudal de protección ambiental.

i. Demanda evapotranspirativa de los humedales

Para poder determinar la evapotranspiración de los humedales presentes en la zona de estudio, se utilizó la siguiente expresión:

$$EVT = ET_0 \cdot k_c \cdot A \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

EVT: Evapotranspiración del humedal.

k_c : Coeficiente de cultivo.

ET_0 : Evapotranspiración de referencia, donde se utiliza el producto grillado del Balance Hídrico (DGA, 2018).

A: Área de humedal.

Para los coeficientes de cultivo, se utilizaron preliminarmente los valores presentados en Salazar et al (1999), los que se presentan en la Tabla 3.3-1.

Luego, a partir del modelo elaborado en WEAP se obtienen los valores de EVT real de acuerdo con el balance hídrico calculado sobre cada humedal.

Tabla 3.3-1 Coeficientes de cultivo

Mes	Kc vega	Kc bofedal
Enero	0,63	1
Febrero	0,63	1
Marzo	0,63	1
Abril	0,56	1
Mayo	0,41	1
Junio	0,41	1
Julio	0,41	1
Agosto	0,56	1
Septiembre	0,56	1
Octubre	0,56	1
Noviembre	0,63	1
Diciembre	0,63	1

Fuente: Salazar et al (1999).

Los humedales se modelan en WEAP utilizando Catchments que calculan el balance hídrico en cada unidad bajo el esquema del Coeficiente Simplificado. Además, topológicamente el humedal se abastece con prioridad 1 desde los elementos

acuíferos asociados y, en segunda instancia, desde cauces superficiales. Además, cada uno de estos catchments realizan sus cálculos de manera autocontenida, a saber, dependiendo solo de las forzantes históricas o futuras. El detalle de la implementación en el modelo se debe consultar en el Anexo H del presente estudio.

ii. Caudal de protección ambiental

No ha sido posible determinar un caudal de reserva para protección ambiental en las áreas de conservación denominadas Parque Nacional “Llullaillaco” (WDPA-030) y Sitio Ramsar “Aguas Calientes IV” (RAM-010), por la falta de registros estadísticos de los flujos de agua asociados a dicha área.

3.3.1.8 Uso turístico

Dadas las características de la cuenca, identificadas a partir del análisis de información, no existen Zonas de Interés Turístico (ZOIT).

3.3.2 Análisis de DAA y mercado de DAA

A continuación, se describe el proceso metodológico para el análisis diagnóstico de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) otorgados por la DGA, incluyendo las solicitudes de cambio de puntos de captación y para el análisis del mercado de los DAA en las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico. El diagnóstico se estructura, por tanto, en dos partes, con el siguiente detalle:

- Recopilación, análisis y sistematización de la información asociada a los DAA.
- Solicitudes de cambio de punto de captación
- Análisis del mercado de los DAA.

Los resultados y análisis, a nivel de las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico, se presentan en los puntos siguientes:

- Acápites 4.1.6 del Informe Final: DAA superficiales concedidos
- Acápites 4.2.5 del Informe Final: DAA subterráneos concedidos
- Acápites 3.4.2 del Informe Final: Derechos de agua para la minería
- Acápites 3.8 del Informe Final: Mercado de aguas

3.3.2.1 Recopilación, análisis y sistematización de la información asociada a los DAA

Para el análisis de los DAA constituidos en las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico, se utilizó el Catastro Público de Aguas que la DGA dispone en su sitio web, actualizado al 26 de septiembre de 2021. Esta información ha sido complementada y contrastada con la base de datos “DAA_cuenca_026” (DGA, 2021) facilitada en el marco del presente estudio por la Inspección Fiscal de la DGA. Del cruce de datos entre las fuentes antes mencionadas, se verificó la información existente y actualizó aquellos registros que carecían de información.

Los pasos realizados para el análisis y sistematización de la información se detallan a continuación:

1.- Se revisó la información de DAA contenida en la base de datos proporcionada por la DGA, la cual debió ser contrastada y complementada con la información disponible en el CPA. En base a esto, se cuantifico el total de "DAA otorgados" y "Caudal" (l/s).

2.- Se cuantificó el total de DAA y Caudal en función de las siguientes variables:

- Naturaleza del DAA, esto es, superficial o subterráneo.
- Tipo de solicitud, esto es:
 - ✓ Derechos de Aprovechamiento (ND) (artículos 130 y siguientes del Código de Aguas).
 - ✓ Derechos de Usuarios Antiguos (UA).
 - ✓ Cambio punto de captación (VPC).
- Ejercicio del derecho solicitado, esto es, consuntivo o no consuntivo.

3.- Por último, en base al cruce de información descrito, se generó una cobertura SIG en formato *shapefile* para cada cuenca en estudio con información relativa a cada DAA.

Los atributos que componen los *shapefile* de DAA son todos aquellos registros disponibles en las bases de datos antes mencionadas. Esto con el objetivo de no eliminar información que pudiese ser requerida en futuros análisis.

A partir de las coberturas descritas anteriormente, se generó una figura con la distribución en cada cuenca de los DAA superficiales y subterráneos.

3.3.2.2 Solicitudes de cambio de punto de captación

De acuerdo a la revisión de antecedentes no se identifican solicitudes de Cambio de Punto de Captación (VPC) en trámite.

3.3.2.3 Análisis del mercado de los DAA

Para el diagnóstico del Mercado de los DAA en las cuencas endorreicas Salar de Atacama-Vertiente del Pacífico se consideró la información contenida en la base de datos que dispone la DGA y que registra las transacciones informadas por los Conservadores de Bienes Raíces (CBR). Disponible en línea en la página web del servicio <https://snia.mop.gob.cl/ciudadaniacbr/>.

Con el objetivo de complementar la información que disponen los CBR a través de la DGA, se utilizó el Catastro Público de Aguas (CPA). Disponible en www.dga.cl, en su módulo de "Información de Recursos Hídricos", en la sección de "Registro Público de Aprovechamiento de Aguas" y, la Base de datos "DAA_SUP_SUB", facilitada en el marco del presente estudio por la Inspección Fiscal (IF) de la DGA.

Respecto de las fuentes antes mencionadas, para el análisis se consideró como esencial del CPA, y de la base de datos facilitada por la Inspección Fiscal, todo lo concerniente a la identificación de los derechos originales, su ubicación y respectivos derechos transados (actuales).

En base a lo anterior y con el objetivo de caracterizar cada una de las transacciones antes identificadas, en relación al tipo de transacción, evolución, tendencia y estacionalidad de precios, se procedió a reconocer dichas transacciones en la base de datos "Inscripciones de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en Conservadores de Bienes Raíces" de la comuna de Antofagasta. Para esto se estimó como punto de encuentro, entre las bases de datos del CBR, CPA e IF, los registros que singularizan una inscripción en el CBR, esto es: N° de Foja, Foja y Año de Inscripción en el CBR.

Los resultados de este análisis se presentan en el acápite 3.8 del Informe Final.

Complementario a lo anterior, se presenta como resultado del análisis los antecedentes que dan cuenta de la falta de información requerida para el análisis.

3.4 METODOLOGÍA APLICADA EN LA OFERTA HÍDRICA

Respecto de la oferta, se abordan en este apartado la metodología seguida en el diagnóstico de las fuentes superficiales, subterráneas y glaciares, a nivel de identificación, división administrativa y restricciones vigentes en torno al uso del agua. Seguidamente, se presenta la metodología de estimación de la oferta en la fuente (aguas superficiales) y cálculo de recargas del modelo WEAP, para posteriormente exponer la metodología aplicada en el diagnóstico de la calidad de las aguas. Finalmente, se presentan los pasos seguidos en el análisis de los derechos concedidos.

3.4.1 Fuentes

3.4.1.1 Identificación de fuentes

La identificación de fuentes superficiales y subterráneas ha sido realizada a partir de fuentes de información secundarias vinculadas a la materia. Entre estas fuentes se encuentra la Dirección General de Aguas (DGA), el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), el Ministerio de Agricultura (MINAGRI), además de otros estudios desarrollados por empresas mineras y diversos autores.

Respecto a las fuentes superficiales, han sido reconocidos los tributarios y cuerpos de aguas más relevantes dentro de la cuenca. La información presentada considera además una representación cartográfica de la hidrografía de la cuenca. Respecto a las fuentes subterráneas se presenta una breve descripción del comportamiento hidrogeológico de la cuenca, que se encuentra con mayor detalle en el anexo H.

3.4.1.2 División administrativa

Los límites administrativos superficiales han sido reconocidos a partir de la clasificación de cuencas hidrográficas BNA (Banco Nacional de Aguas) y de la clasificación de cuencas hidrográficas DARH (Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA). De esta manera, los límites fueron reconocidos a partir de las capas, en formato vectorial (SHP), "Subcuenca_BNA", "Subsubcuenca_BNA", "Cuencas_DARH_Subcuencas" y "Cuencas_DARH_Subsubcuencas". A partir de las capas antes mencionadas se identificó la superficie que abarca la subcuenca y las subsubcuencas que la conforman. La información presentada considera además una representación cartográfica de dichos límites.

Resto a la delimitación administrativa subterránea, se utilizó la capa "Acuíferos_SHAC" que dispone la Mapoteca DGA. A partir de esta información se ha reconocido la superficie que comprende cada uno de los sectores acuíferos de la cuenca. La información presentada considera además una representación cartográfica de dichos límites.

3.4.1.3 Restricciones al uso

Se ha indagado sobre las restricciones al uso de agua existentes en la cuenca en sus diferentes figuras, dictadas por la administración pública. Los resultados de esta

recopilación y análisis se presentan en el acápite 4.1.1.3 del Informe Final (relativo a restricciones de uso de fuentes superficiales) y en el acápite 4.2.1.3 del Informe Final (relativo a restricciones de uso de fuentes subterráneas).

A continuación, se detallan cada uno de estos casos considerados.

- **Declaración de agotamiento de aguas superficiales**

La declaración de agotamiento es un instrumento que dispone la DGA, facultad establecida en el Artículo 282 del Código de Aguas, para señalar que, en la fuente natural de agua superficial respectiva, sea un río, lago, laguna u otro, se agotó la disponibilidad del recurso hídrico para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales de tipo consuntivo y ejercicio permanentes. Esta declaración no impide la constitución de nuevos derechos de tipo no consuntivo o consuntivo de ejercicio eventual.

- **Áreas de restricción de aguas subterráneas**

La declaración de área de restricción de aguas subterráneas (Código de Aguas 1981, Artº 65) es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero. Una vez emitida esta declaración, la DGA sólo podrá otorgar derechos de aprovechamiento con carácter provisional.

- **Zonas de prohibición de aguas subterráneas**

La declaración de zona de prohibición (Código de Aguas 1981, Artº 63) es un mecanismo mediante el cual la Dirección General de Aguas protege la sustentabilidad de un acuífero. Esta declaración, a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento.

- **Zonas de conservación**

Las zonas de conservación bajo protección oficial son las consideradas “áreas protegidas”. Las áreas protegidas a nivel nacional son “porciones de territorio, delimitadas geográficamente y establecidas mediante un acto administrativo de autoridad competente, colocadas bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza o conservar el patrimonio ambiental”. En la Figura 3.4-1 se muestra las áreas protegidas y su grado de homologación de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). Además de las indicadas en dicha figura, a nivel internacional, existen otras figuras de conservación presentes en Chile: los Sitios Ramsar y las Reservas de la Biosfera.

Área Protegida / Categoría UICN	Ia	Ib	II	III	IV	V	VI
Parque Marino							
Reserva de Regiones Vírgenes							
Parque Nacional							
Monumento Natural							
Santuario de la Naturaleza							
Reserva Forestal							
Reserva Nacional							
Reserva Marina							
Áreas Marinas Costera de Múltiples Usos							

Fuente: MMA (2020).

Figura 3.4-1 Áreas protegidas chilenas y su grado de homologación de UICN

- **Decretos de reserva**

El Decreto de Reserva es una facultad del presidente de la República que permite, a través de un decreto fundado, reservar el recurso para el abastecimiento de la población por no existir otros medios para obtener el agua, o bien, tratándose de solicitudes de derechos no consuntivos y por circunstancias excepcionales y de interés nacional; esta facultad está establecida en el Artículo 147 bis inciso 3° del Código de Aguas. Para lo anterior, es posible disponer la denegación parcial de solicitudes de derechos de aprovechamiento en tramitación.

- **Decretos de escasez hídrica**

Los decretos de escasez, facultad establecida en el Artículo 314 del Código de Aguas, se dictan con el objeto de proveer determinadas herramientas a usuarios del agua y a la población en general para reducir al mínimo los daños derivados de la sequía. Básicamente permiten a la DGA redistribuir las aguas disponibles en las fuentes naturales, en caso que no exista acuerdo entre los usuarios, y autorizar extracciones de aguas superficiales o subterráneas sin necesidad de constituir derechos de aprovechamiento de aguas, entre otras.

El Decreto de Escasez Hídrica del MOP no provee recursos económicos, y es independiente de atribuciones de otros Servicios, como la Declaración de Emergencia Agrícola del Ministerio de Agricultura, que sí considera aportes económicos; o la Declaración de Zona de Catástrofe por Escasez Hídrica del Ministerio del Interior, siendo efectivamente esta última declaración la que permite la contratación de camiones aljibes.

3.4.2 Oferta en la fuente (aguas superficiales)

La oferta hídrica se determinó a partir de los resultados de los modelos numéricos, considerando nula demanda. La información de caudal generado como oferta natural del sistema se presenta para las estaciones fluviométricas de cada cuenca.

Para la generación de la oferta histórica y futura, se ha considerado tomar los siguientes criterios:

- Oferta periodo histórico: promedio entre 1991 y 2020;
- Oferta periodo futuro: promedio entre 2021 y 2050;

Para mayor detalle de la obtención de la oferta hídrica en la cuenca, ver apartado relativo a Modelación Hidrológica (acápite 3.5 del presente Anexo F).

3.4.3 Recarga de sistema superficial al subterráneo

Con el modelo WEAP calibrado, se contó con valores mensuales de recarga superficial a los sectores acuíferos del sistema subterráneo definidos según los análisis correspondientes a la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico.

3.4.4 Calidad de las aguas

Seguidamente se expone la metodología aplicada en el diagnóstico de la calidad de las aguas, que se compone de una caracterización hidroquímica, el análisis del estado actual y un análisis isotópico. Los resultados se presentan en el Informe Final, en los acápites 4.1.4 y 4.1.5 (relativos a aguas superficiales) y acápites 4.2.3 y 4.2.4 (relativo a aguas subterráneas).

3.4.4.1 Caracterización hidroquímica

Para efectuar la caracterización hidroquímica de las aguas, se utilizó la información que aportan estudios ingresados al SEIA y sus planes de seguimiento respectivos, además del estudio "Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones-Chile" (DGA – UCN – IRD, 1999).

En primer lugar, se estima el balance iónico de las muestras mediante el software *PHREEQC*, considerando los siguientes 21 parámetros de encontrarse disponibles:

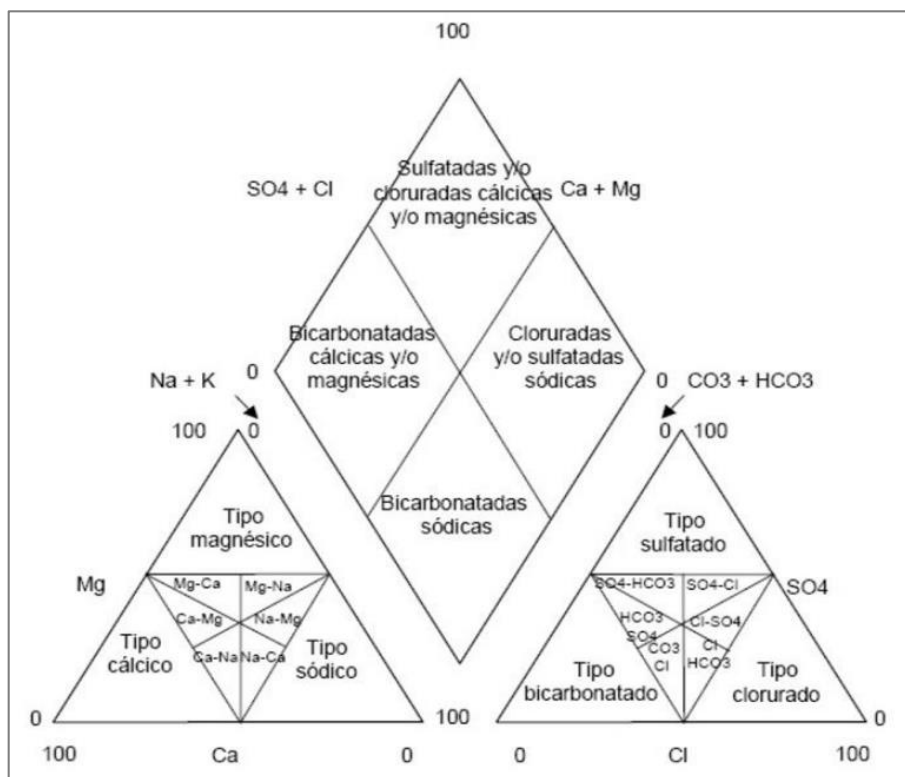
- Aniones mayores y menores: Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-}
- Cationes mayores: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}
- Metales trazas: Al, B, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn
- Parámetros físico-químicos y otros: pH, T° , O_2 .

Quedando como criterio que la muestra no supere el 10% del error en dicho indicador (Custodio, E., Llamas, 1976).

A su vez, en el caso de los parámetros de cada muestra que se encuentren bajo el límite de detección, se considera usar la mitad del valor dado por el límite de detección como concentración.

Así, se genera una base de datos hidroquímica con las muestras aptas para su procesamiento y comparación, efectuándose en primer lugar diagramas de Piper y Stiff, de ser posible, siendo necesario para ellos contar con al menos las concentraciones de los elementos mayores (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}). En el caso de los primeros, se utiliza el software *R* para generar dichos diagramas,

separando las muestras según si son de aguas superficiales/subterráneas, y si corresponden a puntos de muestreo de la SEIA u otros estudios, desarrollándose un total de 4 diagramas que permiten clasificar las aguas según su tipo, como se indica en la Figura 3.4-2.

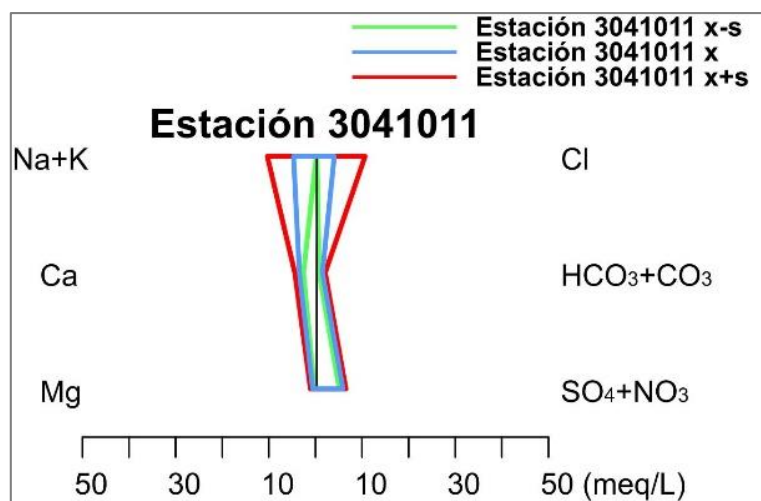


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-2 Ejemplo de Diagrama de Piper

De forma similar son desarrollados los diagramas de Stiff, para cada muestra. Esta vez se utiliza el software *AquaChem*, que permite superponer la estadística de cada punto de muestreo a lo largo del tiempo, según la siguiente simbología, y como se presenta en la Figura 3.4-3:

- Verde: Promedio menos desviación estándar ($x-\sigma$)
- Azul: Promedio (x)
- Rojo: Promedio más desviación estándar ($x+\sigma$)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-3 Ejemplo de Diagrama de Stiff

Una selección de los diagramas de Stiff representativos por sectores son presentados en planta en un mapa de la cuenca de estudio, en lo posible a la misma escala y son con los valores promedio (línea azul), para diferencias no solo el tipo de agua respectivo, sino también la magnitud de las concentraciones absolutas de cada elemento mayor.

3.4.4.2 Estado de la calidad

Seguido a eso, se procede a analizar el resto de los parámetros monitoreados que pudiesen ser de interés para la cuenca de estudio. Conforme a lo anterior, los parámetros considerados son los indicados en la Tabla 3.4-1.

Tabla 3.4-1 Parámetros considerados en el diagnóstico del estado de calidad

Parámetros	Símbolo	Nombre
Metales	As	Arsénico
	Al	Aluminio
	B	Boro
	Ca ²⁺	Calcio
	Cd	Cadmio
	Cr	Cromo
	Cu	Cobre
	Fe	Hierro
	Hg	Mercurio
	K ⁺	Potasio
	Li	Litio
	Mg ²⁺	Magnesio
	Mn	Manganeso
	Mo	Molibdeno
	Na ⁺	Sodio
	Pb	Plomo
	Se	Selenio
	Zn	Zinc

Parámetros	Símbolo	Nombre
Inorgánicos	Cl ⁻	Cloruro
	HCO ₃ ⁻	Bicarbonato
	SO ₄ ²⁻	Sulfato
	NO ₃ ⁻	Nitrato
	PO ₄ ³⁻	Fosfato
	F ⁻	Fluoruro
Físico-químicos	pH	pH
	CE	Conductividad Eléctrica
	SDT	Sólidos disueltos totales
	Turb	Turbiedad

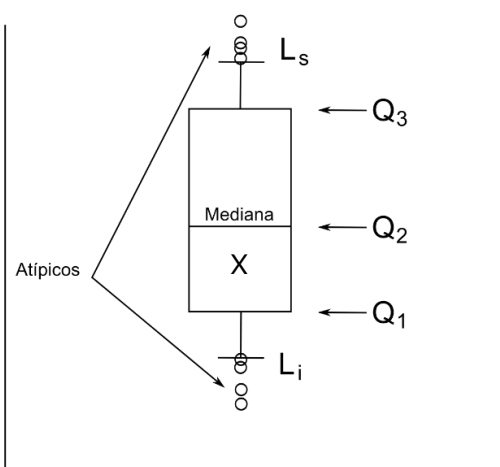
Fuente: Elaboración propia.

La razón de considerar estos parámetros en el análisis, por sobre el total de elementos presentes en la norma, es por su relación con actividades antrópicas. En el caso de los metales están los elementos tóxicos (As, Pb, Cr y Hg), como los elementos positivos en bajas concentraciones (Cu, Mo y Zn); en el caso de los parámetros inorgánicos, se consideraron aquellos con presencia en aguas residuales (Cl⁻ y SO₄²⁻) y aquellos con presencia en abonos o residuos industriales (NO₃⁻); y parámetros físico-químicos que permitan su clasificación según la normativa chilena actual (pH, CE y SDT).

La información que se entrega en el presente estudio es proporcionada de forma separada, según la procedencia del recurso hídrico (superficial o subterráneo):

- Aguas superficiales, con base a los puntos muestreados en el estudio DGA – UCN – IRD (1999), en los principales salares, quebradas y ríos de las cuencas.
- Aguas subterráneas, con base a los puntos muestreados en el estudio DGA – UCN – IRD (1999), en pozos y calicatas relativamente cercanas a los salares, y también con la información obtenida desde proyectos ingresados al SEIA.

La evaluación de la calidad de las aguas se efectuó a través de contraste gráfico entre el comportamiento de cada parámetro (a nivel de estación) y los límites establecidos en las normas chilenas de agua potable (NCh409/05, INN (2005)) y riego (NCh1333/78, INN (1978)), para lo anterior se utilizó gráficas tipo Box-Whiskers (Boxplot o gráfico de cajas) (Figura 3.4-4), generados con el software R. Estos diagramas se dividen según cuartiles, de manera que estos contengan el 25% (Q₁), 50% (Q₂) y 75% (Q₃) de los datos. El espacio entre Q₁ y Q₃, se denomina "caja", y contiene la mitad central de los datos. La medida de la caja o diferencia entre Q₃- Q₁ se denomina "rango intercuartílico (RIC)", mientras que el valor de Q₂ corresponde a la mediana. La media se denota como una "X", la cual se puede ubicar tanto dentro como fuera de la caja. Las barras de error o bigotes se extienden hasta los valores máximos y mínimos de la serie de datos, o hasta 1,5 veces el RIC. Cuando hay datos que se extienden más allá de 1,5 veces el RIC, estos corresponden a valores atípicos u *outliers*. Entonces, se definen como límite inferior (Li) y límite superior (Ls) a los valores Q₁-1,5x(RIC) y Q₃+1,5x(RIC) respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-4 Esquema de un Diagrama Box-Whiskers

Los diagramas fueron generados para cada uno de los parámetros analizados por estación. Fueron representados los estadísticos básicos permitiendo determinar el cumplimiento de normativa, datos atípicos, límite superior e inferior, entre otros.

En el caso de puntos que solo contengan una muestra, en lugar de un Diagrama Box-Whisker se utilizó un diagrama de punto.

De la misma forma para los parámetros relevantes que tengan una cantidad de muestras suficientes, se añaden los diagramas temporales para ver la evolución de un parámetro a lo largo de los años, para identificar tendencias al alza o a la baja. Estos diagramas también son generados usando el software R.

La determinación de rangos de análisis para parámetros físico-químicos se presentan en la Tabla 3.4-2; también es usado el rango presente en la norma chilena relativa a la calidad del agua de riego (NCh1333/78) con límites de mínimo 6,5 y máximo 8,5 unidades para el pH.

Tabla 3.4-2 Rangos límites de parámetros CE y SDT

Clasificación	Rango	Conductividad Específica (c): $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	Sólidos Disueltos Totales (s) mg/l a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observan efectos perjudiciales	C1	$c < 750$	$s < 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	C2	$750 < c < 1.500$	$500 < s < 1.000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	C3	$1.500 < c < 3.000$	$1.000 < s < 2.000$
Agua que puede ser usada	C4	$3.000 < c < 7.500$	$2.000 < s < 5.000$

Clasificación	Rango	Conductividad Específica (c): $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	Sólidos Disueltos Totales (s) mg/l a 105°C
para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos			

Fuente: Tabla N°2 de la Norma Chilena Oficial N°1.333 (NCh1333/78) modificada ((INN), 1978).

Finalmente, usando también los resultados de CE y SDT se clasifican las aguas según si corresponden a agua dulce, salobre, salada o salmuera, de acuerdo a los rangos indicados en la Tabla 3.4-3.

Tabla 3.4-3 Clasificación de Tipo de Agua

Tipo de Agua	Conductividad Específica (c): $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	Sólidos Disueltos Totales (s) mg/l a 105°C
Dulce	$c < 1.400$	$s < 1.000$
Salobre	$1.400 < c < 14.000$	$1.000 < s < 10.000$
Salada	$14.000 < c < 140.000$	$10.000 < s < 100.000$
Salmuera	$140.000 < c$	$100.000 < s$

Fuente: Davis (1964)

3.4.4.3 Análisis isotópico

Finalmente, dentro del diagnóstico de calidad de las aguas, se considera un análisis isotópico de las muestras de agua de la cuenca. Dicha información se busca en estudios complementarios de otros organismos estatales, o de proyectos ingresados al SEIA. Con la información de isótopos de estables de oxígeno-18 (^{18}O), hidrógeno-2 (^2H , deuterio) se realiza una comparación dentro de la cuenca, y con referencias como la línea meteórica mundial (MWL) y la línea meteórica local (LMWL, Aravena et al. (1999)).

3.4.5 Fuentes de contaminación

El análisis de las fuentes de contaminación se realiza en base al estado de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, la distribución de los distintos parámetros estudiados en la cuenca, el contexto geológico y las actividades antropogénicas que se desarrollan. De esto se desprenden las brechas observadas en relación a la calidad de las aguas de la cuenca.

3.4.6 Derechos concedidos

La metodología de análisis de los DAA se ha presentado en el acápite 3.3.2 del presente Anexo F.

3.5 METODOLOGÍA APLICADA EN LA MODELACIÓN Y EL BALANCE DE AGUA

La simulación hidrológica se ha realizado mediante la plataforma WEAP, mientras que para la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico se ha utilizado el software QGIS. Ambos puntos se pasan a detallar a continuación.

3.5.1 Descripción de la plataforma WEAP

WEAP (<http://www.weap21.org/>) es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos desarrollada por el Stockholm Environment Institute (<http://www.sei-us.org/>) sede en Boston y el Tellus Institute (<http://www.tellus.org/>). Proporciona un marco flexible y de fácil uso para la planificación del recurso hídrico y análisis de escenarios.

WEAP permite apoyar la planificación de recursos hídricos mediante el balance de la oferta hídrica (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico, a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal, con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). Para llevar a cabo este balance hídrico, se utiliza una gama de diferentes objetos disponibles en WEAP y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica. Esto permite su uso para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores (stakeholders) de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones físicas de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible.

WEAP es habitualmente forzado por variables climáticas, a diferencia de modelos de operación y gestión de recursos hídricos que se basan en modelación hidrológica externa, es decir, que separan el modelo hidrológico del operacional. Por otra parte, WEAP incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua a diferentes tipos de usuarios, desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo apropiado para realizar estudios de cambio climático, donde es importante estimar cambios en la oferta de agua (e.j. cambios en la precipitación proyectados) y demanda de agua (e.j. cambios en la demanda a partir de variación del área de los cultivos), y como estos cambios convergen en un balance de agua diferente al correspondiente al escenario base o actual.

Si bien WEAP fue creado como una herramienta para la modelación operacional de sistemas de recursos hídricos, incluyendo elementos tales como centrales hidroeléctricas, demandas de riego, canales, embalses, etc., actualmente se ha ampliado su capacidad incluyendo módulos de hidrología (distintos métodos de cálculo de precipitación-escurrimiento), calidad de agua y aguas subterráneas mediante el uso de enlaces con otro software de uso común (e.j. MODFLOW).

3.5.1.1 Balance hidrológico en WEAP

WEAP resuelve numéricamente dos balances de masas planteados en cada estanque. Estos balances pueden ser resumidos mediante la Ec. 2 y la Ec. 3.

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[P_e(t) - ET_0 k_c \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - P_e(t) Z_1^{FR} - f K_1 Z_1^2 - K_2 (1 - f) Z_1^2 \quad \text{Ec. 2}$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2 (1 - f) Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

Pe: Precipitación, además de derretimiento.

f: Dirección preferencial del flujo.

Kc: Coeficiente de cultivo.

Z_{1max}: Capacidad de caja superior

Z_{2max}: Capacidad de caja inferior

Z₁: Porcentaje de utilización inicial de la caja superior.

Z₂: Porcentaje de utilización inicial de la caja inferior.

K₁: Conductividad zona radicular

K₂: Conductividad zona profunda.

El cálculo de la evapotranspiración (ET₀) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, resumido según la Ec. 4.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

ET₀: Evapotranspiración de referencia.

R_n: Radiación neta.

G: Densidad de flujo de calor del suelo.

T: Temperatura media diaria.

u₂: Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.

e_s: Presión de saturación de vapor de agua.

e_a: Presión de vapor.

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor.

γ: Constante psicométrica.

Este método se encuentra implementado en el software de acuerdo a los siguientes supuestos:

- Ecuación se estandariza para pasto de 0,12 m de altura y de resistencia superficial de 69 s/m.
- El albedo varía dentro de un rango de 0,15 a 0,25, como función de la cobertura de nieve.
- El término G se asume nulo.

Además, cabe destacar que la evapotranspiración potencial o de referencia, ET₀, en WEAP se denomina *Reference PET*.

La evapotranspiración en el modelo WEAP se genera desde el estanque superior. Por esto, el volumen de agua almacenado allí influye directamente en la satisfacción de la demanda evapotranspirativa y debe ser observado con cuidado en el proceso de

calibración ya que distintas soluciones, correctas en la simulación de caudal, pueden entregar valores irreales de evaporación.

En el caso de zonas de riego, la evapotranspiración se calcula a partir de un K_c que se obtiene de lo considerado en el modelo base y literatura, según tipo de cultivos, mientras que en cuencas laterales aportantes en estado natural, se utiliza un valor de K_c que no tiene significado desde el punto de vista agronómico. Por esto último, al utilizar esta simplificación en los catchments modelados según el método de humedad de suelo, podrían estar incluidas dentro del total otros procesos como evaporación directa desde suelo, sublimación, entre otros. De esta forma, el K_c en estos casos podría presentar valores no necesariamente concordantes con los rangos clásicos de literatura agronómica.

Otro proceso de importancia en la simulación del proceso físico corresponde a la acumulación y derretimiento de nieve. Esto se hace mediante la utilización de dos parámetros a calibrar denominados temperatura de congelamiento (T_c) y derretimiento (T_d). Teóricamente ambos corresponden a 0°C ; sin embargo, debido a fenómenos que están siendo dejados de lado en la modelación a nivel mensual, T_c y T_d son generalmente calibrados en un rango que va de -5 a 5°C , respectivamente (US-SEI, 2010).

Los coeficientes de derretimiento y congelamiento determinan la proporción de agua líquida y sólida en la precipitación y la fracción de cobertura nival que se derrite en cada paso de tiempo. La Ec. 5 resume este último fenómeno.

$$P_e(t) = (A_c(t) + P_p(t)m_c) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i > T_d \\ \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} & T_c < T_i < T_d \end{cases} \quad \text{Ec. 6}$$

P_e : Aportes a la escorrentía de precipitación líquida y derretimiento de nieve.

A_c : Cobertura nival en unidades de longitud.

P_p : Precipitación total.

T_i : Temperatura media mensual del mes i .

3.5.1.2 Elementos disponibles en WEAP

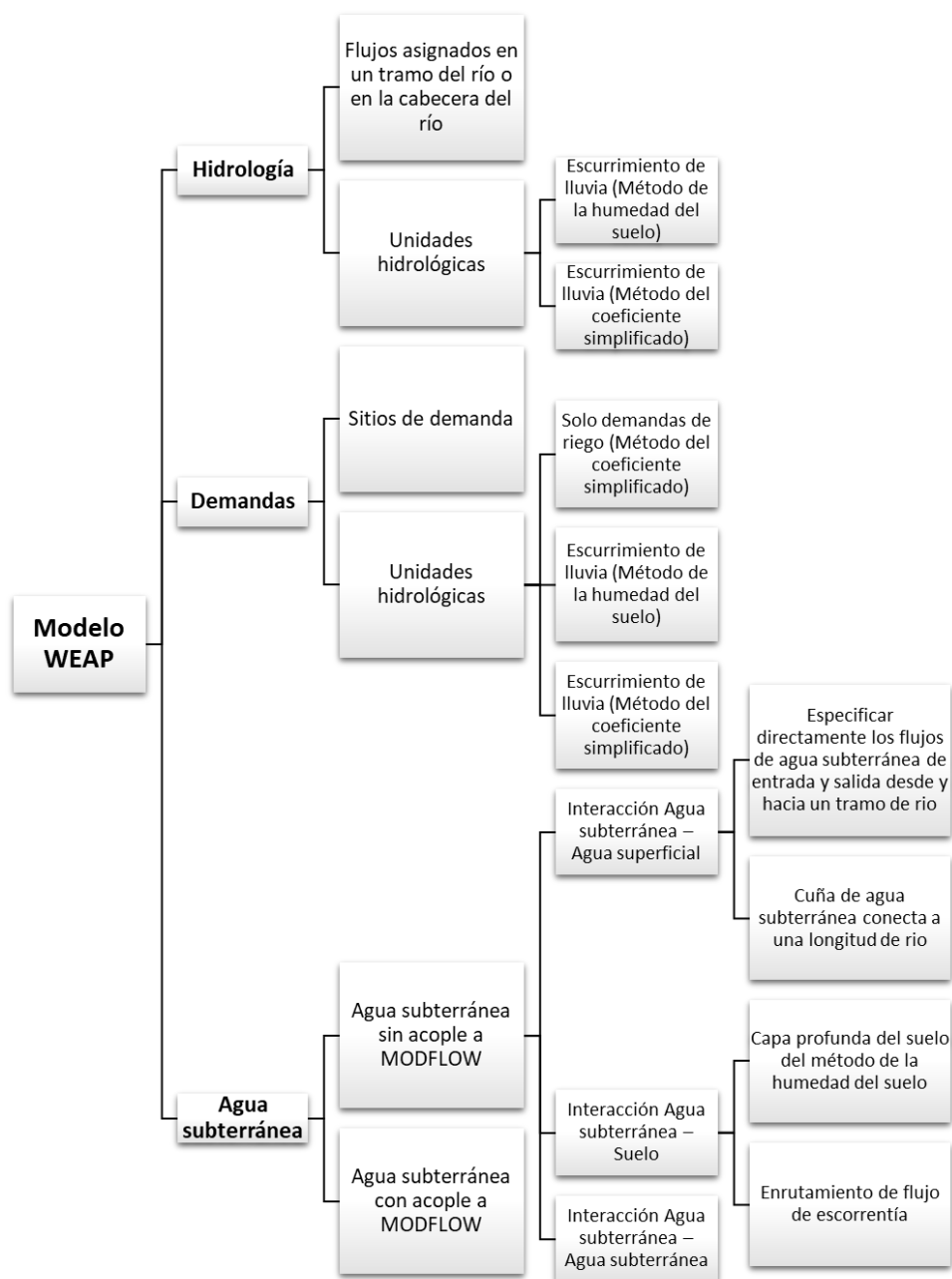
Existen numerosos elementos de gestión en WEAP, los cuáles pueden resumirse en:

- Ríos (River)
- Derivación (Diversion)
- Embalses (Reservoir)
- Agua subterránea (Groundwater)
- Otras fuentes (Other Supply)
- Sitio de Demanda (Demand Site)
- Unidad hidrológica (Catchment)

- Plana de tratamiento de Aguas (WasteWater Treatment Plant)
- Escorrentía/Infiltración (Runoff-Infiltration)
- Conducción (Transmission Link)
- Flujo de Retorno (Return Flows)
- Centrales Hidroeléctrica de Pasada (Hydropower)
- Requerimiento de Caudal (Flow Requirement)
- Medidor de Caudal (Streamflow Gauge)

Dado que este capítulo no busca entregar un manual de aplicación de WEAP, para lo cual están los propios manuales y tutoriales disponibles en su sitio oficial, aquí se ahonda en aquellos elementos básicos que resultan fundamentales para el modelo en particular implementado en este plan estratégico. Para una descripción más completa de todos los elementos, se recomienda la revisión del documento elaborado por DICTUC (DGA, 2019a) o bien la guía del usuario de WEAP en <https://www.weap21.org/index.asp?action=208> (SEI, n.d.).

Basándose en la misma referencia, es prudente entender que en WEAP existen tanto elementos como métodos. La escorrentía en un río puede ser modelada, por ejemplo, a través de una relación o modelo de precipitación - escorrentía dentro de WEAP considerando al menos 5 métodos, o bien, puede ser ingresada a través de un archivo de texto, como una serie operacional estimada “fuera” del modelo. La Figura 3.5-1 elaborada por DICTUC (DGA, 2019a) resume de buena manera los métodos de generación de escorrentía.



Fuente: DGA (2019a), "Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445 (Realizado por: DICTUC S.A. & SEI).

Figura 3.5-1 Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea

i. Hidrología

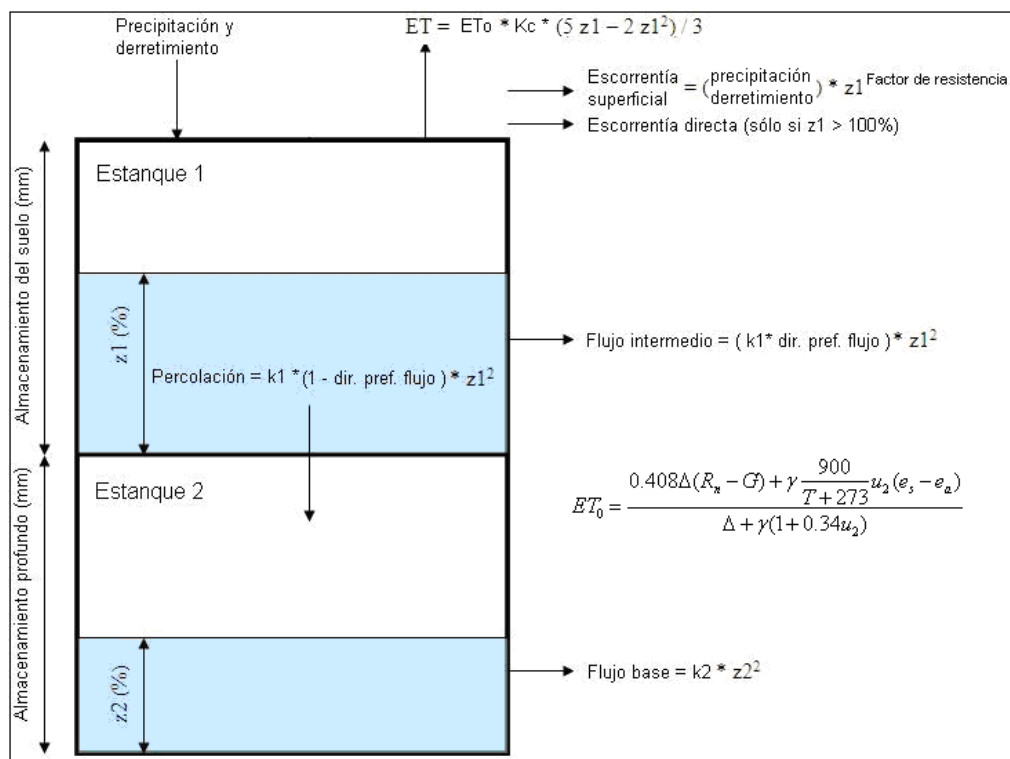
En WEAP existen métodos y elementos relacionados a la producción hidrológica, siendo los más relevantes los ríos y unidades hidrológicas.

En el caso de los ríos, estos son elementos que actúan como “tuberías”, transportando el flujo de un lugar a otro. En la medida que se les va incorporando interacciones con otros elementos éstos comienzan a subdividirse en tramos, en donde se les pueden definir pérdidas por infiltración hacia elementos acuíferos, así como pérdidas totales del sistema. Estos elementos pueden “unirse” para formar confluencias y constituyen un elemento básico desde donde se definen otros elementos como derivaciones, requerimientos de flujo y estaciones fluviométricas de control.

Un elemento esencial es la unidad hidrológica o “catchment”. Este elemento integra diferentes modelos hidrológicos incorporados en WEAP, algunos muy simples y otros más complejos, y por ende sintetiza tanto la información de clima como de uso de suelo dependiendo del método escogido. En este trabajo se ha utilizado principalmente el método de la humedad del suelo (Soil Moisture Method) como el método del coeficiente simplificado para las áreas de riego.

El módulo hidrológico integrado de la humedad del suelo que se utiliza en este estudio se basa en un esquema de dos estanques, capaces de reproducir distintas componentes de los flujos subterráneos y superficiales (Figura 3.5-2).

WEAP simula el proceso de precipitación-escorrentía a partir de una función de transferencia (que depende del módulo hidrológico seleccionado) en la que se determina una variable de salida (el caudal) a partir de una o varias variables de entrada, generalmente de carácter meteorológico (precipitación, temperatura, etc.). Internamente el modelo utiliza numerosos parámetros para representar el fenómeno físico. En la se muestra una clasificación general de las variables involucradas.



Fuente: Ayala (2011), modificado a partir de Guía de Uso WEAP.

Figura 3.5-2 Esquema gráfico modelo WEAP

Donde:

Pp: Precipitación líquida.

ET: Evapotranspiración real.

ET₀: Evapotranspiración potencial.

z₁: Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada.

z₂: Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada.

K₁: Conductividad del estanque superior.

K₂: Conductividad del estanque inferior.

Dir pref flujo: Dirección preferencial de flujo. Determina la fracción de flujo vertical y horizontal.

Tabla 3.5-1 Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP

Tipo de Parámetro	Descripción	Nombre Parámetro
Uso de suelo	Variables de entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Área de la cuenca (catchment) - Coeficiente de cultivo (kc)
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenamiento del suelo, estanque superior (z1 max) - Almacenamiento profundo, estanque inferior (z2 max) - Conductividad de la zona radicular o estanque 1 (K1) - Conductividad de la zona profunda o estanque 2 (K2) - Factor de resistencia al escurrimiento (FR) - Dirección preferencial del flujo - Almacenamiento inicial en el estanque 1 (z1 inicial) - Almacenamiento inicial en el estanque 2 (z1 inicial)
Clima	Variables de entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Series de precipitación - Series de temperatura - Latitud - Humedad relativa - Viento - Fracción nublada o nubosidad - Radiación - Albedo de la nieve
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel de nieve inicial - Temperatura de fusión de la nieve - Temperatura de derretimiento de la nieve - Albedo de nieve vieja - Albedo de nieve nueva
Cauces naturales	Variables de entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Series históricas de caudal (Ríos)
Reservorios	Variables de entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Curva de Volumen vs Elevación del reservorio - Serie de evaporación observada - Serie de volúmenes observados en la laguna

Fuente: Elaboración Propia.

Respecto del método del coeficiente simplificado, este utiliza coeficientes del cultivo para calcular la evapotranspiración potencial. De cumplirse las condiciones de escorrentía, el excedente de la precipitación (escorrentía) puede fluir a un río y/o hacia un nodo de agua subterránea.

Las variables de entrada son menos que las del método anterior, en el caso del clima, recibe aparte de la precipitación la evapotranspiración de referencia y

adicionalmente es necesario definir la precipitación efectiva (Porcentaje de la precipitación disponible para la escorrentía).

Los parámetros de suelo son el coeficiente de cultivo "kc" y la superficie.

ii. Demandas

En el caso de las demandas, éstas pueden ser representadas tanto por "Nodos de demanda" o "Demand Site" o por medio del elemento "unidad hidrológica" en la medida que se desee.

Usualmente, las demandas asociadas a: Industria, consumo humano o agua potable, minería, agricultura, ecológicas y de recreación pueden ser representadas a través del "nodo de demanda". La demanda de riego puede representarse con el método anterior o a través de una unidad hidrológica.

Respecto del nodo de demanda, se tienen dos métodos, los cuales permiten tanto especificar la demanda mensual a través de una serie de tiempo, o a través de la definición de un "tipo" de demanda, en donde se requiere representar el nivel de actividad anual (como puede ser la población, número de hectáreas, etc), una tasa anual, más conocido como "dotación", y la variación mensual, que reparte a lo largo del año, la demanda total, una suerte de la renombrada curva "S" de la demanda que sirve para representar los consumos mínimos y máximos y en que parte del año se producen.

En el caso del método del coeficiente simplificado, sumado a los parámetros ya destacados en el acápite anterior, se agregan el riego, fracción de riego y tasa de reúso. Este método utiliza los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial y así determinar la demanda de riego que se requiera. Cabe destacar que estos mismos parámetros se agregan en el caso que el método de generación de escorrentía sea el de la humedad del suelo.

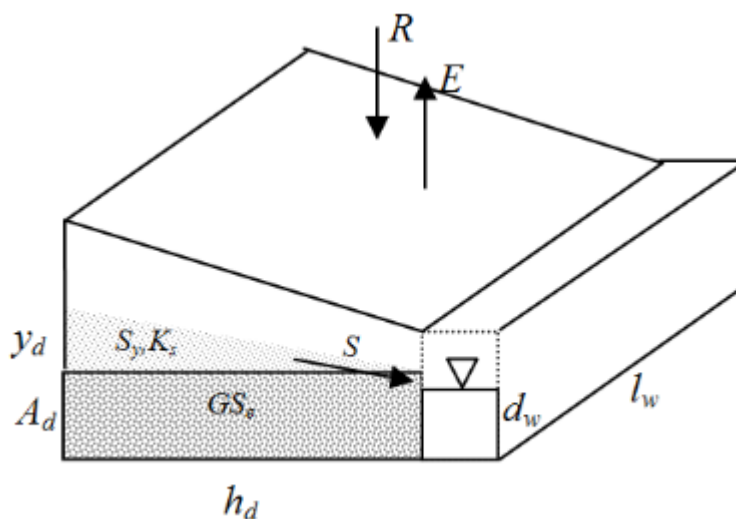
Cuando se agrega más de un vínculo de escorrentía/infiltración desde la unidad hidrológica, sean ríos o nodos de agua subterránea, es necesario indicar el porcentaje en que se debe distribuir la escorrentía (fracción de escorrentía) (DGA, 2019a).

iii. Agua subterránea

La interacción entre el río y el acuífero puede ser modelada de diferentes formas en WEAP. Producto de la complejidad del sistema y la necesidad de conectar los acuíferos de los sistemas existentes, es posible modelar el acuífero con un módulo especial, el cual permite incorporar la mayoría de la información recopilada en antecedentes relativos a espesores, anchos, volúmenes y conductividad hidráulica de los acuíferos.

En el caso de los elementos de agua subterránea, es conveniente relevar 3 métodos para la condición sin acople y el acople con Modflow propiamente tal.

En el caso que se desee modelar la interacción río-acuífero a través de WEAP, el método más conocido es el método de la “cuña”. Este módulo representa al acuífero como un prisma, de geometría regular, que reemplaza al estanque inferior del modelo conceptual de la Figura 3.5-2. Este esquema tiene como función principal resolver el balance hídrico del acuífero, y su interacción con el río, pero no simula niveles. La Figura 3.5-3, presenta el modelo conceptual del acuífero en WEAP, el que además es simétrico respecto del eje del río.



Fuente: Manual del Usuario de WEAP.

Figura 3.5-3 Modelo Conceptual del acuífero en WEAP. Fuente: Manual WEAP

La Tabla 3.5-2 presenta el detalle de los parámetros del modelo conceptual del acuífero en WEAP.

Tabla 3.5-2 Parámetros de acuífero en WEAP

Nombre de Parámetro	Abreviación	Descripción
Almacenamiento del Acuífero	GS_e	Volumen almacenado en el acuífero, ya sea inicial o en un paso de tiempo fijo. [Mm^3]
Ancho medio del acuífero	h_d	Distancia representativa entre el eje del río hacia la extensión más alejada del acuífero, es decir, su ancho máximo. [m]
Perímetro mojado	l_w	Perímetro de contacto entre el acuífero y el río [m]
Profundidad de Equilibrio	A_d	Profundidad que alcanza el acuífero en su condición de equilibrio.
Altura de escurrimiento	d_w	Altura de escurrimiento del río [m]. Valor usado como referencia de comparación para las simulaciones de elevación del acuífero.

Nombre de Parámetro	Abreviación	Descripción
Conductividad Hidráulica	K_s	Conductividad Hidráulica del acuífero. [L/T]
Porosidad Específica	S_y	Porosidad Específica (Specific Yield).

El volumen del acuífero es estimado inicialmente a partir del supuesto que el nivel de agua en el acuífero se encuentra en equilibrio con el río; entonces el almacenamiento de equilibrio hacia un lado del río, denominado GS_e , se calcula como:

$$GS_e = h_d l_w A_d S_y \quad \text{Ec. 7}$$

La variable “ y_d ” es una estimación de la altura sobre la cual el acuífero se encuentra por sobre o bajo el equilibrio, por lo que el almacenamiento inicial $GS(0)$ en el acuífero, es decir el almacenamiento en $t=0$, está dado por la expresión:

$$GS(0) = GS_e + y_d h_d l_w S_y \quad \text{Ec. 8}$$

De esta forma, la altura del acuífero que está por sobre o bajo el equilibrio se puede determinar cómo:

$$y_d = \frac{GS - GS_e}{h_d l_w S_y} \quad \text{Ec. 9}$$

Mientras más aumente el nivel de agua relativo al lecho del río, mayor es entonces el aporte o filtración desde el acuífero hacia este. Por el contrario, al disminuir el nivel de agua respecto de la ubicación de la altura de equilibrio del río, mayor es la infiltración desde el río hacia el acuífero. La infiltración total (S) desde ambos lados del río puede ser descrita como:

$$S = 2 \left(K_s \frac{y_d}{h_d} \right) l_w d_w \quad \text{Ec. 10}$$

Donde K_s representa la conductividad hidráulica saturada del acuífero y d_w es una estimación de altura de escurrimiento del río, invariante en el tiempo. Tanto la altura de escurrimiento (d_w) como el perímetro de contacto (l_w) representan el área por donde ocurre la filtración. La conductividad hidráulica es la encargada de controlar la tasa a la cual el agua se mueve hacia o desde el área de filtración. Una vez que esta filtración es estimada, el almacenamiento del acuífero al final del paso de tiempo adoptado se estima como:

$$GS_i = GS_{i-1} + 0.5 (R - E - S) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde E representa cualquier extracción antropogénica desde el acuífero destinada a la satisfacción de un nodo de demanda y R representa la recarga provista por la precipitación.

Otra manera de simular el acuífero corresponde al método de “especificar los flujos GW”. En este método, se deben imponer los volúmenes del acuífero, así como su recarga natural y flujo desde un acuífero a otro y al caudal máximo de extracción. Usualmente este método es utilizado en el caso en que se tiene información de un modelo subterráneo, pero no se ha optado por el acople y existe información relativa a extracciones del acuífero. Cabe destacar que dicho método permite incluso la modelación de una “caja” de capacidad infinita.

Una manera simplificada de la representación del acuífero corresponde a la interacción entre los estanques superior (zona radicular) e inferior (caja acuífera) del modelo de la humedad del suelo. En este caso el acuífero se parametriza con una caja con una capacidad finita, una conductividad hidráulica y un nivel inicial. Este método tiene la limitación inherente que no permite la separación de ambos elementos por sí sólo, teniéndose que calcularse aparte flujos relevantes como la infiltración o percolación.

Cabe destacar que es factible acoplar una caja acuífera al método de la humedad del suelo. En dicho caso, los parámetros del estanque inferior son reemplazados por los de la caja acuífera. Este método requiere por cierto de mucha información y es extremadamente difícil de calibrar.

El último método corresponde justamente al acople WEAP-MODFLOW, que se discute más adelante.

3.5.1.3 Calibración del Modelo WEAP

Considerando que la cuenca no cuenta con estaciones fluviométricas, el modelo WEAP se ajustó a los valores de recarga de los estudios de referencia analizados. Para mayor detalle, consultar el Anexo H.

3.5.2 Forzantes meteorológicas utilizadas

Las forzantes meteorológicas utilizadas para la modelación superficial en WEAP, corresponden a los datos generados por (DGA, 2018). La metodología de validación y su resultado se puede consultar en el Subanexo H-1.

3.5.3 Desarrollo del Modelo Hidrogeológico Conceptual

La modelación hidrogeológica conceptual fue realizada en base a todos los antecedentes disponibles dentro del área de estudio, la cual debido a su extensión y características fue separada en cuatro sectores que se encuentran hidráulicamente desconectados entre sí y, por ende, son evaluados de forma separada en el presente estudio. Los 4 sistemas hidrogeológicos principales corresponden a: de los Salares Elvira y Los Morros, de los Salares Punta Negra e Imilac, del Salar de Pajonales y del Salar de Aguas Calientes.

La información analizada para el sector norte y central del área de estudio, correspondiente a las cuencas de los Salares Elvira y Los Morros; y la cuenca del Salar de Punta Negra proviene de información tanto pública como privada, mientras que en el caso de los sectores ubicados al sur del área de estudio, correspondientes a las

cuencas del Salar Pajonales y Salar Aguas calientes, la información proviene de información pública generada por la DGA, la cual es complementada con actividad realizada en terreno para estas cuencas mencionadas (punteras, geofísica e hidro química).

Toda la información recopilada, fue analizada con la finalidad de entender el comportamiento evolutivo de las variables hídricas presentes en el área de estudio, realizando así la definición de unidades hidrogeológicas, perfiles hidrogeológicos y geometría del relleno acuífero, caracterización de las propiedades hidráulicas de las unidades realizadas, flujos pasantes, balance hidrogeológico conceptual y esquemas generales de funcionamiento de estos sistemas hidrogeológicos.

La información generada en este modelo se encuentra detallada en el capítulo 1 del Anexo H, y es utilizada como base para la representación de los acuíferos en la modelación hidrogeológica numérica.

Asimismo, se incorpora un modelo en 3D que incluye la información utilizada para la elaboración del modelo conceptual, el cual se encuentra dentro del Anexo H en la subcarpeta "Respaldo Modelos". En esta carpeta se presenta, además, un instructivo que explica el método de uso para la correcta visualización del modelo 3D.

3.5.4 Programa QGIS para modelo hidrogeológico

En base a las coberturas generadas a partir de los trabajos realizados para elaborar el modelo conceptual hidrogeológico, se elaboró un proyecto QGIS que concentró toda la información en un archivo unificado que permitió una visualización más amigable de las principales características del acuífero estudiado.

3.5.5 Índice de precipitación estandarizado

El análisis de la precipitación se realizó utilizando el índice de precipitación estandarizado (IPE), definido por McKee et al. (1993) con el objetivo de definir y monitorear las sequías meteorológicas para diferentes escalas de temporales. El indicador se comporta como una variable normal estándar, a partir de la cual es posible efectuar cálculos estadísticos y estimar probabilidades. Para obtener la serie del indicador, es necesaria una serie homogénea de datos de precipitaciones mensuales de al menos 30 años de duración y definir la escala de tiempo en la que se realizó el cálculo.

El IPE utiliza como único parámetro de cálculo la precipitación, agregada de forma mensual, en un periodo recomendado de al menos 30 años. El IPE se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación a lo largo de un periodo de acumulación, respecto a la media, una vez que la distribución original de precipitación se ha transformado a una distribución normal. En la Tabla 3.5-3 se muestra el sistema de clasificación utilizado por McKee et al. (1993) para interpretar los valores del índice.

Tabla 3.5-3 Valores del índice de precipitación estandarizado.

Valor del IPE	Categoría
$2,0 \leq$	Extremadamente lluvioso
1,5 a 1,99	Lluvioso
1,0 a 1,49	Moderadamente lluvioso
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
$-2,0 \geq$	Extremadamente seco

Fuente: OMM (2012).

El hecho de normalizar la serie histórica permite representar tanto los periodos lluviosos (o húmedos), como los secos. Además, permite interpretar el valor del índice como un periodo de retorno o probabilidad de recurrencia, como se muestra en la Tabla 3.5-4.

Tabla 3.5-4 Probabilidad de recurrencia.

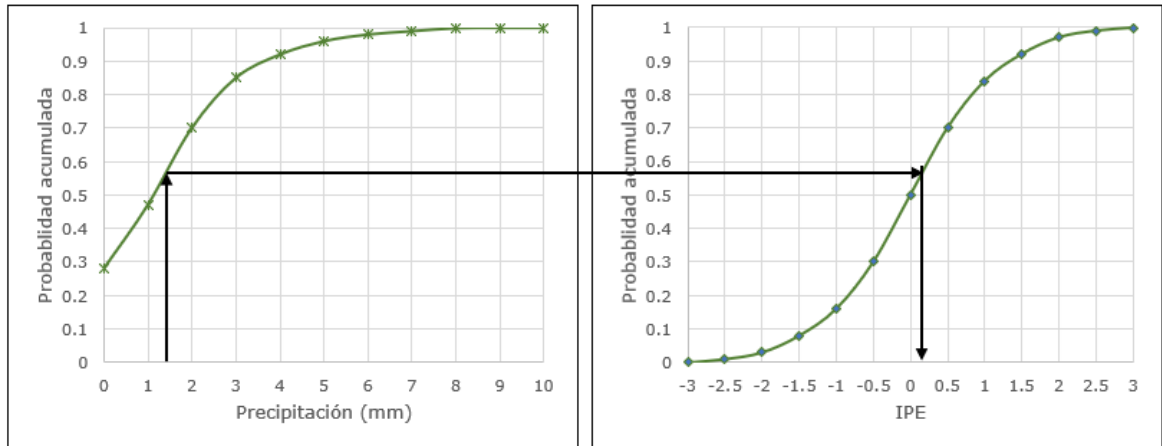
Valor del IPE	Categoría	Nº veces en 100 años	Severidad
-0,99 a 0	Sequía leve	33	1 en 3 años
-1,0 a -1,49	Sequía moderada	10	1 en 10 años
-1,5 a -1,99	Sequía severa	5	1 en 20 años
$-2,0 \geq$	Sequía extrema	2,5	1 en 50 años

Fuente: OMM (2012).

Una ventaja del IPE es que se puede calcular para diversas escalas temporales, lo que permite analizar el comportamiento no solo mes a mes, sino que considerando ventanas de tiempo que consideren los meses previos, de modo de estudiar el comportamiento de la precipitación con mayor flexibilidad. En este estudio, se utilizó un periodo de acumulación de 6 meses, puesto que esta acumulación permite considerar la precipitación entre estaciones, a un mediano plazo y es utilizado en diferentes países para el decreto de sequías. Además, se evita la malinterpretación que se podría dar con periodos de acumulación bajos, donde en meses usualmente secos (verano), ante un año particularmente lluvioso, se pueden interpretar los años secos como sequías y no como una normalidad. Finalmente, un periodo de acumulación de 6 meses evita que en zonas áridas o secas los meses con precipitación nula disminuyan el total de años a considerar para la estandarización y normalización de las series.

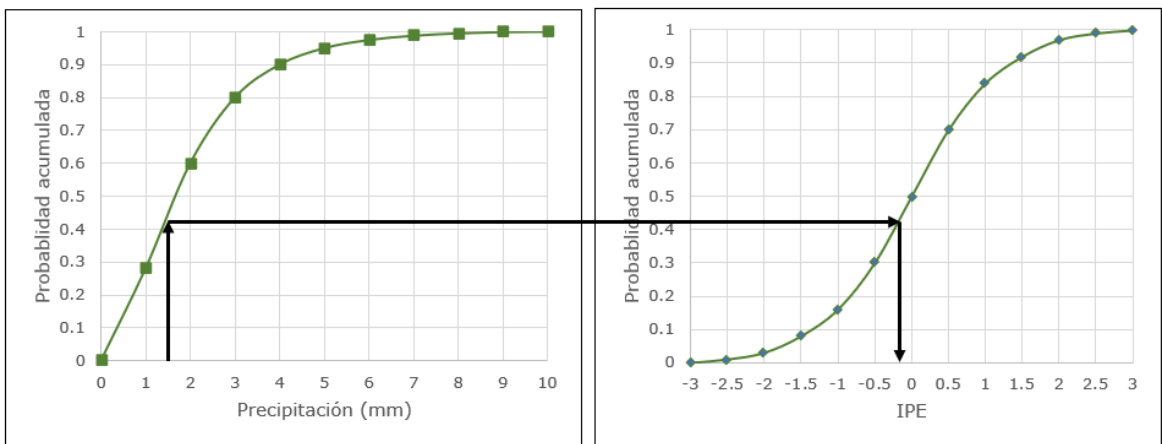
El IPE corresponde a una transformación (normalización y estandarización) de la variable de precipitación. Hay que tomar en consideración que las variables hidrometeorológicas en general no son normales y que pueden presentar

distribuciones de probabilidad mixtas cuando existe una importante cantidad de valores nulos como ocurre en climas áridos y semiáridos. En la Figura 3.5-4 y Figura 3.5-5 se muestra una representación gráfica para la transformación en el caso de una variable mixta o continua, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5-4 Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5-5 Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar

Para obtener el valor del IPE a partir de una serie se debe estimar la función de distribución $H(x)$. Dado que en zonas áridas y semi áridas es posible encontrar valores nulos de precipitación, la probabilidad acumulada se define a partir de la función mixta $H(x)$ como:

$$H(x) = 1 + (1 - q) \cdot G(x)$$

Ec. 12

Donde q es la probabilidad de que la serie de datos tenga un valor nulo y que se puede estimar empíricamente como:

$$q = m/N \quad \text{Ec. 13}$$

Donde m es la cantidad de valores nulos y N es la cantidad de valores en la serie. Por otro lado, la distribución de probabilidades $G(x)$ considera solo los valores que son distintos de cero, por lo que pueden ser menores al total de la serie original. En la formulación original se recomienda utilizar la distribución Gamma de dos parámetros de límite inferior 0, puesto que esta puede aceptar e incorporar asimetrías. La distribución gamma de dos parámetros tiene como límite inferior de la variable el valor cero, es decir acepta sólo valores positivos y por lo tanto se ajusta bastante bien a valores de precipitaciones. La función de distribución está definida como:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{(\alpha-1)} e^{-x/\beta} \quad , \text{ para } x > 0 \quad \text{Ec. 14}$$

Donde $\alpha (>0)$ es el parámetro de forma, $\beta (>0)$ es el parámetro de escala, $x (>0)$ es el valor de la variable de precipitación o caudales, y $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma definida como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{Ec. 15}$$

Para el cálculo de esta función se propone la siguiente aproximación para el cálculo de la función gamma:

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha + 4.5)^{\alpha-0.5} e^{-(\alpha-4.5)} \sqrt{2\pi} \left[1 + \sum_{i=0}^5 \frac{c_i}{\alpha + i} \right] \quad \text{Ec. 16}$$

Donde las constantes c_i , están definidas como: $c_0=76,18009173$, $c_1=-86,50532033$, $c_2=24,01409822$, $c_3=-1,231739516$, $c_4=0,12085003 \times 10^{-2}$, $c_5=-0,536382 \times 10^{-5}$.

Los parámetros α y β son estimados para cada serie de precipitación según la escala de tiempo de interés (1 mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses, etc.) y para cada mes del año y se pueden estimar usando diferentes métodos, como el método de los momentos o método de máxima verosimilitud. Los parámetros resultantes son usados para determinar la probabilidad acumulada de eventos de precipitación observados, esto para un mes dado y una escala de tiempo determinada. La probabilidad acumulada está dada por:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{(\hat{\alpha}-1)} e^{-x/\beta} dx \quad \text{Ec. 17}$$

Si $t = x/\hat{\beta}$ esta ecuación se convierte en la función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad \text{Ec. 18}$$

Esta función no puede ser expresada explícitamente en x , por lo que debe ser evaluada numéricamente. La función se define para valores de α y β mayores a 0, y valores de x entre cero e infinito. En resumen, para cada serie mensual precipitación que dispone de N valores de X , se estiman los parámetros q , α y β , con los cuales se puede calcular para cualquier valor de x de la función de distribución de valores no nulos $G(x)$, y posteriormente la de la serie completa como $H(x)$ con:

$$H(x) = q \quad \text{si } x = 0 \quad \text{Ec. 19}$$

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x) \quad \text{si } x > 0 \quad \text{Ec. 20}$$

Conocida la función de distribución y sus parámetros, para estimar el valor del IPE correspondiente al valor actual de la serie x , se calcula la probabilidad acumulada $H(x)$. Esta probabilidad, es luego transformada a una variable aleatoria normal estándar Z con media cero y varianza uno, que corresponde al valor de IPE. El procedimiento propuesto por Abramowitz y Stegun, (1965) para la estandarización de la variable, consiste en una aproximación mediante polinomios. La variable estandarizada z (o IPE) correspondiente a una probabilidad acumulada $F_z(z)$ se puede aproximar con un error menor a $4.5 \cdot 10^{-4}$ mediante la siguiente expresión:

$$\text{IPE} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad \text{Ec. 21}$$

$$\text{IPE} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0,5 < H(x) < 1 \quad \text{Ec. 22}$$

donde

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad \text{Ec. 23}$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-H(x))^2} \right)} \quad \text{para } 0,5 < H(x) < 1 \quad \text{Ec. 24}$$

donde $c_0=2,515517$, $c_1=0,802853$, $c_2=0,010328$, $d_1=1,433788$, $d_2=0,189269$, $d_3=0,001308$

Conceptualmente el IPE representa la cantidad de desviaciones típicas en que un evento se aleja de su valor medio. Sin embargo, esto no es exacto para pequeñas escalas de tiempo en que la distribución de la variable original es muy asimétrica. Por el contrario, el indicador mismo tiene una distribución normal, o normal truncada, de promedio cero y desviación uno, lo que es muy favorable para hacer comparaciones entre distintas estaciones y zonas. El cálculo de este indicador puede ser realizado fácilmente con el paquete SPEI de R, un software de entorno libre para estadística computacional y gráficos.

3.5.6 Índice de Precipitación-Evaporación Estandarizado

Por su parte, el análisis de la disponibilidad del recurso hídrico se realizó utilizando el índice de precipitación evapotranspiración estandarizado (IPEE), definido por (Vicente-Serrano et al., 2010) con el objetivo de incluir el efecto de un aumento sostenido de las temperaturas durante el siglo XX. Esta alza en las temperaturas provoca un aumento del estrés por sequía, un aumento de bosques bajo escasez de precipitaciones (Adams et al., 2009), disminución de la producción agrícola mundial observada en los últimos años (Lobell et al., 2011) y aumento en la duración y magnitud de las sequías a finales del siglo XX.

A diferencia del IPE, el IPEE considera el efecto de un aumento de temperatura y explica la influencia de la variabilidad de esta, por ejemplo, en las olas de calor. Además, cumple con los requisitos de un índice de sequía por su carácter multiescalar, puede medir la gravedad de la sequía según intensidad y duración, permite comparar la sequía a través del tiempo y el espacio (al igual que el IPE) y tiene un procedimiento de cálculo sencillo y comprensible.

El indicador se comporta como una variable normal estándar, a partir de la cual es posible efectuar cálculos estadísticos y estimar probabilidades. Para obtener la serie del indicador, es necesaria una serie homogénea de datos de precipitaciones y temperaturas mensuales de al menos 30 años de duración y definir la escala de tiempo en la que se realizó el cálculo.

El IPEE utiliza como único parámetro de cálculo la precipitación, agregada de forma mensual, en un periodo recomendado de al menos 30 años. El IPEE se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación a lo largo de un periodo de acumulación, respecto a la media, una vez que la distribución original de precipitación se ha transformado a una distribución normal. Del mismo modo que con el IPE, en la Tabla 3.5-5 se muestra el sistema de clasificación utilizado por McKee et al. (1993) para interpretar los valores del índice.

Tabla 3.5-5 Valores del índice de precipitación evapotranspiración estandarizado.

Valor del IPE	Categoría
2,0 ≤	Alta disponibilidad hídrica
1,5 a 1,99	Bastante disponibilidad hídrica
1,0 a 1,49	Disponibilidad hídrica
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Poca disponibilidad hídrica
-1,5 a -1,99	Muy poca disponibilidad hídrica
-2,0 ≥	Nula disponibilidad hídrica

Fuente: OMM (2012).

El hecho de normalizar la serie histórica permite representar tanto los periodos lluviosos (o húmedos), como los secos. Además, permite interpretar el valor del índice como un periodo de retorno o probabilidad de recurrencia, como se muestra en la Tabla 3.5-6.

Tabla 3.5-6 Probabilidad de recurrencia.

Valor del IPE	Categoría	Nº veces en 100 años	Severidad
-0,99 a 0	Sequía leve	33	1 en 3 años
-1,0 a -1,49	Sequía moderada	10	1 en 10 años
-1,5 a -1,99	Sequía severa	5	1 en 20 años
-2,0 ≥	Sequía extrema	2,5	1 en 50 años

Fuente: OMM (2012).

Al igual que el IPE, el IPEE se puede calcular para diversas escalas temporales, lo que permite analizar el comportamiento no solo mes a mes, sino que considerando ventanas de tiempo que consideren los meses previos, de modo de estudiar el comportamiento de la precipitación con mayor flexibilidad. En este estudio, se utilizó un periodo de acumulación de 6 meses, puesto que esta acumulación permite considerar la precipitación entre estaciones, a un mediano plazo y es utilizado en diferentes países para el decreto de sequías. Además, se evita la malinterpretación que se podría dar con periodos de acumulación bajos, donde en meses usualmente secos (verano), ante un año particularmente lluvioso, se pueden interpretar los años secos como sequías y no como una normalidad. Finalmente, este índice es particularmente útil en zonas áridas, donde se diferencia bastante del IPE, puesto que en estas zonas las precipitaciones son bajas y no representan adecuadamente la disponibilidad del recurso hídrico.

El IPE corresponde a una transformación (normalización y estandarización) del balance hídrico correspondiente a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (PET), la que puede ser calculada según diferentes ecuaciones (por ejemplo,

ecuación de Thornthwaite, ecuación de Penman-Monteith, ecuación de Hargreaves, entre otras), donde el IPEE no se vincula a alguna en particular. La representación gráfica de la transformación de la variable para el caso continuo corresponde a la presentada en la Figura 3.5-5.

Para calcular el balance hídrico, con el valor de PET_i para un mes en particular, la diferencia con la precipitación (P) se calcula como:

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{Ec. 25}$$

Que corresponde una medida del excedente o déficit de agua para un mes dado. Los valores de D_i son calculados y se agregan en diferentes escalas de tiempo, del mismo modo que con el IPE.

Para la estandarización de la variable, se debe seleccionar la distribución estadística más adecuada, la que puede ser, entre otras, Pearson III, Lognormal, Log-logística o General del valor extremos. Se seleccionó la distribución log-logística por su adecuado comportamiento en los valores extremos, además de mostrar una disminución gradual en la curva de valores bajos, obteniendo valores coherentes para valores bajos de D . La función de densidad de probabilidad de una variable distribuida log-logística de tres parámetros se expresa como:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left(1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right) \right)^{-2} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde α, β y γ son los parámetros de escala, forma y origen, para valores de D en el rango de $\gamma > D > \infty$. Los parámetros de la distribución Log-logística se pueden obtener siguiendo diferentes procedimientos. Entre ellos, el procedimiento de los L-momentos es el enfoque más robusto y sencillo (Ahmad et al., 1988). Cuando se calculan los momentos L, los parámetros de la distribución log-logística se pueden obtener siguiendo a (Singh et al., 1993):

$$\beta = \frac{2W_1 - W_0}{6W_1 - W_0 - 6W_2} \quad \text{Ec. 27}$$

$$\alpha = \frac{(W_0 - 2W_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad \text{Ec. 28}$$

$$\gamma = W_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad \text{Ec. 29}$$

Donde $\Gamma(\beta)$ es la función gamma de β .

Según Vicente-Serrano et al. (2010), para calcular los parámetros log-logísticos de distribución α, β y γ , se recomienda utilizar el método de momentos ponderados de probabilidad (PWM), donde los autores recomiendan utilizar el estimador de (Hosking, 1986) para obtener los PWM y no afectar las escalas de tiempo y no tener problemas en ciertas partes del mundo. Así, los PWM imparciales se obtiene según:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{(N-i)}{s}\right) D_i}{\frac{(N-1)}{s}} \quad \text{Ec. 30}$$

La función de distribución de probabilidad de D según la distribución log-logística viene dada por

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad \text{Ec. 31}$$

Conociendo $F(x)$, el IPEE puede obtenerse fácilmente como los valores estandarizados de $F(x)$. Por ejemplo, siguiendo la aproximación clásica de Abramowitz y Stegun (Abramowitz & Stegun, 1965):

$$IPEE = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde $W = -2 \ln(P)$, para $P \leq 0,5$, siendo P la probabilidad de superar un determinado valor D , $P = 1 - F(x)$. Si $P > 0,5$, P es reemplazado por $1 - P$ y se invierte el signo del IPEE resultante. Las constantes son: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ y $d_3 = 0,001308$. El valor promedio del IPEE es 0 y la desviación estándar es 1. El IPEE es una variable estandarizada, por lo que se puede comparar con otros valores del IPEE en el tiempo y el espacio. Un IPEE de 0 indica un valor correspondiente al 50% de la probabilidad acumulada de D , según una distribución Log-logística.

3.6 METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS DE ACCIONES

Este capítulo expone la metodología aplicada en el análisis de soluciones a las problemáticas y/o brechas hídricas de la cuenca.

3.6.1 Ejes del Plan de Acción

Para abordar el análisis de las medidas de intervención que forman del presente plan, se ha estructurado en diferentes ejes que agrupan problemas y soluciones atingentes alrededor de una temática específica. Para ello, se ha tenido especial atención en los objetivos específicos del presente estudio (Informe Etapa 2, acápite 1.1), los que dan una visión de la propuesta de acciones alcanzada a través del trabajo.

De esta forma, en la Tabla 3.6-1 se presentan los cuatro (4) ejes, con sus correspondientes objetivos, sobre los cuales se estructuraron las iniciativas de acción.

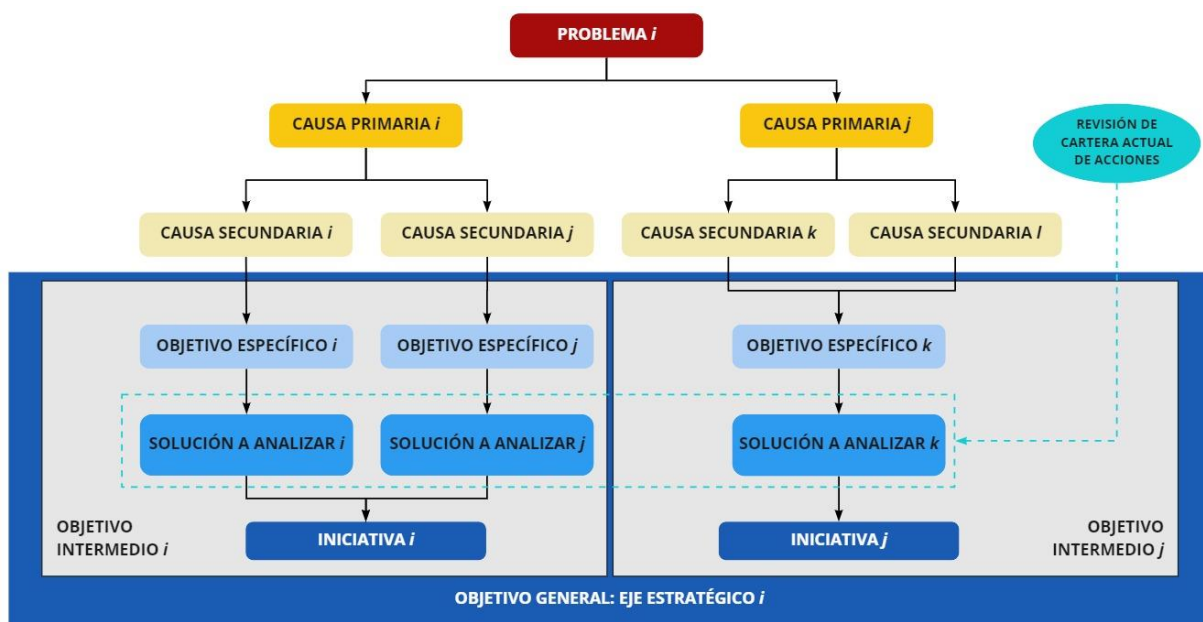
Tabla 3.6-1 Ejes de formulación del PEGH

N° Eje	Nombre del Eje	N° Obj.	Objetivo para definición de acciones del Plan
1	Uso estratégico del recurso hídrico	1.1	Reducir las brechas entre oferta y demanda de agua considerando cambio climático, sequía e inundaciones
2	Monitoreo del recurso hídrico	2.1	Mejorar el monitoreo de las aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña y glaciares)
3	Gestión y gobernanza del agua	3.1	Promover la conformación de OUA y fortalecer las existentes
		3.2	Promover y revitalizar la alianza público-privada en materia hídrica (gobernanza, plataformas de servicios de información y mercado de DAA)
4	Conservación y protección del recurso y del ecosistema hídrico	4.1	Proteger funciones ecosistémicas críticas relacionadas con los cuerpos de agua superficiales y acuíferos en el tiempo

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Árboles de problemas y soluciones

A raíz del diagnóstico del estado de la cuenca, se identifican las brechas encontradas para el cumplimiento de los objetivos específicos del PEGH identificados en la Tabla 3.6-1. La lógica aplicada estuvo basada en determinar las relaciones entre los dichos objetivos, los problemas identificados, las soluciones propuestas y una recopilación de la situación actual de las iniciativas relacionadas con dicho problema, tal como se muestra en la Figura 3.6-1.



Fuente: Elaboración propia en base a (CCG-UC, 2019).

Figura 3.6-1 Esquema de árbol de problemas y soluciones

De acuerdo a lo presentado en la Figura 3.6-1, la metodología utilizada permitió analizar un problema presente en el territorio considerando sus principales causales, lo cual facilitó la identificación de las afecciones que estas conllevan sobre algún sector específico de la cuenca o sobre un grupo de actores particulares. Cabe señalar que, de acuerdo a la metodología propuesta por el Centro de Cambio Climático (CCG-UC, 2019) en su trabajo para los Escenarios 2030, un aspecto importante a la hora de definir problemas y causas primarias relacionadas es que estos no deben confundirse con la “ausencia de una solución”, sino que se debe enfocar en evidenciar el problema al que se enfrentan los afectados por dicha “ausencia”. Por ejemplo, un problema no es la “inexistencia de un punto de monitoreo fluviométrico”, sí lo es la “limitada información sobre los recursos hídricos a nivel cuenca”. Debido a lo anterior, desde CCG-UC sugieren que, al profundizar en las relaciones problema-causa, los distintos componentes del árbol deben responder al por qué se producen dichas brechas o situaciones.

Cabe señalar la importancia de las actividades PAC como fuente de discusión y conversación respecto de las causales de los problemas, así como de la definición de los afectados, ya fuese un territorio, un actor o un conjunto de ellos. Este proceso permitió asociar a cada problemática levantada desde el diagnóstico (ej.: limitada información sobre los recursos hídricos a nivel cuenca), factores causales de primer orden (ej.: información hídrica y/o ambiental con brechas en la cobertura espacial y temporal) y de segundo orden (causas secundarias), provenientes principalmente desde los actores del territorio (ej.: no hay puntos de monitoreo de nivel aguas superficiales en los cuerpos de agua relevantes de la cuenca).

Finalmente, una vez identificadas las diferentes causales de los problemas, fue posible establecer una serie de objetivos específicos que permitieron desarrollar soluciones a

analizar, las cuales dieron paso a la definición de iniciativas o acciones que pudiesen resolver la problemática identificada. Dichos objetivos específicos se vincularon a un objetivo intermedio, el cual fue previamente establecido como una meta a alcanzar dentro de los objetivos del PEGH. Finalmente, como se presentó en la Tabla 3.6-1, dicho objetivo intermedio se clasificó dentro de un eje estratégico permitiendo diseñar un plan de acción coherente con el diagnóstico.

3.6.3 Medidas de intervención

Así, para el planteamiento de las soluciones que den respuestas a las brechas, se analizaron una serie de aspectos (medidas, soluciones o acciones), las cuales estuvieron enfocadas en planificar problemas relativos a cada uno de los ámbitos (ejes) establecidos en los objetivos, en consonancia a las problemáticas diagnosticadas. Las temáticas analizadas se presentan en la Figura 6.1-3 del Informe Etapa 2 y en el acápite 3.6.1 del presente Anexo F. A continuación, se presentan las medidas consideradas por eje y objetivo específico.

Eje 1. Uso estratégico del recurso hídrico

- Objetivo 1.1. *"Reducir las brechas entre oferta y demanda de agua considerando cambio climático, sequía e inundaciones"*:
 - Construcción de embalses superficiales.
 - Control de extracciones.
 - Monitoreo de aguas superficiales y subterráneas.
 - Conocimiento hidrogeológico.

Eje 2. Monitoreo del recurso hídrico

- Objetivo 2.1. *"Mejorar el monitoreo de las aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña y glaciares)"*:
 - Mejoramiento y/o ampliación de la red de monitoreo de aguas superficiales, subterráneas, calidad, glaciológica.

Eje 3. Gestión y gobernanza del agua

- Objetivo 3.1. *"Promover la conformación de OUA y fortalecer las existentes"*:
 - Formación de nuevas Organizaciones de Usuarios hasta su registro en la DGA, fortalecimiento de OU existentes.
- Objetivo 3.2. *"Promover y revitalizar la alianza público-privada en materia hídrica (gobernanza, plataformas de servicios de información y mercado de DAA)"*:
 - Acuerdos Voluntarios de Gestión de Cuencas (AVGC).
 - Fortalecimiento de la coordinación entre usuarios de agua a través de mecanismos específicos.

Eje 4. Conservación y protección del recurso y del ecosistema hídrico

- Objetivo 4.1 *"Proteger funciones ecosistémicas críticas relacionadas con los cuerpos de agua superficiales y acuíferos en el tiempo"*:
 - Medidas de conservación.
 - Control de extracciones.

- Mejoramiento y/o ampliación de la red de monitoreo de aguas superficiales, subterráneas, calidad, glaciológica.

Cabe señalar que las medidas pueden responder a más de un objetivo e incluso a más de un eje. El análisis preliminar de medidas se contrastó y/o complementó con las iniciativas ya catastradas e identificadas en la fase de diagnóstico de la cuenca, respecto de la revisión de la Cartera de Acciones.

3.6.4 Categorización de las acciones del Plan

A raíz de los puntos descritos anteriormente se establecieron las estrategias para la gestión de las brechas encontradas, mediante la generación de un portafolio de acciones.

Las acciones se han clasificadas según su tipología, siguiendo las recomendaciones indicadas por DGA, en cuatro (4) tipos, analizando las siguientes temáticas:

- **Obras hidráulicas (OH):**
 - Embalses
 - Infraestructura de riego y tecnificación
 - Infraestructura de agua potable y tratamiento de aguas servidas
 - Infraestructura de defensa fluvial
 - Red hidrométrica de la DGA
- **Medidas de gestión (MG):**
 - Fortalecimiento y formalización OUA
 - Capital humano
 - Recuperación de acuíferos
 - Gobernanza
 - Sistemas de Información
 - Constitución de reservas
 - Tecnologías habilitantes
 - Mejoras de eficiencia
- **Nuevas fuentes de agua (NF):**
 - Desalinización
 - Acuíferos profundos
 - Recarga artificial de acuíferos
 - Cosecha aguas lluvia
 - Reúso de aguas servidas
- **Otras medidas (OM):**
 - Conocimiento en materia hídrica

A su vez, las acciones de gestión tienen establecidos los plazos de implementación, considerando iniciativas:

- a corto plazo (> 5 años);
- a mediano plazo (5-10 años); y
- a largo plazo (< 10 años).

Las soluciones son segregadas según quien se identifique inicialmente como responsable de las mismas, siendo éstas:

- medidas de intervención DGA;
- medidas de intervención de otros organismos del Estado;
- medidas de intervención de privados; o bien,
- medidas de intervención mixtas, esto es, alianzas público-privadas (APP o *PPP*, *public-private partnership*).

Finalmente, para cada acción se generó una ficha resumen con el contenido y la estructura mostrada en la Tabla 3.6-2, la que comprende:

- identificación;
- problemática y objetivo;
- características;
- relación con el PEGH y cartera existente;
- observaciones; y
- ubicación.

Tabla 3.6-2 Ficha resumen identificativa de las acciones del plan

Identificación	ACCIÓN N°:
	Nombre de la Acción:
Problemática y Objetivo	Brecha o problemática identificada:
	Objetivo(s) de la Acción:
Características	Tipología(s) de la Acción:
	Características generales:
	Ámbito: Ubicación: Beneficiarios directos: Tipo de acción: Situación de la acción: Horizonte: Tipo de financiación: Monto estimado VAC (UF): Entidad(es) financiadora(s): Entidad(es) responsable(s):
	Descripción de la Acción y/o especificaciones técnicas:
Relación con el PEGH y cartera existente	Eje(s) del Plan:
	Objetivo(s) del Plan:
	Relación con Políticas y/o Cartera de acciones actual:
Observaciones	Requisitos habilitantes y/o comentarios adicionales:
Ubicación	Ubicación de la acción:

Fuente: Elaboración propia.

3.7 METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARTERA DE INICIATIVAS PROPUESTAS

El presente capítulo la metodología aplicada para la formulación de la cartera de iniciativas propuestas en el presente Plan, con la evaluación económica, social y ambiental, así como la priorización, la valorización y el cronograma propuesto para la implementación.

3.7.1 Síntesis de la selección de alternativas

La síntesis del diagnóstico realizado en la etapa de análisis de acciones, junto con la revisión de la cartera actual de acciones derivan en iniciativas estratégicas, las cuales son clasificadas según su tipología (OH, MG, NF, OM) y levantadas con su información asociada en una ficha resumen (acápite 3.6.3). Una vez realizada esta identificación y clasificación, se efectúa la evaluación de las iniciativas y posterior priorización.

3.7.2 Metodología para la evaluación y priorización de medidas

A continuación, se entrega la metodología de evaluación de las iniciativas identificadas para el PEGH. Esta consta de la evaluación integral, en sus componentes económica, social, ambiental y estratégica; en el acápite 3.7.2.4 se expone la metodología de priorización de iniciativas del plan.

3.7.2.1 Evaluación económica

La evaluación económica de las iniciativas pretende determinar los costos asociados a través de un enfoque de costo-eficiencia. Es importante mencionar que se utiliza información referencial respecto a los costos, tomando en consideración la información pública respecto del gasto público y/o privado en estas materias.

El enfoque costo eficiencia tiene como supuesto implícito que el valor actual de los beneficios sociales de la medida es mayor que el valor actual de los costos de implementarla, por lo cual dicha medida es de por sí socialmente rentable y no se evalúa su conveniencia. Bajo este enfoque de evaluación se utilizó como indicador el **valor actual de costos o VAC**.

El VAC es ampliamente utilizado cuando se comparan alternativas de proyecto que tienen los mismos beneficios y vida útil, o cuando los beneficios son difíciles de cuantificar. Toma especial relevancia en el presente ejercicio, para poder comparar medidas e iniciativas que tienen una gran componente de gestión y procesos, que, si bien no es posible atribuirles beneficios directos o externalidades valorables, sí contribuyen a que el PEGH obtenga información de base o genere capacidades necesarias para la implementación del plan y que se logren los objetivos de este. Se debe resaltar que la mayoría de las iniciativas habilitantes o de procesos, tienen este perfil, siendo solo algunas iniciativas que requieren una inversión en infraestructura.

Luego, para poder comparar las iniciativas, se utiliza el indicador VAC que se expresa como la suma algebraica de cada flujo de costos descontados, y representa el costo total del proyecto evaluado en valor presente. Su expresión matemática es la siguiente.

$$VAC = I_o + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad \text{Ec. 33}$$

donde,

VAC: Valor actual de los costos;

Ct: Costos sociales del proyecto, basados en información referencial;

Io: Inversión inicial, basada en información referencial;

r: Tasa social de descuento (expresada en términos reales);

T: Horizonte de evaluación del proyecto.

Si se compararan alternativas que compiten entre sí, en el cumplimiento de un mismo beneficio, el criterio de decisión es seleccionar aquella alternativa que tenga el menor VAC.

Adicionalmente, se estima el indicador de **costo anual equivalente o CAE**. La expresión matemática del CAE corresponde a la siguiente:

$$CAE = VAC \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad \text{Ec. 34}$$

donde,

CAE: Costo anual equivalente;

VAC: Valor actual de los costos;

r: Tasa social de descuento (expresada en términos reales);

T: Horizonte de evaluación del proyecto.

Finalmente, si existen antecedentes suficientes, se puede aplicar la razón de costo efectividad estimada como la división entre el CAE y un indicador de beneficio, como puede ser el número de beneficiarios (B), el aumento de seguridad de ejercer el derecho de agua, o el aumento en la disponibilidad del recurso hídrico en l/s. Si la intención es comparar proyectos, el indicador de beneficio debe ser el mismo para todas las iniciativas. El criterio de decisión es seleccionar o priorizar aquellas alternativas que tengan el menor CAE por unidad de beneficio. Para el presente PEGH no se aplicó este análisis puesto que un Plan de estas características no tiene el mismo indicador de beneficios para todas las medidas.

Para la priorización de las iniciativas del PEGH desde el punto de vista de la evaluación económica, se ha considerado la clasificación y la puntuación recogida en la Tabla 3.7-1.

Tabla 3.7-1 Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado

Categoría de CAE	Descripción	Puntaje
Bajo	CAE normalizado superior al 80% del valor máximo de CAE: [máx. CAE a 0,8% máx. CAE]	1
Medio	CAE mayor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas y menor o igual al valor máximo de CAE:]0,8% máx. CAE - mediana CAE]	2
Alto	CAE igual o menor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas:]mediana CAE – mín. CAE]	4

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.2 Evaluación social

La evaluación social considera la opinión de los asistentes a las reuniones y talleres de la actividad de Participación Ciudadana, donde los actores han identificado y priorizado las brechas que consideran más relevantes y medidas atingentes, frente a aquellas soluciones que no consideran oportunas o que causan rechazo.

Para la priorización de las iniciativas desde el punto de vista de la evaluación social, se ha considerado la clasificación y la puntuación recogida en la Tabla 3.7-2.

Tabla 3.7-2 Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC

Categoría de validación PAC	Descripción	Puntaje
Bajo	Iniciativa validada "indiferente" con porcentaje de votos mayor al 20%.	1
Medio	Iniciativa validada "de acuerdo" con porcentajes de votos igual o menor al 90% y con porcentajes de votos "indiferente" menor o igual al 20%.	2
Alto	Iniciativa validada "de acuerdo" con porcentaje de votos mayor al 90%.	4

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.3 Evaluación ambiental

La evaluación ambiental recoge los aspectos principales en materia medioambiental del proyecto propuesto. Este se ha definido en un indicador cualitativo de evaluación relativo al impacto en la protección y conservación de los recursos, aportando al Eje

4 del PEGH. Para dicho indicador de impacto se recurre a la opinión experta, y se considera la Tabla 3.7-3 de puntuación para la evaluación ambiental.

Tabla 3.7-3 Escala de puntuación para evaluación ambiental

Categoría de impacto	Descripción	Puntaje
Bajo	Acciones con la comunidad que tienen un impacto indirecto de protección y conservación de los recursos naturales	1
Medio	Programas, obras de mejora y monitoreo, que tienen un impacto indirecto de protección y conservación de los recursos naturales	2
Alto	Proyectos o acciones con incidencia directa en protección y conservación en recursos naturales	4

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.4 Evaluación Estratégica

Para la evaluación estratégica se considera como criterio la temporalidad de las medidas, es decir, si éstas son contempladas a corto, mediano o largo plazo. El peso o puntaje asignado a esta temporalidad recae en la lógica de la habilitación de medidas, es decir, aquellas medidas que se estipulan a corto plazo, tienen mayor peso, dado que son habilitantes para las de mediano o largo plazo. Para esta evaluación se consideran los valores puntuación indicados en la Tabla 3.7-4.

Tabla 3.7-4 Escala de puntuación para evaluación estratégica

Categoría de impacto	Descripción	Puntaje
Bajo	Medidas de largo plazo, 6 o más años	1
Medio	Medidas de mediano plazo, 3 a 5 años	2
Alto	Medidas de corto plazo, 1 a 2 años	4

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.5 Priorización de las medidas

Para la priorización de medidas se utiliza una aproximación de la metodología de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (MCDM, por sus siglas en inglés). Este método ha sido estudiado por la DOH para la priorización de infraestructura hidráulica, específicamente cuando se toman decisiones de inversión de un conjunto

de iniciativas que contemplan el mismo producto estratégico de la DOH (tipo de obra). Para el presente ejercicio se aproxima la metodología para poder comparar iniciativas de gestión, que incluyen medidas habilitantes, de procesos y de inversión en obras menores y mayores.

Para ello, a continuación, se detallan los pasos generales a considerar en el análisis multicriterio.

1. Identificar opciones a ser evaluadas: Consiste en determinar los actores relevantes del problema, evaluar los objetivos del proyecto y, en base a lo anterior, determinar cuáles son las opciones con las que se cuenta actualmente. Esta identificación se basa en el trabajo realizado en las actividades de la PAC, las modelaciones, y la opinión técnica del equipo de expertos del estudio.
2. Identificar criterios y objetivos: En esta etapa se pretende identificar aquellos criterios que se van a considerar, de forma que las opciones del problema estén reflejadas en estos. Además, en esta etapa se deben jerarquizar los criterios en grupos de acuerdo al nivel de importancia y características de estos. Es importante revisar que los criterios identificados concuerden con los objetivos del proyecto, para lo cual se debe tener en cuenta: viabilidad técnica, eficiencia económica, desarrollo y planes estratégicos del proyecto. Para ello, en el presente ejercicio se consideran como criterios de desarrollo las evaluaciones ambiental, social, y económica antes descritas, agregando un criterio estratégico que se refiere a la temporalidad y relevancia de la iniciativa bajo la opinión experta.
3. Determinar variables a considerar de acuerdo con criterios previamente establecidos: Consiste en identificar las opciones con las que se cuenta, definir una forma de llevar estas opciones a variables medibles (indicadores) y determinar las puntuaciones de cada una de estas opciones de acuerdo a los criterios previamente establecidos. Para este paso, se consideran los indicadores económicos de costo-eficiencia de las iniciativas y los indicadores ambientales y sociales descritos en las secciones previas.
4. Asignar promedios ponderados a cada variable de acuerdo con la importancia relativa, que en el presente ejercicio se hace a través del proceso analítico jerárquico (AHP). Este método requiere que el tomador de decisiones proporcione tanto evaluaciones como preferencias subjetivas con respecto a la importancia relativa de decisión para cada criterio. El resultado del AHP corresponde a una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada alternativa de decisión. Dado que es el tomador de decisiones quien determina, mediante sus juicios de valor, conocimientos y experiencia previa, las ponderaciones de cada criterio en el modelo, el AHP requiere de la participación de representantes de todos los estamentos relacionados con la toma de decisión. Más abajo se expone el modelo matemático para obtener las ponderaciones finales a ser utilizada.

5. Combinar ponderaciones y calificaciones de cada opción de forma de obtener un valor global: En esta etapa se debe establecer que método de combinación se va a utilizar para agrupar los indicadores. Hasta el momento se considera el método de ponderación aditiva simple (SAW), conocido como método de combinación o puntuación lineal ponderada. Es una técnica de decisión multicriterio y se basa en el promedio ponderado. Corresponde a uno de los métodos más simples y se utiliza muy a menudo en métodos de decisión a través de técnicas multicriterio. El modelo matemático corresponde a:

$$u_i = \sum_{j=1}^m r_{ij}w_j$$

Ec. 35

Donde la utilidad u_i es el resultado de la suma ponderada de los criterios w_j y sus ponderaciones relativas r_{ij} . Luego se aplica un criterio de maximización de utilidades, donde los mayores valores de la utilidad (u_i) son las mejores alternativas.

6. Finalmente se deben examinar los resultados obtenidos.

Respecto al proceso analítico jerárquico (AHP), se debe aclarar que es una metodología de análisis multicriterio, y que está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples o muy distintos, basado en una matriz de comparación de pares que permite definir preferencias de un conjunto de actores. A pesar de ser un método subjetivo, su principal ventaja respecto de otros métodos es que considera la posibilidad de incluir datos cualitativos que, generalmente, no se consideran en los análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero suelen ser relevantes en algunos casos. Otras aproximaciones metodológicas de priorización son el método de la Entropía, el método CRITIC (*Criteria Importance Through Intercriteria Correlation*), o el CP (*Compromise Programming*), entre otros. Particularmente estos métodos son considerados más objetivos porque exploran contrastes entre grupos de datos, a través de correlaciones u optimización para una función objetivo o un "punto ideal" que debe ser previamente definido. La filosofía de estos métodos se basa en la cantidad de información disponible y su relación con la importancia del criterio. En la presente aplicación no se cuenta con información histórica de gasto público e inversión en el tipo de iniciativas que se están proponiendo en el PEGH, y las acciones representan necesidades en un nuevo contexto social, ambiental y económico, que no necesariamente responden a la experiencia en toma de decisiones en el pasado. Por todo lo anterior se selecciona la metodología AHP por sobre los otros métodos mencionados, que a pesar de ser subjetivo, permite consolidar una decisión bajo consenso de acuerdo a la preferencia de los distintos actores. Es importante mencionar que, para un mejor resultado, se promueve que la mayor cantidad de actores relacionados participen en la aplicación de AHP.

El modelo matemático asociado a AHP para determinar las ponderaciones de los criterios contempla los siguientes cuatro pasos.

1. El tomador de decisión define la matriz de comparación por pares, P , donde los valores p_{ij} corresponden a la importancia relativa del criterio i -ésimo con respecto del criterio j -ésimo, en una matriz como la siguiente.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & 1 & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

2. En el proceso de comparación, una vez determinada la matriz singular superior, se puede obtener la matriz triangular inferior mediante la siguiente ecuación

$$p_{ji} = \frac{1}{p_{ij}}$$

3. Luego, para obtener la matriz de comparación de pares normalizada, X , se debe dividir cada elemento en P por la suma de sus columnas, como sigue:

$$X = \begin{bmatrix} 1/\sum_{m=1}^m p_{m1} & \cdot & \cdot & p_{1m}/\sum_{t=1}^m p_{tm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{m1}/\sum_{m=1}^m p_{m1} & \cdot & \cdot & 1/\sum_{t=1}^m p_{tm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdot & \cdot & x_{1m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{m1} & \cdot & \cdot & x_{mm} \end{bmatrix}$$

4. Para obtener el vector de ponderaciones de los criterios (W), se deben promediar las filas de la matriz X .

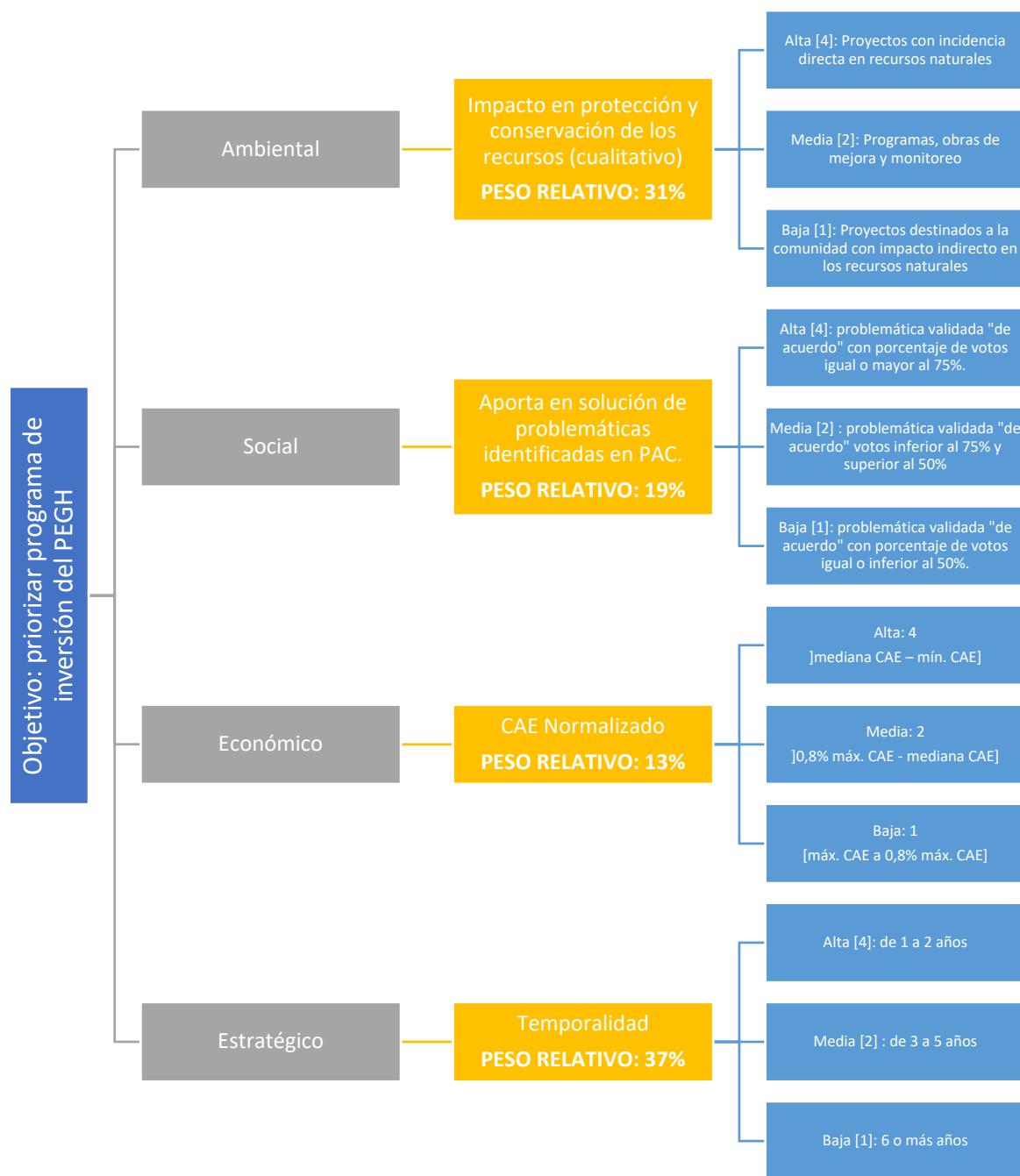
$$W = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^m x_{1m} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{t=1}^m x_{mt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ w_m \end{bmatrix}$$

En la ecuación anterior, el término w_j ($j= 1, \dots, m$) corresponde a la ponderación relativa del criterio j y la suma de las ponderaciones de los criterios debe ser 1.

El resultado de la priorización permitió entregar un ranking para la implementación de las medidas seleccionadas para el PEGH. En resumen, el presente ejercicio consideró: los resultados de las evaluaciones social, económica y ambiental descritos previamente, otorgando una escala de puntuación; más un criterio estratégico asociado a la urgencia temporal de implementación; y, las ponderaciones abordadas desde la opinión experta de los tomadores de decisión a través del método AHP.

Finalmente, los resultados se presentaron en una tabla de priorización (Anexo K.3), en la cual se ordenaron los puntajes del ranking de mayor a menor valor, y se destacaron en color verde aquellas iniciativas cuyos puntajes se encuentran dentro del 40% superior del rango de valor de priorización máximo y mínimo calculado.

En la Figura 3.7-1 se presenta el esquema de priorización y los pesos relativos. Como se aprecia, el indicador asociado al criterio estratégico se presenta con el mayor porcentaje relativo de 37%, seguido del indicador ambiental con un 31%, mientras que el indicador social se presenta con un 19% y el económico con un 13%. Se debe mencionar que las ponderaciones son subjetivas al grupo de expertos que participa en la aplicación del modelo de jerarquización AHP. En futuras aplicaciones se puede considerar un grupo más amplio de tomadores de decisión, incluyendo por ejemplo actores del Ministerio de Desarrollo Social y del Gobierno Regional.



Fuente: Elaboración propia.
Figura 3.7-1 Esquema de priorización de las acciones¹

¹ Los pesos relativos indicados se obtienen bajo el método de AHP con sólo dos (2) participantes.

Por petición de Inspección Fiscal, se presenta una priorización adicional, en base a lo propuesto por el Consultor (resultados se presentan el Anexo K.3). Los porcentajes utilizados en esta priorización son los siguientes: criterio estratégico 35%, indicador ambiental 20%, indicador social 25%, indicador económico 20%.

3.7.3 Valorización económica del PEGH

La valorización económica del PEGH corresponde a la identificación del monto total asociado al VAC y CAE de las iniciativas del Plan de Acción, así como consideraciones y estrategias de financiamiento.

Cada una de las iniciativas contiene la identificación de la entidad financiadora y la entidad responsable, de forma de establecer la gobernanza asociada al PEGH. En lo relativo a su sostenibilidad, se establece el presupuesto correspondiente a cada administración implicada, ya sea un actor público o privado. Se compila así, mediante tablas resumen, las iniciativas a ejecutar por DGA diferenciadas de aquellas a cargo de otras instituciones, incluyendo valores totales por cada una de las entidades financiadoras propuestas, con apoyo de gráficos de torta.

3.7.4 Metodología para la generación del cronograma de las soluciones

El cronograma de las soluciones corresponde a la generación de la hoja de ruta asociada a cada una de las iniciativas, identificando los horizontes (corto, mediano y largo plazo), clasificando las acciones según su tipología (OH, MG, NF, OM) e identificadas por código y nombre.

3.8 METODOLOGÍA APLICADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

En el presente capítulo se presentan la metodología aplicada a la implementación del PEGH, comenzado con un resumen de los principales hitos identificados en la implementación del Plan de Acción, seguido de algunas directrices a considerar para el éxito del Plan de Acción, relativo a la estrategia de implementación y comunicacional, para finalizar con un resumen con la identificación de las fuentes de financiación previstas.

3.8.1 Hitos de referencia en la implementación del plan

Se incluye, en primer lugar, un resumen de la estructura del Plan en la relación a: i) ejes, y ii) tipología de acciones. Seguidamente se presentan los principales hitos a cada uno de los horizontes del Plan (corto, mediano y largo), identificando iniciativas clave en cada caso.

3.8.2 Estrategia de implementación

La estrategia de implementación aborda dos aspectos:

- i) Aspectos condicionantes y/o requisitos habilitantes. Se abordan las siguientes temáticas: aspectos institucionales, de cultura del agua, de financiamiento y normativos, describiendo las consideraciones relevantes en cada caso por tipología de acción prevista en el Plan.

- ii) Pasos en la implementación. Comprende una propuesta de implementación del Plan de Acción, abordando responsabilidades y gobernanza en las diferentes escalas: nivel de coordinación (ejecución del PEGH) y nivel técnico (implementación de acciones, y monitoreo y seguimiento).

3.8.3 Estrategia de comunicación

La estrategia de comunicación comprende aquellas estrategias de comunicación y difusión del PEGH en dos estadios: i) síntesis de acciones ejecutadas durante el desarrollo del estudio; y ii) propuesta de estrategia para fases posteriores a la elaboración del Plan.

3.8.4 Identificación de fuentes de financiamiento del Plan

La identificación de fuentes de financiamiento corresponde a una tabla de síntesis de distribución de costos según mandante (DGA, DGA junto con otras instituciones, y otras instituciones) con montos de VAC y CAE, en unidades de UF.

3.9 METODOLOGÍA APLICADA EN EL MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN

En este capítulo se detalla la metodología aplicada al Monitoreo del PEGH, así como los mecanismos para análisis y toma de decisiones asociados.

3.9.1 Programa de seguimiento y control del Plan

Las pautas del programa de seguimiento y control del PEGH se han establecido en un Plan de Monitoreo, con el objetivo de verificar la eficacia de las acciones efectivamente implementadas, a través de la definición de indicadores de cumplimiento.

Adicionalmente, para realizar la evaluación de las iniciativas propiamente tal, se han definido en cada caso, siempre que sea posible:

- **Indicadores de producto:** dan cuenta del grado de cumplimiento de las iniciativas planificadas.
- **Indicadores de impacto:** permiten evaluar los resultados de las ejecuciones de las iniciativas respecto de las problemáticas o brechas existentes.

En el establecimiento de indicadores del PM, se han considerado experiencias anteriores en planificación hídrica; específicamente, se ha tomado como referencia principal el último instrumento de características similares promovido por la DGA, correspondiente al estudio DGA (2013).

Así, los indicadores considerados son:

- Indicadores Generales: PIC, PICa, PIF y PIFa.
- Indicadores Específicos.

A su vez, para realizar el seguimiento del PEGH propiamente tal, se han definido una serie de conceptos adicionales:

- Parámetro de referencia.
- Umbrales.

- Frecuencia de revisión.

Consecuentemente, seguidamente se detallan los siguientes indicadores, de tipo general y específicos, así como otros conceptos a tener en cuenta:

- **Indicadores Generales.** Cuantifican el grado de avance del PEGH a nivel global, considerando la relación existente entre iniciativas comenzadas y/o finalizadas versus la programación planificada según la carta Gantt. Considera 4 indicadores:
 - Porcentaje de iniciativas comenzadas (PIC). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas comenzadas en el año *i* y el número de iniciativas planificadas en el año *i*.
 - Porcentaje de iniciativas comenzadas acumulada (PICa). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas comenzadas hasta año *i* y el número de iniciativas planificadas hasta el año *i*.
 - Porcentaje de iniciativas finalizadas (PIF). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas finalizadas en el año *i* y el número de iniciativas planificadas en el año *i*.
 - Porcentaje de iniciativas finalizadas acumulada (PIFa). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas finalizadas hasta año *i* y el número de iniciativas planificadas hasta el año *i*.
- **Indicadores Específicos.** Dan cuenta del porcentaje de avance de la implementación de las iniciativas clave del Plan de Acción.
 - Porcentaje de avance iniciativa N°1. Se calcula como el cociente entre el avance real y lo planificado. Este cálculo se obtiene a partir de la carta Gantt específica de la iniciativa 1, cronograma que debe confeccionarse al momento de comenzar el proyecto en particular. Adicionalmente este indicador tiene definido un tiempo máximo para su implementación.
 - Porcentaje de avance iniciativa N°2. Se calcula como el cociente entre el avance real y lo planificado. Este cálculo se obtiene a partir de la carta Gantt específica de la iniciativa 2, cronograma que debe confeccionarse al momento de comenzar el proyecto en particular. Adicionalmente este indicador tiene definido un tiempo máximo para su implementación.
- **Parámetro de referencia.** Para los indicadores generales representa el número de iniciativas totales por año que deben ser comenzadas o finalizadas para dar cumplimiento en un 100% a la planificación del PEGH. Para los indicadores específicos representa el tiempo al cual la iniciativa debe estar 100% implementada. Este parámetro es sólo referencial y ayudan a la determinación de los umbrales del PM.
- **Umbrales.** Los umbrales corresponden a los valores de avance mínimos aceptados para cada tipo de indicador.

- **Frecuencia de revisión y Plan de Acción.** El PM debe tener en cuenta las posibles revisiones del PEGH, de acuerdo a una frecuencia establecida y siguiendo un Plan de Acción fijado, según se detalla a continuación:
 - El PM considera el seguimiento de la implementación de las iniciativas durante los primeros cinco años, a través de los indicadores descritos anteriormente. Sin embargo, se considera la aplicación de un Plan de Acción, en caso de ser necesario, hasta el cuarto año. Lo anterior debido a la realización de una evaluación y rediseño del plan en su conjunto durante el quinto año, donde una de las variables a evaluar y rediseñar es el PM.
 - Si la evaluación realizada a través del PM indica que no se han cumplido con los umbrales definidos, es decir, existen desviaciones importantes respecto de lo planificado, se ejecutó un plan de acción, que tiene por objetivo replanificar el PEGH de modo de cumplir con los objetivos propuestos en los tiempos propuestos.

Además, se establecen mecanismos para la potencial reformulación del PEGH.