



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

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL MAIPO

**INFORME FINAL
ANEXO F ASPECTOS METODOLÓGICOS
DEL PLAN DE CUENCAS**

**REALIZADO POR:
ICASS SpA**

S.I.T. N°471

SANTIAGO, MAYO DE 2021

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda hacerlo según el siguiente formato:

DGA, 2021. PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL MAIPO. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por ICASS SpA.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas
Sr. Oscar Cristi Marfil

Jefa División Estudios y Planificación
Sr. Mauricio Lorca

Inspector Fiscal
Sr. Marco Larenas Contreras

Inspector Fiscal (S)
Sr. Franco Calderón Maturana
Sr. Ernesto Ríos Ríos

INGENIERÍA Y CONSULTORÍA EN AGUAS SPA

Bernardo Capino Díaz, Ingeniero Civil, Hidrogeólogo
Jefe de Proyecto

Profesionales:

Wolf von Igel G., Hidrogeólogo, Especialista calidad de agua y medio ambiente

Kirk Heatwole, Especialista modelación de aguas subterráneas

Mauricio Zambrano B., Especialista recursos hídricos y modelación integrada

Nicolás Jadue M., Especialista en economía

Luis Acevedo L., Especialista SIG

Kapris Tabilo V., Especialista actividades de participación ciudadana

Adrián Lillo Z., Asesor coordinación

Alexander Fuentealba V., Ingeniero Civil

Daniel Graf, Ingeniero geólogo

Sofía López U., Hidrogeóloga

Laura Paricio M., Hidrogeóloga

Fernando Pérez V., Hidrogeólogo

Paulina Rodríguez Ch., Ingeniera Civil Hidráulica

Tabla de Contenido General

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ALCANCE	1
1.2	OBJETIVO GENERAL	1
2	METODOLOGIA APLICADA EN LA PAC	2
2.1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA PAC	2
2.2	HERRAMIENTAS Y/O TÉCNICAS METODOLÓGICAS EN ENFOQUE DE PAC TELEMÁTICO.	6
2.3	PLAN DE TRABAJO PAC.....	8
2.4	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	9
2.5	DEFINICIÓN DE ESCALAS DE ANÁLISIS. MAPA DE ACTORES	10
	2.5.1 Definición de actor relevante	10
	2.5.2 Metodología de convocatoria de actores	11
	2.5.3 Actores en el territorio	12
2.6	MAPA DE ACTORES CONVOCADOS	13
	2.6.1 Reuniones de presentación y Talleres realizadas en la cuenca	15
3	METODOLOGIA APLICADA EN EL PLAN DE ACCIÓN	18
3.1	SELECCIÓN DE INICIATIVAS ASOCIADAS AL PLAN	18
	3.1.1 Identificación de cartera de iniciativas vigentes.....	18
	3.1.2 Levantamiento de acciones.....	18
	3.1.3 Evaluación y priorización de acciones.....	19
	3.1.4 Identificación de iniciativas asociadas a acciones y complementación según materias clave.....	20
3.2	EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA EL PLAN DE ACCIÓN.....	20
3.3	EVALUACIÓN SOCIAL PARA EL PLAN DE ACCIÓN	21
3.4	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	22
3.5	EVALUACIÓN DE TEMPORALIDAD	22
3.6	PRIORIZACIÓN DE LAS ACCIONES Y DEFINICIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN	23
4	METODOLOGIA ESTIMACIÓN DE DEMANDAS HIDRICAS	26
4.1	DEMANDA ACTUAL.....	26
	4.1.1 Demanda agrícola	26
	4.1.2 Demanda de agua potable.....	32
	4.1.3 Demanda de uso industrial	33
	4.1.4 Demanda de uso minero	34
	4.1.5 Demanda de uso eléctrico	34
4.2	PROYECCIÓN DE DEMANDA.....	38
	4.2.1 Demanda agrícola	38
	4.2.2 Demanda de agua potable.....	38
	4.2.3 Demanda de uso industrial	42
	4.2.4 Demanda de uso minero	43

5	METODOLOGIA APLICADA EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA	46
5.1	PLATAFORMA WEAP	46
5.1.1	Modelación Hidrológica en WEAP	46
5.2	DESCRIPCIÓN DE MODFLOW	49
5.3	ACOPLE WEAP-MODFLOW	49
5.4	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	51
5.5	CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD	52
5.5.1	Descensos sustentables	53
5.5.2	Afectación al río	53
5.5.3	Satisfacción de demanda.....	54
5.5.4	Pozos secos	55
5.5.5	Análisis de influencia a otros sectores	55

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Alcance

El presente documento contiene los principales alcances metodológicos considerados para la elaboración del PEGH de la cuenca del Maipo.

1.2 Objetivo general

Explicar en forma clara y detallada los principales aspectos metodológicos considerados para el desarrollo de los componentes del plan, esto es, tanto en la etapa descripción, caracterización y modelación de la cuenca, así como en el desarrollo de las actividades de PAC.

2 METODOLOGIA APLICADA EN LA PAC

En el marco del estudio “Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del río Maipo” (PEGH Maipo), se desarrolló un proceso de participación ciudadana (PAC), siguiendo las bases de licitación, modificado acorde a las circunstancias del contexto de pandemia por COVID19, cuyo detalle se entrega en los puntos siguientes.

2.1 Introducción y objetivos de la PAC

El “Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maipo” desarrolló un componente de PAC basada en Espectro de Participación Ciudadana (o *Spectrum of Public Participation*) desarrollada por la Asociación Internacional para la Participación Pública (IAP2), la que se intentó enlazar con una perspectiva territorial y sociohídrica, que intentaba visibilizar de forma efectiva a los actores públicos y privados que están involucrados con la gestión y manejo del recurso hídrico en esta cuenca de manera específica, con miras a la gobernanza del recurso, en un contexto de crisis hídrica.

De este modo, el proceso de PAC se constituyó fuertemente sobre los procesos de INFORMAR y CONSULTAR a la comunidad, por tanto, algunas especificidades territoriales a considerar en este punto se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Especificidades territoriales y sociohídricas consideradas en Proceso PAC de la Cuenca del Maipo.

	Niveles de participación	
	Informar	Consultar
Meta	Proveer a la comunidad información objetiva que los ayude a comprender los problemas y/o las alternativas de solución.	Obtener y tomar en cuenta las inquietudes, necesidades y aportes de la ciudadanía.
Especificidades territoriales y sociohídricas a considerar	<p>Cada uno de los territorios presentan características específicas que fueron consideradas para realizar el proceso informativo (mayor cantidad de adultos mayores, mujeres adultas mayores solas, agricultores que trabajan en la actividad productiva durante todo el día, analfabetismo funcional de algunas personas de la comunidad, madres con hijos pequeños, etc.), lo que se complejizó debido al contexto pandémico, que dejó de manifiesto otros problemas, como el analfabetismo digital y/o poco manejo con algunos de las herramientas tecnológicas requeridas para las reuniones telemáticas.</p> <p>Las técnicas de difusión consideraron este contexto, enviando información por mail o sistemas de mensajería instantánea.</p>	<p>Se realizaron reuniones, talleres, entrevistas individuales de forma telemática en todos los casos, que levantaron los aportes de la comunidad respecto a la gestión hídrica.</p> <p>Asimismo, se utilizaron herramientas tecnológicas, como el Menti para realizar consultas a los distintos actores del territorio.</p>

Fuente: Elaboración propia en base a *Spectrum of Public Participation*, de IAP2, 2019.

Los ejes que fueron considerados en todo el proceso PAC, que pese a ser desarrollado vía telemática en todo momento, no dejó de considerar estos ejes como relevantes en su propuesta, tanto de conversación con los actores del territorio, como en la mirada implementada en la interacción con éstos, en instancias grupales e individuales, se relacionan con el enfoque territorial sociohídrico, y la perspectiva de género y consideración de adultos mayores (Tabla 2-2).

Tabla 2-2 Ejes transversales proceso PAC Cuenca del Maipo.

Ejes transversales	Descripción
Enfoque territorial sociohídrico	La perspectiva territorial considera que las localidades poseen particularidades socioculturales específicas, las que siempre se tuvieron en consideración, incluso en el contexto COVID19. En ese sentido, elementos como las actividades productivas realizadas, la estructura demográfica de los participantes, la pertinencia local respecto a los horarios más adecuados para las actividades, especificidades técnico/culturales en el lenguaje (resuelto en parte a partir de un glosario de términos entregados a los actores), fechas, entre otros aspectos.
Perspectiva de género y consideración de adultos mayores	La participación de mujeres y hombres se considera central durante todo el proceso, la que se fue dando de forma orgánica, ya que muchos APR tienen a mujeres como parte de sus directivas, por lo que en la PAC se logró levantar la mirada de género en la gestión y manejo de los recursos hídricos. Respecto a los adultos y adultas mayores se consideró su participación igualitaria, apoyando su participación a través de conversaciones telefónicas, las que no siempre terminaban en su efectiva participación en los talleres, pero se rescató su perspectiva en cada llamada realizada, las que fueron 2 por cada actor en este proceso.

Fuente: Elaboración propia.

Los objetivos específicos de la PAC de la cuenca del Maipo se presentan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Objetivos para el trabajo de participación ciudadana, Cuenca del Maipo.

Id	Objetivo	Detalle
1	Sistematizar y analizar información previa	Sistematizar y analizar la información generada en los distintos procesos de participación ciudadana realizada por los distintos planes de gestión ya desarrollados, en cuanto a compromisos adquiridos, conclusiones generales, etc.
2	Realizar proceso de consulta	Realizar un proceso de consulta a la institucionalidad del agua de cada cuenca, garantizando la participación de todos los interesados, y promoviendo la coordinación y orientación de las diversas intervenciones locales, de manera de orientar las decisiones públicas y privadas de los proyectos, programas y planes relacionados directa o indirectamente con el agua.
3	Obtener información	Obtener la información necesaria que permita retroalimentar elementos del diagnóstico que complementen el desarrollo del plan de cuenca, y también para entender la realidad de la cuenca, y así formular escenarios de gestión hídrica exitosos.
4	Presentar resultados	Presentar a las Juntas de Vigilancia, las Organizaciones de Usuarios de Agua de la cuenca, empresas usuarias de agua y Comunidades Indígenas, los resultados de la simulación de los escenarios diseñados en el plan de cuenca, para involucrarlos y responder a sus observaciones y comentarios.
5	Validar estrategias de gestión	Validar en conjunto con las Juntas de Vigilancia, Organizaciones de Usuarios de Agua de la cuenca y empresas usuarias de agua, el planteamiento de las estrategias de gestión de acuerdo a las brechas identificadas.
6	Consolidar resultados	Consolidar resultados del proceso participativo para informarlos a la ciudadanía en general.

Fuente: Bases de Licitación DGA, pp. 61. 2019.

2.2 Herramientas y/o técnicas metodológicas en enfoque de PAC telemático.

En este punto hubo que realizar una modificación general del proceso PAC que había sido propuesto, por una estrategia alterna que debió implementarse completamente de forma telemática, a pesar de las intenciones de haber podido, en algunos momentos, poder realizar una estrategia mixta (presencial/telemática), lo que lamentablemente no fue posible.

La Tabla 2-4 muestra las técnicas concretas que fueron utilizadas para acceder a los distintos actores de la cuenca.

Tabla 2-4 Técnicas de acceso a actores de la cuenca.

	NIVELES DE PARTICIPACIÓN	
	INFORMAR	CONSULTAR
META	Proveer a la comunidad información objetiva que los ayude a comprender los problemas y/o las alternativas de solución.	Obtener y tomar en cuenta las inquietudes, necesidades y aportes de la ciudadanía.
Técnicas y herramientas metodológicas de trabajo PAC	<ul style="list-style-type: none"> • Talleres online con la comunidad que tiene accesibilidad. • Entrevistas telefónicas. • Envío de material físico a las direcciones de las organizaciones y/o a algunos domicilios, de actores relevantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de entrevistas semiestructuradas en reuniones bilaterales, con actores clave, más allá de los talleres, tanto para SSPP como para actores comunitarios. • Talleres online con la comunidad que tiene accesibilidad. • Entrevistas telefónicas.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Considerando, además, que la estrategia participativa debió modificarse, se consideró que había que explicitar los criterios de participación que se considerarían en todo el

proceso, lo que fue compartido con todo el equipo de trabajo que se vinculó con los actores del territorio durante el proceso. Los criterios se resumen en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Criterios de participación en contexto telemático.

Criterio	Actividad
Lo participativo puede producirse tanto dentro del espacio del taller específico, como fuera de éste, en actividades previas con la comunidad.	Algunas de las OUA no contaban con capacidad digital, por lo que se las entrevistó telefónicamente, en que fueron informados y también consultados respecto a las temáticas más relevantes del estudio.
Lo participativo debe considerar la perspectiva de todos los involucrados, tengan o no tengan conectividad y/o acceso de redes.	<p>Por lo mismo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • si los actores tienen conectividad, se reúnen en instancias de taller online; • si no la tienen, se entrevistan por teléfono según tipología de actor.
Lo participativo debe ser informado.	Por ello, para las instancias de reunión de presentación y taller 1, se enviaron las presentaciones a todos los actores relevantes, previo a la realización de la actividad.
Lo participativo debe considerar el grado de acceso y manejo de sistemas de conexión online.	<p>Los talleres participativos fueron respetuosos con el grado de manejo de las tecnologías por parte de las comunidades, por lo que sistemas como <i>Menti</i> que pueden ser trabajados en grupos con mayor experiencia en tecnologías digitales, fueron aplicados con cautela en cada uno de los procesos.</p> <p>La herramienta <i>Menti</i> tuvo buenos resultados obtuvo en el proceso, ya que estableció las prioridades de los actores, siendo de fácil implementación en el contexto de taller.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.3 Plan de trabajo PAC

El plan de trabajo original, presencial, consideraba instancias de reunión de PAC presentadas en la Figura 2-1.

ESTRATEGIA ORIGINAL DE PAC, PRESENCIAL. CUENCA DEL MAIPO.

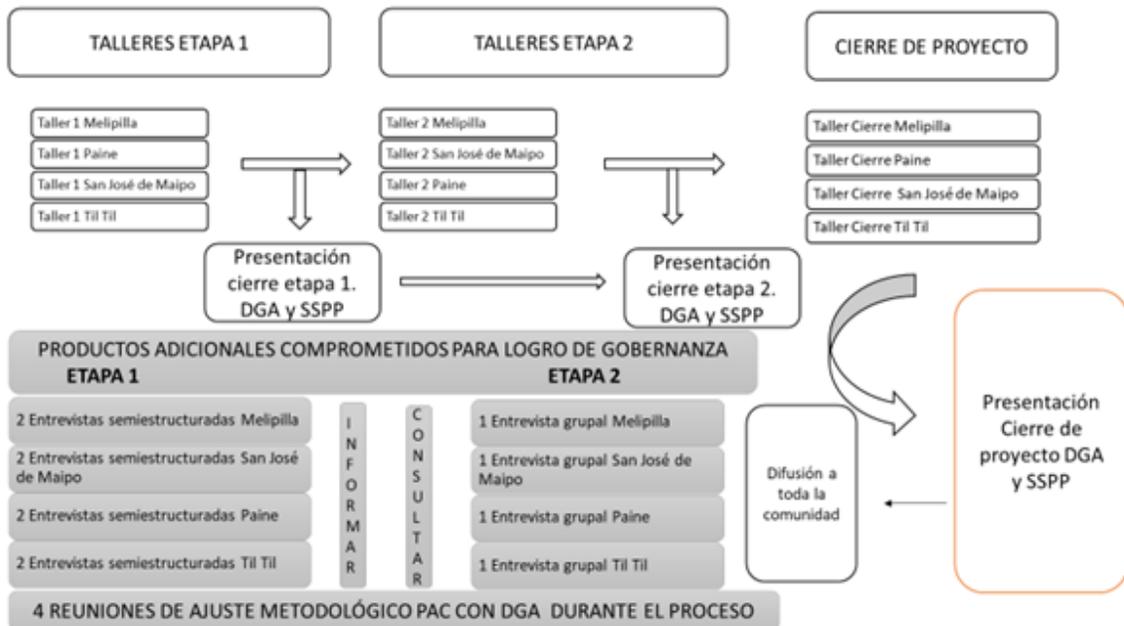


Figura 2-1 Estrategia original de PAC, presencial. Cuenca del Maipo.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La estrategia alternativa utilizada se presenta en la Figura 2-2.

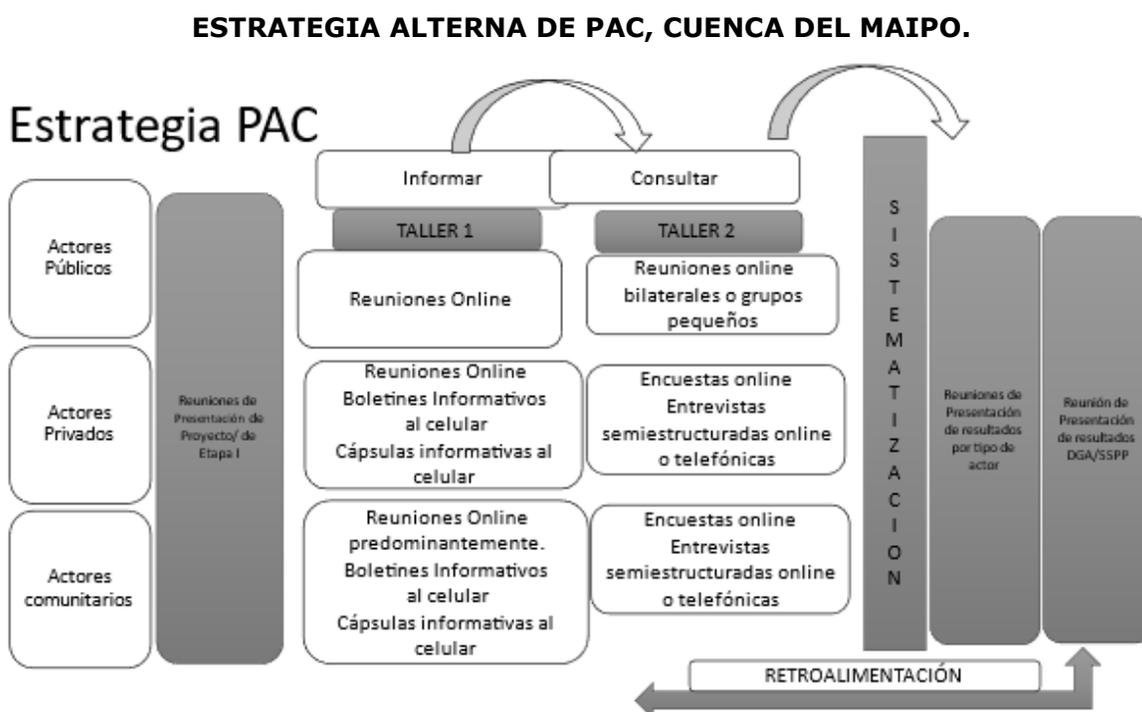


Figura 2-2 Estrategia alternativa de PAC, Cuenca del Maipo.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

El cambio más relevante para la estrategia alterna de PAC fue considerar como eje a los actores, más que los territorios de los que éstos provenían o representaban, en consideración a la situación de pandemia que se vive en el país.

El detalle de las reuniones de presentación y de los talleres implementados por tipo de actor se presenta en Anexo I.

2.4 Recopilación de antecedentes

Se recopilaron y revisaron en gabinete diversos antecedentes levantados en los procesos de participación ciudadana en las localidades involucradas en el proyecto, obtenida tanto de planes de gestión previos como de otros documentos relativos a la gestión del recurso hídrico en estos 4 territorios. El levantamiento de información consideró información disponible en DGA y los que se lograron levantar en diversas instituciones u organismos públicos o privados. El resultado de este levantamiento se entrega en Anexo I.

2.5 Definición de escalas de análisis. Mapa de actores

Esta parte del proceso PAC se sustentó en la búsqueda y sistematización de información secundaria y primaria respecto a los distintos actores de esta Cuenca, que estuvieran vinculados al recurso hídrico, sumando a esto los requerimientos dados por las bases de licitación, lo que derivó en la definición de ciertos actores por sobre otros. Los elementos considerados como criterios se describen someramente a continuación.

2.5.1 Definición de actor relevante

Los elementos que orientaron la selección de actores para el mapeo que permitió caracterizar a los usuarios de agua en la cuenca, son:

Atributos

Los elementos centrales para dar cuenta de la relevancia de los actores a convocar fueron:

- Tener presencia en decisiones en el uso y manejo del recurso hídrico en el territorio.
- Que utilicen el recurso para actividades productivas, empresariales u otras.
- Que tengan interés (académico, medioambiental, económico, político) en la temática hídrica en la cuenca.
- Que tengan información respecto al recurso hídrico en la cuenca.
- Que tengan responsabilidad en el uso y manejo del recurso en la cuenca por parte de todos los actores.

Representación sectorial

Se consideró que los actores fueran representativos de una serie de sectores vinculados con el recurso hídrico, los criterios fueron:

- Actores institucionales públicos relacionados con el recurso hídrico.
- Organizaciones usuarias de agua.
- Mesas técnicas o Asociaciones de APR.
- Fundaciones o movimientos ambientales.
- Organismos técnicos vinculados a temas hídricos.
- Empresas Sanitarias, Mineras o Hidroeléctricas usuarias de recursos hídricos.

2.5.2 Metodología de convocatoria de actores

La metodología de convocatoria de actores se esquematiza en la Figura 2-3, considerado para la identificación y convocatoria de actores se identifican los siguientes criterios y/o procedimientos.

Procedimiento de inclusión

Para la inclusión se implementaron algunos criterios:

- Interés y confianza por participar en el proceso. Hubo actores que se negaron a participar de este proceso, como APR del sector de Batuco, por ejemplo.
- Liderazgo en los temas hídricos, que hace que sea un referente y pueda generar un proceso multiplicador de las iniciativas del Plan Estratégico.
- Que tuvieran información central para el desarrollo de este Plan, pensando en la gobernanza del proceso.

Esto se implementó de forma concreta a través de la revisión de los listados de actores de otros proyectos similares en la cuenca, implementados por DGA y por otros servicios públicos, así como a partir del contacto con diversos actores de la zona, como algunos SSPP que fueron contactados con este fin y profesionales de las Ciencias Sociales que habían trabajado previamente en las iniciativas previas implementadas en la zona.

Encuestas de conectividad

Consideró la aplicación de encuestas de conectividad en la cuenca, para todos los actores que fueron identificados, que incluyen temas como: accesibilidad celular, internet, softwares de acceso a reuniones online. Además, se solicitaron algunas direcciones postales. Esto, en vista que la detección e inclusión de actores también tenía que considerar este aspecto, que no había sido considerado anteriormente.

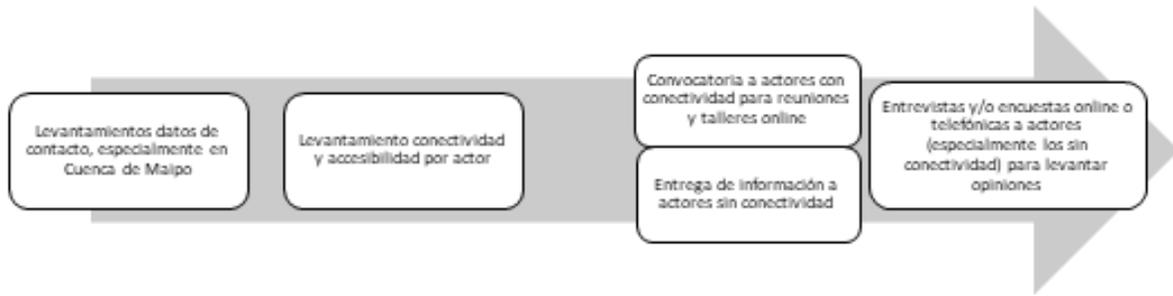


Figura 2-3 Metodología de convocatoria de actores.

Fuente: Elaboración propia, 2020

2.5.3 Actores en el territorio

Se levantaron 5 tipos de actores a partir del proceso ya comentado: Actores Públicos, Actores Privados, Actores Público/Privados y Actores de la Comunidad. Estos se definen como sigue:

- **Actores Públicos:** todos los servicios y organismos que forman parte de la administración del Estado y cuyo quehacer se relaciona con las temáticas relativas a la gestión del recurso hídrico y a su rol en la implementación del Plan en la Cuenca.
- **Actores Públicos Locales:** son todos los servicios públicos que tienen origen político que se asientan y tiene vínculo con los territorios locales.
- **Actores Privados:** son todos aquellos cuyas actividades se relacionan con el mercado, es decir, con todos los aspectos que promueven la producción de bienes y servicios, con o sin fines de lucro, teniendo en muchos casos como misión obtener alianzas que beneficien a sus socios o faciliten el desarrollo de su labor. Considerando lo anterior, esta categoría agrupa a organizaciones de agricultores, asociaciones productivas y gremiales del agro, Juntas de Vigilancia, APR, Comunidades de aguas, Comunidades de regantes, empresas privadas como sanitarias y mineras, entre otras.
- **Actores Público/Privados:** son todos aquellos que tienen financiamiento mixto: fondos estatales y fondos privados, en formato corporación o fundación. Entre éstos se encuentran el Fondo del Agua y CIREN, entre otros.
- **Actores de la comunidad:** son todas aquellas organizaciones conformadas por personas que comparten un territorio y/o que de alguna forma interactúan con

los procesos y problemáticas del recurso hídrico, o tienen una visión común respecto a estos temas. Entre estas organizaciones se pueden mencionar a ONGs, representantes de la comunidad, organizaciones territoriales y comunitarias, etc.

2.6 Mapa de actores convocados

Los mapas de actores son herramientas que permiten observar la realidad social a partir de estructuras que se expresan a través de distintas formas de relación entre los actores, que pueden ser un grupo, una organización, un individuo, una institución, etc. Las relaciones entre éstos configuran redes y a partir de la posición de los actores en estas redes se definen las incidencias, relaciones de poder y/o de influencia que éstos mantienen en relación a una temática específica (Tapella, 2007).

A partir de la información lograda a través de las herramientas de levantamiento de información ya mencionadas, se elaboró un acercamiento a un mapa de actores, sustentado en los criterios de interés e influencia.

Relaciones de Interés e Influencia

Dentro de las herramientas que permiten establecer la posición de diversos actores frente a un tema específico, se encuentra aquella que lo hace a partir de parámetros y/o variables e influencia o poder e interés - disposición de esos actores (Tabla 2-6).

El grado de influencia se establece a partir de su nivel de injerencia en temas hídricos (decisiones, gestiones, campo de acción mandatado por ley).

El grado interés, acorde a CNR (2016) tiene que ver con el nivel de interés respecto a la temática, en términos de la necesidad y/o beneficios, respecto de las determinaciones de inversión, en proyectos, estudios o programas, etc.

Tabla 2-6 Matriz de mapa de actores de influencia/interés- disposición Cuenca del Maipo.

	Influencia				
		Sin Influencia	Poca Influencia	Mediana Influencia	Poder formal/Mucha influencia
Disposición	Alta Disposición				
	Mediana Disposición				
	Escasa Disposición				
	Nula disposición				
	Oposición				

Fuente: Matriz CNR, 2016 y Elaboración propia, PEGH Maipo, 2021.

A pesar de que se realizaron reuniones de forma telemática vía ZOOM, y conversaciones telefónicas con los actores contactados, como entrevistas en reuniones bilaterales, fue posible, a través de herramientas como Menti, lograr algunas aproximaciones a las posiciones de los actores en la cuenca, que fueron entregadas en el Informe Final, acápite 2.6.

Para complementar la información, una de las metas del proceso de consulta con los actores mencionados era poder incorporar sus observaciones y comentarios al proceso PAC realizado. Esto fue implementado en dos instancias, entrevistas abiertas con los actores cuando se implementó el proceso de identificación y convocatoria, y en el mismo momento de taller, en que se utilizó la herramienta Menti Meter con los diversos actores, la que es explicada en el anexo I.

Las visiones de los actores, sistematizadas, fueron rescatadas en la sección 2.6 de este informe, en vista de que la gran mayoría son efectivamente complementarias a las diversas situaciones que han sido documentadas en estudios previos (CNR, 2016; DGA, 2018).

Los temas trabajados en las entrevistas fueron, básicamente, respecto a las brechas y situaciones de conflicto que han sido observadas por los diversos actores. Respecto a las reuniones bilaterales con instituciones públicas, éstas tendían a dar cuenta de las carteras de proyectos que se están implementando en la Cuenca, para poder hacer un buen ajuste con lo que este Plan propondrá. Se anexan las pautas de entrevistas realizadas y sus resultados en las minutas sintetizadas en el anexo I de este informe, junto a los actores que fueron efectivamente entrevistados.

Sin embargo, se pueden mencionar las reuniones bilaterales con Servicios Públicos, las que fueron dos:

- SISS
- CNR

En ambas se discutió la cartera de proyectos que estas instituciones manejan, con el fin de no replicar acciones que tienden al mismo fin.

2.6.1 Reuniones de presentación y Talleres realizadas en la cuenca

Las reuniones de presentación y los talleres se desarrollaron, como se señaló, por tipo de actor en la cuenca, a saber:

- Reuniones de presentación a SSPP de región de Valparaíso y Metropolitana.
- Reunión de presentación a APR de la Cuenca del Maipo.
- Reunión de presentación a OUA de la Cuenca del Maipo.
- Reunión de presentación Empresa Sanitaria Aguas Andinas.
- Reunión de presentación Empresas Sanitarias de la Cuenca del Maipo.
- Reunión de presentación Empresas mineras y termoeléctricas de la cuenca del Maipo.
- Reunión de presentación a Corporación de Desarrollo San Antonio.
- Taller 1 con APR de la Cuenca del Maipo.
- Taller 1 con OUA de la Cuenca del Maipo.
- Taller 1 Empresas privadas de la Cuenca del Maipo (sanitarias, mineras y termoeléctricas).
- Taller 2 con APR de la Cuenca del Maipo.
- Taller 2 con OUA de la Cuenca del Maipo.
- Taller 2 Empresas privadas de la Cuenca del Maipo (sanitarias, mineras y termoeléctricas).

La opinión de los actores se les comentó en el taller 2, de entrega de resultados, la que fue ponderada acorde a lo que se explica en la metodología de elaboración del Plan de Acción. La Figura 2-4 muestra la forma en que el PAC se hace presente en la elaboración del PEGH.

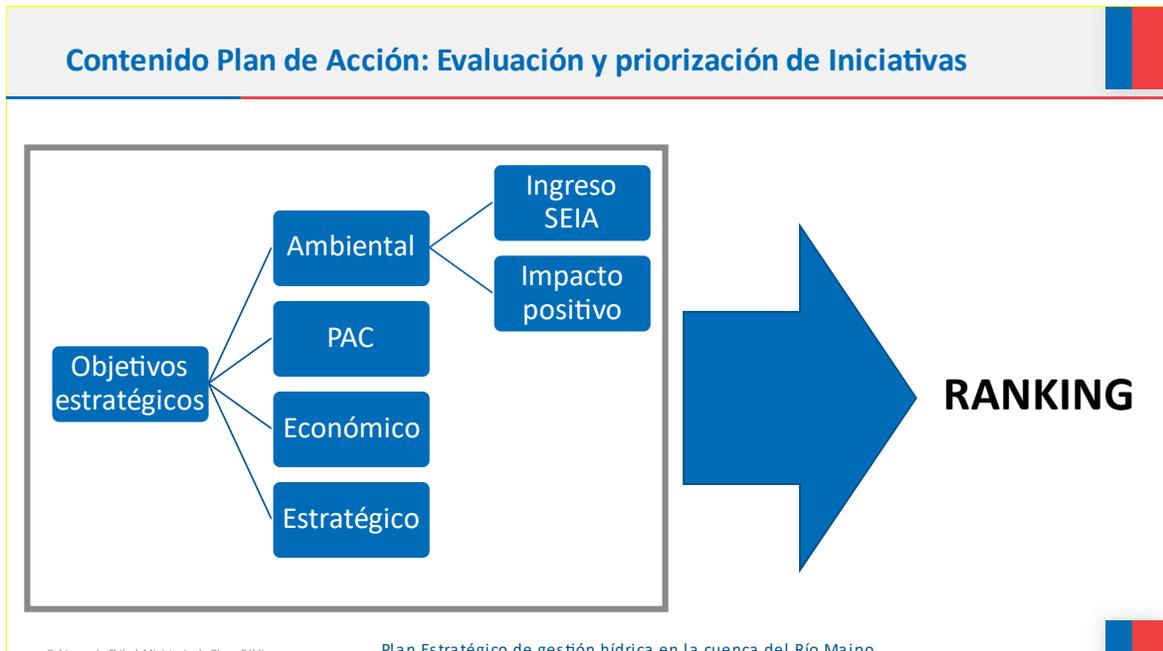


Figura 2-4 Diapositiva de Presentación Taller 2 PEGH Maipo.

Fuente: Presentación Resultados, Taller 2, Mayo 2021.

La retroalimentación hacia los participantes se produjo siempre en la misma instancia del taller, y posterior a este, se enviaba, hasta 5 días después, las presentaciones y las grabaciones en audio de las mismas.

La estructura de las reuniones, todas vía ZOOM, fueron:

- Dar cuenta de los objetivos de estas y la estructura de presentación.
- Presentación expositiva de los encargados de la modelación.
- Ronda de preguntas/respuestas y comentarios de los participantes.
- Implementación de un taller, diseñado en Menti, para dar cuenta de los problemas y soluciones que cada participante manifiesta.
- Entrega de los resultados de *Menti*.
- Cierre de la actividad y definición de nueva fecha de encuentro.

Respecto al Glosario de términos, este es un glosario específico de PAC, que se entregó a los actores convocados una semana antes del taller 1, junto con la presentación que se realizaría, para que tuvieran más información al momento de llegar a la misma. No se realizó una evaluación del efecto del glosario, en vista de que, a la fecha, no se ha realizado el Seminario final, en que se tendrá nuevamente contacto con los actores. Sin embargo, es importante mencionar que el taller 1 se logró obtener mayor comprensión de los temas, lo que es posible verificar por dos situaciones:

- El tipo de preguntas que realizan los actores de los talleres.
- Los alcances que realizan a los contenidos que se les presentan.

3 METODOLOGIA APLICADA EN EL PLAN DE ACCIÓN

3.1 Selección de iniciativas asociadas al Plan

La selección de iniciativas asociadas al plan consideró una serie de actividades, las cuales se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Actividades para la selección de iniciativas.

Nº	Actividad
1	Identificación de cartera de iniciativas vigentes
2	Levantamiento de acciones, considerando: <ul style="list-style-type: none"> • Bibliografías relevantes • Aportes desde la PAC
3	Evaluación y priorización de acciones, considerando: <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación desde la PAC • Evaluación según existencia de iniciativas asociadas a las acciones • Evaluación según criterio consultor
4	Identificación de iniciativas asociadas a acciones y complementación según materias clave

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.1.1 Identificación de cartera de iniciativas vigentes

La identificación de la cartera de iniciativas vigentes se presenta en sección 6.2 del informe principal cuya información fue extraída desde el Banco Integrado de Proyectos del Ministerio de Desarrollo Social.

3.1.2 Levantamiento de acciones

Las acciones levantadas deben entenderse como ideas, soluciones o recomendaciones en un sentido más amplio que una iniciativa concreta, pero fue el paso previo a la identificación de las iniciativas concretas que conforman el plan.

Esta búsqueda de acciones se hizo en función de los ejes y objetivos considerados para el plan (Tabla 6-1 del informe principal).

En cuanto a la principal bibliografía considerada para la identificación de acciones, se cuenta:

- Bases para la formulación de un Plan Director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maipo (DGA, 2007a).
- Plan Director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maipo (DGA, 2008a).
- Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región Metropolitana de Santiago (DGA, 2015a).
- Diagnóstico para desarrollar plan de riego en cuenca del Maipo (CNR, 2016).

Finalmente, las actividades de PAC (reuniones y talleres) también aportaron información de validación de las acciones levantadas.

3.1.3 Evaluación y priorización de acciones

Luego de identificadas las acciones, éstas fueron sometidas a una Evaluación desde la PAC y otra desde el equipo consultor. En la evaluación desde la PAC se les solicitó a los participantes ordenar desde más relevante a menos relevante el listado de acciones (Tabla 6-11 del informe principal), asignando mejor nota a las más relevantes.

Por otro lado, el equipo consultor realizó un cruce entre las acciones propuestas y las iniciativas de la cartera vigente para realizar un conteo de iniciativas según cada acción, asignando mejor nota a aquéllas con menos iniciativas contabilizadas. Por último, el equipo consultor realizó una evaluación de las acciones asignando mejor nota a las más relevantes.

Con esto, la evaluación de cada acción consideró una nota ponderada entre la nota desde la PAC y la nota del equipo consultor, notando que la nota del equipo consultor ponderó la falta de iniciativas de inversión con la nota de relevancia que estimó el equipo. El listado de acciones finalmente consideró como criterio de corte la nota 5 (Tabla 7-1 del informe principal).

3.1.4 Identificación de iniciativas asociadas a acciones y complementación según materias clave

Tomando el listado de acciones mejor evaluadas (Tabla 7-2 del informe principal) se realizó el trabajo de proponer un conjunto de iniciativas que permitan abordarlas. Para esto, se recurrió tanto al listado de la cartera de iniciativas vigente, así como a las iniciativas propuestas en planes previos (indicados en 3.1.2), y finalmente, iniciativas propuestas por el equipo consultor en línea con las acciones propuestas.

Cabe señalar que dicho listado fue complementado con algunas iniciativas que no fueron priorizadas según los criterios originales de evaluación. Esta decisión fue tomada a partir de los resultados que se fueron levantando desde la PAC y desde el análisis ya más en detalle del plan, donde las materias de información y monitoreo del recurso hídrico, y gestión y gobernanza del agua, que si bien no fueron priorizadas en los primeros lugares por la votación de la PAC, son claves para el PEGH.

3.2 Evaluación Económica para el plan de acción

La evaluación económica de las iniciativas pretende determinar los costos asociados a cada iniciativa. Es importante mencionar que se utilizó información referencial respecto a los costos asociados, tomando en consideración la información pública respecto del gasto público y/o privado en estas materias, además de estimaciones realizado por Planes previos (DGA 2008, DGA 2015).

Para realizar la evaluación económica se estableció un sistema de puntuación, donde para comparar las iniciativas entre si se utilizó el indicador de **costo anual equivalente o CAE**. La expresión matemática del CAE corresponde a la siguiente:

$$CAE = VAC \frac{r (1 + r)^T}{(1 + r)^T - 1}$$

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.

Donde el indicador Valor Actual de costo o 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.

$$VAC = I_o + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

donde,

VAC: Valor actual de los costos;

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

I_o: Inversión inicial, basada en información referencial;

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

T: Horizonte de evaluación del proyecto.

Por último, se presenta en la Tabla 3-2 la puntuación según CAE obtenido.

Tabla 3-2 Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado

Descripción	Puntaje
CAE superior a \$ 1.300.000.000	1
CAE mayor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas y menor o igual a \$1.300.000.000	2
CAE igual o menor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas	4

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Evaluación Social para el plan de acción

La evaluación social considera las principales problemáticas planteadas por los asistentes a las reuniones de la actividad de Participación Ciudadana, donde los actores han identificado y priorizado las brechas que consideran más relevantes, por lo que se les asignó un mejor puntaje a aquellas iniciativas que respondían de forma directa a las problemáticas ciudadanas. Para esta 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 3-3.

Tabla 3-3 Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC

Descripción	Puntaje
Soluciona problemática no identificada por actores consultados.	1-2
Soluciona problemática identificada por sólo 1 actor consultado.	2-5
Soluciona problemática identificada por 2 o más actores consultados.	6-8

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Evaluación Ambiental

La evaluación ambiental recoge los aspectos principales en materia medioambiental del proyecto propuesto. Estos se han considerado dos indicadores de evaluación: la pertinencia de ingreso al SEIA; y el impacto en la protección y conservación de los recursos, es decir el impacto positivo en el medio ambiente. La puntuación en el primer indicador sobre ingreso al SEIA, se valoriza en 0 o 1, donde 0 se refiere a que requiere ingresar al SEIA con mayores requerimientos de gestión, tiempo y recursos.

Para el indicador de impacto positivo, se considera la Tabla 3-4 de puntuación para la evaluación ambiental.

Tabla 3-4 Escala de puntuación para evaluación ambiental.

Descripción	Puntaje
Proyectos destinados a la comunidad con impacto indirecto en los recursos naturales	1
Programas, obras de mejora y monitoreo	2
Proyectos con incidencia directa en recursos naturales (calidad de aguas, glaciares, etc.)	4

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Evaluación de temporalidad

Adicionalmente, se realizó una evaluación de temporalidad, donde se optó por asignar una mejor evaluación a aquellas iniciativas cuyo plazo de implementación y castigar las iniciativas que necesitan un mayor tiempo de implementación con un menor puntaje (Tabla 3-5).

Tabla 3-5 Escala de puntuación de evaluación temporal.

Descripción	Puntaje
Iniciativas \geq 6 años de implementación	1
Iniciativas con plazos de 3 a 5 años de implementación	2
Iniciativas con plazos de 1 a 2 años de implementación	4

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Priorización de las acciones y Definición del Plan de Acción

Para realizar la priorización de iniciativas se utilizó una aproximación de la metodología de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones, la cual permite priorizar y tomar decisiones de inversión sobre un conjunto de iniciativas. A continuación, se detallan los pasos generales considerados en el análisis multicriterio:

1. Identificar iniciativas: Consistió 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 identificaron aquellos criterios a considerar, de forma que las opciones del problema estén reflejadas en éstos. 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.
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 a importancia relativa.
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. En este caso se consideraron las siguientes ponderaciones: 10% al puntaje de Ingreso al SEIA, 20% al Impacto positivo en el medio ambiente, 40% a la Evaluación Social y 30% al económico.

El modelo matemático corresponde a:

$$\begin{aligned} \text{Puntaje de priorización} \\ &= 0.05 * (\text{Ingreso a SEIA}) + 0.15 * (\text{Impacto Pisitivo Ambiental}) \\ &+ 0.25 (* \text{Social}) + 0.2 (\text{Economico}) + 0.35 * (\text{Temporalidad}) \end{aligned}$$

Donde el puntaje de priorización es el resultado de la suma ponderada de los criterios considerados y sus ponderaciones, Luego se aplica un criterio de maximización de utilidades, donde los mayores puntajes corresponden a las mejores iniciativas.

6. Finalmente se deben revisar y analizar los resultados obtenidos.

El resultado de la priorización permitió entregar un ranking para la implementación de las medidas seleccionadas para el PEGH. El presente ejercicio consideró los resultados de las evaluaciones social, económica, ambiental y temporal descritos previamente.

En la Figura 3-1 se presenta el esquema de priorización y los pesos relativos. Considerados para los 3 aspectos priorizados (Ambiental, social, Económico, Temporal). Además, en el Apéndice Digital K se encuentra un documento Excel donde se llevó a cabo esta priorización.

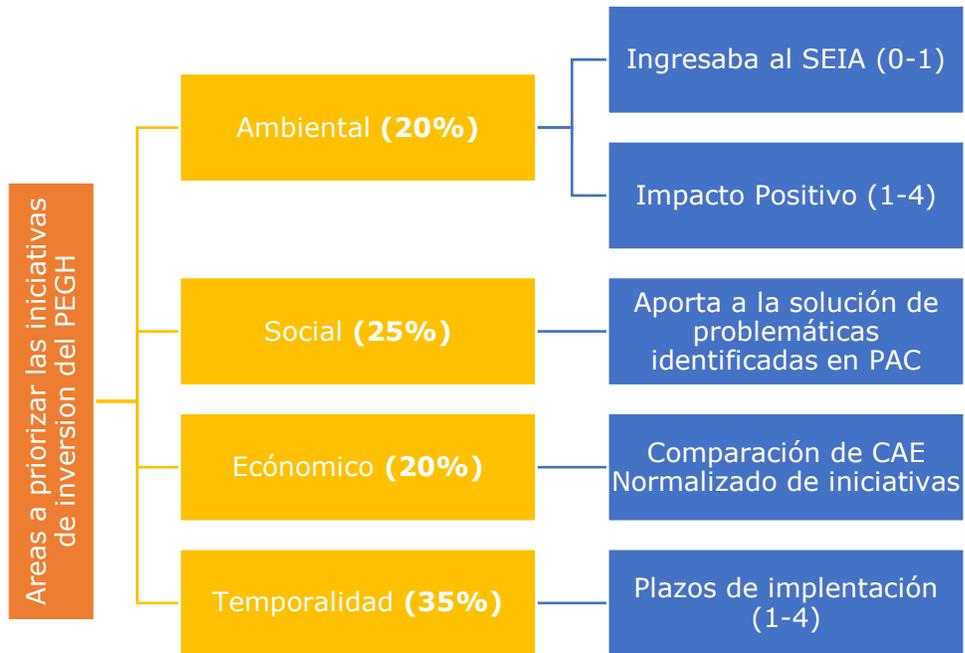


Figura 3-1 Esquema de priorización de iniciativas.

Fuente: Elaboración propia.

4 METODOLOGIA ESTIMACIÓN DE DEMANDAS HIDRICAS

En este capítulo se describe como se estimaron las demandas actuales en la cuenca del Maipo y cómo se realizó la estimación de la demanda futura en la cuenca. Esta descripción se separó por tipo de uso.

4.1 Demanda actual

En esta sección se cuantifica la demanda de agua por los diferentes sectores productivos, demanda agrícola, uso humano, uso industrial, uso minero y uso eléctrico.

4.1.1 Demanda agrícola

La demanda agrícola se define en términos de área de los cultivos por tipo y la ineficiencia de los métodos de riego.

Definición de zonas de riego

Las zonas agrícolas utilizadas en este estudio provienen de las zonas de riego que se definieron en los estudios previos (DGA, 2007; DGA, 2000; CNR, 1984), a las cuales se les realizó una modificación en base a la revisión de imágenes satelitales de Google Earth, en las que se distribuyó proporcionalmente información de superficies cultivada, tipos de cultivo y métodos de riego, provenientes de los censos agropecuarios de 1976, 1997 y 2007 (INE, 1997 y 2007).

Para poder distribuir las áreas entregadas por los Censos Agropecuarios (1976, 1997, 2007), que se encontraban en distritos, a las zonas de riego que finalmente se utilizaron se desarrolló la siguiente metodología:

- Primero se interceptaron las áreas de las zonas de riego con las áreas de los distritos mediante herramientas GIS, obteniendo sub-áreas de las zonas de riego (A_{subZR}), generadas por la división de las zonas de riego y los límites de los distritos.
- En segundo lugar, se agruparon las sub-áreas de zona de riego que se encontraban en un mismo distrito, generando sub-áreas de zona de riego por distrito (A_{ZRxDIS}).

- Luego se calculó el porcentaje que ocupaba cada sub-área de las zonas de riego en cada sub-área zona de riego por distrito, lo que es equivalente a $P_{ZRxDIS} = A_{subZR} / A_{ZRxDIS}$.
- Luego se multiplicó el área de cada cultivo contenido por distrito ($A_{CULTxDIS}$) por el porcentaje obtenido el paso anterior, obteniendo de esta forma el área cultivo para cada sub-área de las zonas de riego ($A_{CULTxsubZR}$), lo cual se puede expresar como $A_{CULTxsubZR} = P_{ZRxDIS} * A_{CULTxDIS}$.
- A continuación, se sumaron las áreas de cada cultivo asignado a cada sub-área de zona de riego ($A_{CULTxsubZR}$) correspondientes a una misma zona de riego, obteniendo de esta forma el área de cada cultivo por zona de riego.
- Por último, se verificó que el área del polígono de las zonas de riego fuera mayor o igual a la suma de los distintos tipos de cultivos, calculados previamente, donde se obtuvo que para algunos casos el área total de los cultivos era mayor que el área de la zona de riego, lo cual se debía a que se consideró dentro la zona de riego Praderas Naturales o Mejoradas, por lo que se disminuyó el área de estas al interior de las zonas riego, asignándole solo el área restante de la zona de riego que no se encontraba plantada por los otros tipos de cultivos.

Para la demanda agrícola se consideraron variaciones de área de los cultivos según la información para cada distrito informada por los censos agropecuarios de 1976, 1997 y 2007, considerando además las proyecciones por distritos estimadas por DGA (2018a) para años posteriores, aplicando la metodología ya descrita anteriormente para distribuir las áreas a las zonas de riego. En la Tabla 4-1 muestra las áreas de riego por zona y la Figura 4-1 la distribución espacial de todas las zonas de riego en estudio.

Tabla 4-1 Áreas de zonas de riego agrícola.

Zona de Riego	Superficie [ha]	Zona de Riego	Superficie [ha]
ZR-01	6.041,5	ZR-24	671
ZR-02	17.670,7	ZR-25	3.265,8
ZR-03	1.379,5	ZR-26	284,2
ZR-04	10.822,5	ZR-27	4.751,7
ZR-05	7.404,4	ZR-28	905,2
ZR-06	9.944,8	ZR-29	4.830,1
ZR-07	3.405,3	ZR-30	5.064,2
ZR-08	26.538,7	ZR-31	1.717
ZR-09	5.467,3	ZR-32	3.227,2
ZR-10	2.219,1	ZR-33	1.585,7
ZR-11	3.809,1	ZR-34	2.675,6

Zona de Riego	Superficie [ha]	Zona de Riego	Superficie [ha]
ZR-12	3.948,4	ZR-35	8.012,6
ZR-13	4.256,8	ZR-36	915,6
ZR-14	5.087	ZR-37	1.643,3
ZR-15	1.501,1	ZR-38	6.524,1
ZR-16	4.925,4	ZR-39	18.909,2
ZR-17	2.004,8	ZR-40	8.694,8
ZR-18	723	ZR-41	4.814,6
ZR-19	2.781,7	ZR-42	14.312,6
ZR-20	900	ZR-43	1.219,7
ZR-21	734,3	ZR-44	24.249,7
ZR-22	2.945,1	ZR-45	9.824,3
ZR-23	370,3	ZR-46	2.744,3
Total	255.723 ha		

Fuente: Elaboración propia.

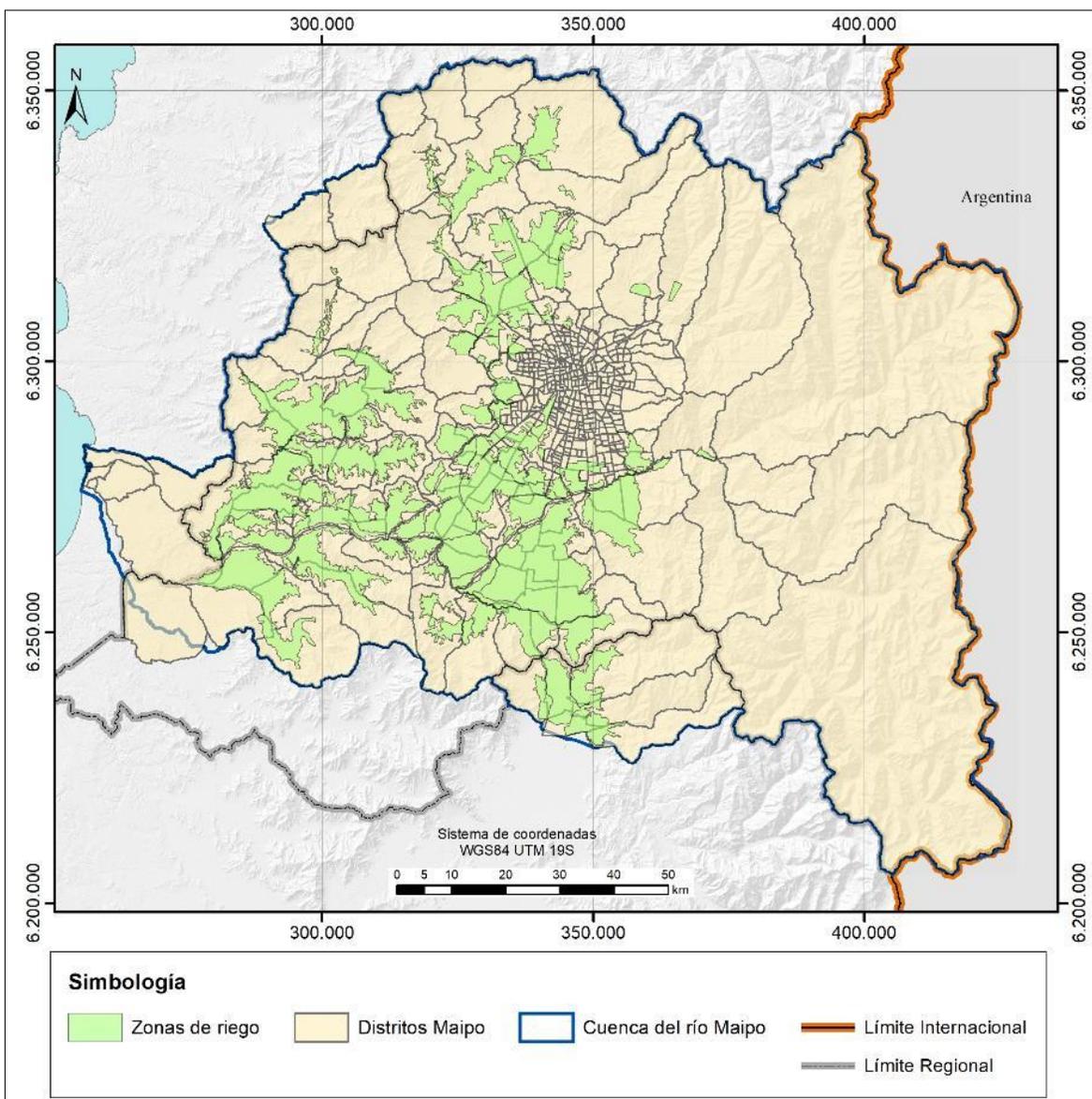


Figura 4-1 Zonas de riego agrícola y Distritos del Censo Agropecuario.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2007a) e INE (2007).

Tipos de cultivo

Los cultivos a ser simulados en la Cuenca del río Maipo se agruparon en ocho categorías la Tabla 4-2 muestra su correspondencia con las categorías del Censo Agropecuario del año 2007.

Tabla 4-2 Cultivos considerados en el Censo Agropecuario de 2007.

Grupo Cultivo	Especies consideradas
Cereales	Cereales, Legumbres, Tubérculos y Forraje anual
Forrajeras Permanentes	Forrajes permanentes
Hortalizas	Hortalizas, Flores y Semilleros
Viñas	Viñas y Parronales
Frutales	Frutales y Huertos caseros
Praderas mejoradas y naturales	Praderas Mejoradas y Naturales
Barbecho	Barbechos y descanso

Fuente: Elaboración propia.

En cada una de las zonas de riego, se incorporó la información de superficies cultivada, tipos de cultivo y métodos de riego provenientes de la información de los censos agropecuarios. La Tabla 4-3 muestra la superficie de cultivo en las Zonas de Riego de la Cuenca del río Maipo para el año 2019.

Tabla 4-3 Superficie cultivada por tipo de cultivo, año 2019.

Grupo Cultivo	Riego [ha]	Secano [ha]	Total [ha]	Porcentaje
Cereales	14.109	567	14.676	5,7%
Forrajeras Permanentes	16.707	36	16.744	6,5%
Hortalizas	17.498	212	17.710	6,9%
Viñas	13.845	56	13.901	5,4%
Frutales	58.324	145	58.469	22,9%
Praderas mejoradas y naturales	0	125.332	125.332	49,0%
Barbecho	0	8.891	8.891	3,5%
Total	120.483	135.241	255.723	100%

Fuente: Elaboración propia.

Existen diferencias importantes con las áreas de las zonas de riego provenientes del anterior Plan Director de la Cuenca del río Maipo (DGA, 2008, SIT N°133). La diferencia radica en que se identificaron menos cultivos que los informados en el Censo Agropecuario ODEPA. Los cultivos identificados en el Plan Director son:

- Frutales
- Viñas compuesto
 - Mesa
 - Viníferas
- Trigo y otros

- Maíz y otros
- Hortalizas
- Forrajeras

Posterior a la identificación de los cultivos en la cuenca se calcularon los porcentajes de cada cultivo por zona de riego, para después calcular su área de acuerdo a la Superficie Máxima Bajo Riego. Aquí existe un error, en que no se considera en las Zonas de Riego la presencia de Praderas Naturales ni Mejoradas, que son un cultivo importante en las distintas Zonas de Riego.

Eficiencia de métodos de riego

La Tabla 4-4 muestra la eficiencia de riego en las Zonas de Riego de la cuenca del río Maipo. Estas eficiencias no fueron utilizadas en la modelación WEAP, pero si para estimar la demanda de riego total de la cuenca.

Tabla 4-4 Eficiencia de riego de las Zonas de Riego de la cuenca del río Maipo.

Catchment	Eficiencia [%]	Catchment	Eficiencia [%]
ZR_01	66%	ZR_24	37%
ZR_02	59%	ZR_25	65%
ZR_03	59%	ZR_26	54%
ZR_04	64%	ZR_27	63%
ZR_05	61%	ZR_28	86%
ZR_06	64%	ZR_29	83%
ZR_07	61%	ZR_30	72%
ZR_08	75%	ZR_31	65%
ZR_09	79%	ZR_32	66%
ZR_10	78%	ZR_33	53%
ZR_11	82%	ZR_34	52%
ZR_12	58%	ZR_35	68%
ZR_13	72%	ZR_36	48%
ZR_14	75%	ZR_37	62%
ZR_15	60%	ZR_38	62%
ZR_16	56%	ZR_39	67%
ZR_17	56%	ZR_40	80%
ZR_18	57%	ZR_41	64%
ZR_19	70%	ZR_42	67%
ZR_20	69%	ZR_43	78%
ZR_21	67%	ZR_44	64%
ZR_22	88%	ZR_45	72%
ZR_23	92%	ZR_46	85%

Fuente: DGA (2017).

4.1.2 Demanda de agua potable

Agua potable urbana (APU)

Las series de demanda de agua potable urbana fueron estimadas a partir de dos fuentes de datos: el catastro de extracciones del informe *Modelo de simulación hidrológico operacional, cuencas de los ríos Maipo y Mapocho* (DGA, 2000), que cuenta con datos de extracciones subterráneas mensuales entre 1990 - 1998 y, como segunda fuente, las extracciones informadas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios. Esta última contaba con registros mensuales de extracciones subterráneas y superficiales en m³/s para 3 periodos distintos: 2003-2010, 2004-2014 y 2014-2019. A pesar de que el formato de la base de datos era difícil de trabajar, se realizó un importante esfuerzo para generar una serie de datos por pozo y captación.

Por tanto, la demanda subterránea de agua potable urbana fue estimada considerando la base de datos de DGA (2000) entre 1990-1998 y las extracciones entregadas por la SISS entre 2005-2019, sin tomar en cuenta los registros entre 2003 y 2004, dado que este periodo incluía muy poco registro de datos. Para el periodo 1999-2004, en el que no se contaba con registro de datos, se utilizó solo la base de datos de DGA (2000) a la cual se le aplicó una tasa de crecimiento anual por SHAC que permitiera representar la variación de demanda entre los años 1998 y 2005.

Por otra parte, la demanda superficial de agua potable urbana se determinó a partir de la información entregada por la SISS en el periodo 2005-2019 y para el periodo previo al 2005 se utilizó la herramienta interna de WEAP para la extrapolación de datos.

Agua potable rural (APR)

Para la estimación de la demanda de Agua Potable Rural, correspondiente solo a demanda subterránea, se consideró la demanda estimada por DGA (2000) entre 1990-1998, mientras que para el periodo posterior a 1998, se consideró la demanda estimada al año 2019, por el informe DGA (2019b), y la demanda para años previos se obtuvo utilizando una tasa de crecimiento para cada APR, la cual se encontraba disponible en la base de datos del informe. Dado que la fuente del CPA también contenía pozos de APR, se hizo una revisión comparando número de expedientes asociados y optó por priorizar la fuente del informe DGA (2019b). Solo 2 expedientes del CPA no

podieron ser vinculados con ningún APR presente en el informe DGA (2019b), por lo que se optó por mantenerlos en la base datos.

4.1.3 Demanda de uso industrial

Para estimar la demanda industrial se generaron dos metodologías, la primera asociada a la demanda industrial superficial, y la segunda, a la demanda industrial subterránea. Lo anterior responde a que, de acuerdo al origen del recurso, sea este superficial o subterráneo, se cuenta con distintas fuentes de información.

Para la estimación de demanda subterránea de uso industrial, se consideró como base los registros provenientes del catastro del informe (2000) del cual se utilizaron los registros entre 1990-1998 y se mantuvieron las extracciones del último año constantes hasta el año 2019. Adicionalmente se añadieron extracciones subterráneas entre el periodo 1999-2019, estimadas a partir de los registros del CPA inscritos de manera posterior a 1998, a los cuales se les aplicaron factores de uso mensuales obtenidos calculando los caudales mensuales promedio por uso del catastro del informe DGA (2000) divididos por la suma de los derechos asociados a dicho uso. Se consideraron solo el 86% de las extracciones presente en el catastro, dado que el porcentaje restante no contaba con un derecho asociado. Los resultados se muestran en la Tabla 4-5. Por otra parte, para la estimación de la demanda superficial se utilizó solo el registro del CPA, al cual se le aplicó un factor de uso de 0,75.

Tabla 4-5 Factor de utilización de derechos subterráneos estimada según catastro de pozos DGA (2000).

Uso	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Riego	0,40	0,42	0,34	0,17	0,08	0,05	0,05	0,05	0,14	0,34	0,40	0,40
Sanitario	0,25	0,25	0,22	0,20	0,16	0,18	0,13	0,12	0,14	0,16	0,18	0,22
Industrial	0,32	0,35	0,32	0,33	0,31	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32	0,32
Minero	0,32	0,35	0,32	0,33	0,31	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32	0,32
Riego no Agrícola	0,40	0,42	0,34	0,17	0,08	0,05	0,05	0,05	0,14	0,34	0,40	0,40
Energía hidroeléctrica	0,32	0,35	0,32	0,33	0,31	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32	0,32
Otro	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: DGA (2000).

Las estimaciones de estudios previos muestran discrepancias respecto a la demanda total de uso industrial en la cuenca. Los informes de DGA (2000); DGA (2008a); DGA (2015a); y DGA (2018a), entregaban estimaciones de 5.250 l/s, 3.588 l/s, 2.620 l/s y

1.167 l/s respectivamente. Esta gran discrepancia entre la demanda de los diferentes informes se debe principalmente a que los 2 últimos informes estiman la demanda industrial a partir de la descarga de riles, metodología que no permite conocer la ubicación de los pozos o captaciones necesaria para la modelación. Es por esto que, dado que se tomó como base la información de extracciones provenientes del informe de DGA (2000), la demanda de uso industrial es mayor que los valores presentados en los informes DGA (2015a y 2018a).

4.1.4 Demanda de uso minero

Para estimar la demanda minera se generaron dos metodologías, la primera asociada a la demanda minera superficial, y la segunda, a la demanda minera subterránea. Lo anterior responde a que, de acuerdo al origen del recurso, sea este superficial o subterráneo, se cuenta con distintas fuentes de información.

Para la estimación de la demanda subterránea minera se consideraron las extracciones del informe DGA (2000), para el periodo 1990-1998, mientras que para el periodo posterior a 1998 se consideraron los derechos de aprovechamiento del CPA multiplicados por un factor de uso estimado a partir del estudio DGA (2000) (Tabla 4-5). Adicionalmente, se consideraron registros del Control de Extracciones asociados a extracciones mineras y además extracciones de pozos informadas por Codelco correspondientes a 27 pozos de bombeo en el sector Ovejería.

Por otra parte, la demanda superficial de uso minero fue estimada considerando los derechos de aprovechamiento del CPA con su uso completo, y además, se consideraron datos de extracciones superficiales de Anglo American en la captación Los Bronces.

4.1.5 Demanda de uso eléctrico

En la Figura 4-2 se presenta la ubicación de las centrales hidroeléctricas de la cuenca. Hay un total de 20 de las cuales 4 son centrales hidroeléctricas de pasada y 16 son minihidro de pasada, las cuales están conectadas al Sistema Eléctrico Nacional, cuya información fue recopilada a partir de la web del Coordinador Eléctrico Nacional (actualizado al 2020) y del informe de DGA (2015a).

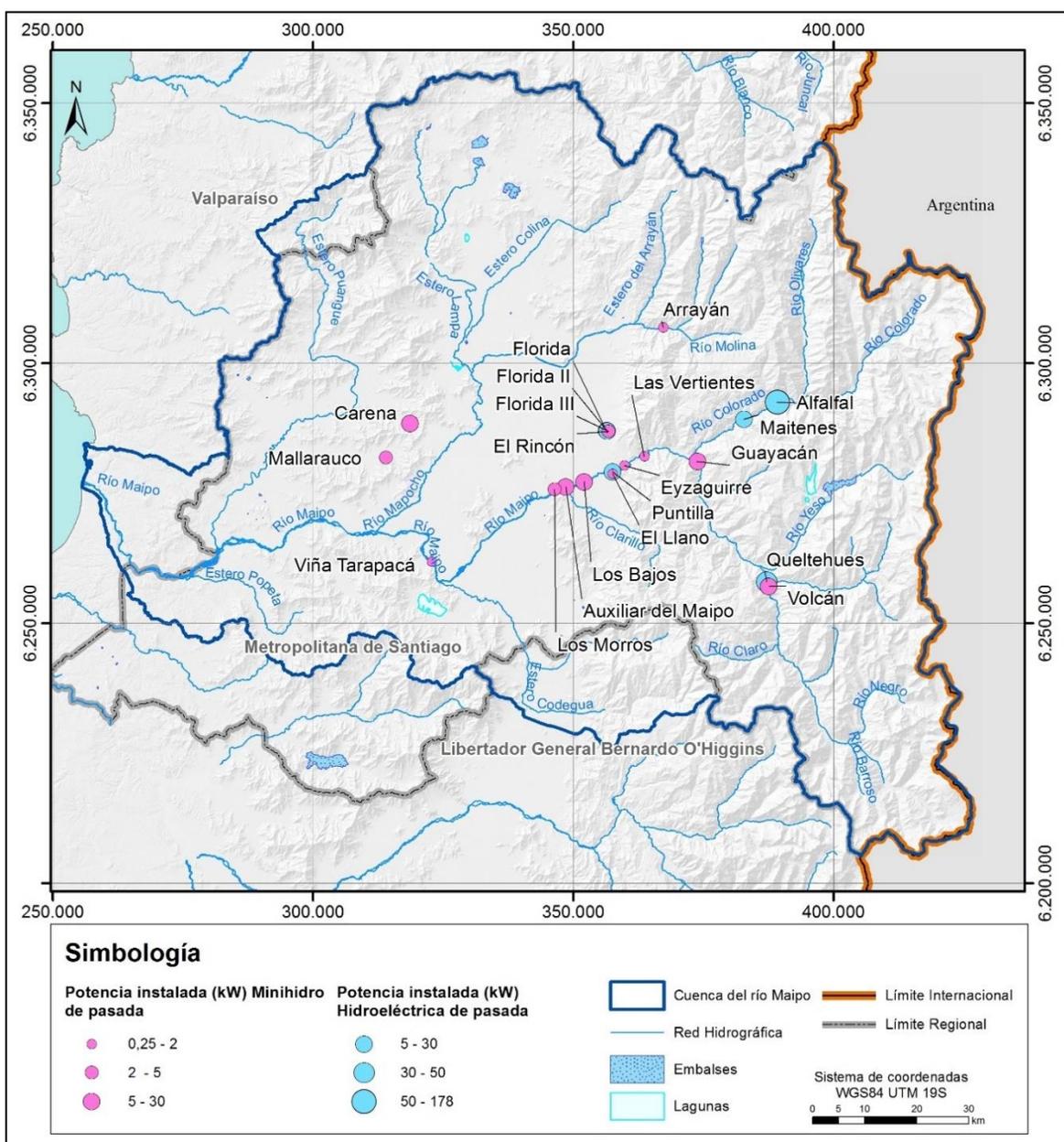


Figura 4-2 Ubicación de las centrales hidroeléctricas en la cuenca del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes web Coordinador Eléctrico Nacional.

En la Tabla 4-6 se presentan las principales características de las centrales hidroeléctricas presentes en la cuenca.

Tabla 4-6 Centrales hidroeléctricas de la cuenca del Maipo.

Nombre	Nombre grupo	Potencia máxima [MW]	Entrada en operación	Tipo de Central	Q Diseño [m ³ /s]
HP ALFALFAL	AES GENER	178	1991	Hidroeléctrica de pasada	30,5
HP QUELTEHUES	AES GENER	49	1928	Hidroeléctrica de pasada	28,1
HP MAITENES	AES GENER	27	1923	Hidroeléctrica de pasada	11,3
HP PUNTILLA	PUNTILLA	22	1926	Hidroeléctrica de pasada	20,0
HP FLORIDA II	PUNTILLA	20	1993	Hidroeléctrica de pasada	s/i
HP VOLCÁN	AES GENER	13	1944	Minihidro de pasada	9,1
HP GUAYACÁN	ENERGIA COYANCO	12	2011	Minihidro de pasada	36
HP CARENA	EMPRESA ELECTRICA INDUSTRIAL	10	1943	Minihidro de pasada	s/i
HP FLORIDA	PUNTILLA	6	1909	Minihidro de pasada	30,0
PMGD HP LOS BAJOS	CARBOMET	6	1944	Minihidro de pasada	24,0
PMGD HP AUXILIAR DEL MAIPO	CAEMSA	5	1962	Minihidro de pasada	24,0
PMGD HP MALLARAUCO	HIDROELECTRICA MALLARAUCO	3	2011	Minihidro de pasada	3,5
PMGD HP LOS MORROS	CELMSA	3	1930	Minihidro de pasada	s/i
HP FLORIDA III	PUNTILLA	3	1999	Minihidro de pasada	s/i
PMGD HP EL LLANO	PUNTILLA	2	2013	Minihidro de pasada	s/i
PMGD HP EYZAGUIRRE	PUNTILLA	2	2003	Minihidro de pasada	s/i
PMGD HP LAS VERTIENTES	PUNTILLA	2	2013	Minihidro de pasada	s/i
PMGD HP ARRAYÁN	HIDROELECTRICA ARRAYÁN SpA	1	2017	Minihidro de pasada	s/i
HP EL RINCÓN	PUNTILLA	0,3	2007	Minihidro de pasada	s/i
PMGD HP VIÑA TARAPACÁ (*)	ANDES ENERGY CAPITAL	0,3	Pendiente	Minihidro de pasada	s/i

(*) En prueba

Fuente: web Coordinador Eléctrico Nacional (actualizado al 2020) y DGA (2015a).

Si bien se encuentra aún en etapa de construcción, es necesario considerar el proyecto hidroeléctrico Alto Maipo, conformado por dos centrales de pasada (ver Figura 4-3, y sus coordenadas en Tabla 2-18 de Informe Central):

- Alfalfal II, en la margen izquierda del río Colorado, aguas abajo de la actual Central Alfalfal y que genera con las aguas captadas en la cuenca alta del río Volcán y los caudales que entrega el embalse El Yeso.
- Las Lajas, en la ribera derecha del río Maipo, en las proximidades de la confluencia con el estero El Manzano. Esta última central genera con las aguas que descargan las centrales Alfalfal I y II, sumados a los aportes de la hoya intermedia del río Colorado y las subcuencas de los esteros Quempo y Aucayes.

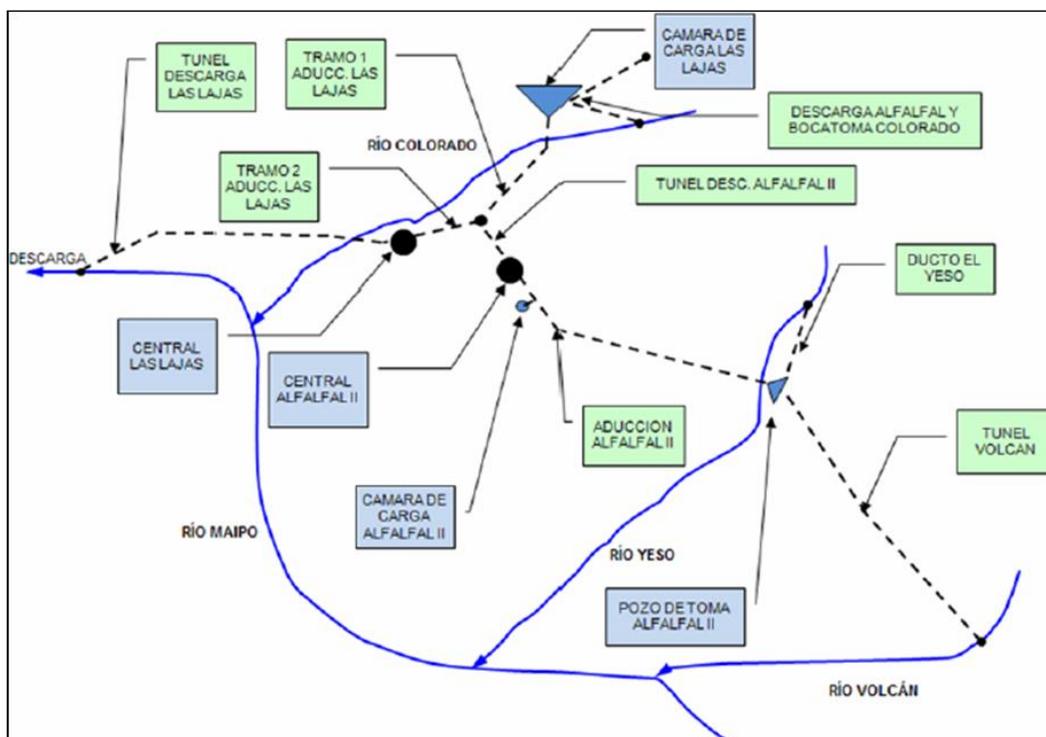


Figura 4-3 Esquema del Proyecto Alto Maipo.

Fuente: Alto Maipo (2008).

Las dos centrales generarán una potencia máxima de 530 MW, la que se sumará a la de las centrales de pasadas ya existentes en el Valle del Maipo pertenecientes a AES Gener (Alfalfal I, Maitenes, Queltehues y Volcán) y será inyectada al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). El proyecto considera las siguientes obras: 5 Bocatoma de alta montaña, más de 70 kilómetros de túneles a una profundidad promedio de 800 metros, 17 kilómetros de líneas de alta tensión.

Adicionalmente se consideró la demanda consuntiva considerando la información del CPA a la cual se aplicó un factor de uso estimado a partir del estudio DGA (2000) (Tabla 4-5). De lo cual se obtuvo una demanda desde abril del 2006 de 0,63 l/s al año.

4.2 Proyección de demanda

En esta sección se cuantifica la demanda proyectada de agua hasta el año 2050 para los diferentes sectores productivos, demanda agrícola, uso humano, uso minero y uso industrial.

4.2.1 Demanda agrícola

Para la estimación de la demanda agrícola se utilizó de proyección realizada por DGA (2018a), estudio en el cual hizo una proyección de la demanda considerando los censos agrícolas y frutícolas. Dentro de sus anexos incluyen la proyección por distrito censal en la cuenca, lo cual se distribuyó por zona de riego al igual que en la sección 4.1.5.1. En la Tabla 4-7. Se presentan las proyecciones por cultivo para los años 2030 y 2050 en hectáreas.

Tabla 4-7 Proyección de la superficie agrícola para la cuenca del Maipo.

Cultivo	2020 [ha]		2030 [ha]		2050 [ha]	
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano
Cereales	12.783	474	10.363	360	10.005	433
Forrajeras	16.554	28	15.633	27	15.445	33
Hortalizas	17.003	223	15.547	290	16.415	361
Viñas	12.915	56	14.546	71	16.293	86
Frutales	60.390	171	69.134	185	77.904	213
Praderas mejoradas y naturales	-	139.423		121.619	-	109.816
Barbecho	-	8.618		7.947	-	8.718
Total	119.465	148.993	125.224	130.500	136.063	119.660

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018a).

4.2.2 Demanda de agua potable

Se presentan a continuación la proyección de la demanda de agua potable urbana y rural.

Demanda de agua potable urbana

Para estimar la proyección del uso sanitario se tomó como referencia el informe Actualización de Desarrollo del Sistema Gran Santiago (Agua Andinas, 2020) y en base a su demanda proyectada hasta el año 2034 se estimó el porcentaje de

crecimiento anual de demanda APU. En la Figura 4-4 se puede ver el porcentaje de crecimiento y la proyección de este. El año 2037 el porcentaje toma un valor cero por lo que para los años siguientes se optó por mantener la tasa de crecimiento del año 2037 correspondiente a un 0,03%. Además, se consideró que todo el aumento de la demanda se produciría en la demanda subterránea por lo que se la demanda superficial constante desde el 2019, esto se puede revisar en la Tabla 4-8 y gráficamente en la Figura 4-5.

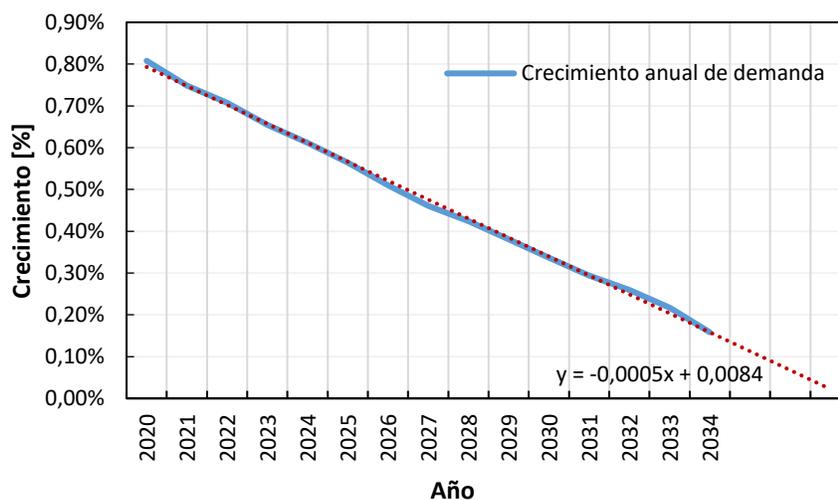


Figura 4-4 Porcentaje de crecimiento anual de demanda APU estimada en base al caudal medio de demanda de Agua Potable de Actualización de Desarrollo del Sistema Gran Santiago de Aguas Andinas, 2020.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-8 Proyección de demanda Agua Potable Urbana para la Cuenca del Maipo [l/s].

Año	Crecimiento Demanda APU Total [%]	Demanda APU Total Proyectada [l/s]	Demanda APU Superficial Proyectada [l/s]	Demanda APU Subterránea Proyectada [l/s]	Crecimiento Demanda subterránea [%]
2019	-	32.490	23.114	9.376	-
2020	0,81%	32.752	23.114	9.638	2,8%
2021	0,75%	33.017	23.114	9.903	2,7%
2022	0,71%	33.264	23.114	10.150	2,5%
2023	0,65%	33.499	23.114	10.385	2,3%
2024	0,61%	33.719	23.114	10.605	2,1%
2025	0,56%	33.925	23.114	10.811	1,9%
2026	0,51%	34.116	23.114	11.002	1,8%
2027	0,46%	34.290	23.114	11.176	1,6%
2028	0,42%	34.448	23.114	11.334	1,4%
2029	0,38%	34.594	23.114	11.480	1,3%
2030	0,34%	34.726	23.114	11.612	1,1%
2031	0,29%	34.843	23.114	11.729	1,0%
2032	0,26%	34.945	23.114	11.831	0,9%
2033	0,22%	35.036	23.114	11.922	0,8%

Año	Crecimiento Demanda APU Total [%]	Demanda APU Total Proyectada [l/s]	Demanda APU Superficial Proyectada [l/s]	Demanda APU Subterránea Proyectada [l/s]	Crecimiento Demanda subterránea [%]
2034	0,16%	35.112	23.114	11.998	0,6%
2035	0,12%	35.167	23.114	12.053	0,5%
2036	0,07%	35.208	23.114	12.094	0,3%
2037	0,03%	35.233	23.114	12.119	0,2%
2038	0,03%	35.243	23.114	12.129	0,1%
2039	0,03%	35.254	23.114	12.140	0,1%
2040	0,03%	35.264	23.114	12.150	0,1%
2041	0,03%	35.275	23.114	12.161	0,1%
2042	0,03%	35.285	23.114	12.171	0,1%
2043	0,03%	35.296	23.114	12.182	0,1%
2044	0,03%	35.307	23.114	12.193	0,1%
2045	0,03%	35.317	23.114	12.203	0,1%
2046	0,03%	35.328	23.114	12.214	0,1%
2047	0,03%	35.338	23.114	12.224	0,1%
2048	0,03%	35.349	23.114	12.235	0,1%
2049	0,03%	35.360	23.114	12.246	0,1%
2050	0,03%	35.370	23.114	12.256	0,1%

Fuente: Elaboración propia.

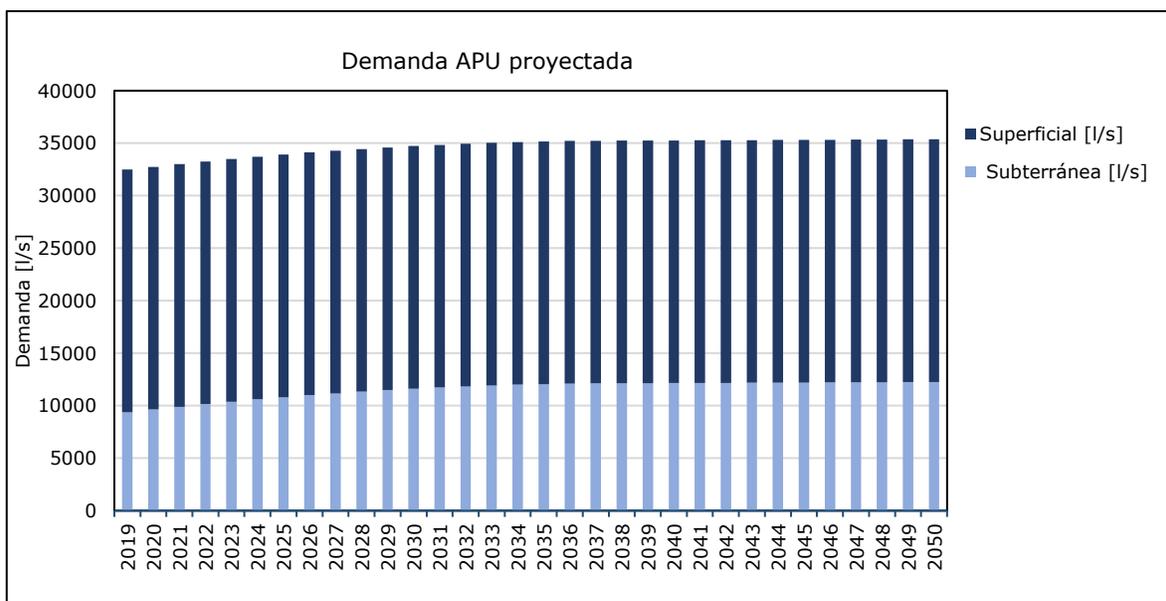


Figura 4-5 Demanda anual de uso APU en la Cuenca del Maipo proyectada al año 2050.

Fuente: Elaboración propia.

Demanda de Agua Potable Rural

La demanda de agua potable rural fue estimada identificando los pozos presentes en el informe DGA (2019b), y en base a la información presentada de tasa de crecimiento de cada APR se proyectó la demanda por año hasta el año 2050. Esta proyección se presenta en la Tabla 4-9 y de forma gráfica en la Figura 4-6.

Tabla 4-9 Proyección de demanda Agua Potable Rural para la Cuenca del Maipo [l/s].

Año	Demanda Proyectada de Agua Potable Rural [l/s]
2019	391,0
2020	380,5
2021	395,3
2022	410,1
2023	424,9
2024	439,7
2025	454,6
2026	469,4
2027	484,2
2028	499,0
2029	513,8
2030	512,8
2031	535,4
2032	558,1
2033	580,8
2034	603,5
2035	626,2
2036	648,8
2037	671,5
2038	694,2
2039	716,9
2040	726,2
2041	748,8
2042	771,5
2043	794,2
2044	816,9
2045	839,6
2046	862,3
2047	884,9
2048	907,6
2049	930,3
2050	953,0

Fuente: Elaboración propia.

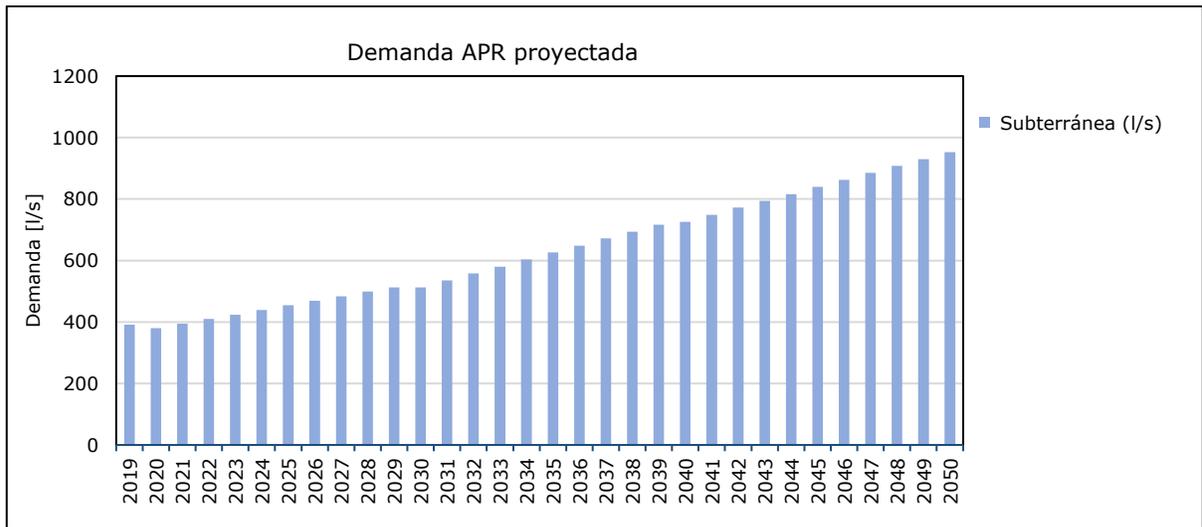


Figura 4-6 Demanda anual de uso APR en la Cuenca del Maipo proyectada al año 2050.
Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018a).

4.2.3 Demanda de uso industrial

Para la estimación futura de la demanda de uso industrial, se realizó una simplificación en el cálculo de proyección, en base a la estimación de demanda futura para uso industrial del informe DGA (2018a), y se calculó el porcentaje de crecimiento de la demanda desde el 2019 al 2030 y desde el 2030 al 2040, siendo un 51% y 31% respectivamente entre periodos. De esta forma se aplicó este porcentaje de crecimiento en base a la demanda año 2019 presentada en la sección 4.1.3, obteniendo de esta forma una demanda propia para los años 2030 y 2040. Utilizando la ecuación de la recta para interpolar y extrapolar, se obtuvieron las demandas para los periodos 2019 al 2030 y 2030 al 2050, generando un aumento proporcional al caudal para cada pozo y captación. Dichas proyecciones se presentan la Tabla 4-10 y gráficamente en Figura 4-7.

Tabla 4-10 Proyección de demanda de Uso Industrial para la Cuenca del Maipo [l/s].

Año	Demanda Industrial Subterránea [l/s]	Demanda Industrial Superficial [l/s]	Demanda Industrial Total [l/s]
2019	6.895	2.142	9.037
2020	7.215	2.241	9.456
2021	7.535	2.341	9.875
2022	7.854	2.440	10.294
2023	8.174	2.539	10.713
2024	8.494	2.639	11.132
2025	8.814	2.738	11.551
2026	9.133	2.837	11.970

Año	Demanda Industrial Subterránea [l/s]	Demanda Industrial Superficial [l/s]	Demanda Industrial Total [l/s]
2027	9.453	2.937	12.389
2028	9.773	3.036	12.808
2029	10.092	3.135	13.227
2030	10.412	3.234	13.646
2031	10.735	3.335	14.070
2032	11.058	3.435	14.493
2033	11.380	3.535	14.916
2034	11.703	3.636	15.339
2035	12.026	3.736	15.762
2036	12.349	3.836	16.185
2037	12.671	3.936	16.608
2038	12.994	4.037	17.031
2039	13.317	4.137	17.454
2040	13.640	4.237	17.877
2041	13.963	4.337	18.300
2042	14.285	4.438	18.723
2043	14.608	4.538	19.146
2044	14.931	4.638	19.569
2045	15.254	4.738	19.992
2046	15.576	4.839	20.415
2047	15.899	4.939	20.838
2048	16.222	5.039	21.261
2049	16.545	5.140	21.684
2050	16.867	5.240	22.107

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018a).

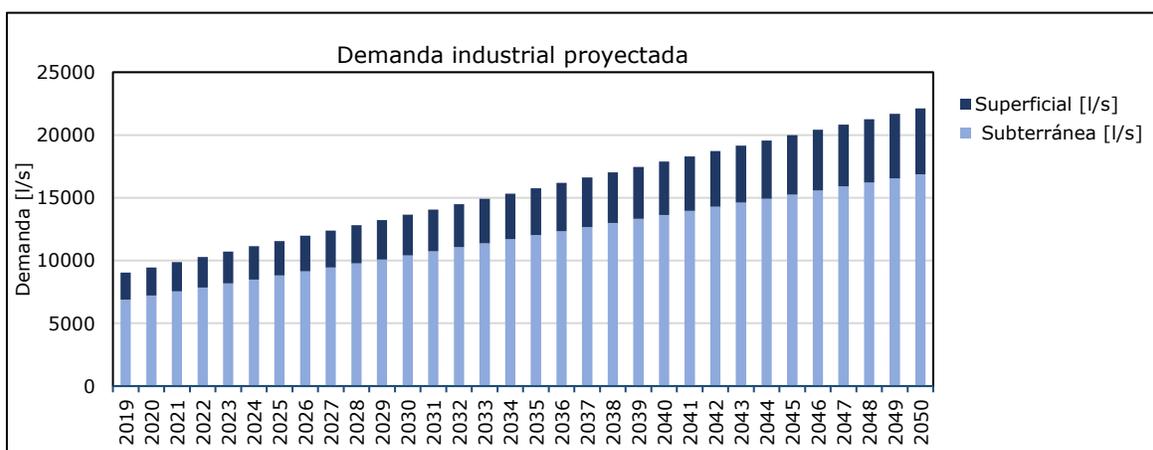


Figura 4-7 Demanda anual de uso industrial en la Cuenca del Maipo proyectada al año 2050.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018a).

4.2.4 Demanda de uso minero

A la demanda de uso minero del año 2019, se le aplicó una proyección similar a la de uso industrial. Utilizando como base la proyección de demanda de uso minero del informe DGA (2018a) se calculó el porcentaje de crecimiento de la demanda desde el 2019 al 2030 y desde 2030 al 2040, siendo un 4,3% y -2% respectivamente para cada periodo. Se aplicó este porcentaje en base a la demanda año 2019, obteniendo de esta

forma una demanda propia para los años 2030 y 2040. Utilizando la ecuación de la recta para interpolar y extrapolar, se obtiene la demanda para los periodos 2019 al 2030 y 2030 al 2050. Este crecimiento fue solo aplicado a la demanda subterránea, considerando que en algunos casos el factor de utilización superficial para la demanda era ya del 100%. Esta proyección se presenta en la Tabla 4-11, y gráficamente en la Figura 4-8.

Tabla 4-11 Proyección de demanda de Uso minero para la Cuenca del Maipo [l/s].

Año	Demanda Minera Subterránea [l/s]	Demanda Minera Superficial [l/s]	Demanda Minera Total [l/s]
2019	601	1.395	1.996
2020	603	1.395	1.998
2021	606	1.395	2.001
2022	608	1.395	2.003
2023	611	1.395	2.005
2024	613	1.395	2.008
2025	615	1.395	2.010
2026	618	1.395	2.012
2027	620	1.395	2.015
2028	622	1.395	2.017
2029	625	1.395	2.019
2030	627	1.395	2.022
2031	626	1.395	2.020
2032	624	1.395	2.019
2033	623	1.395	2.018
2034	622	1.395	2.017
2035	621	1.395	2.015
2036	619	1.395	2.014
2037	618	1.395	2.013
2038	617	1.395	2.012
2039	616	1.395	2.010
2040	614	1.395	2.009
2041	613	1.395	2.008
2042	612	1.395	2.007
2043	611	1.395	2.005
2044	609	1.395	2.004
2045	608	1.395	2.003
2046	607	1.395	2.002
2047	606	1.395	2.000
2048	604	1.395	1.999
2049	603	1.395	1.998
2050	602	1.395	1.997

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018a).

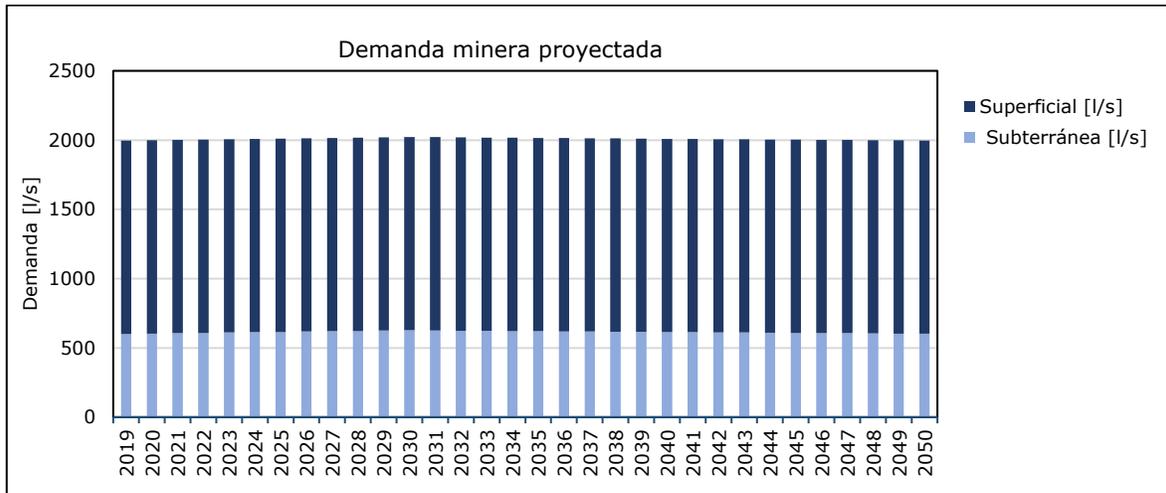


Figura 4-8 Demanda anual de uso minero en la Cuenca del Maipo proyectada al año 2050.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018a).

5 METODOLOGIA APLICADA EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA

Debido a que los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales se encuentran otorgados a lo largo de toda la cuenca, mientras que los derechos de aguas subterráneas se encuentran concentrados en la parte media y baja de ésta. La modelación numérica se implementó mediante dos simulaciones:

- Modelo Cordillera: modelación superficial de la parte alta de la cuenca. Se desarrolló mediante WEAP.
- Modelo Maipo Valle: modelación superficial y subterránea. Se desarrolló mediante el acople WEAP-MODFLOW.

A continuación, se presenta el detalle de la metodología y la descripción de las plataformas utilizadas.

5.1 Plataforma WEAP

El modelo *Water Evaluation And Planning* (WEAP) es una herramienta computacional que sirve para la modelación hidrológica y planificación de los recursos hídricos, fue creado en 1988 como iniciativa del *Stockholm Environment Institute* (SEI), con el objetivo de generar una herramienta de planificación flexible, integral y transparente para evaluar la sostenibilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance (DGA, 2019d). En la página web <http://www.weap21.org/> se puede encontrar una descripción detallada de las características del software, publicaciones, su integración con otros softwares y otros recursos.

5.1.1 Modelación Hidrológica en WEAP

Esta plataforma de modelación hidrológica integra la oferta y demanda de agua permitiendo además aplicar escenarios de variabilidad en la gestión del recurso, cambio climático, distintas escalas de tiempo y enlaces con otro software de uso común (como MODFLOW). Estas características convierten a WEAP en un modelo apropiado para realizar estudios de cambio climático.

El MPL (modelo pluvial) corresponde a un modelo hidrológico de generación de caudales que simula el ciclo de escorrentía de una cuenca pluvial aplicando la ecuación de continuidad sobre un elemento de área y/o volumen de control en la cuenca.

WEAP es un MPL forzado por variables climáticas para resolver numéricamente los balances de masas para dos tanques. El tanque superior representa la zona de raíces, en donde se simulan procesos de evapotranspiración, escorrentía, flujo intermedio y cambios de humedad. El tanque inferior representa la zona profunda y simula procesos de percolación profunda y cambios de humedad (ver Figura 5-1). La percolación profunda se puede transmitir a un cuerpo de agua superficial como flujo base agregando un vínculo de escorrentía/infiltración desde la unidad hidrológica al río y/o como recarga a un elemento de agua subterránea cuando se agrega un vínculo de escorrentía/infiltración desde la unidad hidrológica a un nodo de agua subterránea.

Los balances de masa desarrollados por WEAP pueden ser resumidos mediante las siguientes ecuaciones:

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

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

Donde:

P_e : Precipitación, además derretimiento.

f : Dirección preferencial del flujo.

K_c : Coeficiente de cultivo.

Z_{1max} : Capacidad de caja superior

Z_{2max} : Capacidad de caja inferior

Z_1 : Porcentaje de utilización inicial de la caja superior.

Z_2 : Porcentaje de utilización inicial de la caja inferior.

K_1 : Conductividad zona radicular

K_2 : Conductividad zona profunda.

ET_0 : Evapotranspiración, que se calcula internamente mediante el método de Penman Monteith.

Cabe mencionar los principales elementos que permiten representar la gestión en WEAP:

- Ríos (*River*)
- Derivación (*Diversion*)
- Embalses (*Reservoir*)
- Agua subterránea (*Groundwater*)
- Otras fuentes (*Other Supply*)
- Sitio de Demanda (*Demand Site*)
- Unidad hidrológica (*Catchment*)
- Planta 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 Requirment*)
- Estación fluviométrica (*Streamflow Gauge*)

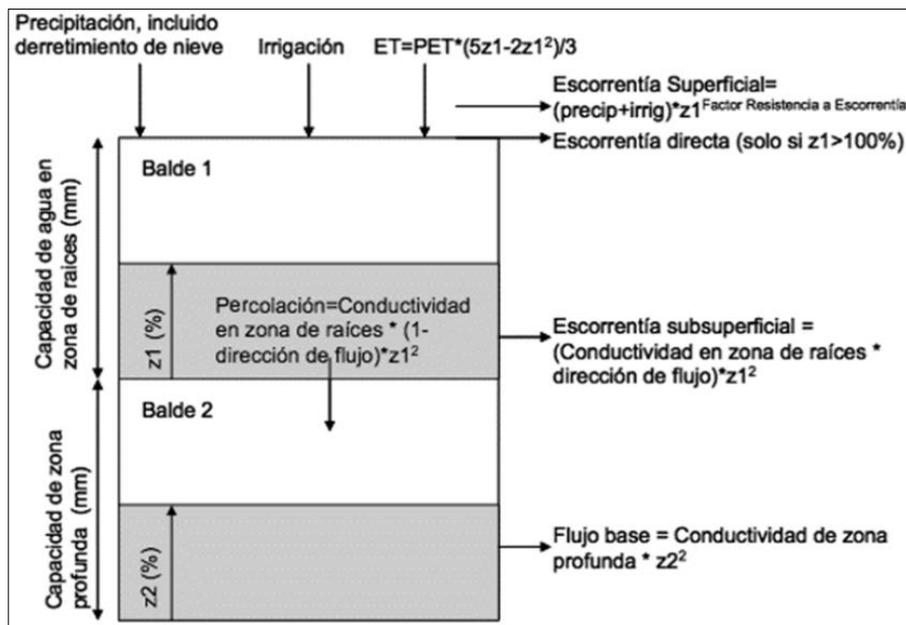


Figura 5-1 Esquema Simplificado del Modelo WEAP.

Fuente: Sanzana (2019).

5.2 Descripción de MODFLOW

MODFLOW es un modelo tridimensional de aguas subterráneas de diferencia finita creada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que permite estimar la variación del nivel freático completamente distribuida e incorporar extracciones puntuales, drenes y la interacción río acuífero. El modelo numérico del presente Plan fue desarrollado con el código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988), lo cual es un código de dominio público de reconocimiento internacional por su utilidad en resolver la ecuación de flujo de agua subterránea en tres dimensiones por el método de diferencia finita, permitiendo estimar la variación del nivel freático completamente distribuida, e incorporar extracciones puntuales, drenes y la interacción río acuífero. Específicamente se utilizó el código MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011), una versión de MODFLOW 2005 que fue desarrollada para tratar el tema de secado/restauración de celdas. Se ocupó el software Groundwater Vistas versión 8 para ayudar con el pre- y post-procesamiento de los archivos de MODFLOW.

El objetivo principal del modelo numérico MODFLOW desarrollado fue generar una herramienta a escala de cuenca sobre la modelación del sistema agua subterránea en la parte baja de la Cuenca del río Maipo, la estrategia de modelación fue unir los dominios de los modelos previos en un dominio integrado y establecer una actualización al periodo histórico hasta el fin del 2019.

5.3 Acople WEAP-MODFLOW

El modelo integrado WEAP-MODFLOW para la cuenca del río Maipo ha sido implementado a partir de los modelos WEAP Maipo Valle y el modelo subterráneo MODFLOW. De esta forma, el alcance espacial del modelo corresponde a la parte media baja de la cuenca, al cual se le han incorporado las entradas correspondientes al sector cordillerano, resultados del modelo WEAP Cordillera.

La conexión de ambos modelos queda dada por un archivo de *linkage*, que corresponde a un archivo shapefile de la malla del modelo MODFLOW que a su vez incorpora en sus diferentes columnas información relacionada a los elementos del modelo WEAP pudiendo así conectar los distintos elementos entre su representación superficial y subterránea (Figura 5-2).

Cabe destacar que las extracciones subterráneas se representan como nodos de demanda en el modelo WEAP, como un único elemento por uso y SHAC, mientras que el modelo MODFLOW incorpora cada pozo en un elemento específico de la malla de modelación.

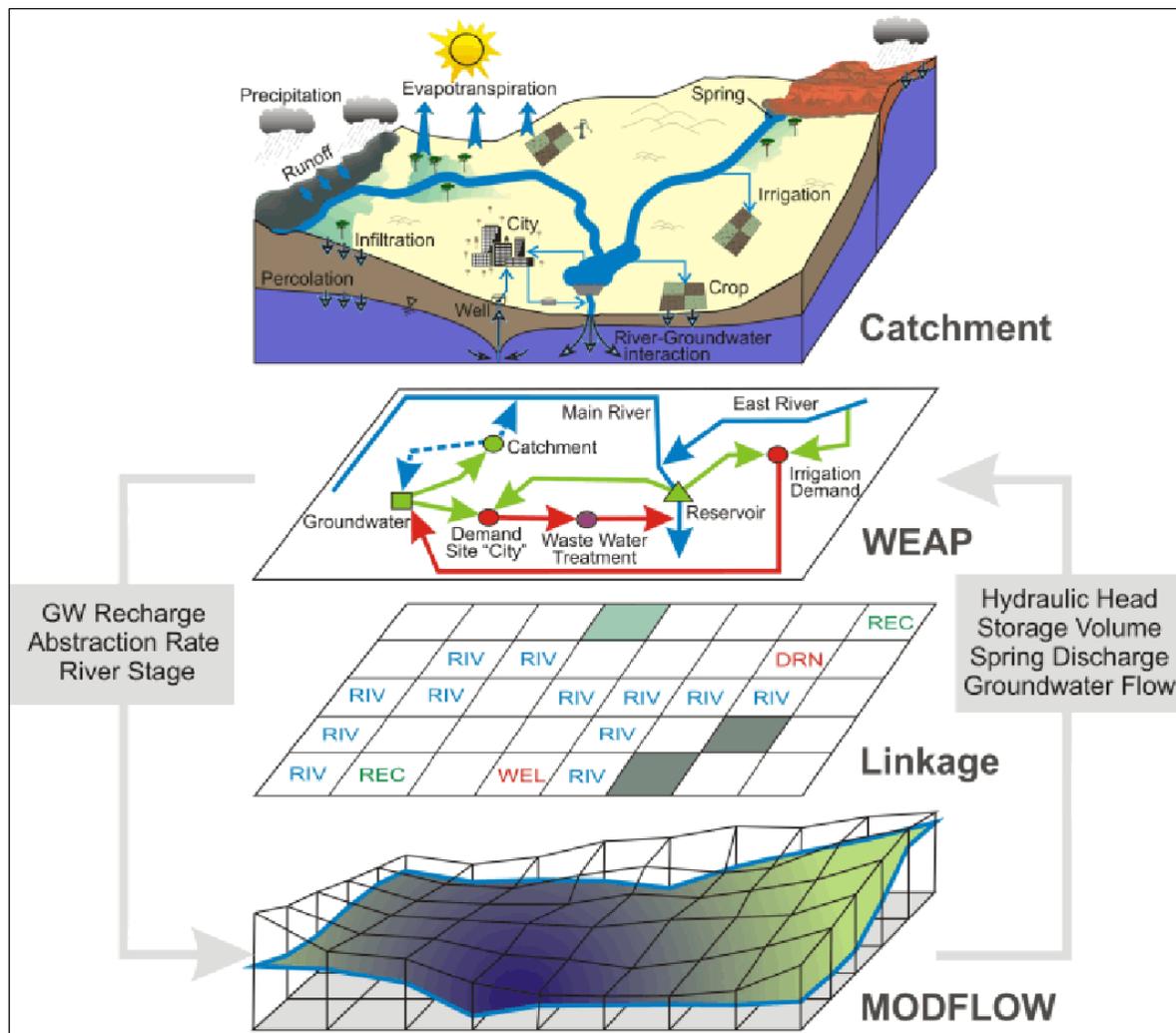


Figura 5-2 Configuración Esquemática WEAP-MODFLOW.

Fuente: DGA, 2019d, a partir de Federal Institute for Geosciences and Natural Resources.

La Figura 5-3 muestra un esquema general de acoplamiento entre un modelo WEAP y un modelo MODFLOW detallando los procesos e interacciones simuladas.

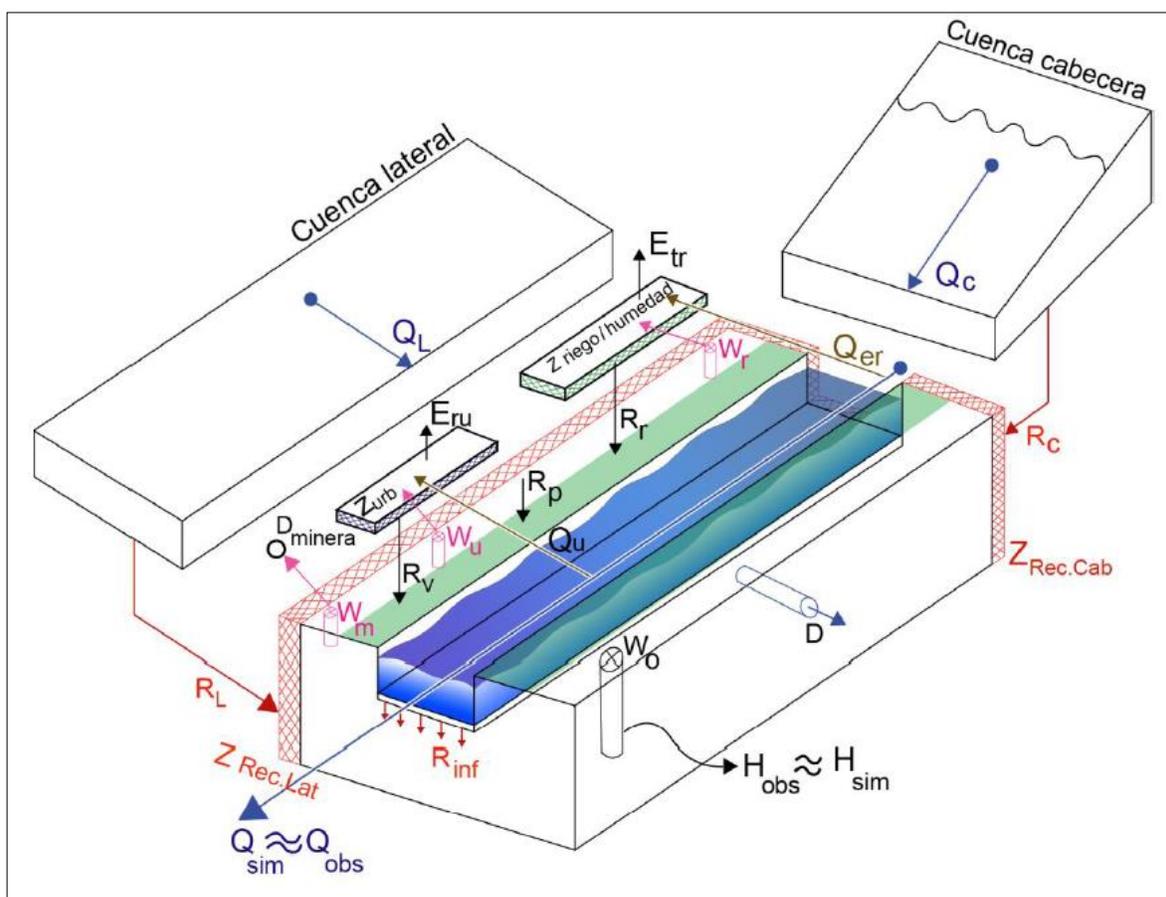


Figura 5-3 Esquema de acoplamiento WEAP-MODFLOW.

Fuente: DGA (2019d).

5.4 Parámetros de calibración

A continuación, una breve descripción de cada uno de los parámetros calibrados para ajustar los caudales superficiales en los modelos Maipo Cordillera y Maipo Valle. El valor de los parámetros ajustados se presenta en la sección 4.3.2.17 del anexo H para el modelo Maipo Cordillera y en la sección 6.3 del anexo H para el modelo Maipo Valle.

***K_c*, Coeficiente de cultivo**

Coeficiente (adimensional) que para representar el gasto de agua desde el suelo. Se determinaron valores de K_c para 6 cubiertas de suelo: áreas sin vegetación, áreas urbanas bosque nativo, cuerpos de agua, humedales, nieve y glaciares y praderas y matorrales.

Sw, Soil Water Capacity

Capacidad efectiva (mm) del suelo en la capa superior o zona de raíces.

Ks, Root Zone Conductivity

Tasa de conductividad (mm/semana) a saturación 100% en la capa superior o zona de raíces.

RRF, Runoff Resistance Factor

Factor (adimensional) de resistencia a la escorrentía, mientras mayor es este factor, la escorrentía tiende a decrecer.

PFD, Preferred Flow Direction

Dirección referencial del flujo. Si PFD es 1 entonces el flujo es 100% horizontal, si el PFD es 0 entonces el flujo es 100% vertical.

Melting Point

Umbral de temperatura (°C) en que la nieve se derrite pasando a ser agua líquida.

Freezing Point

Umbral de temperatura (°C) en que el agua se solidifica para la acumulación de nieve.

5.5 Criterios de sustentabilidad

Se presenta a continuación la metodología aplicada y los supuestos realizados para la estimación de los criterios de sustentabilidad para cada SHAC. El análisis se realizó para los 24 SHAC incluidos en el modelo acoplado WEAP-MODFLOW, considerando los resultados del escenario histórico para los años 1990 al 2019 y del escenario base para los años 2020 al 2050.

Es necesario destacar que a la fecha de realización de este estudio no existe un manual que defina por completo los criterios de sustentabilidad, aunque si existe el "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos" del Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) que ha sido utilizado para estudiar cuencas específico por dicho departamento. Los criterios utilizados en el

presente estudio fueron los establecidos por la Dirección General de Aguas en forma general para los PEGH y se basan en la Resolución DGA-MOP N°425 de 2007 y en el Decreto MOP-DGA N°203 de 2014. Estos criterios corresponden al análisis de descensos sustentables, grado de afectación al río, satisfacción de la demanda, pozos secos y análisis de influencia hacia otros sectores, según el detalle presentado a continuación.

Adicionalmente, se debe de considerar que los PEGHs están estimando una oferta sustentable menos las extracciones reales, por lo que no es posible comparar los resultados con la Disponibilidad establecida por el DARH.

5.5.1 Descensos sustentables

La estimación de este criterio considera que, si los descensos son sostenidos, se considera que el volumen de afección sobre el acuífero en el largo plazo (50 años) no debe afectar más allá de un 5% del volumen total del acuífero. En caso contrario, el sistema acuífero será considerado con afección y se deberá cerrar el acuífero.

Para evaluar el cambio de volumen acuífero de cada SHAC, se calculó el volumen inicial y final de cada SHAC, correspondiente al volumen medio de los años 1990 y 2050, respectivamente, y se comparó la diferencia con el 5% del volumen total del acuífero, considerado igual al volumen inicial (1990).

5.5.2 Afectación al río

Este criterio busca analizar la afectación sobre los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción, equivalente a la diferencia de flujo neto hacia el río, debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia. La afectación sobre el cauce superficial se define como la diferencia entre la recarga desde el río al acuífero generada en cada SHAC y los afloramientos al río. Esto resulta en:

$$\Delta Q \leq 10\% Q_{anual85\%}$$

Para aplicar este criterio se consideraron las recargas del río al acuífero y afloramientos desde el acuífero al río en los tramos correspondientes a cada SHAC, tomando los valores medios anuales de los años 1990 y 2050.

Por otra parte, se obtuvieron las series de caudal en un punto del cauce identificado a la salida de cada SHAC. Para cada serie se estimó el caudal de probabilidad de excedencia del 85% a través del método de Weibull.

Por último, se comparó la diferencia del flujo neto hacia el río entre los años 1990 y 2050 con el caudal superficial pasante de 85% de probabilidad de excedencia a la salida del respectivo SHAC y se definió el cumplimiento del criterio.

5.5.3 Satisfacción de demanda

Este criterio considera que, para cada SHAC, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda, considerando que la oferta está dada por el caudal de los pozos que el modelo indica que son factibles de obtener.

Para dar cumplimiento al criterio de satisfacción de la demanda en cada SHAC, el modelo debe permitir una extracción mínima del 95% del caudal ingresado como demanda, Esto resulta en:

$$Q_{oferta} > 95\% Q_{demanda}$$

Para evaluar la satisfacción de la demanda desde cada SHAC es necesario considerar las características y limitaciones del modelo construido. Las demandas subterráneas no agrícolas han sido ingresadas al modelo como series fijas conocidas, mientras que, en el caso de las demandas subterráneas agrícolas, sus valores quedan condicionadas por la demanda de riego total en cada zona de riego y lo que haya sido abastecido desde la fuente superficial. Lo anterior, debido a que la demanda cada zona agrícola es abastecida en primera instancia por el río o canales, y en segunda instancia por el acuífero, de acuerdo a los supuestos establecidos. Debido a esto, se vuelve difícil diferenciar la demanda agrícola puramente subterránea, y por tanto, realizar un análisis totalmente concluyente sobre este criterio. El análisis se hace por ende solo de manera parcial, analizando las demandas no agrícolas por SHAC, destacando en los resultados los SHAC que en este escenario no logran dar cumplimiento al criterio, sin poder concluir con respecto a los otros. Por otra parte, y debido a la configuración del

modelo acoplado, donde un elemento puede representar múltiples pozos asociados a una zona de riego, no es posible representar una disminución en la satisfacción de la demanda debido a posibles pozos secos, dado que frente a esto el modelo redistribuye la extracción hacia otras celdas unidas al correspondiente *demand site*.

Se analizaron para este criterio dos alternativas. En primer lugar, se consideró el periodo entre 1990 y 2050 (periodo superior a 50 años), tomando el nivel medio histórico de la demanda promedio anual. En segundo lugar, se analizó el horizonte final de modelación, correspondiente al año 2050.

5.5.4 Pozos secos

Este criterio considera que en cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

Debido a que no se dispone de información completa y sistematizada de la profundidad de los pozos de bombeo en la cuenca, no es posible hacer un análisis directo sobre pozos desconectados o colgados. Lo anterior se explica en que si bien el modelo entrega para cada paso de tiempo el nivel en cada celda, al no contar con la profundidad real de cada pozo, no es posible establecer el punto en que estos quedan o no secos. Además, debido a que el modelo WEAP distribuye la demanda de un *demand site* de forma equivalente a todos los pozos conectados, no se está representando necesariamente el comportamiento real del sistema al nivel de detalle requerido para el análisis de este criterio. Por lo tanto, se ha optado por realizar un análisis alternativo que permita identificar los posibles problemas asociados a pozos secos o descensos importantes de niveles, sin obtener el número exacto de pozos afectados, para los cual se realizó un análisis del descenso promedio de los niveles en cada SHAC.

5.5.5 Análisis de influencia a otros sectores

Este criterio busca verificar que el aumento de extracciones desde un sector no afecte a la disponibilidad sustentable de otro sector aguas abajo. El cumplimiento de este criterio estará dado porque ninguno de los SHAC aumente la demanda provocando el

no cumplimiento de los criterios para los otros sectores abiertos, o para los sectores cerrados.

Actualmente el criterio de sustentabilidad DGA de afectación a otros Sectores no tiene una metodología de análisis o un umbral explícitamente definidos. Por lo tanto, no se puede definir el cumplimiento o no cumplimiento de este criterio de manera definitiva. No obstante, se realizó un análisis sobre los flujos subterráneos de entrada y salida para cada SHAC del modelo. Este análisis permite ver cómo cambian dichos flujos con el tiempo. Sin embargo, el análisis no permite entender toda la complejidad del sistema, en el cual existen varias direcciones de flujo de agua subterránea, a nivel local, de SHAC, y de cuenca, que puedan cambiar con el tiempo. Por ejemplo, existen varios SHAC cuyo flujo subterráneo de entrada baja, mientras que su flujo subterráneo de salida aumenta, o viceversa, durante el periodo de análisis. Estos cambios pueden deberse a varios factores, entre ellos cambios en la recarga y la demanda, y el efecto acumulativo de estos cambios en el largo plazo.