



Gobierno
de Chile

GOBIERNO DE CHILE

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

DIAGNÓSTICO PARA EL DESARROLLO DEL PLAN NACIONAL

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE AZAPA

ANEXO F – ASPECTOS METODOLÓGICOS

REALIZADO POR:

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS TERRITORIAL

S.I.T. N°496

Santiago, ABRIL 2022

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	Introducción	1
CAPÍTULO 2	Caracterización de la cuenca	2
2.1	Caracterización climática	2
2.1.1	Variabilidad climática	2
2.1.2	Escenarios de cambio climático	6
CAPÍTULO 3	Demanda Física y Legal de Recursos Hídricos para diferentes usos	14
CAPÍTULO 4	Oferta Hídrica	14
CAPÍTULO 5	Modelación Hidrológica	14
CAPÍTULO 6	Plan de acción	15
6.1	Marco Estructurante	15
6.2	Ejes estratégicos del plan de acción	19
6.3	Metodología de análisis: Árbol de problemas y soluciones	23
6.4	Categorización de las acciones del Plan	26
6.5	Cartera de acciones	29
CAPÍTULO 7	Cartera de Iniciativas	30
7.1	Evaluación Económica	30
7.2	Evaluación Social	31
7.3	Evaluación Ambiental	32
7.4	Evaluación Estratégica	33
7.5	Evaluación de Balance	33
7.6	Priorización de las acciones y Definición del Plan de Acción	34
CAPÍTULO 8	Implementación del Plan	43
CAPÍTULO 9	Monitoreo y seguimiento del plan	43

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA) es el organismo del Estado chileno a cargo de promover la gestión y administración del agua. Actualmente, en un contexto de cambio climático, es relevante la planificación estratégica y la eficiencia en la gestión del agua, promoviendo objetivos y metas de Seguridad Hídrica. El concepto Seguridad Hídrica a partir II Foro Mundial del Agua del año 2000, ha recibido una creciente y amplia aceptación internacional para la formulación de objetivos en relación con la gestión del agua (Lankford et al., 2013; Cook y Bakker, 2016; Peña, 2016; MMA-LAT, 2017).

El Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) del acuífero del valle de Azapa, considera como marco estructurante la Seguridad Hídrica, definida como *“Acceso al agua en un nivel de cantidad y calidad adecuada, definida por cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo, tanto para la salud, subsistencia, desarrollo socio-económico y la conservación de los ecosistemas, manteniendo una alta resiliencia frente a las amenazas asociadas a sequías, crecidas y contaminación”* (MMA-LAT, 2017). Establecido mediante los siguientes ejes estratégicos:

- Eje 1. Seguridad Hídrica para el consumo humano.
- Eje 2. Seguridad Hídrica para las actividades productivas.
- Eje 3. Seguridad Hídrica para los ecosistemas.
- Eje 4. Seguridad Hídrica ante eventos extremos y contaminación.
- Eje 5. Balance Hídrico.
- Eje 6. Gobernanza.
- Eje 7. Disponibilidad de Información.

De esta manera, el diagnóstico, los escenarios modelados, la definición de acciones y las iniciativas escogidas son coherentes con el logro de metas y objetivos de Seguridad Hídrica al alero de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como paradigma de gestión, cuya comprensión del manejo del agua considera los componentes del ciclo hidrológico en su totalidad, las múltiples necesidades de los actores involucrados, y la gestión tanto de la oferta como de la demanda del agua. Cabe destacar que el presente estudio tiene alcance a nivel del acuífero del valle de Azapa, en la región de Arica y Parinacota. No obstante, igualmente se presentan datos y análisis a nivel de la cuenca del río San José, dado que aguas superficiales y subterráneas se encuentran interconectadas por su naturaleza física y sociocultural.

Por último, es importante mencionar los métodos de caracterización de la cuenca, demanda, oferta y balance se basa en los insumos y elementos centrales de la modelación acoplada desarrollada para el acuífero del valle de Azapa por el estudio DGA-DICTUC (2020)¹, financiado también por la DGA y que desarrolló un modelo acoplado para el periodo histórico 1986-2018, y futuro 2018-2020, mismos periodos de análisis utilizados para el presente PEGH.

¹ DGA-DICTUC. (2020). Diagnóstico para la Explotación del Acuífero del Valle de Azapa. SIT N°468.

CAPÍTULO 2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

2.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

2.1.1 Variabilidad climática

Cuenca alta

Dado que en la zona alta de la cuenca de Azapa es donde ocurren mayores precipitaciones, en conjunto con la presencia de un acuífero que se recarga y luego tributa sus aguas al sistema hidrológico bajo su cota, se analizó la zona alta separadamente de la cuenca total. Para comprender, sin embargo, cómo es el comportamiento en general de los datos CR2MET de la precipitación se presenta la Figura 2-1.

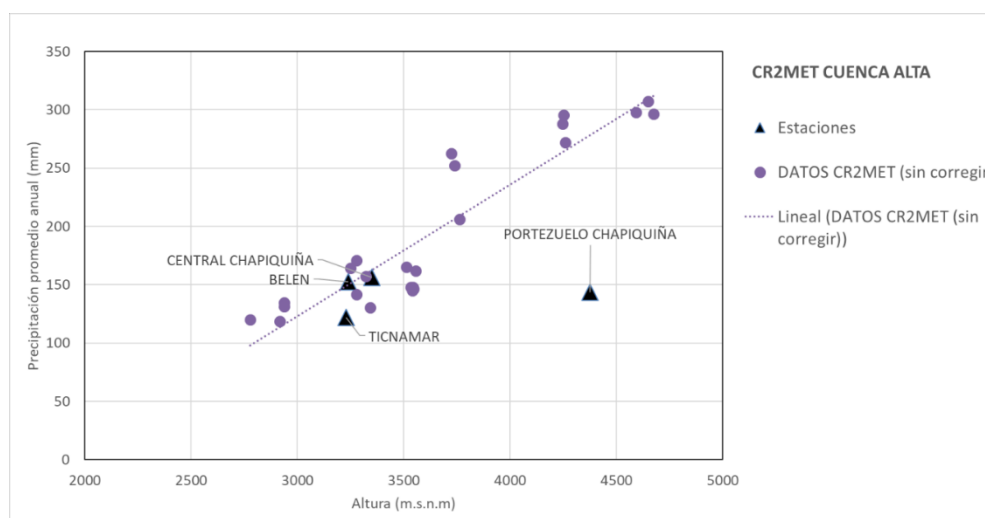


Figura 2-1. Precipitación promedio anual en toda la cuenca de Azapa. Datos CR2MET sin corregir. También se incluyen los valores históricos registrados en estaciones DGA (junto con su gradiente estimado). Para la zona alta, se incluye también un gradiente de precipitación.

Fuente: DGA-DICTUC (2020)

Se puede apreciar que los datos CR2MET describen su propio gradiente zonal a lo largo del valle de Azapa, pero este sobreestima con creces los valores de precipitación esperados para alturas sobre los 3.500 m s.n.m. De ser aplicados sin corrección, los datos generarían un exceso de agua ingresando al sistema, desbalanceando el sistema hidrológico. Por otra parte, la zona más baja de la cuenca alta (3.000 m s.n.m.) presenta un buen ajuste, coincidiendo satisfactoriamente en las estaciones de Belén y Central Chapiquiña, y con una ligera sobreestimación (10 mm/año) en Ticnamar.

Ante este panorama, se han corregido los valores de las forzantes en la cuenca alta según la siguiente metodología:

- En primer lugar, se han reajustado los valores de las forzantes por un factor de ajuste. Este factor de ajuste se obtuvo comparando el promedio de precipitación anual promedio para las tres estaciones de referencia ubicadas en la cuenca alta (Ticnamar, Belén y Chapiquiña). Los valores reportados por (CR)2 y DGA pueden consultarse en la Tabla 2-1, donde se evidencia una sobrestimación del producto grillado. El factor de ajuste, por tanto, es simplemente el cociente entre los valores DGA y (CR)2, y se aplicará a las distintas subcuencas. El criterio para aplicar cada factor en cada serie de tiempo de las forzantes fue el de polígonos de Thiessen, es decir, las áreas más cercanas a cada una de las estaciones pluviométricas.

Tabla 2-1. Promedio anual de precipitación (mm/año) para tres estaciones de referencia.

Fuente: DGA-DICTUC (2020)

Fuente/Factor	Ticnamar	Belén	Chapiquiña
(CR)2	198,2	190,9	183,2
DGA	124,6	137,2	146,9
Factor	0,63	0,72	0,80

- Seguido a esta corrección, se volvió a ajustar los valores de precipitación, pero esta vez, sólo para los valores sobre 3.700 m s.n.m. Esto se explica por el comportamiento de sobrestimación general ya señalado en la Figura 7-9 para la parte más alta de la cuenca alta. Se ocupó un factor de corrección de 0,85 en dichas subcuencas, lográndose así una mejor estimación de la precipitación (comparada con los promedios de Portezuelo Chapiquiña), y quedando dentro del umbral de los 200 mm/año para toda la cuenca.

Las forzantes finales pueden verse en la Figura 2-2.

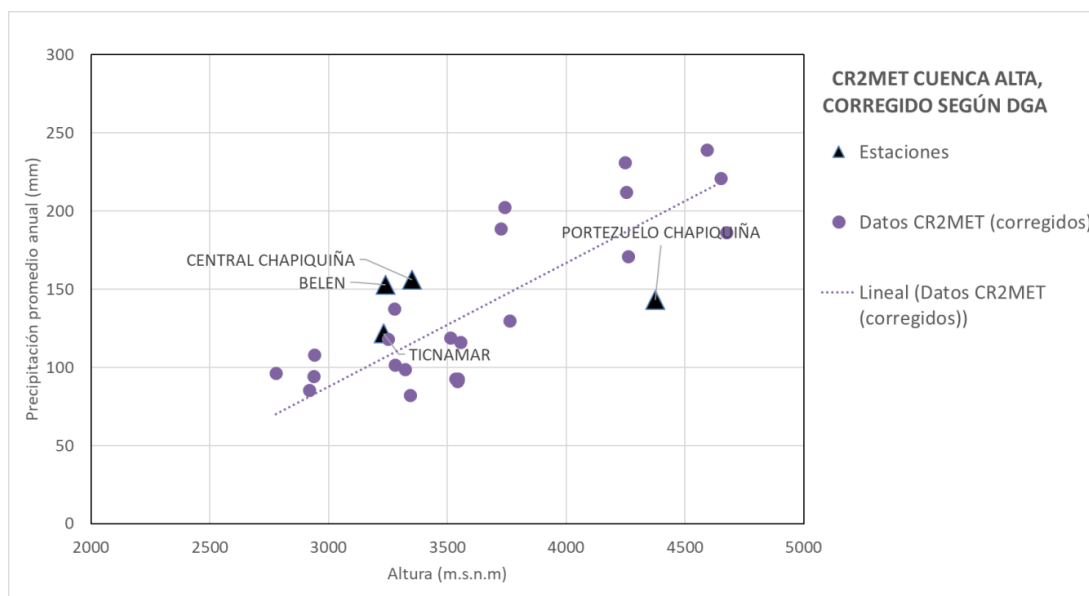


Figura 2-2. Precipitación promedio anual en la cuenca alta de Azapa. Datos CR2MET corregidos. También se incluyen los valores históricos registrados en estaciones DGA.

Fuente: DGA-DICTUC (2020)

Cuenca baja

Dado que en la zona baja de la cuenca del río San José es donde ocurren escasas precipitaciones, se analizó la subcuenca del río San José separadamente de la subcuenca Azapa Alto. Aquí es donde se desarrolla la agricultura, por lo que se tienen subcuencas asociadas a SHACs y zonas de riego correspondiente al Valle de Azapa. Para comprender, sin embargo, cómo es el comportamiento en general de los datos CR2MET de la precipitación, en la Figura 2-3 se muestran las forzantes (sin corregir) para cada una de las subcuencas de la zona baja.

Se puede apreciar que los datos CR2MET describen un gradiente que tiene, a grandes rasgos, la misma pendiente que la obtenida en base a los datos DGA. Sin embargo, vale mencionar que el gradiente está fuertemente dominado por altos valores de precipitación en la zona alta (160 mm/año) y nulos valores de precipitación bajo los 1.500 m s.n.m. En este sentido, no es propicio considerar el gradiente como una línea a seguir para estimar el ajuste de la precipitación, pues la experiencia en terreno ha mostrado que la subcuenca del río San José (Modelo Bajo) comparte un clima local claramente distinguible y con escasas lluvias en relación a la subcuenca de Azapa Alto (Modelo Alto), que es donde se ubican las estaciones DGA de referencia sobre los 3.000 m s.n.m.

Ante este panorama, se han corregido los valores de las forzantes en la cuenca baja según la siguiente metodología:

En primer lugar, se han reajustado los valores de las forzantes por un factor de ajuste. Este factor de ajuste se obtuvo comparando el promedio de precipitación anual promedio para las dos estaciones de referencia: una ubicada en la subcuenca alta (Ticnamar) y otra en la subcuenca baja (Azapa). Los valores reportados por (CR)2 y DGA pueden consultarse en la

Tabla 2-2, donde se evidencia una sobrestimación en la estación alta por parte del producto grillado. El factor de ajuste es el cociente entre los valores DGA y (CR)2, y se aplicará a las distintas subcuencas. El criterio para aplicar cada factor en cada serie de tiempo de las forzantes fue el de polígonos de Thiessen, es decir, las áreas más cercanas a cada una de las estaciones pluviométricas.

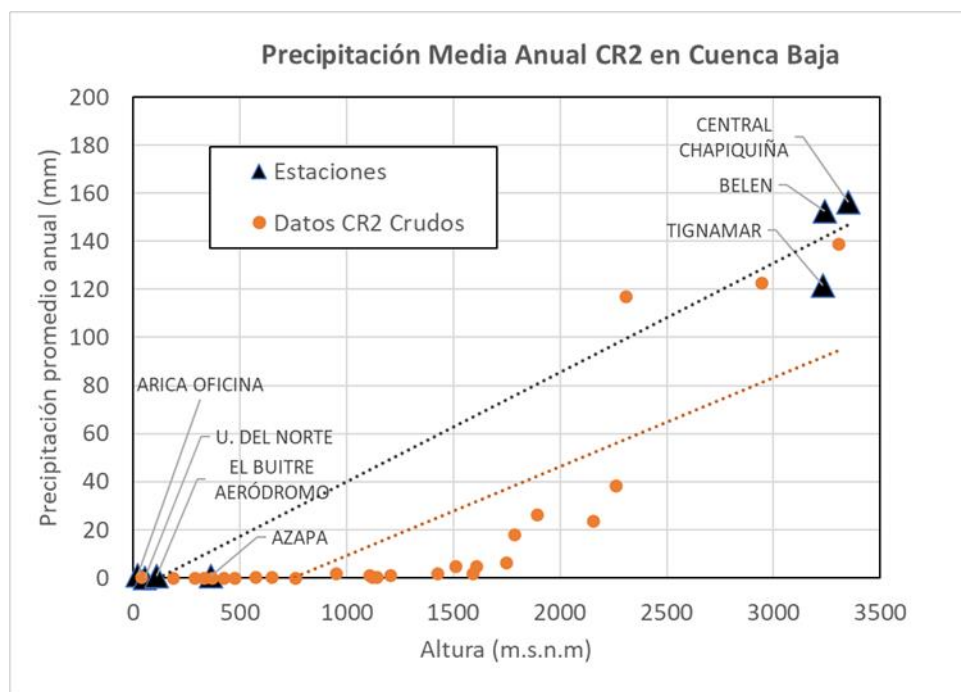


Figura 2-3. Precipitación promedio anual en la subcuenca del río San José. Datos CR2MET sin corregir (junto con gradiente). También se incluyen los valores históricos registrados en estaciones DGA (junto con su gradiente estimado).

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Tabla 2-2. Promedio anual de precipitación (mm/año) para dos estaciones de referencia.

Fuente Factor	Ticnamar	Azapa
(CR)2	198,19	0,35
DGA	124,56	0,76
Factor	0,63	2,21

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Seguido a esta corrección, se volvió a ajustar los valores de precipitación, pero esta vez, sólo para las cuencas sobre los 2.500 m s.n.m. Esto se explica por el comportamiento de sobrestimación general ya señalado en la Figura 7-32 para la parte más alta de la subcuenca del río San José (Modelo Bajo). De no corregirse este aspecto, las subcuencas

más altas aportaban una considerable cantidad de agua, la cual desbalanceaba todo el sistema hídrico bajo los 2.000 m.s.n.m; el cual percibe escasa precipitación. Se ocupó un factor de corrección de 0,5 en dichas subcuencas (2 en total), lográndose así una mejor estimación de la precipitación (comparada con los promedios de Portezuelo Chapiquiña), y quedando dentro del umbral de los 40 mm/año para toda la cuenca.

Las forzantes finales pueden verse en la Figura 2-4.

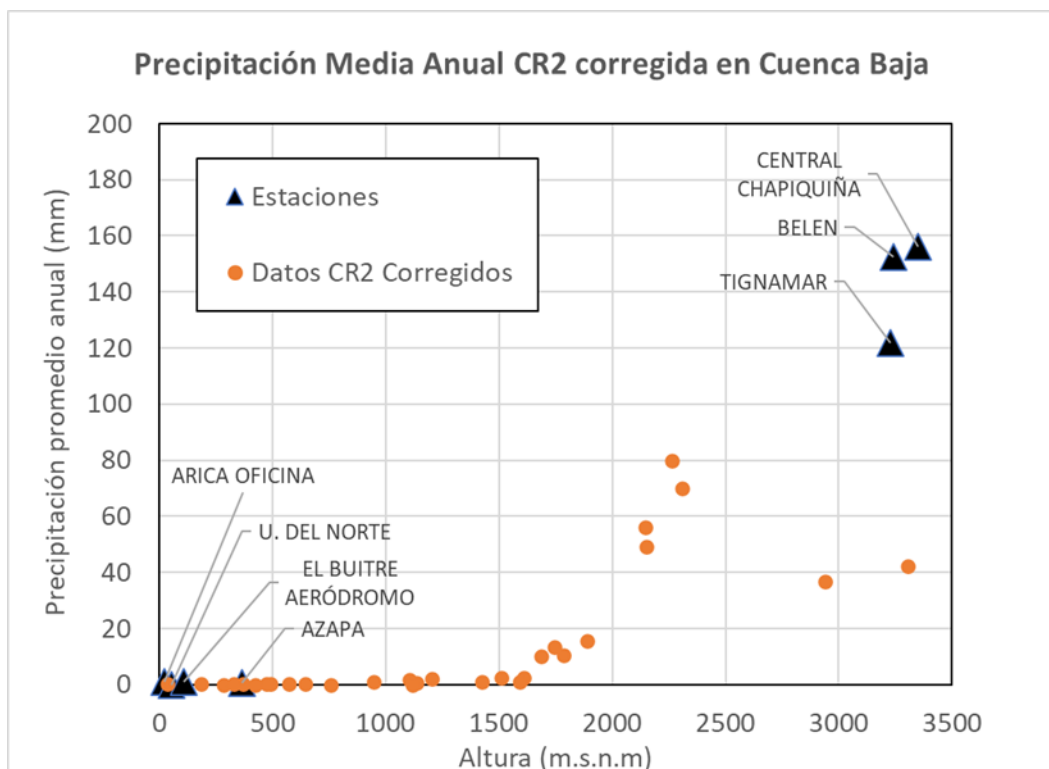


Figura 2-4. Precipitación promedio anual en la cuenca baja de Azapa. Datos CR2MET corregidos. También se incluyen los valores históricos registrados en estaciones DGA.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

2.1.2 Escenarios de cambio climático

Los distintos métodos para generar series futuras a escala mensual de precipitación y temperatura se basan en proyecciones generadas por modelos de circulación general (GCMs), que simulan el clima a una escala espacial relativamente grande. Estas simulaciones pueden considerar distintos escenarios futuros de concentración de gases de efecto invernadero denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Estos RCP están asociados a distintos niveles de forzamiento radiativo total al año 2100, los que oscilan entre 2.6 y 8.5W/m². Los distintos métodos para la generación de clima local en general deben capturar tanto las tendencias de estas simulaciones climáticas futuras, como la dinámica climática registrada localmente. Lo anterior es muy desafiante en zonas áridas e hiper áridas como la considerada en el estudio,

dado el particular comportamiento de las precipitaciones. Esto se traduce en sesgos considerables en los resultados de los GCMs con respecto del clima observado.

El método *Delta Change* utiliza las tasas de cambio de una variable climática (e.g. precipitación o temperatura) extraída a partir de las proyecciones de los GCMs, en torno a las cuales se agrega la variabilidad climática típica de la zona de estudio. A partir de estos cambios y los registros históricos se pueden generar series futuras a escala mensual o anual, escalas temporales típicas en el manejo y planificación de los recursos hídricos.

En Chile, durante los últimos años se han desarrollado productos climáticos que han incorporado las tendencias en precipitación y temperatura a partir de una amplia variedad de GCMs provenientes de la versión CMIP 5 (Taylor et al. 2012). En este contexto, Santibáñez et al. (2014) presentaron el atlas de cambio climático de la zona semiárida de Chile a alta resolución espacial, en el que proyectaron escenarios climáticos al año 2050 para el estudio de impactos del cambio climático en agricultura, recursos hídricos, suelos y biodiversidad. En el marco de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2016) presentó una base digital del clima a escala comunal para todo Chile considerando la línea base 1980-2010 con proyección al año 2050. Finalmente, con la metodología propuesta por Santibáñez et al. (2014) y el enfoque a escala comunal de MMA (2016), se creó el producto denominado Atlas Agroclimático de Chile (AGRIMED, 2017). Sin embargo, este producto se elaboró a partir del periodo de referencia 1980-2015. Por otra parte, para la reciente actualización del balance hídrico nacional se desarrolló un producto grillado para todo Chile que incorporó las tendencias del clima futuro provenientes de 4 GCMs de la versión CMIP 5 bajo el RCP8.5 (DGA, 2017). Los principales criterios para la selección de estos GCMs fueron (1) la respuesta regional a modos globales de variabilidad climática, (2) la sensibilidad climática del GCM, y (3) los cambios regionales. Otros detalles sobre estos criterios pueden ser consultados en DGA (2017).

Las principales ventajas que hacen atractivo el uso de estos productos incluyen (1) la robustez y documentación asociada a la metodología utilizada en su desarrollo, (2) la disponibilidad a escala comunal de las proyecciones, (3) la desagregación espacial de estas según unidades territoriales que obedecen a patrones geomorfológicos, y (4) el acceso fácil a las bases de datos en las plataformas de consulta pública. En particular se utilizarán las tendencias reportadas en MMA (2016) para cuyo cálculo se consideraron los siguientes aspectos discutidos.

Metodología para la generación de escenario climático futuro

Uno de los enfoques más simples para la generación de clima a escala de cuenca a partir de las simulaciones de los GCM es el método *Delta Change*. Este método utiliza las tasas de cambio de una variable climática (e.g. precipitación o temperatura) extraída a partir de las proyecciones de los GCMs, en torno a las cuales se agrega la variabilidad climática típica de la zona de estudio. A partir de estos cambios y los registros históricos se pueden generar series futuras a escala mensual o anual, escalas temporales típicas en el manejo y planificación de los recursos hídricos. El método *Delta Change* es el que se propone usar para la generación de clima futuro en el área de estudio, puesto que permite de manera simple preservar las tendencias simuladas por los GCMs, así como el comportamiento climático típico observado.

Se propone usar los resultados de tendencias o tasas de cambio para precipitación y temperatura al año 2050 presentados a escala comunal por MMA (2016) y AGRIMED (2017) para la implementación de la metodología *Delta Change*. Las principales ventajas que hacen atractivo el uso de estos productos incluyen (1) la robustez y documentación asociada a la metodología utilizada en su desarrollo, (2) la disponibilidad a escala comunal de las proyecciones, (3) la desagregación espacial de estas según unidades territoriales que obedecen a patrones geomorfológicos, y (4) el acceso fácil a las bases de datos en las plataformas de consulta pública. En particular se utilizarán las tendencias reportadas en MMA (2016) para cuyo cálculo se consideraron los siguientes aspectos discutidos. Detalles adicionales pueden ser consultados en la documentación original de MMA (2016).

El clima observado fue reproducido en celdas de 1 km x 1 km de resolución, considerando la información de estaciones meteorológicas administradas por la Dirección General de Aguas (DGA), Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Universidades y otros centros de carácter privado. El clima futuro fue generado a partir de un ensamble de 19 GCMs de la versión CMIP 5 bajo el escenario RCP8.5 (Tabla 2-3).

Tabla 2-3. Listado de GCMs utilizados en MMA (2016).

No.	Nombre del GCM	No.	Nombre del GCM
1	ACCESS1-0	11	HadGEM2-CC
2	GFDL-ESM2G	12	MIROC5
3	IPSL-CM5A-LR	13	CNRM-CM5
4	BCC-CSM1-1	14	HadGEM2-ES
5	GISS-E2-R	15	MPI-ESM-LR
6	MIROC-ESM-CHEM	16	GFDL-CM3
7	CCSM4	17	INMCM4
8	HadGEM2-AO	18	MRI-CGCM3
9	MIROC-ESM	19	NorESM1-M
10	CESM1-CAM5-1-FV2		

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Las unidades de desagregación territorial son conglomerados que obedecen a patrones geomorfológicos (Tabla 2-4).

Tabla 2-4. Unidades de desagregación territorial por macrozonas.

Región	Litoral	Valles interiores y pre-cordilleranos	Pre-cordillera	Cordillera	
Región de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama					
	< 600 m	650-1.300 m	1.300-2.800 m	>2.800 m	
Región de Coquimbo	Litoral	Valles interiores y precordilleranos	Precordillera	Cordillera	
	< 200 m	200- 650 m	650-1.500 m	>1.500 m	
Región de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins	Litoral	Secano interior	Valle Central	Precordillera	Cordillera
	< 50 m	50-200 m	100-650 m	650-1.500 m	>1.500 m
Región de Maule y Biobío	Litoral	Secano interior	Valle Central	Precordillera	Cordillera
	< 50 m	Loc. geográfica	< 500 m	500-1.400 m	>1.400 m
Región de Araucanía, Los Ríos, Los Lagos	Serranías costeras	Secano interior	Valle Central	Precordillera	Cordillera
	Loc. geográfica	Loc. geográfica	>350 m	350-850 m	>850
Región de Aysén y Magallanes	Patagonia Occidente (con fuerte regulación marítima)	Patagonia central (sectores interiores con cierto grado de continentalidad)	Patagonia Oriente (Sectores continentales con rasgos estépicos)		

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Las variables usadas para caracterizar el clima de línea base y clima futuro corresponden a los descritos en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5. Parámetros de caracterización climática presentados en MMA (2016).

Abreviatura	Variable
TXE	Temperatura máxima estival (Máxima media del mes más cálido, ENERO)
TNE	Temperatura mínima estival (Mínima media del mes más cálido, ENERO)
TXJ	Temperatura máxima invernal (Máxima media del mes más frío, JULIO)
TNJ	Temperatura mínima invernal (Mínima media del mes más frío, JULIO))
Temed	Temperatura media del período estival (Dic-Ene-Feb)
Timed	Temperatura media del período invernal (Jun-Jul-Ago)
PPA	Precipitación normal anual
PPA MIN	Precipitación anual más baja en cada subcomuna
PPA MAX	Precipitación anual más alta en cada subcomuna

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Un total de 7 estaciones meteorológicas fueron consideradas para representar el clima en el modelo WEAP según la metodología descrita en DGA (2020). En la cuenca Azapa Alto se consideraron las estaciones Central Chapiquiña, Tignamar y Belén, todas localizadas a alturas sobre los 3.000 m s.n.m. Para la cuenca del río San José (entre los 0 - 500 m s.n.m., donde se localiza el Valle de Azapa), las estaciones consideradas en el modelo WEAP fueron Arica Oficina, U. del Norte, Aeródromo El Buitre y Azapa respectivamente. Los valores de precipitación promedio anual para cada grupo de estaciones descritas anteriormente se presenta en la Figura 2-5b.

Teniendo en cuenta la posición geográfica - altimétrica de las estaciones meteorológicas consideradas en Azapa Alto y cruzando esta información con las unidades de desagregación territorial propuestas por MMA (2016) para las comunas de Arica y Putre (Tabla 2-4), se puede establecer que las macrozonas a consultar corresponden a Putre en zona de valles interiores (conglomerado número 11, Figura 2-6) y Arica en zona de cordillera (conglomerado número 1, Figura 2-6).

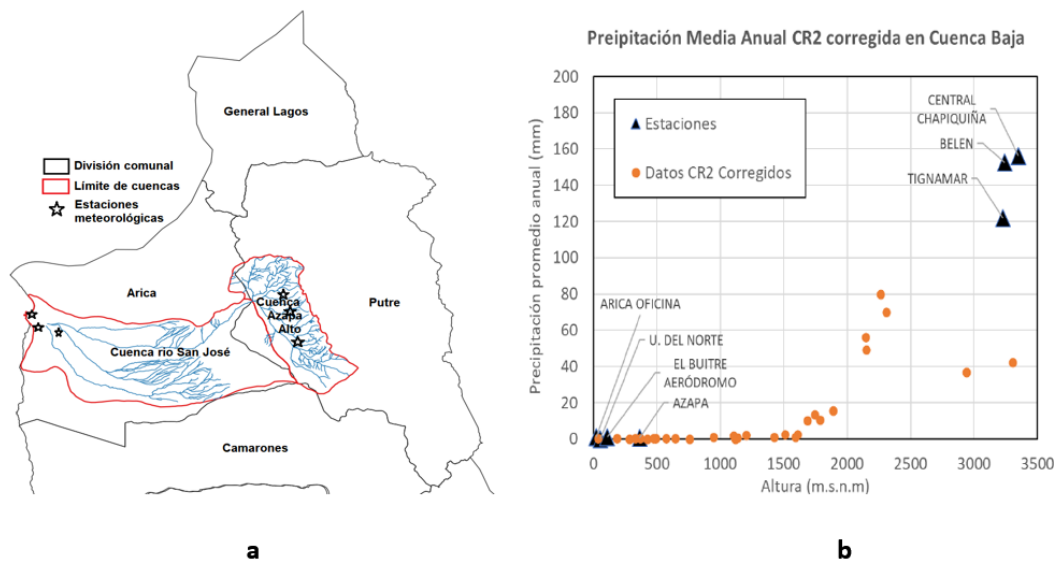


Figura 2-5. a) Localización de las cuencas de estudio en la división administrativa. b) Rango de precipitaciones entre estaciones de las cuencas río San José y Azapa Alto.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

De acuerdo con la base de datos consultada en MMA (2016), la precipitación promedio anual en estas zonas (conglomerados 1 y 11, cuyo dominio espacial pertenece a la cuenca Azapa Alto) tendrá una reducción promedio de 6,4% al año 2050, respecto del periodo base 1980-2010. En el caso de la temperatura, las proyecciones al 2050 indican un incremento de 2,4 °C en la temperatura media estival (Dic-Ene-Feb) y 2,8°C en la temperatura media invernal (Jun-Jul-Ago), respecto de la línea base 1980-2010.

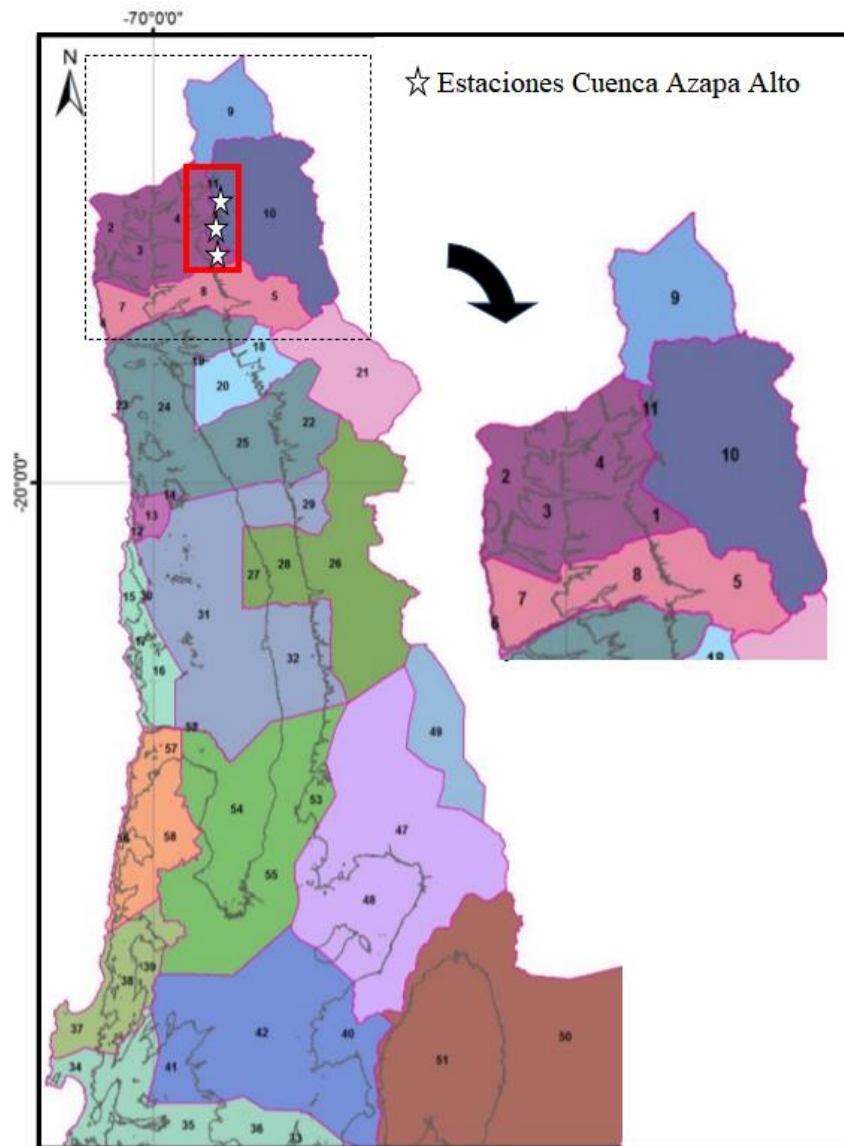


Figura 2-6. Identificación de las macrozonas o conglomerados en función de las estaciones meteorológicas consideradas en la cuenca Azapa Alto.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Metodología para la generación de escenario climático futuro

A continuación, se describe el procedimiento para generar las series futuras de precipitación y temperatura considerando las tendencias.

Precipitación

Considerando un periodo de registros observados a escala mensual (e.g 1980-2010), la serie de precipitación futura se considera como el periodo base perturbado por una tasa de cambio. De esta manera, la expresión para construir mes a mes la serie futura es descrita en la *Ecuación 2-1*:

$$P_i^f = P_i^{obs} \times \Delta P$$

Ecuación 2-1

Siendo P_i^f el registro de precipitación futura del mes (i), P_i^{obs} el registro de precipitación observado del mes (i) y ΔP es la tasa de cambio obtenida. Este escalamiento garantiza que tanto la media como la desviación estándar de la serie futura sean escaladas por el mismo factor (Maraun y Widmann, 2018).

Temperatura

En el caso de la temperatura, la serie futura se construye en términos aditivos a partir de los cambios absolutos entre los valores futuros y observados, siguiendo la expresión de la Ecuación 10.2.

$$T_i^f = T_i^{obs} + \Delta T$$

Ecuación 2-2

Siendo T_i^f el registro de temperatura futura del mes (i), T_i^{obs} el registro de temperatura observado del mes (i) y ΔT es la variación de temperatura en términos absolutos entre el periodo futuro y el periodo histórico de referencia obtenida.

CAPÍTULO 3 DEMANDA FÍSICA Y LEGAL DE RECURSOS HÍDRICOS PARA DIFERENTES USOS

Se realizó una revisión de los principales antecedentes de la cuenca del río San José para determinar las magnitudes de la demanda y sus distintos usos en el área de estudio. Se tuvo especial énfasis en la demanda agrícola asociada al valle de Azapa y la producción de agua potable por parte de la empresa sanitaria Aguas del Altiplano, que son los principales usos.

Cabe destacar que los aspectos metodológicos en detalle para la estimación de la demanda hídrica se presentan en el respectivo Anexo H, sección 2.4 para la demanda en la subcuenca de Azapa Alto, y en la sección 3.4 para la subcuenca de río San José.

CAPÍTULO 4 OFERTA HÍDRICA

Los aspectos metodológicos para la estimación de la oferta hídrica se presentan en el respectivo Anexo H, sección 2.10 para la subcuenca de Azapa Alto (oferta superficial), sección 3.11 para la subcuenca del río San José (oferta superficial), y sección 5.4.5 para el modelo acoplado (oferta superficial, recargas, volumen del acuífero).

CAPÍTULO 5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación numérica acoplada se ha realizado para la cuenca del río San José, y en específico para el acuífero del valle de Azapa en el caso del acople. Se utilizaron las plataformas WEAP y MODFLOW, para el sistema superficial y subterráneo, respectivamente. Tanto la metodología como los resultados mayoritarios provienen del estudio DGA-DICTUC (2020), de acuerdo con las bases de licitación del presente estudio. La metodología, plataformas utilizadas y principales resultados se presentan con detalle en el Anexo H, a lo largo de todas las secciones, diferenciando la metodología general de la modelación (sección 1), del modelo superficial de la subcuenca Azapa Alto (sección 2) y subcuenca del río San José (sección 3), del modelo subterráneo para el acuífero del valle de Azapa (sección 4), del acople del modelo superficial y subterráneo en el caso de la subcuenca del río San José (sección 5) y los escenarios de gestión simulados (6). Además, en la sección 1.7 se presenta el detalle metodológico para la estimación de la sustentabilidad del SHAC del acuífero del río San José, en función de los criterios de sustentabilidad DGA.

CAPÍTULO 6 PLAN DE ACCIÓN

La formulación del plan de acción es el resultado del análisis crítico del diagnóstico, actividades participativas y la modelación, en los cuales se identifican brechas y problemáticas hídricas de acuerdo con los objetivos del plan y la meta de Seguridad Hídrica. A partir de ello, las acciones propuestas para el valle de Azapa son categorizadas, y luego, priorizadas según una evaluación técnica, ambiental y socioeconómicamente.

A continuación, se describe la metodología que se aplicó en su generación. Los resultados del plan de acción se presentan en los Capítulos 6 (Acciones), 7 (Cartera de Iniciativas Propuestas), 8 (Implementación del Plan) y 9 (Monitoreo y Evaluación del Plan) del Informe Final.

6.1 MARCO ESTRUCTURANTE

El análisis de las medidas de intervención que forman el PEGH del acuífero del valle de Azapa, se estructura en diferentes ejes estratégicos, los que consideran como marco estructurante la Seguridad Hídrica.

En el país, y durante el último año (2022), se han aprobado normativas tendientes delimitar la seguridad hídrica como una meta a alcanzar en las distintas cuencas del país. Por una parte, la Ley Marco de Cambio Climático (artículo 13 de la ley N° 21.455/2022) propone Planes Estratégicos de Recursos Hídricos para resguardar la seguridad hídrica. Por otra parte, el Código de aguas (artículo 293 bis del DFL N°1122/1981, modificado por la ley N°21.435/2022) mandata a cada cuenca del país a contar con un Plan Estratégico de Recursos Hídricos tendiente a propiciar la seguridad hídrica en el contexto de las restricciones asociadas al cambio climático. En coherencia con las innovaciones normativas aprobadas en el país, el presente Plan de Acción propuesto para el acuífero del Valle de Azapa se estructura en ejes estratégicos, con la meta de Seguridad Hídrica para el valle de Azapa y los factores condicionantes para el cumplimiento de ésta. Cabe destacar que el presente estudio fue conceptualizado para el acuífero del valle de Azapa, por lo tanto, no se detalla la meta de seguridad hídrica ni la problemática enfocada en las aguas superficiales y, por tanto, en la cuenca del río San José, sino que a nivel de acuífero. No obstante, igualmente el presente estudio aborda la problemática de las aguas superficiales dada la conexión entre las aguas superficiales y subterráneas, lo que permite ver problemáticas más amplias que solo el acuífero del valle de Azapa, pero no como el foco principal.

En el marco de la formulación del Plan de Acción Nacional del Cambio Climático (2017-2022), el Laboratorio de Análisis Territorial (LAT) de la Universidad de Chile presenta la siguiente propuesta conceptual de Seguridad Hídrica adaptada a la realidad del país (MMA-LAT, 2017):

"Acceso al agua en un nivel de cantidad y calidad adecuada, definida por cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo, tanto para la salud, subsistencia, desarrollo socioeconómico y la conservación de los ecosistemas, manteniendo una alta resiliencia frente a las amenazas asociadas a sequías, crecidas y contaminación".

Con la finalidad de facilitar la gestión y medición de los objetivos y metas de Seguridad Hídrica, el concepto propuesto se subdivide en cuatro dimensiones -con sus subdimensiones respectivas- estrechamente relacionadas entre sí (Figura 3- 1), es decir, el no cumplimiento de los objetivos de una dimensión afecta potencialmente el cumplimiento de los objetivos diseñados para una o más dimensiones (MMA-LAT, 2017).

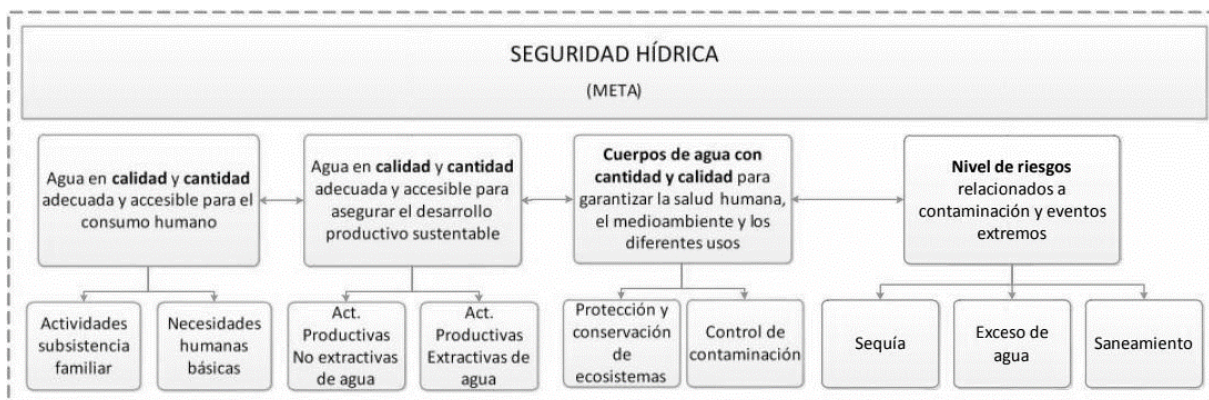


Figura 3- 1. Dimensiones y subdimensiones de Seguridad Hídrica

Fuente: MMA-LAT, 2017.

Los factores principales que condicionan el logro de objetivos y metas de Seguridad Hídrica están relacionados, de manera general, con las características del sistema biofísico (sistema hidrológico y ecológico), con la estructura del sistema socioeconómico que caracteriza a un determinado territorio y con el sistema de gobernanza de este. Por ello, al analizar el estado de Seguridad Hídrica en un territorio determinado, se incorpora el análisis de los factores condicionantes del mismo (Figura 6-1):

- Gobernanza del agua
- Gestión del agua
- Escenarios del clima
- Escenarios de desarrollo
- Conservación de los servicios ecosistémicos

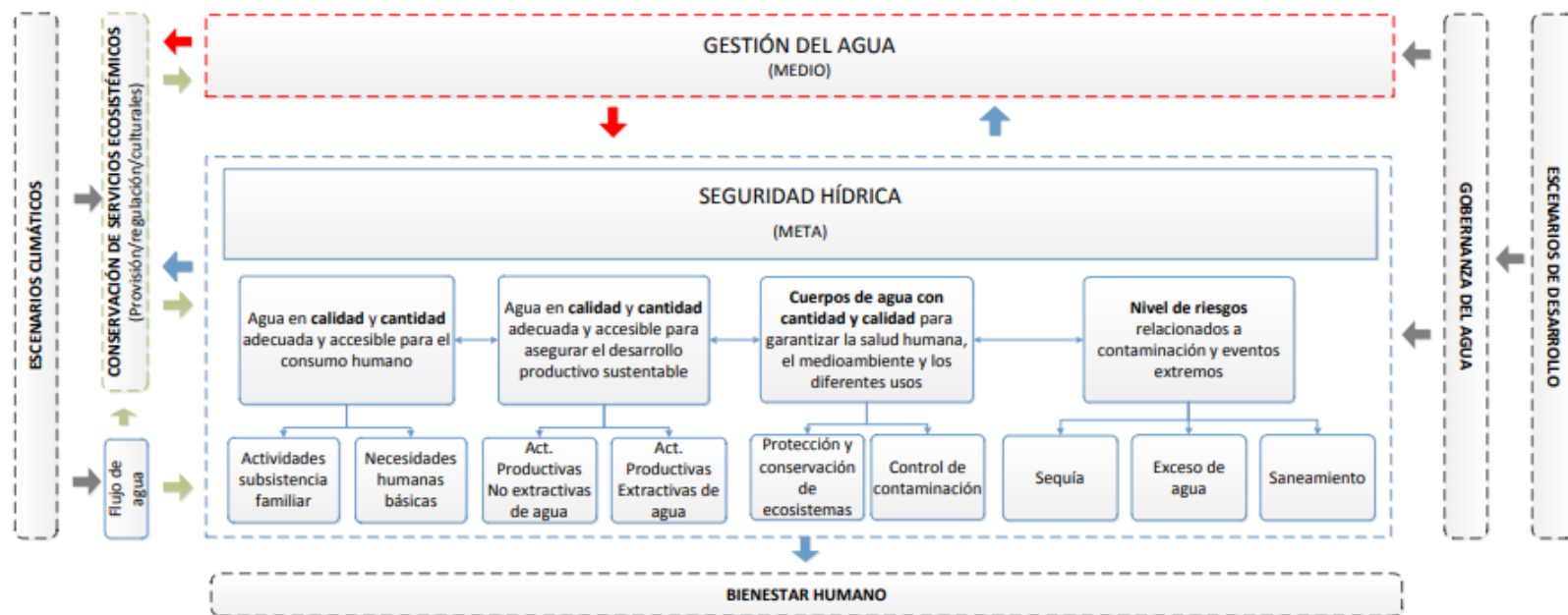


Figura 6-1. Factores condicionantes, dimensiones y subdimensiones de la Seguridad Hídrica

Fuente: MMA-LAT, 2017.

El concepto de Seguridad Hídrica involucra diversas variables y las dimensiones que requieren de análisis son múltiples, ya que busca caracterizar la interacción del sistema hidrológico con los ecosistemas y el sistema social, por lo cual el contexto de las interacciones es particular de cada territorio y las acciones e iniciativas que apunten a la Seguridad Hídrica requiere un enfoque interdisciplinario al alero de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como paradigma de gestión, cuya comprensión del manejo del agua considera los componentes del ciclo hidrológico en su totalidad, las múltiples necesidades de los actores involucrados, y la gestión tanto de la oferta como de la demanda del agua.

Paralelamente, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) señalan las metas en el marco de la Agenda 2030 para Chile, lo que incluye la necesidad de adoptar un enfoque integrado en la gestión del agua. Si bien es el ODS 6 el que explícitamente hace referencia al agua, prácticamente son todos los otros ODS los que se relacionan con la gestión del agua en calidad, cantidad y oportunidad. Sin embargo, para el PEGH del acuífero del valle de Azapa se destacan los siguientes:

- ODS 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
- ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.
- ODS 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.
- ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.
- ODS 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- ODS 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.
- ODS 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad

Consecuentemente, el logro de metas ODS que apuntan a una gestión sostenible, integrada y participativa, conlleva en la mejora de la Seguridad Hídrica (Figura 6-2).

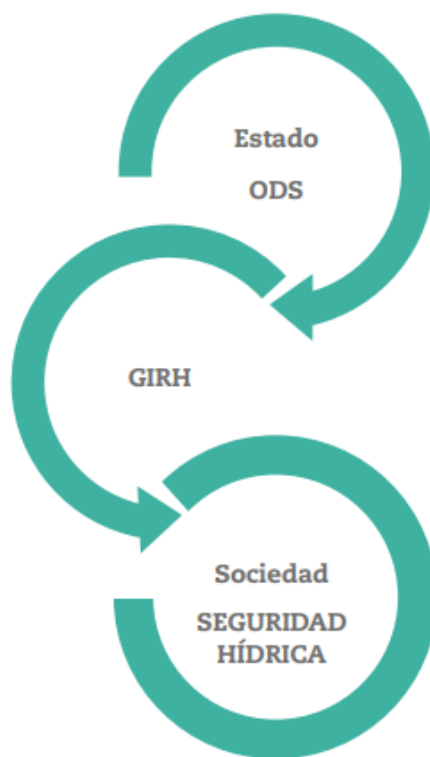


Figura 6-2. Relación entre los ODS, GIRH y Seguridad Hídrica.

Fuente: UNESCO, 2020.

Por último, para el monitoreo y seguimiento en el tiempo, tanto de objetivos de Seguridad Hídrica o metas ODS, es condicionante la disponibilidad y accesibilidad a información de calidad. Las brechas de información condicionan la certidumbre sobre las diferentes variables que afectan la realidad hídrica y la gestión del agua en la cuenca (biofísicas, sociales y económicas). Sin embargo, diferentes diagnósticos sobre el estado de la información relacionada con aguas en el país, devela grandes brechas de información relacionada tanto a oferta como demanda hídrica (Banco Mundial, 2011; Banco Mundial, 2013; DGA, 2015; Stehr et al., 2019).

Consecuentemente, la formulación de los ejes estratégicos del PEGH consideró las dimensiones de Seguridad Hídrica, los factores condicionantes de la Seguridad Hídrica y la disponibilidad de información sobre la realidad hídrica en el valle de Azapa, y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en el marco de la agenda 2030.

6.2 EJES ESTRATÉGICOS DEL PLAN DE ACCIÓN

El PEGH del acuífero del valle de Azapa considera 7 ejes estratégicos estructurados a partir del concepto integrador de Seguridad Hídrica en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dicho marco estructurante acoge los objetivos específicos del presente estudio (Tabla 6-1).

Tabla 6-1. Relación entre ejes estratégicos, objetivos de Seguridad Hídrica y Objetivos de Desarrollo Sostenible.

EJE ESTRATÉGICO	OBJETIVO HÍDRICA	OBJETIVO ODS
Eje 1. Seguridad Hídrica para el consumo humano	Agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para el consumo humano.	ODS 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
Eje 2. Seguridad Hídrica para actividades productivas	Agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para asegurar el desarrollo productivo sustentable.	ODS 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. ODS 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. ODS 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.
Eje 3. Seguridad Hídrica para los ecosistemas	Cuerpos de agua en cantidad y calidad para garantizar salud humana, el medio ambiente y los diferentes usos.	ODS 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. ODS 14. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos ODS 15. Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.
Eje 4. Seguridad Hídrica ante eventos	Aumentar los niveles de resiliencia para disminuir la vulnerabilidad de la población ante episodios de eventos	ODS 11. Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.

EJE ESTRATÉGICO	OBJETIVO HÍDRICA	SEGURIDAD	OBJETIVO ODS
extremos y contaminación	extremos de exceso y déficit de agua.		ODS 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
Eje 5. Balance Hídrico	Garantizar disponibilidad de agua, en cantidad, de manera sostenible para diferentes usos, incluido los ecosistemas.		ODS 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
Eje 6. Gobernanza	Fortalecer los organismos participantes de la gobernanza e implementar medidas que faciliten la gobernanza para el Plan Estratégico.		ODS 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
Eje 7. Disponibilidad de Información	Información de calidad y accesible sobre la realidad hídrica de la cuenca que permita una toma de decisiones informada en la gestión del agua, y un mayor control de extracciones de agua por diferentes usos, lo cual facilite el logro de la Seguridad Hídrica.		Factor condicionante en el monitoreo y seguimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y sus metas.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

A continuación, se describen los ejes estratégicos del PEGH:

- i. **Seguridad Hídrica para el consumo humano:** Agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para el consumo humano. Resguarda del agua en calidad y cantidad para proteger la salud pública, buscando satisfacer las necesidades básicas de las personas que se relacionen con el acceso al agua potable. Situación fundamentada en el derecho humano al agua y el saneamiento (Res. 64/292, 2010 de la Asamblea General de las Naciones Unidas) y en concordancia con el ODS 6.

A partir de ello, se identifican las siguientes áreas relevantes:

- a. *Actividades de subsistencia familiar:* Referido a mantener de manera sustentable las actividades de subsistencia que desarrollen comunidades locales o grupos indígenas, por ejemplo, agricultura de autoconsumo y satisfacción de actividades relacionadas a la cosmovisión, dichas actividades no consideran la producción de excedentes que permitan la comercialización de productos.

- b. *Necesidades humanas básicas*: Satisfacción de necesidades humanas básicas en relación con el acceso de la población a niveles adecuados de agua potable, tanto en cantidad como en calidad, en sectores rurales y urbanos.
- ii. **Seguridad Hídrica para los ecosistemas**: Cuerpos de agua en cantidad y calidad para garantizar salud humana, el medio ambiente y los diferentes usos. Aborda la importancia del mejoramiento de la calidad del recurso hídrico en cuerpos de agua superficiales y subterráneos, sumado a la mantención de caudales mínimos en cauces superficiales para garantizar salud humana, salud del medio ambiente, y satisfacer la demanda hídrica por parte de la población y de los sectores productivos, en concordancia con los ODS 6, 14 y 15. Este eje se asocia a dos áreas de relevancia:
 - a. *Protección y conservación de los ecosistemas*: Se relaciona a la protección y conservación de los ecosistemas naturales, terrestres y acuáticos, en cuanto a la demanda hídrica que requieren para mantener sus procesos y funciones ecológicas fundamentales, ya que determinan la provisión de servicios ecosistémicos relacionados al recurso hídrico.
 - b. *Control de contaminación*: Se refiere al control de la contaminación producida por actividades productivas en cuerpos de agua superficial y subterránea, con la finalidad de mantener la calidad del recurso hídrico que requieren los ecosistemas terrestres y acuáticos para realizar sus procesos y funciones ecológicas.
- iii. **Seguridad Hídrica para las actividades productivas**: Agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para asegurar el desarrollo productivo sustentable. Fundamentado en la importancia del resguardo del agua para la economía del país, la dimensión aborda la satisfacción de manera sustentable de agua en calidad y cantidad para las actividades productivas, en concordancia con los ODS 6, 7 y 9. Por ello, ésta se disgrega en dos componentes de importancia:
 - a. *Satisfacción de necesidades de actividades productivas extractivas de agua*: Relacionada con la satisfacción de la demanda de agua, en calidad y cantidad, por actividades productivas con uso consuntivo del recurso hídrico.
 - b. *Satisfacción de necesidades de actividades productivas no extractivas de agua*: Componente que aborda la satisfacción del recurso hídrico, en calidad y cantidad, para sectores productivos que demandan un uso no consuntivo del agua.
- iv. **Seguridad Hídrica ante eventos extremos de agua y contaminación**: Nivel de riesgos relacionados a contaminación y eventos extremos de agua. Referente a la necesidad de aumentar los niveles de resiliencia para disminuir la vulnerabilidad de la población ante episodios de eventos extremos de exceso y déficit de agua, los cuales se esperan sean más frecuentes e intensos producto del cambio climático (IPCC, 2013). El eje se constituye en concordancia con los ODS 11 y 13. A partir de esta dimensión se desprenden áreas de relevancia:
 - a. *Sequía*: Apunta a aumentar la resiliencia de la población frente a estos eventos, entendiendo sequía como “anomalía transitoria en la condición del clima, más o menos prolongada, caracterizada por un periodo de tiempo en el cual las tasas de precipitaciones son inferiores a las normales en un área geográfica determinada”.

- b. *Exceso de agua*: Referente a aumentar la resiliencia de la población frente a eventos extremos relacionados al exceso de agua, tales como aluviones, aludes e inundaciones.
 - c. *Saneamiento*: Relacionado al tratamiento de aguas servidas domiciliarias urbanas y rurales. Cabe destacar que no se incluye el tratamiento de RILES y relaves, debido a la dificultad de obtención de dicha información.
- v. **Balance hídrico**: El eje estratégico considera el balance hídrico, en concordancia con el ODS 6, entendiendo este como una relación entre la disponibilidad y demanda de agua en el territorio, cuyo delta diferencial condiciona la Seguridad Hídrica para el consumo humano, los ecosistemas y las actividades productivas.
- vi. **Gobernanza**: Incluye la gestión como “la forma en que el recurso hídrico es administrado por una gobernanza en particular” y la gobernanza como “conjunto de procesos políticos, organizacionales y administrativos a través de los cuales los intereses y requerimientos de la comunidad son articulados e incorporados, las decisiones son tomadas e implementadas, y los tomadores de decisiones desarrollan y gestionan los recursos hídricos para proveer servicios de agua efectivos” (Bakker, 2003 citado por Bakker y Morinville, 2013). Por ello, el eje estratégico busca fortalecer los organismos participantes de la gobernanza e implementar medidas que faciliten la gobernanza para el Plan Estratégico, en concordancia con ODS 6.
- vii. **Disponibilidad de información**: La información disponible condiciona la certidumbre sobre el estado de Seguridad Hídrica en un momento y territorio determinado, su monitoreo y seguimiento. Consecuentemente, es de relevancia disponer de conocimiento e información de calidad y accesible sobre la realidad hídrica de la cuenca que permita una toma de decisiones informada en la gestión del agua, y un mayor control de extracciones de agua por diferentes usos, lo cual facilite el logro de la Seguridad Hídrica en el valle de Azapa.

6.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS: ÁRBOL DE PROBLEMAS Y SOLUCIONES

A raíz del diagnóstico del estado de la cuenca, las actividades participativas, y la modelación se identificaron las brechas y problemáticas hídricas condicionantes para el cumplimiento de los objetivos específicos del PEGH y la Seguridad Hídrica. La metodología utilizada para el análisis de ello fue el “árbol de problemas y de soluciones”.

La herramienta permite analizar una situación o problemática con sus causas y efectos principales, mediante una disposición gráfica que establece las relaciones de estos con el problema central o focal. El nombre “árbol de problemas” proviene del diagrama gráfico en forma de “árbol”, en el cual las causas del problema son las “raíces”; y sus efectos, las “ramas” (Figura 6-3).

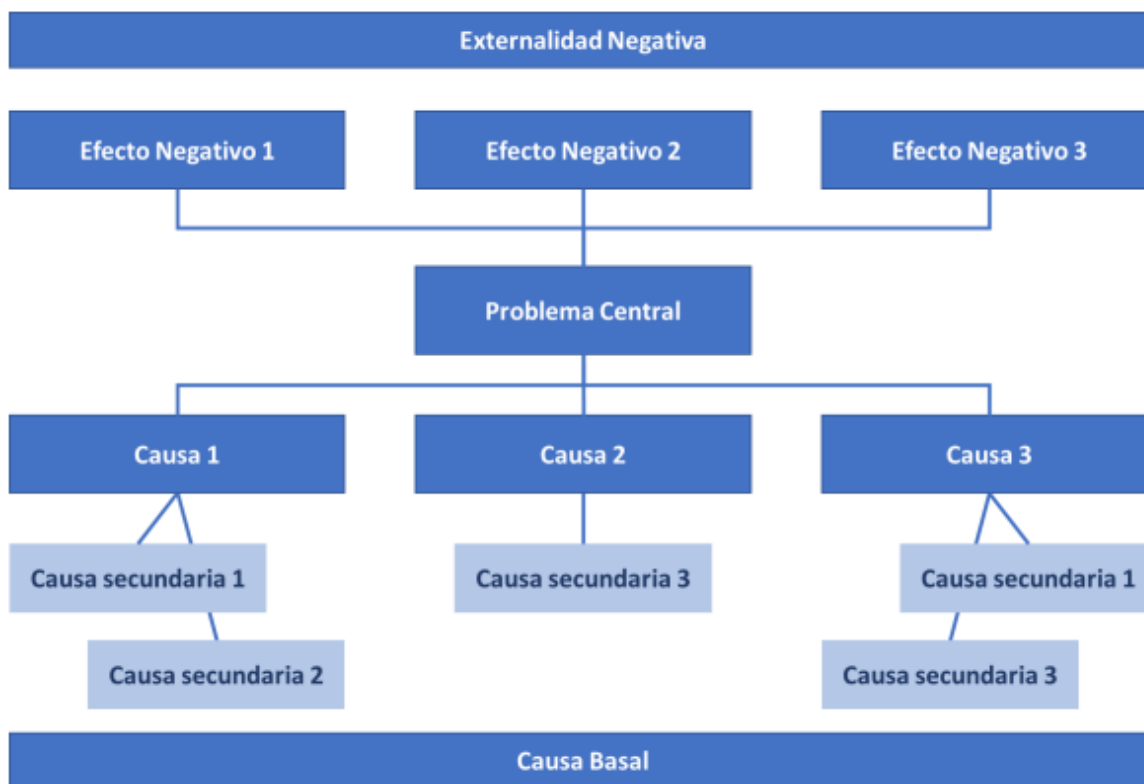


Figura 6-3. Esquema general de análisis del árbol de problemas.

Fuente: Centro de Cambio Global UC, 2019.

A partir de la identificación, análisis de la causas y efectos de un problema central o focal en el “árbol de problemas”, el equipo de trabajo estableció brechas de síntesis, que agrupan a una o más causas, tanto primarias como secundarias, para buscar ser resueltas y así contribuir a abordar la problemática central (Figura 6-4).

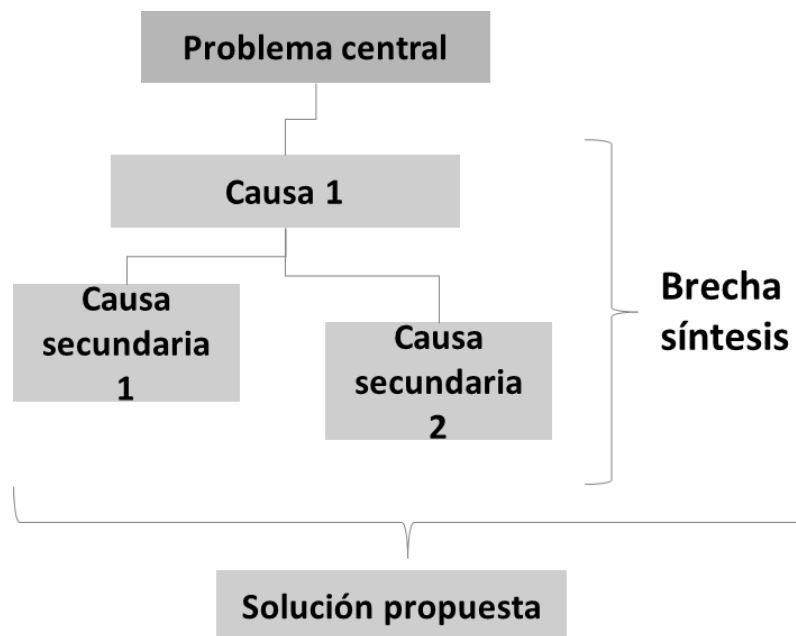


Figura 6-4. Esquema general de análisis del árbol de soluciones.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

El análisis crítico obtenido de la metodología “árbol de problemas y soluciones” se relaciona con los ejes estratégicos del PEGH, a través de establecer relaciones entre los objetivos de Seguridad Hídrica, los problemas identificados, las acciones propuestas y una recopilación de las iniciativas que actualmente se relacionan con dicha problemática hídrica o brecha identificada, tal como se muestra en la Figura 6-5.

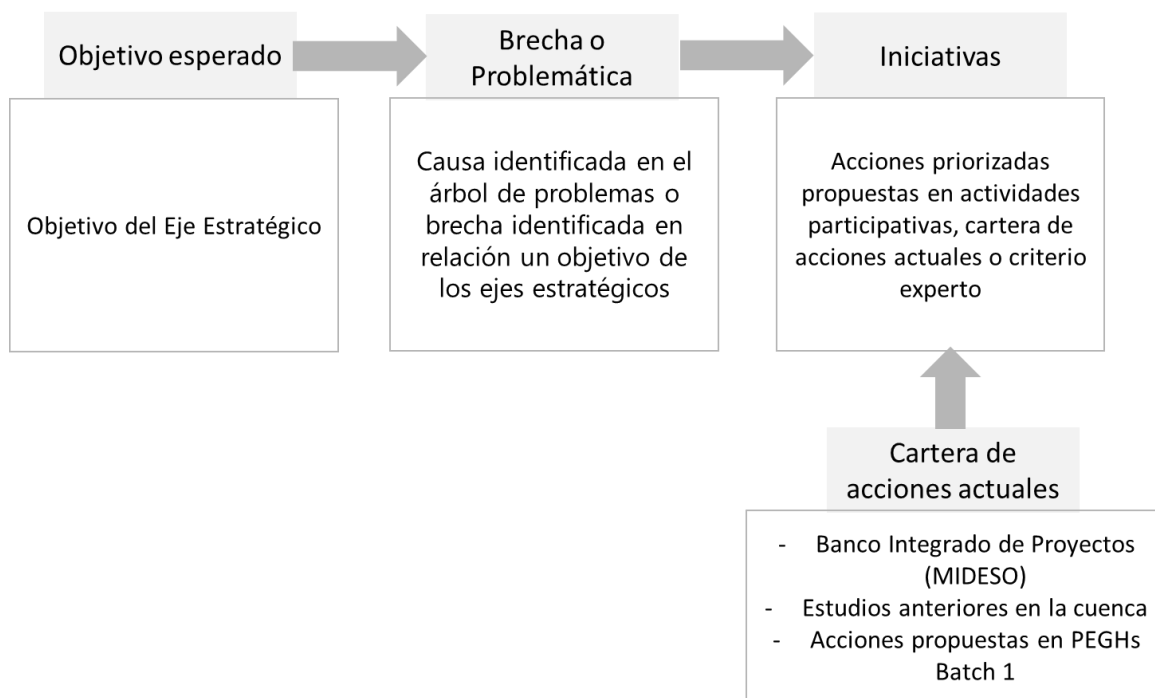


Figura 6-5. Relación Objetivo-Problema (brecha de síntesis)-Iniciativa

Fuente: Elaboración propia (2022).

Consecuentemente, del análisis se obtiene un listado de acciones posibles que aportan a la solución del problema central, según brecha/problemática hídrica y ejes estratégicos. A continuación, se presentan dichas acciones.

6.4 CATEGORIZACIÓN DE LAS ACCIONES DEL PLAN

Las posibles acciones catastradas para el valle de Azapa se clasificaron según tipología y temática -siguiendo las recomendaciones indicadas por DGA-. En la Tabla 6-2se identifican las categorías y seguidamente se describen las cuatro tipologías.

Tabla 6-2. Categorías de clasificación de las acciones catastradas

TIPOLOGÍA	TEMÁTICA
Obras hidráulicas (OH)	Obras mayores (embalses)
	Obras menores (riego, agua potable, defensa fluvial y red hidrométrica)
	Tecnificación y revestimiento

TIPOLOGÍA	TEMÁTICA
Medidas de gestión (MG)	Fortalecimiento y formalización de Organizaciones de Usuarios de Agua
	Capital humano
	Recuperación de acuíferos
	Gobernanza
	Sistemas de información
	Tecnologías habilitantes
Nuevas Fuentes (NF)	Desalinización
	Recarga de acuíferos
	Reúso aguas servidas
Otras medidas (OM)	Estudios y conocimiento de realidad hídrica

Finalmente, cada acción fue descrita en una ficha resumen con el contenido y la estructura mostrada en la Tabla 6-3. Para ello, los plazos de implementación se definieron como:

- Corto plazo (> 3 años);
- Mediano plazo (3-7 años); y
- Largo plazo (< 7 años).

Tabla 6-3. Estructura de 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	Temática de la acción	
	Características Generales	
	Tipología	
	Alcance	
	Beneficiarios directos	
	Situación de la acción	
	Horizonte	
	Tipo de financiamiento	
	Monto estimado VAC (UF)	
	Monto estimado CAE (UF)	
	Entidad(es) financiadora(s)	
	Entidad(es) responsable(s)	
	Iniciativa de referencia	
	Descripción de la acción y/o especificaciones técnicas	
Relación con Seguridad hídrica y cartera existente	Eje Estratégico de Seguridad hídrica	
	Subdimensión Seguridad hídrica	

	Relación con políticas y/o cartera de acciones actual
Observaciones	Requisitos habilitantes y/o comentarios adicionales
Indicadores	Indicadores de proceso
Ubicación	Ubicación de la acción

Fuente: Elaboración propia, 2022.

6.5 CARTERA DE ACCIONES

El análisis inicial de acciones e iniciativas de inversión pública relacionadas a la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río San José se realizó mediante múltiples fuentes de información. En primer lugar, se utilizaron estudios anteriores tales como CNR-Arrau (2016), DGA-ICASS (2017), DGA (1998). Además, se revisaron PEGH de otras cuencas que han sido desarrollados entre 2019 y 2022. Por último, se revisó la información disponible en el Banco Integrado de Proyectos del MIDESO, el que contiene información de distintos organismos públicos como la DGA, DOH; CNR, MMA, entre otros. Para el caso específico del BIP del MIDESO², se identificaron Estudios, Proyectos y Programas vinculados a recursos hídricos, energía y medio ambiente, para el periodo 2017-2023, tanto a nivel de cuenca, como de región e interregional.

Los resultados y análisis, a nivel de cuenca, se recopilan en el informe final, correspondiente al PEGH del acuífero del valle de Azapa. En el Anexo J.7 y Anexo J.8 se presentan las acciones e iniciativas recopiladas que sirvieron de base para el presente PEGH.

² Sitio web disponible: www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl

CAPÍTULO 7 CARTERA DE INICIATIVAS

La metodología utilizada para la evaluación de iniciativas a partir de una aproximación multicriterio se presenta a continuación. La metodología integra criterios ambientales, estratégicos, sociales y económicos.

7.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Gran parte de las iniciativas y acciones propuestas en el Plan de acción corresponden a medidas de gestión y gobernanza de las aguas, principalmente enfocadas a programas de mejoramiento y capacitaciones sobre el uso del recurso hídrico. Es importante resaltar que este tipo de acciones no siempre se le pueden atribuir beneficios directos o cuantificar las externalidades en su ejecución, a pesar de que contribuyen a obtener información de base o generar capacidades a los usuarios del agua, alineándose con los objetivos propios del PEGH. Es por ello por lo que, para tener un indicador económico comparable entre las iniciativas propuestas, se utilizó el Valor Actual de Costos (VAC) y Costo Anual Equivalente (CAE), ambos bajo el enfoque de costo eficiencia. Para el caso del VAC, cuando más de una acción compiten entre sí, el criterio de selección de la mejor alternativa es aquella que tenga menor VAC, es decir, que el valor actual de los costos de implementarla es menor a los beneficios sociales. El indicador se estima a partir de la siguiente ecuación, donde el costo social y la inversión inicial está basada en información referencial y supuestos:

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

donde,

VAC: Valor actual de los costos;

Ct: Costos sociales del proyecto,

Io: Inversión inicial;

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

T: Horizonte de evaluación del proyecto.

En el caso del CAE, la forma de estimación del indicador se resume en la siguiente ecuación, que se encuentra en función al VAC:

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

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.

Luego, se utilizaron los parámetros VAC y CAE, con el objetivo de dimensionar los costos totales y los costos en función del tiempo. Para efectos de la priorización de las iniciativas, el indicador económico contemplado es el CAE, categorizado como bajo, medio o alto, con una ponderación normalizada de 1; 0,67 y 0,33, respectivamente. La ponderación se considera inversamente proporcional al costo, esto es a mayor costo es menor la ponderación de priorización.

La evaluación de cada medida se presenta en el Anexo K.3, donde se indican los supuestos y referencias para determinar los elementos de costo y flujo de evaluación. Cabe destacar que la evaluación económica es una estimación y aproximación general al costo real de cada acción, el cual puede variar en la práctica en función del tiempo en que se ejecute y a la situación país al momento de llevarla a cabo, como también un análisis de ingeniería más detallado, siendo un primer acercamiento al costo total del Plan de acción.

7.2 EVALUACIÓN SOCIAL

La evaluación social se basa en el trabajo desarrollado en las actividades de Participación Ciudadana del presente estudio, desarrollado ampliamente en el Anexo I.

Esta evaluación considera la opinión de los actores de la cuenca respecto a la identificación de los problemas y brechas más relevantes para cada participante, frente a las soluciones que consideran oportunas y que aportan a la resolución de estas. De esta manera, la evaluación social consta de una priorización participativa con el objetivo de recoger las valoraciones de las y los agricultores y actores relevantes de la cuenca sobre las distintas propuestas de proyectos e iniciativas elaboradas por el equipo encargado del PEGH.

Para ello, se presentó el listado de iniciativas con su respectiva tipología y Eje estratégico de Seguridad hídrica que aborda, junto con una breve descripción y alcance que tiene (local, de cuenca, regional o nacional). Cada iniciativa fue valorada de 1 a 5, según la importancia en solucionar los problemas hídricos identificados en el valle. En total se realizaron cuatro talleres de priorización de acciones, totalizando más de 40 votos diferenciados en cinco tipos de actores: Servicios Públicos, directiva COMCA, APR, Empresas y Comunidad. A continuación, se detalla la escala original de priorización.

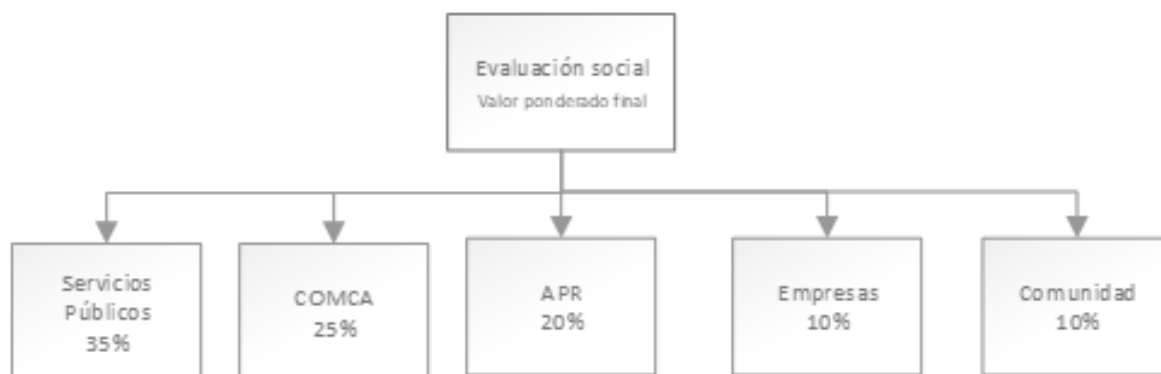
Tabla 7-1. Escala original de priorización utilizado en talleres participativos

Escala	Descripción de la escala
1	No aporta a la solución del problema
2	Aporta escasamente a la solución del problema
3	Aporta medianamente a la solución del problema
4	Aporta a la solución del problema
5	Aporta significativamente a la solución del problema

Fuente: Elaboración propia (2022).

Tomando como base la votación en la escala 1 a 5 en cada instancia participativa, el valor de priorización por actor se estimó a partir de la moda de los votos de los participantes, es decir, la puntuación que más se repitió fue el representativo del actor respectivo. Luego, el resultado de la evaluación social derivó de la normalización de los valores votados en el taller participativo, entre valores 0 y 1. Cabe destacar, que para esta valorización dependió del tipo de actor para ponderar el resultado final de la evaluación multicriterio, diferenciándose los cinco tipos de actores descritos anteriormente. Los servicios públicos tuvieron el mayor porcentaje de ponderación dado que representan el accionar público desde múltiples perspectivas (Figura 7-1). Sigue en peso la directiva de la COMCA, dado que representan, en sus palabras, a 1800 usuarios. Luego, las APR siguen en la ponderación por su relevancia para la seguridad hídrica para el consumo humano. Por último, las empresas y comunidades se les asignó un porcentaje menor de ponderación dado que no fue posible convocar a una mayor cantidad de participantes. Para más detalles de la metodología revisar el Anexo K.3.2.

Figura 7-1. Detalle de la construcción del valor ponderado final según tipo de actor para la evaluación social de las acciones.



Fuente: Elaboración propia (2022).

7.3 EVALUACIÓN AMBIENTAL

La evaluación ambiental recoge los aspectos principales en materia medioambiental del proyecto propuesto. Estos se han definido en un indicador de evaluación relativo al impacto en la protección y conservación de los recursos, en cuanto a los beneficios ambientales positivos de la acción, y en un indicador sobre la pertinencia de ingreso al SEIA por: 1) altera sistemas de vida y costumbres de la población, 2) requerir la relocalización de comunidades y/o 3) afectar el valor paisajístico, en relación con los impactos negativos sobre el medio ambiente. Ambas variables evaluadas fueron definidas por criterio experto del equipo elaborador.

La escala de puntuación del primer criterio, sobre la generación de beneficios o potenciales impactos positivos, se valoriza entre 1, 0,5 y 0, que corresponde a un impacto positivo directo, indirecto o sin impactos beneficiosos, respectivamente. En cuanto al indicador de pertinencia de ingreso al SEIA, este se valoriza en 0 o 1, donde 0 indica que no requiere ingresar al SEIA y 1 que si requiere ingresar.

7.4 EVALUACIÓN ESTRATÉGICA

La evaluación estratégica consiste en el impacto que las medidas propuestas generan en el acceso del recurso hídrico, en cuanto a la calidad, cantidad y gestión de la organización que se encarga de ello. De esta manera, se definen dos criterios para esta evaluación: 1) el aporte de las iniciativas para abordar las problemáticas de escasez y/o calidad de las aguas, considerando los factores de tecnología, captación, reducción de pérdidas, gestión del recurso y calidad del recurso, y 2) el mejoramiento en la organización de los usuarios de aguas subterránea.

La valoración del primer criterio va de 1 a 0, donde 1 corresponde a que la iniciativa aporta en tres o más factores en el grado de escasez o calidad de las aguas del valle, y 0 que no aporta a ningún factor, con la opción de evaluar con 0.67 y 0.33 si aporta parcialmente al criterio. Sobre las medidas que apuntan a mejorar la organización de los usuarios de aguas subterráneas, se evaluó con 1 si aporta directamente a este criterio, 0.5 si aporta indirectamente y 0 si es que la acción no aporta a este objetivo.

En el Anexo K.4 se encuentra el detalle metodológico de la evaluación estratégica.

7.5 EVALUACIÓN DE BALANCE

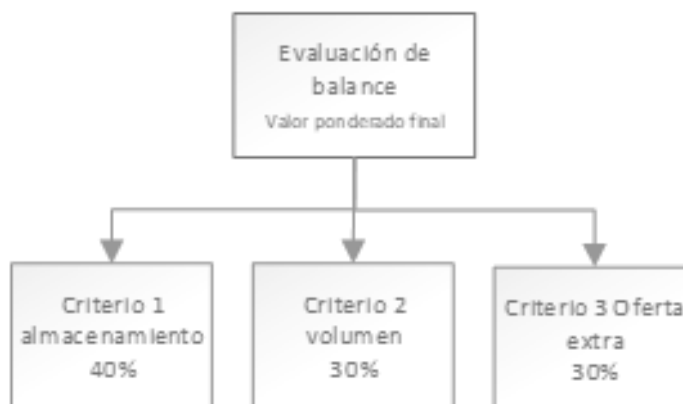
La evaluación de balance consiste en incluir como criterio de decisión los resultados de modelación para priorizar entre aquellas acciones o iniciativas que tengan un escenario de gestión asociado en la sección 5.3 del informe central del PEGH. De esta manera, se definen tres subcriterios de balance, donde se evalúa si la acción propuesta mejora o empeora la situación del acuífero al ejecutar la simulación integrada entre aguas superficiales y subterráneas, en relación con: 1) cambios en el almacenamiento o balance del acuífero, 2) cambios en el volumen del acuífero, y 3) cambios en las entradas de agua, sin considerar entradas por intrusión marina. En todos los criterios se utiliza el promedio futuro del escenario de gestión simulado (2018-2050) para compararlo con el escenario base promedio futuro (2018-2050).

La valoración del primer criterio busca priorizar iniciativas que mejoren o aporten a disminuir el balance negativo del acuífero (delta de almacenamiento), asignando un valor de 0 para aquellas medidas que empeoren el balance, de 0,33 a las iniciativas que mantengan el balance, de 0,66 a aquellas medidas que mejoren el balance, pero aún lo mantengan negativo, y de 1 para aquellas medidas que mejoren el balance y quede positivo.

En el segundo criterio, se asignaron tres niveles para priorizar aquellas iniciativas que aporten a mejorar el volumen almacenado de agua en el acuífero. El primero, para aquellas medidas que no mejoren el volumen (0). El segundo, para aquellas medidas que mejoren el balance en menos de un 10% (0,5), mientras que el tercero, para aquellas medidas que mejoren el volumen en más de un 10% (1).

Por último, el tercer criterio, busca priorizar iniciativas que incrementen las entradas de agua al acuífero, sin considerar las entradas por intrusión marina (según el modelo). Para aquellas medidas que disminuyan entrada promedio de agua (0), las que aumentan en un 10% o menos (0,5), y de 1 para aquellas medidas que aumentan sobre un 10% las entradas de agua. En la Figura 7-3 se presenta la ponderación de cada criterio para la estimación del valor ponderado final de la evaluación de balance.

Figura 7-2. Detalle de la construcción del valor ponderado final según tipo de actor para la evaluación de balance de las acciones con escenario de gestión simulado.



Fuente: Elaboración propia (2022).

En el Anexo K.4 se encuentra el detalle metodológico de la evaluación de cada criterio de balance y los resultados de cada uno.

7.6 PRIORIZACIÓN DE LAS ACCIONES Y DEFINICIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN

La priorización de las iniciativas busca definir una planificación para la implementación del plan de acción de acuerdo con el orden de prioridad de cada una de las medidas, acorde a los objetivos del PEGH y la seguridad hídrica, considerando la caracterización de la cuenca (en sus diferentes dimensiones), el proceso participativo en toda la preparación del plan, y el criterio experto del equipo elaborador, involucrado en ambas instancias.

Esta priorización es de gran relevancia ya que atiende a una secuencia estratégica de planificación, en el horizonte previsto como corto, mediano y largo plazo, integrando la evaluación y validación de los actores clave de la cuenca con las implicancias económicas y ambientales que conlleva la implementación del PEGH, considerando el impacto en el acceso al recurso y los costos y riesgos asociados a cada iniciativa. De este modo, se configura una priorización integral basada en la metodología de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones.

Esta metodología busca, en este caso, aportar con la comparación de iniciativas de gestión, obras hidráulicas, estudios y nuevas fuentes. En síntesis, es posible delimitar seis pasos generales.

1. Identificar iniciativas a ser evaluadas: A partir de las actividades participativas, revisión bibliográfica, modelación y la opinión experta, se delimitan las acciones o iniciativas a priorizar y comparar entre sí.
2. Identificar criterios y objetivos: Luego de tener las iniciativas seleccionadas, se procedió a identificar criterios de decisión, en función del objetivo del estudio. En este caso, se seleccionaron cuatro criterios generales: Social, Ambiental, Económico y Estratégico.

3. Determinar variables/indicadores a considerar por cada criterio: A partir de los criterios anteriores, se seleccionaron variables cuantificables para determinar el valor de cada criterio. En cada criterio se identificaron un numero diverso de indicadores, las que se detallan en el Anexo K.4 y en la Tabla 7-2.
4. Asignar pesos: Luego, cada variable y criterio debe contar con un peso. En este caso, todos los pesos de los criterios y variables fueron asignados por criterio experto. De esta forma, se aproxima a la importancia relativa de cada criterio en la priorización final.
5. Normalizar variables: todas las variables fueron normalizadas entre 0 y 1, de modo de poder hacer comparativa las variables de distintos orígenes. En su mayoría se asignaron tres niveles (alto, medio y bajo), siendo el nivel de mayor importancia el correspondiente a 1. Por tanto, las variables que tengan valores más cercanos a 1 son aquellas con mayor importancia relativa.
6. Ponderar las distintas opciones según ponderadores (pesos) y valores finales: Finalmente, se obtiene el valor global de priorización, en base al método de combinación utilizado. En este caso, se utilizó la ponderación aditiva simple, donde cada criterio y variable se pondera de forma lineal y se adicionan para obtener el criterio global. La ecuación representativa del método se presenta a continuación:

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

Donde u_i corresponde a la suma ponderada de cada criterio w_j y pesos o ponderaciones relativas r_{ij} . Esta fórmula se aplica para obtener el valor final del criterio (ponderado cada variable) y luego para obtener el valor global de priorización, donde las acciones con mayor valor de u_i corresponden a aquellas más prioritarias.

Tabla 7-2. Resumen de subcriterios, indicadores y sus valores posibles para el ejercicio de priorización de acciones en base a cinco criterios de decisión.

	Criterio	Subcriterio	Descripción	Descripción del Indicador	Valores de indicador
Valor Global de Priorización [0-1]	Económico	Tiempo de la inversión	Busca priorizar iniciativas que minimicen el tiempo de retorno de la inversión, esto es que den cuenta de resultados en el menor tiempo posible	Indicador que valoriza la iniciativa de forma inversa al N° de años en que logra sus productos o resultados. Se valoriza de forma fija por tramos de 2 años	5-6 o más años en lograr resultados = 0,33 3-4 años en lograr resultados = 0,66 1-2 años en lograr resultados = 1,00
		Escala de inversión	Busca priorizar las acciones menos costosas de implementar en términos económicos	Indicador que considera que tan costoso será desarrollar cada acción de acuerdo con una escala de priorización del indicador económico CAE	Rango 3 [valor máximo del CAE a 70% del valor máximo del CAE] = 0,33 Rango 2 [70% del valor máximo del CAE - mediana del CAE] = 0,67 Rango 1 [mediana del CAE - valor mínimo del CAE] = 1

	Criterio	Subcriterio	Descripción	Descripción del Indicador	Valores de indicador
	Estratégico	Grado de escasez o calidad de aguas	Busca priorizar iniciativas que aborden las problemáticas de escasez y/o calidad de las aguas por ser problemáticas de interés común.	<p>El indicador valoriza si las iniciativas abordan los factores relacionados a problemas de escasez y/o calidad de las aguas, asignándoles un valor de acuerdo con la presencia/ausencia de éstos. Por lo tanto, el valor final se determina por la presencia de algunos de estos factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Tecnologías para mejorar la eficiencia en el uso de agua - Capacitación para el uso eficiente del agua - Reducción de pérdidas en el uso del agua - Gestión del recurso a nivel de cuenca - Calidad del recurso 	<p>Aporta en 3 o más factores = 1</p> <p>Aporta en 2 factores = 0,67</p> <p>Aporta en 1 factor = 0,33</p> <p>No aporta en ningún factor = 0</p>
		Nivel organizacional	Busca priorizar iniciativas que generan algún tipo de mejora en la organización de los usuarios de aguas subterráneas	El indicador valoriza si la iniciativa aporta directa o indirectamente a una mejor gestión organizacional de los usuarios de aguas subterráneas principalmente. Para esto, se asume una escala de razón de la clasificación cualitativa para asignar un valor a cada nivel.	<p>Aporta Directamente: 1</p> <p>Aporta Indirectamente: 0,5</p> <p>No aporta: 0</p>

	Criterio	Subcriterio	Descripción	Descripción del Indicador	Valores de indicador
	Social	Valoración Organismos Públicos	Busca priorizar aquellas iniciativas que obtuvieron los mayores puntajes de priorización en una escala del 1 al 5 por parte de los profesionales y autoridades de los Servicios Públicos de la región de Arica y Parinacota	El indicador valoriza si las acciones son prioritarias en función si aportan de forma significativa o no a la solución del problema central del acuífero del valle de Azapa relativo al aumento sostenido de la escasez de agua subterránea actual y sus proyecciones futuras, de acuerdo a las votaciones en los Talleres 2 del proceso participativo. El valor final de la priorización de los organismos públicos resulta de la moda de valores, es decir, el valor más repetido dentro de las votaciones.	No aporta a la solución del problema = 0,2
		Valoración COMCA	Busca priorizar aquellas iniciativas que obtuvieron los mayores puntajes de priorización en una escala del 1 al 5 por parte de la directiva de la COMCA		Aporta escasamente a la solución del problema = 0,4
		Valoración APR	Busca priorizar aquellas iniciativas que obtuvieron los mayores puntajes de priorización en una escala del 1 al 5 por parte de representantes de las APR del valle de Azapa		Aporta medianamente a la solución del problema = 0,6
		Valoración Comunidad	Busca priorizar aquellas iniciativas que obtuvieron los mayores puntajes de priorización en una escala del 1 al 5 por parte de miembros de la comunidad del valle de Azapa		Aporta a la solución del problema = 0,8
					Aporta significativamente a la solución del problema = 1

	Criterio	Subcriterio	Descripción	Descripción del Indicador	Valores de indicador
		Valoración Empresas	Busca priorizar aquellas iniciativas que obtuvieron los mayores puntajes de priorización en una escala del 1 al 5 por parte de los profesionales y representantes de empresas del valle de Azapa		
	Ambiental	Beneficios ambientales o potenciales impactos ambientales positivos	Busca priorizar aquellas iniciativas que puedan generar impactos positivos en el medio ambiente. [ej. estudios para mejorar la calidad de aguas, programas de uso eficiente del agua, entre otros].	El indicador valoriza los impactos positivos que la iniciativa genera en el medio ambiente, ya sea directa o indirectamente. Esto último se define de acuerdo con si la iniciativa contempla estos impactos positivos explícitamente en sus objetivos o resultados, en cuyo caso es un impacto directo, o bien, aunque no aparece explícito en la iniciativa es posible inferirlo (indirecto). El valor es fijo para cada condición	Impacta Directamente = 1 Impacta Indirectamente: = 0,5 No genera impactos positivos = 0

	Criterio	Subcriterio	Descripción	Descripción del Indicador	Valores de indicador
		Requerimiento de ingreso al SEIA	Busca priorizar aquellas iniciativas que no requieran alterar significativamente sistemas de vida y costumbres de la población o relocalización de comunidades humanas para su instalación y/o desarrollo, es decir, que no deban entrar al SEIA, dado que implicaría mayores plazos e impactos potenciales negativos.	<p>El indicador disminuye la valoración de la iniciativa en la medida que afecte a alguno de los aspectos a señalar. Esto será evaluado según las definiciones contenidas en el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) (DTO40 12-AGO-2013).</p> <p>De este modo se evaluará si la iniciativa como resultado de sus principales obras y acciones para sus distintas etapas (construcción, operación y cierre) requiere ingreso al SEIA por: 1) Altera sistemas de vida y costumbres de la población, 2) Requiere la relocalización de comunidades, 3) afecta el valor paisajístico</p>	<p>Requiere ingreso al SEIA = 0</p> <p>No requiere ingreso al SEIA = 1</p>
	Balance	Cambios en almacenamiento subterráneo	Busca priorizar iniciativas que mejoren o aporten a disminuir el balance negativo del acuífero (delta de almacenamiento)	<p>El indicador se relaciona con el cambio en el almacenamiento de agua subterránea producto del balance entre la oferta y la demanda simulada promedio futuro 2018-2050 en el escenario base. Se asigna una escala cualitativa de cuatro niveles, donde la menor ponderación es para aquellas iniciativas que no permitan mantener o mejorar el balance, y la mayor es para aquellas que permitan mejorar el balance y tornarlo positivo.</p>	<p>Empeora el balance = 0</p> <p>Mantiene el balance = 0,33</p> <p>Mejora el balance, pero aún negativo = 0,66</p> <p>Mejora el balance y lo pone positivo = 1</p>

	Criterio	Subcriterio	Descripción	Descripción del Indicador	Valores de indicador
		Cambios en el volumen del acuífero	Busca priorizar aquellas iniciativas que aporten a mejorar el volumen almacenado de agua en el acuífero	El indicador se relaciona con el cambio en el volumen de agua almacenada en el acuífero según el volumen promedio futuro 2018-2050 en el escenario base. Se asigna una escala cualitativa de tres niveles, donde el menor nivel es para aquellas iniciativas que no permiten mejorar el volumen almacenado, y la mayor es para aquellas iniciativas que permiten mejorar el volumen en más de un 10% en relación con el escenario base.	No mejora el volumen = 0 Mejora en menos de un 10% el volumen = 0,5 Mejora en más de un 10% = 1,0
		Cambios en las entradas de agua	Busca priorizar iniciativas que incrementen las entradas de agua al acuífero, sin considerar los aportes por intrusión marina	El indicador se relaciona con la mejora en las entradas de agua al acuífero en relación con el promedio futuro 2018-2050 de entradas en el escenario base. Las entradas no consideran las entradas desde el mar. Se asigna una escala cualitativa de tres niveles, siendo el mayor el aumento de un más del 10% de las entradas al acuífero.	Disminuye entrada promedio de agua = 0 Aumenta en un 10% o menos = 0,5 Aumenta sobre un 10% = 1

Obtenida la priorización, los resultados se deben interpretar como una primera aproximación a la prioridad de acciones a implementar en el territorio bajo estudio. Por tanto, esta aproximación puede ser complejizada de acuerdo con la opinión de más actores para incorporar más criterios, más variables y asignar distintos pesos a la decisión final.

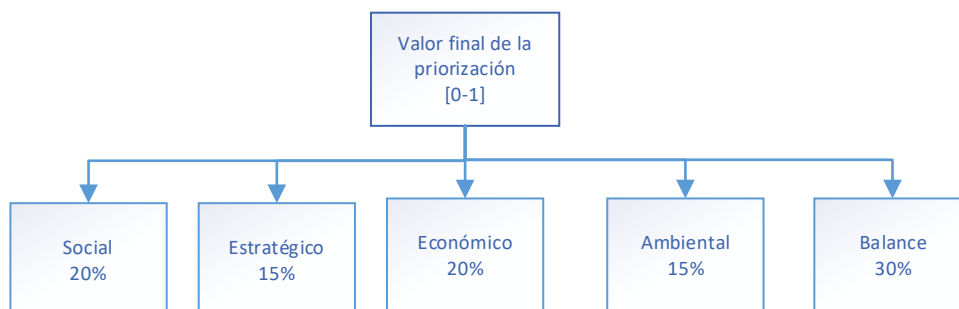
Cada uno de los factores a evaluar presentan una ponderación diferente para el resultado final de la priorización, de acuerdo con el criterio experto del equipo consultor (Figura 7-3). Además, para efectos de vincular el plan de acción con el balance del modelo integrado, se realizó un segundo ejercicio de priorización, solo con las acciones que poseen escenarios de gestión modelados (Figura 7-4). Cabe destacar que para la primera priorización (sin el criterio de balance) se realizó el ejercicio omitiendo a aquellas acciones que fueron priorizadas con el criterio de balance. Aquellas iniciativas con mayor puntaje son las que resultan prioritarias, lo que permite tener un orden referencial para orientar los esfuerzos requeridos para el Plan. Es recomendable que los pesos y criterios sean definidos en un proceso participativo más amplio o en una mesa de trabajo dentro del comité de coordinación regional propuesto.

Figura 7-3. Esquema de priorización resumen para la construcción del valor ponderado final.



Fuente: Elaboración propia (2022).

Figura 7-4. Esquema de priorización resumen para la construcción del valor ponderado final con criterio balance.



Fuente: Elaboración propia (2022).

CAPÍTULO 8 IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

La implementación del plan contiene los principales hitos, la estrategia para su implementación, una propuesta de estrategia comunicacional y una breve revisión de la identificación de fuentes de financiamiento. Cada iniciativa identificada detallada en las fichas de acciones (Anexo K.2) detalla la entidad responsable y financiadora del plan, desde donde se desprenden los principales actores involucrados en la gobernanza del PEGH.

CAPÍTULO 9 MONITOREO Y SEGUIMIENTO DEL PLAN

Los indicadores presentan de una forma medible y específica aspectos para hacer seguimiento, de distintas formas, a la ejecución del plan y el estado de la Seguridad Hídrica en la cuenca. Consiguientemente, se proponen tres tipos de indicadores para estimar el monitoreo y seguimiento de la implementación del PEGH del acuífero del valle de Azapa:

- **Indicadores de Impacto:** Metodología descrita en Anexo K.5
- **Indicadores de Proceso:** Metodología descrita en Anexo K.2.
- **Indicadores de seguimiento:** Descritos en el informe principal del PEGH sección 9.1.4.

A su vez, para aumentar la accesibilidad a la información en la cuenca, para cada eje estratégico del PEGH del acuífero del valle de Azapa se realizó una pesquisa de posibles fuentes de información que provean datos que aumenten la certidumbre sobre la realidad hídrica en la cuenca.