



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

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS TERRITORIAL**

S.I.T. N°496

Santiago, ABRIL 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Arquitecto Sr. Juan Carlos García Pérez de Arce

Director General de Aguas (S)
Ingeniero Civil Sr. Cristian Núñez Riveros

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Mauricio Lorca Miranda

Inspectora Fiscal
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

Inspectora Fiscal Subrogante 1
Ingeniera Civil Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal Subrogante 2
Administrador Público Alejandro Peña Troncoso

UNIVERSIDAD DE CHILE, LABORATORIO DE ANÁLISIS TERRITORIAL (LAT)

Jefe de Proyecto
Ingeniero Agrónomo, Dr. Rodrigo Fuster G.

Coordinador de proyecto
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, MSc. José Miguel Valdés N.

Especialistas
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, MSc. Hilda Moya Jofré.
Ingeniero Civil, Dr. Cristián Chadwick Irrarrázaval.
Ingeniera Civil, PhD. Pilar Barría Sandoval
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Karla Astorga Vega

Profesionales Complementarios

Geógrafo, Carlos Gasca Guíñez
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Tomás Amézquita Toledo
Antropóloga Social Paula Carrasco Aguilera
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Paloma Escobar Jiménez
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, MSc. Ana Karina Palacios Q
Licenciada en Ciencias de los Recursos Naturales, Macarena Salinas Camus
Licenciada en Ciencias de los Recursos Naturales, Catalina Espinoza Saavedra
Licenciada en Ciencias de los Recursos Naturales, Consuelo de Camino Apablaza

CONTENIDO

Resumen Ejecutivo	1
1. Introducción y Objetivos del estudio	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos	7
2. Caracterización de la Cuenca	8
2.1 Área de estudio	8
2.2 Dimensión política administrativa	10
2.2.1 División política administrativa	10
2.2.2 Demografía	12
2.2.3 Actividades económicas	12
2.3 Dimensión Física	14
2.3.1 Geomorfología	14
2.3.2 Geología	17
2.3.3 Suelos	19
2.3.4 Hidrología	19
2.3.5 Hidrogeología	22
2.4 Clima	25
2.4.1 Caracterización climática	26
2.4.2 Eventos extremos y variabilidad climática	35
2.4.3 Escenarios de cambio climático	39
2.5 Dimensión Ambiental	40
2.5.1 Unidades ecosistémicas	40
2.5.2 Áreas silvestres protegidas y otras figuras de conservación	43
2.6 Infraestructura Hídrica	46
2.6.1 Obras hidráulicas	46
2.6.2 Pozos	49
2.6.3 Agua potable y PTAS	51
2.6.4 Central hidroeléctrica	53
2.6.5 Redes de monitoreo de aguas	55

2.7	Nuevas Fuentes	58
2.7.1	Embalses	58
2.7.2	Desalación	59
2.7.3	Uso de aguas servidas tratadas y recarga de acuíferos	59
2.8	Gobernanza del agua a nivel de cuencas	60
2.8.1	Mapa de agentes	61
2.8.2	Sociograma	64
2.8.3	Brechas de coordinación	65
2.8.4	Brechas de información	67
3.	Demanda Física y Legal de agua para diferentes usos	69
3.1	Demanda actual y proyectada de agua	69
3.1.1	Consumo Humano urbano y rural	70
3.1.2	Agrícola	77
3.1.3	Industrial y Pecuario	89
3.1.4	Resumen de demandas	90
3.1.5	Brechas de información de demanda	94
3.2	Derechos de Aprovechamiento de Aguas	94
3.3	Mercado de Aguas	95
3.3.1	Evolución histórica	95
3.3.2	Valor del DAA	98
4.	Oferta Hídrica superficial y subterránea	101
4.1	Aguas Superficiales	101
4.1.1	Identificación de fuentes superficiales	101
4.1.2	División administrativa	101
4.1.3	Restricciones de uso	106
4.1.4	Oferta en la fuente superficial	106
4.1.5	Oferta proyectada en la fuente superficial	114
4.1.6	Calidad de aguas	118
4.1.7	Derechos concedidos	124
4.2	Aguas Subterráneas	126
4.2.1	Identificación de fuentes subterráneas	126
4.2.2	División administrativa	127

4.2.3	Restricciones al uso: zona de prohibición de aguas subterráneas	131
4.2.4	Stock y recarga actual	131
4.2.5	Calidad de aguas	136
4.2.6	Derechos concedidos	144
4.3	Brechas de información de Oferta	147
5.	Balance de Agua	150
5.1	Modelos de Simulación	150
5.1.1	Descripción del modelo elaborado	152
5.1.2	Escenarios de cambio climático	166
5.1.3	Balance de agua. Situación histórica (1986-2018)	167
5.1.4	Balance de Agua. Situación Proyectada	169
5.2	Brechas hídricas de demanda	175
5.2.1	Brechas de agua para consumo de Agua Potable Urbano	175
5.2.2	Brechas de agua para consumo de Agua Potable Rural	176
5.2.3	Brechas de agua para uso agrícola	180
5.3	Escenarios de Gestión	181
5.3.1	Escenario 1 (E-1): Gestión y Mitigación – CAS	182
5.3.2	Escenario 2 (E-2): Planta Desaladora Agua de Mar	185
5.3.3	Escenario 3 (E-3): Embalse Livilcar	189
5.3.4	Escenario 4 (E-4): Barreras de Goma para infiltración hacia el acuífero (Recarga Artificial)	191
5.3.5	Escenario 5 (E-5): Reúso de Aguas Servidas	193
5.3.6	Comparación de Escenarios	195
5.3.7	Unión de Escenarios (E-6): Instalación de Planta Desaladora y Planta de Tratamiento de Aguas Servidas	199
5.4	Análisis de Sustentabilidad	201
5.5	Brechas y mejoras a la modelación	204
6.	Acciones	209
6.1	Seguridad Hídrica para el acuífero del valle de Azapa	209
6.2	Árbol de problemas y tipología de acciones	211
6.3	Obras Hidráulicas	216
6.3.1	Obras mayores	216
6.3.2	Obras menores	217

6.3.3	Tecnificación y revestimientos	221
6.4	Medidas de Gestión	222
6.4.1	Fortalecimiento y Formalización de las Organizaciones de Usuarios	222
6.4.2	Capital Humano	224
6.4.3	Recuperación de acuíferos	227
6.4.4	Gobernanza	227
6.4.5	Sistemas de información	229
6.4.6	Tecnologías habilitantes	231
6.5	Nuevas Fuentes de Agua	232
6.5.1	Desalinización	232
6.5.2	Acuíferos profundos	233
6.5.3	Recarga de acuíferos	233
6.5.4	Uso aguas servidas tratadas	233
6.6	Otras Medidas	234
6.6.1	Generación de estudios, informes y diagnósticos para la gestión hídrica	235
7.	Cartera de Iniciativas propuestas	240
7.1	Síntesis de la Selección de Alternativas	240
7.2	Evaluación de las Iniciativas	245
7.2.1	Evaluación económica	245
7.2.2	Evaluación social	247
7.2.3	Evaluación ambiental	249
7.2.4	Evaluación estratégica	249
7.2.5	Priorización de las medidas según líneas de acción	250
7.2.6	Evaluación Balance	253
7.2.7	Priorización de las medidas con resultados de balance según líneas de acción	253
7.3	Valorización económica del Plan Estratégico de Gestión Hídrica	255
7.3.1	Acciones según ejecutor o institución responsable	255
7.3.2	Acciones ejecutadas por otras instituciones	256
7.3.3	Distribución de costos por actores	257
7.4	Cronograma de Soluciones	259
8.	Implementación del Plan	261

8.1	Implementación por ejes estratégicos del Plan	261
8.1.1	Seguridad Hídrica para el consumo humano	261
8.1.2	Seguridad Hídrica para las actividades productivas	263
8.1.3	Seguridad Hídrica para los ecosistemas	264
8.1.4	Seguridad Hídrica ante eventos extremos y contaminación	265
8.1.5	Balance Hídrico	265
8.1.6	Gobernanza	266
8.1.7	Disponibilidad de Información	268
8.2	Hitos de referencia en la implementación del Plan	269
8.2.1	Corto plazo	269
8.2.2	Mediano plazo	270
8.2.3	Largo plazo	270
8.3	Sistema de gobernanza para la implementación	270
8.3.1	Estructura de Gobernanza	270
8.3.2	Proceso de Gobernanza	273
8.4	Estrategia de Comunicación	274
8.4.1	Comunicación y difusión del PEGH en fases posteriores	274
8.4.2	Comunicación y difusión durante la actualización del estudio	276
8.5	Identificación de fuentes de financiamiento	276
9.	Monitoreo y Evaluación del Plan	278
9.1	Plan de monitoreo	278
9.1.1	Indicadores para el PEGH del acuífero del valle de Azapa	279
9.2	Mecanismos para el análisis y toma de decisiones	283
10.	Consideraciones finales	285
11.	Anexos Digitales	288

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Superficie de la cuenca del río San José respecto a comunas.	10
Tabla 2-2. Clasificación climas de Köppen en la cuenca del río San José.	27
Tabla 2-3. Frecuencia de eventos extremos en las comunas de la cuenca del río San José.	35
Tabla 2-4. Listado de GCM utilizados para la construcción del escenario de cambio climático.	39
Tabla 2-5. Tasas de cambio proyectadas al año 2050 para la precipitación promedio anual en la zona de influencia de la cuenca Azapa Alto.....	40
Tabla 2-6. Pisos vegetacionales presentes en la cuenca del río San José.	41
Tabla 2-7. Estaciones meteorológicas de la red DGA en la cuenca del río San José.	55
Tabla 2-8. Estaciones fluviométricas DGA con información disponible.	56
Tabla 3-1. Demandas de agua potable Cuenca de Azapa Alto.	75
Tabla 3-2. Demanda de agua potable rural en localidades de la subcuenca del río San José.	76
Tabla 3-3. Sectores o localidades por zona de riego.	81
Tabla 3-4. Área con frutales por cada zona de riego (año 2018).	83
Tabla 3-5. Resumen demanda de agua estimadas por actividades industriales en la cuenca del río San José para el año 2018.	89
Tabla 3-6. Resumen demandas promedio (L/s y Hm ³ /año) estimadas en estudio DGA-DICTUC (2020), diferenciando por subcuenca y tipo de uso.	91
Tabla 3-7. Resumen demandas (Hm ³ /año) al 2018 y proyectadas según estudio DGA-DICTUC (2020), diferenciando por subcuenca y tipo de uso.	92
Tabla 3-8. Número de derechos y caudal por uso declarado y naturaleza del derecho, según el CPA al año 2020.	95
Tabla 3-9. Número de derechos transados entre 1990 y 2020 según naturaleza (superficial y subterránea).	96
Tabla 3-10. Número de derechos transados entre 1990 y 2020 según ejercicio del derecho.	97
Tabla 3-11. Número de derechos transados entre 1990 y 2020 según tipo (consuntivo, no consuntivo).....	97
Tabla 3-12. Resumen de resultados de DAA depurados incrementalmente por criterios.	98
Tabla 3-13. Resumen de transacciones depuradas diferenciando por naturaleza y ejercicio del derecho.....	99
Tabla 3-14. Resumen de estadígrafos de tendencia central y de dispersión estimados para la base de datos depurada de transacciones de DAA.	100
Tabla 4-1. Oferta promedio Anual en subcuenca Azapa Alto (1986-2018).	109

Tabla 4-2. Oferta promedio Anual en subcuenca río San José (1986-2018).	112
Tabla 4-3. Oferta superficial proyectada en subcuenca Azapa Alto.	115
Tabla 4-4. Oferta superficial proyectada en subcuenca río San José.	117
Tabla 4-5. Resumen de DAA superficiales otorgados para distintos ejercicios del derecho y con su respectivo caudal ubicados en la cuenca del río San José al 2020.	124
Tabla 4-6. División de Sectores Hidrogeológicos de modelación para el valle de Azapa.	128
Tabla 4-7. Recargas promedio del acuífero en el periodo histórico (1986-2018).	133
Tabla 4-8. Recargas promedio del acuífero en el periodo futuro (2020-2050).	135
Tabla 4-9. Categorías Índice de Calidad de Agua.	143
Tabla 4-10. Índice de Calidad de Agua por Parámetro y por pozo.	144
Tabla 4-11. Resumen de DAA subterráneos otorgados para distintos ejercicios del derecho y con su respectivo caudal ubicados en el acuífero del valle de Azapa al 2020.	145
Tabla 5-1. Indicadores de ajuste para la calibración del modelo superficial WEAP Azapa Alto.	158
Tabla 5-2. Indicadores de ajuste para la calibración del modelo acoplado WEAP valle de Azapa, sector superficial.	159
Tabla 5-3. Indicadores de ajuste de la calibración del modelo acoplado WEAP valle de Azapa, sector subterráneo.	159
Tabla 5-4. Balance Hidrogeológico del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Histórico (1986-2018).	168
Tabla 5-5. Balance Hidrogeológico del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro (2020-2050).	170
Tabla 5-6. Balance Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro ante una disminución del 50% del caudal del Canal Lauca.	173
Tabla 5-7. Balance Hidrogeológico del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro ante una disminución del 50% del caudal del Canal Lauca.	174
Tabla 5-8. Brecha Hídrica para demanda de APU en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).	176
Tabla 5-9. Brecha Hídrica para demanda de APR en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).	177
Tabla 5-10. Brecha Hídrica para demanda de APR y Población en sectores Rurales en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).	179
Tabla 5-11. Brecha Hídrica para demanda Agrícola en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).	181
Tabla 5-12. Balance Hidrogeológico de escenarios de gestión y mitigación ante el descenso de volumen en el acuífero del valle de Azapa.	197

Tabla 5-13. Resumen de brechas hídricas (Hm ³) por cada escenario de gestión para el acuífero del valle de Azapa.	198
Tabla 5-14. Demanda Requerida versus Demanda Entregada para consumo de producción Agrícola en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).....	202
Tabla 5-15. Resultado criterio interferencia río acuífero para el SHAC del acuífero del valle de Azapa, para los distintos escenarios de gestión.	203
Tabla 5-16. Resultado criterio satisfacción de la demanda para el SHAC del acuífero del valle de Azapa, para los distintos escenarios de gestión.....	204
Tabla 6-1. Tipologías y temáticas de clasificación de las posibles acciones a realizar en el valle de Azapa.....	215
Tabla 7-1. Síntesis de acciones por Eje Estratégico, detallando la tipología, objetivo y brecha síntesis asociada.	241
Tabla 7-2. Resumen de evaluación económica de iniciativas.....	245
Tabla 7-3. Resumen de evaluación social de las iniciativas.....	248
Tabla 7-4. Resultado de priorización de iniciativas sin balance hídrico según evaluación multicriterio.	251
Tabla 7-5. Resultado de priorización de iniciativas con balance hídrico según evaluación multicriterio.	254
Tabla 7-6. Iniciativas ejecutadas por DGA.....	256
Tabla 7-7. Iniciativas ejecutadas por otras instituciones.	256
Tabla 7-8. Distribución de costos según responsable.	257
Tabla 9-1. Indicadores de Impacto del PEGH del acuífero del valle de Azapa.	280
Tabla 9-2. Seguimiento del PEGH del acuífero del valle de Azapa.....	283

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Área de estudio, correspondiente al acuífero del valle de Azapa, el que se encuentra contenido dentro de la cuenca del río San José, en la Región de Arica y Parinacota	9
Figura 2-2. División político-administrativa y localidades en torno al acuífero del valle de Azapa.	11
Figura 2-3. Mapa geomorfológico de la cuenca del valle de Azapa.	15
Figura 2-4. Curva hipsométrica subcuenca del río San José.....	16
Figura 2-5. Curva hipsométrica subcuenca Azapa Alto.	16
Figura 2-6. Mapa geológico de la cuenca del valle de Azapa.	18
Figura 2-7. Caudal observado en estación fluviométrica río Ticnamar en Ticnamar	20
Figura 2-8. Caudal observado en estación fluviométrica río San José en Ausipar.	20
Figura 2-9. Fuentes superficiales en las subcuencas Azapa Alto y río San José.	21
Figura 2-10. Perfil Longitudinal del valle de Azapa.	23
Figura 2-11. Unidades de importancia hidrogeológica de la cuenca del río San José.	25
Figura 2-12. Distribución de climas de Köppen en la cuenca del río San José.....	28
Figura 2-13. Precipitación mensual observada en la estación Meteorológica Ticnamar Codigo BNA 01300008-5 Altitud 3.230 m.s.n.m. (1986-2016).	29
Figura 2-14. Diagrama ombrotérmico representativo con precipitación y temperatura media de la subcuenca del río San José, Estación Azapa Código BNA 01310019-5, Altitud 365 m.s.n.m.	30
Figura 2-15. Diagrama ombrotérmico representativo de la subcuenca de Azapa Alto, con datos de precipitación media en la estación Central Chapiquiña (código BNA 01300006, Altitud 3.350 m.s.n.m.) y de temperatura de la estación Murmuante.	31
Figura 2-16. Distribución geoespacial de las precipitaciones promedio anual en la cuenca del río San José (1986-2018).....	32
Figura 2-17. Gradiente de temperatura para la cuenca del río San José.	33
Figura 2-18. Distribución geoespacial de las temperaturas promedio anuales en la cuenca del río San José (1986-2018).....	34
Figura 2-19. Variación de precipitaciones en las subcuencas río San José (arriba) y Azapa Alto (abajo).	37
Figura 2-20. Variación de la temperatura en las subcuencas río San José (arriba) y Azapa Alto (abajo).	38
Figura 2-21. Pisos vegetacionales en la cuenca del río San José.	42
Figura 2-22. Áreas protegidas y sitios prioritarios en la cuenca del río San José.....	45
Figura 2-23. Distribución espacial de los canales de riego principales y secundarios.	48

Figura 2-24. Georreferencias de los pozos con derechos concedidos.....	50
Figura 2-25. Captaciones subterráneas producción de agua potable y obras relevantes de agua potable.....	52
Figura 2-26. Ubicación de la Central Chapiquiña.	54
Figura 2-27. Ubicación de las estaciones de monitoreo de agua (meteorológicas, fluviométricas, niveles de pozo, calidad de aguas) vigentes.	57
Figura 2-28. Curva de Capacidad, Cota de Agua vs Volumen Embalse.	58
Figura 2-29. Áreas más adecuadas para recarga artificial profunda.	60
Figura 2-30. Diagrama influencia/interés de los actores en relación con la gestión hídrica.	63
Figura 2-31: Sociograma actores relevantes del valle de Azapa.	64
Figura 3-1. Demanda hídrica total en la cuenca del río San José al año 2018.	70
Figura 3-2. Captaciones subterráneas para agua potable urbana a lo largo del valle de Azapa.	71
Figura 3-3. Evolución de la producción de agua potable urbana en la cuenca del río San José según distintas fuentes de información. *El estudio 2016 y 2017 incluyen el agua potable urbana y rural dentro de la sumatoria.	72
Figura 3-4. Producción mensual de agua potable urbana periodo 2004-2019 Aguas del Altiplano S.A.	73
Figura 3-5. Demanda de agua potable urbana histórica (1986-2018) y proyectada (2020-2050) para la ciudad de Arica.....	74
Figura 3-6. Demanda de agua potable rural histórica (1986-2018) y proyectada (2020-2050) para tres sistemas APR de la subcuenca Azapa Alto.	75
Figura 3-7. Serie mensual de caudales de extracción en pozos de APR periodo 1985-2018.	77
Figura 3-8. Evolución de la demanda de agua total de riego en la cuenca del río San José.	78
Figura 3-9. Evolución de la demanda de agua total de riego en la cuenca de la subcuenca de Azapa Alto para el periodo 1986-2050.	79
Figura 3-10. Zonas de riego definidas en el valle de Azapa.	80
Figura 3-11. Serie de tiempo de la estimación del área cultivada de hortalizas.	82
Figura 3-12. Serie anual estimada del área de cultivos hortícolas en el valle de Azapa. .	83
Figura 3-13. Serie anual estimada del área de cultivos frutales en el valle de Azapa.	84
Figura 3-14. Serie de tiempo de área con viñedos en Azapa.....	85
Figura 3-15. Serie mensual de superficie cubierta por invernaderos en el valle de Azapa.	86

Figura 3-16. Serie mensual de superficie cubierta por invernaderos en el valle de Azapa.	87
Figura 3-17. Evolución de la demanda de agua total de riego en la subcuenca del río San José para el periodo 1986-2050.	88
Figura 3-18. Método de riego empleado en Azapa, en porcentaje (periodo 1985-2020).	88
Figura 3-19. Evolución de la demanda industrial en la ciudad de Arica para el periodo 1986-2050.	90
Figura 3-20. Distribución de puntos relevantes y sectores de demanda del sector de agua potable y agricultura de riego a lo largo del valle de Azapa.	93
Figura 3-21. Número de transacciones de DAA realizadas anualmente desde 1990 hasta 2020 según los registros del CBR Arica enviados a DGA.	96
Figura 4-1. Subcuencas de la cuenca río San José.	103
Figura 4-2. Definición de subsubcuencas principales del sector Azapa Alto.	104
Figura 4-3. Definición de subsubcuencas principales del sector medio-bajo de la cuenca río San José.	105
Figura 4-4. Curva de duración de caudales medio diarios para el río San José en punto Planta de recarga.	106
Figura 4-5. Caudales en estación río San José en Ausipar.	107
Figura 4-6. Caudales en estación Acueducto Azapa en Bocatoma.	107
Figura 4-7. Curva de variación estacional en Ticnamar en Ticnamar.	108
Figura 4-8. Curva de variación estacional en Ticnamar en Angostura.	109
Figura 4-9. Oferta Superficial disponible en la subcuenca Azapa Alto con Caudal de 50% y 85% de probabilidad de Excedencia.	110
Figura 4-10. Caudal de entrada al río San José.	111
Figura 4-11. Curva de variación estacional en río San José en Ausipar.	112
Figura 4-12. Oferta Superficial disponible en la subcuenca río San José con Caudal de 50% y 85% de probabilidad de Excedencia.	114
Figura 4-13. Oferta Superficial proyectada en la subcuenca Azapa Alto con Caudal de 50% y 85% de probabilidad de Excedencia.	116
Figura 4-14. Oferta Superficial proyectada en la subcuenca río San José con Caudal de 50% (gráfico superior) y 85% (gráfico inferior) de probabilidad de Excedencia.	118
Figura 4-15. Valores de temperatura de aguas superficiales registradas en campaña de terreno de 2015-2016.	119
Figura 4-16. Valores de pH de aguas superficiales registradas en campaña de terreno 2015-2016.	120
Figura 4-17. Diagrama de Piper muestras de noviembre 2015.	121
Figura 4-18. Diagrama de Stiff con muestras de noviembre 2015.	122

Figura 4-19. Distribución geoespacial de DAA superficiales concedidos al año 2020.....	125
Figura 4-20. Delimitación del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) oficial para el valle de Azapa.	129
Figura 4-21. Sectores Hidrogeológicos en el valle de Azapa utilizados para efectos de la modelación numérica acoplada.	130
Figura 4-22. Recarga subterránea en subcuenca Azapa Alto (1986-2018).	132
Figura 4-23. Recarga subterránea en subcuenca río San José (1986-2018).	133
Figura 4-24. Recarga subterránea en subcuenca Azapa Alto (2020-2050).	134
Figura 4-25. Recarga subterránea en subcuenca río San José (2020-2050).	135
Figura 4-26. Valores de temperatura registrados en aguas subterráneas en las campañas de terreno 2015 - 2016.	136
Figura 4-27. Valores de temperatura registrados en aguas subterráneas en las campañas de terreno 2021.	137
Figura 4-28. Valores de pH de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2015-2016.	137
Figura 4-29. Valores de pH de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	138
Figura 4-30. Valores de CE de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	139
Figura 4-31. Valores de CE de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	140
Figura 4-32. Diagrama de piper de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	140
Figura 4-33. Diagrama Stiff de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	141
Figura 4-34. Concentración de cloruros en aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	142
Figura 4-35. Concentración de nitratos en aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	142
Figura 4-36. Concentración de arsénico en aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.	143
Figura 4-37. Distribución geoespacial de DAA subterráneos concedidos al año 2020....	146
Figura 4-38. Densidad de puntos de monitoreo.	148
Figura 5-1. División zona baja y media denominada, Valle Azapa, zona alta denominada, Azapa Alto.	151
Figura 5-2: Esquema General de modelación integral WEAP - MODFLOW en acuífero del valle de Azapa y cuenca asociada en el trabajo de DGA-DICTUC (2020).	153

Figura 5-3. División zona baja y media denominada, Valle Azapa, zona alta denominada, Azapa Alto, según DGA-DICTUC (2020).....	155
Figura 5-4. Caudal Simulado versus Caudal Observado en EF Ticnamar en Ticnamar...	157
Figura 5-5. Caudal Simulado versus Caudal Observado en EF Ticnamar en Angostura.	157
Figura 5-6. Caudal Simulado versus Caudal Observado en EF Río San José en Ausipar.	158
Figura 5-7. Análisis estadístico de los niveles de pozos de observación.	160
Figura 5-8. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en la ciudad de Arica.....	162
Figura 5-9. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en los sectores de Pago de Gómez y Cerro Sombrero (al inicio del valle de Azapa).	163
Figura 5-10. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en los sectores de Las Maitas y San Miguel de Azapa.	164
Figura 5-11. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en los sectores de Cerro Moreno y Cabuza.	165
Figura 5-12. Precipitación histórica y futura en Azapa Alto simulada en WEAP.	167
Figura 5-13. Precipitación histórica y futura en valle Azapa simulada en WEAP.	167
Figura 5-14. Variación del nivel del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Histórico (1986-2018).....	169
Figura 5-15. Variación del nivel del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro (1986-2050).....	172
Figura 5-16. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de APU en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).	176
Figura 5-17. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de APR en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).	177
Figura 5-18. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de APR y Población en sectores Rurales en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).....	178
Figura 5-19. Variación de profundidad en los pozos APR – Escenario Base.	180
Figura 5-20. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de producción Agrícola en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).....	181
Figura 5-21. Principales resultados del Escenario de Gestión E-1.	184
Figura 5-22. Principales resultados del Escenario de Gestión E-2.1.	186
Figura 5-23. Principales resultados del Escenario de Gestión E-2.2.	188
Figura 5-24. Principales resultados del Escenario de Gestión E-3.	190
Figura 5-25. Principales resultados del Escenario de Gestión E-4.	192
Figura 5-26. Principales resultados del Escenario de Gestión E-5	194

Figura 5-27. Resumen comparativo de brechas hídricas (Hm ³) por cada escenario de gestión para el acuífero del valle de Azapa.	198
Figura 5-28. Principales resultados del Escenario de Gestión E-6.	200
Figura 6-1. Esquema resumen del marco conceptual de seguridad hídrica a utilizar de base para estructurar el plan de acción.	210
Figura 6-2. Esquema resumen del árbol de problemas y soluciones.	212
Figura 6-3. Esquema de árbol de problemas utilizado como base para el desarrollo del Plan de Acción.	214
Figura 6-4. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-01.	217
Figura 6-5. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-02.	218
Figura 6-6. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-03.	219
Figura 6-7. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-04.	220
Figura 6-8. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-05.	221
Figura 6-9. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-06.	222
Figura 6-10. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-01.	223
Figura 6-11. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-02.	224
Figura 6-12. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-03.	225
Figura 6-13. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-04.	226
Figura 6-14. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-05.	227
Figura 6-15. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-06.	228
Figura 6-16. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-07.	229
Figura 6-17. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-08.	230
Figura 6-18. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-09.	231
Figura 6-19. Árbol de problema y solución asociado a la medida NF-01.	233
Figura 6-20. Árbol de problema y solución asociado a la medida NF-02.	234
Figura 6-21. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-01.	235
Figura 6-22. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-02.	236
Figura 6-23. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-03.	237
Figura 6-24. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-04.	238
Figura 6-25. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-05.	239
Figura 7-1. Detalle de la construcción del valor ponderado final para la priorización multicriterio de acciones.	250
Figura 7-2. Detalle de la construcción del valor ponderado final para la priorización multicriterio de acciones.	253

Figura 7-3. VAC [UF] por entidad responsable.	258
Figura 7-4. CAE [UF] por entidad responsable.	258
Figura 7-5. Cronograma de las acciones propuestas.	260
Figura 8-1. Diagrama resumen de la estructura de funcionamiento de las tres instancias de gobernanza propuestas para la implementación del PEGH.	273
Figura 9-1: Ciclo del monitoreo para el PEGH del acuífero del valle de Azapa.	278

RESUMEN EJECUTIVO

El PEGH del acuífero del valle de Azapa, promovido por la DGA, compila una serie de acciones a diferentes horizontes temporales para guiar la búsqueda de la seguridad hídrica de los actores públicos y privados con interés en el área de estudio, con énfasis en aquellas que son responsabilidad de DGA. El desarrollo de este plan ha sido un proceso en el cual distintos actores han participado en diferentes etapas a través de entrevistas, reuniones y talleres. El presente informe, desarrollado por la Universidad de Chile (Laboratorio de Análisis Territorial) se enfoca en la Etapa Final de elaboración del PEGH del acuífero del valle de Azapa, cuyo objetivo central fue adaptar y complementar el estudio “Diagnóstico para la Gestión de Explotación del Acuífero valle de Azapa” (DGA-DICTUC, 2020) a fin de entregar un Plan Estratégico de Gestión Hídrica para el Acuífero del valle de Azapa.

En este informe se presentan tanto elementos diagnósticos sobre la situación hídrica del acuífero del valle de Azapa y de la cuenca del río San José, así como una hoja de ruta para alcanzar la seguridad hídrica con diversas líneas de acción y propuestas para su implementación y monitoreo. La formulación del plan se basa tanto en un proceso participativo como 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 2020-2050, mismos periodos de análisis utilizados para el presente PEGH.

Es relevante precisar que el PEGH fue elaborado con énfasis en el acuífero del valle de Azapa, área donde se centraron principalmente los esfuerzos de modelación hidrológica (DGA-DICTUC, 2020) y del proceso participativo desarrollado. No obstante, y considerando que las aguas subterráneas están intrínsecamente conectadas con las aguas superficiales que fluyen a lo largo de toda la cuenca del río San José (p.ej. recargas de agua, infiltración por ineficiencia en métodos de riego, afloramientos subterráneos, entre otros), a lo largo de este informe se presentan descripciones y análisis diferenciando, cuando corresponde, la escala del acuífero, de subcuencas, y de cuenca.

La cuenca del río San José, donde está contenido el acuífero del valle de Azapa, es una cuenca exorreica, que se puede dividir en dos grandes subcuencas: la de Azapa Alto, cuya superficie es de 1.053 km² y está conformada por los ríos Ticnamar y Seco, que confluyen y dan origen al río San José; y la subcuenca del río San José, cuya área total es de 1.931 km² y representa la parte baja de la cuenca formada por el río del mismo nombre que desemboca en el mar. En la subcuenca del río San José se presentan las mayores demandas de agua tanto superficial como subterránea: uso de agua para el riego de hortalizas y frutales del valle de Azapa, y agua potable urbana para la ciudad de Arica. Además, existe un uso de agua potable rural en ambas subcuencas, además de un uso de agua para fines industriales en torno a la ciudad de Arica. Dentro de las principales entradas de agua de la zona alta son las precipitaciones y el trasvase del

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

canal Lauca. El promedio del caudal de entrada a través del Canal Lauca fue de 0,75 m³/s entre 1986 y 2018.

La problemática central evidenciada durante el desarrollo del PEGH, y que es reconocida por los actores involucrados en la gestión y explotación del acuífero del valle de Azapa, fue el aumento sostenido de la escasez de agua subterránea, tanto en la actualidad como en relación con las proyecciones futuras, situación que afecta la seguridad hídrica del acuífero del valle de Azapa. Ante esto, se han generado respuestas administrativas, como la declaración del acuífero como zona de prohibición desde 1996, sin embargo, desde ese año a la fecha se ha evidenciado un aumento en la demanda de agua y disminución de la oferta, sin mostrar grandes impactos esta declaración para mitigar la sobreexplotación. Los principales efectos que ya se viven en el territorio tienen que ver con un sostenido descenso de los niveles de pozos, pozos “colgados” y la profundización de pozos. Además, se ha visto en el último tiempo la llegada de camiones aljibes para uso de agua potable rural, la activación del “mercado de aguas” a través del arriendo y compra de DAA, y una creciente conflictividad entre usuarios, en especial entre los grandes usos del acuífero y del valle de Azapa: Agua Potable Urbana y Agricultura. Todos estos efectos que se han identificado repercuten finalmente en la afectación de la calidad y sistemas de vida, de los sistemas naturales y de los sistemas socioeconómicos y culturales.

Al analizar los distintos resultados sobre satisfacción de las demandas, balance del acuífero, variaciones en el volumen, identificación de brechas hídricas y la sustentabilidad del acuífero, se reafirma que existe una sobreexplotación sobre los recursos hídricos subterráneos. Esta situación ha generado y generará una disminución significativa del volumen subterráneo de agua, siendo la intrusión marina una amenaza potencial, lo que debe ser estudiado en el futuro. En base a los datos históricos, se observó que existiría un balance negativo de 148,5 L/s y también una brecha en las demandas de 0,18 Hm³. A futuro, se prevé que exista un balance negativo de 36,3 L/s pero que no distingue la recarga o entrada de agua salada al sistema subterráneo por intrusión salina que aumenta en un 793% respecto al periodo histórico, mientras, por otro lado, las brechas hídricas por demandas aumentarían a 1,46 Hm³. Es importante mencionar que estos resultados, están sujetos tanto a la incertidumbre climática y socioeconómica futura, así como a la falta de datos históricos, diversas brechas de modelación y a las reglas de modelación propias de la simplificación de la realidad, lo que debe ser considerado al interpretar los datos.

Si bien se presentaron dos escenarios de gestión simulados en el modelo acoplado (E-5 y E-6) que generarían una disminución en las brechas de agua potable y una recarga significativa en el acuífero, igualmente no se lograría satisfacer las demandas futuras en un 100%. Este hecho refuerza la idea de que se requieren medidas de gestión y de gobernanza entre usuarios que permitan administrar, monitorear y gestionar el recurso subterráneo y las fuentes de agua de forma sustentable, además de avanzar en mejoras en las eficiencias de uso y la incorporación de nuevas fuentes.

El Plan de Acción considera 22 acciones de diversos tipos (Obras Hidráulicas, Medidas de Gestión, Nuevas Fuentes, Otras Medidas), en siete ejes estratégicos basados en la meta de Seguridad Hídrica, concepto empleado en las nuevas reformas a la normativa ambiental e hídrica del país introducidas en 2022, de modo de estar a la vanguardia en dichas temáticas. El Plan incorpora una propuesta de sistema de gobernanza para la

implementación y monitoreo. Además, cabe precisar que el plan se basó en un proceso de participación ciudadana con perspectiva de género, donde se pudo realizar un proceso de recopilación de información y generación de acciones mediante la validación de los actores a través de una serie de etapas (reuniones, entrevistas y talleres participativos).

El informe se estructura en nueve capítulos, los que se detallan a continuación.

- Capítulo 1: Introducción y Objetivos del estudio. En este capítulo se introduce al estudio desarrollado, al contexto de ejecución y se presentan los objetivos específicos y el objetivo general.
- Capítulo 2: Caracterización de la cuenca. En este acápite se presentan las principales características del valle de Azapa, abarcando la división político-administrativa, actividades económicas que hacen uso del recurso hídrico, geología y geomorfología, suelos e hidrología en general. Además, se detallan las características climáticas enfocadas en temperatura y precipitación, junto con la dimensión ambiental del valle y la infraestructura hídrica presente. Por último, se describen las nuevas fuentes de agua, actuales y potenciales, y se analiza la gobernanza del agua existente a nivel de cuenca.
- Capítulo 3: Demanda Física y Legal. En este acápite se señala la demanda de agua, actual (2018) y proyectada al 2050, para los diferentes usos, donde se encuentra el consumo humano urbano y rural, el uso agrícola e industrial. Los resultados se dividen en la subcuenca del río San José y de Azapa Alto. También se presentan los Derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en la cuenca a los diferentes usos y finalmente un análisis del mercado de aguas.
- Capítulo 4: Oferta Hídrica. En el capítulo 4 se presenta la estimación y aspectos relevantes de la oferta hídrica superficial de la cuenca del río San José (fuentes superficiales, oferta proyectada, calidad de aguas y derechos concedidos) y subterránea del acuífero del valle de Azapa (fuentes subterráneas, stock, recarga, niveles, calidad de aguas y derechos concedidos). El análisis contempla también las restricciones históricas y actuales del territorio sobre el uso de las fuentes identificadas, entregando un diagnóstico sobre la disponibilidad del recurso y la, considerando además de la cantidad actual y proyectada, diferentes parámetros de la calidad de las fuentes.
- Capítulo 5: Balance de Agua. En este capítulo se describe la herramienta de modelación integrada superficial-subterránea en la plataforma WEAP-MODFLOW desarrollada en el estudio DGA-DICTUC (2020), que permita simular el balance hídrico de la cuenca, con énfasis en el acuífero. El modelo desarrollado por DGA-DICTUC (2020) y empleado en este estudio es la mejor aproximación a nivel integral para el área de estudio, sin embargo, es importante mencionar que estos resultados están sujetos a la incertidumbre climática y socioeconómica futura, así como a la falta de datos históricos y a las reglas de modelación propias de la simplificación de la realidad, lo que debe ser considerado al interpretar los datos. En base a dicha herramienta, en dicho capítulo se describe y analiza: 1) el balance de agua considerando la situación histórica (1886-2018), 2) balance de agua futuro al 2020-2050 bajo cambio climático, 3) brechas hídricas de demanda para los distintos usos del agua, 4) criterios de sustentabilidad en el acuífero y 5) el

desarrollo de seis escenarios de gestión que simulan medidas de gestión de la demanda y oferta para el acuífero del valle de Azapa.

- **Capítulo 6: Acciones.** En este capítulo se presenta la formulación del Plan de acción del acuífero que aborda las principales problemáticas hídricas comentadas y analizadas a lo largo del informe. La formulación del plan de acción es el resultado del análisis crítico del diagnóstico, de las actividades participativas y de los resultados de la modelación acoplada, en los cuales se identifican brechas y problemáticas hídricas de acuerdo con los objetivos del plan y la meta de Seguridad Hídrica. En primer lugar, se detalla tanto el marco conceptual y los ejes estratégicos que fundan el Plan de Acción, junto a la metodología de árbol de problemas utilizada para dar coherencia y pertinencia de las acciones propuestas. Posteriormente, se presenta un detalle de las 22 acciones propuestas en el contexto del PEGH, divididas en una tipología de cuatro categorías de acciones (Obras Hidráulicas OH, Medidas de Gestión MG, Nuevas Fuentes NF, Otras Medidas OM) con su respectivo análisis causal.

- **Capítulo 7: Cartera de iniciativas propuestas.** En este capítulo se entrega la cartera de iniciativas para el PEGH el acuífero del valle de Azapa (y algunas con alcance de cuenca), con la evaluación económica, social y ambiental, así como la priorización, valorización y cronograma propuesto para la implementación. Las acciones se dividen en siete Ejes Estratégicos: Seguridad hídrica para consumo humano, Seguridad hídrica para actividades productivas, Seguridad hídrica para Ecosistema, Eventos extremos y Contaminación, Balance Hídrico, Gobernanza, Disponibilidad de información. Las acciones fueron sometidas a dos análisis multicriterio para obtener un listado priorizado de acciones en base a criterios económicos, sociales, ambientales, estratégicos y de balance. El primero prioriza las acciones que no poseen un escenario de gestión asociado, es decir, que no poseen datos de balance asociados a su implementación. El segundo ejercicio de priorización aplica para cuatro acciones que tienen relacionado un escenario de gestión, es decir, que poseen datos de balance para ser incluidos en la priorización multicriterio.

- **Capítulo 8: Implementación del Plan.** En este acápite se presenta la propuesta de implementación del Plan, es decir, la planificación asociada a la Cartera de Iniciativas, teniendo en cuenta el cronograma del Plan de acción y sus horizontes (corto, mediano y largo plazo) y los actores responsables de estas iniciativas agrupados en una propuesta de estructura y proceso de gobernanza. También incluye algunas directrices a considerar apuntando a una implementación efectiva del Plan, que consideran tanto los obstáculos como oportunidades derivadas de los aspectos institucionales y de la cultura del agua del territorio en cuestión, así como las fuentes de financiamiento necesarias para su puesta en práctica y aspectos legales relevantes que habilitan o condicionan la implementación. Por último, se presenta una propuesta de estrategia de comunicación para este proceso de implementación.

- **Capítulo 9: Monitoreo y Evaluación del Plan.** El último capítulo presenta una propuesta de monitoreo y evaluación del PEGH. Este proceso es un componente importante en el marco de la elaboración del PEGH, donde el monitoreo de la evolución de las acciones a realizar permite una retroalimentación y adaptación

que mejore la pertinencia y oportunidad de las propuestas de acción existentes evaluando también cuál ha sido el nivel de desarrollo y de impacto de las acciones, razón por la cual se propone un sistema de monitoreo y evaluación que se considera el más adaptable a realidad del área de estudio, basado en indicadores de impacto, de proceso y de seguimiento.

• Anexos. Complementan al informe principal 11 Anexos, los que se nombran a continuación:

- Anexo A - Abreviaciones
- Anexo B - Referencias
- Anexo C - Glosario
- Anexo D - Figuras
- Anexo E – Antecedentes recopilados
- Anexo F – Aspectos metodológicos
- Anexo G - SIG
- Anexo H – Modelo
- Anexo I – Detalle de actividades PAC
- Anexo J – Información complementaria
- Anexo K – Plan de acción e iniciativas

Por último, es preciso mencionar que el equipo consultor no pretende, a través de este PEGH, dar una receta de cómo resolver el problema de sobreexplotación de acuífero del valle de Azapa, considerando que es una problemática que se arrastra hace más de 20 años. En contraposición, el presente PEGH busca dar orientaciones técnicas y estratégicas para que, a través de un proceso de toma de decisiones basado en el conocimiento, se busque la Seguridad Hídrica del acuífero del valle de Azapa, y por ende de todo el sistema humano y ecológico que depende de él. Esta búsqueda no solo debiera ser desde las ideas que se han propuesto en múltiples estudios desde hace décadas realizados, sino que también desde las propias ideas emanadas de los diversos actores territoriales.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

La planificación de recursos hídricos desde un enfoque estratégico es clave para alcanzar la seguridad hídrica en las distintas cuencas del país. La DGA representa al organismo público mandatado al respecto. Este organismo público está en cargado de promover la gestión y administración sustentable de los recursos hídricos, para asegurar el interés público, la producción de bienes y servicios, el uso eficiente del agua y la conservación del medio ambiente en un contexto de cambio climático.

Para avanzar en la planificación con enfoque estratégico, la DGA mandató la elaboración del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) para el acuífero del valle de Azapa, en el contexto de la iniciativa de análisis para el desarrollo del Plan Nacional de Recursos Hídricos. El PEGH compila una serie de acciones a diferentes horizontes temporales para guiar la búsqueda de la seguridad hídrica por actores públicos y privados, con énfasis en aquellas que son responsabilidad de DGA.

El desarrollo de este plan ha sido un proceso en el cual distintos actores han participado en diferentes etapas. El presente informe, desarrollado por la Universidad de Chile (Laboratorio de Análisis Territorial) se enfoca en la Etapa Final de elaboración del PEGH del acuífero del valle de Azapa, presentando elementos diagnósticos sobre la situación hídrica tanto del acuífero del valle de Azapa como de la cuenca del río San José, así como una hoja de ruta para alcanzar la seguridad hídrica con diversas líneas de acción. La formulación del plan se basa tanto en un proceso participativo como en los insumos y elementos centrales de la modelación acoplada desarrollada para el acuífero del valle de Azapa por el estudio DGA-DICTUC (2020), financiado también por la DGA.

Es relevante precisar que el presente PEGH fue elaborado con énfasis en el acuífero del valle de Azapa, área donde se centraron principalmente los esfuerzos de modelación hidrológica (DGA-DICTUC, 2020) y del proceso participativo desarrollado. No obstante, y considerando que las aguas subterráneas están intrínsecamente conectadas con las aguas superficiales que fluyen a lo largo de toda la cuenca del río San José (p.ej. recargas de agua, infiltración por ineficiencia en métodos de riego, afloramientos subterráneos, entre otros), a lo largo de este informe se presentan descripciones y análisis diferenciando, cuando corresponde, la escala del acuífero, de subcuencas, y de cuenca.

1.2 OBJETIVOS

Este documento constituye el Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) para el acuífero del valle de Azapa que se inserta dentro de un estudio mayor mandatado por la Dirección General de Aguas denominado “Diagnóstico para el Desarrollo del Plan Nacional”.

El “Diagnóstico para el Desarrollo del Plan Nacional” tiene como uno de sus objetivos otorgar una asesoría integral a la Dirección General de Aguas, en lo relativo a la planificación estratégica tanto de cuencas como a nivel nacional, en materias de los recursos hídricos.

1.2.1 Objetivo general

Generar un diagnóstico para el desarrollo de un Plan Nacional de los Recursos Hídricos.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del estudio "Diagnóstico para el Desarrollo del Plan Nacional" son 8 en total, siendo el objetivo n°7 el correspondiente al desarrollo del PEGH del acuífero del valle de Azapa.

1. Revisión analítica de los proyectos desarrollados en el marco de la iniciativa "Análisis para el desarrollo de Plan Nacional de Recursos Hídricos", de acuerdo a contenidos y lineamientos de la misma.
2. Revisión de otros estudios realizados por la D.G.A. u otro organismo que aporten a los contenidos y lineamientos de la iniciativa.
3. Diagnóstico del aporte de estudios desarrollados para el Plan Nacional
4. Levantamiento de brechas de información.
5. Generación de lineamientos de trabajo para el desarrollo de un Plan Nacional de los Recursos Hídricos.
6. Apoyar a la inspección fiscal en las labores estipuladas en las bases técnicas de los estudios desarrollados por la división de Estudios y Planificación como complemento a las actividades del Plan Nacional, como son los "Planes Estratégicos de Gestión Hídrica" a desarrollar en el año 2021.
7. Adaptar y complementar el estudio "Diagnóstico para la Gestión de Explotación del Acuífero valle de Azapa" a fin de entregar un Plan Estratégico de Gestión Hídrica para el Acuífero del valle de Azapa.
8. Compilar avances y productos finales en un sistema de información geográfico e informes.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

En el presente acápite se presentan las principales características del valle de Azapa, abarcando la división político-administrativa, actividades económicas que hacen uso del recurso hídrico, geología y geomorfología, suelos e hidrología en general. Además, se detallan las características climáticas enfocadas en temperatura y precipitación, junto con la dimensión ambiental del valle y la infraestructura hídrica presente. Por último, se describen las nuevas fuentes de agua, actuales y potenciales, y se analiza la gobernanza del agua existente a nivel de cuenca.

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se centra en el acuífero del valle de Azapa, ubicado dentro de la cuenca del río San José y cuyos límites fueron delimitados en el estudio de DGA-DICTUC (2020). Dicha cuenca se encuentra en la Región de Arica y Parinacota, al sur del valle del río Lluta y al norte de la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor. Hacia el oeste se encuentra el Océano Pacífico y hacia el este limita con las cuencas Altiplánicas. El área de estudio se presenta en la Figura 2-1.

De acuerdo con el Banco Nacional de Aguas (BNA), y con la figura presentada, la cuenca del río San José se puede dividir en dos grandes subcuencas: la de Azapa Alto, cuya superficie es de 1.053 km² y está conformada por los ríos Ticnamar y Seco, que confluyen y dan origen al río San José, y la subcuenca del río San José, cuya área total es de 1.931 km² y representa la parte baja de la cuenca formada por el río del mismo nombre y que desemboca en el mar.

A lo largo de la caracterización del área de estudio, así como para efectos de la modelación, los datos e información se presentan a nivel de la subcuenca de Azapa Alto, la subcuenca del río San José, y el acuífero del valle de Azapa. No obstante, el presente estudio elabora un plan para el acuífero del valle de Azapa, dado que es un complemento al estudio ejecutado por DGA-DICTUC (2020). En dicho estudio, se levantaron datos de diagnóstico de demanda con mayor detalle a nivel de acuífero para efectos de construir el modelo numérico acoplado de las aguas subterráneas y superficiales. Es así también que dicha área delimitó las actividades participativas tendientes al desarrollo del Plan de Acción para el acuífero del valle de Azapa.

Por tanto, a lo largo de los siguientes capítulos, se presentan datos diferenciando si la escala de la información es a nivel de acuífero (área mostaza en la Figura 2-1), a nivel de subcuenca o a nivel de cuenca, precisando que es a nivel del acuífero donde se levantaron datos con mayores esfuerzos para la modelación. Es importante destacar que las aguas subterráneas están intrínsecamente conectadas con las aguas superficiales que fluyen a lo largo de toda la cuenca del río San José (p.ej. recargas de agua, infiltración por ineficiencia en métodos de riego, afloramientos subterráneos, entre otros) por lo que algunos análisis para el desarrollo de este plan consideran la cuenca en su totalidad.

2.2 DIMENSIÓN POLÍTICA ADMINISTRATIVA

En este acápite se presentan aspectos de la división político-administrativa del área de estudio, así como aspectos demográficos y de las actividades económicas principales que están presentes, con énfasis en aquellas que dependen del acuífero del valle de Azapa.

2.2.1 División política administrativa

La cuenca del valle de Azapa se extiende por la provincia de Arica y la provincia de Parinacota. En ese sentido, la subcuenca del río San José se ubica mayoritariamente en la comuna de Arica, provincia de Arica, mientras que una parte importante de la subcuenca Azapa Alto se encuentra en la comuna de Putre y una pequeña parte en la comuna de Camarones, provincia de Parinacota (Tabla 2-1). En cuanto a poblados, a lo largo del valle de Azapa se identifican 17 localidades y/o sectores, las que se distribuyen espacialmente en el territorio según la Figura 2-2.

Tabla 2-1. Superficie de la cuenca del río San José respecto a comunas.

Provincia	Comuna	Superficie total comuna [km ²]	Superficie de la comuna en la cuenca [km ²]	Superficie de la comuna en la cuenca [%]
Arica	Arica	4.802	2.153	44,83
Parinacota	Camarones	3.925	4	0,10
	Putre	5.889	1.038	17,62

Fuente: Elaboración propia (2022) en base a Mapoteca BCN.

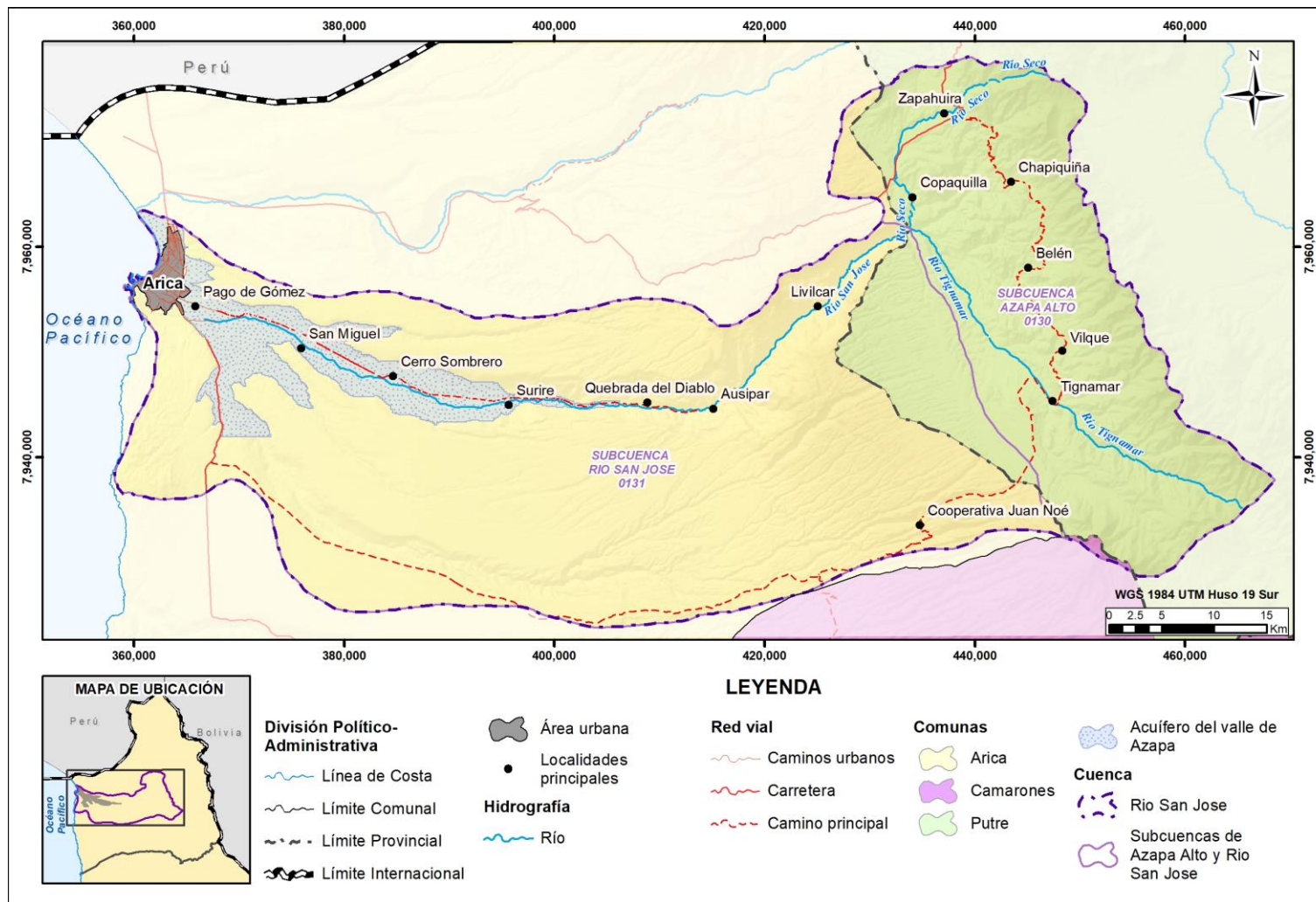


Figura 2-2. División político-administrativa y localidades en torno al acuífero del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia (2022) en base a Mapoteca DGA.

2.2.2 Demografía

De acuerdo con el “Censo de Población y Vivienda” del 2017, la región de Arica y Parinacota cuenta con una población de 226.068 habitantes, de los cuales 113.487 son mujeres, representando el 50,2%, y 112.581 son hombres, alcanzando el 49,8% del total. En cuanto a la población por áreas, un 91.7% vive en áreas urbanas y un 8.3% en áreas rurales, lo cual representa un crecimiento de la población rural según censos anteriores, además un total de 78.883 personas se considera perteneciente a un pueblo originario, siendo el pueblo Aymara el más predominante.

La distribución por grupos de edad en la Región presenta una tendencia al envejecimiento de la población, en donde la población de más de 65 años creció de un 7,1% el año 2002 a un 10,9% en el año 2017, mientras que el grupo etario entre 0-14 años disminuyó de un 25,8% a un 21,8% en el mismo período. El grupo etario de 15 a 64 años no presentó cambios significativos entre estos años. En cuanto al nivel educacional en la Región, el porcentaje de población que alcanza la educación superior aumentó de un 23,4% en el año 2002 a un 28,8% al año 2017, a su vez, el porcentaje de población que posee hasta la enseñanza básica completa disminuyó de un 26,6% a un 19,2%. El 52% restante en el año 2017 declara que la enseñanza media es el nivel educacional más alto aprobado.

La tasa de crecimiento poblacional entre el censo de 1982-1992 fue un 1,3%, en el período 1992-2002 la tasa de crecimiento corresponde a un 0,9% y finalmente entre 2002-2017 fue un 1,2% aumentando de 128.644 a 226.068 habitantes en la Región. Cabe destacar que un 97,9% de la población de la Región se concentra en la comuna de Arica y un 1,2% en la comuna de Putre.

En la ciudad de Arica, principal núcleo urbano de la cuenca, la población alcanza los 213.000 habitantes aproximadamente, mientras que la comuna completa abarca una población de 221.364 con una densidad poblacional de 46 habitantes por km² y la comuna de Putre un total de 2.765 habitantes y una densidad de 0,4 habitantes por km².

2.2.3 Actividades económicas

La descripción de las actividades económicas para la cuenca del río San José se representan a través del producto interno bruto regional y de una descripción breve de las principales actividades económicas. Destaca la importancia del sector agrícola dentro de las actividades económicas relevantes que utilizan agua para su desarrollo.

2.2.3.1 Valor de la producción regional

El Producto Interno Bruto (PIB) de la región de Arica y Parinacota, de acuerdo con el Banco Central de Chile (2022) para el año 2019, fue MM\$ 1,4, representando el 0,79% del PIB a nivel nacional. A nivel sectorial, las principales actividades económicas de la región corresponden a Servicios Personales (18%), seguida de la Administración Pública (17,5%) y el Transporte, información y comunicaciones (11,9%). El sector agropecuario-silvícola alcanza un 5,25% del PIB regional, mientras que la minería contribuye sólo un 2,2% al total, no obstante, la actividad con menor participación corresponde a electricidad, gas, agua y gestión de desechos con un 1,47% del PIB regional.

Cabe destacar que en sector del valle de Azapa la principal actividad es la agrícola caracterizada por olivicultura, productos hortícolas y frutas tropicales, mientras que, en

la ciudad de Arica, núcleo urbano de la cuenca en estudio, la pesca es la actividad económica relevante para la realización de este plan.

2.2.3.2 Principales actividades económicas en la cuenca del río San José

A continuación, se presenta una descripción de las actividades económicas presentes en la cuenca del río San José, sistema hídrico de gran importancia para entender la dinámica hídrica del acuífero.

2.2.3.2.1 Sector agrícola

El valle de Azapa posee condiciones climáticas favorables para el cultivo de hortalizas durante todo el año, además de la producción de frutas tropicales como maracuyá, guayaba, papaya y mangos. Según el censo agropecuario del año 2007, los cultivos principales son maíz, tomate, poroto verde, cebolla, pimentón y ají.

De acuerdo con la caracterización de la agricultura en el valle de Azapa realizada por el Gobierno Regional de Arica y Parinacota (s.f.), el 32% de los agricultores poseen invernaderos de malla, un 4% invernaderos de cubierta plástica, el 13% tiene ambos tipos de invernadero, mientras que el 51% no posee este tipo de infraestructuras. En relación con los estanques acumuladores de agua, un 7% no posee uno, el 73% tiene uno para sus cultivos y el 18% tiene entre dos o tres estanques. La construcción de estos estanques acumuladores surgió de la incorporación del riego por goteo y la escasez hídrica en el período estival. Por otro lado, existen grandes empresas ubicadas en el valle que se dedican al rubro agropecuario como Agrícola Lombardi, Agrícola Tarapacá, Bezma Ltda., Agropiemonte y Agrícola del Norte entre otras.

Según el estudio del Laboratorio de Análisis Territorial (2012), la superficie total de riego, al 2012, alcanzaba las 4.386 hectáreas con un 67,3% de hectáreas cubiertas con sistema de riego por goteo y el 32,7% con un sistema de pozas. En el estudio DGA-DICTUC (2020) se actualizó el área de riego, alcanzando una superficie de cerca de 5.500 ha, lo que demuestra un aumento de la superficie, pero cambiando la composición de cultivos, con una gran presencia de invernaderos para la producción de semillas y el cultivo de hortalizas.

2.2.3.2.2 Sector Industrial

La actividad industrial más relevante de la cuenca es la actividad pesquera, situada en la ciudad de Arica, sin embargo, de acuerdo con la "Estrategia Regional de Desarrollo Arica y Parinacota" (Gobierno Regional de Arica y Parinacota, 2018), ha tenido un retroceso en cuanto a la productividad, con una tendencia decreciente en el período 2010-2015. El informe señala que las restricciones y normativas dificultan la mantención de la pesca artesanal en la región.

Los principales pescados comercializados son la palometa, rocacho, azulejo, corvina, pejerrey de mar, cojinoba, bacalao entre otros, en cuanto a los mariscos los principales son piure, cholga, erizo y almeja. Este sector, ha sufrido un retroceso en cuanto a la exportación de harina de pescado, sin embargo, el aceite de pescado ha incrementado su exportación desde el año 2012.

Otras actividades industriales que se emplazan en el territorio son industrias químicas, procesamiento de aves de corral, embotelladoras y cervecerías, frigoríficos, mataderos y procesamiento de carnes.

2.3 DIMENSIÓN FÍSICA

En esta sección se presentan los principales aspectos físicos del área de estudio, compuesto por una descripción general de la geología, geomorfología, de los suelos, y con mayor detalle de la hidrología e hidrogeología.

2.3.1 Geomorfología

Las formaciones geomorfológicas influyen en las condiciones climáticas, hidrológicas, ambientales y económico-sociales de la cuenca. En la región de Arica y Parinacota se pueden diferenciar, de manera general, cuatro unidades geomorfológicas (Figura 2-3): Litoral de hasta 600 m; Valles interiores y precordilleranos entre 650-1.300m; Precordillera con alturas entre 1.300-2.800 m y la Cordillera con alturas superiores a los 2.800m (DGA-DICTUC, 2020).

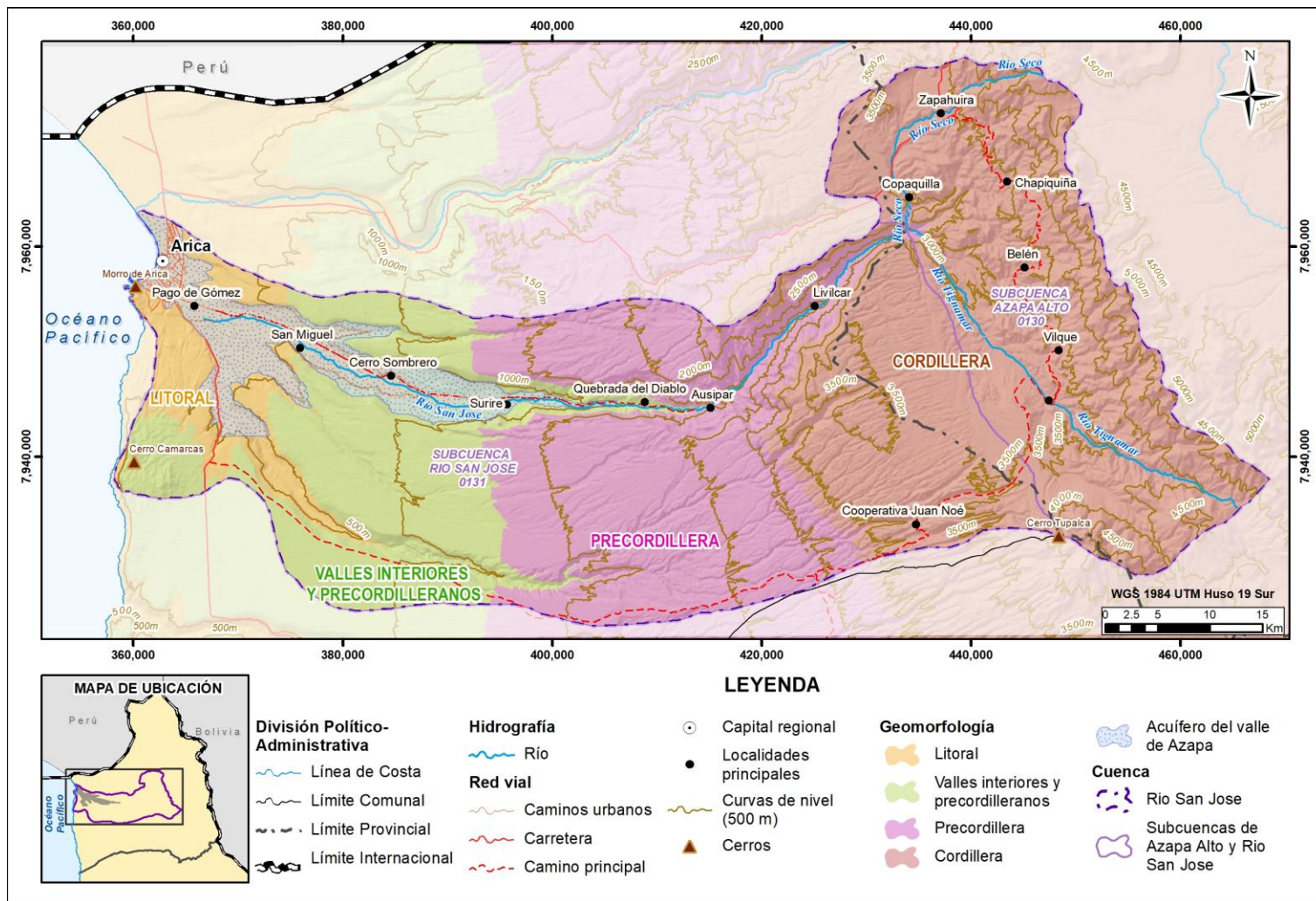


Figura 2-3. Mapa geomorfológico de la cuenca del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a las clasificaciones de DGA-DICTUC (2020) y MMA (2016).

La subcuenca del río San José comprende una altura que va desde los 0 m.s.n.m. hasta los 4.131 m.s.n.m., mientras que, para la subcuenca de Azapa Alto, su altitud varía entre los 2.432 m.s.n.m. y los 5.249 m.s.n.m. Las curvas hipsométricas de cada subcuenca se presentan en la Figura 2-4 y Figura 2-5, respectivamente.

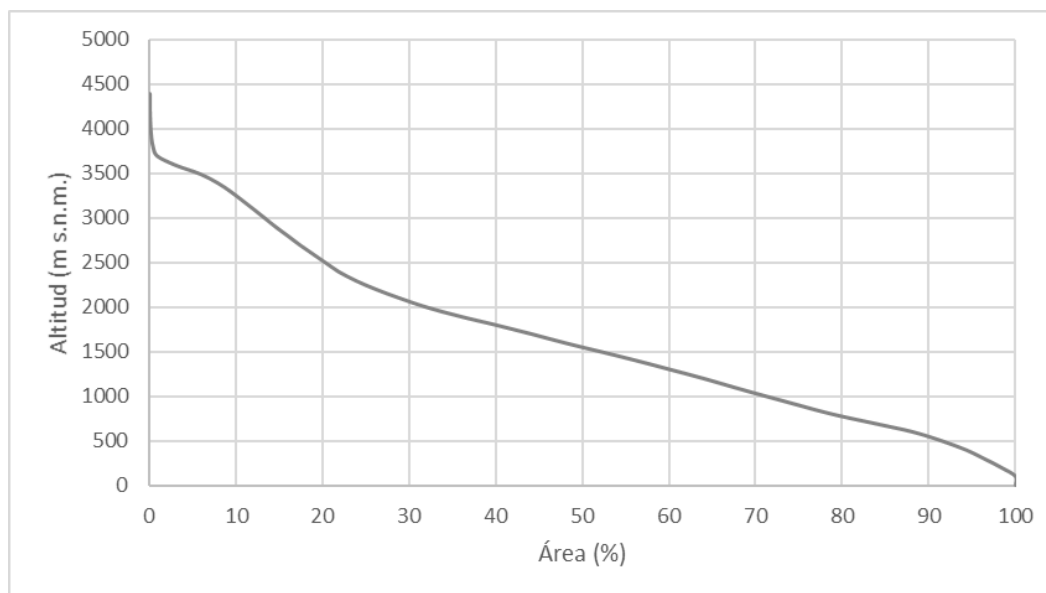


Figura 2-4. Curva hipsométrica subcuenca del río San José.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a Modelo Digital de Elevación SRTM de Mapoteca DGA.

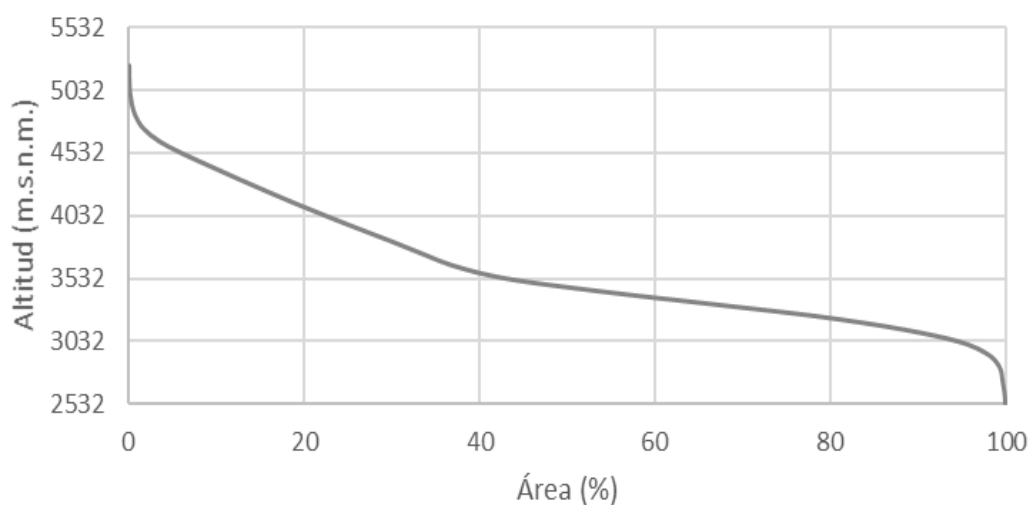


Figura 2-5. Curva hipsométrica subcuenca Azapa Alto.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a Modelo Digital de Elevación SRTM de Mapoteca DGA.

2.3.2 Geología

La descripción de las formaciones geológicas para la cuenca del valle de Azapa se abarca según la zona geográfica en que se encuentren. Para este caso, se presentan las principales formaciones de la zona costera, zona continental y valle de Azapa descritas en el estudio de "Diagnóstico para la gestión de explotación del acuífero valle de Azapa" (DGA-ARRAU, 1997; DGA, 2010; INH, 2014; DGA-DICTUC, 2020). En la Figura 2-6 se visualiza el mapa geológico de la cuenca mientras que en Anexo J.1 se presenta el listado de formaciones geológicas según mapa geológico Hoja de Arica escala 1:250.000 (SERNAGEOMIN, 2004).

Zona costera: (1) Se encuentra la Formación (Fm.) Camaraca de edad Jurásica Inferior, compuesta por lavas andesíticas con intercalaciones de calizas, lutitas y areniscas marinas fosilíferas, las que afloran en el morro de Arica. (2) Además, se puede diferenciar la Fm. Concordia de edad Cuaternaria, compuesta por depósitos de aluviones y arenas con intercalaciones de arcilla, ceniza volcánica y horizontes de conchas, junto con intercalaciones de arena, arcillolitas y ripio-bolones. Esta última capa es donde se almacenan los principales acuíferos de la ciudad de Arica, con un espesor de 200 m y una capa de 40 m dentro de ella compuesta por ceniza volcánica con intercalaciones de arena, arcillolitas y ripio-bolones.

Zona continental: (1) La Fm. los Tarros de edad Jurásica Superior sobre yace a la Fm. Camaraca y aflora en la Quebrada de Acha. Está compuesta por areniscas, calizas y lutitas fosilíferas con algunas intercalaciones de lavas. (2) Sobre esta formación se depositó la Fm. Atajaña de edad Cretácico Superior, formación compuesta por conglomerados gruesos con algunas intercalaciones de lavas silíceas y de areniscas grises.

Valle de Azapa: (1) La Fm. Azapa de edad Terciaria Inferior, está compuesta por areniscas de grano fino a medio, colores pardos claros, con intercalaciones de arcillolitas pardo-oscuros y de conglomerados finos. Sus estratos se encuentran horizontalmente y aflora principalmente en la parte baja de las quebradas del valle de Azapa y hacia la costa, con un espesor máximo al este de 250 m. Esta formación también se encuentra en la zona costera de la cuenca. (2) La Fm. Oxaya de edad Terciaria Superior, está compuesta por ignimbritas de color gris claras y tobas blancas, aflora en todo el valle de Azapa, con espesores entre 60 m y 200 m. Por último, (3) sobre Oxaya, yace la Fm. El Diablo que está compuesta de conglomerados y areniscas gruesas alteradas, de colores oscuros con intercalaciones de evaporitas.

Cabe mencionar que durante el terciario se reactivaron fallas N-S que condicionaron el levantamiento del acantilado costero característico de la región. Además, las Fms. Camaraca, los Tarros y Atajaña fueron intruidas por un Plutón de composición diorítica correspondiente al Plutón El Buitre de edad Cretácica media a Superior que afloran en el valle de Azapa en la zona de Cabuza. Estas tres formaciones están fuertemente falladas según sistemas de dirección EO, NS y NE-SO, condicionando el fracturamiento de rocas. Por último, es importante de destacar que las rocas volcánicas impermeables presentan fallas que favorecen la circulación de agua.

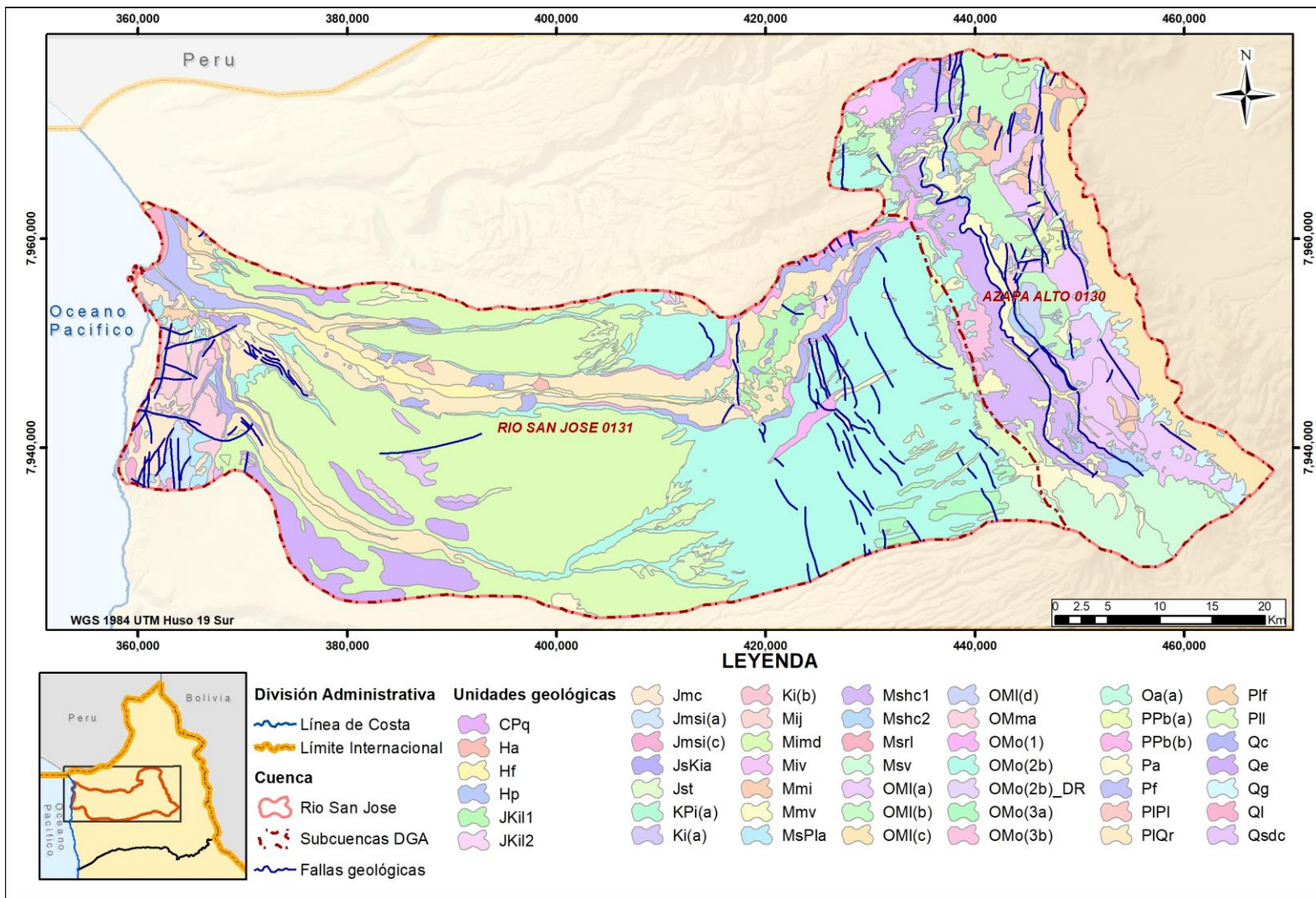


Figura 2-6. Mapa geológico de la cuenca del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a Mapa Geológico de Chile, en escala 1:1.000.000. SERNAGEOMIN (2004).

2.3.3 Suelos

A lo largo de la extensión de la cuenca, se encuentran diferentes tipos de suelo que entregan condiciones de permeabilidad y acumulación de agua subterránea, sobre todo en los sectores que colindan al río. Uno de los estudios de referencia es DGA-AC (2010), en donde se realizaron nuevas exploraciones geofísicas usando el método TEM y se describen diferentes perfiles transversales. En estos perfiles, descritos con mayor detalle en el Anexo J (sección 1.2.2), se encuentra una capa de sedimentos superficiales secos que se extiende a lo largo del valle. Bajo ella, se identifican lentes irregulares de arcillas, lo que bajan la conductividad hidráulica del acuífero en ciertas zonas. Además, bajo los sedimentos superficiales sueltos, se observan gravas arcillosas, configuración que se da en todo el valle. Las características edáficas relevantes para la modelación se detallan en el anexo H, específicamente en la descripción del modelo subcuenca Azapa Alto (sección 2.1) y subcuenca río San José (sección 3.1).

2.3.4 Hidrología

Las principales fuentes de agua superficial que drenan la cuenca corresponden a los ríos Seco, Ticnamar y San José. En la subcuenca Azapa Alto, nacen los ríos Seco y Ticnamar, ambos afluentes del río San José. El río Ticnamar drena al río San José un caudal promedio de aproximadamente 40 L/s considerando el periodo histórico 1995-2005. En la Figura 2-7 se grafica el caudal observado del río Ticnamar previo a la junta con el río San José, para el periodo 1995-2005.

La subcuenca río San José, donde se ubica el valle de Azapa, es atravesada por los 88 km del río San José, desde la confluencia entre el río Seco y el Ticnamar a los 2.477 m.s.n.m., hasta la desembocadura en la ciudad de Arica. Debido al trasvase por el canal Lauca, este río presenta un caudal base relativamente constante a lo largo del año en sus primeros kilómetros, antes de la bocatoma del canal de riego Azapa. Sin embargo, se registran importantes crecidas en épocas estivales (1997, 2001), como se observa en las Figura 2-7 y Figura 2-8 respectivamente, debido a las precipitaciones de las cuencas cordilleranas, drenadas por los ríos Seco y Ticnamar.

En la parte baja de la subcuenca, el río San José recibe aportes de escurrimiento superficial desde las quebradas de Acha, Llosyas y del Diablo. Las fuentes superficiales de la subcuenca del río San José se visualizan en la Figura 2-9.



Figura 2-7. Caudal observado en estación fluviométrica río Ticnamar en Ticnamar

Fuente: Elaboración propia (2022).

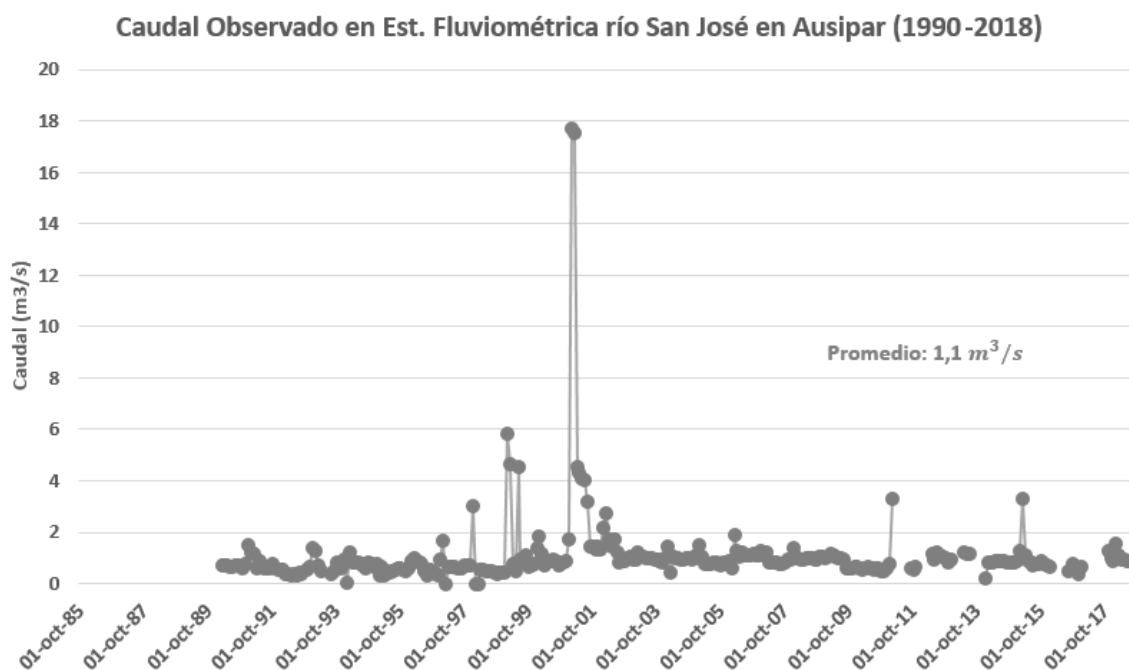


Figura 2-8. Caudal observado en estación fluviométrica río San José en Ausipar.

Fuente: Elaboración propia (2022).

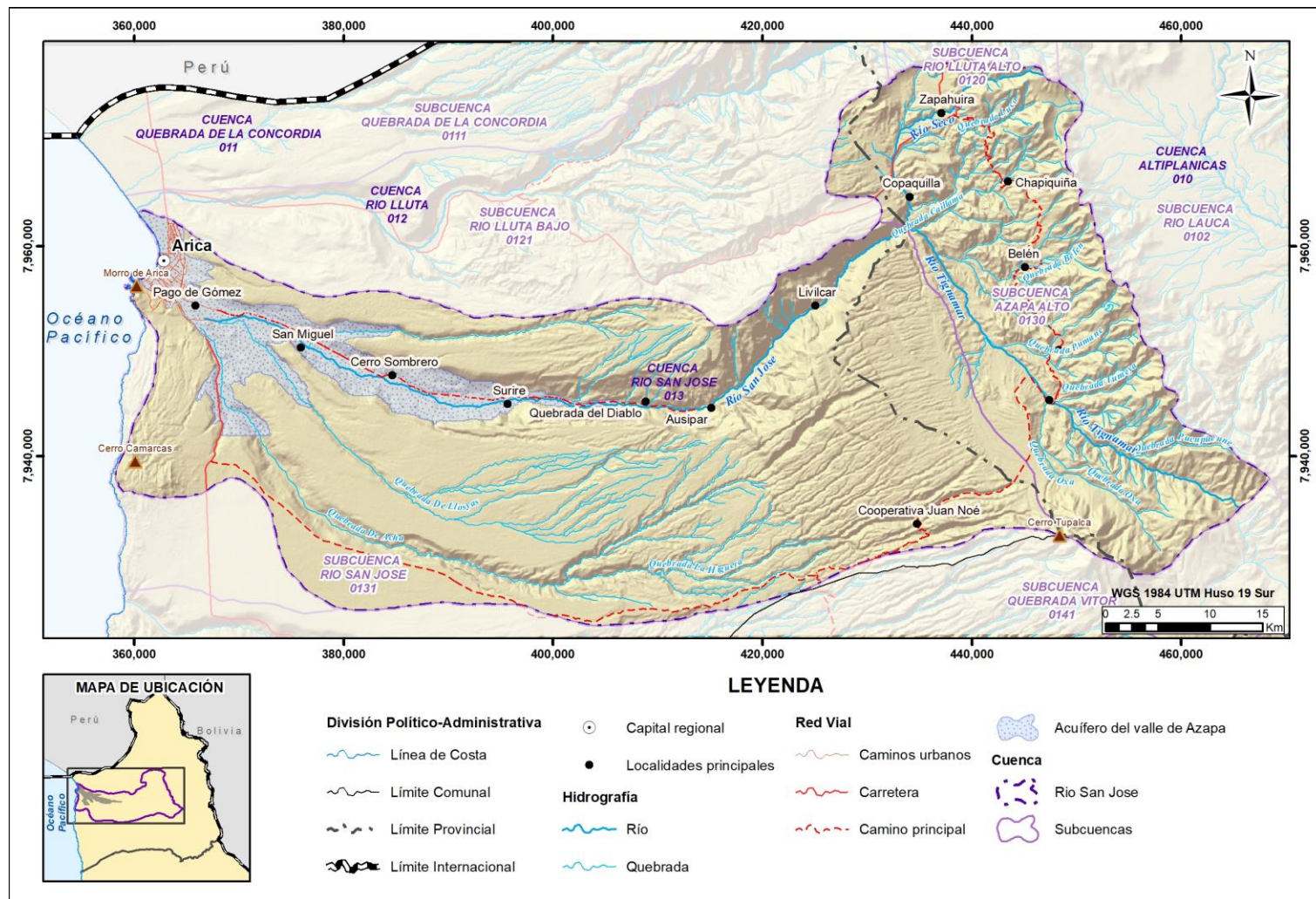


Figura 2-9. Fuentes superficiales en las subcuencas Azapa Alto y río San José.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

2.3.5 Hidrogeología

A modo de contextualización de la hidrogeología y las fuentes de agua subterráneas presentes en la cuenca, y complementando la información de los acápites anteriores, se presenta una descripción general de los almacenamientos acuíferos.

2.3.5.1 Descripción general almacenamiento acuífero

De acuerdo con Araneda y Avendaño (1997), en la ciudad de Arica y el valle de Azapa existe una alternancia de capas permeables e impermeables en la FM. Concordia que evitaría el paso de agua de mar a acuíferos más profundos. Debido a esto, los estratos profundos no presentan una clara contaminación de agua marina a pesar de que los niveles estáticos y dinámicos se ubican muy por debajo del nivel medio del mar, situación que se ha mantenido por muchos años.

Respecto al basamento en la zona del valle de Azapa, este presenta una profundidad que varía desde los 80 hasta los 270 m aproximadamente. Considerando los perfiles longitudinales al río realizados por Jiménez (2013), que contempla un estrato permeable, semipermeable y finalmente roca de baja permeabilidad, de abajo hacia la superficie, el acuífero estaría entre los 0 a 80 m de profundidad (ver Figura 2-10), originando capas libres y semiconfinadas (Jiménez, 2013; AC-Ingenieros, 2010).

La descripción del acuífero resultante de la aplicación del método TEM en el estudio de Jiménez (2013) desprende que, en la parte baja del valle la profundidad del acuífero es de 100 m aproximadamente, presentando una capa superficial permeable de aproximadamente 80 m de gravas arcillosas y lentes de arcilla a distintas profundidades. En los perfiles TEM que abarcan desde el kilómetro 18 al 30 del camino principal del valle de Azapa, el acuífero presenta una profundidad alrededor de 130 m, no obstante, las zonas más permeables se presentan entre la cota de terreno y los 70 m.

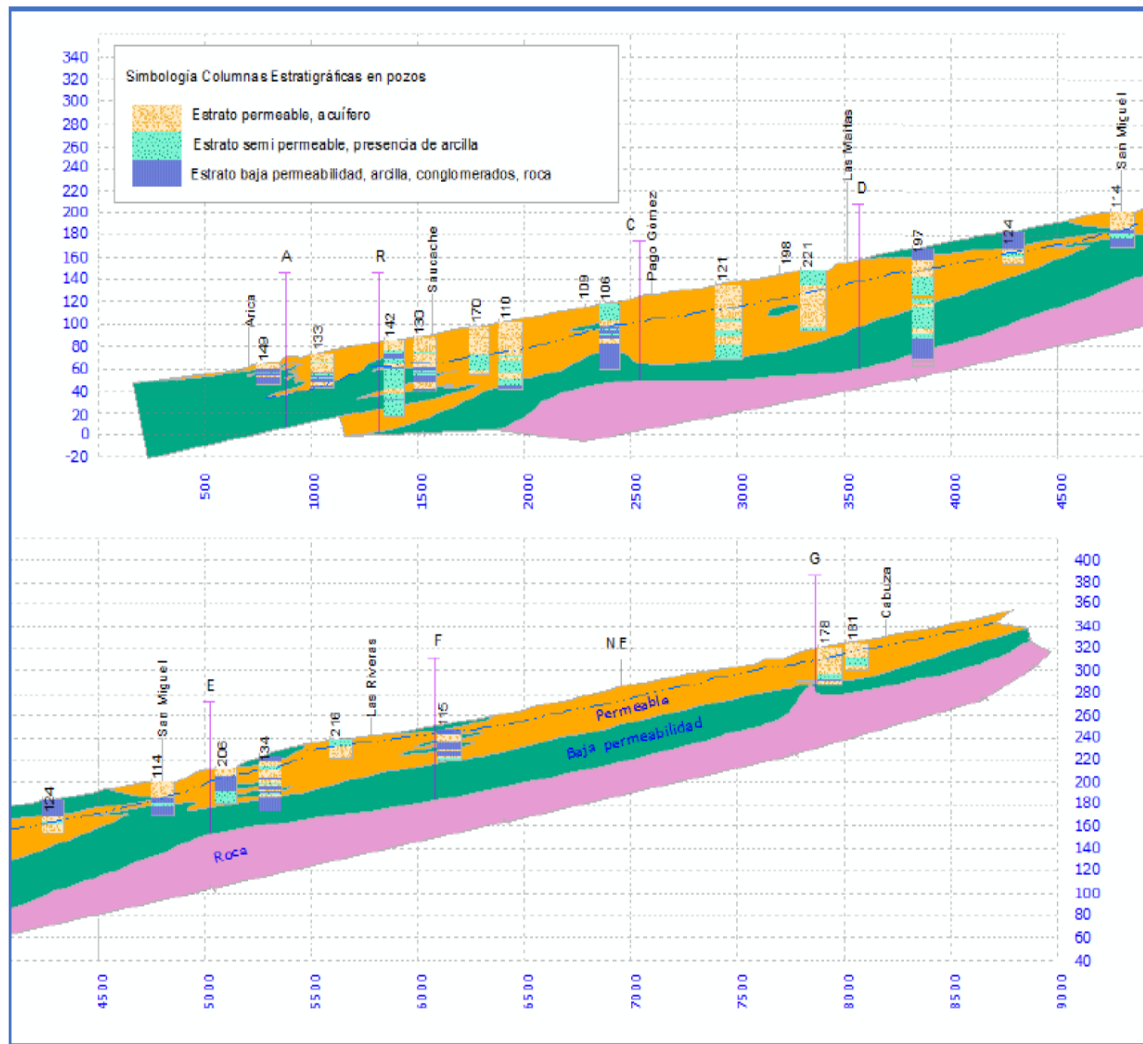


Figura 2-10. Perfil Longitudinal del valle de Azapa.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

2.3.5.2 Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas del acuífero presente en el valle de Azapa varían según los tipos de rocas y su formación, las que cambian desde la zona costera hacia las partes más altas del valle. De acuerdo con el informe DGA-ARRAU (1997), las rocas presentes en la cuenca, principalmente las mesozoicas, son prácticamente impermeables, por lo que se les puede considerar imposibilitadas de contener aguas subterráneas y, en consecuencia, formar acuíferos.

Las rocas Terciarias-Cuaternarias son conformadas por rocas tipo lavas, tobas, ignimbritas riolíticas, sedimentos y rocas sedimentarias de grano medio a grueso, con la cualidad de presentar alta permeabilidad. En cuanto a las rocas volcánicas impermeables, estas presentan fallas que permiten la circulación de agua. No obstante, la calidad de estas rocas como acuíferos es reducida, siendo su principal importancia la conformación de acuíferos confinados y fuentes termales.

Los depósitos de rellenos cuaternarios constituyen los principales contenedores de agua subterránea. Por el contrario, los depósitos exclusivamente de ladera no presentan las condiciones para formar acuíferos, ya que son impermeables y están desconectados de las zonas de recarga. Los depósitos fluviales son las principales vías para la circulación y recarga de las aguas subterráneas.

Debido a la ubicación de los depósitos de terrazas marinas, estos no constituyen áreas favorables para la recarga de las napas subterráneas. Sin embargo, se conectan lateralmente con depósitos fluviales, permitiendo la circulación de las aguas subterráneas. Con respecto a la porosidad de las rocas, esta es más alta en los depósitos sedimentarios y más baja en lavas y plutones.

En la Figura 2-11 se presentan las unidades hidrogeológicas importantes. Se destaca que en la parte baja del valle y en los sectores cercanos al río hay un desarrollo del acuífero con depósitos granulares. En específico, y de acuerdo con las descripciones detalladas en DGA-GP Consultores (2022) y en DGA-ICASS (2016), a continuación, se describen las principales Unidades Hidrogeológicas (UH) atinentes al acuífero del valle de Azapa en relación con la Figura 2-11 (parte media y baja de la cuenca del río San José):

- UH I: unidad que posee depósitos aluviales, fluviales y litorales, que presenta un régimen libre y que está conformado por gravas, arenas, limos y arcillas. Localmente se identifica una capa de ignimbritas o tobas que separa esta unidad de un acuífero libre superior y un acuífero confinado inferior. En esta unidad presenta una permeabilidad primaria, otorgándole una alta importancia hidrogeológica. A partir de lo anterior, es importante destacar que en la UH 1 es donde se han perforado la mayor cantidad de pozos.
- UH IV: esta unidad, que presenta un régimen libre, está conformada por depósitos eólicos, coluviales, de remoción en masa, de depósitos de las formaciones El Diablo y Azapa y también de avalanchas desde el Lluta. Dichos depósitos corresponden a materiales detríticos semi consolidados y consolidados. La importancia hidrogeológica de esta unidad es de media a baja.
- UH V: esta unidad está conformada por ignimbritas de la Formación Oxaya, secuencia de rocas volcánico-sedimentarias de flujos piroclásticos de tobas y/o consolidadas. Dicha formación se encuentra moderada a intensamente plegada y fracturada. Por lo anterior, la importancia hidrogeológica es baja.
- UH VI: por último, esta unidad está conformada por una secuencia de rocas marinas, las que están ubicadas en el sector bajo de la cuenca, específicamente en la Formación Livilcar. La porosidad primaria es nula en la UH IV, con bajo grado de fracturación, características que determinan su bajo o incluso muy bajo potencial hidrogeológico.

En el Anexo J sección 1.2.2 se presenta información complementaria sobre la hidrogeología de la cuenca, mientras que en el Anexo H se presentan las propiedades y parámetros hidrogeológicos utilizados para la modelación (geometría, basamento, conductividad, porosidad, tipo de acuífero, entre otros).

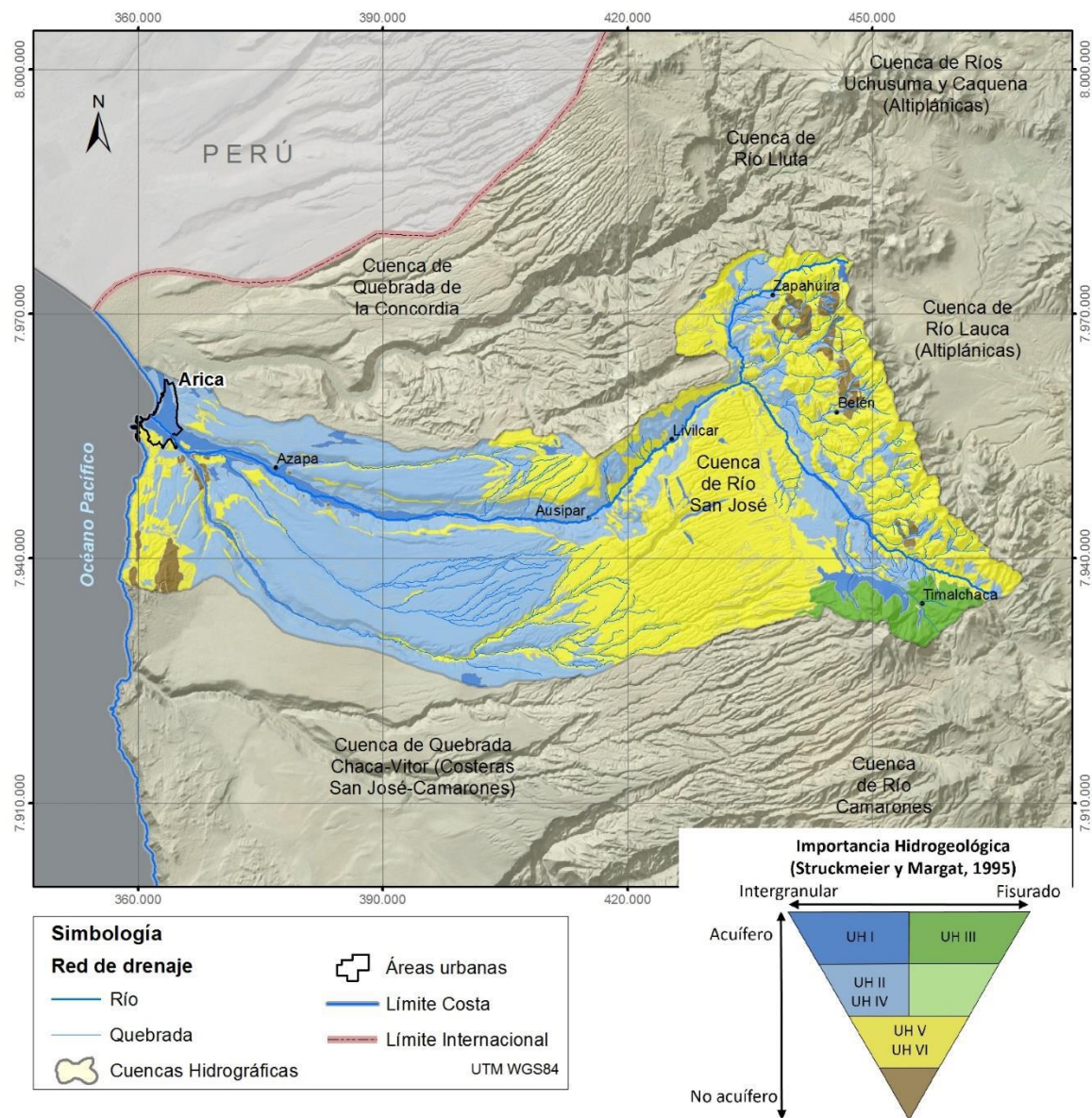


Figura 2-11. Unidades de importancia hidrogeológica de la cuenca del río San José.

Fuente: DGA-ICASS (2016) y DGA-DICTUC (2020).

2.4 CLIMA

En este acápite se presenta una caracterización climática general de la cuenca del río San José, en conjunto a la caracterización de la variabilidad climáticas y los eventos extremos, en un contexto de cambio climático. En esta línea, el acápite también menciona como se incorporó dicha variabilidad hacia el futuro, a partir de escenarios de cambio climático que fueron considerados en la modelación acoplada.

2.4.1 Caracterización climática

Las condiciones climáticas en el valle de Azapa describen una zona hiper árida, influenciada principalmente por los efectos del Anticiclón del Pacífico Sur y el descenso de masas de aire cálidas y secas como consecuencia del patrón de circulación general de la célula de Hadley. Sin embargo, el efecto orográfico de la Cordillera de los Andes permite que en las partes altas de esta (> 3.000 m.s.n.m.) se produzcan mayores valores de precipitación respecto de los valles próximos al litoral. A partir de estas condiciones climáticas, desde la cuenca Azapa Alto se generan importantes aportes por escurrimiento hacia el valle de Azapa, los que generan una interacción del recurso hídrico a nivel superficial y subterráneo en esta zona. El efecto de esta condición natural ha permitido el desarrollo de actividades agrícolas en el valle de Azapa y el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Arica. Por tanto, es posible diferenciar que en el caso de la subcuenca del río San José, el tipo de clima es desértico, con una estación árida prolongada, que recibe un aporte superficial y subterráneo de agua desde la subcuenca Azapa Alto, la que está sujeta a un clima altiplánico, con intensas lluvias estivales (DGA-DICTUC, 2020).

De acuerdo con la clasificación de Köppen, es posible diferenciar cinco denominaciones climáticas que tienen representación en la cuenca del río San José (Tabla 2-2). La distribución geoespacial de dichas denominaciones climáticas, de acuerdo con el trabajo de Sarricolea *et al.* (2017), se presentan en la Figura 2-12. Cabe destacar que la escala de dicho levantamiento fue de 1:1.500.000 (país), por lo tanto, los límites de cada denominación climáticas pueden estar discontinuos porque se visualizan a una escala mucho menor (cuenca).

Tabla 2-2. Clasificación climas de Köppen en la cuenca del río San José.

Código	Denominación Clima	Precipitación media máxima [mm]	Temperatura media [°C]	Breve descripción de denominaciones climáticas presentes en la cuenca
BWh	Desértico cálido	10	18,5	Los inviernos son suaves, aunque en zonas del interior las temperaturas pueden acercarse por la noche a los cero grados. Los veranos son cálidos o muy cálidos. En algunas zonas con este clima las temperaturas en verano son extremadamente altas, y se han registrado las máximas del planeta. Las precipitaciones son muy escasas.
BWk	Desértico frío	10	16	Los inviernos son muy fríos y los veranos templados o cálidos. Las precipitaciones son muy escasas. La vegetación es la propia del desierto, o inexistente.
BWk(w)	Desértico frío de lluvia estival	10	13	Similar al clima descrito anteriormente, pero con un régimen de precipitaciones mayor, con por lo menos un mes bajo los 60 mm.
BSk(w)	Semiárido de lluvia estival	65	8,5	Los inviernos son fríos o muy fríos, y los veranos pueden ser templados o cálidos. Las precipitaciones son escasas. La vegetación natural es la estepa.
ET(w)	Tundra de lluvia estival	120	4	La temperatura media del mes más cálido está entre 0°C y 10°C. Sólo hay musgos y hierbas cuando la temperatura media supera los 0°C.

Fuente: Elaboración propia en base a Sarricolea *et al.* (2017).

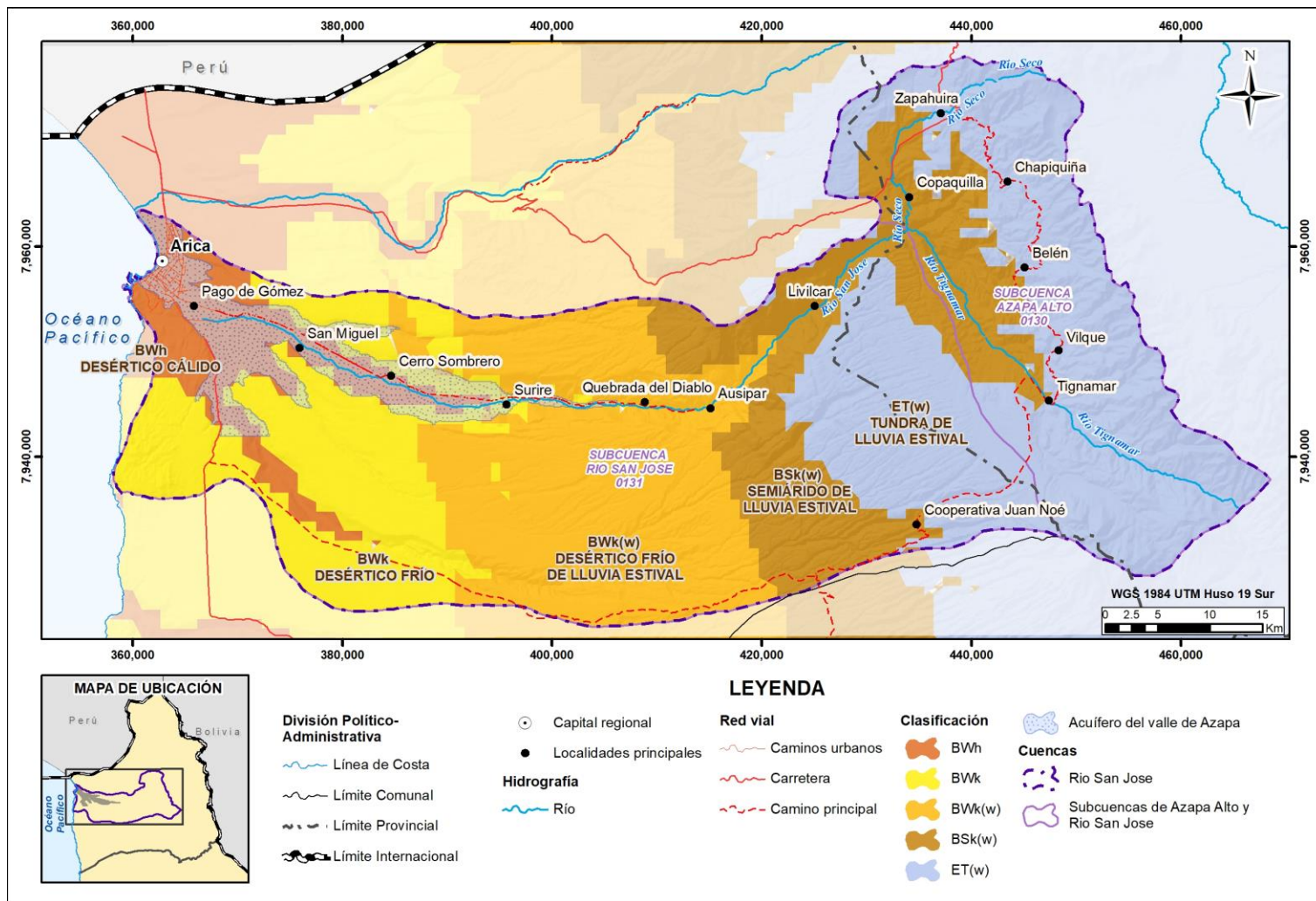


Figura 2-12. Distribución de climas de Köppen en la cuenca del río San José.

Fuente: Elaboración propia a Sarricolea *et al.* (2017).

En cuanto a la precipitación y temperatura, la cuenca posee un gradiente importante de acuerdo con los cambios de altitud y la climatología descrita anteriormente. Cabe destacar que la información que se presenta a continuación sobre ambas variables corresponde tanto a observaciones in situ en estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca, así como información extraída de las forzantes meteorológicas asociadas a los productos grillados de CR2MET 2.0, para todo el periodo histórico (1986-2018), cuya resolución espacial es 0.05 ° de latitud y longitud (5 km aproximadamente), y cuyos datos fueron empleados en la modelación acoplada del presente PEGH.

De modo idéntico, la altitud a lo largo de la cuenca influye directamente en la magnitud de las precipitaciones. Según los registros de las estaciones meteorológicas Central Chapiquiña, Belén y Tignamar de la DGA (Figura 2-27), la precipitación media anual de la subcuenca Azapa Alto osciló entre los 120 y 150 mm durante el periodo 1985-2018, con mayor presencia durante los meses de verano. Por otra parte, para el mismo periodo de estudio, los registros de la subcuenca del río San José no superan los 10 mm al año, donde incluso en la mayoría del año la precipitación es nula. En el caso de Azapa Alto, la Figura 2-13 ilustra que la precipitación observada media mensual en el periodo 1986-2016 superó en varios años los 100 mm en la época estival, con un evento extremo de más de 400 mm.

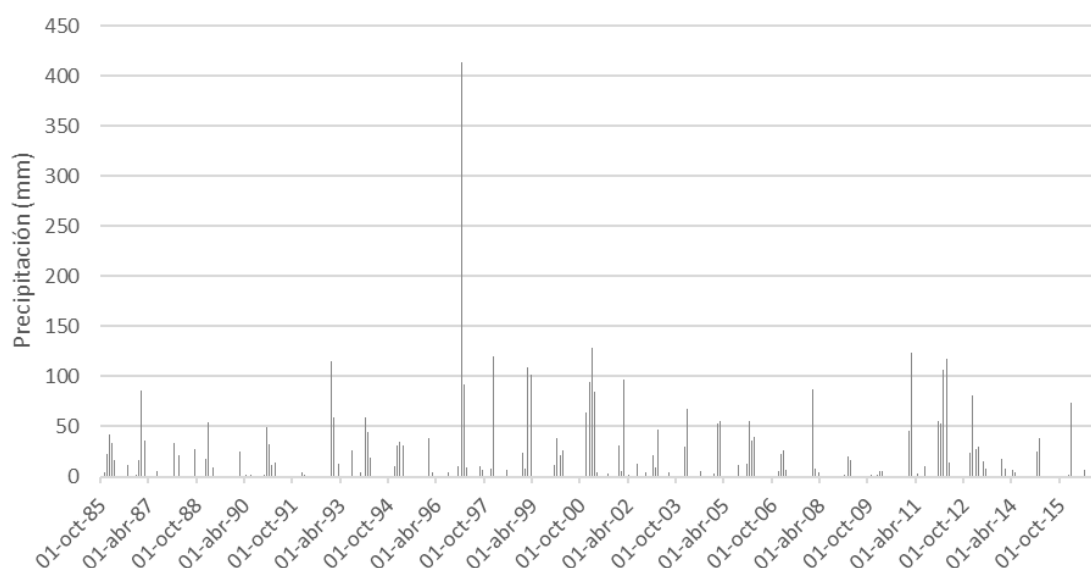


Figura 2-13. Precipitación mensual observada en la estación Meteorológica Tignamar Código BNA 01300008-5 Altitud 3.230 m.s.n.m. (1986-2016).

Fuente: Elaboración propia (2022).

En términos promedio, en la Figura 2-14 se presenta el diagrama ombrotérmico representativo de la subcuenca del río San José, donde se observa que la precipitación suele ser bastante reducida a lo largo de todo el año y con una temperatura media en torno a los 18° C, propio de un clima desértico. Por otra parte, en la Figura 2-15 se

presenta el mismo tipo de diagrama para la subcuenca de Azapa Alto², con una estación lluviosa estival, con montos promedios de precipitación estival superiores a 50 mm, y temperaturas medias frías, propias de semiárido e incluso tundra de lluvia estival.

En cuanto a las forzantes climáticas, la Figura 2-16 muestra la distribución espacial de los datos grillados de precipitación del CR2 que fueron ajustados a los datos de las estaciones meteorológicas de la cuenca, según el procedimiento descrito en el Anexo H, sección 1.6. A partir de la Figura, se observa claramente que las precipitaciones promedios máximas son del orden de los 200 mm en la subcuenca de Azapa Alto, mientras que en la parte baja los datos tienden a 0 mm.

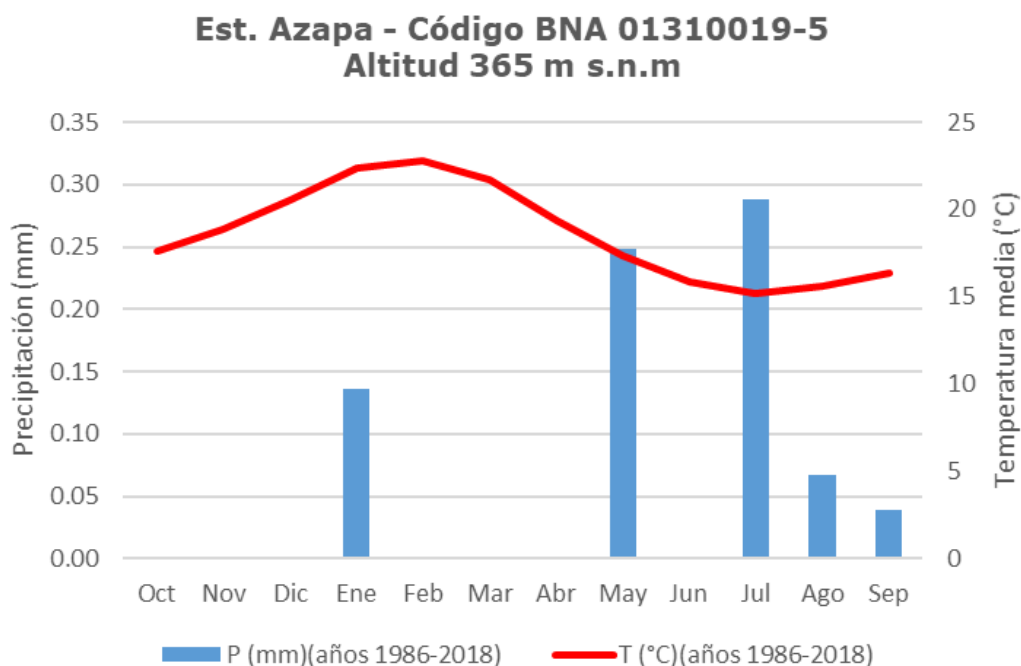


Figura 2-14. Diagrama ombrotérmico representativo con precipitación y temperatura media de la subcuenca del río San José, Estación Azapa Código BNA 01310019-5, Altitud 365 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia (2022).

² Cabe destacar que, en el caso de Azapa Alto, los datos de precipitación más extensos se encuentran en la estación meteorológica Central Chapiquiña, mientras que los únicos datos de temperatura se encuentran en la estación meteorológica Murmuante, y son solo de un año.

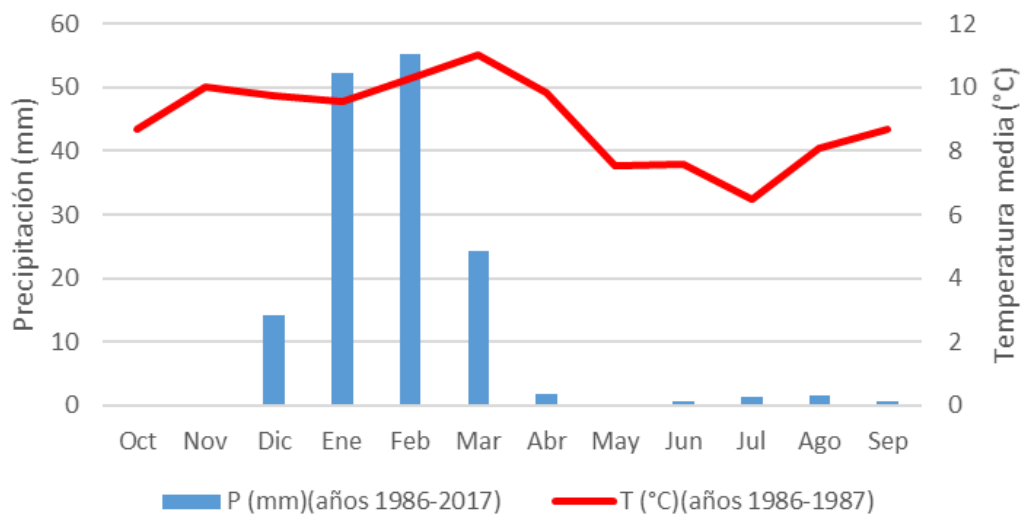


Figura 2-15. Diagrama ombrotérmico representativo de la subcuenca de Azapa Alto, con datos de precipitación media en la estación Central Chapiquiña (código BNA 01300006, Altitud 3.350 m.s.n.m.) y de temperatura de la estación Murmuante.

Fuente: Elaboración propia (2022).

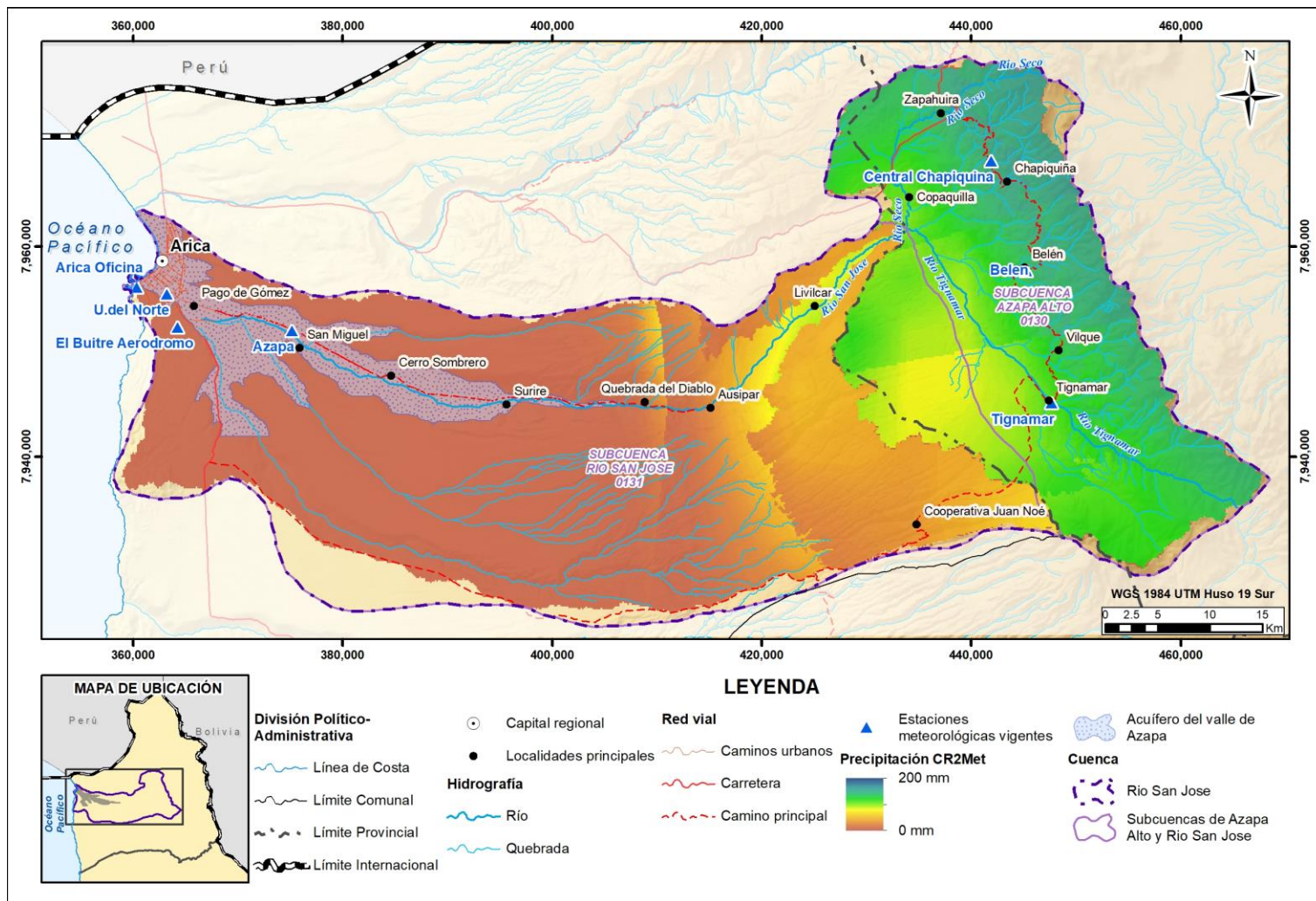


Figura 2-16. Distribución geoespacial de las precipitaciones promedio anual en la cuenca del río San José (1986-2018).

Fuente: Elaboración propia en base a CR2 MET (2022).

Con respecto a la temperatura, y en línea con la altitud de la cuenca, la estimación en base a los productos grillados del CR2MET resultó en un gradiente cercano a $-3^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ (ver Figura 2-17). Este gradiente aplica para ambas subcuencas. Tanto en el Anexo F sección 2.1.1 como en el Anexo H sección 1.6 se presenta la metodología para la estimación de la temperatura. Según el MMA (2016), la temperatura promedio por comuna corresponde a: (1) Periodo estival (dic-ene-feb) en la zona cordillerana de Arica a $6,4^{\circ}\text{C}$ y en la zona de valles interiores de Putre a $11,9^{\circ}\text{C}$; y (2) periodo invernal (jun-jul-ago.) en la zona cordillerana de Arica a $1,9^{\circ}\text{C}$ y en la zona de valles interiores de Putre a $6,9^{\circ}\text{C}$. En la Figura 2-18 se muestra la distribución espacial de la temperatura en base a los datos del CR2. Se desprende de la Figura una gran diferencia entre la parte baja y alta de la cuenca en cuanto a las temperaturas medias, con valores cercanos a 0°C en la parte alta de la subcuenca de Azapa Alto.

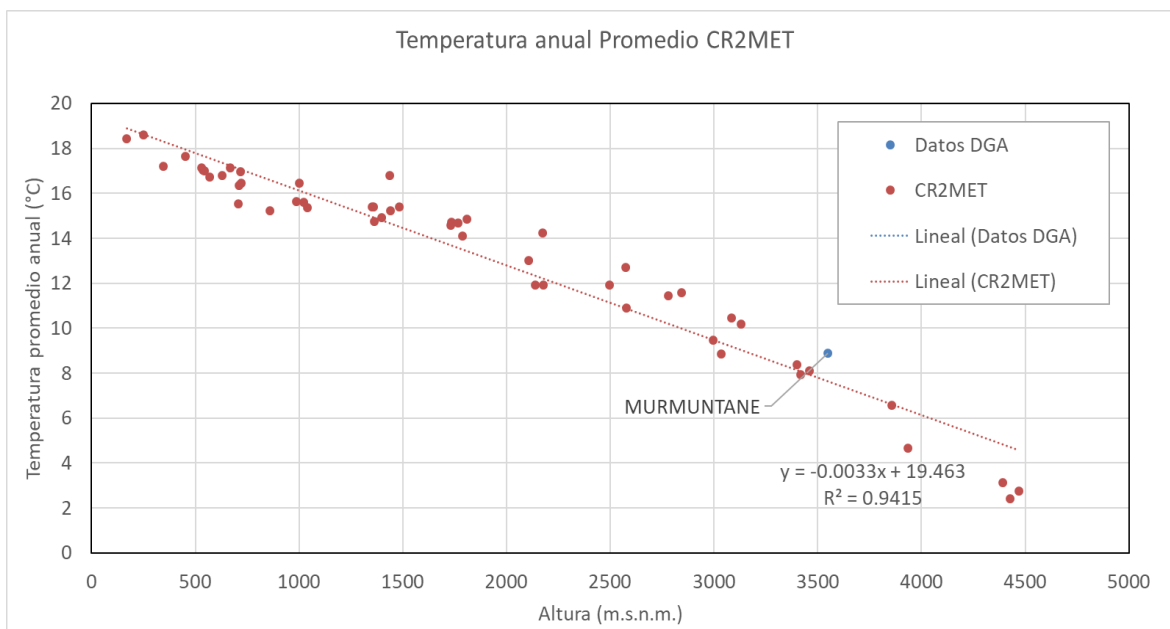


Figura 2-17. Gradiente de temperatura para la cuenca del río San José.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

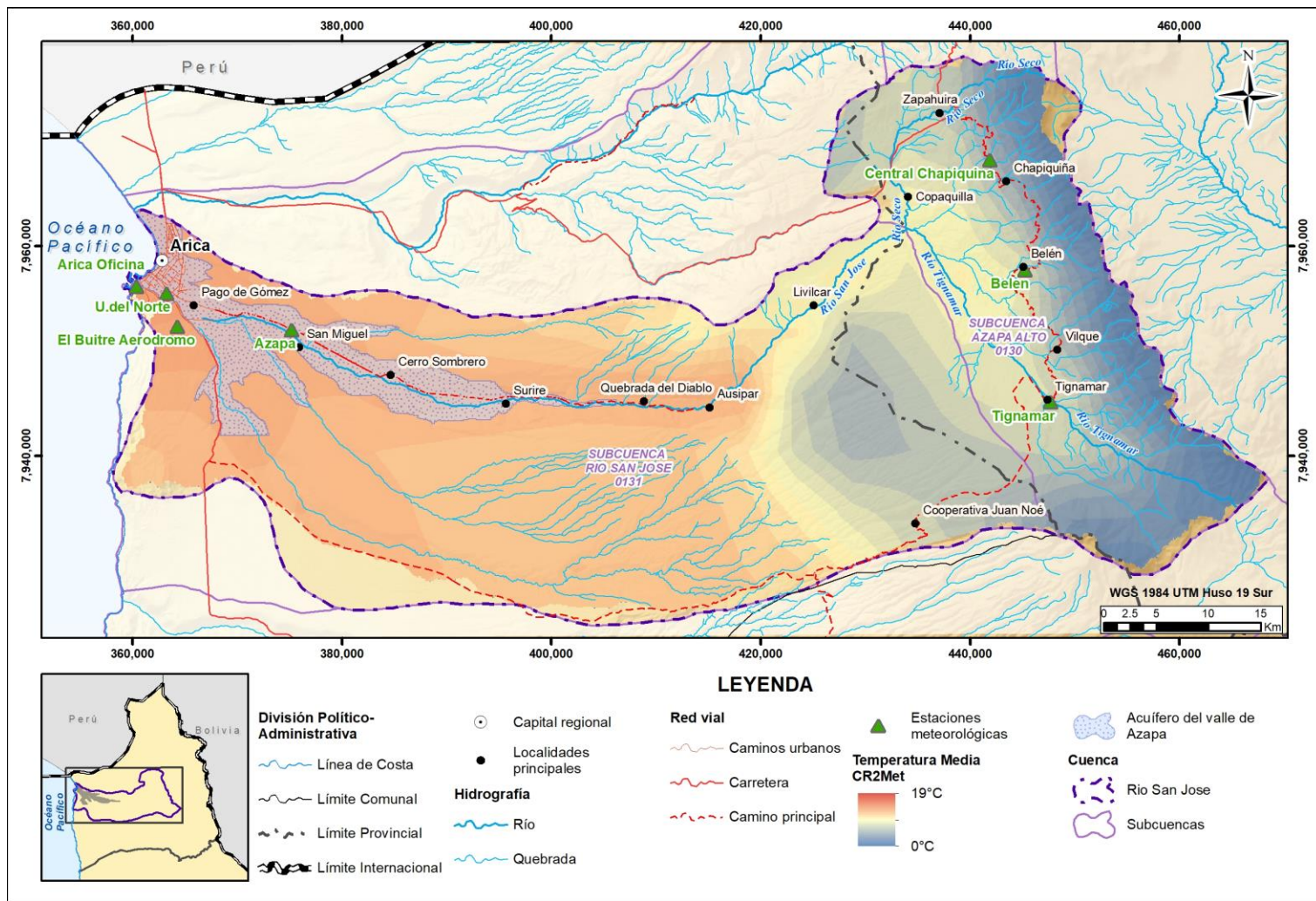


Figura 2-18. Distribución geoespacial de las temperaturas promedio anuales en la cuenca del río San José (1986-2018).

Fuente: Elaboración propia en base a CR2 (2022).

2.4.2 Eventos extremos y variabilidad climática

La caracterización de los eventos extremos y variabilidad climática que influyen y determinan el panorama de riesgos de la cuenca del río San José se presentan a continuación. A partir de un análisis de eventos extremos, de variabilidad climática y de los escenarios futuros de cambio climático, es importante destacar que las crecidas e inundaciones representan los eventos extremos más recurrentes para el área de estudio, con un escenario futuro complejo y de incertidumbre, en especial con las precipitaciones.

2.4.2.1 Análisis de eventos extremos

El análisis de los eventos extremos utiliza como base la plataforma DesInventar³, herramienta metodológica creada para generar un Inventario Nacional de Desastres Naturales y la construcción de una base de datos de daños, pérdidas y efectos generales producidos por estos eventos.

Para las comunas de la cuenca de estudio (Arica, Putre), los eventos más recurrentes según la base de datos previamente mencionada son, inundaciones, incendios y tormentas, no obstante, se agregaron al análisis los eventos de sequía, crecidas y aluviones. En el Anexo C se definen cada uno de estos eventos y en la Tabla 2-3 se presenta la frecuencia de estos por períodos de 10 años. Es de relevancia señalar que, el total de datos sobre los eventos extremos fue complementado con información periodística de noticias y diarios tanto nacionales como regionales. Cabe destacar que los incendios corresponden en su totalidad a eventos relacionados con construcciones en la ciudad de Arica y otras localidades de la comuna.

Tabla 2-3. Frecuencia de eventos extremos en las comunas de la cuenca del río San José.

Año	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Inundaciones	4	1	8		2
Sequía	2	1	3		
Crecidas	3			1	4
Tormentas	2	1	1		
Aluviones	1			2	

Fuente: Elaboración propia a partir de la plataforma DesInventar y prensa en línea (2022).

Uno de los eventos más relevantes resulta la crecida de febrero del año 2001, en donde se registró un caudal instantáneo máximo del orden de los 145 m³/s según el registro fluviométrico ubicado en el cauce del río San José, en el puente Saucache, ciudad de Arica (DGA-AC, 2010). El evento trajo consigo una importante contribución de recarga hacia el acuífero, tal como se observa en el alza de los niveles observados en los pozos DGA posteriores a la fecha de la crecida.

³ Plataforma web base de datos; <https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp>

2.4.2.2 Variabilidad climática

Para la variabilidad climática histórica y futura, en el presente acápite se presenta el análisis de las variables meteorológicas de precipitación y temperatura. El detalle de las metodologías para determinar la variabilidad climática se encuentra en el Anexo F acápite 2.1.1.

En la Figura 2-19 y Figura 2-20 se observa la variación de las precipitaciones y la temperatura en el valle de Azapa, representativo de la subcuenca río San José y en Azapa Alto. Se observa que la mayor precipitación se encuentra en los meses de verano, siendo febrero el con mayor precipitación en la subcuenca de San José y en el mes de enero en la subcuenca Azapa Alto. Como se mencionó anteriormente en la subcuenca Azapa Alto se encuentran las mayores precipitaciones bordeando los 25 mm como media mensual. En ambas cuencas se observa una disminución de las precipitaciones en un escenario futuro.

Respecto a la temperatura, también los meses de verano presenta los mayores valores, siendo las temperaturas más altas la que se registran en la subcuenca río San José, bordeando los 20°C. En esta variable, se observa un aumento de la temperatura a futuro, donde los valores superan los 20°C en los meses de verano en la subcuenca del río San José.

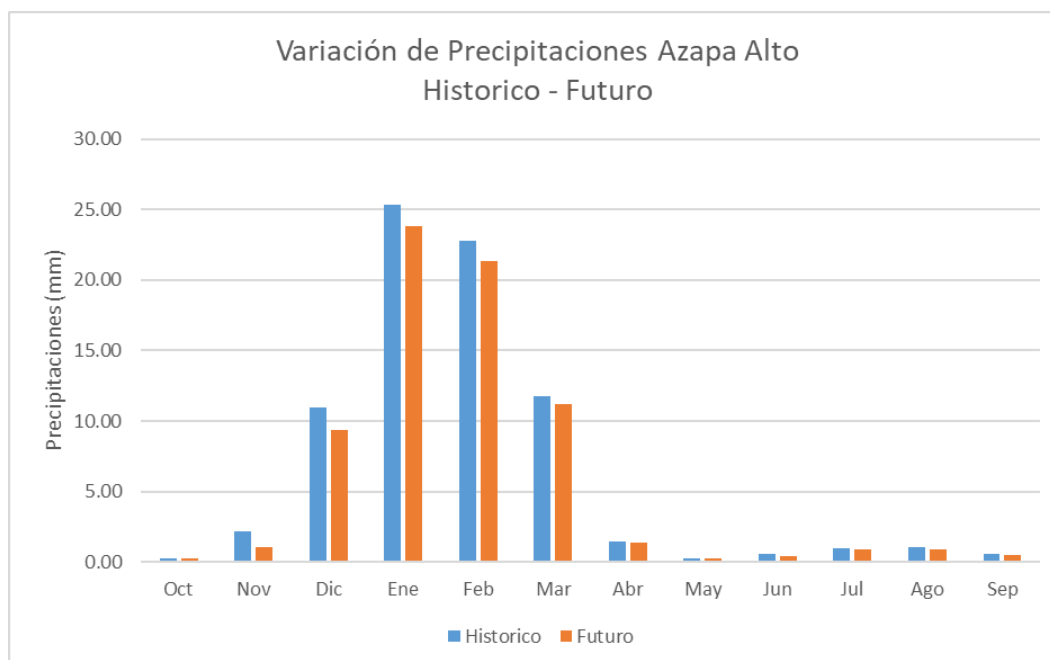
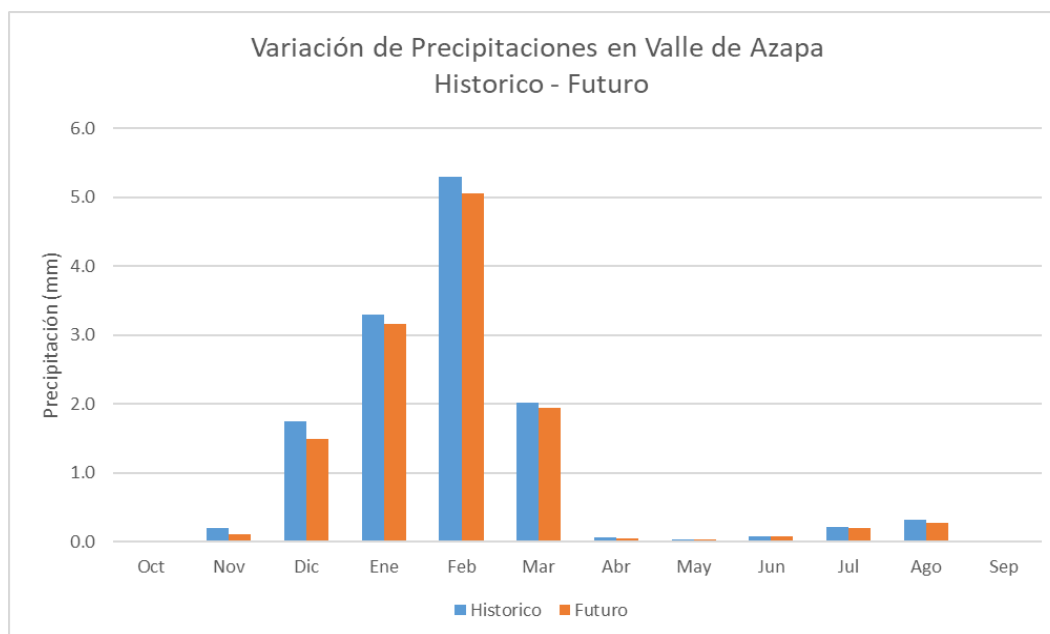


Figura 2-19. Variación de precipitaciones en las subcuencas río San José (arriba) y Azapa Alto (abajo).

Fuente: DICTUC-DGA (2020).

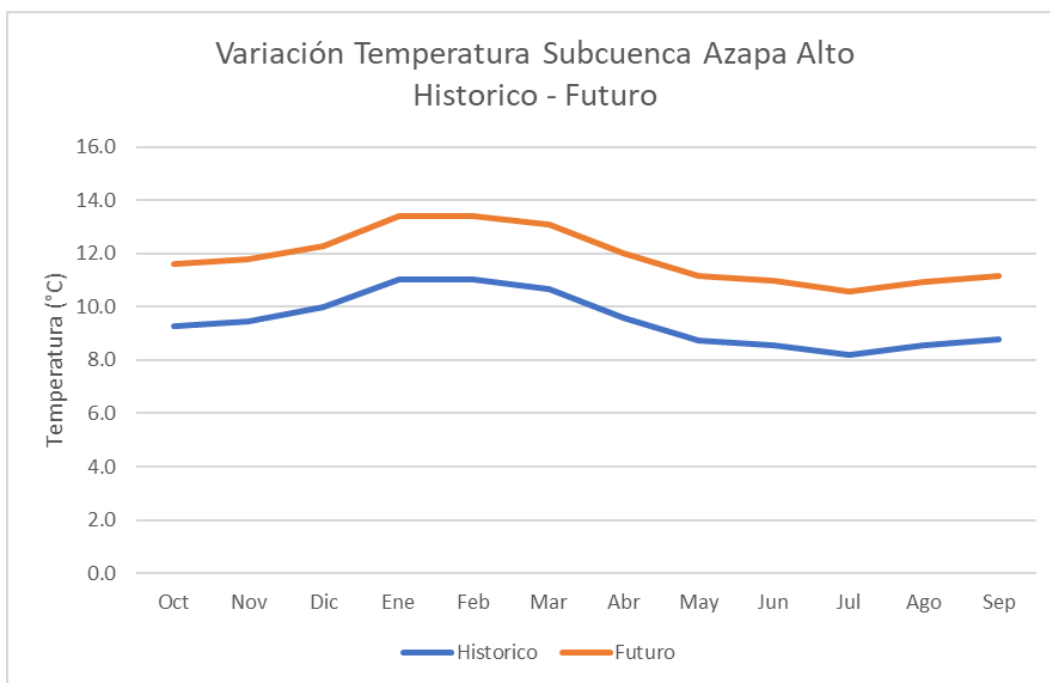
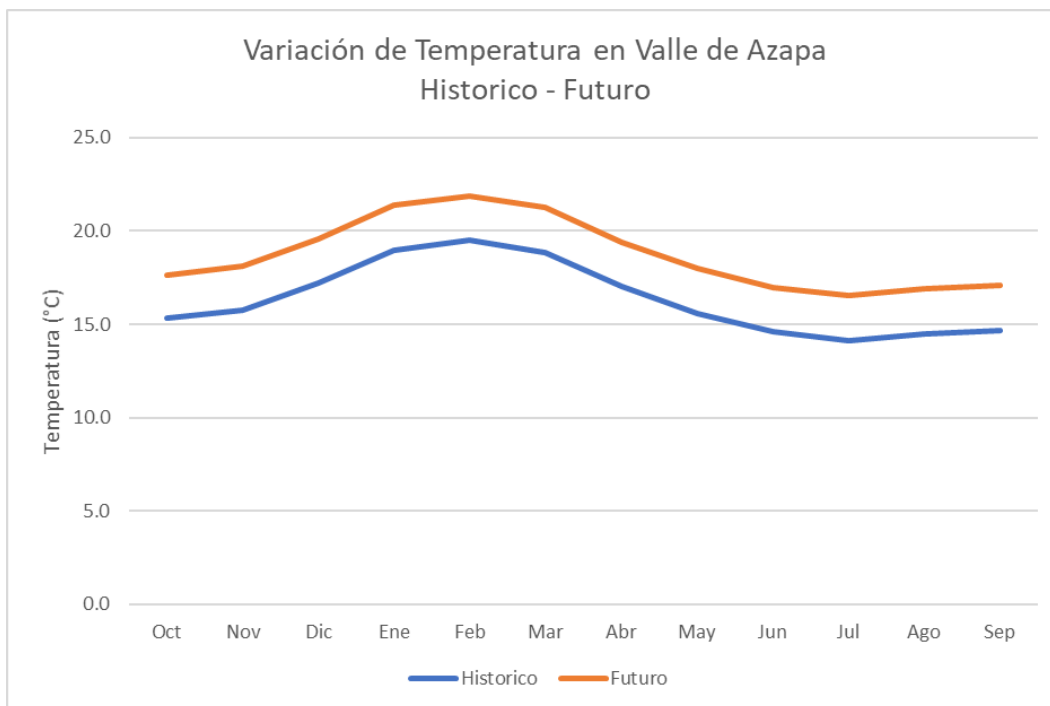


Figura 2-20. Variación de la temperatura en las subcuencas río San José (arriba) y Azapa Alto (abajo).

Fuente: DICTUC-DGA (2020).

2.4.3 Escenarios de cambio climático

Los métodos para desarrollar proyecciones y series futuras de precipitación y temperatura se basan en Modelos de Circulación General (GCM) de la atmósfera, los cuales tienen un alcance espacial relativamente grande. Estas simulaciones pueden considerar distintos escenarios potenciales de concentración de gases de efecto invernadero, también denominadas, Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés), las cuales se asocian a diferentes niveles de forzamiento radiativo, que varían entre 2,6 y 8,6 W/m².

Para proyectar el clima futuro a partir de las simulaciones de los GMC, se utilizó el método Delta Change, que es el método recomendado por la literatura para este tipo de climas, caracterizados por tener muchos datos de precipitación 0 a lo largo de la serie histórica, lo que impide ajustar una distribución de probabilidad estadística para la proyección futura. El método Delta Change permite integrar las tendencias climáticas simuladas a escala global con el comportamiento climático a una escala menor, el método consiste en replicar la serie mensual histórica (1985-2018) hacia el futuro para la precipitación y la temperatura por factores de cambios o deltas, calculados a partir del ensamble de 19 GCMs utilizados en el estudio MMA (2016), los que se presentan en la Tabla 2-4. Estos datos son considerados bajo un escenario pesimista o de alta carga de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5).

Tabla 2-4. Listado de GCM utilizados para la construcción del escenario de cambio climático.

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: Elaboración propia en base a MMA (2016).

Debido a que los datos del MMA (2016) son a escala comunal, se obtuvo la tasa de cambio de precipitación y temperatura en las comunas de Putre y Arica, dado que la delimitación de los modelos WEAP⁴ Azapa Alto y WEAP valle de Azapa predominan respectivamente a cada comuna. La Tabla 2-5 muestra las tasas de cambio anual al año 2050 de la precipitación y temperatura del estudio del MMA (2016). Mayores detalles se encuentran en el Capítulo 5 sección 5.1.2.

Tabla 2-5. Tasas de cambio proyectadas al año 2050 para la precipitación promedio anual en la zona de influencia de la cuenca Azapa Alto.

Comuna	Tasa de Cambio Precipitación			Tasa de Cambio Temperatura	
	PPA	PPA Min	PPA Max	Tmed	Timed
Arica	-6,2%	-8,2%	-4,6%	2,4°C	2,8°C
Putre	-6,6%	-6,7%	-6,4%	2,4°C	2,8°C

PPA: Precipitación normal anual PPA Min: Precip. anual mínima PPA Max: Precip. anual máxima. Tmed: Temp. media periodo estival (Dic -Ene- Feb) Timed: Temp. media periodo invernal (Jun-Jul-Ago).

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

2.5 DIMENSIÓN AMBIENTAL

En este acápite se presentan los ecosistemas identificados en la cuenca. Se exponen también las áreas protegidas y sitios prioritarios de conservación ubicados en el área de estudio.

2.5.1 Unidades ecosistémicas

Para la caracterización de las unidades ecosistémicas presentes en la cuenca del río San José, se diferencian a continuación los pisos vegetacionales a nivel de ecosistemas terrestres y se destaca la ausencia de ecosistemas acuáticos con flujos de agua permanente dentro de la cuenca del río San José.

2.5.1.1 Ecosistemas terrestres

Las formaciones y pisos vegetacionales presentes en la cuenca del río San José según Luebert y Pliscoff (2016) se presentan en la Tabla 2-6 y Figura 2-21, la descripción en detalle de cada piso vegetal se encuentra en el Anexo J sección 1.4.1. La mayor parte de la cuenca está dominada por la formación de desierto absoluto, seguido de Matorral Bajo de altitud en diversas formas según los pisos vegetacionales. Es

⁴ El modelo hidrológico superficial presentado en el presente PEGH utilizó el programa computacional Water Evaluation And Planning (WEAP). Fue creado en 1988 como iniciativa del Stockholm Environment Institute (SEI) (SEI, 2022) con el objetivo de integrar el uso sostenible del agua ante problemas contemporáneos que afectan su alta demanda, su limitada oferta, la calidad de la misma, su preservación y protección del ecosistema, que se traducen finalmente en la creación de nuevas políticas de uso del agua en distintas regiones.

importante resaltar la condición de aridez que caracteriza a la cuenca donde los ecosistemas terrestres son más vulnerables.

Tabla 2-6. Pisos vegetacionales presentes en la cuenca del río San José.

Formación	Código Piso	Piso	Superficie (km²)
Desierto absoluto	P1	Desierto tropical interior con vegetación escasa	1.266
Bosque espinoso	P30	Bosque espinoso tropical interior de <i>Geoffroea decorticans</i> - <i>Prosopis alba</i>	193
Dunas de aerófitos	P2	Dunas tropicales costeras de <i>Tillandsia landbeckii</i> - <i>T. marconae</i>	53
Matorral desértico	P4	Matorral desértico tropical interior <i>Malesherbia auristipulata</i> - <i>Tarasa operculata</i>	172
Bosque espinoso	P31	Bosque espinoso tropical andino de <i>Browningia candelaris</i> - <i>Corryocactus brevistylus</i>	136
Matorral bajo desértico	P23	Matorral bajo desértico tropical andino de <i>Atriplex imbricata</i> - <i>Acantholippia deserticola</i>	437
Matorral bajo de altitud	P97	Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana ramulosa</i> - <i>Displotephium meyenii</i>	606
Matorral bajo de altitud	P100	Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lepidophylla</i> - <i>P. quadrangularis</i>	160
Matorral bajo de altitud	P99	Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> - <i>Festuca orthophylla</i>	30
Matorral bajo de altitud	P98	Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> - <i>Azorella compacta</i>	90
Matorral bajo de altitud	P101	Matorral bajo tropical andino de <i>Azorella compacta</i> - <i>Pycnophyllum molle</i>	52

Fuente: Elaboración propia en base a Luebert y Pliscoff (2016).

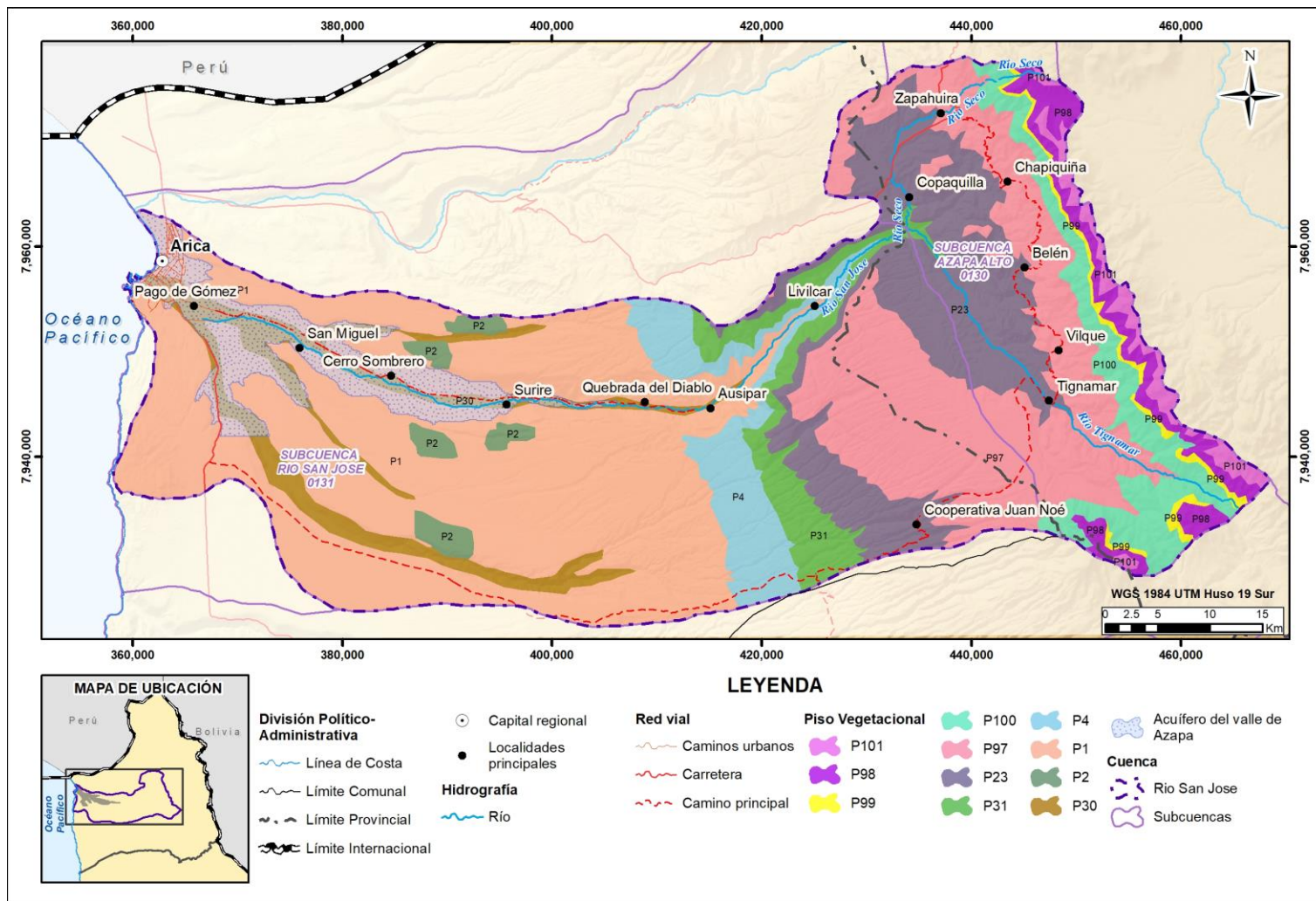


Figura 2-21. Pisos vegetacionales en la cuenca del río San José.

Fuente: Elaboración propia en base a Luebert y Pliscoff (2016).

2.5.1.2 Ecosistemas acuáticos

Los ecosistemas acuáticos como vegas, bofedales, lagos y lagunas andinas no se encuentran dentro de los límites de la cuenca. Destaca que no se presentan cursos de agua relevantes con escurrimientos superficiales permanentes. No obstante, y en complemento al acápite siguiente, es importante mencionar que la seguridad hídrica del valle de Azapa, en relación con la seguridad de riego, depende fuertemente de las lagunas altiplánicas y bofedales del Parque Nacional Lauca, cuyas aguas son trasvasadas hacia el valle de Azapa (ver capítulo 2.6.1.1 Canales). Dichas aguas provienen por tanto de la subcuenca del río Lauca, de la subcuenca del río Desaguadero Cotacotani y de la subcuenca del Lago Chungará⁵ (DGA-Matraz, 2015).

2.5.2 Áreas silvestres protegidas y otras figuras de conservación

En cuanto a las áreas protegidas, según el Registro Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) del Ministerio del Medio Ambiente (2022), dentro de la cuenca del río San José no se ubica ninguna designación de área protegida. Conforme a la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE) (2022) tampoco se encuentran vegas, bofedales o acuíferos bajo protección dentro del territorio.

No obstante, según datos IDE, se encuentran Sitios Prioritarios de Conservación, los cuales se describen a continuación en base a la "Estrategia Regional de Desarrollo de la región de Arica y Parinacota" del 2018.

1. Valle de Azapa: Importancia en cuanto a la presencia de aves, especialmente el Picaflor de Arica (*Eulidia yarrelli*), especie clasificada como "En peligro crítico".
2. Pan de Azúcar: Zona donde se encuentra la especie *Tecoma Fulva*, nombre común "Chuque", además de la presencia del Picaflor de Arica.
3. Sector Precordillera de Ticnamar: Sitio prioritario de mayor superficie en la Región, en este sector habita la Taruca (*Hippocamelus antisensis*), especie que actualmente se encuentra en estado de conservación "En Peligro", también es hábitat del Guanaco (*Lama guanicoe*), Gato Colo-Colo (*Leopardus colocolo*), especie en "Peligro" en la Región "Casi Amenazada" a nivel nacional y contiene comunidades de Queñoas (*Polilepys rugulosa*) especie catalogada como "En Peligro".

Cabe destacar que, de acuerdo con datos geoespaciales, parte de dos áreas protegidas quedan dentro de la cuenca, las que se describen brevemente a continuación:

1. Monumento Natural "Quebrada Cardones": Parte de este monumento se ubica dentro de la cuenca del río San José, esta área protegida tiene una superficie de 11.325 ha mientras que dentro de la cuenca solo se encuentran 3 km². Se destaca la presencia de las especies *Acantholippia tarapacana* y *Ambrosia artemisioides* y por la protección del Cactus candelabro (*Browningia candelaris*), especie en estado de conservación "Vulnerable".

⁵ En los estudios de Herrera et al. (2006) y de DGA-Matraz (2015) se demuestra que las aguas del Lauca y del Lago Chungará están conectadas, a través de un flujo de agua subterráneo desde el Lago Chungará hacia las lagunas de Cotacotani. Incluso, en el estudio de Herrera et al. (2006) sostienen que el 58% del volumen de agua que alimenta las lagunas proviene del lago Chungará, siendo el 42% restante proviniendo de otros aportes subterráneos.

2. Parque Nacional Lauca: Se creó para proteger la flora, fauna y acuíferos asociados a la cuenca del Lauca, la superficie total del parque es de 137.883 ha pero dentro de la cuenca solo se ubican 8320 ha. Posee comunidades de queñoas (*Polylepsis tarapacana* y *Polylepsis rugulosa*), más de 60 especies de aves y mamíferos como el Guanaco (*Lama guanicoe*), Vicuña (*Vicugna vicugna*), actualmente en categoría "En Peligro", Taruca (*Hippocamelus antisensis*), Puma (*Puma concolor*), entre otros.

En la Figura 2-22 se ubican las áreas protegidas y sitios prioritarios presentes en la cuenca y las fichas de las especies nombradas anteriormente con alguna categoría de conservación se encuentran en el Anexo J.2.

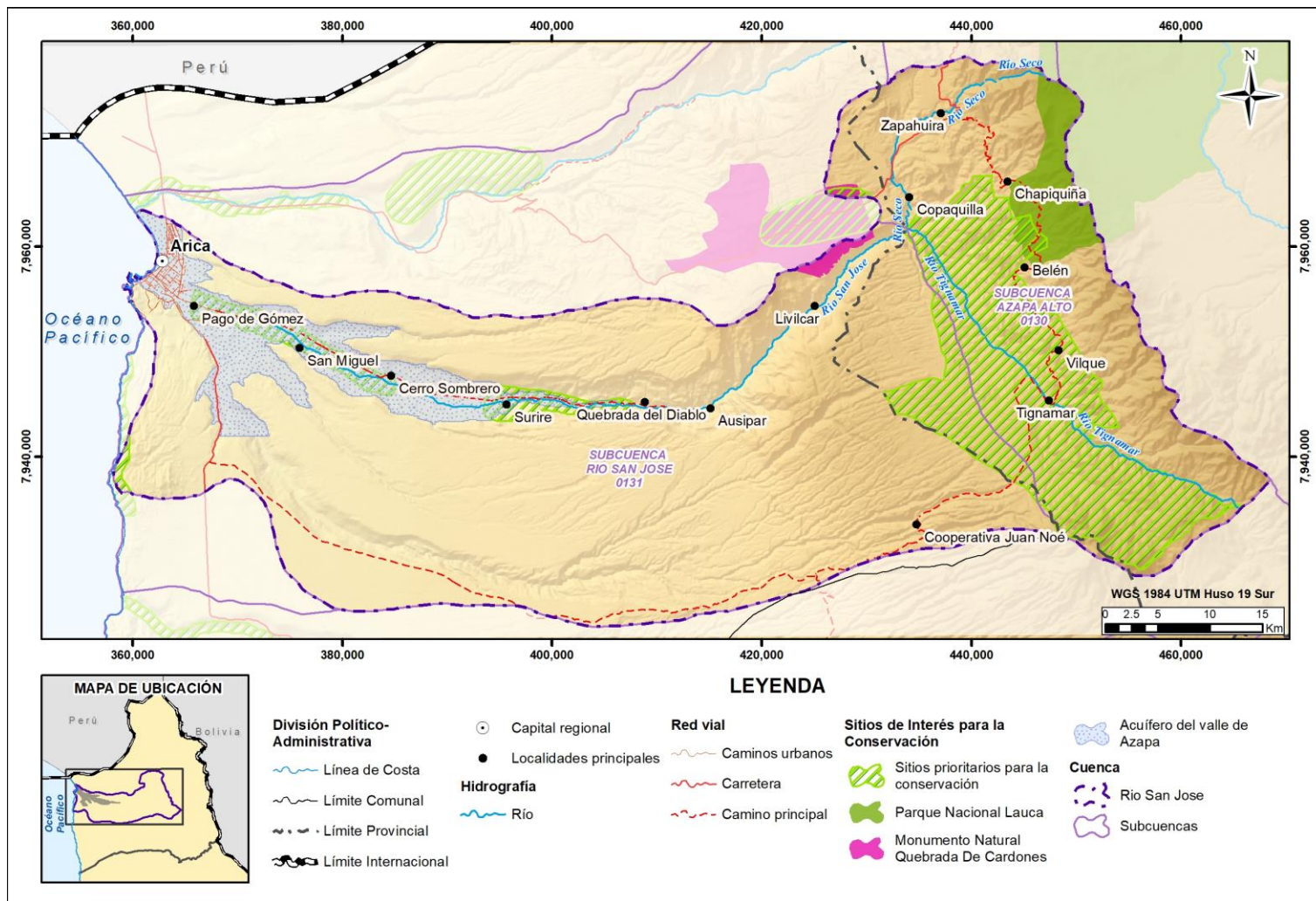


Figura 2-22. Áreas protegidas y sitios prioritarios en la cuenca del río San José.

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.6 INFRAESTRUCTURA HÍDRICA

En este acápite se describe la infraestructura hídrica relacionada con obras hidráulicas como canales y tranques, pozos, infraestructura para el agua potable y saneamiento, la generación de electricidad y, por último, las redes de monitoreo de aguas y meteorología.

2.6.1 Obras hidráulicas

A continuación, se describen las obras hidráulicas diferenciando canales, tranques, pozos, plantas de tratamiento de aguas servidas, y central hidroeléctrica. Es de relevancia señalar que la fuente de información de este acápite corresponde al diagnóstico del acuífero del valle de Azapa elaborado por DGA-DICTUC (2020).

2.6.1.1 Canales

Los canales principales presentes en la cuenca del río San José corresponden al canal Lauca, que trasvasa agua desde las ciénagas del Parinacota hacia la cuenca del río San José, y al canal Azapa, el cuál abastece de agua a las zonas de riego del valle de Azapa. En la Figura 2-23 se muestra la ubicación geoespacial de los canales según información geoespacial de la Comisión Nacional de Riego. El canal Lauca se construyó en el año 1962. Ubicado en el río del mismo nombre en la zona altiplánica de la región de Arica y Parinacota, con el objetivo de transvasar agua del altiplano al valle, pasando por la Quebrada Luco, drenando en el río Seco, para finalmente llegar al río San José, desde donde se captan las aguas y se distribuyen a lo largo del valle de Azapa por intermedio del canal Azapa. Dicho canal capta los recursos trasvasados del Lauca aguas abajo de la localidad de Livilcar, mediante una bocatoma operada con una compuerta reguladora y un embalse que permite acumular y estabilizar el agua. Este canal cuenta con una red de sub derivados, permitiendo distribuir agua a todos los sectores en el valle, controlado por la Comunidad de Aguas del Canal de Azapa (COMCA).

Según DGA-Matraz (2015), los usuarios del canal "Lauca-Azapa" poseen otorgados 1.470,41 L/s de derechos consuntivos superficiales a extraer desde las ciénagas de Parinacota, distribuidos en 2.812,55 acciones (con una equivalencia de 0,52 L/s por acción), según las Resoluciones DGA N°320 y N°450. Del caudal total, y según registros promedios de la estación fluviométrica Canal Lauca en Sifón N°1 en el periodo 1984 y 2013, se extraen 764 L/s como caudal promedio, de los cuales, cerca de 600 L/s en promedio son extraídos desde el río San José a través de la bocatoma del canal Azapa.

A través de las aguas trasvasadas, el riego del valle de Azapa se realiza a través de 40 canales de diferentes características. Según CNR-ARRAU, (2016), donde realizaron un diagnóstico de los 40 canales presentes en la subcuenca del río San José, cerca del 51% de los canales se encontraban en buen estado, siendo el porcentaje restante para la categorías regular y malo. Además, mencionan que el 46% de los canales estaban compuestos de losetas, seguidos por un 25% de canales revestidos en hormigón, 17% de mampostería y 12% de tierra. Por último, señalan que al año 2016 el 78% de las obras de los canales estaban construidas en hormigón, y el 9% correspondieron a obras realizadas en mampostería para entregas prediales fundamentalmente.

Cabe mencionar, que durante el año 2012 COMCA firmó un acuerdo para iniciar el entubamiento del Canal Azapa a lo largo del valle de Azapa, obra comandada en su

construcción por la DOH. La obra corresponde a un trazado con una longitud de 41.015 m, la que cuenta con recepción de obras según comunicación con DOH, aunque teniendo problemas en temas de presión de agua y ha generado conflictos por la demora en la entrada en operación según lo resaltado por actores de la cuenca (Anexo I sección 7).

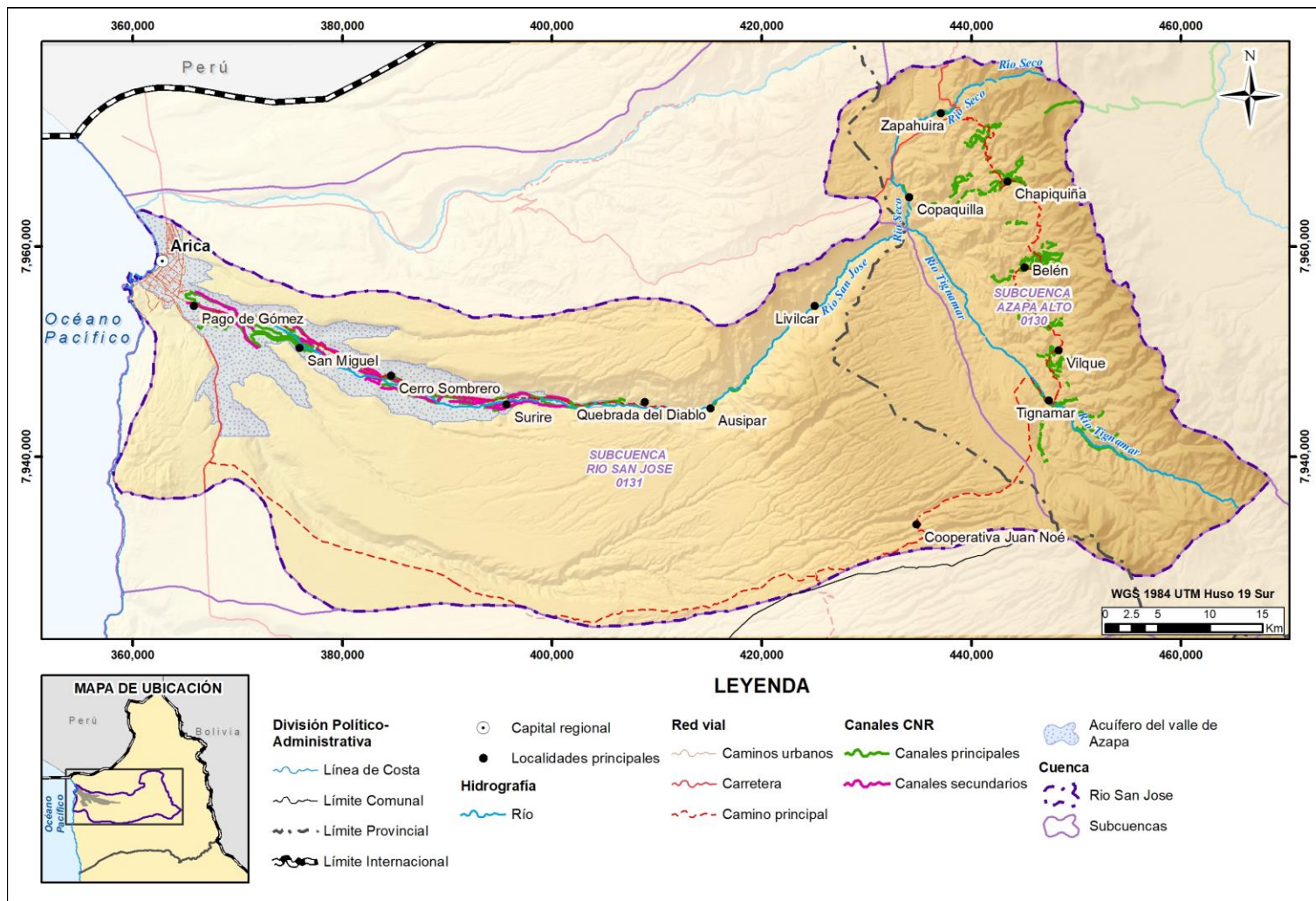


Figura 2-23. Distribución espacial de los canales de riego principales y secundarios.

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.6.1.2 Tranques

En la cuenca se identifican tres tranques destinados a almacenar agua para riego. Estos son: Sobraya, con capacidad de 30.000 m³; Juan Noé, que puede almacenar 15.000 m³; y Bellavista, con tan sólo 800 m³. Dichos tranques juegan un rol importante en aumentar la seguridad de riego para el valle de Azapa, siendo el soporte para algunas semanas de riego, en complemento con el importante aporte de aguas desde el Lauca.

2.6.2 Pozos

Al 2020, existían cerca de 330 pozos con derechos concedidos ubicados en la subcuenca del río San José, principalmente en torno al valle de Azapa (ver Figura 2-24). De estos, 7 pozos pertenecen a comités de agua potable rural (APR) (DGA-DICTUC, 2020). Según el mismo estudio, es importante mencionar que las extracciones de aguas subterráneas efectivas en norias, pozos y vertientes alcanzarían los 800 L/s como promedio anual, sin considerar las extracciones ilegales.

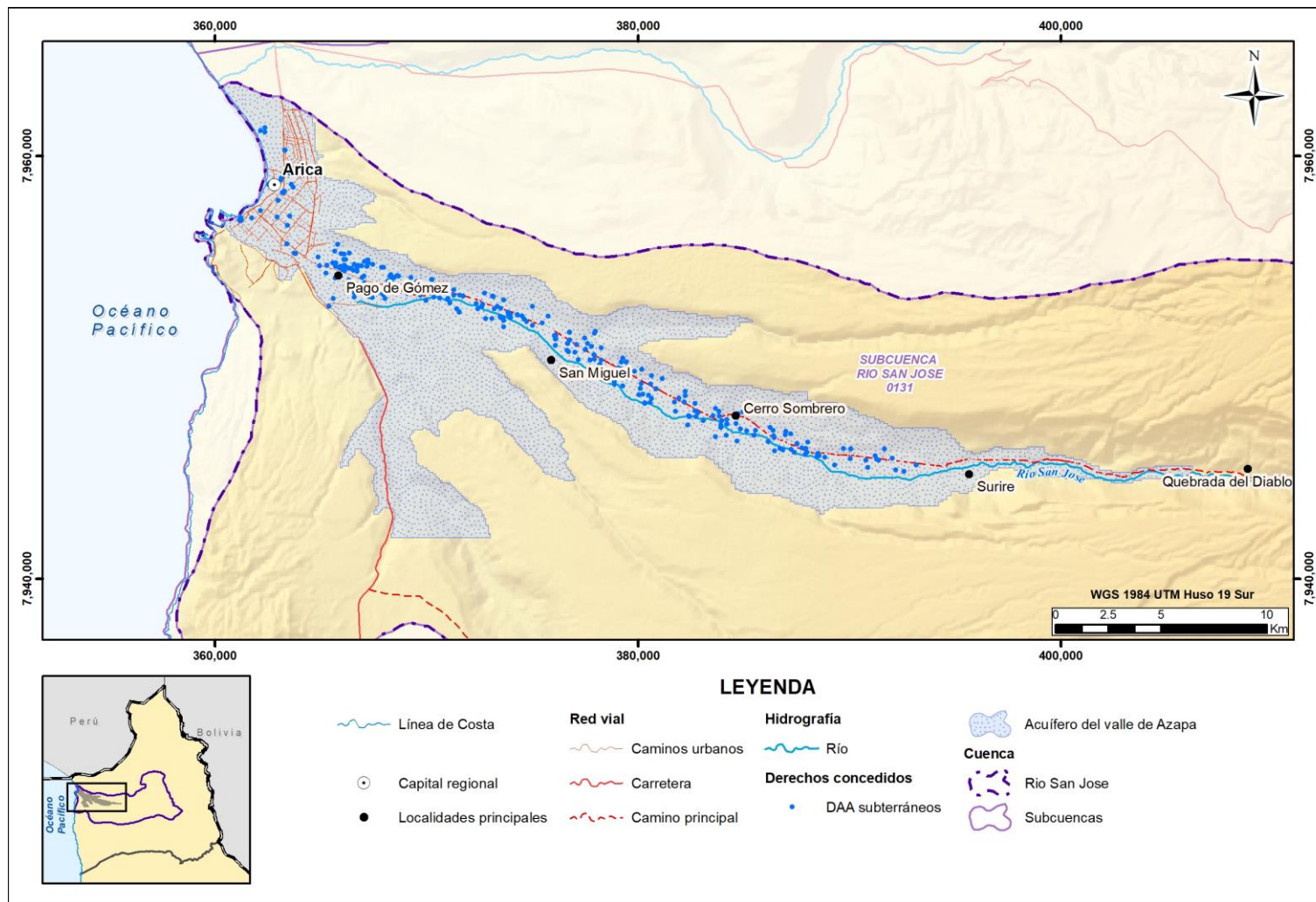


Figura 2-24. Georreferencias de los pozos con derechos concedidos.

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.6.3 Agua potable y PTAS

Sobre el agua potable en la zona urbana, Aguas del Altiplano es la empresa sanitaria con concesión en la ciudad de Arica. Para la producción de agua potable, la sanitaria cuenta con un conjunto de captaciones desde fuentes subterráneas, tanto con derechos propios como en arriendo, distribuidos por la ciudad de Arica y a lo largo del valle, así como una serie de puntos de descargas para el tratamiento de aguas servidas (Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas PTAS). Además, estos derechos conviven con extracciones subterráneas en base a derechos de diferentes APR distribuidos a lo largo del valle. En la Figura 2-25 es posible observar lo descrito.

Con respecto a la zona rural, centrado principalmente en la subcuenca del río San José, al largo del valle de Azapa, el abastecimiento de agua potable se realiza mediante los servicios de APR.

En tanto al tratamiento de aguas servidas urbanas de Arica, estas son sometidas a un tratamiento primario para posteriormente descargarlas al mar frente a la ciudad de Arica. El caudal medio horario de aguas servidas es aproximadamente de 400 L/s.

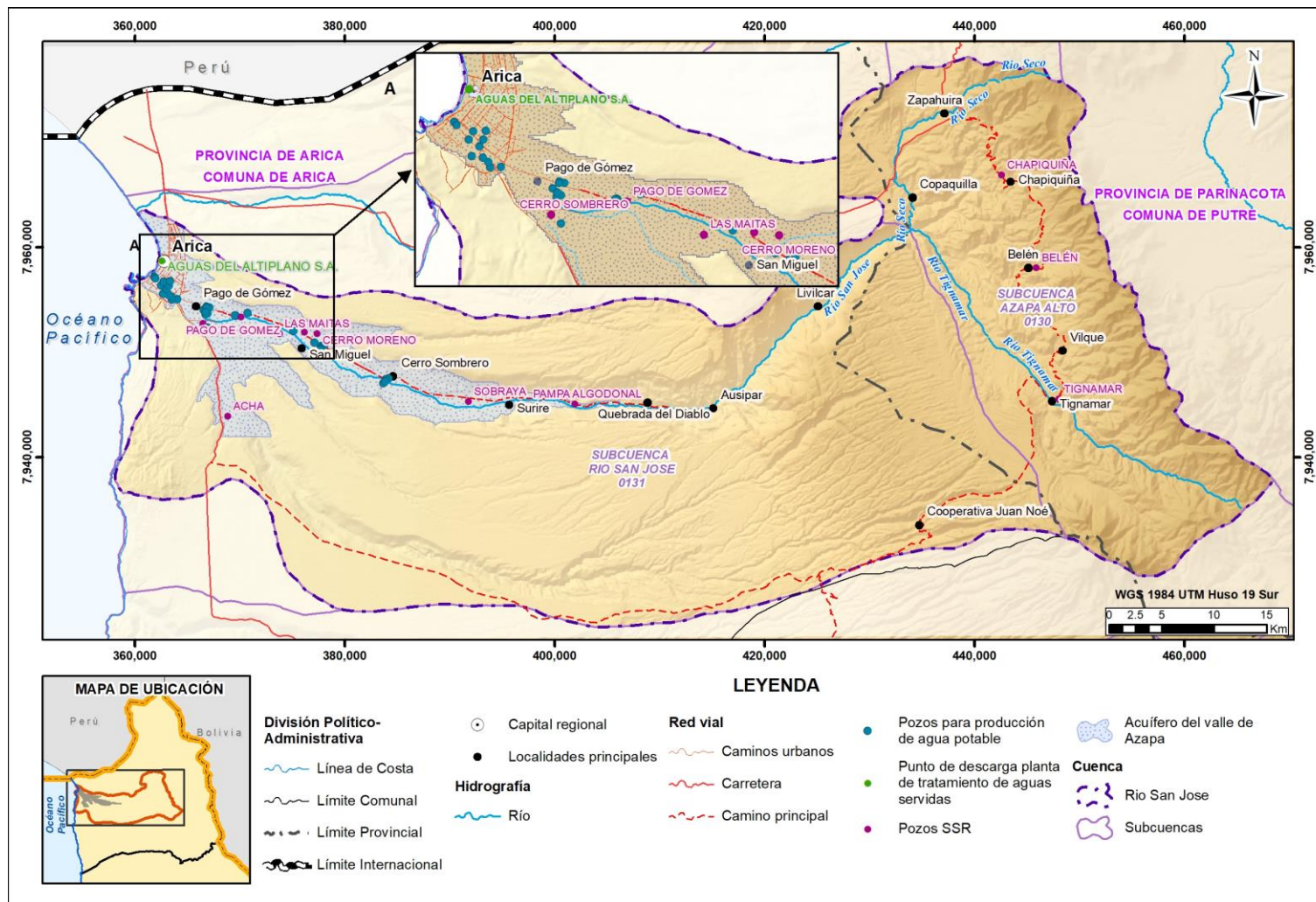


Figura 2-25. Captaciones subterráneas producción de agua potable y obras relevantes de agua potable.

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.6.4 Central hidroeléctrica

Dentro de la subcuenca Azapa Alto, específicamente en la Quebrada Luco que se encuentra dentro de la localidad de Chapiquiña, se encuentra una central hidroeléctrica llamada igual que la localidad, abasteciendo a los sectores cercanos con electricidad. Esta central tiene una potencia diaria máxima de 10,48 MW y un caudal máximo diario de 1,48 m³/s (DGA-DICTUC, 2020). Sin embargo, como la potencia media diaria de los últimos 3 años ha sido de 4,60 MW, el caudal equivale a 0,63 m³/s. En la Figura 2-26 se puede visualizar la ubicación geoespacial de la central hidroeléctrica Chapiquiña.

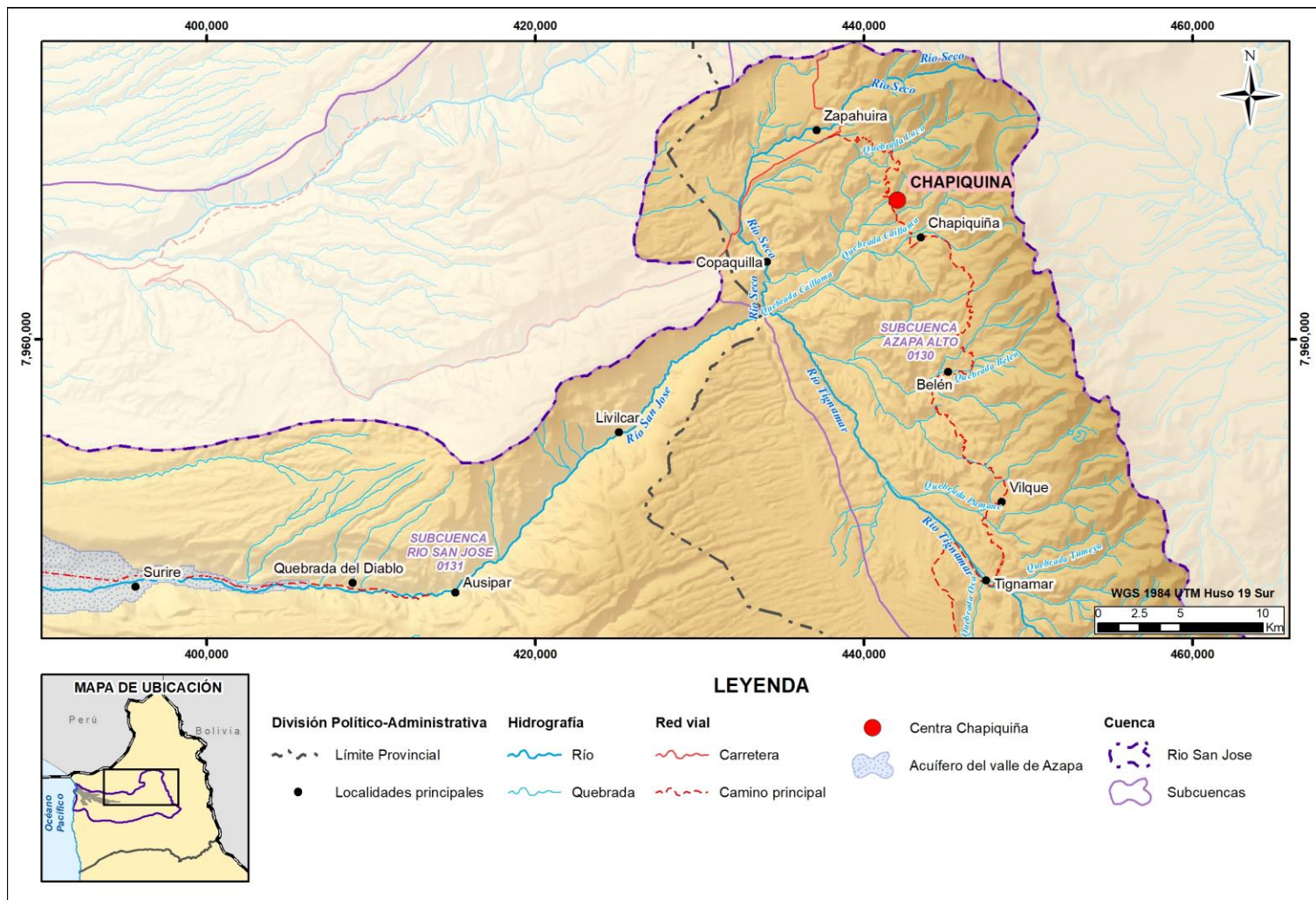


Figura 2-26. Ubicación de la Central Chapiquiña.

Fuente: Elaboración propia (2022).

2.6.5 Redes de monitoreo de aguas

La red hidrométrica de la DGA en la cuenca del río de San José cuenta con 11 estaciones meteorológicas de las cuales seis están suspendidas actualmente. Seis estaciones en la cuenca cuentan con registros de precipitación, tres de ellas en la parte baja de la subcuenca río San José y las otras tres en la subcuenca Azapa Alto (ver Figura 2-27 y Tabla 2-7). Cabe mencionar que la estación Murmuntane es la única estación meteorológica que cuenta con registros históricos de temperatura en la subcuenca de Azapa Alto, pero solo entre los años 1986-1987, revelando una importante falta de datos de monitoreo.

Tabla 2-7. Estaciones meteorológicas de la red DGA en la cuenca del río San José.

ID	Nombre	Altitud (m.s.n.m)	Estado	Fecha de inicio/ Periodo de vigencia	Variable meteorológica monitoreada vigente	
					Precipitación	Temperatura
1	Arica Oficina	20	Vigente	01/09/1974	Sí	Sí
2	Azapa	365	Vigente	01/08/1966	Sí	Sí
3	Belén	3240	Sin información	01/01/1963	Sí	No
4	Central Chapiquiña	3350	Vigente	01/01/1963	Sí	No
5	Ticnamar	3230	Vigente	01/12/1975	Sí	No
6	Copaquilla	2900	Vigente	04/12/2016	Sí	Sí
7	Río Ticnamar en Angostura	3010	Vigente	03/12/2005	Sí	No
8	Murmuntane	3550	Suspendida	1968-2006	Sí	Sí
9	Portezuelo Chapiquiña	4375	Suspendida	1976-2006	Sí	No
10	U. del Norte	55	Suspendida	1975-2012	Sí	Sí
11	El Buitre Aeródromo	110	Suspendida	1985-2015	Sí	Sí
12	La Rivera	310	Suspendida	1970-2013	No	Sí

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Para analizar la cobertura territorial de la red hidrométrica, se utilizaron los valores mínimos de densidad de estaciones presentes en la guía de prácticas hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en donde se sugiere una densidad mínima de estaciones para cubrir de información el territorio, en este caso datos de precipitación y fluviometría. Para realizar este análisis, se han considerado las subcuencas río San José y Azapa Alto individualmente, siendo planicie interior y montaña las unidades fisiográficas predominantes respectivamente.

En cuanto a la precipitación, lo recomendado para planicie interior es 575 km²/estación y en la subcuenca del río San José se obtiene una densidad de 482 km²/estación, mientras que en la unidad fisiográfica montañosa la densidad recomendada es 250 km²/estación y en Azapa Alto se tiene una densidad de 150 km²/estación. De esta forma las estaciones meteorológicas que se encuentran en cada subcuenca están acorde con lo establecido por la OMM (2020), sin embargo, en la subcuenca río San José, todas las estaciones se encuentran en la parte baja, dejando un vacío de información la zona media y alta de la subcuenca.

En relación con las estaciones de monitoreo de caudal, cinco estaciones fluviométricas cuentan con información disponible (ver Tabla 2-8 y Figura 2-27) y una no se encuentra disponible. Cabe destacar que no existen estaciones fluviométricas al cierre de la cuenca, lo que dificulta las labores de calibración y validación de cualquier intento de modelación hidrológica de la cuenca. Tampoco existen estaciones fluviométricas en la Quebrada Acha, sistema hídrico que aporta agua desde la parte sureste de la subcuenca del río San José.

Tabla 2-8. Estaciones fluviométricas DGA con información disponible.

ID	Nombre	Altitud (m.s.n.m.)	Estado	Fecha inicio o Periodo vigencia
1	Acueducto Azapa en bocatoma	960	Vigente	01/01/1970
2	Rio San José antes bocatoma Azapa	960	Vigente	01/04/1967
3	Rio San José en Ausipar	1300	Vigente	01/01/1969
4	Rio Lauca en Cosapilla	3000	Vigente	01/01/1991
5	Rio Ticnamar en Angostura	3010	Vigente	03/12/2005
6	Rio Ticnamar en Ticnamar	3800	Suspendida	1992-2014

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Es relevante mencionar que no se encontraron estaciones de monitoreo de calidad de aguas superficiales vigentes en la cuenca de estudio. La única información, según la base de datos en línea de la DGA, corresponde al pozo Albarracines, ubicado en el valle de Azapa cercano a la ciudad de Arica.

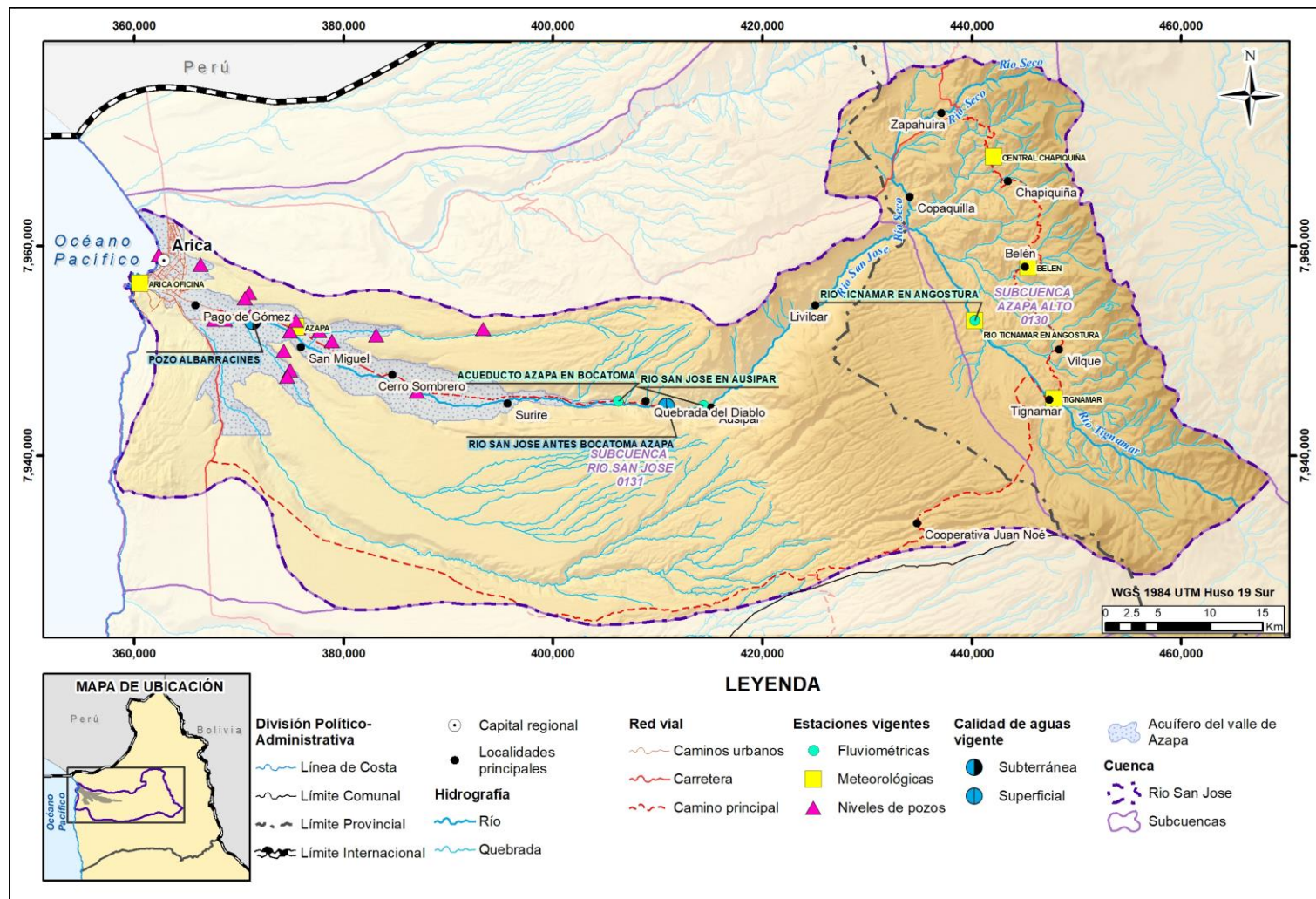


Figura 2-27. Ubicación de las estaciones de monitoreo de agua (meteorológicas, fluviométricas, niveles de pozo, calidad de aguas) vigentes.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

2.7 NUEVAS FUENTES

A continuación, se detalla brevemente infraestructuras o proyectos que se están ejecutando, o que potencialmente se podrían ejecutar, para aumentar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca, considerando fuentes que actualmente no son utilizadas o que se puedan reintegrar al sistema.

2.7.1 Embalses

En la actualidad, la cuenca del río San José no cuenta con embalses. Sin embargo, el 2009 se evaluó el diseño del embalse Livilcar, con el objetivo de apalejar la escasez hídrica mediante la regulación de crecidas, permitiendo la recarga del acuífero, la regulación de caudales de riego aguas abajo del embalse (DGA-ICASS, 2017) y, eventualmente, generar energía eléctrica. Al mismo tiempo, se espera que el embalse pueda mitigar los impactos y daños que puedan causar las crecidas y arrastre de sedimentos. Según información comunicada por el MOP-DOH, el proyecto aún no ingresa a evaluación de impacto ambiental a la espera de zanjar las fuentes de financiamiento.

Dentro de las características que se han mencionado del potencial embalse se destaca la capacidad de 10 Hm³, de los cuales 4,6 Hm³ serían para los sedimentos, 3,4 Hm³ para la amortiguación de crecidas y 2 Hm³ estarían destinados para regular la recarga de napas subterráneas y otros usos. El proyecto inundaría, en su diseño original, una superficie de 43,44 ha, con una vida útil proyectada aproximada de 61 años (DGA-DICTUC, 2020).

Cabe mencionar que el potencial funcionamiento del embalse está incluido dentro de los escenarios del modelo WEAP en los acápite posteriores (sección 5.3.3). La curva de capacidad en relación con el volumen embalsado vs la cota de agua se visualiza en la Figura 2-28.

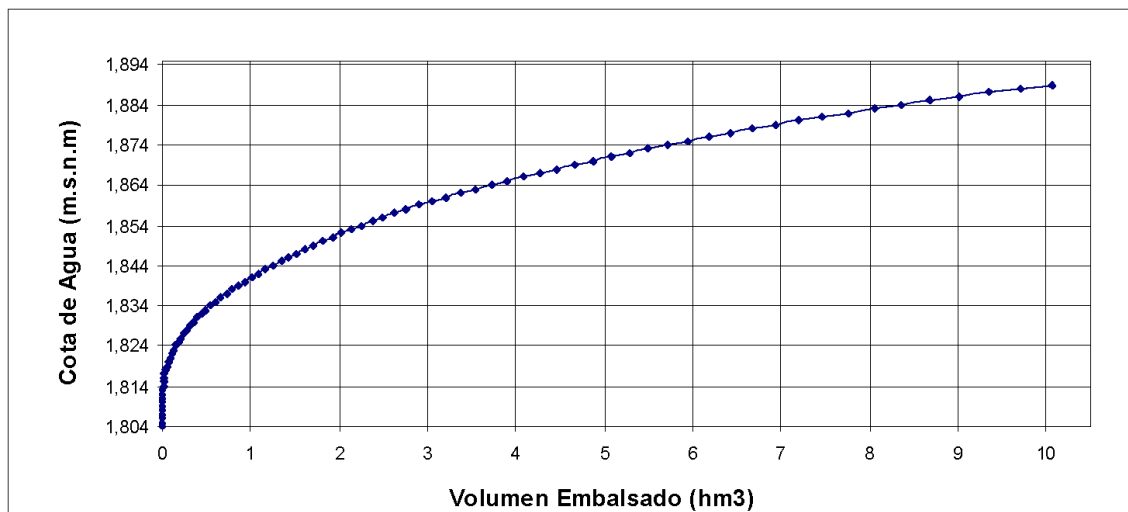


Figura 2-28. Curva de Capacidad, Cota de Agua vs Volumen Embalse.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

2.7.2 Desalación

Actualmente no existe una planta desalinizadora ni un proyecto oficialmente en marcha para implementar esta tecnología en la cuenca del río San José. No obstante, en una reunión el 16 de marzo de 2020 con ECOSAN y DICTUC, se indicó que la sanitaria Aguas del Altiplano tiene como proyecto una desaladora con capacidad de 200 L/s, pero como soporte de la empresa y no como una planta de funcionamiento continuo.

Cabe destacar que, dentro del proceso participativo, se mencionó que es relevante considerar el potencial aumento de las tarifas de agua potable urbana para los usuarios finales en la aceptación social del proyecto (sección 7 del Anexo I). Asimismo, diversos actores del valle de Azapa mencionaron que sería positivo tener una planta desaladora que permita abastecer de agua potable a la ciudad de Arica, de modo de disminuir la presión del acuífero dentro del valle de Azapa.

En las secciones de escenarios modelados (sección 5.3.2), se plantea el efecto sobre el acuífero del valle de Azapa de este tipo de obras, ya que sería un tipo de infraestructura que permitiría quitar presión al sistema subterráneo.

2.7.3 Uso de aguas servidas tratadas y recarga de acuíferos

El reúso de aguas servidas tratadas es una idea de larga data para la cuenca del río San José, y ha sido estudiada en detalle en diversos estudios, siendo el más reciente el Proyecto INOVA CORFO COD. 12BPC2-13504 descrito en INH (2014). Esta alternativa considera implementar una planta de tratamiento de aguas servidas para la ciudad de Arica y reutilizar las aguas servidas tratadas, aplicado al escenario futuro base que contempla cambio climático y crecimiento poblacional.

Actualmente las aguas servidas urbanas de Arica son sometidas a tratamiento primario y posteriormente descargadas al mar mediante un emisario ubicado frente al sector que presta servicio en Arica, el caudal medio horario de aguas servida es aproximadamente 400 L/s.

Dentro de las alternativas de reutilización de las aguas grises después del tratamiento, considerando la magnitud y las actividades principales desarrolladas en el valle de Azapa, se suelen encontrar dos:

1. riego en el valle de Azapa en sus sectores bajos.
2. reinyección / infiltración para la recarga del acuífero.

Ahora bien, en lo que refiere a la ley 21.075, las aguas grises tratadas no podrían ser utilizadas ni para riego ni para producción de agua potable, que son los principales usos subterráneos que se busca compensar con la medida.

Por otro lado, el Decreto 46 promulgado el 8 marzo del 2002 que establece Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, detalla los requerimientos mínimos para efectuar la infiltración de residuos líquidos al acuífero. Considerando que actualmente Aguas del Altiplano trata las aguas grises derivadas del uso de agua potable de la ciudad de Arica, un proceso más estricto que cumpla con dicho decreto puede ser llevado a cabo para que dichas aguas tratadas sean inyectadas al acuífero. Por tanto, sería factible infiltrar las aguas residuales siempre y cuando se le aplique el tratamiento secundario indicado. De este modo la recarga incluida para los años de modelación futura (desde el 2020) es de 400 L/s infiltrados desde una fuente emisora mediante pozos de

infiltración al acuífero del valle de Azapa, escenario detallado en la sección 5.3.5, donde se simula el proceso de inyección de aguas servidas tratadas al acuífero a partir de la aproximación del INH (2014), estudio donde identificaron las potenciales zonas para implementar un programa de recarga al acuífero. Las zonas más adecuadas para realizar la infiltración mediante recarga profunda (pozos de infiltración) según dicho estudio, se señalan en la Figura 2-29.

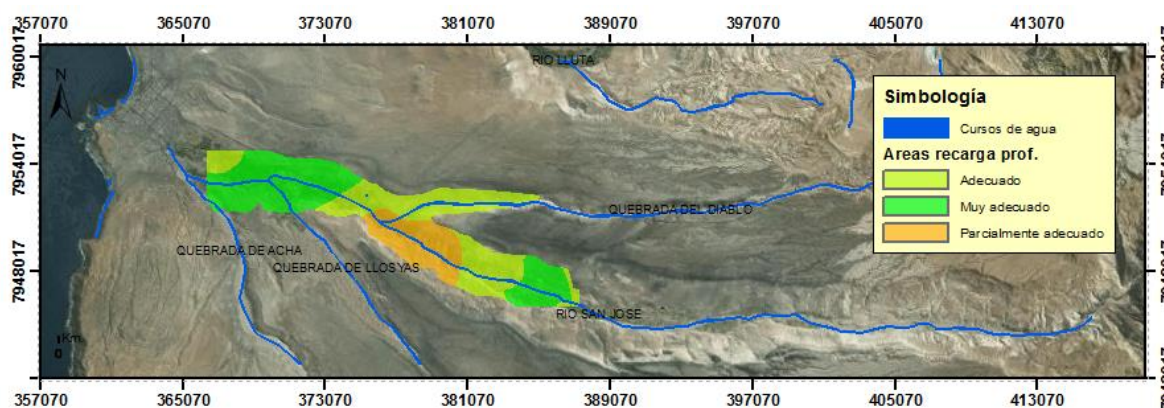


Figura 2-29. Áreas más adecuadas para recarga artificial profunda.

Fuente: INH (2014).

2.8 GOBERNANZA DEL AGUA A NIVEL DE CUENCAS

No hay duda de que el agua es un elemento esencial para la vida en múltiples dimensiones, incluyendo las necesidades humanas domésticas, la conservación de los ecosistemas, y el desarrollo de actividades productivas, como la agricultura, minería, industria, entre otras. Sin embargo, en el actual contexto de cambio climático el agua se ha vuelto un recurso escaso que además se distribuye de manera desigual en el territorio (CR2, 2021) cuestión causada de manera importante por factores antrópicos. Es más, como lo indica la OCDE (2015) la crisis del agua es también una crisis de *gobernanza*. Por lo tanto, resulta de gran importancia abordar las problemáticas de esta para mejorar la gestión hídrica.

Gobernanza es un concepto diverso en su conceptualización, pero que refuerza la idea de una toma de decisiones que incorpora a actores más allá del Estado, incluyendo a actores privados y a la sociedad civil, considerando, además, diversas escalas.

Integrando varias definiciones (OCDE, 2015; Bakker, 2003 y Hurlbert and Gupta, 2016) se plantea para el contexto de elaboración del PEGH que la gobernanza del agua es el conjunto de reglas y prácticas políticas y organizacionales, formales e informales, a través de los cuales se toman e implementan decisiones relativas al recurso hídrico y que desde una perspectiva normativa -de lo que debe ser- se realiza incorporando las preocupaciones e intereses de las comunidades, se rinden cuentas por la gestión de los recursos hídricos, y se promueve la resiliencia a través de la gestión colaborativa, flexible y basada en el aprendizaje. En línea con lo anterior, la gobernanza es específica a los territorios ("contexto-dependiente"), por lo que las políticas públicas deben adaptarse al contexto territorial donde se implementan, en particular, considerar las interacciones entre los actores en el contexto de la gestión hídrica actual, sus sinergias, desencuentros

y relaciones conflictivas, pues la articulación de los actores requiere fuertemente de bases de colaboración y confianza no siempre presentes.

Como se aprecia, su relación con la gestión viene dada por entregar un contexto donde opera esta última, por lo que si se presentan estructuras o modelos de gobernanza que no funcionan por ejemplo de forma articulada o no integran sus distintas escalas, o se copia un modelo externo sin analizar su pertinencia territorial, incidirá inevitablemente en problemas de gestión del recurso hacia objetivos de sustentabilidad y/o de seguridad hídrica, entendida esta última como el acceso a cantidad y calidad de agua que satisfaga las distintas demandas con un enfoque de sostenibilidad y resiliencia, cuestión coherente con los objetivos de los PEGH.

Considerando lo expuesto y las bases técnicas, se definirán brechas de coordinación e información para la cuenca del valle de Azapa, articulando los antecedentes recopilados de las actividades PAC y estudios previos realizados. Así también se presenta el mapa de actores cuyos detalles se pueden observar en la sección 4 del Anexo I sección 4.

2.8.1 Mapa de agentes

actividades de participación realizadas, y la revisión de bibliografía pertinente, principalmente el Diagnóstico para la gestión de explotación del acuífero valle de Azapa (DGA-DICTUC, 2020). El listado de actores del territorio se encuentra en el Anexo I sección 4.2, en la que también se presenta la definición de actor relevante.

A continuación, se dará a conocer una caracterización de los principales actores vinculados a la cuenca:

- Dirección General de Aguas (DGA): organismo del Estado que se encarga de gestionar, verificar y difundir la información hídrica del país, especialmente respecto de su cantidad y calidad, las personas naturales y jurídicas que están autorizadas a utilizarlas, las obras hidráulicas existentes y la seguridad de estas, entre otras funciones. En la cuenca del valle de Azapa ocupa un rol relevante, sin embargo, existe desconfianza por parte de algunos sectores, como es el caso de los pequeños agricultores, producto de compromisos a su juicio, incumplidos. Además, se visualiza que no funciona de manera coordinada con otras instituciones.
- Aguas del Altiplano (ADA): empresa sanitaria cuya función es suministrar agua potable al sector urbano. El agua es extraída desde el acuífero del valle de Azapa en niveles significativos, con pozos ubicados en el sector bajo "Pago de Gómez", sector medio "Las Maitas" y "Cerro Moreno" y sector medio alto "Cabuya", correspondientes aproximadamente al km 4, km 12, km 15 y km 21 de la ruta A-27, respectivamente.
- Comunidad de Aguas Canal Azapa (COMCA): es la principal organización de usuarios de agua, presentando un grado de influencia importante en el territorio, ya que las decisiones que aquí se toman aplican para todos los usuarios de la fuente de agua del Canal de Azapa. La COMCA es el canal matriz, entendiendo este último como la columna vertebral de riego del valle. Además, existen diversos canales que son llamados "comunidades" por los agricultores, sin embargo, no todos se encuentran formalizadas por DGA.

- La Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS) del valle de Azapa está recientemente conformada pero no se encuentra activa en la práctica. Los actores locales no conocen o conocen, pero no valoran lo suficiente a esta organización y sus beneficios asociados. La presencia de la empresa sanitaria como un usuario importante de la CAS influye en cierto nivel de desconfianza desde otros actores locales.
- Comités de Agua Potable Rural (APR) actual Servicios Sanitarios Rurales (SSR): los comités de APR, son quienes se encargan de abastecer de agua potable a las localidades rurales. Específicamente en la cuenca, representan un actor importante ya que distribuyen el agua a una gran cantidad de usuarios. A la fecha existen 7 APR que abastecen a la población del sector, donde cada uno de ellos es administrado por su respectiva directiva.
- Comisión Nacional de Riego (CNR): servicio público dependiente del Ministerio de Agricultura, que tiene por objetivo principalmente contribuir a la formulación de la política de riego nacional, mejorar la eficiencia del riego a través de proyectos de desarrollo y transformación productiva, fomentar la inversión privada en obras de riego, entre otros. En la cuenca del valle de Azapa, la CNR ha sido un actor relevante en cuanto al apoyo técnico y financiero para los agricultores, de manera que puedan optimizar su riego y con ello, la eficiencia hídrica en un contexto de escasez hídrica. En específico, se destaca, además, por ser el impulsor del proceso de conformación de la Comunidad de Aguas Subterráneas.
- Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP): servicio dependiente del Ministerio de Agricultura, es el encargado de promover el desarrollo económico, social y tecnológico de los campesinos y pequeños agricultores.
- Grandes agricultores: en la cuenca de Azapa existen familias que formaron empresas agrícolas hace más de dos o tres décadas y que se les reconoce como los grandes agricultores del Valle, con producción que abastecen al mercado nacional como de exportación. Esta producción, lógicamente, va acompañada de una participación importante en los DAA, ya sea de agua superficial como subterránea. En particular, la familia Lombardi inclusive participa en los directorios de COMCA como de la futura CAS.
- Empresas semilleras: es un rubro ya establecido, en que diversas agroindustrias producen en este valle, con importancia por los DAA que poseen, pero menormente involucrados en dinámicas relacionales con otros actores del Valle.
- I. Municipalidad de Arica: el municipio de Arica se expresa en el valle a través de la oficina de la Delegación Municipal Azapa, que lo representa, estableciendo puentes con las y los habitantes valle de Azapa, en atención a los requerimientos y necesidades que tenga la comunidad.
- Organizaciones agrícolas: existen diversas organizaciones a largo del Valle, que representan a grupos de productores generalmente pequeños del valle de Azapa algunas de las cuales se definen también como organizaciones indígenas. Son un actor que en general presenta interés en la gestión hídrica y que mantiene relaciones con el Municipio y otros actores.

Tanto estos como otros actores mencionados en las fuentes señaladas se presentan en el mapa de actores vinculados a la gestión hídrica en la cuenca del valle de Azapa bajo la estructura de una matriz de Gardner (1986) señalada en la Figura 2-30:

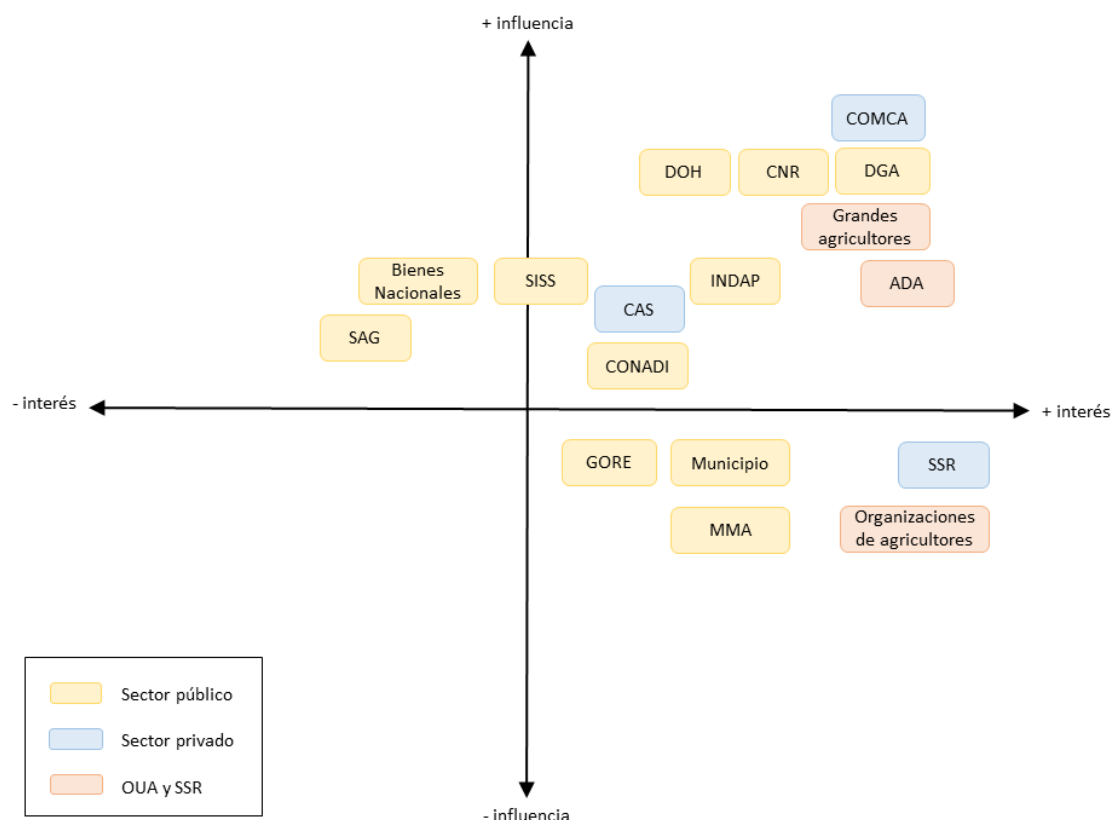


Figura 2-30. Diagrama influencia/interés de los actores en relación con la gestión hídrica.

Fuente: Elaboración propia (2022).

El Diagrama de influencia/interés de actores, muestra algunas ubicaciones interesantes de destacar. Entre los actores con mayor poder se encuentran los grandes titulares de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA), quienes al poseer una proporción importante de DAA pueden incidir de mayor manera en la organización de usuarios y a nivel individual, tiene los medios para hacer efectivo el ejercicio de sus derechos (orientación técnico-legal, recursos económicos). Su interés en la gestión hídrica es diverso, existiendo algunos que se destacan por su participación en la directiva de organizaciones de usuarios relevantes, mientras otros, se mantienen más al margen de estas estructura y procesos organizacionales al menos desde lo observado desde los procesos participativos.

En el otro extremo, de la menor influencia se pueden observar a comités APR (SSR actuales) y organizaciones de agricultores que con niveles de interés diverso presentan en general un bajo poder e incidencia en la gestión a nivel de cuenca, no así necesariamente a nivel local, donde una APR tiene estructuralmente incidencia en la

gestión del agua potable de esa localidad. En el proceso participativo, se expresan como los más interesados en que los actores con mayor incidencia realicen acciones que les beneficie.

En los actores públicos son sus competencias las que definen en su mayoría su localización en esta matriz de interés/influencia en la gestión hídrica. Así DGA, DOH y luego CNR, INDAP, SISS, entre otros van teniendo ubicaciones menos relevantes en la influencia, no así necesariamente en el interés, que al menos desde el proceso participativo, fue posible reconocer la I. Municipalidad de Arica, GORE y MMA.

2.8.2 Sociograma

Complementando el análisis anterior se elaboró un sociograma donde se representaron los vínculos entre los actores identificados en el territorio, destacando en particular las redes existentes entre los grupos que toman decisiones sobre recursos hídricos o que poseen algún tipo de injerencia en su gestión y uso en la cuenca.

A continuación, se muestra el sociograma de los actores relevantes del valle de Azapa (Figura 2-31), mientras que en el Anexo I sección 5 se explica el detalle metodológico y los resultados en detalle de este.

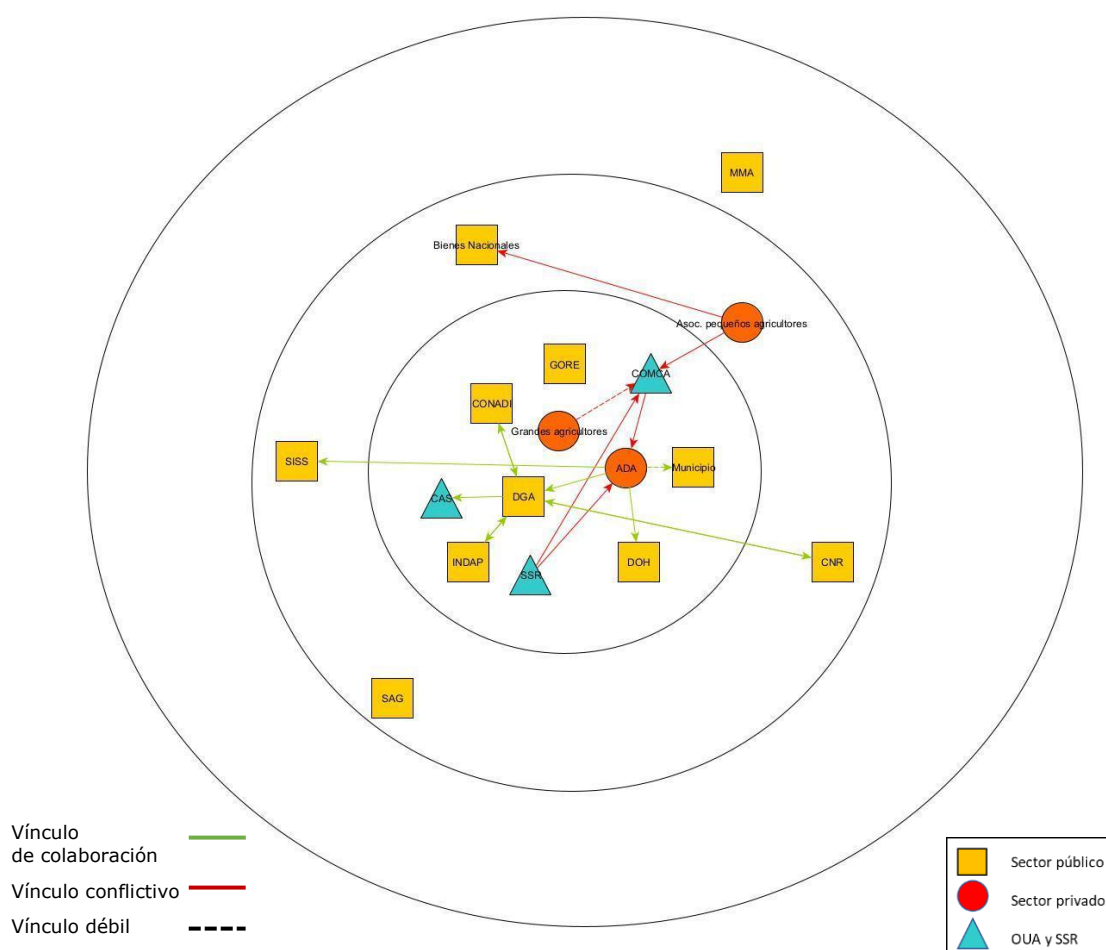


Figura 2-31: Sociograma actores relevantes del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Este sociograma integra también la influencia e interés a través de los círculos concéntrico, dejando en el centro (primer nivel) a los actores que tienen mayor influencia e interés en el territorio y que en general presentan relaciones colaborativas. En el caso de COMCA y ADA dado lo ya explicado, son actores que presentan algunas relaciones negativas desde y/o hacia ellos. En el caso de ADA es una condición más bien hacia ellos, mientras que en COMCA es en ambos sentidos.

En los círculos siguientes se observan actores con media y baja influencia, y sus respectivas relaciones y no relaciones con otros, donde no se percibieron redes importantes con otros usuarios en las distintas actividades de participación.

2.8.3 Brechas de coordinación

A continuación, se presentan las principales dificultades entre actores, a partir de la información de los antecedentes recopilados, y las experiencias en los procesos de Participación Ciudadana realizadas (sistematizados en Anexo I sección 7). Estos puntos más que brechas en términos de su forma de presentación, resultan más bien en cuestiones críticas en materia de coordinación, en aspectos subyacentes que influyen en esta, en aspectos de gobernanza, en definitiva, que tal como se ha explicado, afectan la gestión en de variadas formas:

- **Baja coordinación estratégica en torno a la gestión hídrica en el sector público:** la imposibilidad de mantener coordinaciones permanentes más allá de los gobiernos de turno o de los tiempos que involucra la elaboración de planes o estrategias integrales, ha atentado contra la implementación de las acciones propuestas en intervenciones anteriores, pudiendo este estudio llegar a correr el mismo riesgo. Se observa la necesidad urgente de abordar esta limitación, profundizando en sus causas estructurales y entregando condiciones que favorezcan las coordinaciones en el largo plazo.
- **Desconfianza entre actores comunidad/público, comunidad/privado, comunidad/comunidad:** la desconfianza es un aspecto basal para lograr avanzar en coordinaciones con eficiencia y eficacia. A partir del proceso participativo (consignado en el Anexo I sección 7), ha sido posible constatar diversas relaciones de desconfianza y visiones de baja legitimidad que ponen en riesgo las necesarias coordinaciones y toma decisiones para la gestión hídrica:
 - Se reconoce una crisis de confianza hacia el sector público (comunidad/pública) con sus intervenciones en esta materia (lo cual cruza tanto al sector de obras públicas como al de agricultura), explicado en parte por la no implementación de acciones de intervenciones previas o por la ineficacia de estas. Esta situación ha traído como consecuencia conflictos con las comunidades, las cuales han mostrado reticencias en participar de la realización de proyectos o estudios.
 - A nivel de organizaciones de usuarios, la más destacada correspondiente a la COMCA, presenta algunos problemas de legitimidad desde algunos sectores o grupos de usuarios (comunidad/comunidad). Esto se ve afectado por el proyecto de entubamiento que no ha podido ponerse en funcionamiento, lo cual ha despertado críticas hacia la administración, aun cuando esta a su vez expresa su

disconformidad con el accionar de la DOH, organismo público responsable de la iniciativa (comunidad/público).

- Entre usuarios de agua también se presentan tensiones y visiones de injusticia respecto a la explotación del acuífero, aun cuando pertenezcan a la misma organización de usuarios (COMCA), aunque distanciados espacialmente en el Valle (parte baja *versus* parte alta (comunidad/comunidad)). Bajo el ejemplo particular del proyecto de entubamiento, los usuarios de agua del sector bajo del valle (bajo el km 14 si se considera la extensión del entubamiento) tienen la visión que los usuarios de la parte alta extraen agua ilegalmente. Por esto para la "parte baja" el proyecto del entubamiento resultaba relevante. Esto adiciona otro obstáculo al funcionamiento de COMCA como una organización cohesionada.
- Las tensiones y desconfianzas al interior de la COMCA no son solo entre usuarios, sino también desde algunos grupos de usuarios hacia la administración de su organización de usuarios, por una percepción de baja eficacia en sus acciones, y una visión por supuestas acciones que benefician solo a algunos miembros de la organización. Esto conlleva a problemas organizacionales, y en brechas de información para la comunidad, que en ocasiones se encuentra desinformada y molesta con la administración. La administración por su parte se muestra conocedora de su labor de distribución y previsoras frente a la escasez, cuestión no visibilizada por parte de un sector de sus usuarios que los ve de manera más crítica. Eso debilita la voluntad de los usuarios de interactuar con estas estructuras institucionales.
- Un conflicto evidente es el que se genera por la presencia de la empresa sanitaria en el valle con sus DAA garantizados por ley para abastecer a la población. El sector agrícola del Valle en su diversidad (grandes y pequeños) y también las APR imputan a la sanitaria parte importante de la escasez de agua subterránea al existir una percepción de perjuicio de los pozos de agua potable urbana situados a lo largo del valle sobre los pozos de agricultores y de APR (comunidad/privados, privados/privados). Esto incide también en el futuro funcionamiento de una CAS.
- **(Des)organización en torno a la gestión de las aguas subterráneas:** La gestión de aguas subterráneas avanza con la conformación de la CAS San José de Arica, la cual se encuentra actualmente en tramitación en la DGA, y es muy necesaria para realizar una gestión eficiente de las aguas subterráneas de la cuenca junto con la DGA. Cabe destacar que hace unos 22 años se habla de la inexistencia de una organización de usuarios de agua subterránea, a pesar de que el agua subterránea es una de las fuentes principales del recurso, junto al Canal Matriz de Azapa administrado por la COMCA. Su fortalecimiento posterior será clave, toda vez que se observó en el proceso participativo poca claridad respecto de sus beneficios.
- **Descoordinación en torno al desregulado crecimiento poblacional.** En la actualidad la expansión agrícola y el aumento de loteos en las zonas rurales se percibe como una problemática que requiere una regulación coordinada desde el Estado y sus organismos públicos competentes (DGA, DOH, Bienes Nacionales, entre

otros). El primer punto resulta preocupante desde su contribución a una mayor explotación del acuífero y el segundo resulta de preocupación especialmente para los habitantes de los sectores rurales, por el potencial impacto que puede generar en su acceso al agua subterránea.

- **Interacción para la construcción de visión común:** Por otra parte, se observa una baja coincidencia en las miradas de los actores públicos y privados/comunidad, respecto a aspectos diversos, desde la situación de eficiencia en el uso del agua hasta la situación en torno a la extracción legal/ilegal de aguas subterráneas. Se requieren espacios de interacción que permitan reconocer por parte de todos los involucrados cuáles son las brechas en esta materia. Cada actor posee información y conocimientos distintos sobre la situación actual e histórica del agua en el valle, lo que influye en la percepción diferenciada por actor de las causas de las problemáticas y las posibles vías de soluciones, dificultando las posibilidades de llegar a acuerdos sobre cómo abordar problemáticas comunes.
- **Escasa consideración de la dimensión ambiental en la coordinación público/público:** desde MMA se observa que oportunidades de generar instrumentos que contribuyan a la conservación en coordinación con otros servicios (Bienes Nacionales, INDAP, entre otros) no logran materializarse pese a los acercamientos con éstos, en parte por el centralismo dado que la definición de estos instrumentos tiene un alcance nacional y no se pueden adaptar a la región.
- **Voluntad de coordinación público/público:** esto no corresponde a una brecha, sino que a una condición que se requiere fortalecer y favorecer. Entre los organismos del Estado, se observan espacios favorables para la interacción con el fin de coordinarse frente a problemáticas mayores, aunque tendiendo a resguardar su carga de responsabilidades y en este sentido indicando la necesidad de que exista un rol coordinador en la resolución de estas acciones por fuera de los organismos sectoriales.

2.8.4 Brechas de información

A continuación, se presenta una síntesis de brechas identificadas a partir de la información y las experiencias recopiladas durante los procesos de Participación Ciudadana. Cabe destacar que en los capítulos de demanda (sección 3.1.5), oferta (sección 4.3) y balance (sección 5.5) se agregan brechas de información relevantes para la modelación numérica acoplada y la para la gestión hídrica del acuífero del valle de Azapa.

- **Baja coincidencia sobre la situación de eficiencia del uso del agua.** Esto puede responder a una falta de investigación en la materia, y a un énfasis diferencial en los actores sobre los aspectos la eficiencia que deben ser abordados: conducción, infiltración/recarga de crecidas, riego, etc. Las visiones diferenciales entre sector público y usuarios de agua inciden también en el manejo de este recurso.
- **Desconocimiento sobre los efectos de actividades productivas y domésticas sobre la calidad del agua.** Las personas desconocen los efectos que malas prácticas -agrícolas y domiciliarias- generan sobre las aguas

superficiales/subterráneas, habiendo algunas responsables de estas prácticas y otras que observan con preocupación estas prácticas por sus efectos.

- **Desconocimiento sobre las potencialidades de una comunidad de aguas subterráneas.** Entre los agricultores se visibiliza escasamente la oportunidad que representa este tipo de organización de usuarios. Asimismo, la gestión del agua se piensa de forma más individual que colectiva.
- **Desconocimiento sobre los caudales extraídos/distribuidos y sobre los pozos inscritos.** Se requieren acciones que transparenten esta información hacia la comunidad, APR y agricultores que, al no tener esta información accesible, se plantean con mayor suspicacia ante otros usuarios como la sanitaria o grandes empresas o incluso hacia la administración de la COMCA.

Es importante señalar que en muchos casos la información puede que exista, pero no está siendo accesible. La desinformación lleva a su vez a una falta de transparencia y es una fuente de tensiones entre actores que requieren coordinarse para gestionar sustentablemente el acuífero.

3. DEMANDA FÍSICA Y LEGAL DE AGUA PARA DIFERENTES USOS

En el presente capítulo se señala la demanda de agua para los diferentes usos, donde se encuentra el consumo humano urbano y rural, el uso agrícola e industrial. También se presentan los Derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en la cuenca a los diferentes usos y finalmente un análisis del mercado de aguas.

3.1 DEMANDA ACTUAL Y PROYECTADA DE AGUA

En el presente acápite se cuantifica la demanda de agua actual y futura, para los diferentes usos de agua en la cuenca del río San José estimadas en el estudio DGA-DICTUC (2020), donde emplearon como periodo histórico 1986 - 2018, y el periodo futuro estuvo representado entre por el periodo 2018 – 2050.

Para la modelación hidrológica de la cuenca del río San José, se utilizaron distintas fuentes bibliográficas para representar las principales demandas identificadas, tomando como estudio base para el presente PEGH el estudio de DGA-DICTUC (2020). La demanda de la subcuenca de Azapa Alto fue estimada a partir de estudios elaborados por DGA-ICASS (2016) y DGA-Hídrica-Aquaterra (2017), donde se identifican demandas de agua en actividad agrícola y para abastecimiento de agua potable rural (APR). En la zona media-baja de la cuenca (subcuenca del río San José), existen más antecedentes bibliográficos que permiten representar con mayor detalle las demandas de la zona, las cuales se detallan en los siguientes subcapítulos. Su implementación en el modelo superficial se describe en el Anexo H acápite 2.4 para la subcuenca Azapa Alto, y Anexo H acápite 3.4 para subcuenca del río San José (donde se ubica el valle de Azapa).

Cabe mencionar que la demanda actual y futura presentada en este acápite no está necesariamente vinculada con la fuente de agua. En el valle de Azapa, por ejemplo, para el caso agrícola, se combinan fuentes superficiales (trasvase Lauca y aportes de ríos en subcuenca Azapa alto) y subterráneas (pozos), para suplir la demanda. No obstante, lo anterior, las demandas estimadas y consideradas en la modelación son aquellas que obtienen el agua desde la cuenca del río San José y del acuífero del valle de Azapa, y no desde fuentes externas (a excepción del trasvase del Lauca).

A modo general y sin diferenciar por fuente de agua, al año 2018, el sector agrícola (61%; 1.054 L/s) y el agua potable urbana (35%; 601 L/s) representan los principales usos del agua en la cuenca en términos promedios anuales, seguidos por el sector industrial (3%; 52 L/s) y agua potable rural (< 1%; 7 L/s) (Figura 3-1).

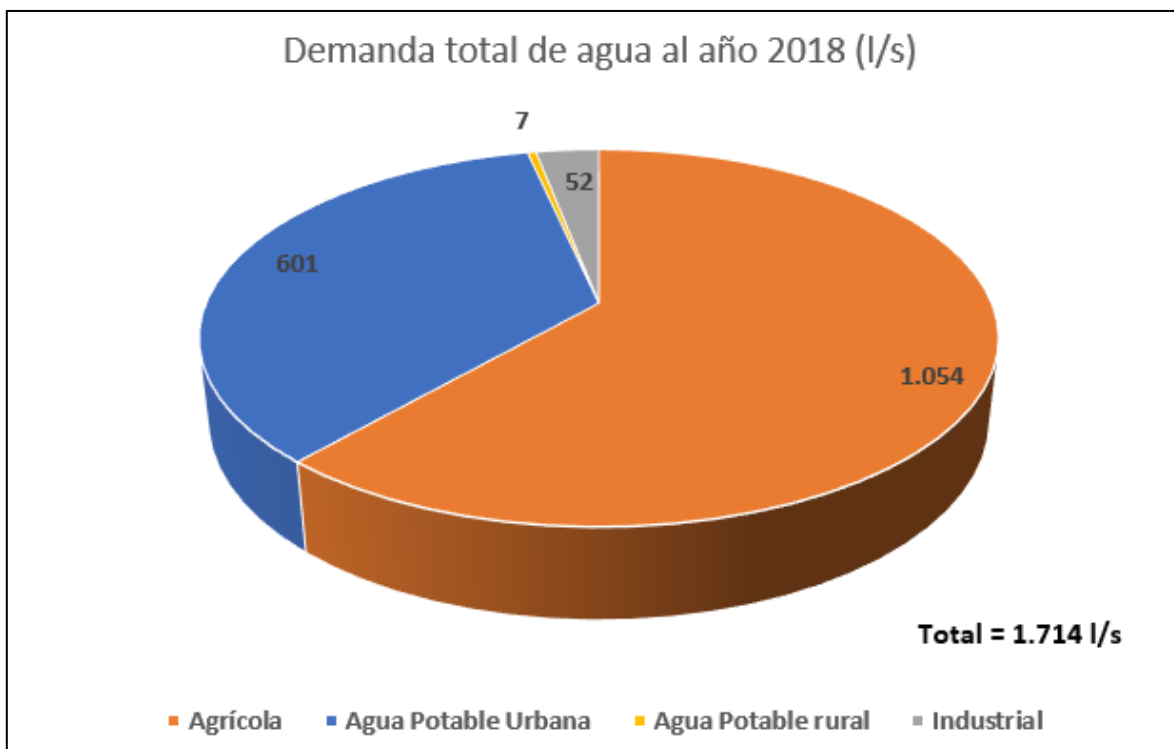


Figura 3-1. Demanda hídrica total en la cuenca del río San José al año 2018.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

3.1.1 Consumo Humano urbano y rural

El consumo de agua urbano y rural se abastece principalmente por el acuífero de Azapa. La zona urbana (ciudad de Arica) es abastecida por la empresa sanitaria Aguas del Altiplano S.A. a partir de captaciones subterráneas distribuidas a lo largo de la ciudad y del valle de Azapa (Figura 3-2), en combinación a la extracción de agua desde el valle de Lluta. La demanda de agua potable urbana, a su vez, representa una de las mayores demandas del área de estudio. En la zona rural del valle de Azapa, principalmente en localidades concentradas, son siete comités de Agua Potable Rural los que abastecen de agua potable a la población (sección 2.6.3). No obstante, en la modelación hidrológica fueron considerados solo aquellos que poseen DAA y que fueron catastrados por DGA-DICTUC (2020).

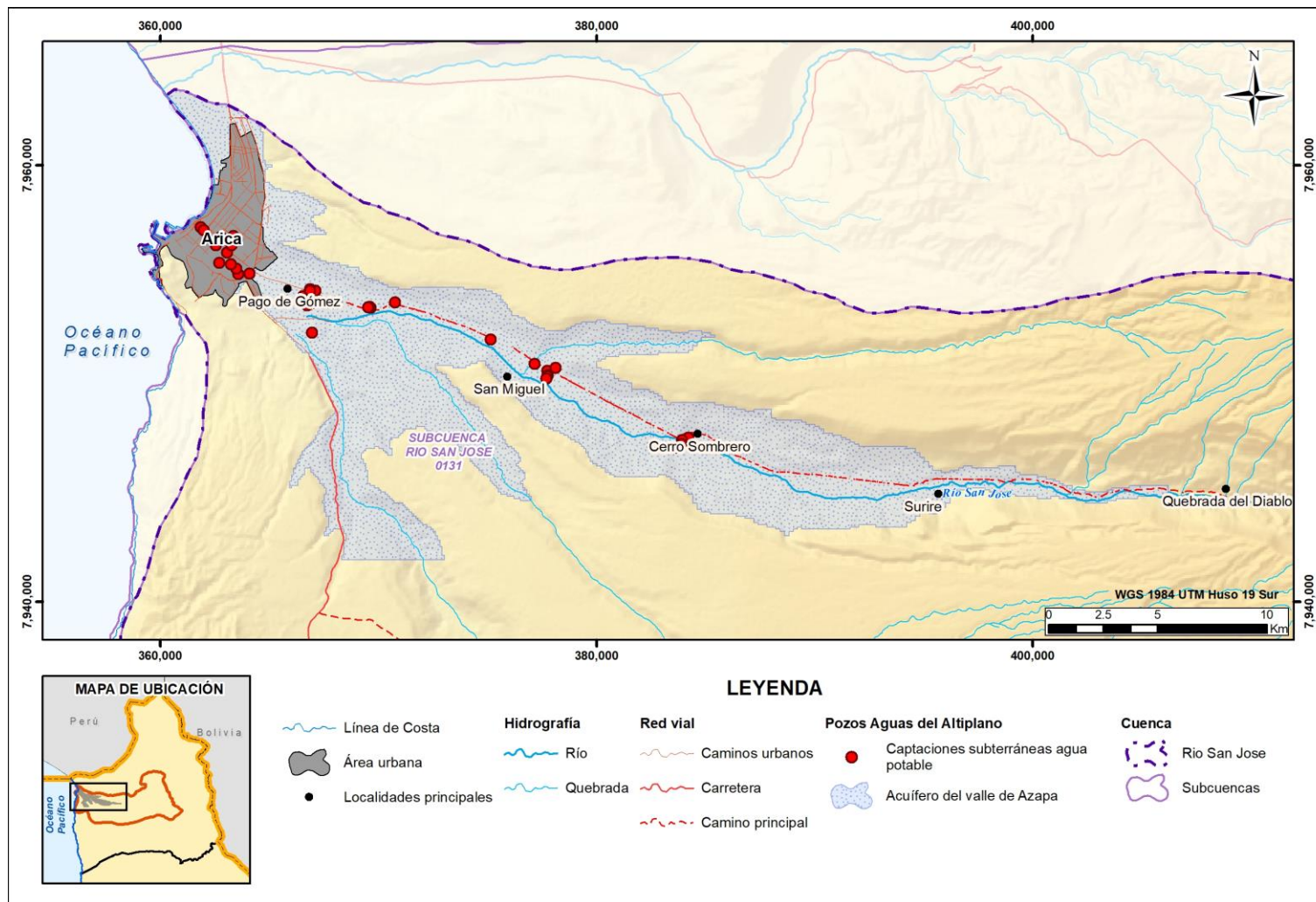


Figura 3-2. Captaciones subterráneas para agua potable urbana a lo largo del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

3.1.1.1 Demanda agua potable urbana histórica y proyectada

En el estudio DGA-DICTUC (2020) se realizó una revisión de los antecedentes principales de la cuenca del río San José, con la finalidad de caracterizar magnitudes de demanda de agua históricas para uso agua potable en la cuenca (Figura 3-3). Los datos revelan que existe una demanda estimada en torno a los 600 L/s desde los años 90 para el caso del agua potable urbana.

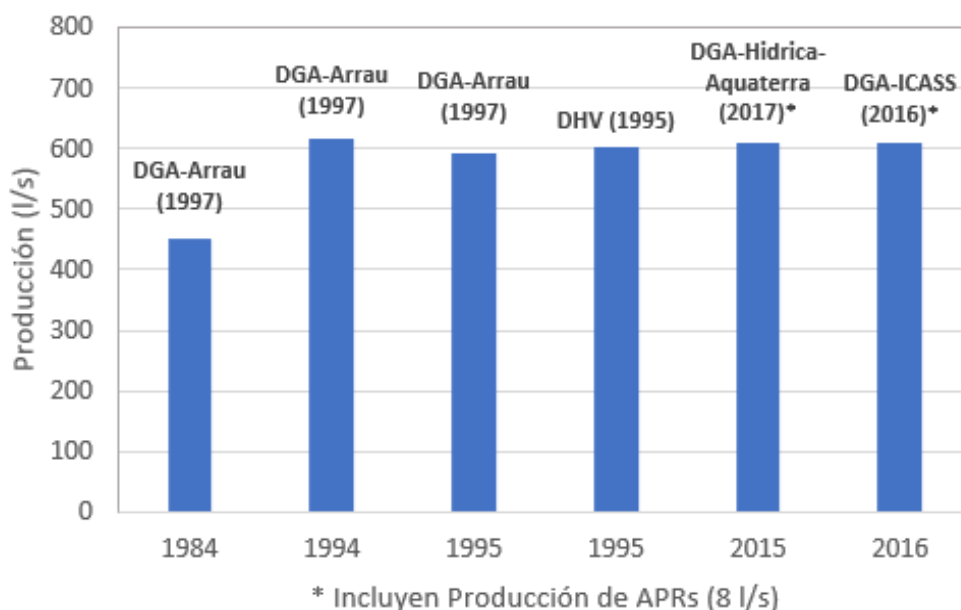


Figura 3-3. Evolución de la producción de agua potable urbana en la cuenca del río San José según distintas fuentes de información. *El estudio 2016 y 2017 incluyen el agua potable urbana y rural dentro de la sumatoria.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a DGA-ARRAU (1997), DHV (1995), DGA-Hídrica-Aquaterra (2017) y DGA-ICASS (2016).

La demanda de agua potable urbana en la cuenca del río San José solo está presente en la subcuenca del río San José, y está representada por la ciudad de Arica. La extracción del agua para abastecer a la ciudad de Arica, a través de la concesionaria, se realiza, en la zona de estudio, a través de la explotación de 35 nodos de demanda (pozos). De esos nodos, el 35% se encuentra en la ciudad de Arica, mientras que el 65% se encuentra distribuidos a lo largo del valle de Azapa.

Cada nodo de demanda de Agua Potable cuenta con una demanda requerida mensual definida. La definición de esta se logró a través de dos fuentes de información. En primer lugar, conociendo los valores mensuales de producción de agua potable de la empresaria sanitaria Aguas del Altiplano, entre los años 2004-2019. En segundo lugar, obteniendo las ubicaciones y caudales captados por la Empresa Sanitaria, informadas al SISS. La combinación de ambos insumos logro generar la distribución del caudal de producción total según las captaciones informadas a la fecha. En la Figura 3-4 se presentan la serie histórica de producción mensual de agua potable urbana en el periodo mencionado para la ciudad de Arica, obtenidos de información oficial reportada a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) (ver Anexo H sección 3.4.2).

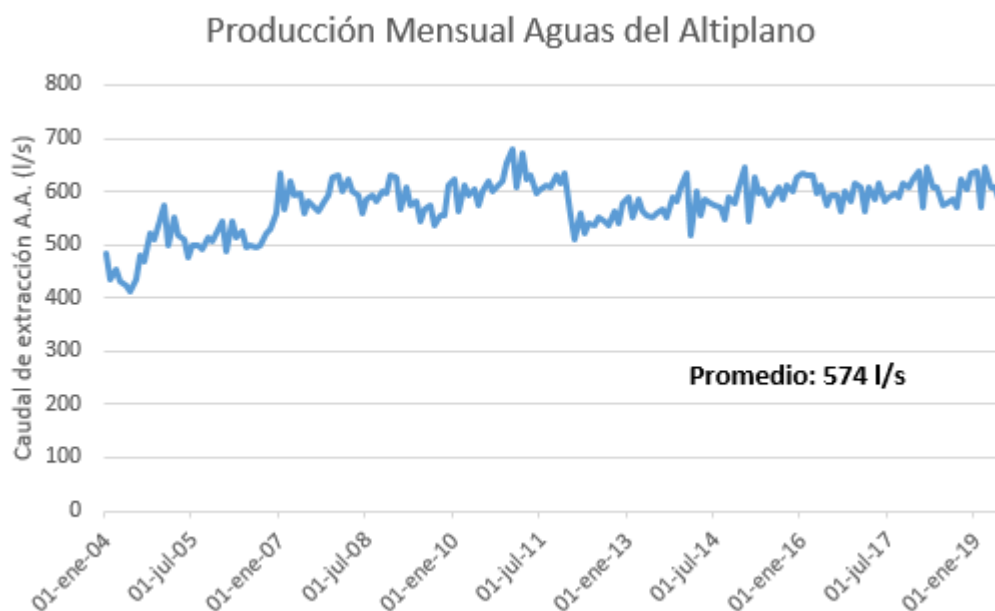


Figura 3-4. Producción mensual de agua potable urbana periodo 2004-2019 Aguas del Altiplano S.A.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Para poder obtener una distribución completa del periodo histórico, fue necesario estimar la demanda requerida mensual, por medio de dos fuentes de información complementarias. La primera, utilizando datos demográficos, los cuales fueron obtenidos por medio de los CENSOS del año 2017, 2002 y 1985 (INE, 2017; INE, 2002; INE, 1985) para conocer la tendencia de crecimiento poblacional en la zona. La segunda información fue indicar un factor de consumo diario por habitante, obtenido de la producción de agua potable registrada en el SISS por parte de la empresa sanitaria, en el primero periodo registrado (año 2004), lo que generó un consumo promedio de 186 litros/habitante/día.

Con lo anterior se generó una serie de tiempo de la demanda requerida de forma variable, con temporalidad mensual, desde 1985 a 2050, y separada para cada nodo de demanda de agua potable en el modelo superficial WEAP. En este mismo sentido, es preciso indicar que la serie de tiempo obtenida mantiene una misma magnitud de la demanda requerida desde el año 2018 al 2050. El motivo de lo anterior es la posibilidad de ajustar la demanda del periodo futuro a través de distintos factores obtenidos por escenarios de gestión futuro diferentes.

En relación con el periodo futuro, este se calculó a partir de una interpolación lineal de los datos del periodo histórico utilizando un factor futuro. Dicho factor se determinó a través del informe DGA-Hídrica-Aqua Terra (2017), como también por la proyección de población informada por INE (2017) en el último CENSO realizado en el país. Según esta fuente, al año 2035 se prevé un aumento del 13,2% de la población urbana, resultado un total de 254.692 habitantes. Posteriormente, se mantuvo el mismo porcentaje de crecimiento poblacional al año 2050 dejando como resultando una población de 288.311 habitantes.

A través de lo anterior, se desarrolló una interpolación lineal a los datos históricos utilizando un factor entre 1 y 1,245, desde 2018 al año 2050 respectivamente. Los resultados de la demanda requerida tanto para el periodo histórico – futuro se muestran a continuación en la Figura 3-4. Se observa un comportamiento cíclico con una variación interanual, desde mínimos de demanda de cerca de 300 L/s en los años 80 hasta máximos de demanda futura de 800 L/s, con un consumo al año 2018 cerca de los 600 L/s, equivalente a cerca de 18,9 hm³/año.

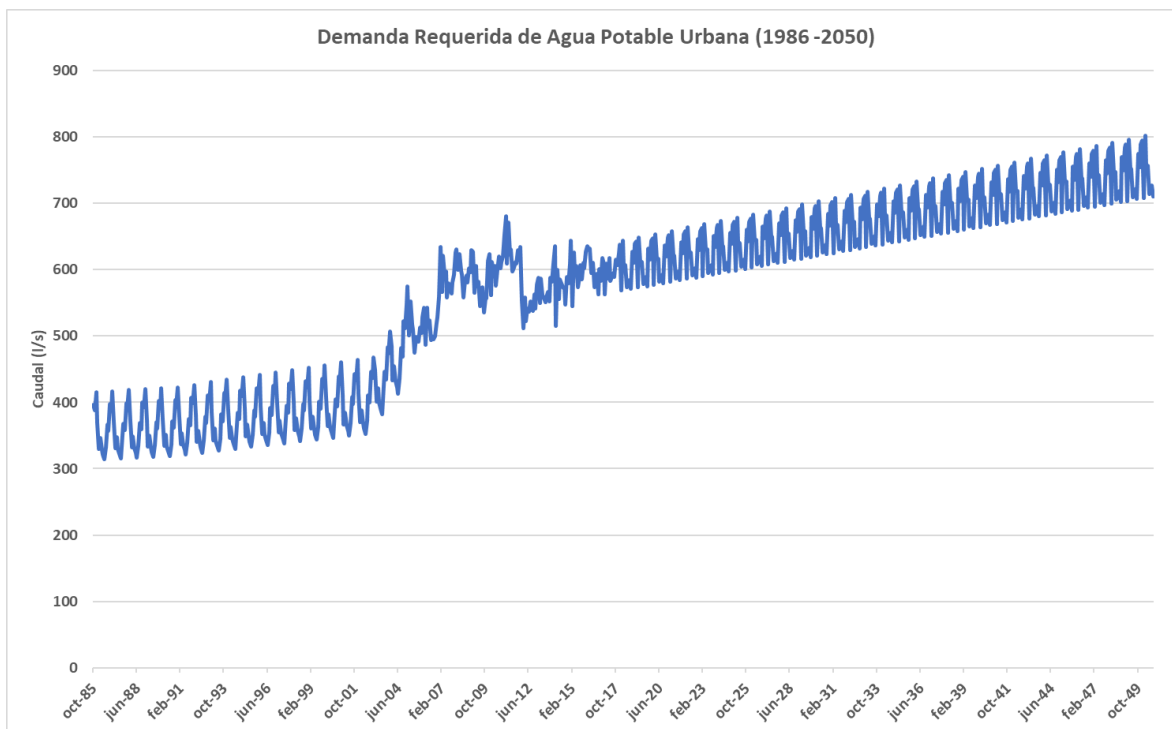


Figura 3-5. Demanda de agua potable urbana histórica (1986-2018) y proyectada (2020-2050) para la ciudad de Arica.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a datos de producción SISS.

3.1.1.2 Demanda agua potable rural histórica y proyectada

Dado que existen sistemas de APR en la subcuenca de Azapa Alto como en la subcuenca del río San José, los resultados son presentados de forma diferenciada por subcuencas. Cabe destacar que los datos con mayor fiabilidad y mayor detalle son los de los APR de la subcuenca del río San José, de acuerdo con el levantamiento de datos realizado por DGA-ICASS (2016) y rescatado por DGA-DICTUC (2020).

3.1.1.2.1 Subcuenca Azapa Alto

El agua potable en la subcuenca Azapa Alto es provista por comités de APR abastecidas directamente por aguas superficiales, los cuales están localizados en las zonas de Chapiquiña, Ticnamar y Belén, cuya demanda de agua al año 2016 corresponde a 22.173 m³/año, 12.592 m³/año y 17.082 m³/año, respectivamente (DGA-ICASS, 2016) (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Demandas de agua potable Cuenca de Azapa Alto.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	N° Personas	Dotación (l/hab/día)	Caudal (L/s)
Ticnamar	Río San José	Azapa Alto	Putre	230	150	0,4
Belén	Río San José	Azapa Alto	Putre	312	150	0,5
Chapiquiña	Río San José	Azapa Alto	Putre	405	150	0,7
Total						8,6

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-ICASS (2016).

El periodo futuro, la demanda requerida se obtiene a partir de un Factor Futuro calculado de información recabada por el estudio DGA-Hídrica-Aquaterra (2017) y la estimación de población a futuro elaborada por INE (2017) del último CENSO levantado. El Factor Futuro para la demanda hídrica de las APR en la zona Alta de la cuenca del río San José oscila entre 1 a 1,081 entre los años 2018 y 2050 respectivamente. Por tanto, con el factor futuro definido y la demanda requerida del periodo histórico, se interpolan de forma lineal los datos para obtener la serie de tiempo de la demanda requerida para cada APR, como muestra la Figura 3-6. Se observa que las demandas oscilan entre los 0,4 y los 0,8 L/s durante el periodo histórico y futuro para cada sistema APR.

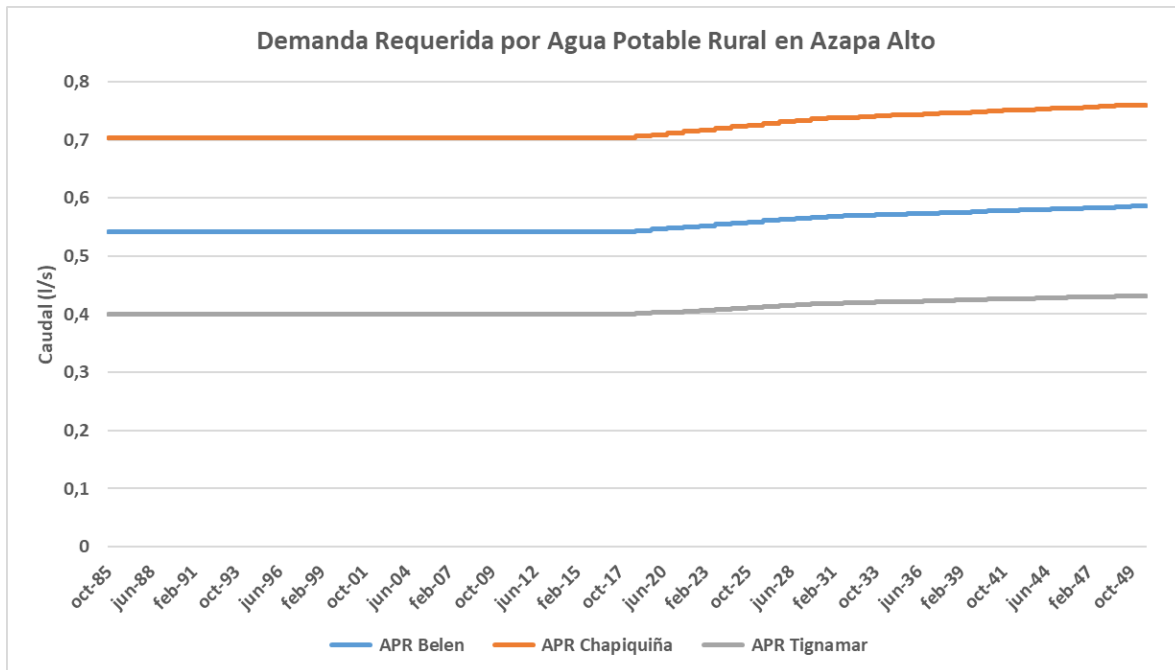


Figura 3-6. Demanda de agua potable rural histórica (1986-2018) y proyectada (2020-2050) para tres sistemas APR de la subcuenca Azapa Alto.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a datos de DGA-ICASS (2016).

3.1.1.2.2 Subcuenca del río San José

La demanda de agua potable rural de la zona del valle de Azapa (subcuenca río San José) es representada a través de 4 nodos de demanda subterránea, los cuales se ubican en su totalidad dentro del área agrícola de riego del valle. La población rural de las localidades San Miguel de Azapa, Cerro Sombrero, Las Maitas y Sobraya, que son abastecidas de agua principalmente por servicios de APR, generan una demanda de agua de cerca de 7 L/s (Tabla 3-2), la cual muestra las poblaciones y dotaciones por localidad estimadas por DGA-ICASS (2016). Cabe destacar que hay más APR constituidas en el valle de Azapa, no obstante, y tal como fue mencionado, las cuatro mencionadas son las que poseen DAA.

Tabla 3-2. Demanda de agua potable rural en localidades de la subcuenca del río San José.

Localidad APR	Código APR	Nº Personas	Dotación (l/hab/día)	Caudal (L/s)
Sobraya	APR1	1.524	150	2,6
San Miguel de Azapa	APR2	998	150	1,7
Las Maitas	APR3	704	150	1,2
Cerro sombrero	APR4	792	150	1,4
Total				6,9

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-ICASS (2016).

Con esta información base, DGA-DICTUC (2020) realizó una reconstrucción estimada de demanda requerida para todo el periodo histórico, a través de información demográfica del INE año 2002 y 2012. Con ello se obtuvo una serie de tiempo con la demanda requerida para cada APR en el valle de Azapa, desde 1985 a 2018.

Para el periodo futuro, se estimó la demanda a partir de información obtenida por DGA-Hídrica-AquaTerra (2017) donde se proyectan al año 2035 la demanda de APR. Obtenida la variación porcentual del estudio anterior, esta se mantuvo hasta el año 2050, generando el Factor Futuro. Este factor registra un valor de 1 hasta 1,137, desde el año 2018 al 2050 respectivamente, el cual se aplicó a través de una interpolación lineal a los datos de demanda requerida del año 2018.

La Figura 3-7 muestra la estimación de la demanda requerida para consumo de agua potable rural para el periodo histórico y futuro en el valle de Azapa. Se observa un consumo que oscila entre los 5 L/s hasta los 8 L/s al 2050, con un consumo de cerca de 7 L/s al año 2018, equivalente a 0,22 hm³.

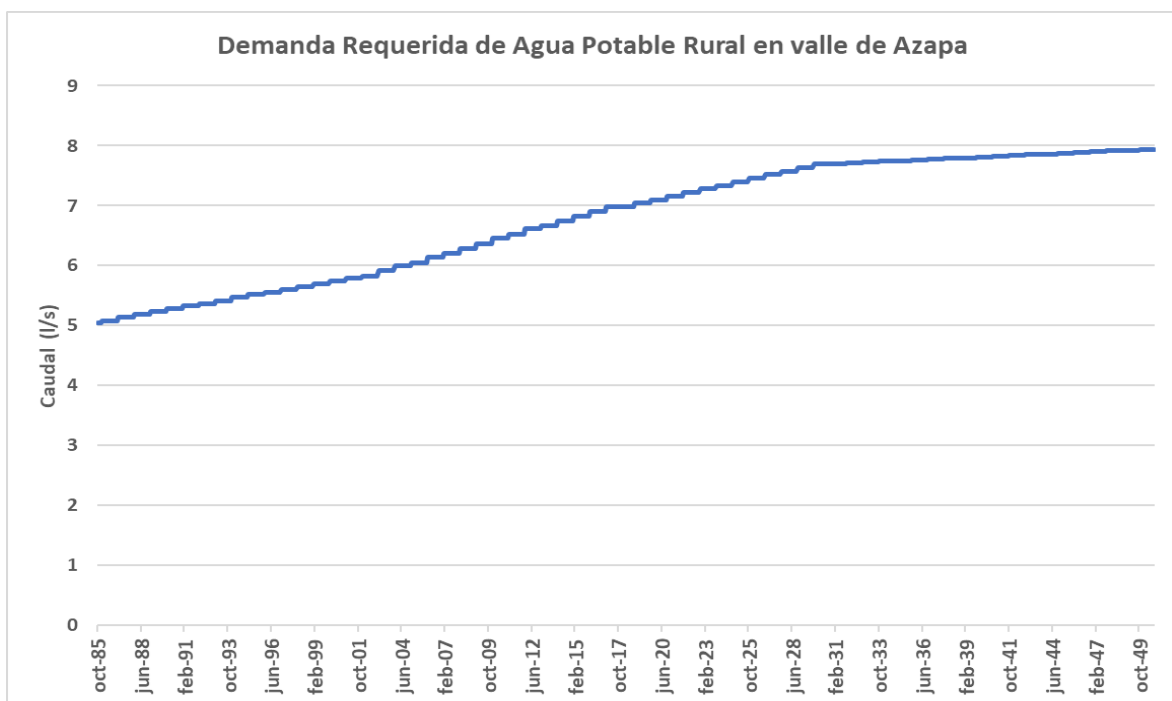


Figura 3-7. Serie mensual de caudales de extracción en pozos de APR periodo 1985-2018.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

3.1.1.3 Eficiencia de uso

Las pérdidas en el sistema de distribución de agua potable urbana (fugas superficiales, pérdidas domiciliarias, robos, grifos, etc.) en la cuenca es de 40%, la cual se estima como la diferencia entre el agua potable facturada y la producida (DGA-AC, 2010 citado en DGA-DICTUC, 2020). De estas pérdidas se considera que sólo un 15% infiltra como recarga al acuífero, lo que se traduce en una percolación del 6% de la producción total. En el caso de las pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable rural, se considera como una brecha de información, ya que corresponden a datos no disponibles y que pueden tener un impacto incierto en la modelación numérica y en las medidas de gestión.

3.1.2 Agrícola

El valle de Azapa ha experimentado un gran aumento de la actividad agrícola en los últimos años, siendo uno de los ejes principales de desarrollo económico en la región de Arica y Parinacota. Presenta condiciones climáticas favorables para cultivos de hortalizas a lo largo del año, combinando cultivos con y sin invernaderos. Por ello, es el principal proveedor de hortalizas de la zona central en la estación de invierno. A su vez, debido a las aguas trasvasadas desde el río Lauca, gran parte de la actividad agrícola (que también incluye frutales) se mantiene activa durante todo el año.

Para estimar la demanda hídrica agrícola, el estudio DGA-DICTUC (2020) consideró como fuentes de información estudios previos de la DGA, CNR y DOH. Sin embargo, se considera que, con estudios que incluyan encuestas agroeconómicas y con información actualizada del censo silvoagropecuaria, se podría estimar con menor incertidumbre los

valores de demanda de agua agrícola, dado que esta información actualmente no existe para todo el valle de Azapa.

3.1.2.1 Demanda agrícola histórica y proyectada

En el estudio DGA-DICTUC (2020) se realizó una revisión de los antecedentes principales de la cuenca del río San José, con la finalidad de caracterizar magnitudes de demanda de agua históricas para uso agrícola en la cuenca (Ver Figura 3-8). Como se observa, la demanda agrícola tiende a ser estimada entre los 1.200 y 1.700 L/s durante los últimos 15 años, representando una de las principales demandas de la cuenca.

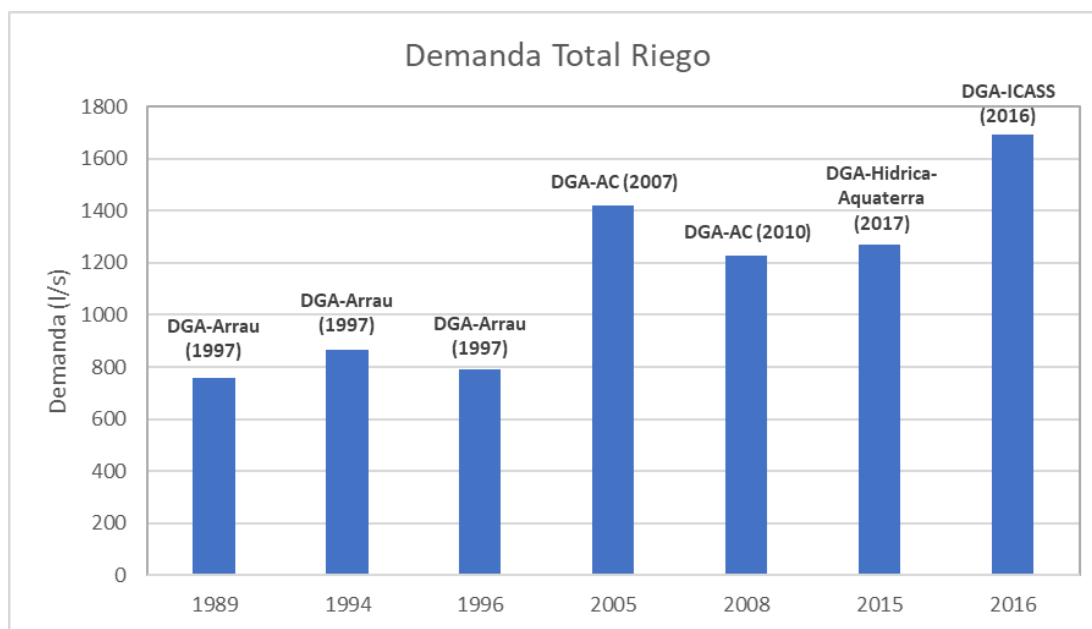


Figura 3-8. Evolución de la demanda de agua total de riego en la cuenca del río San José.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a DGA-ARRAU (1997), DHV (1995), DGA-Hídrica-Aquaterra (2017) y DGA-ICASS (2016).

Dado que existe demanda agrícola tanto en la subcuenca de Azapa Alto como en la subcuenca del río San José, es que a continuación se presentan los resultados diferenciados por subcuencas, haciendo la precisión de que existe mayor fiabilidad de datos para la subcuenca del río San José, específicamente para el valle de Azapa, dado que fue parte del levantamiento de detalle realizado por DGA-DICTUC (2020).

3.1.2.1.1 Subcuenca Azapa Alto

La demanda Agrícola (AGR) histórica y futura fue estimada por DGA-DICTUC (2020) y es representada a través de 1 nodo de demanda, que agrupa tanto la actividad frutícola, de hortalizas, riego de praderas y otras. La demanda requerida fue definida a una escala anual. Los datos que definen la demanda agrícola en la subcuenca de Azapa Alto fueron obtenidos desde DGA-Hídrica-AquaTerra (2017), que entregan un total de 253 L/s, equivalente a cerca de 7.978.608 m³/año, la cual fue mantenida para efectos de modelación constante en el tiempo, dentro del periodo histórico.

Respecto al comportamiento de la demanda agrícola en el periodo futuro, esta fue estimada calcula a partir de un Factor Futuro estimado por información recabada por el estudio DGA-Hídrica-AquaTerra (2017). El Factor Futuro para la demanda agrícola en la zona Alta de la cuenca del río San José oscila entre 1 y 1,188 entre los años 2018 a 2050, respectivamente. Por tanto, con el factor futuro definido y la demanda requerida del periodo histórico, se interpolaron de forma lineal los datos para obtener la serie de tiempo de la demanda requerida Agrícola, como muestra la Figura 3-9, donde se observa que la demanda agrícola podría llegar a los 300 L/s al 2050.

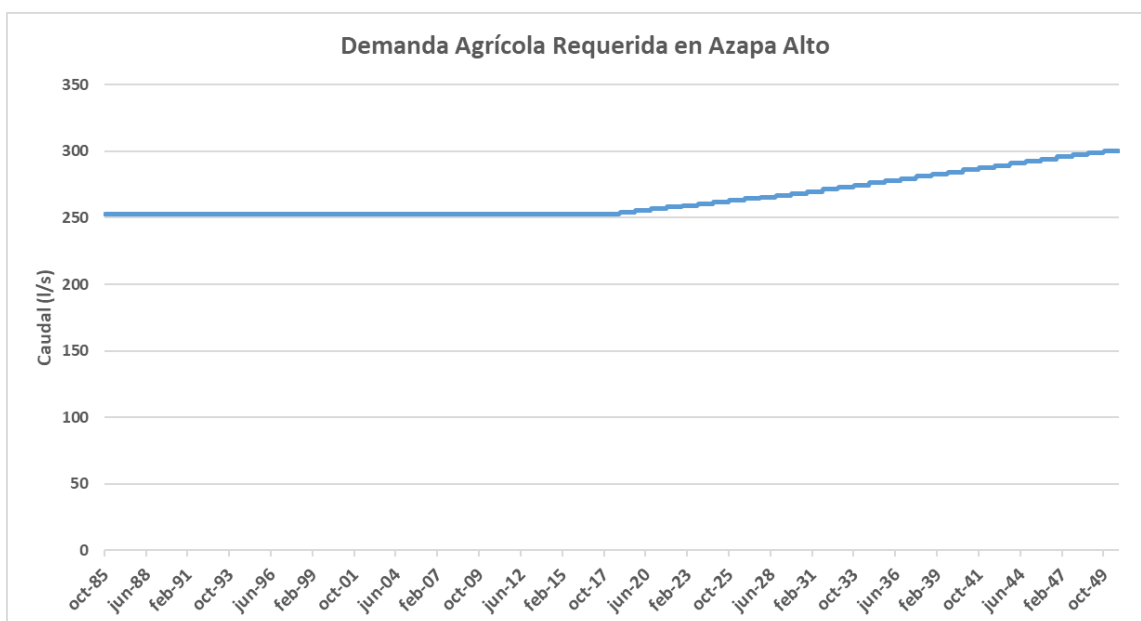


Figura 3-9. Evolución de la demanda de agua total de riego en la cuenca de la subcuenca de Azapa Alto para el periodo 1986-2050.

Fuente: DGA-DICTUC (2020) en base a DGA-ARRAU (1997), DHV (1995), DGA-Hídrica-Aquaterra (2017) y DGA-ICASS (2016).

3.1.2.1.2 Subcuenca río San José

La demanda agrícola en la subcuenca del río San José, específicamente en el valle de Azapa, fue estimada por DGA-DICTUC (2020) de forma indirecta utilizando propiedades de los cultivos sembrados, superficie agrícola, y factores climáticos principalmente relacionados a la precipitación y temperatura. Además, en el modelo hidrológico del valle de Azapa, la demanda agrícola se distribuye en seis zonas de riego (ZR) (Figura 3-10) que se determinaron en base a diferentes localidades existentes en el valle de Azapa y la ubicación de canales de regadío derivados del canal Azapa. Así también, cada zona de riego definida posee información dividida en los tres principales tipos de cultivos de la zona: Frutales, Hortalizas y Hortalizas en invernaderos.

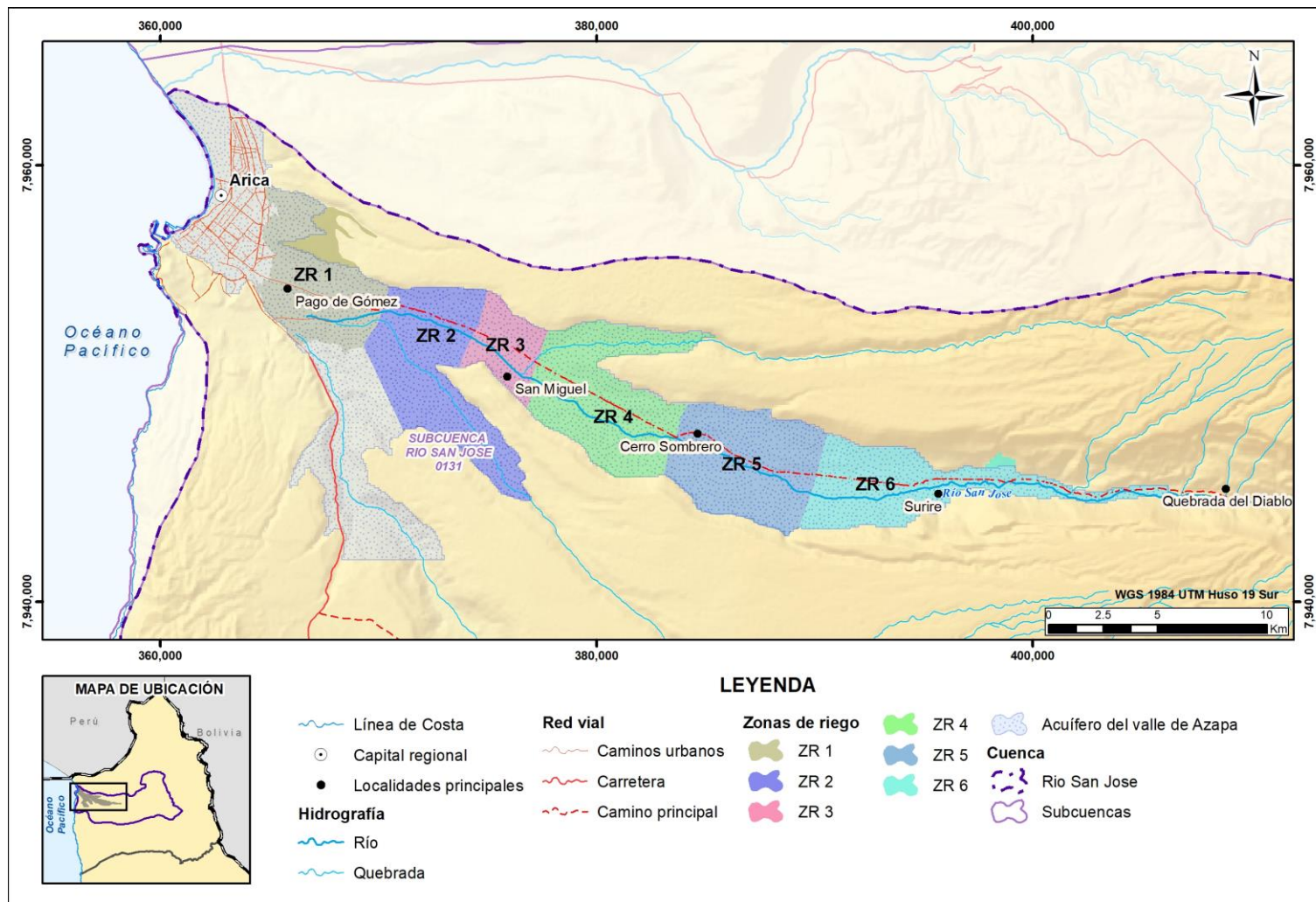


Figura 3-10. Zonas de riego definidas en el valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Las diferentes localidades que cada zona de riego posee dentro del valle de Azapa se muestran en la Tabla 3-3 . Al año 2018, la superficie de riego agrícola posee un total 3.658 hectáreas según la estimación de DGA-DICTUC (2020). Es importante mencionar que la demanda de la actividad agrícola se abastece de una oferta superficial proveniente del canal de Azapa y de una oferta subterránea que proviene del acuífero del valle de Azapa.

Tabla 3-3. Sectores o localidades por zona de riego.

Código de Zona de Riego	Sectores/Localidades
ZR1	Pago de Gómez – Cerro Sombrero
ZR2	Albarracín – Alto de Ramírez – Las Maitas – Cooperativa Juan Noé – Las Llosyas
ZR3	San Miguel de Azapa – Las Riberas
ZR4	Cerro Moreno – Rivera Norte – Quebrada del Diablo – Santa Irene – Chuval
ZR5	Cabuza – Cerro Blanco – Sobraya – Chitita
ZR6	Casa Grande – Livilcar – Dieciocho de Septiembre – La Cruz – Pampa Algodonal – Surire - Ticamar

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Un primer elemento por determinar, para calcular la demanda requerida a los distintos tipos de cultivos agrícolas, es la superficie y su evolución temporal para el periodo histórico y futuro. Para conocer la superficie de la serie de Frutales se utilizó como fuente el Censo frutícola de CIREN (2019), el cual fue complementado con datos del Censo Agropecuario de 2007 y 1997 (INE, 2007; INE, 1997) para posteriormente interpolar de forma lineal los datos, obteniendo una serie continua de la superficie Frutícola para el periodo histórico.

En cuanto a la serie de hortalizas, fue consultado el Censo Agropecuario de 1976, 1997 y 2007. Luego, para conocer el periodo entre 2007 y 2018, se utilizó la metodología de Knight Piesold (2014) la cual consiste en aplicar la variación del Producto Interno Bruto (PIB) Silvoagropecuario entre 2007 y 2018 a la serie de Hortalizas y obtener la serie completa del periodo histórico. Para aplicar esa metodología, el PIB fue obtenido a través de información otorgada por el Banco Central (2020) y ODEPA (2020a).

En cuanto a la superficie de Hortalizas en Invernaderos, fue necesario aplicar dos metodologías: obtener la superficie de invernaderos registrados en los Censos Agropecuarios de 2007 – 1997 e identificar la superficie de invernaderos por medio de imágenes satelitales desde el año 2016 al 2020. La información de superficie de plantaciones en invernaderos de los Censos Agropecuarios 1997 y 2007 fue obtenida desde ODEPA (2020b). Además, se estableció el supuesto de que antes de 1987 no existían invernaderos y estos comienzan de forma gradual a aparecer a partir de esa fecha.

Respecto al trabajo de imágenes satelitales, estas fueron previamente corregidas, para poder calcular el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Paralelamente, con las imágenes satelitales se aplicó el Índice de detección de invernaderos de plástico desarrollado por Yang et. Al. (2017), lo que a ese resultado fue multiplicado el índice NDVI. Posteriormente, la capa resultante fue contrastada con una imagen de alta resolución del valle de Azapa identificando zonas de invernadero en el valle de Azapa en cada Zona de Riego. Con la información recopilada, se procedió a interpolar los datos para obtener valores a nivel mensual mediante una interpolación lineal.

Obtenida la superficie agrícola para los tres tipos de cultivo, fue necesario asignar una proporción de estas a cada Zona de Riego. Para eso, se utilizó el catastro de área agrícola de CONAF (2015) que permitió ponderar el área total del tipo de cultivo al área de cada Zona de Riego.

En el caso de las hortalizas, en la Figura 3-11 se presenta el área cultivada por hortalizas en el valle de Azapa. La metodología empleada se describe el Anexo H sección 3.4.5. Se observa que las hectáreas de cultivo de hortalizas han aumentado de forma sostenida desde los años 90, con un crecimiento importante desde el año 2010, llegando a más de 2.500 hectáreas de hortalizas cultivadas.

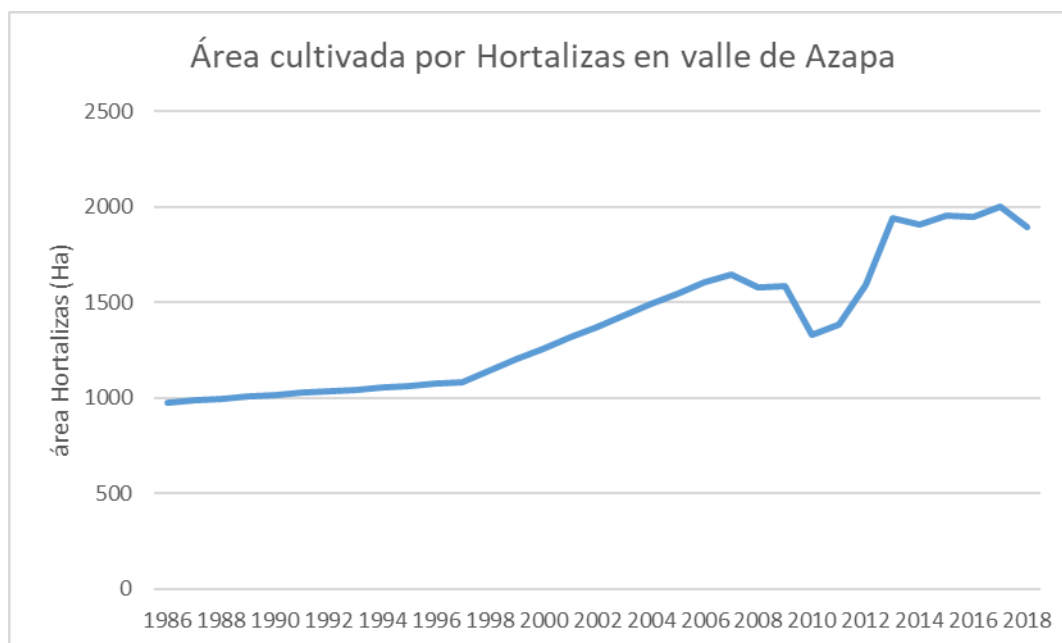


Figura 3-11. Serie de tiempo de la estimación del área cultivada de hortalizas.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

En el Anexo J Sección 2.1.1 y Anexo H 3.1.2 se presentan las 35 especies de hortalizas junto a su área y proporción respecto al total, a su vez, se presentan las series de tiempo para las especies tomate consumo fresco, poroto verde, choclo y pimiento en cada zona de riego del valle de Azapa. Paralelamente, en la Figura 3-12 se observa el área de cultivo hortícola por zona de riego en el valle de Azapa. La ZR 2, 4 y 6 son las que poseen la mayor cantidad de hectáreas de hortalizas cultivadas.

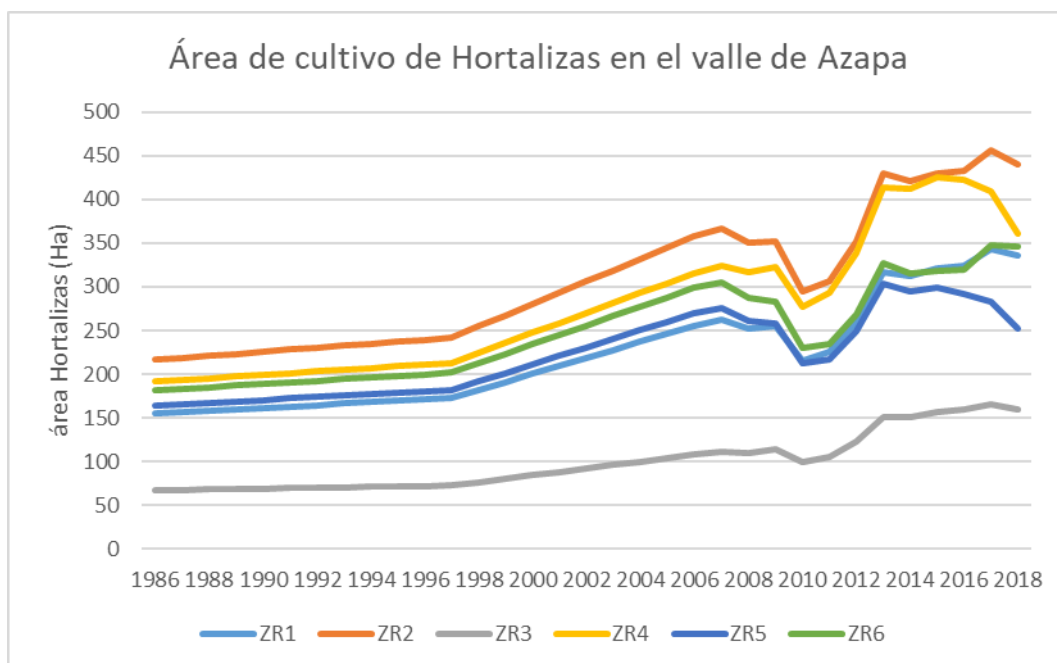


Figura 3-12. Serie anual estimada del área de cultivos hortícolas en el valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Con respecto a frutales, la serie de tiempo de la superficie con frutales se obtuvo del censo frutícola (CIREN, 2019). En la Tabla 3-4 se observa el área con frutales por cada zona de riego para el año 2018, las dos primeras zonas de riego concentran el 60% de la superficie regada.

Tabla 3-4. Área con frutales por cada zona de riego (año 2018).

Zona de Riego	Área (ha)	Porcentaje (%)
ZR1	274,69	30,9%
ZR2	289,27	32,6%
ZR3	119,01	13,4%
ZR4	160,34	18,1%
ZR5	30,35	3,4%
ZR6	14,50	1,6%
Total	888, 16	100%

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Las especies de frutales con su área correspondiente se detallan en el Anexo J Sección 2.1.1 y Anexo H 3.1.2. A su vez, en la Figura 3-13 se presenta la superficie de cultivos frutales por zona de riego en el valle de Azapa.

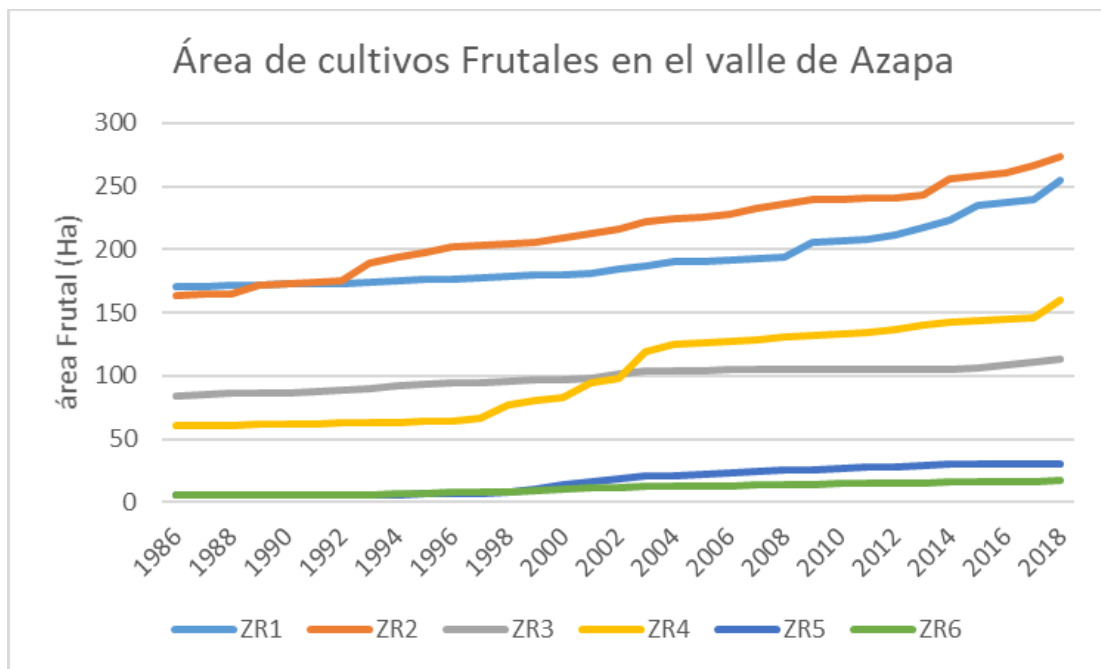


Figura 3-13. Serie anual estimada del área de cultivos frutales en el valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

En el caso de las viñas, dado que no se cuenta con información a nivel distrital de los censos agropecuarios de 1997 y 2007, se estima la superficie mediante la misma metodología utilizada en los cultivos de hortaliza (ver Anexo H 3.1 y sección 3.4.5). En la Figura 3-14 se presenta la evolución histórica del área con viñedos en Azapa.

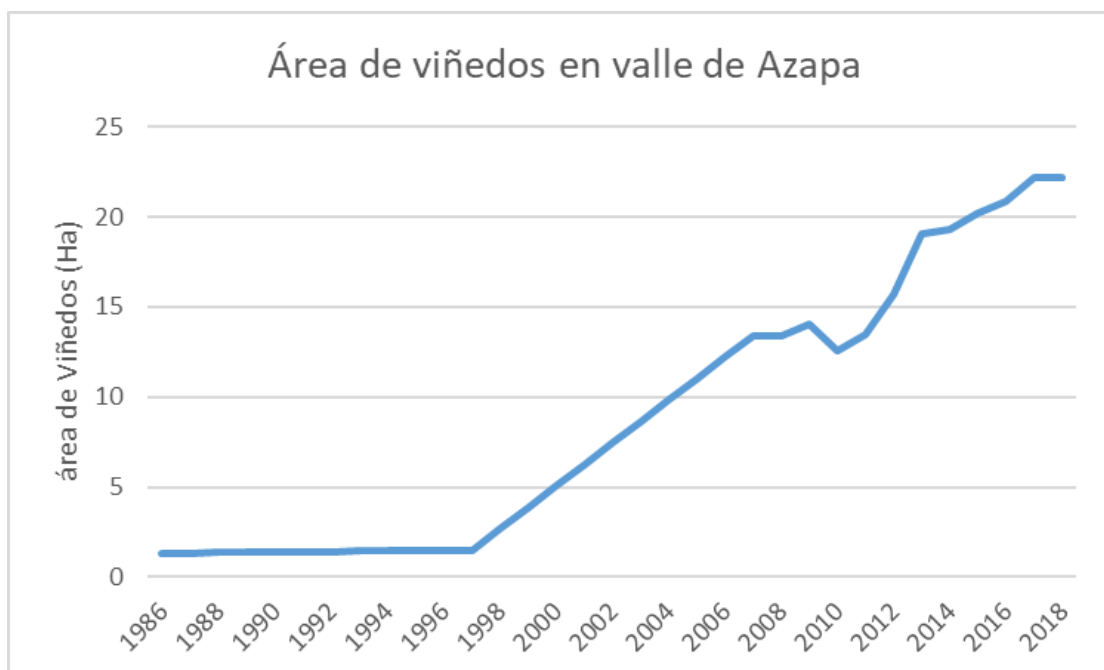


Figura 3-14. Serie de tiempo de área con viñedos en Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

En el censo agropecuario del año 1997 y 2007 se reportan otros cultivos (como forestales y forrajeras permanentes), sin embargo, al no disponer de información actualizada sobre su tendencia solo se presenta la información que otorgan los censos mencionados. Para el año 1997 se presentan 128 ha de forrajeras permanentes -todo bajo régimen de riego- y 0 ha de plantaciones forestales. Sin embargo, para el censo agropecuario del año 2007, se presentan 0,76 ha de forrajeras permanentes – de las cuales 0,65 ha son de riego- y 5,75 ha forestales. Lo catastrado de forrajeras permanentes corresponde a alfalfa en ambos censos, mientras que las plantaciones forestales son menores a cinco años siendo la mayoría de tipo mixto.

Por último, el censo de 1997 muestra 11,57 ha de flores de las cuales 3.500 m² son en invernaderos, consiguientemente, el censo realizado el 2007 presentó 20,46 ha de flores de las cuales 700 m² se encuentran en invernaderos. En las últimas décadas han incrementado los invernaderos en el sector productivo agrícola del valle de Azapa (Figura 3-15). En el Anexo J Sección 2.1.2 y Anexo H 3.1.2 se presentan las especies cultivadas en invernadero.

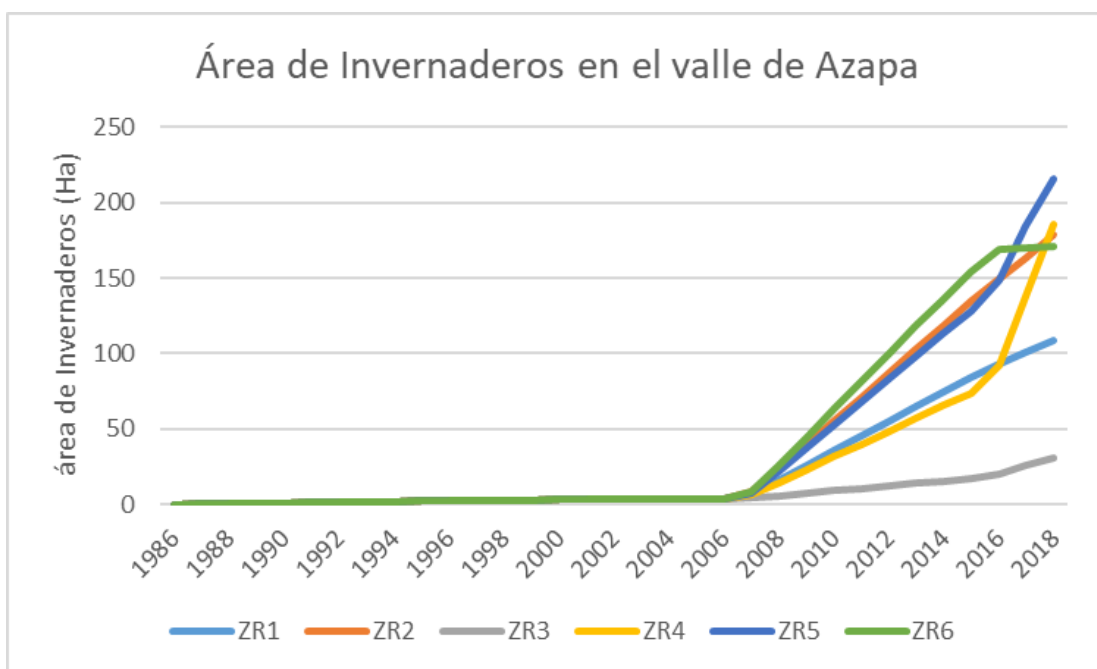


Figura 3-15. Serie mensual de superficie cubierta por invernaderos en el valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Cabe destacar que las hortalizas han aumentado en el tiempo, mientras las forrajeras han disminuido. Esto implica que hay un cambio de cultivo en la zona, revelando un alto dinamismo agrícola en la zona, por lo que considerar nuevos catastros es importante para tener información actualizada.

En síntesis, la Figura 3-16 se presenta la superficie agrícola (ha) para el periodo histórico (1986-2018) y proyectado (2020-2050) según las estimaciones del estudio DGA-DICTUC (2020). Se observa un aumento progresivo de la superficie cultivada, motivada principalmente por el aumento del cultivo de hortalizas en invernadero (en detrimento de la superficie de hortalizas cultivadas en exterior) y de los frutales. Cabe destacar que este dato podrá ser mejorado en futuros estudios a partir de los datos del Censo Silvoagropecuario 2022.

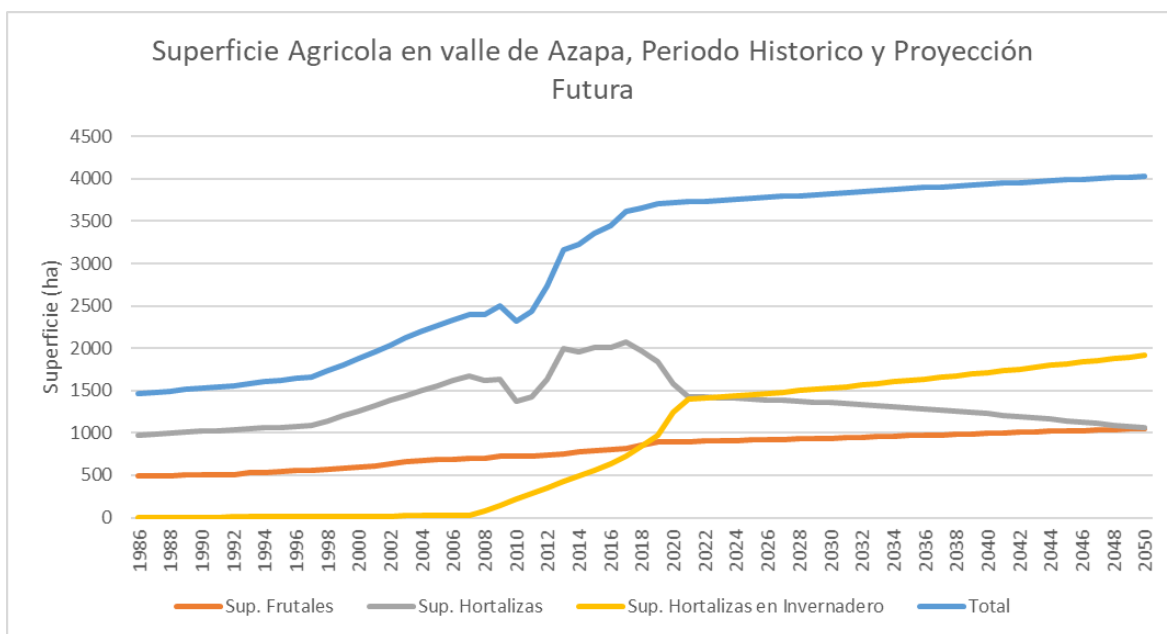


Figura 3-16. Serie mensual de superficie cubierta por invernaderos en el valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Ahora bien, y ya teniendo las superficies de riego, otro factor relevante y necesario es el coeficiente de cultivo (kc) el cual fue obtenido por AGRIMED (2015) y definido para cada tipo de cultivo en el modelo. Respecto a los cultivos en invernadero, el coeficiente de cultivo se corrigió en razón 0,81:1,25 para el cultivo en invernadero y exterior respectivamente, según propuesta de INDAP (s.f).

Para calcular la demanda requerida agrícola en el periodo futuro, se analizó los datos del estudio realizado por DGA-hídrica-Aqua Terra (2017) que estiman una demanda hídrica futura para la agricultura. Esto permitió obtener un Factor Futuro agrícola, que se aplicó a la superficie agrícola del periodo histórico a través de una interpolación lineal. Los valores del Factor Futuro oscilan entre 1 y 1,18 entre los años 2018 y 2050 respectivamente.

En la Figura 3-17 se muestra la evolución de la demanda requerida para toda la actividad agrícola, tanto para su periodo histórico y futuro, sin diferenciar por fuente de abastecimiento. Se observa un comportamiento con variabilidad intraanual, dado que el riego suele tener un ciclo de mayor y menor consumo durante el año. Se observan además consumos máximos de 1.800 L/s hacia el futuro. Es importante considerar que existe incertidumbre en la estimación de la superficie futura de riego, pues dependerá de diversos factores como la dinámica de los mercados nacionales e internacionales, cambios tecnológicos, cambios en mano de obra, cambio en inversiones, entre otros.

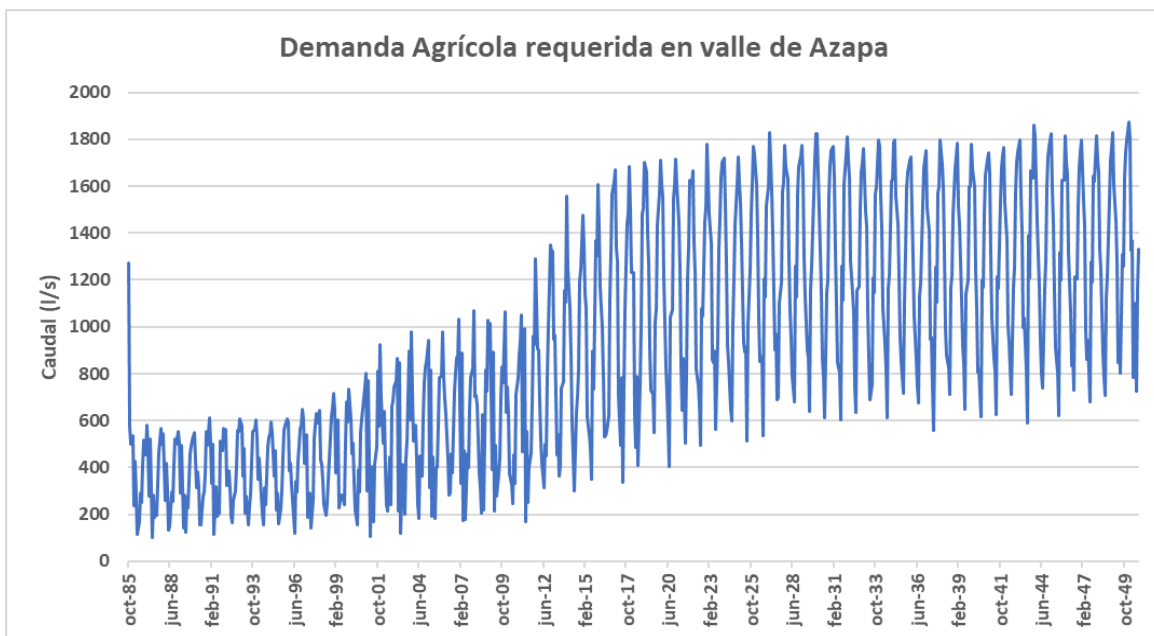


Figura 3-17. Evolución de la demanda de agua total de riego en la subcuenca del río San José para el periodo 1986-2050.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

3.1.2.2 Eficiencia de uso

A partir de los censos agropecuarios 1997 y 2007, DGA-DICTUC (2020) estableció el método de riego empleado, los que fueron clasificados como riego “tradicional” y “tecnificado” (Ver Figura 3-18).

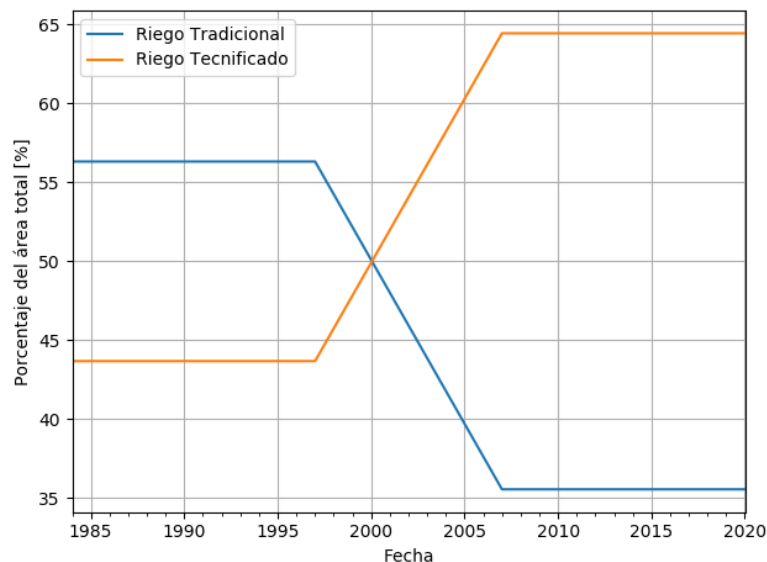


Figura 3-18. Método de riego empleado en Azapa, en porcentaje (periodo 1985-2020).

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

En el caso de los cultivos frutales, el método de riego se obtuvo del catastro frutícola 2019 (CIREN, 2019), los cuales fueron agrupados según zona de riego considerando dos categorías: riego tecnificado -incluye riego por goteo y microaspersión- y riego tradicional -incluye riego por secano, surcos y tazas-. En el Anexo H 3.1.2 se presenta la metodología, mientras el Anexo J Sección 2.1.2, se encuentran las series de tiempo de riego tecnificado y tradicional por zona de riego.

Para los invernaderos se consideró una eficiencia de riego del 40% para tradicional y 88% para tecnificado, para ello se adoptó un valor representativo de la mayor proporción según la información presentada por INDAP (s.f.).

Finalmente, el riego se ha ido tecnificando a lo largo del tiempo, dada la disminución de las hectáreas regadas con métodos tradicionales mientras aumenta el riego micro localizado (gooteo y microaspersión). Por otro lado, las pérdidas por infiltración proveniente de los canales -canal Azapa y sus canales secundarios- se obtuvieron de DOH-ARRAU (2010).

3.1.3 Industrial y Pecuario

La demanda de agua por parte de la actividad industrial (IND) fue estimada por DGA-DICTUC (2020), y es representada a través de un nodo de demanda, ubicado al norte de la ciudad de Arica. Este nodo de demanda representa todas las actividades industriales de la zona que extraen agua desde el acuífero bajo estudio. Es por lo anterior, que la definición de la demanda requerida se obtuvo a partir de información recabada por el estudio DGA-ICASS (2016). Dicho estudio estimó la demanda industrial basada en el estudio DGA-IPLA (1996), donde se señala que la demanda industrial en la cuenca del río San José es de un total bruto de 176,7 L/s (Ver Tabla 3-5).

La mayor extracción del rubro industrial proviene de las pesqueras, aquellas que demandan agua salobre para procesos industriales, mediante captaciones propias localizadas al Sur de la ciudad de Arica, dado esto se consideraron fuera del área de estudio al no afectar el balance propio del acuífero del valle de Azapa. Sobre la demanda de agua minera, según DGA-ICASS (2016) existe una demanda de 0,8 L/s asociado a dicho sector productivo. Sin embargo, la mina existente en la zona -mina Carol- no registra caudales de extracción. Las demás fuentes industriales (industrias químicas, Procesamiento aves de corral, embotelladoras y cervecerías, frigoríficos y otras) poseen una demanda bruta total de 52 L/s.

Tabla 3-5. Resumen demanda de agua estimadas por actividades industriales en la cuenca del río San José para el año 2018.

Rubro	Demanda neta		Demanda bruta	
	m ³ /mes	L/s	m ³ /mes	L/s
Pesqueras*	226.000	87,2	323.180	124,7
Industrias químicas	30.000	11,6	81.000	31,3
Procesamiento aves de corral	20.000	7,7	25.000	9,6
Embotelladoras y cervecerías	10.000	3,9	14.000	5,4
Frigoríficos, mataderos y procesamiento de carnes	6.000	2,3	7.500	2,9

Rubro	Demanda neta		Demanda bruta	
	m ³ /mes	L/s	m ³ /mes	L/s
Otras	6.000	2,3	7.200	2,8
TOTAL	298.000	115,0	457.880	176,7
m³/año	3.576.000		5.494.560	

*La actividad pesquera extrae agua desde el sur de la ciudad, no constituyendo demanda subterránea del sistema acuífero analizado según DGA-DICTUC (2020).

Fuente: DGA-ICASS (2016).

En cuanto al periodo futuro, la demanda requerida de la actividad industrial también contó con un Factor Futuro que estima en el tiempo la demanda, hasta el año 2050. Los valores del año 2018 al 2050 van desde 1 a 1,57 respetivamente. Así, en Figura 3-19 se observa la evolución de la demanda, con una demanda bruta de 52 L/s para el periodo histórico y un máximo para el periodo futuro de más de 80 L/s, equivalente a más de 2,5 hm³/año.

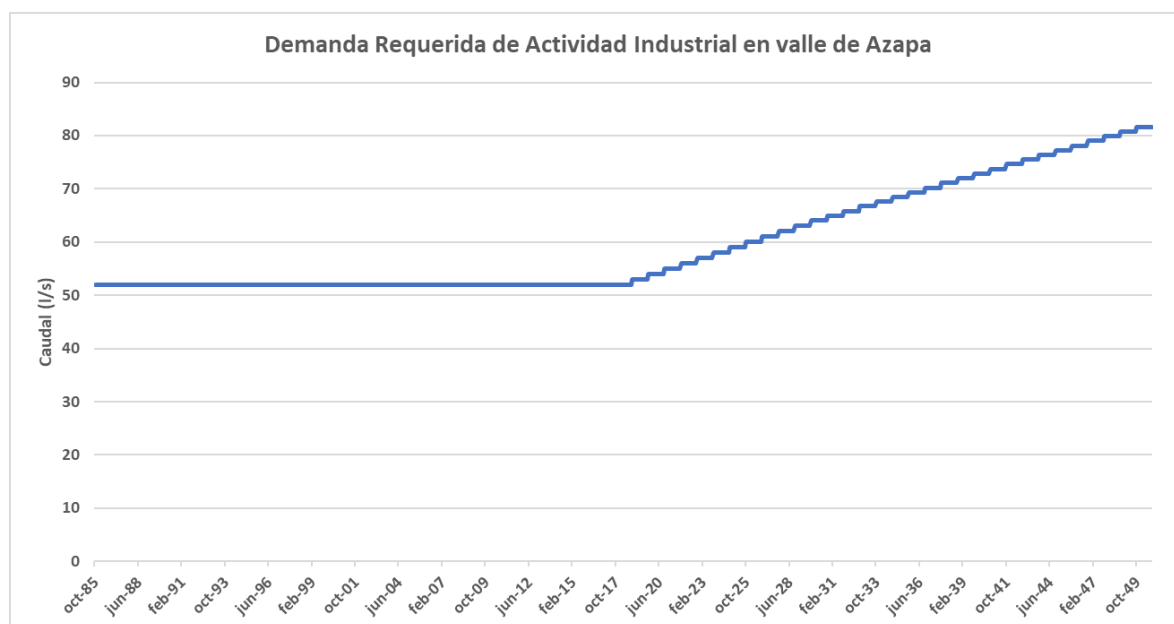


Figura 3-19. Evolución de la demanda industrial en la ciudad de Arica para el periodo 1986-2050.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

3.1.4 Resumen de demandas

En la Tabla 3-6 se presenta un resumen de las demandas, diferenciando por periodo histórico y futuro, tanto para la subcuenca de Azapa Alto como para la subcuenca del río San José. De forma similar, la Tabla 3-7 resume los datos puntuales proyectados para los distintos usos dentro de la cuenca del río San José. Destaca que el principal uso de la subcuenca del río San José, específicamente en el valle de Azapa, es el uso agrícola con un promedio de 568,1 L/s y un promedio futuro de 1278 L/s. Esta diferencia se debe a que desde el 2010 aproximadamente la superficie agrícola comenzó a aumentar de

forma relevante en el valle, llegando a cerca de 4.500 hectáreas al año 2018, lo que influyó en la estimación del promedio de demanda. Sigue al uso agrícola el consumo de agua potable urbana, con un promedio histórico de 464 L/s y un promedio futuro de cerca de 700 L/s. Ambos usos, por tanto, representan las principales demandas de agua de la cuenca, sin discriminar desde que fuente obtienen el agua.

Tabla 3-6. Resumen demandas promedio (L/s y Hm³/año) estimadas en estudio DGA-DICTUC (2020), diferenciando por subcuenca y tipo de uso.

Tipo Demanda	Subcuenca río San José				Subcuenca Azapa Alto			
	Periodo histórico (1986-2018)		Periodo futuro (2020-2050)		Periodo histórico (1986-2018)		Periodo futuro (2020-2050)	
	L/s	Hm ³ /año	L/s	Hm ³ /año	L/s	Hm ³ /año	L/s	Hm ³ /año
Agua Potable Urbana	464,8	14,7	680,3	21,5	-	-	-	-
Agua Potable Rural	5,9	0,2	7,7	0,2	1,6	0,05	1,7	0,05
Agricultura	568,1	17,9	1278,2	40,3	253,0	7,9	276,2	8,7
Industrial	52	1,6	68,2	2,2	-	-	-	-
Total	1.090,8	34,4	2.034,4	64,2	254,6	7,95	277,9	8,75

Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 3-7. Resumen demandas (Hm³/año) al 2018 y proyectadas según estudio DGA-DICTUC (2020), diferenciando por subcuenca y tipo de uso.

Tipo Demanda	Subcuenca río San José				Subcuenca Azapa Alto			
	2018	2030	2040	2050	2018	2030	2040	2050
Agricultura	33,2	41,1	39,9	43,7	8,0	8,5	9,0	9,5
Agua Potable Urbana	19,0	20,8	22,2	23,7				
Agua Potable Rural	0,22	0,24	0,25	0,25	0,05	0,05	0,06	0,06
Industrial	1,6	2,0	2,3	2,6				

Fuente: Elaboración propia (2022).

Ahora bien, considerando el acuífero del valle de Azapa como zona de estudio del presente PEGH, es que en la Figura 3-20 se presentan los principales hitos y zonas asociadas a ambos usos a lo largo del valle, donde se observa que el uso de agua potable urbana, rural y de agricultura conviven en el valle, mientras que en la zona urbana domina el uso de agua potable urbana.

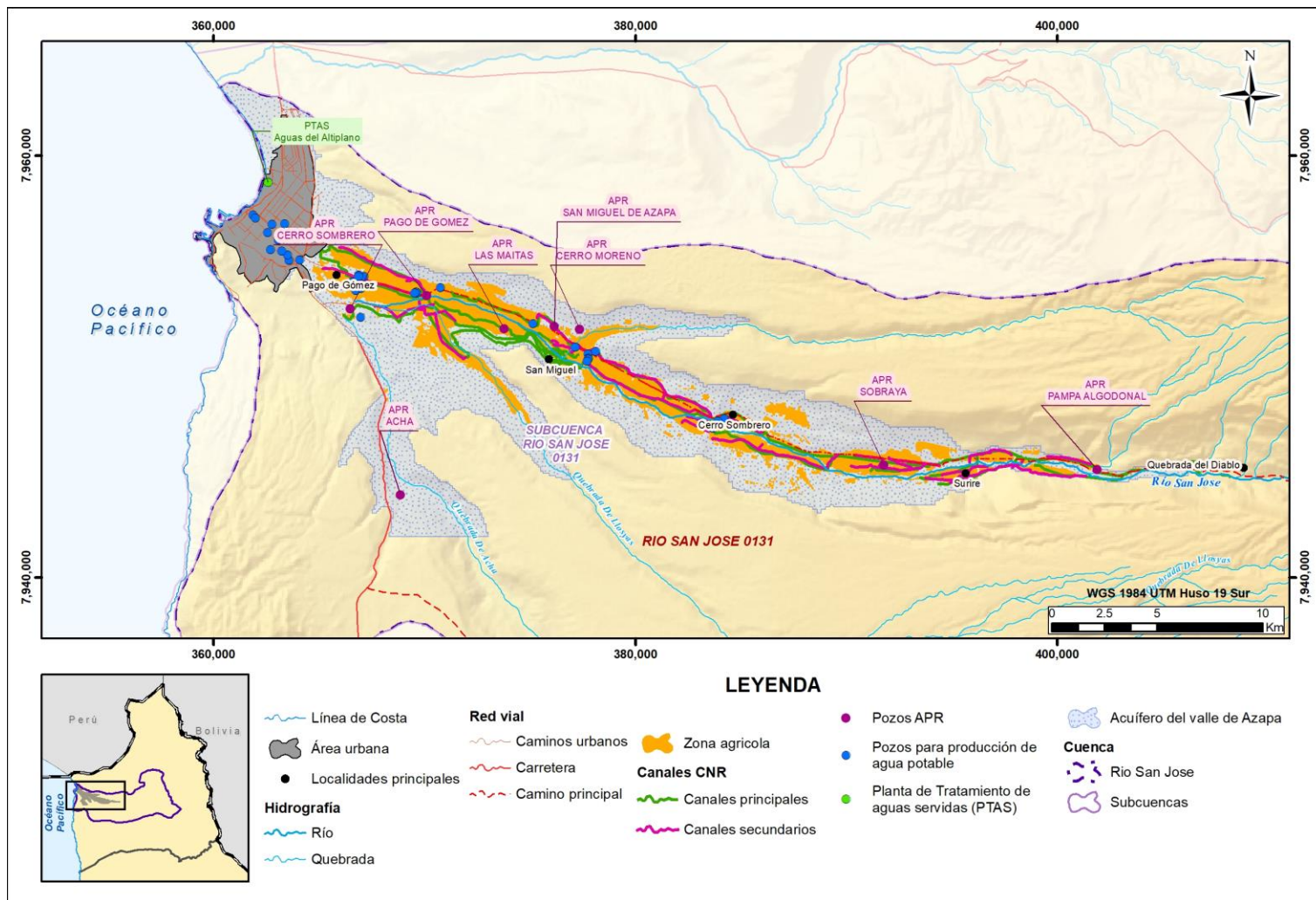


Figura 3-20. Distribución de puntos relevantes y sectores de demanda del sector de agua potable y agricultura de riego a lo largo del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

3.1.5 Brechas de información de demanda

Es el presente acápite se mencionan las principales brechas de información relacionadas al capítulo precedente y que condicionan una completa y precisa caracterización de la demanda hídrica del área de estudio, las que sirven de contexto para la delimitación de acciones para el cierre de dichas brechas, acciones que se detallan en la sección 6. Dichas brechas se levantaron producto del presente estudio, así como lo señalado en DGA-DICTUC (2020).

Considerando las fuentes de información disponibles cabe destacar que:

- No se dispone de la información del censo agropecuario realizado en 1976, dado que sólo se encuentra en formato físico en CIREN. Esto se subsana estimando con una proporción regional a partir de los resultados de INE (1997).
- Los datos entre 2007 y 2020 fueron calculados siguiendo una metodología bajo el supuesto que las hectáreas aumentan en el tiempo en base al PIB. Lo que no es cierto en todos los casos, ya que en ese mismo informe de Knight Piesold -de donde proviene la metodología- se observa que entre 1975 y 2007 el área cultivada decrece en algunos sectores, debido al aumento del recurso hídrico destinado a otros usos, situación que varía según las condiciones locales y no regionales. Se considera que esta información podría ser mejorada con el nuevo censo agropecuario. Cabe destacar que el segundo semestre del 2022 se liberarán los resultados del último censo agropecuario, información que podrá robustecer la estimación de demanda.
- Algunas planillas de la información del censo de 1997 y 2007 no eran consistentes con las tablas totales, por lo que sólo se usaron las planillas con información detallada, por ejemplo, sólo de hortalizas y no las series agregadas.
- La estimación de la demanda se puede robustecer con información acerca de la fuente de abastecimiento de agua, diferenciando de fuentes subterráneas y fuentes superficiales. Esta información permitirá mejorar la operación del modelo numérico acoplado y permitiría identificar las extracciones ilegales.
- Es necesario tener información más precisa de la demanda de Agua Potable Rural, considerando el importante aumento de población a lo largo del valle de Azapa y las dificultades técnicas de los actuales sistemas APR para abastecer a mayor cantidad de población. Los datos de demanda de APR fueron estimados a partir de DGA-ICASS (2016), por lo que pueden estar desactualizados y pueden ser complementados con datos del Censo 2017.

3.2 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS

A partir del Catastro de Usuarios desarrollado por DGA-DICTUC (2020) y el Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA, la Tabla 3-8 muestra el caudal provisto por el CPA por rubro y por naturaleza del derecho para la cuenca del río San José. Se observa que el agua que satisface los diferentes usos proviene principalmente de aguas subterráneas y que la mayoría de los caudales se encuentren asociados al riego, mientras que una alta cantidad de derechos se encuentran sin un uso declarado.

Tabla 3-8. Número de derechos y caudal por uso declarado y naturaleza del derecho, según el CPA al año 2020.

Uso declarado del DAA	Aguas subterráneas		Aguas superficiales	
	Número de DAA	Caudal Anual Promedio (L/s)	Número de DAA	Caudal Anual Promedio (L/s)
Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	27	254,00	6	172,90
Otros Usos	3	101,90		
Riego	222	777,26	15	344,29
s/i	177	850,42	11	181,40
Uso Industrial	4	28,80		
Energía Hidroeléctrica			1	142,27
Total	433	2.012,38	33	840,86

Fuente: Elaboración propia (2022).

Según la información anterior, el uso para riego tiene asignado más de 1.100 L/s entre los derechos de aguas superficiales y subterráneas. Si eso se compara con la información de demanda del área agrícola (Tabla 3-6) se observa que la demanda histórica no supera los 900 L/s. En el caso del agua para bebida y saneamiento, se tienen derechos de agua por un poco más de 400 L/s entre DAA superficial y subterráneo pero la demanda de agua potable y rural es menor a 500 L/s (Tabla 3-6). Con esta información se puede desprender que existe un desbalance entre la demanda de agua y los DAA otorgados. En el caso de la actividad agrícola hay más DAA otorgados que la demanda de los cultivos y en el caso del agua potable y saneamiento la demanda supera a los derechos otorgados. Así se identifican problemas de gestión del recurso.

3.3 MERCADO DE AGUAS

3.3.1 Evolución histórica

La información que se presenta a continuación proviene de la base de datos "Inscripciones de Derechos de Aprovechamiento de Aguas informadas por Conservadores de Bienes Raíces" de la región de Arica y Parinacota, obtenida desde el portal web de la DGA con fecha de emisión el 25 de enero de 2022. La base de datos original se presenta en el Anexo J.3.

Esta base de datos indica el tipo de transacción de cada DAA, el nombre del vendedor y comprador, la naturaleza del agua, el caudal promedio, el tipo y ejercicio del derecho, la fuente de obtención, el valor total de la transacción, entre otras variables.

A continuación, se presenta el desglose de las características esenciales de los DAA y los movimientos de estos, inscritos en el Conservador de Bienes Raíces (CBR) de Arica desde el año 1990 al 2020.

i) Número de transacciones

El número de transacciones informadas corresponde a 6.103 en un periodo de 30 años. En la Figura 3-21 se presenta las transacciones de DAA realizadas anualmente desde 1990 al 2020. Se observa que del 2012 al 2020 se concentra la mayoría de las

transacciones de DAA en relación con el total informado, llegando a su máximo el 2015 con 626 transacciones.

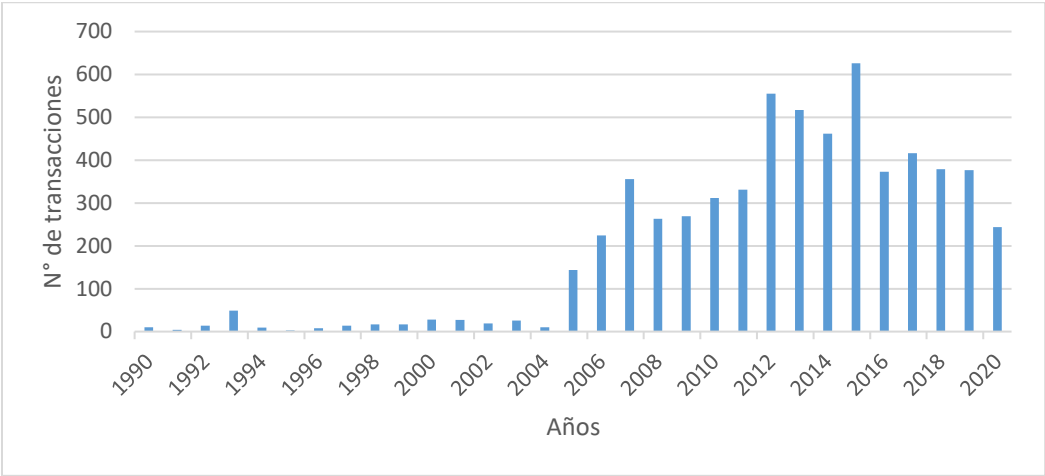


Figura 3-21. Número de transacciones de DAA realizadas anualmente desde 1990 hasta 2020 según los registros del CBR Arica enviados a DGA.

Fuente: Elaboración propia (2022).

ii) Naturaleza del derecho

La naturaleza de los DAA transados en el mercado, ya sean de agua superficial como subterránea se pueden observar en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Número de derechos transados entre 1990 y 2020 según naturaleza (superficial y subterránea).

Naturaleza del derecho	N° de DAA
Superficial	1.110
Subterránea	4.585
No indica	408

Fuente: Elaboración propia (2022).

En la Tabla 3-9 se aprecia que la mayoría de los movimientos de DAA corresponden a una naturaleza subterránea, situación esperable considerando el bajo caudal de las fuentes superficiales presentes en la cuenca (o valle). En el caso de los DAA en que no se indica la naturaleza, para el análisis se determinó su naturaleza según la fuente correspondiente del derecho, pudiendo ser de un río, quebrada, canal, pozo, canal, etc.

iii) Ejercicio del derecho

El ejercicio del derecho corresponde a si el DAA comercializado es de carácter permanente continuo, discontinuo o alternado, o si el DAA es eventual continuo, discontinuo o alternado. En la Tabla Y se presenta el detalle.

Tabla 3-10. Número de derechos transados entre 1990 y 2020 según ejercicio del derecho.

Ejercicio del derecho	N° de DAA
Permanente continuo	3.519
Permanente discontinuo	20
Permanente alternado	1.547
Eventual continuo	11
Eventual discontinuo	6
Eventual alternado	1
No indica	999

Fuente: Elaboración propia (2022).

En la Tabla 3-10 anteriormente expuesta, se aprecia que la mayoría de los movimientos de DAA corresponden a derechos permanentes, tanto continuos como alternados. En cambio, los derechos de ejercicio eventual transados tienen una proporción significativamente menor. Se destaca que más del 16% de los movimientos de DAA no tiene identificado el ejercicio de estos.

iv) Tipo de Derecho

En la siguiente tabla se presentan los DAA según el tipo de derecho que estos sean, es decir, si corresponde a derechos consuntivos o no consuntivos (ver Tabla 3-11).

Tabla 3-11. Número de derechos transados entre 1990 y 2020 según tipo (consuntivo, no consuntivo).

Tipo de Derecho	N° de DAA
Consuntivo	4.979
No consuntivo	25
No indica	1.099

Fuente: Elaboración propia (2022).

Según la base de datos del CBR, la mayoría de los DAA corresponden al tipo de derecho consuntivo, lo cual va en línea con que el principal uso del recurso en el valle (o cuenca) es el agrícola, que es un uso consuntivo por naturaleza. Por otro lado, una parte considerable de los DAA no indican el tipo de derecho que corresponde.

3.3.2 Valor del DAA

Con el fin de estimar el valor de mercado de lo DAA, se utilizó la base de datos del CBR de la región de Arica y Parinacota previamente descrita, la cual presenta 6.103 registros de transacciones desde 1990 al 2020.

Sobre esta base de datos se procedió a aplicar criterios de depuración en base a la metodología que la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) utiliza para estimar el valor de los DAA que se encuentra en el estudio DGA-ECONAP (2018). Con esto, se buscó contar con una base de datos de las transacciones que cumpla todas las condiciones para su estimación.

Las transacciones que no fueron consideradas en la estimación, luego de verificar todos los datos y observaciones presentes en la CBR de Arica, fueron aquellas con las siguientes características:

- Imposibilidad de identificar el tipo de naturaleza del DAA
- Imposibilidad de identificar el tipo ejercicio del DAA
- Transacciones diferentes a compraventa
- Inexistencia o poca claridad sobre información del caudal promedio y la unidad del caudal (L/s, % o acciones)
- Imprecisión en el monto total de la transacción
- Transacciones entre parientes
- Agrupación de transacciones con igual fecha y mismo precio, bajo el supuesto que representaban una misma transacción, junto con las que en su observación declaran que incluyen otro derecho.

Por último, con el objetivo de minimizar la distorsión de los precios inconsistentes o atípicos en la muestra de datos obtenida, se estableció un rango de datos típicos para poder discriminar y eliminar los valores extremos u “outliers”.

En la Tabla 3-12 se presenta el resultado del proceso de depuración incremental en base a los criterios señalados. Se observa que, de un total de 6.103 transacciones, sólo 305 (4,9%) cumplieron todos los requisitos definidos para estimar el precio del mercado de DAA.

Tabla 3-12. Resumen de resultados de DAA depurados incrementalmente por criterios.

	N° de transacciones
Base de datos inicial	6.103
<u>Criterios de depuración</u>	
Transacción diferente a Compraventa	2.532
Falta de Naturaleza del derecho	56

	N° de transacciones
Base de datos inicial	6.103
<u>Criterios de depuración</u>	
Falta de Ejercicio del derecho	606
Falta de Caudal promedio y Unidad del caudal	1.769
Falta de valor total de la transacción	155
Transacción entre parientes	574
Agrupación de transacciones	100
Eliminación inconsistencias	6
Base de datos depurada	305

Fuente: Elaboración propia (2022).

En la Tabla 3-13 se presenta una síntesis de las características de las transacciones que cumplieron los requisitos para el análisis de precio de mercado de DAA. Se observa que la estimación de precios del mercado de DAA se hace principalmente con derechos de naturaleza subterránea y de ejercicio permanente y continuo.

Tabla 3-13. Resumen de transacciones depuradas diferenciando por naturaleza y ejercicio del derecho.

Naturaleza	Ejercicio DAA	N° DAA	Proporción
Subterránea	Permanente continuo	280	92,8%
	Permanente alternado	2	
	Eventual discontinuo	1	
Superficial	Permanente continuo	19	7,2%
	Permanente alternado	2	
	Eventual discontinuo	1	
Total		305	100%

Fuente: Elaboración propia (2022).

En la Tabla 3-14 se presentan los resultados obtenidos de media y mediana para la estimación del precio de DAA para los derechos de aguas superficiales y subterráneos.

Tabla 3-14. Resumen de estadígrafos de tendencia central y de dispersión estimados para la base de datos depurada de transacciones de DAA.

Derechos Subterráneos	283 DAA		Derechos Superficiales	22 DAA	
Unidad precio L/s	UF L/s	\$ L/s	Unidad precio L/s	UF L/s	\$ L/s
Media	452,3	11.334.423	Media	40,84	950.133
Mediana	402,69	10.000.000	Mediana	8,68	198.039
Máxima	1.767,77	40.000.000	Máxima	336,6	7.692.308
Mínima	0,15	3.333	Mínima	0,1	1.812
Desviación estándar	392,44	9.867.585	Desviación estándar	86,02	1.948.872

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el caso de los DAA subterráneos, se aprecia que el valor promedio de un litro por segundo corresponde a 452,3 UF o, al equivalente de, \$11.334.423; mientras que la mediana bordea los 402,69 UF o \$10.000.000. Los derechos de agua superficiales, en cambio, presentan un valor del litro por segundo promedio de 40,84 UF (lo que en pesos chilenos representan \$950.133); mientras que el valor de la mediana del litro por segundo corresponde a 8,68 UF u \$198.039.

4. OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

En el siguiente acápite se presenta la estimación de la oferta hídrica superficial de la cuenca del río San José y subterránea del acuífero del valle de Azapa, basado en el estudio DGA-DICUTC (2020). El análisis contempla las restricciones históricas y actuales del territorio sobre el uso de las fuentes identificadas, entregando un diagnóstico sobre la disponibilidad del recurso, considerando además de la cantidad actual y proyectada, diferentes parámetros de la calidad de las fuentes.

4.1 AGUAS SUPERFICIALES

Este acápite se caracterizan las fuentes superficiales existentes en la cuenca del río San José y su división administrativa, la oferta superficial, la calidad actual de las aguas y sus fuentes de contaminación existentes, además de entregar una descripción de los DAA concedidos.

4.1.1 Identificación de fuentes superficiales

Como se indicó en el apartado 2.3.4 Hidrología, las principales fuentes superficiales de la cuenca del río San José en su zona cordillerana/altiplánica son el río Ticnamar y río Seco. Este último río recibe una escorrentía superficial externa desde el río Lauca a través del Canal Lauca instalado sobre la Quebrada Luco. El aporte desde el río Lauca representa el mayor flujo superficial que posee el río Seco (600 L/s promedio durante los últimos 3 años). El río San José nace de la confluencia del río Seco y río Ticnamar a los 2.477 m.s.n.m.

En el sector medio-bajo de la cuenca, la fuente superficial principal es el río San José, que recorre 88 km de Este a Oeste hasta desembocar en el Océano Pacífico en el sector de la ciudad de Arica. Los primeros kilómetros del río mantienen un caudal constante, principalmente por el aporte del río Lauca, cuyo caudal luego es desviado por la bocatoma del Canal de Azapa para distribución y uso de actividad agrícola. Aguas abajo de la bocatoma del Canal de Azapa el río San José permanece seco en la mayor parte del año, salvo los meses estivales que generan crecidas ocasionadas por precipitaciones en el sector altiplánico. Sin embargo, el sector bajo de la cuenca también posee tres quebradas principales que generan un aporte del río San José en eventos excepcionales, siendo estas la Quebrada del Diablo, Quebrada de Llosyas y Quebrada de Acha.

Estas fuentes de agua fueron simuladas en dos modelos superficiales WEAP, separando el sector alto de la cuenca San José del sector medio bajo, dado que este último fue acoplado a un modelo subterráneo (WEAP-MODFLOW) dando los siguientes resultados de oferta en la fuente. La delimitación de ambos modelos se detalla en el capítulo 5.1 del presente plan.

4.1.2 División administrativa

La cuenca del río San José tiene una superficie aproximada de 3000 km² y según propuesta DGA-DICTUC (2020) para el modelo WEAP, la cuenca se divide en dos subcuencas: río San José, dentro de la comuna de Arica y Azapa Alto ubicada en la comuna de Putre (Figura 4-1). Además, para la estimación de caudales en la subcuenca Azapa Alto fue sectorizada en cinco unidades hidrológicas menores (Figura 4-2), por otro

lado, en la subcuenca del río San José se limitaron siete unidades hidrológicas menores sectorizadas por: ciudad, valle y principales quebradas (Figura 4-3).

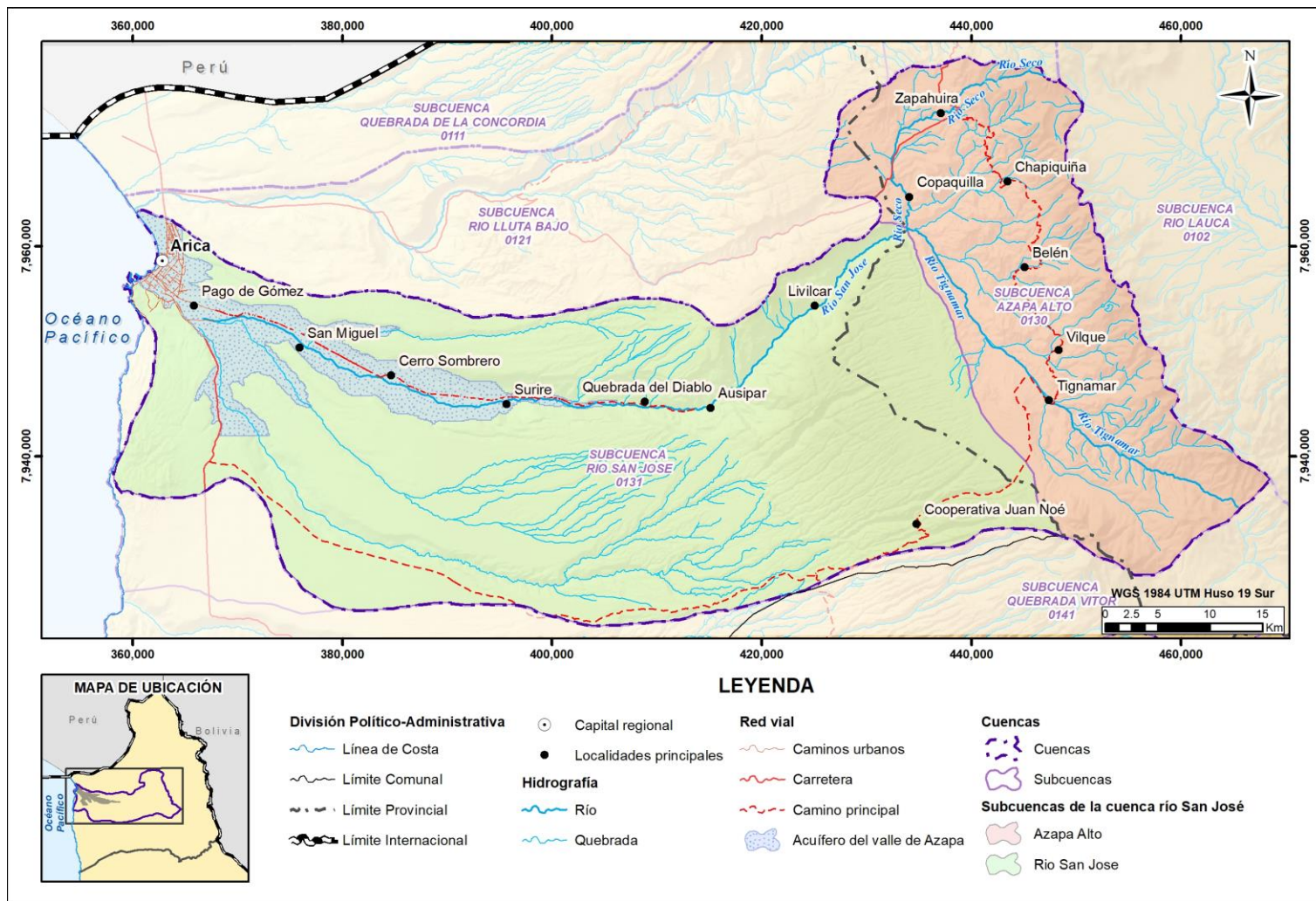


Figura 4-1. Subcuencas de la cuenca río San José.

Fuente: Elaboración propia (2022).

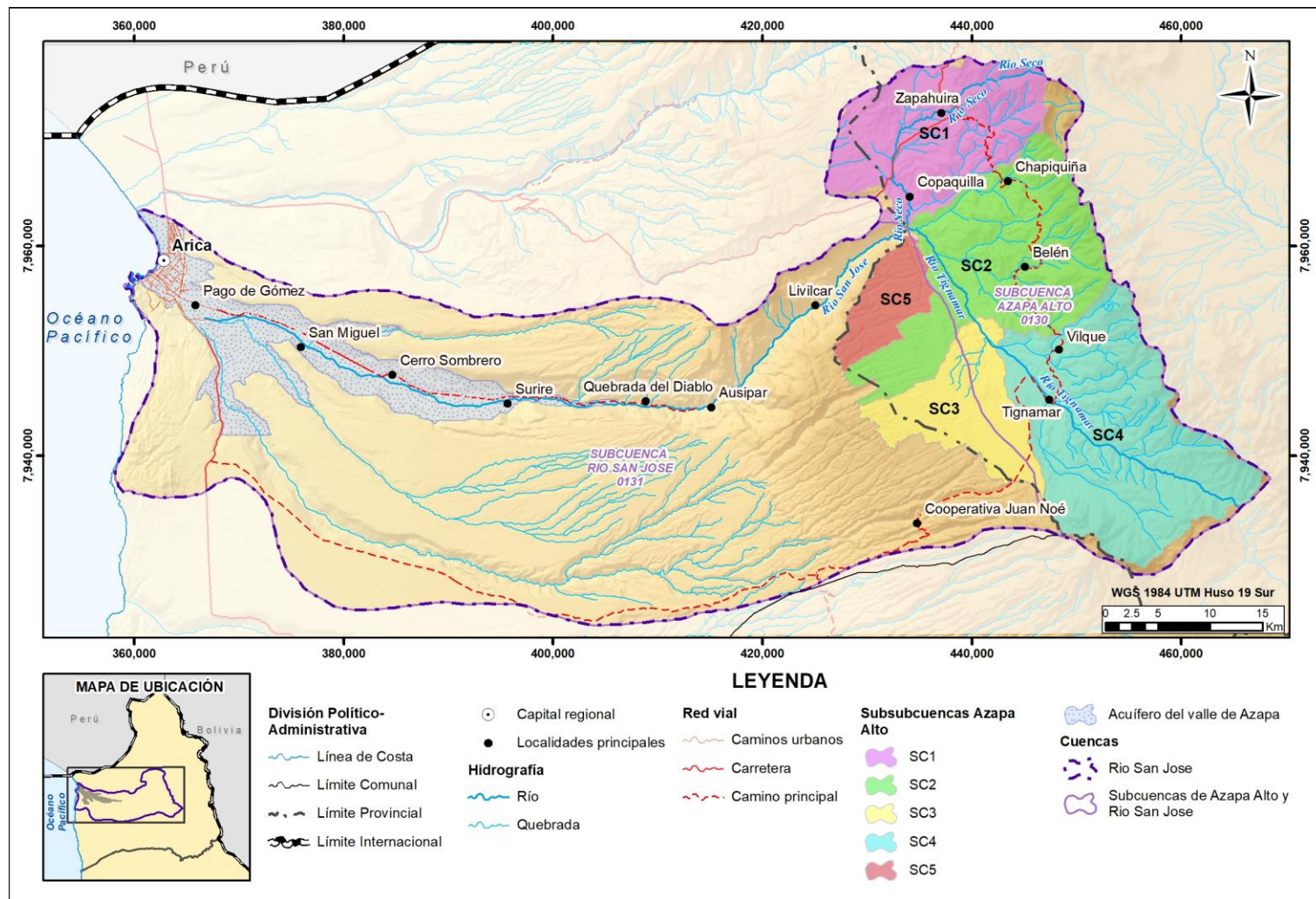


Figura 4-2. Definición de subsubcuencas principales del sector Azapa Alto.

Fuente: Elaboración propia (2022).

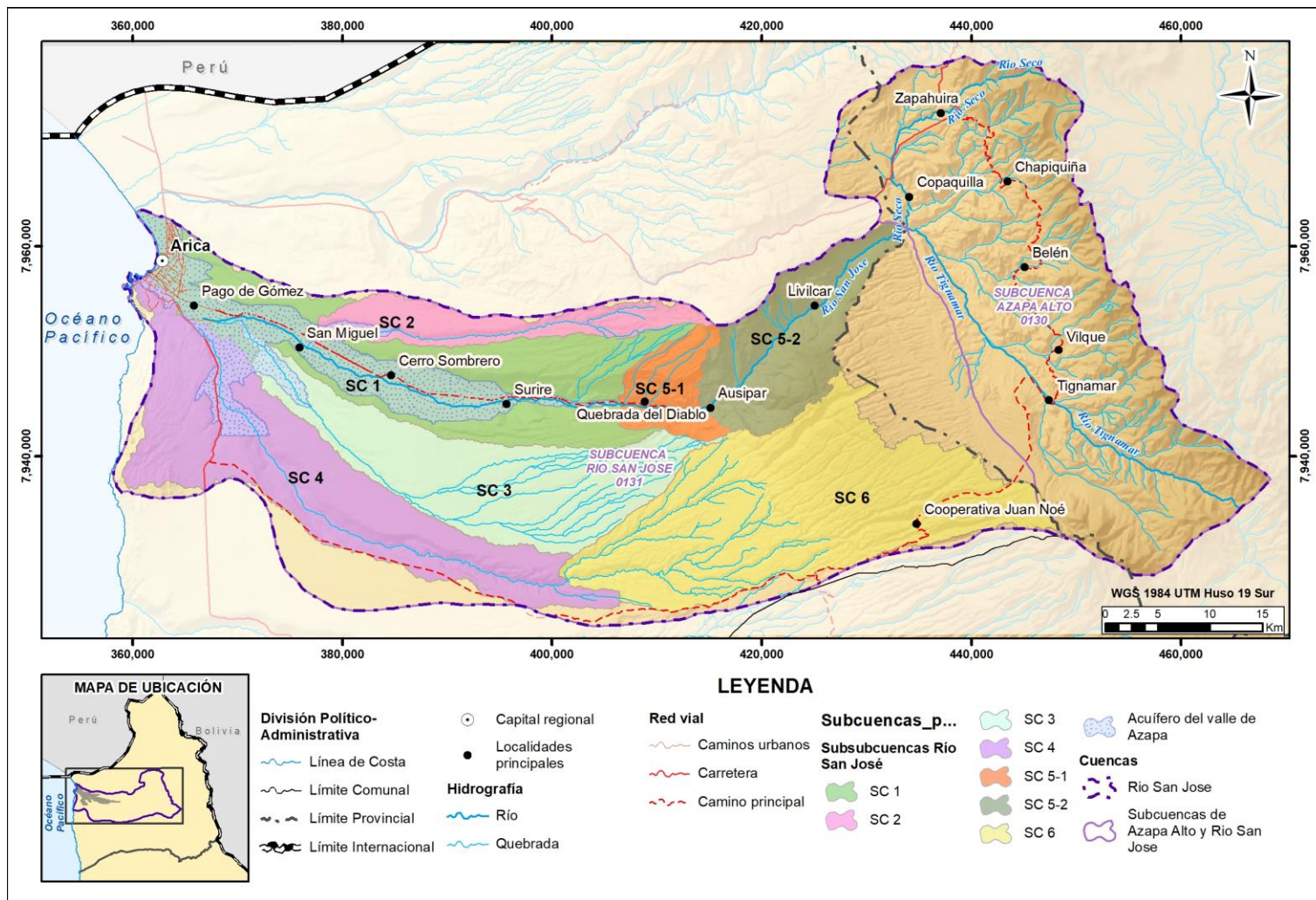


Figura 4-3. Definición de subsubcuencas principales del sector medio-bajo de la cuenca río San José.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.1.3 Restricciones de uso

La DGA posee distintas herramientas para las restricciones de uso de aguas superficiales, tales como las declaraciones de agotamiento o decretos de escasez. No obstante, al año 2022, la oferta superficial de la cuenca del río San José no ha sido decretada en ninguna de las dos figuras. Además, tampoco existen figuras de zonas de conservación ni decretos de reserva de caudales.

4.1.4 Oferta en la fuente superficial

En términos históricos, en la Figura 4-4 se muestra la curva de duración del río del estudio INH (2014). Los resultados muestran que el 95% del año, el cauce está seco y solo se presenta un caudal mayor de sobre los 5 L/s el 2 % del tiempo.

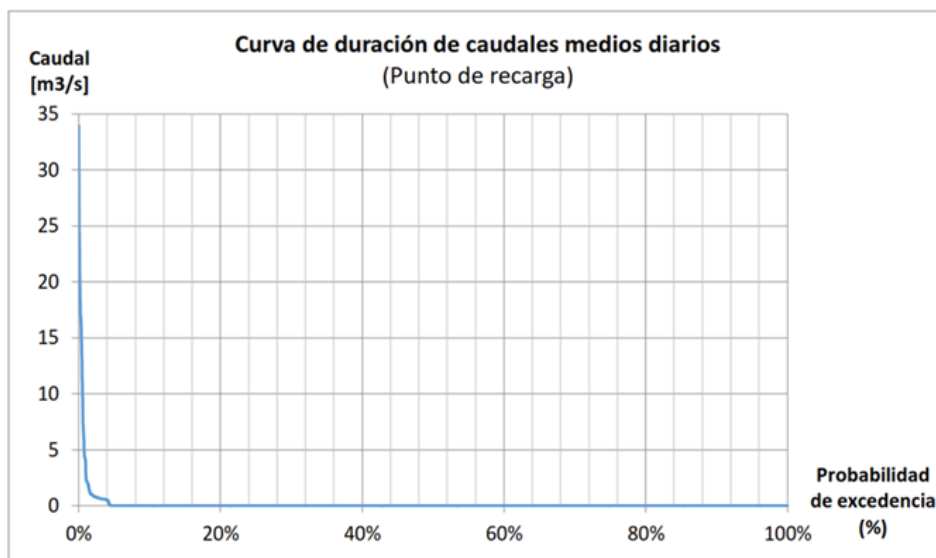


Figura 4-4. Curva de duración de caudales medio diarios para el río San José en punto Planta de recarga.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

En el sector altiplano de la cuenca del río San José, el trasvase del río Lauca aporta en promedio un caudal de 600 L/s al río Seco, mientras que los aportes de quebradas al río Ticnamar alcanzan un caudal promedio de 50 L/s. Luego, después del nacimiento del río San José, aguas abajo se encuentra la estación fluviométrica río San José en Ausipar que registra un caudal que varía entre 0.41 m³/s y 17.69 m³/s con un promedio de 1.05 m³/s (Figura 4-5). Posteriormente, la escorrentía del río San José es desviada por el canal Azapa, que posee una estación fluviométrica que registra un máximo de 1.09 m³/s y un caudal medio de 0.56 m³/s (Figura 4-6). Los aportes de las quebradas Llosyas y Acha en la parte baja de la cuenca alcanzan una media de 49 L/s y 2 L/s respectivamente.

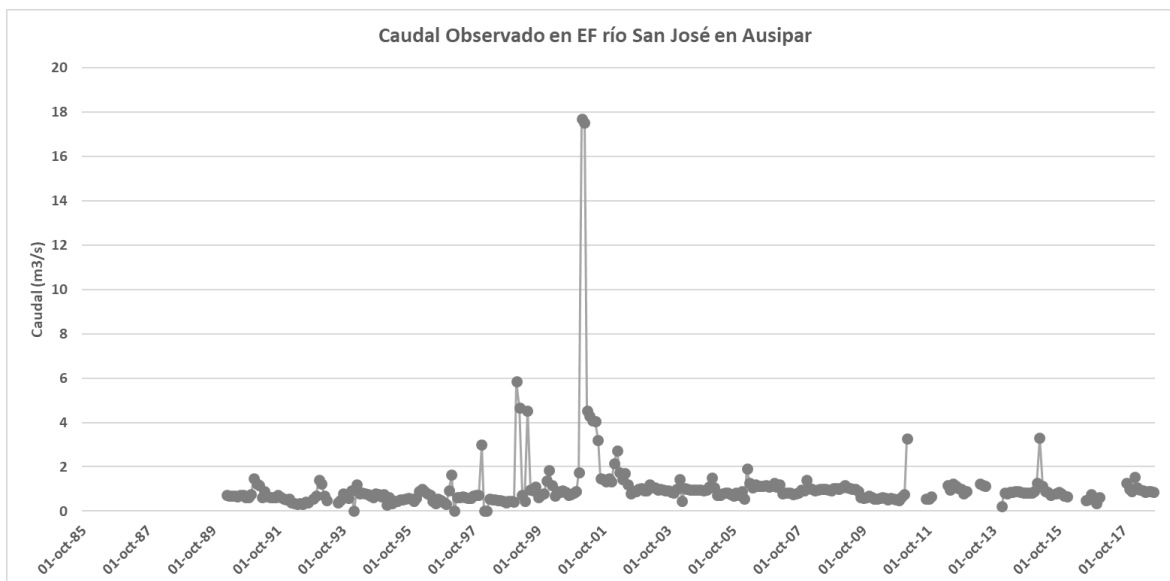


Figura 4-5. Caudales en estación río San José en Ausipar.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

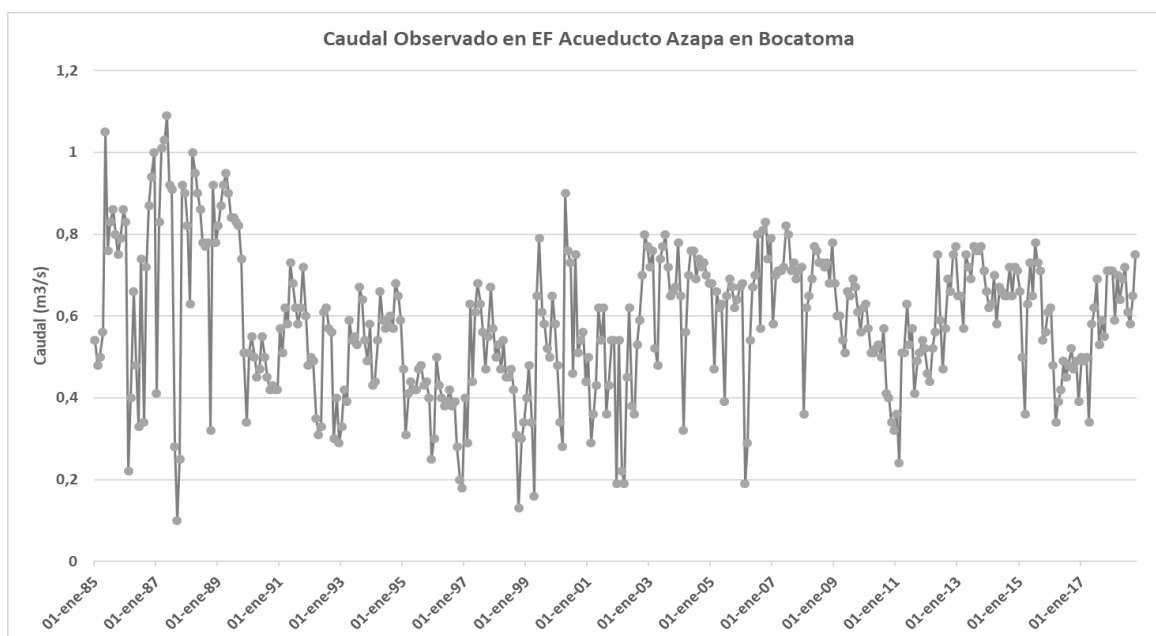


Figura 4-6. Caudales en estación Acueducto Azapa en Bocatoma.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Ahora bien, y acorde a los resultados de modelación obtenidos por DGA-DICTUC (2020) y validados posteriormente, se presentan los resultados de oferta en la fuente, separando el sector altiplánico del sector medio-bajo de la cuenca del río San José debido a que ambas subcuencas fueron simuladas separadamente por las diferencias climatológicas que poseen.

4.1.4.1 Oferta en la fuente subcuenca Azapa Alto

En la subcuenca de Azapa Alto, la variación estacional de los caudales superficiales observados y simulados a partir del modelo de DGA-DICTUC (2020) en las estaciones fluviométricas se muestran en las Figura 4-7 y Figura 4-8. Como primera observación de los resultados, se logra distinguir para ambas estaciones de medición, que los caudales presentan un aumento en la época estival. La principal diferencia entre los dos resultados es que en la estación fluviométrica Ticnamar en Ticnamar existe una sobrestimación de los valores de caudal simulados. Lo anterior se debe a que la estación fluviométrica cuenta con un acotado conjunto de datos observados, entre 1996 y 2005, los que tampoco cuentan con mediciones en el periodo estival. En cambio, los datos de la estación fluviométrica Ticnamar en Angostura poseen un mayor registro de datos de caudal en la estación con mediciones en los meses del periodo estival lo que probablemente generó por el modelo una subestimación de los caudales. Esta falta de datos observados en la zona cordillera forma parte de una brecha en la modelación (acápite 5.5).

Además, otra de las diferencias se observa en los meses donde se registran los cuales máximos. En la estación fluviométrica Ticnamar en Ticnamar el modelo entrega un caudal máximo promedio de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el mes de febrero, mientras que los caudales máximos en la estación fluviométrica Ticnamar en Angostura, ubicada aguas debajo de la primera estación, poseen registros históricos donde el caudal máximo es de $0,95 \text{ m}^3/\text{s}$ durante en el mes de febrero, lo que condice más con los valores simulados.

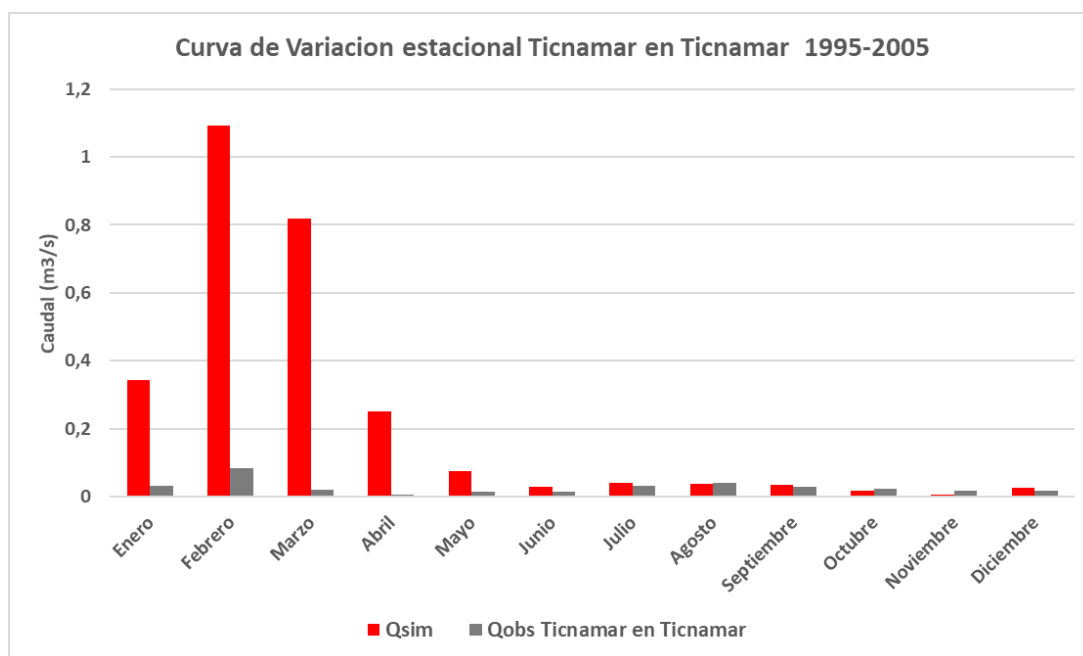


Figura 4-7. Curva de variación estacional en Ticnamar en Ticnamar.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

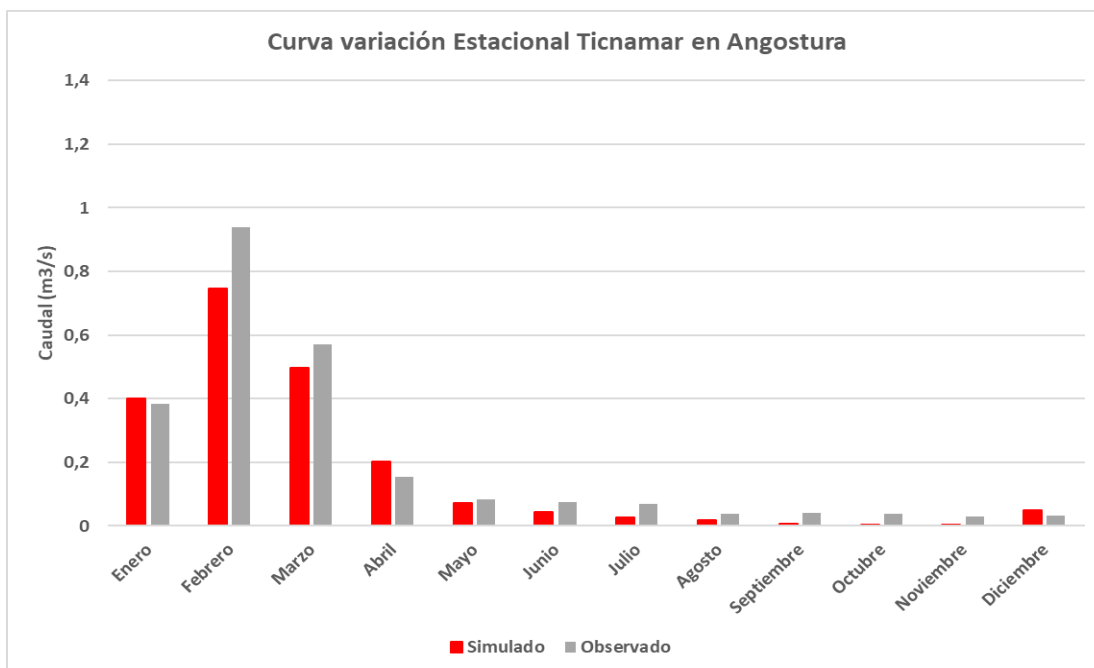


Figura 4-8. Curva de variación estacional en Ticnamar en Angostura.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

Como anteriormente se mencionó, la subcuenca de Azapa Alto se dividió en 5 subsubcuencas (Figura 4-2) a partir de los principales ríos, afluentes y dos estaciones fluviométricas presentes en la zona (Ticnamar en Ticnamar, Ticnamar en Angostura). A partir del modelo hidrológico superficial se estimó la oferta hídrica a partir de la suma de escorrentía superficial (*Surface Runoff*) y la escorrentía subsuperficial (*Interflow*). El resultado por cada subsubcuenca para el periodo histórico (1986-2018) se muestra en la Tabla 4-1, donde destaca que la mayor oferta está representada por la SC-1.

Tabla 4-1. Oferta promedio Anual en subcuenca Azapa Alto (1986-2018).

Código SC	Oferta Superficial Histórica (1986-2018)	
	L/s	Hm³/año
SC-1	204,6	6,5
SC-2	122,7	3,9
SC-3	34,8	1,1
SC-4	183,9	5,8
SC-5	31,7	1,0

Fuente: Elaboración propia (2022).

Con respecto a la probabilidad de excedencia de la oferta hídrica superficial de un 50%, la escorrentía alcanza magnitudes de 680 L/s durante los meses de verano en el periodo histórico. Por otro lado, un caudal con 85% probabilidad de excedencia alcanza un máximo de 200 L/s (Figura 4-9). El resto del año la escorrentía en la zona alta es muy cercana a 0 L/s.

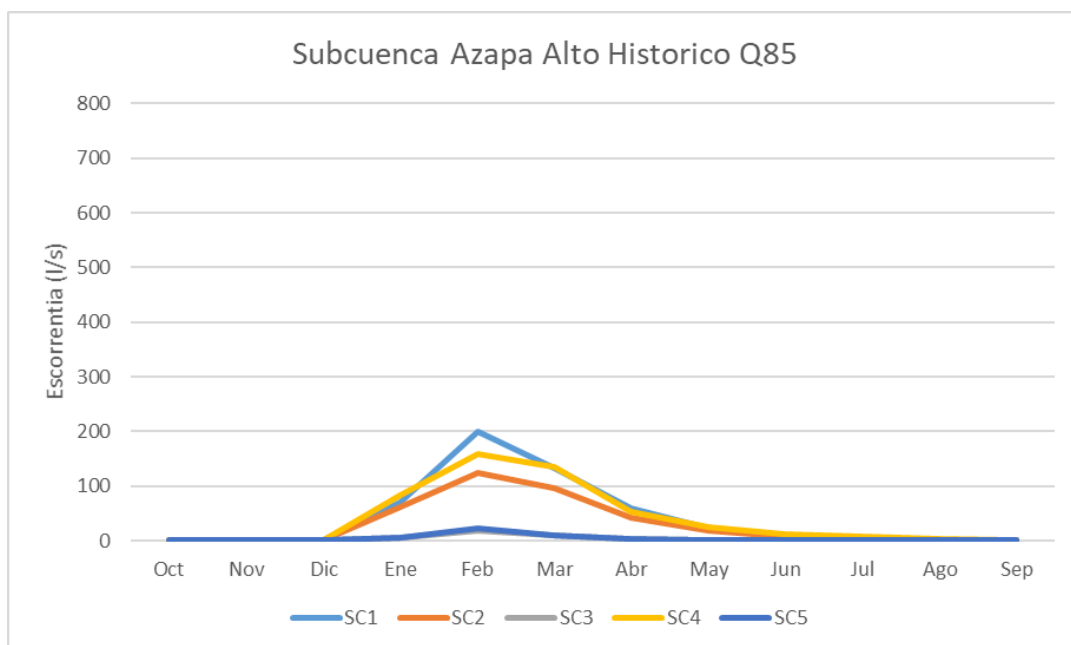
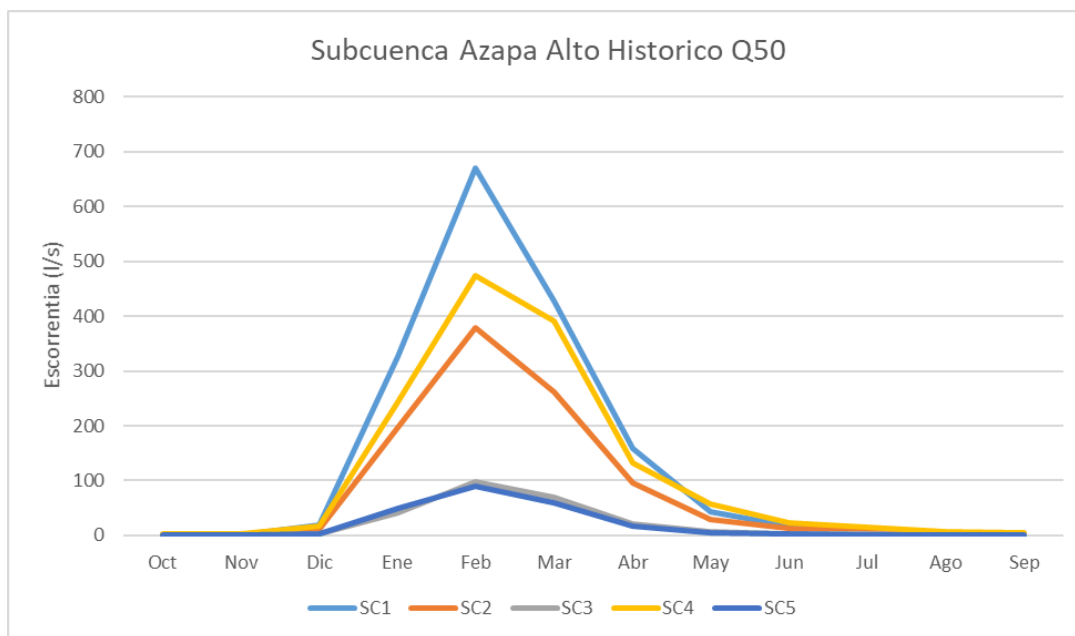


Figura 4-9. Oferta Superficial disponible en la subcuenca Azapa Alto con Caudal de 50% y 85% de probabilidad de Excedencia.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Como último resultado del modelo superficial de Azapa Alto es la escorrentía del río San José como parte del afluente proveniente del río Seco y río Ticnamar (Figura 4-10). En el periodo histórico, el caudal promedio del río es de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzando un máximo de $11,6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el mes de febrero del año 2001. Este caudal forma parte de una entrada al modelo hidrológico superficial del río San José.

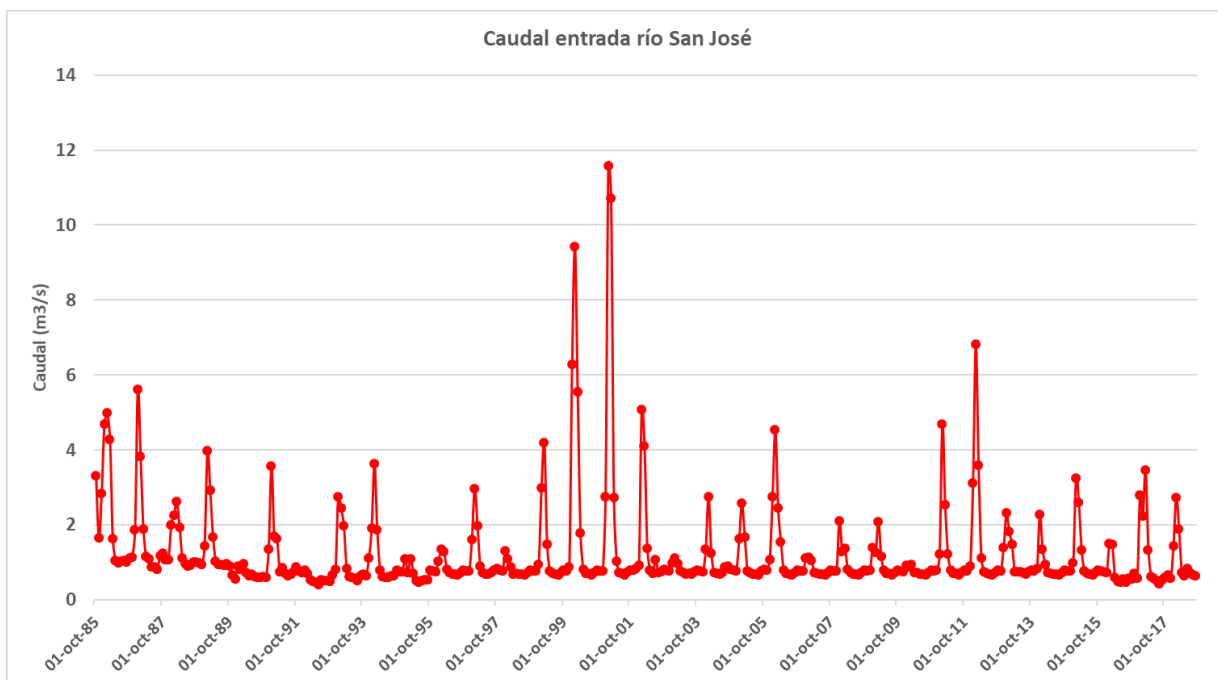


Figura 4-10. Caudal de entrada al río San José.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

4.1.4.2 Oferta en la fuente subcuenca río San José

En la subcuenca del río San José, la variación estacional de los caudales observados y simulados a partir del modelo desarrollado por DGA-DICTUC (2020) para la estación fluviométrica río San José en Ausipar posee un mejor ajuste en general (Figura 4-11). Los meses de verano (diciembre a marzo) hay una sobrestimación de los caudales, mientras que en los meses de invierno (mayo a agosto) hay una subestimación. Los otros 4 meses de transición de estaciones (abril, septiembre, octubre y noviembre) los caudales simulados poseen un buen ajuste promedio a los observados. En el acápite 5.1.1 del presente plan se resumen los principales indicadores de ajuste de la modelación emanada de DGA-DICTUC (2020) que comparan la serie de caudales simulados y observados que evalúan el comportamiento del modelo.

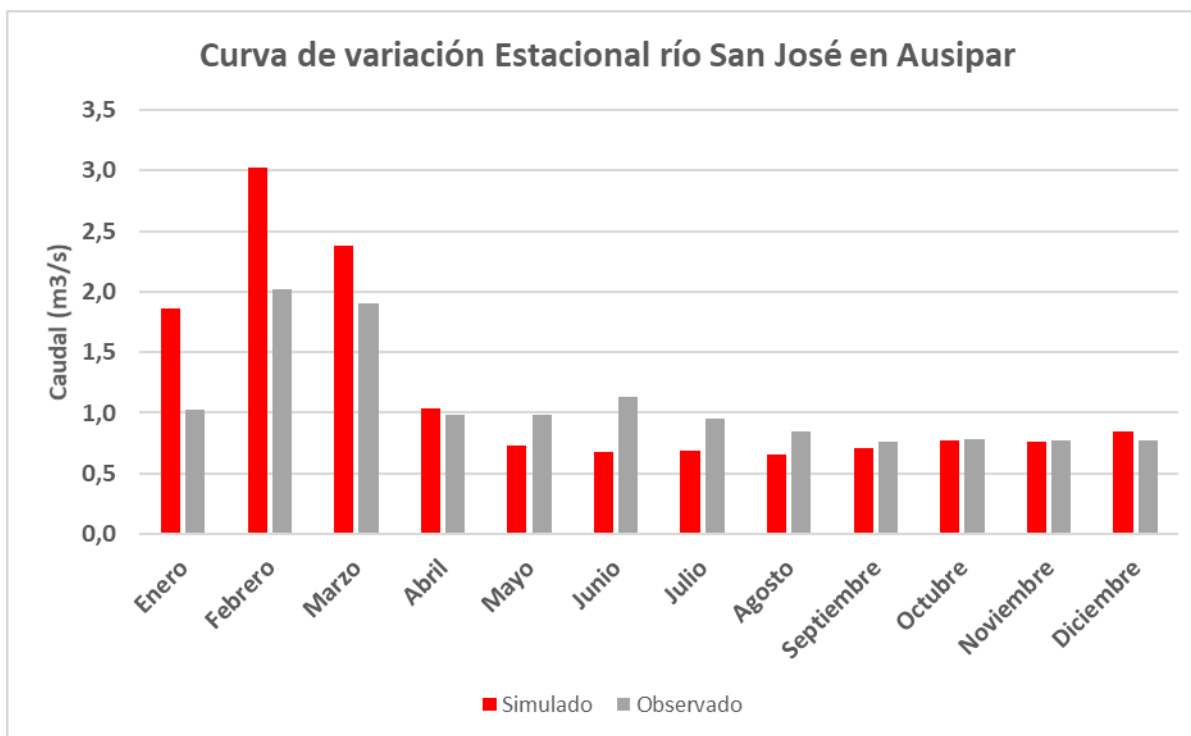


Figura 4-11. Curva de variación estacional en río San José en Ausipar.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

El sector medio-bajo de la cuenca, se subdividió en 7 subsubcuencas a partir de las principales quebradas mencionadas anteriormente, estaciones fluviométricas de la zona, sector productivo del valle de Azapa y límite de la ciudad de Arica (Figura 4-3). El detalle de la formulación de las subsubcuencas y resultados se describe en el Anexo H acápite 3.1.1.

La oferta hídrica superficial de la zona media-baja de la cuenca del río San José para el periodo histórico se muestra en la Tabla 4-2. Los resultados muestran que prácticamente la escorrentía superficial y subsuperficial modelada es prácticamente nula en los sectores de ladera. Por otro lado, la subsubcuenca más alta (SC5.1) posee la mayor oferta que proviene directamente del sector altiplano de la cuenca, siendo esta oferta finalmente captada por la bocatoma del Canal de Azapa para riego. Por último, la subsubcuenca 1 también posee un valor mayor de oferta disponible debido a que en esta zona se mantiene la actividad agrícola y por ende el riego en este sector genera un flujo subsuperficial mayor. Es importante tener en consideración que el agua usada para riego se obtiene a nivel superficial y subterráneo, por lo que la oferta superficial en esta zona en particular mantiene una relación con la extracción de agua a nivel subterráneo.

Tabla 4-2. Oferta promedio Anual en subcuenca río San José (1986-2018).

Código SC	L/s	Hm³/año
SC-1	27,4	0,86
SC-2	0,2	0,00
SC-3	0,7	0,02

Código SC	L/s	Hm³/año
SC-4	0,0	0,00
SC-5.1	28,7	0,90
SC-5.2	0,7	0,02
SC-6	21,9	0,69

Fuente: Elaboración propia (2022).

En relación con su distribución mensual, la Figura 4-12 muestra la tendencia de la oferta hídrica superficial ante un caudal con probabilidad de excedencia de un 50% y de un 85%. A primera vista se observa que se mantiene la tendencia de la zona alta, donde los meses de verano entregan el mayor caudal superficial durante el año. Además, frente a una probabilidad de excedencia de un 50%, el caudal de la subsubcuenca 5.1, ubicada en el sector más alto, alcanza un máximo de 70 L/s durante el mes de febrero. Por otra parte, la oferta superficial de la subsubcuenca 1 se mantiene relativamente constante, con 25 L/s promedio, dada la actividad agrícola en esa zona que requiere mantener durante todo el año un riego en sus cultivos. Por último, se muestra que, en la zona media-baja de la cuenca, no existe un aporte significativo de agua superficial desde sus quebradas.

Frente a un caudal con probabilidad de excedencia de un 85%, la situación se deteriora dado que el caudal superficial proveniente de la zona altiplánica alcanza solo un máximo de 10 L/s durante el mes de febrero.

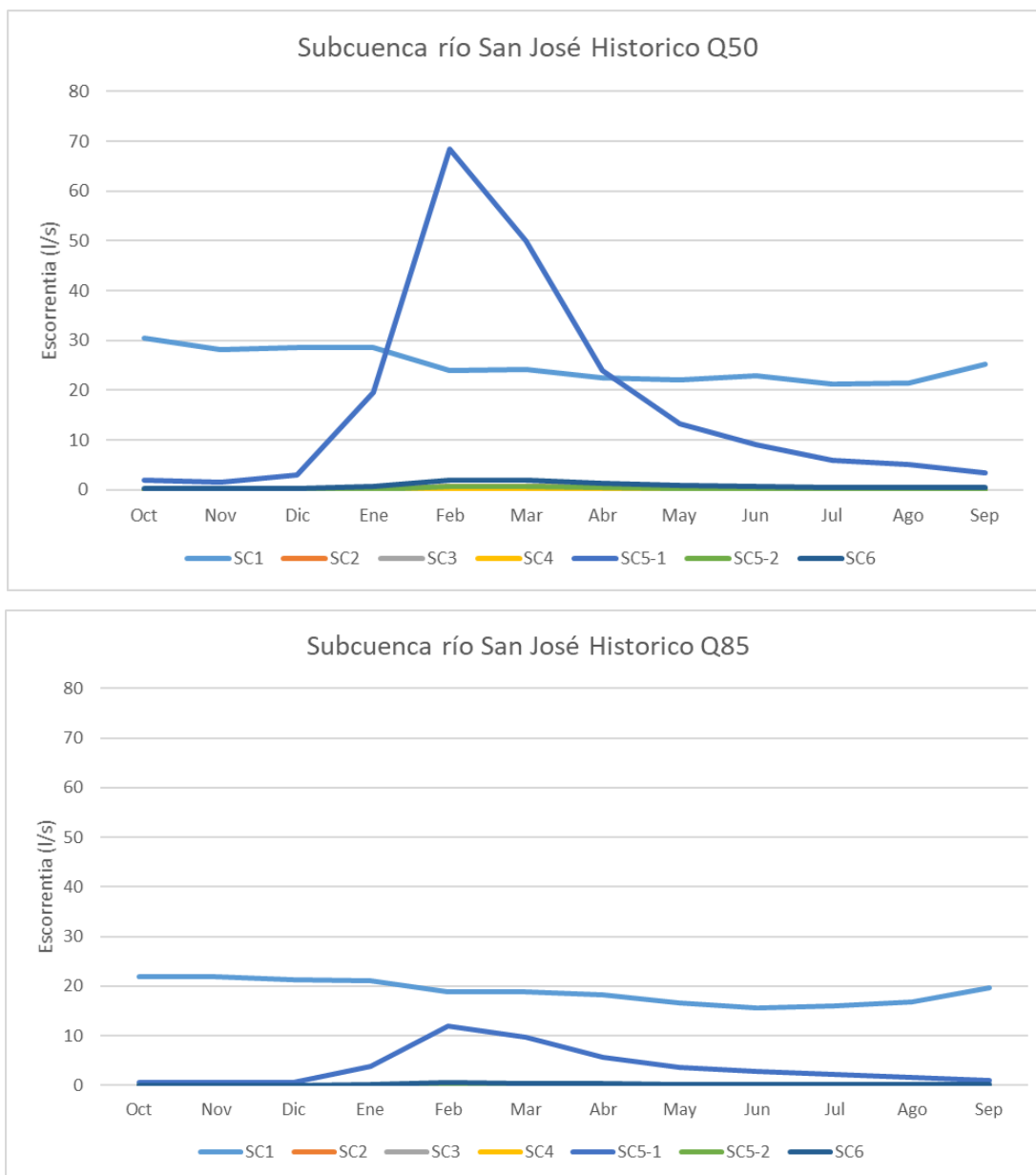


Figura 4-12. Oferta Superficial disponible en la subcuenca río San José con Caudal de 50% y 85% de probabilidad de Excedencia.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.1.5 Oferta proyectada en la fuente superficial

En los últimos años, ya han podido observar los efectos de la escasez del agua en zonas altiplánicas, no obstante, no existen estudios que relacionen los eventos climáticos sobre el territorio.

Si bien no se puede afirmar la oferta de agua proyectada y cómo será afectada la escorrentía, el CNR (2016) declara que existirán reducciones en los escenarios de cambio climático, a su vez, Neukom et al., (2015) denota que los efectos del cambio climático sobre la escorrentía y precipitación en la región, durante el periodo 2071-2100,

observados en la modelación climática global construida bajo distintos escenarios de emisiones de gases efecto invernadero, se puede cuadruplicar.

La proyección de las forzantes climáticas (temperatura y precipitación) en este modelo se explica brevemente en la sección 5.1.2 y en el Anexo H (sección 1.6 y 1.8). A modo general se utilizaron tasas de variación obtenidas de MMA (2016) generadas a partir de un ensamble de 19 Modelos de Circulación General (GCM) de la versión CMIP 5 bajo el escenario RCP 8.5 (ver Tabla 2-4). Tanto las tasas de variación para precipitación y temperatura se encuentran a escala comunal asignadas a la comuna de Arica para la zona del valle de Azapa y la comuna de Putre para Azapa Alto. El detalle de la proyección futura de las forzantes meteorológicas se describe en Anexo H acápite 1.8.

Posteriormente a la serie de datos de precipitación y temperatura históricos se aplicó el método de *downscaling* Delta Change. Para el modelo Azapa Alto las precipitaciones variaron -6,6% y las temperaturas aumentaron 2,4 °C. Por otro lado, el modelo valle de Azapa disminuyó sus precipitaciones en un 6,2% y las temperaturas aumentaron 2,4 °C.

En base a lo anterior, se presenta la oferta hídrica superficial proyectada hacia el año 2050, tanto para la subcuenca Azapa Alto y subcuenca río San José.

4.1.5.1 Oferta proyectada subcuenca Azapa Alto

Los resultados obtenidos de la modelación para estimar la oferta superficial (entendida como el flujo superficial más flujo subsuperficial) se muestran en la Tabla 4-3. De ahí se logra ver en primer lugar que la subsubcuenca 1 genera el mayor volumen promedio anual de escorrentía, seguido de la subsubcuenca 4 y en tercer lugar la subsubcuenca 2. Además, también es posible notar que existe un aumento de oferta estimado para el periodo 2030-2040 de forma excepcional, dado que la proyección de la precipitación estima mayores volúmenes durante esa década, lo que generaría una mayor escorrentía.

No obstante, al compararse con el periodo histórico, la disponibilidad hídrica superficial disminuye. Los sectores más afectados son las subsubcuencas 4 y 1, donde el volumen disponible disminuye en 2,3 y 2,2 Hm³ al año respectivamente.

Tabla 4-3. Oferta superficial proyectada en subcuenca Azapa Alto.

	2020-2030		2030-2040		2040-2050	
	L/s	Hm ³ /año	L/s	Hm ³ /año	L/s	Hm ³ /s
SC-1	136,9	4,3	235,6	7,4	136,3	4,3
SC-2	78,3	2,5	146,2	4,6	79,6	2,5
SC-3	20,7	0,7	40,5	1,3	20,5	0,6
SC-4	111,4	3,5	223,3	7,0	112,8	3,6
SC-5	20,3	0,6	34,9	1,1	21,2	0,7

Fuente: Elaboración propia (2022).

Por otro lado, la Figura 4-13 muestran el caudal disponible con una probabilidad de excedencia sobre el 50% y 85% para cada subsubcuenca de la zona alta. A partir de esos resultados se logra ver en primer lugar que la tendencia de una mayor oferta superficial ocurre durante los meses de verano, manteniendo el valor máximo alcanzado durante el mes de febrero, mientras que el resto de la temporada la oferta superficial es cercana de 0. Sin embargo, a futuro se proyecta que las magnitudes

máximas disminuyan, ya que para el mes de febrero el caudal disminuiría un 110 L/s respecto al periodo histórico, considerando una probabilidad de excedencia del 50%, mientras que ante una probabilidad de excedencia del 85% el caudal máximo registrado en el mes de febrero disminuirá 30 L/s aproximadamente.

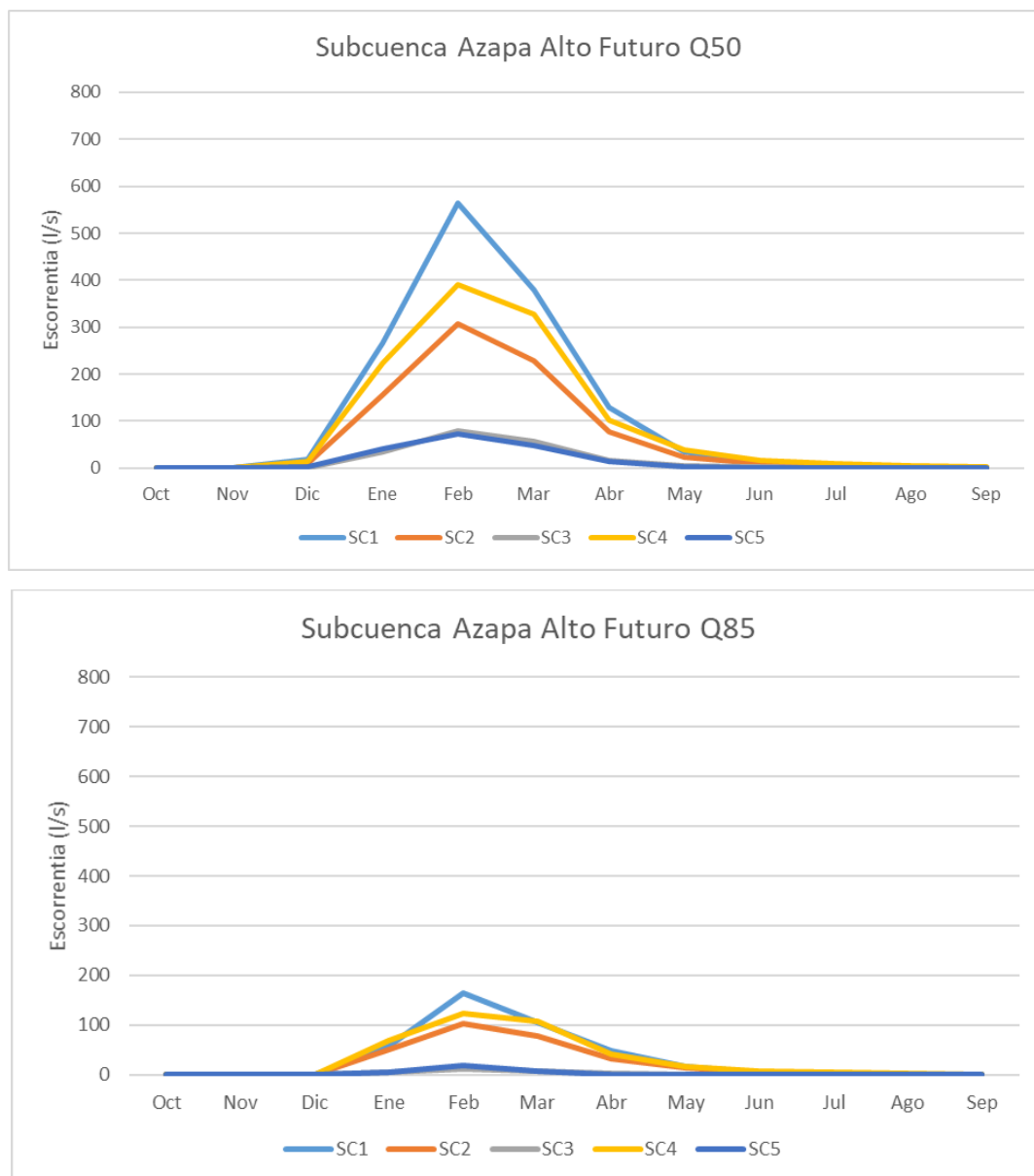


Figura 4-13. Oferta Superficial proyectada en la subcuenca Azapa Alto con Caudal de 50% y 85% de probabilidad de Excedencia.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.1.5.2 Oferta proyectada subcuenca río San José

Los resultados de oferta hídrica proyectada para la subcuenca del río San José se presentan en la Tabla 4-4. A nivel general se puede ver que a futuro la zona media-baja de la cuenca no posee una significativa oferta hídrica superficial que permite ser usada por distintas demandas de la zona. Solo la subcuenca genera escorrentía superficial ante

importantes precipitaciones en la zona, las cuales no ocurren desde el año 2001-2002. Por otra parte, como anteriormente se mencionó, la oferta hídrica que muestra la subsubcuenca 1 se debe principalmente al riego, el que provoca que un porcentaje del agua escurra a nivel subsuperficial, y que además para futuro será mayor al registrado durante el periodo histórico ya que se estima un aumento de demanda agrícola debido a una mayor superficie agrícola.

Tabla 4-4. Oferta superficial proyectada en subcuenca río San José.

	2020-2030		2030-2040		2040-2050	
	L/s	Hm³/año	L/s	Hm³/año	L/s	Hm³/s
SC-1	50,7	1,59	52,6	1,65	55,7	1,75
SC-2	0,2	0,00	0,2	0,00	0,1	0,00
SC-3	0,2	0,00	1,1	0,03	0,3	0,01
SC-4	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
SC-5.1	21,4	0,67	27,4	0,86	22,2	0,70
SC-5.2	0,5	0,01	0,6	0,02	0,4	0,1
SC-6	0,8	0,03	46,4	1,46	13,2	0,41

Fuente: Elaboración propia (2022).

Por otra parte, los resultados de los caudales disponibles ante una probabilidad de excedencia del 50% y 85% se muestran en la Figura 4-14. Se observa que existe una escorrentía mayor en la subsubcuenca 1 respecto al periodo histórico, pero esa disponibilidad de agua se debe principalmente al aumento de extracción de agua subterránea que se utiliza para riego, generando un mayor flujo subsuperficial en la zona (sección 5.1.2).

También se puede ver que no existe una oferta superficial del resto del territorio de la subcuenca, a excepción de su zona más alta que posee una influencia del sector altiplánico en donde hay mayor precipitación y por ende una escorrentía mayor al resto. No obstante, el caudal con una probabilidad de excedencia de un 85% muestra que la escorrentía generada en esa zona es de 9 L/s aproximadamente y solo se genera durante los meses de verano, mientras que el resto del año se mantiene sin una escorrentía superficial.

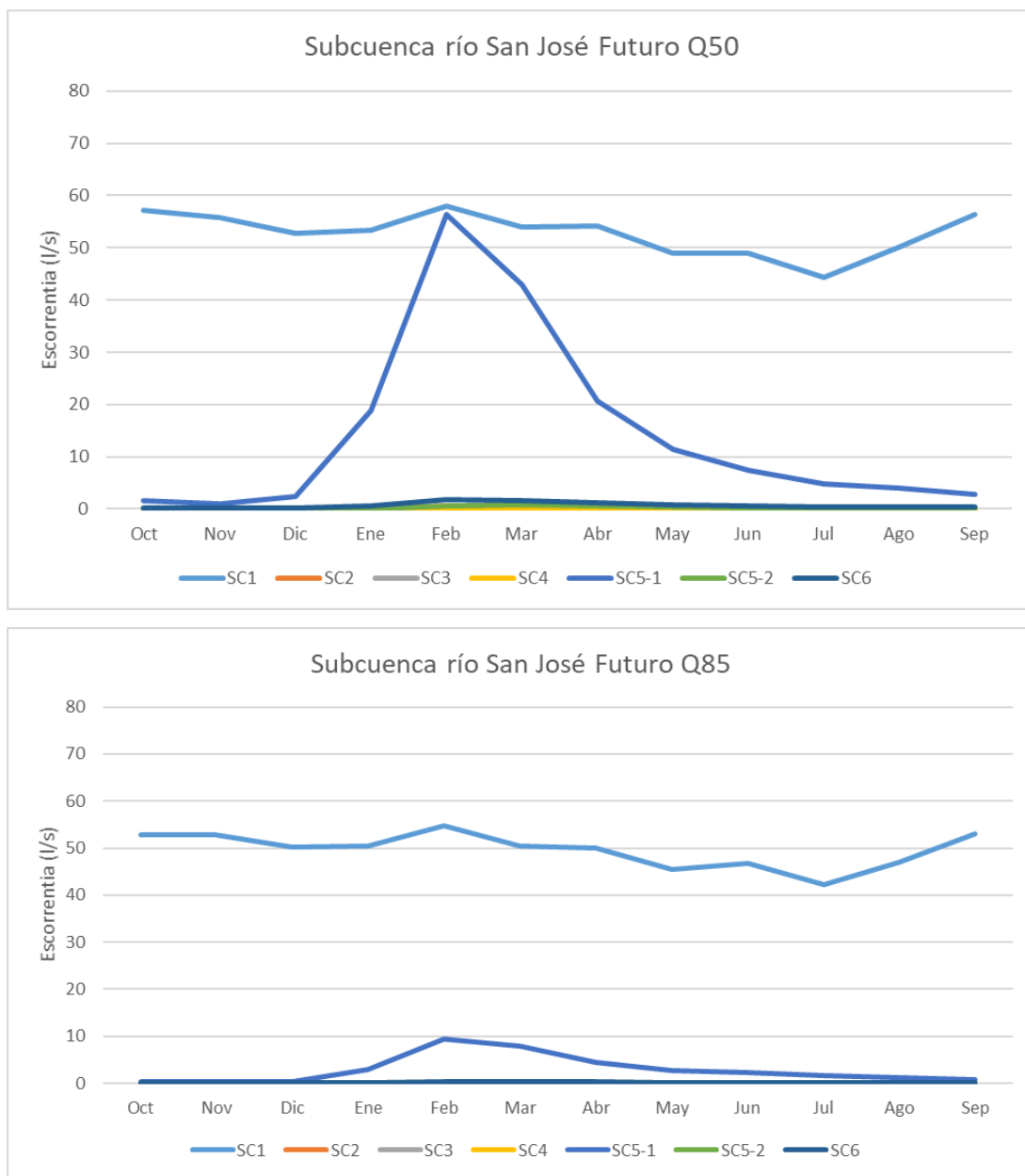


Figura 4-14. Oferta Superficial proyectada en la subcuenca río San José con Caudal de 50% (gráfico superior) y 85% (gráfico inferior) de probabilidad de Excedencia.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.1.6 Calidad de aguas

La DGA cuenta sólo con dos estaciones de calidad de aguas en la cuenca del río San José (una superficial -Río San José antes de Bocatoma Azapa- y una subterránea – Pozo Albarracines-), por lo cual no es factible hacer un análisis sobre los parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios, minoritarios y trazas de las aguas superficiales y subterráneas con los datos públicos disponibles. En función de esta situación, lo que

se presenta a continuación es un extracto de información realizados en otros estudios o investigaciones, las cuales realizaron su propio levantamiento de información.

4.1.6.1 Parámetros fisicoquímicos

En el estudio de DGA-ICASS (2016), se levantó información de los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TDS).

La temperatura de las aguas superficiales (según anexo “parámetros in situ” DGA-ICASS, 2016) osciló entre 11,7°C y 25,3°C en el mes de noviembre de 2015, las cuales en su mayoría fueron descendiendo a medida que las mediciones se acercaron a los meses invernales (ver Figura 4-15), lo cual indica que las aguas superficiales son influenciadas por las condiciones climáticas, dado que las temperaturas en invierno son más bajas que las de verano.

En la siguiente Figura se observa cómo disminuye la temperatura a medida que se acerca el invierno, donde se indican las muestras tomadas (en Anexo J.4 se puede observar la ubicación de las muestras levantadas en el estudio DGA-ICASS (2016)).

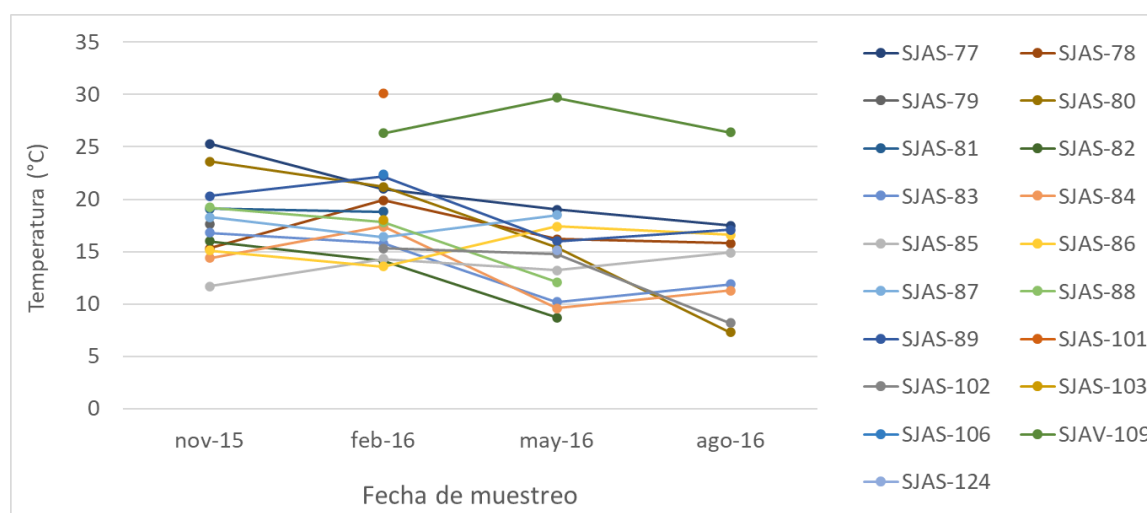


Figura 4-15. Valores de temperatura de aguas superficiales registradas en campaña de terreno de 2015-2016.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de DGA-ICASS (2016).

Respecto al pH (Figura 4-16), las aguas superficiales presentan un pH que oscila entre 6 y 8,9, exceptuando la muestra que se tomó en la quebrada OXA (SJAS-89) que son aguas bastante ácidas, variando entre 4,2 y 4,8 y la muestra Quebrada Oxa en Timalchaca (SJAS-88) que presenta valores de 5,55 y 4,86 en nov-2015 y feb-2016, respectivamente. No se identificó una variación temporal del pH en el tiempo. Según la NCh409 de agua potable los valores permitidos para pH deben estar entre los rangos de 6,9 y 7,7, existiendo varias muestras que no se encuentran en este rango. Y en el caso de agua para riego, las muestras se encuentran dentro del rango aceptable, sin embargo, hay que tener en observación aquellas muestras básicas cercanas al valor de 9.

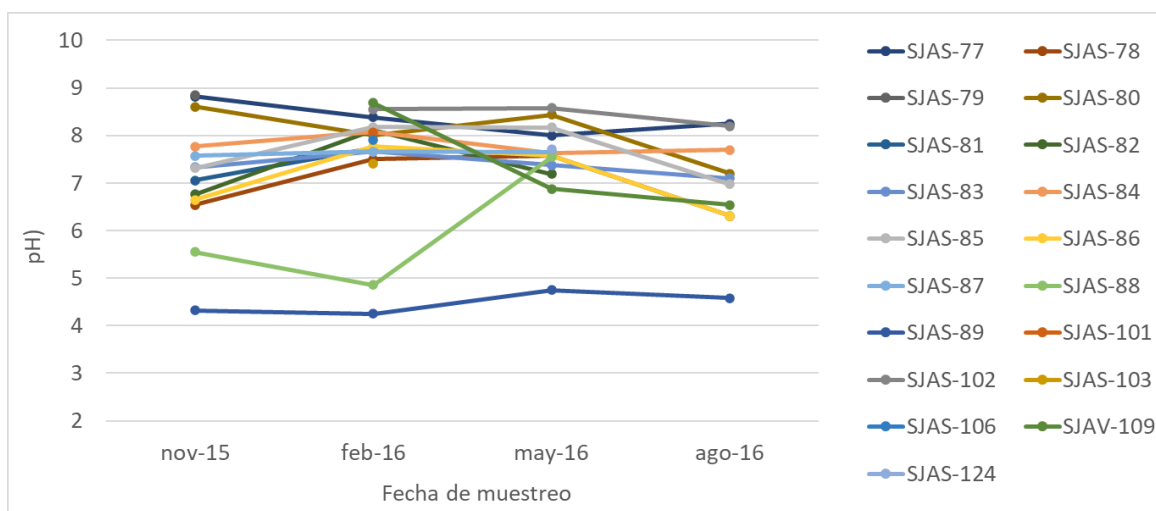


Figura 4-16. Valores de pH de aguas superficiales registradas en campaña de terreno 2015-2016.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de DGA-ICASS, 2016.

Según DGA-ICASS (2016), la conductividad eléctrica (CE) de las aguas superficiales son inferiores a $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, exceptuando la muestra de la Quebrada de Caillama (SJAS-80 ubicada en la zona noreste de la cuenca) que presenta valores entre 900 y $1.350 \mu\text{S}/\text{cm}$. Este aumento de conductividad eléctrica indica aumento en concentración de sales, las que se debiesen evidenciar con el análisis de otros parámetros. No se presenta gráfico de conductividad eléctrica dado que los valores proporcionados por ICASS (2016) en sus anexos, no coinciden con la información del informe.

De acuerdo con la información proporcionada por DGA-ICASS (2016) los valores de sólidos disueltos totales (SDT) en aguas superficiales varían entre 143 y $865 \text{ mg}/\text{L}$ (según anexo "parámetros in situ" DGA-ICASS, 2016). Estos valores se encuentran dentro del valor máximo permitido de la NCH 409 que indica como valor máximo $1500 \text{ mg}/\text{L}$.

4.1.6.2 Análisis Hidroquímico

En el estudio de DGA-ICASS (2016), se realizó una campaña de levantamiento de información de calidad en noviembre de 2015. En la Figura 4-17, se muestra el diagrama de Piper de esos resultados, donde se presenta de manera conjunta aguas superficiales y subterráneas. En color celeste se presentan las aguas superficiales del río San José, de color naranja las aguas subterráneas tomadas en pozos, de color morado las aguas superficiales del río Tignamar y de color verde las muestras tomadas en diferentes quebradas precordilleranas (DGA-ICASS, 2016).

En la Figura 4-18, se presenta el diagrama de Stiff que también muestra la hidroquímica del agua, pero a nivel espacial. También se presentan de manera conjunta las aguas superficiales y subterráneas.

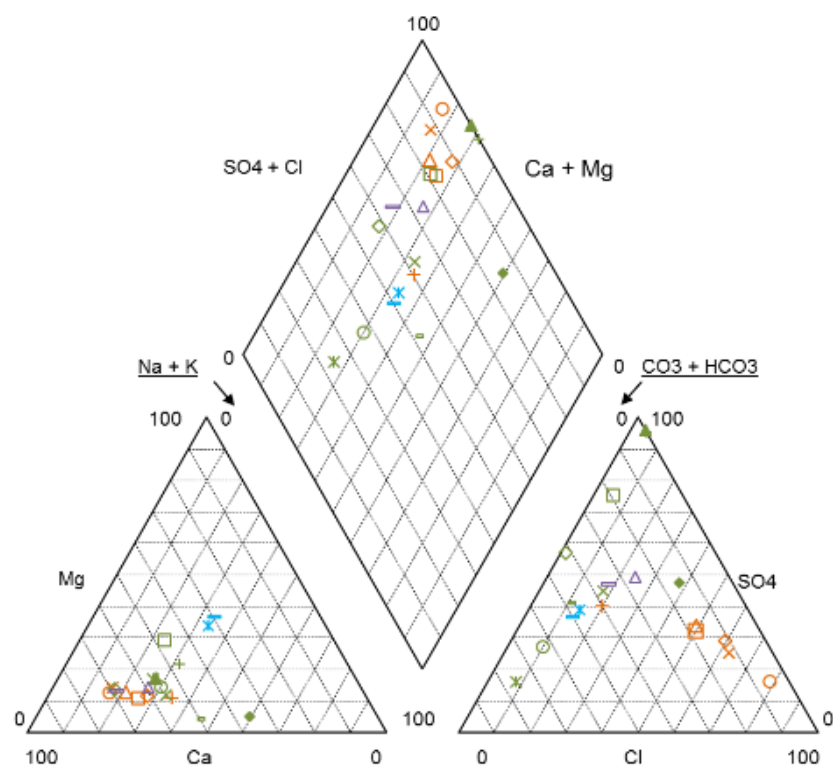


Figura 4-17. Diagrama de Piper muestras de noviembre 2015.

Fuente: DGA-ICASS (2016).

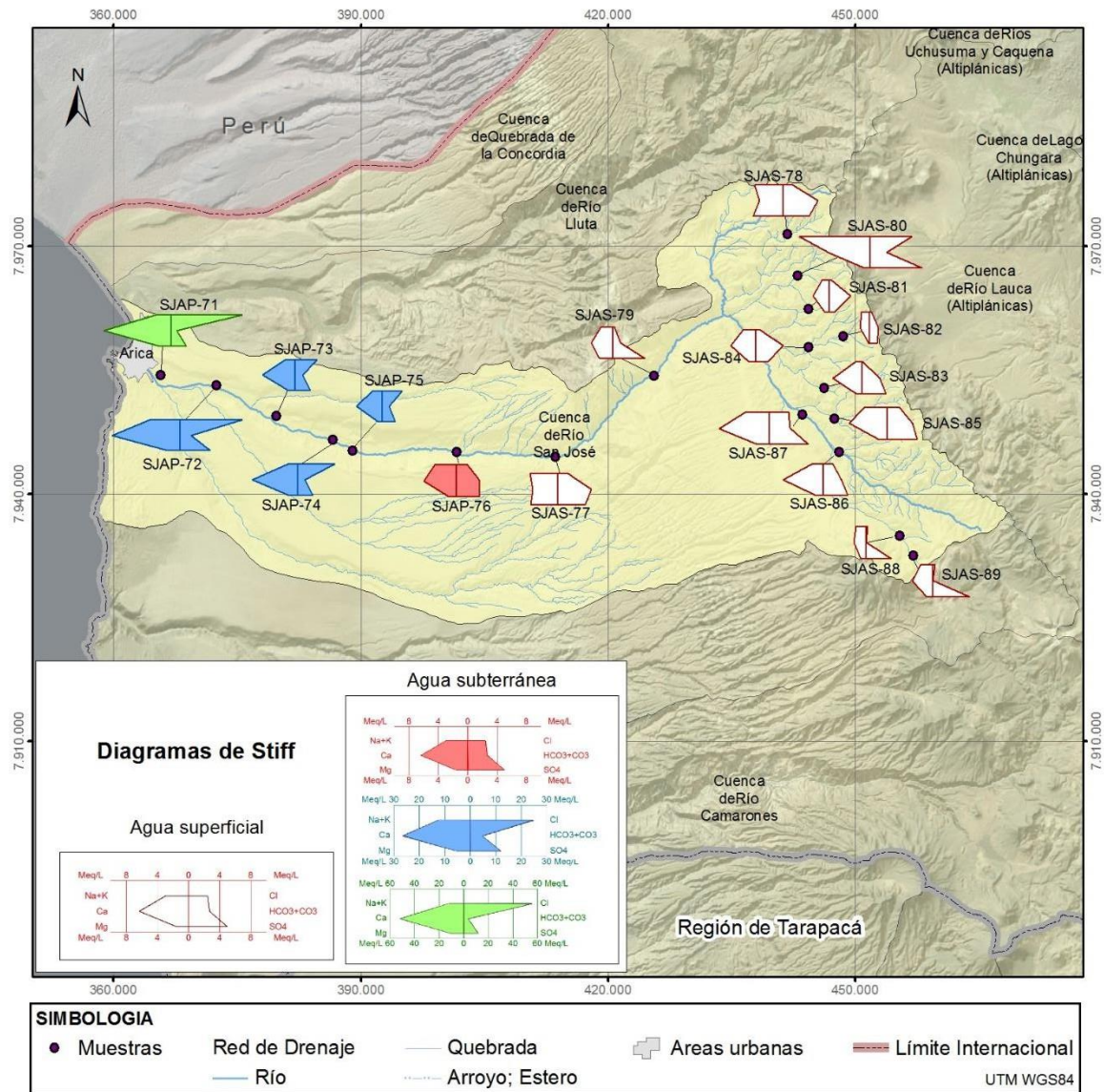


Figura 4-18. Diagrama de Stiff con muestras de noviembre 2015.

Fuente: DGA-ICASS (2016).

Según DGA-ICASS (2016) las quebradas de la parte alta de la cuenca del río San José presentan diferentes facies, no obstante, la zona baja de la cuenca presenta características químicas similares. Según las muestras tomadas en 2015-2016 (DGA-ICASS, 2016), el agua en la quebrada Oxa (SJAS-89) presentó características sulfatadas cálcicas, mientras que aguas abajo, cercanas al sector de Tignamar y más abajo presentaron características sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas.

La quebrada Pumane presenta facies sulfato-bicarbonatadas, en cambio la quebrada Lupica se caracteriza por aguas sulfatadas cálcicas. Las aguas de la quebrada Belén (SJAS-84) son bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas, pero aguas abajo del pueblo Belén, son aguas bicarbonatadas cálcicas y con mayor contenido de elementos mayores que la muestra de la quebrada de Belén, pero de composición química similar a la muestra tomada en el pueblo Pachama (SJAS-81). En la quebrada Caillama (SJAS-80) las aguas son sulfatos-cloruradas sódicas, mientras que las aguas de la quebrada Luco son sulfatadas magnésicas con un alto contenido de calcio y sodio.

Por otro lado, las aguas transvasadas desde el río Lauca son bicarbonatadas sódico-magnésicas (DGA-ICASS, 2016), sin embargo, según Jiménez (2013) las aguas provenientes del trasvase del río Lauca son cordilleranas neutras, la geoquímica de estas se sitúa entre aguas bicarbonatadas a sulfatadas cálcicas o cálcico-magnésicas. Estas diferencias se pueden dar por el momento de toma de muestras, lugares exactos de medición y condiciones del caudal externas, como eventos pluviométricos.

Aguas abajo, el río San José en Livilcar, se caracteriza por ser bicarbonatado cálcico-magnésico y en Ausipar se enriquecen en sodio. A partir de este punto las aguas superficiales se infiltran o se desvían en la bocatoma Azapa y no circula agua generalmente por el cauce del río San José en el valle. Sin embargo, en febrero de 2016 (momento de toma de datos) escurrían aguas por el río San José hasta la desembocadura, siendo aguas sulfatadas cálcico-magnésicas.

En la quebrada La Higuera o Acha hay algunas pequeñas vertientes en la localidad de Puquio. Estas aguas son dulces, de pH básico, facies sulfatadas-cloruradas o sulfatadas sódico-cálcicas y con bajo grado de mineralización.

4.1.6.3 Elementos minoritarios y trazas

El contenido de nitratos es bajo o nulo en las aguas superficiales que fluyen por las quebradas de la precordillera y por el río San José (DGA-ICASS, 2016). Los valores de las concentraciones de nitratos son menores a 50 mg/L y las concentraciones de nitrito son menores a 5 mg/L en las muestras tomadas en las campañas de 2015 y 2016 por DGA-ICASS.

Según DGA-ICASS (2016) las aguas superficiales de la cuenca del río San José no contienen selenio, fosfatos, cianuro, cadmio (excepto la muestra más cercana a la desembocadura en febrero de 2016), zinc, aluminio, hierro, cobre y cromo. Excepcionalmente, en el mes de febrero 2016 las aguas superficiales presentaron concentraciones de zinc, aluminio, hierro, cobre y cromo. Las aguas de las quebradas precordilleranas generalmente tienen un bajo contenido en bromuros excepto en la muestra de la Quebrada de Caillama (SJAS-80), misma muestra donde los niveles de conductividad eléctrica son mayores. En el trabajo de Tchernitchin et al. (2015) determinaron que los niveles de arsénico, hierro y Manganeseo para el 2015 eran elevados en la cabecera de la cuenca del río San José, donde en una de sus muestras se

arrojaron valores de 0,078 mg As/L. Por otro lado, Pincetti-Zúniga *et al.* (2022), señala que en la parte alta de la cuenca del río San José las concentraciones de Boro pueden llegar al rango de 5 – 9 mg/L, mientras que las concentraciones de Arsénico pueden encontrarse incluso en rangos de 501-1000 µg/L.

4.1.6.4 Fuentes de contaminación

Tchernitchin *et al.* (2015) indican que existen evidentes fuentes de contaminación antrópica en el valle de Azapa, siendo la minería uno de los principales responsables de contaminación por Arsénico y Boro. Esta situación es perjudicial para la salud de la población, pudiendo ocasionar diferentes enfermedades. Estos elementos no sólo se encontraron en fuentes superficiales sino también en agua potable (Tchernitchin *et al.*, 2015, Pincetti-Zúniga *et al.*, 2022), lo cual es importante de mencionar dado que la población se encuentra expuesta de manera crónica al consumo de Arsénico (Tchernitchin *et al.*, 2015).

4.1.7 Derechos concedidos

A partir de los registros del CPA levantados por DGA-DICTUC (2020), para aguas superficiales de la cuenca del río San José, al año 2020, existían 33 derechos tanto de ejercicio permanente y continuo, como eventuales (continuos y discontinuos). Los datos desagregados se presentan en el Anexo J.5. En la Tabla 4-5 se desagregan los datos de caudal y ejercicio de los 33 derechos catastrados. Destaca la existencia de derechos con unidad de caudal en acciones, y la presencia de derechos eventuales que pueden corresponderse con las crecidas recurrentes del río San José y afluentes en época estival. La distribución espacial de los DAA se muestra en la Figura 4-19.

Tabla 4-5. Resumen de DAA superficiales otorgados para distintos ejercicios del derecho y con su respectivo caudal ubicados en la cuenca del río San José al 2020.

Ejercicio del derecho	Número de DAA	Caudal Promedio Anual
Eventual y Continuo	1	18,06
Acciones	1	18,06
Eventual y Discontinuo	7	699,07
L/s	7	699,07
Permanente y Continuo	25	123,73
Acciones	2	8,75
L/s	23	114,98
Total	33	840,86

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

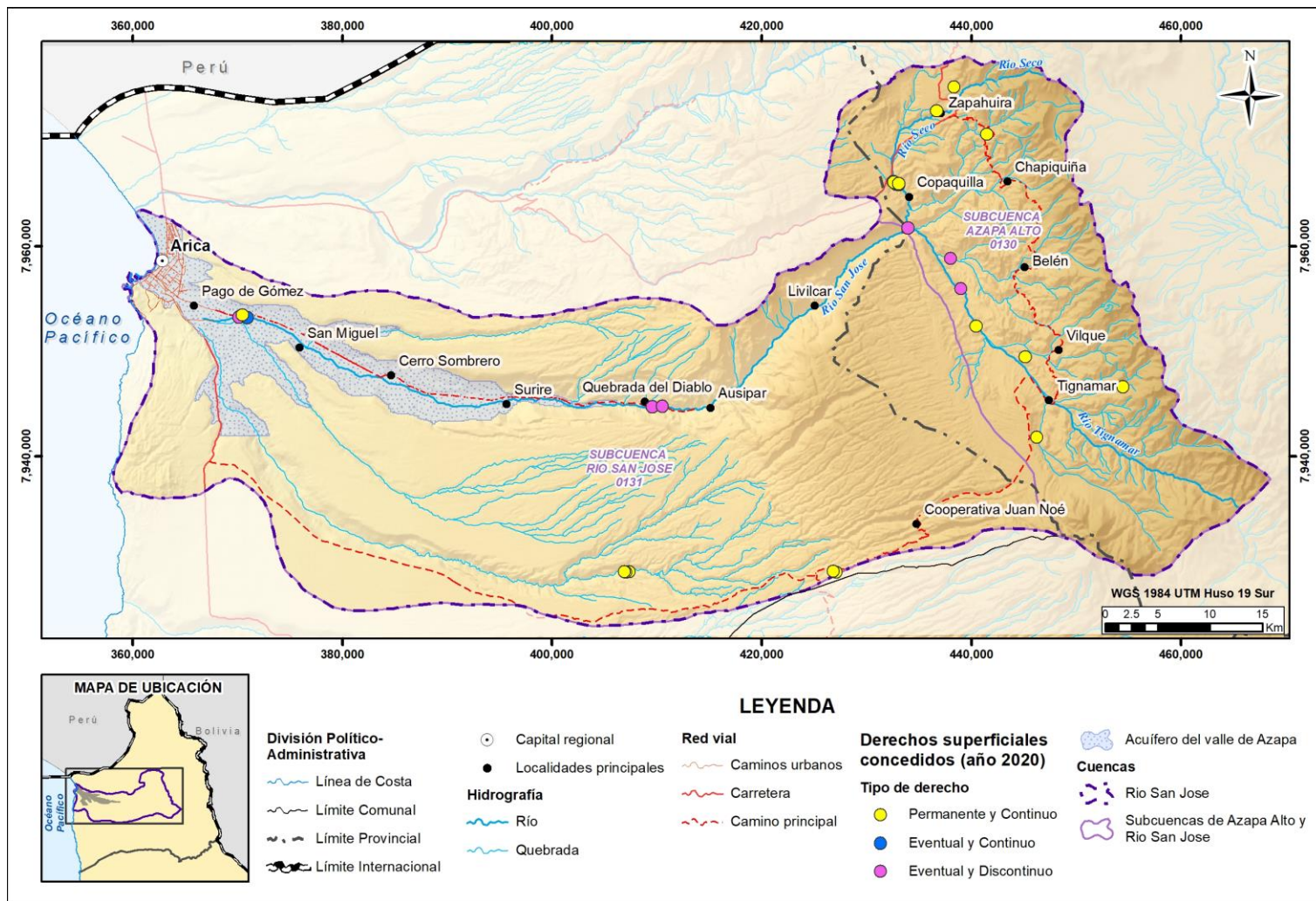


Figura 4-19. Distribución geoespacial de DAA superficiales concedidos al año 2020.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2 AGUAS SUBTERRÁNEAS

Este acápite se caracterizan las fuentes subterráneas existentes en la cuenca del río San José, el análisis de stock, recarga y niveles subterráneos de estas, la calidad actual de las aguas y las fuentes de contaminación existentes, además de la descripción de los DAA concedidos.

4.2.1 Identificación de fuentes subterráneas

En este acápite se presenta la identificación de las fuentes subterráneas, la división administrativa de las aguas subterráneas y las restricciones de uso asociadas.

En la cuenca del río San José los acuíferos se ubican entre los 0 y 70 m de profundidad (DGA-ARRAU, 1997) y se divide en tres sectores que dividen el flujo de agua subterránea: i) Tramo Cabuza-Albarracines; ii) Tramo Albarracines-Alto Ramírez y iii) Tramo Alto Ramírez-Arica Costa, dentro de estas divisiones se encuentran sondajes de profundidades aproximadas a los 90 m. Los acuíferos se componen de materiales gruesos y predominancia de bolones en capas superficiales, mientras que en las capas más profundas se encuentra mayormente gravas y arenas.

De acuerdo con el estudio de Araneda y Avedaño (1997), en la ciudad de Arica y en el valle de Azapa el basamento se profundiza hasta llegar a los 340 m desde el morro de Arica hacia el NE, luego sube hasta llegar a los 140 m y se vuelve a profundizar hasta alcanzar los 500 m en el cerro Colo-Colo.

Respecto del basamento en la zona del valle de Azapa, se obtuvo las siguientes conclusiones:

- En la zona de aguas abajo de Ausípar, la profundidad máxima del basamento sería de 270 metros aproximadamente, en su costado Sur.
- En Cabuza, la profundidad máxima de la roca hacia el NE es de 100 metros, aproximadamente.
- En el sector de Las Riveras se observa una profundidad máxima del basamento, en la parte Sur del perfil, del orden 190 metros.
- Para el sector de San Miguel, la profundidad máxima es 80 metros al costado Sur del valle.

De acuerdo con la información de la DGA-AC (2010) sobre sondajes, se deduce que no existen capas permeables en el valle a mayor profundidad de 100 m. A continuación, se describen las principales formaciones acuíferas.

i) Tramo Cabuza-Albarracines

En este tramo la prospección gravimétrica determinó a 80 m la profundidad de la roca basal. En el sector de Cabuza, el relleno está formado por depósitos fluviales, grava y bolones grandes que alcanzan un ancho de 1200 m. Los acuíferos se encuentran entre los 10 y 50 m y el agua estática se encuentra a partir de los 20 m. No se encuentran capas permeables sobre los 70 m de profundidad. Entre Cabuza y Las Riveras, los acuíferos se ubican entre los 10 y 50 m de profundidad y se componen de capas alternadas de granulometría gruesa, media y fina con alta presencia de arcilla. Entre San

Miguel y Albarracines, el estrato permeable se conforma de gravas, arenas finas y limo a unos 15 metros de profundidad, pero no contiene agua.

ii) Tramo Albarracines-Alto Ramírez

En este sector los acuíferos están conformados mayoritariamente por grava, arena y bolones en los estratos superficiales y gravas y arenas en los estratos más profundos, mientras que las capas impermeables se forman por conglomerados arcillosos, arcilla con limos o arena y en estratos más profundos se encuentra presencia de ceniza volcánica. En este tramo no se detectan acuíferos bajo los 80 m de profundidad.

En los costados del valle los sondeos determinan estratos acuíferos con potencia de 3 a 4 m con intercalación de capas semipermeables o impermeables. Se distingue la relación entre la potencia de los estratos acuíferos con la cercanía al río y el aumento en la cota, caso del pozo DGA-124 que se ubica a 300 m del cauce, próximo al límite sur del relleno y presenta dos capas permeables con potencia mayor a 15 m.

Cabe destacar que, entre Pago de Gómez y Saucache, existe una gran concentración de pozos, pero el río San José escurre por el costado sur del valle, por lo que la totalidad de los sondeos están sobre depósitos fluviales aterrizados. A su vez, en el sector Pago de Gómez existe alternancia de estratos de diferente potencia y granulometría, sin que pueda identificarse una clara continuidad lateral.

iii) Tramo Alto Ramírez-Arica Costa

En el sector centro de la ciudad de Arica aumentan los sedimentos permeables o semi permeables formados por arcillas y limos hasta los 15 m, a profundidades mayores a los 25 m se encuentran alternados con gravas y arenas, desde los 35 m existe mayor presencia de arcillas y ceniza volcánica.

En la zona costera de Arica se encuentran estratos acuíferos con formación impermeable por la sedimentación marina "La Concordia", de manera que los estratos profundos no han sido contaminados por intrusión marina, aun así, cuando los niveles estáticos y dinámicos son menores al nivel medio del mar. En otras palabras, esto explicaría el hecho de que los estratos profundos no presenten una clara contaminación por intrusión de aguas marinas, a pesar de que los niveles estáticos y dinámicos se ubican muy por debajo del nivel medio del mar, situación que se ha mantenido por muchos años.

4.2.2 División administrativa

En términos administrativos, el acuífero del valle de Azapa está constituido por un Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC), como se aprecia en la Figura 4-20, cuya delimitación se encuentra vigente a julio de 2021 (según Resolución DGA N°202 del 19 de marzo de 1996), dado que en el mes de agosto de 2021 se publicó la Resolución DGA N°27 del 22 de julio de 2021 que modifica la resolución anterior, ampliando la zona de prohibición para el SHAC del valle de Azapa a toda la subcuenca del río San José, bajo la premisa de incorporar dentro del área del acuífero las áreas de recarga y su relleno sedimentario (Informe Técnico SDT N°353 del año 2014).

Ahora bien, y para efectos de la modelación desarrollada en el estudio DGA-DICTUC (2020), el acuífero se subdividió en tres sectores hidrogeológicos (SH) listados en la Tabla 4-6. En la Figura 4-21 se presenta esta división del acuífero espacialmente. Esta división se explica en el capítulo de Balance, sección 5.1.1 y en el Anexo-H sección 3.1.1.

Tabla 4-6. División de Sectores Hidrogeológicos de modelación para el valle de Azapa.

Nomenclatura	Sector
SH1	Ciudad de Arica
SH2	Valle de Azapa – sector productivo
SH3	Quebrada de Acha

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

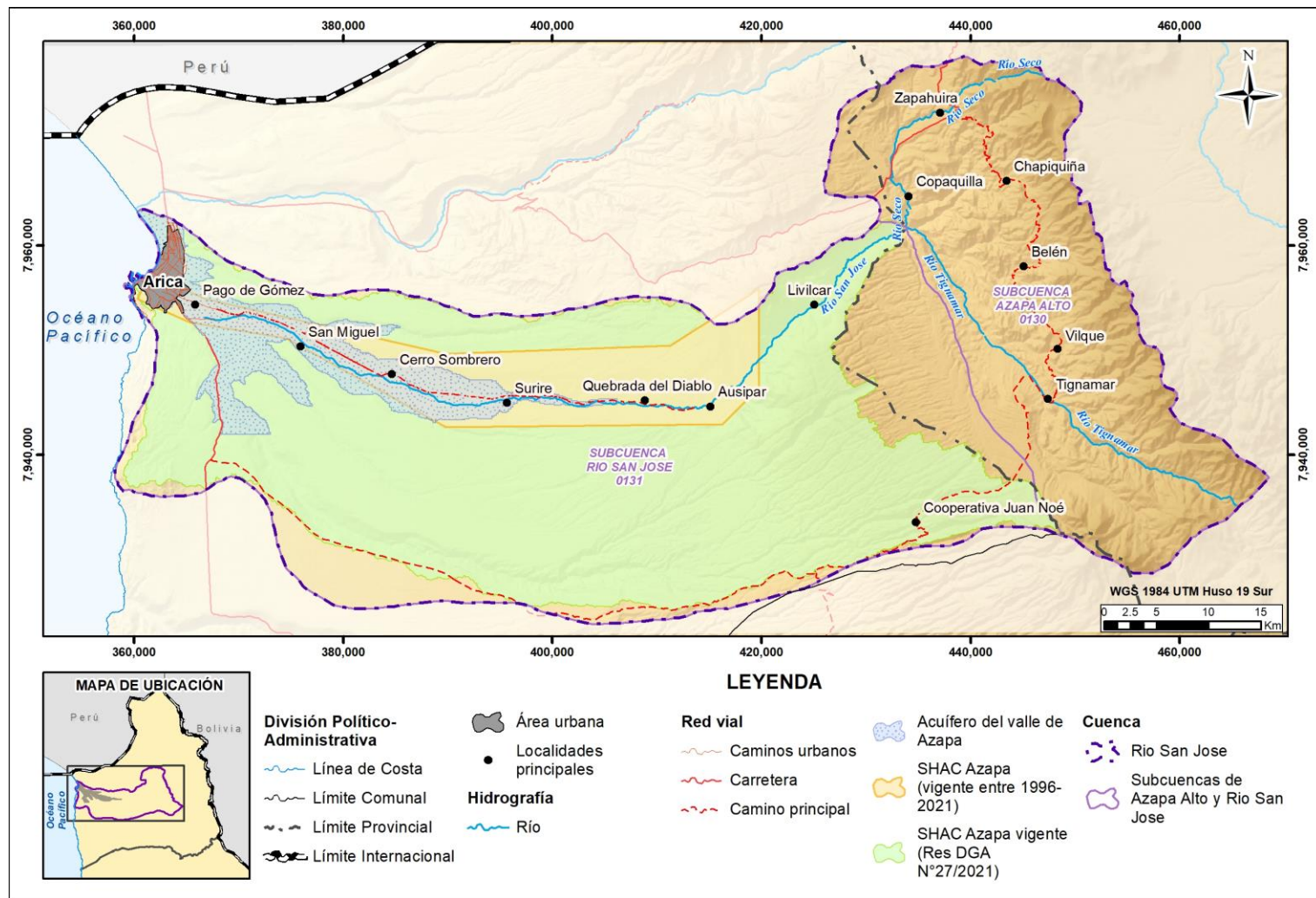


Figura 4-20. Delimitación del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) oficial para el valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia (2022).

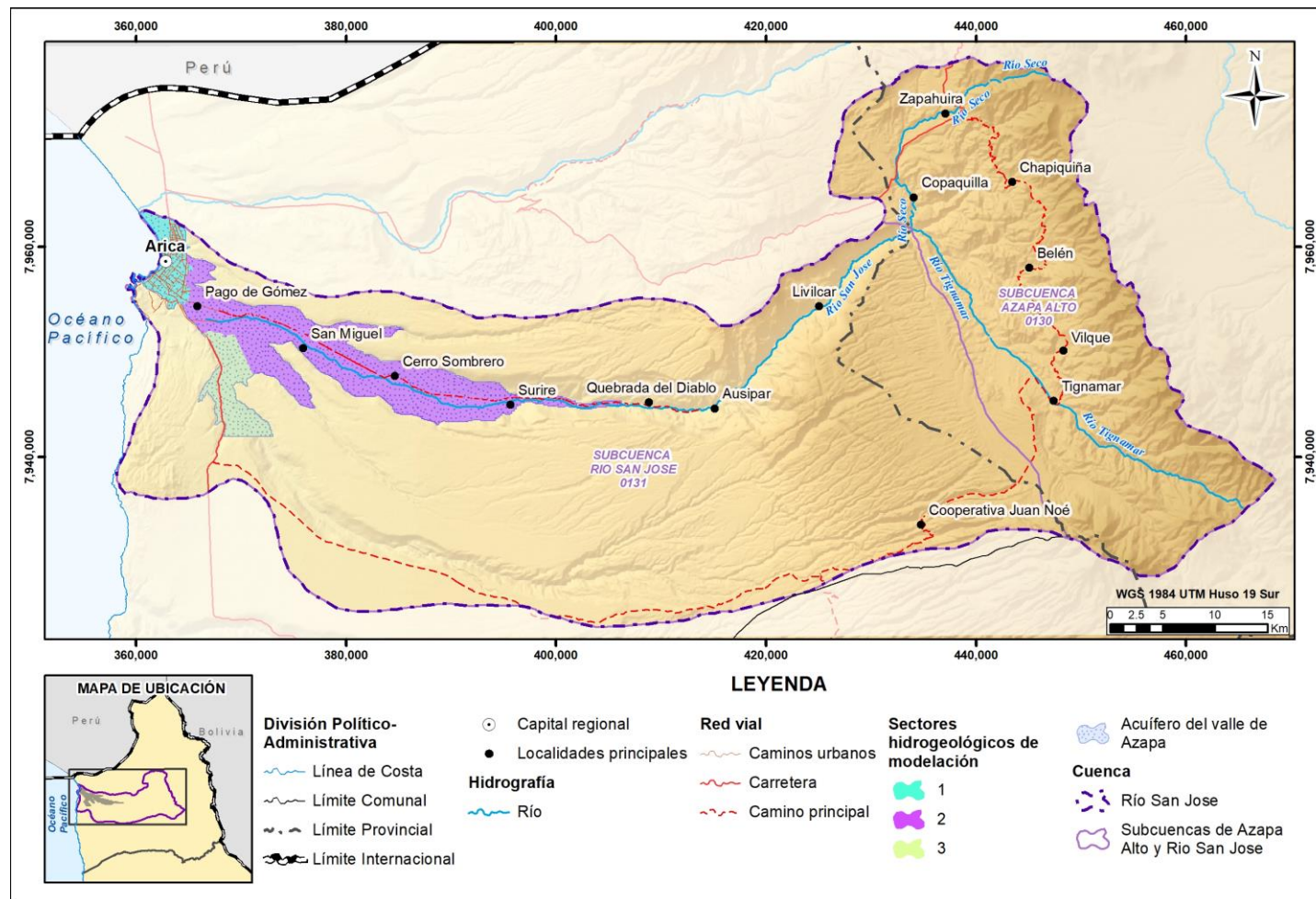


Figura 4-21. Sectores Hidrogeológicos en el valle de Azapa utilizados para efectos de la modelación numérica acoplada.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2.3 Restricciones al uso: zona de prohibición de aguas subterráneas

En marzo de 1996 la Resolución N°202 de la Dirección General de Aguas (DGA) declaró zona de prohibición, para nuevas explotaciones el acuífero de Azapa. No obstante, esta resolución limitaba la explotación solo en una parte del acuífero y no en la totalidad de este, definiendo un caudal de explotación sustentable de 700 L/s. Posterior a esta resolución, en junio de 2018 se tramita la “Modificación a la Resolución N°202” para la zona de prohibición del valle de Azapa a fin de rectificar la limitación al sector hidrogeológico de aprovechamiento común “valle de Azapa”, la que finalmente fue publicada en agosto de 2021 (Resolución DGA N°27 del 22 de julio de 2021), siendo la nueva zona de prohibición el acuífero comprendido en toda la subcuenca del río San José.

4.2.4 Stock y recarga actual

Dado que la modelación de la cuenca del río San José se presenta en dos modelos separados (Capítulo 5, acápite 5.1 Modelos de Simulación), es que la recarga del acuífero se divide en dos partes. En primer lugar, se obtiene una recarga al acuífero desde la zona alta de la cuenca por medio del modelo superficial, la cual se define como un input al modelo de la zona media-baja. Posteriormente, los resultados de la zona alta más los generados en el modelo superficial de la zona media-baja presentan una interacción con un modelo subterráneo de la zona del acuífero en el valle de Azapa. Del acople de un modelo superficial y subterráneo se obtiene el balance hidrogeológico que posee el acuífero.

Por lo tanto, en esta sección los resultados mostrados corresponden al caudal que recarga el acuífero desde la modelación superficial, en el periodo histórico, tanto en su zona alta y zona media-baja. En el siguiente capítulo de Balance de aguas se detalla los resultados de la dinámica de entradas y salidas que existen en el acuífero valle de Azapa a nivel superficial y subterráneo.

4.2.4.1 Recarga subterránea histórica (1986-2018)

En relación con la zona alta de la cuenca del río San José, la Figura 4-22 muestra la recarga a nivel mensual que se genera en esta zona. El promedio durante todo el periodo histórico es de 340 L/s por mes. Sin embargo, se presentan *peaks* importantes relacionadas directamente a los periodos de mayores precipitaciones.

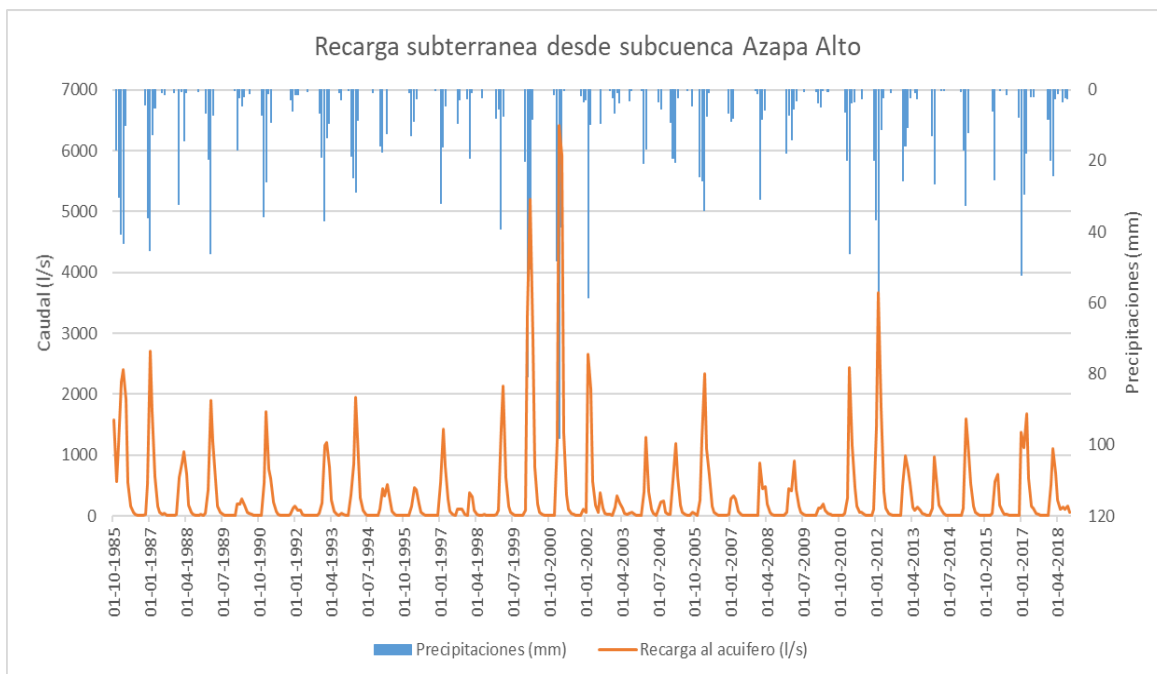


Figura 4-22. Recarga subterránea en subcuenca Azapa Alto (1986-2018).

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el sector medio-bajo de la cuenca, la recarga promedio al acuífero es de 450 L/s mensuales durante el periodo histórico (Figura 4-23), cuyo nivel más alto se registra en marzo 2001 con una magnitud de 6.685 L/s. Sin embargo, esta no se encuentra relacionada directamente a las precipitaciones, dado que el promedio en la zona alta es de 5,7 mm mensuales, mientras que en la zona media-baja el promedio es de 1,1 mm al mes. Además, el gráfico muestra que no existen varios periodos de crecidas que generen importantes recargas, pero a su vez, estas mantienen magnitudes más altas que en la zona alta.

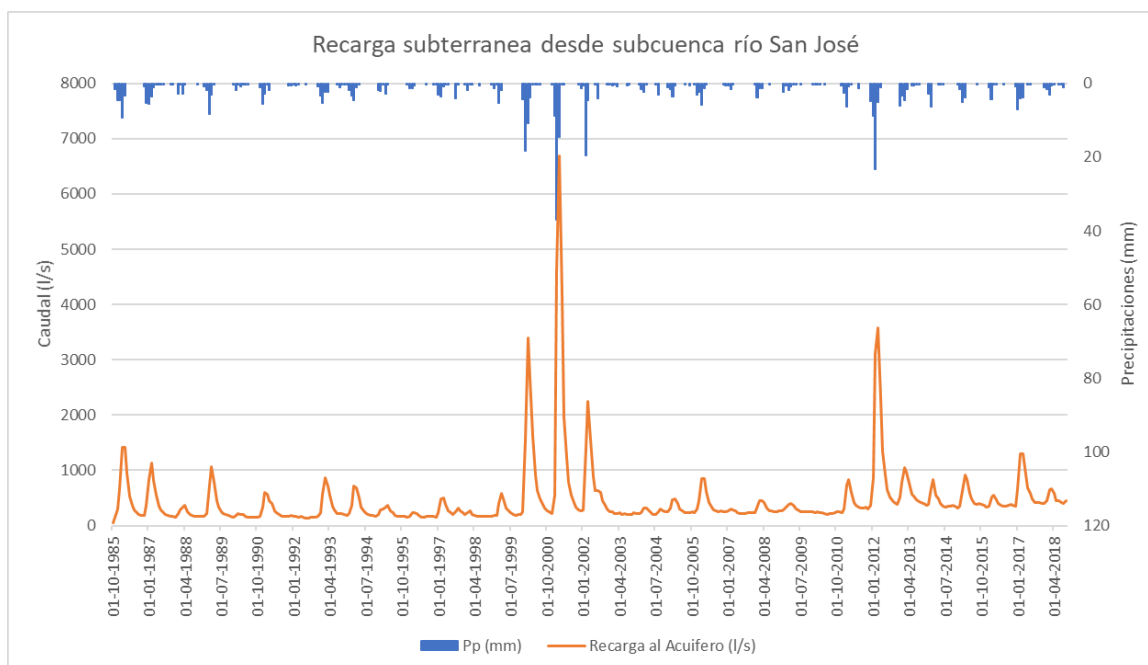


Figura 4-23. Recarga subterránea en subcuenca río San José (1986-2018).

Fuente: Elaboración propia (2022).

Complementando lo anterior, la Tabla 4-7 muestra las recargas históricas separadas por sectores hidrogeológicos del valle de Azapa definidos en la modelación y descritos previamente en la Tabla 4-6. Los resultados fueron obtenidos desde MODFLOW y muestran que en promedio existe una recarga desde al acuífero de 1.043, donde el 9,1% de la recarga proviene desde la Quebrada de Acha (SH3), el 9,5% es recargado desde la ciudad de Arica (SH1) y finalmente la diferencia del 81,4% proviene del sector agrícola y de las laderas que rodean el valle en la subcuenca del río San José.

Tabla 4-7. Recargas promedio del acuífero en el periodo histórico (1986-2018).

Sectores Hidrogeológicos del Acuífero del valle de Azapa	Recarga Promedio (L/s)
SH1 (Ciudad de Arica)	95
SH2 (Sector Agrícola del valle de Azapa)	848
SH2 (Quebrada de Acha)	99
Total	1.043

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2.4.2 Recarga subterránea futura (2020-2050)

En el periodo futuro la recarga en Azapa Alto se presenta en la Figura 4-24. En general se puede apreciar que el comportamiento de la recarga mantiene una semejanza con el periodo histórico, pero a una menor magnitud. El caudal promedio de recarga es de 277

L/s, disminuyendo un 18,5% con respecto al periodo histórico. En cuanto a los valores más altos simulados, estos se ubican en febrero del año 2034 cuyo caudal alcanza los 5.633 L/s.

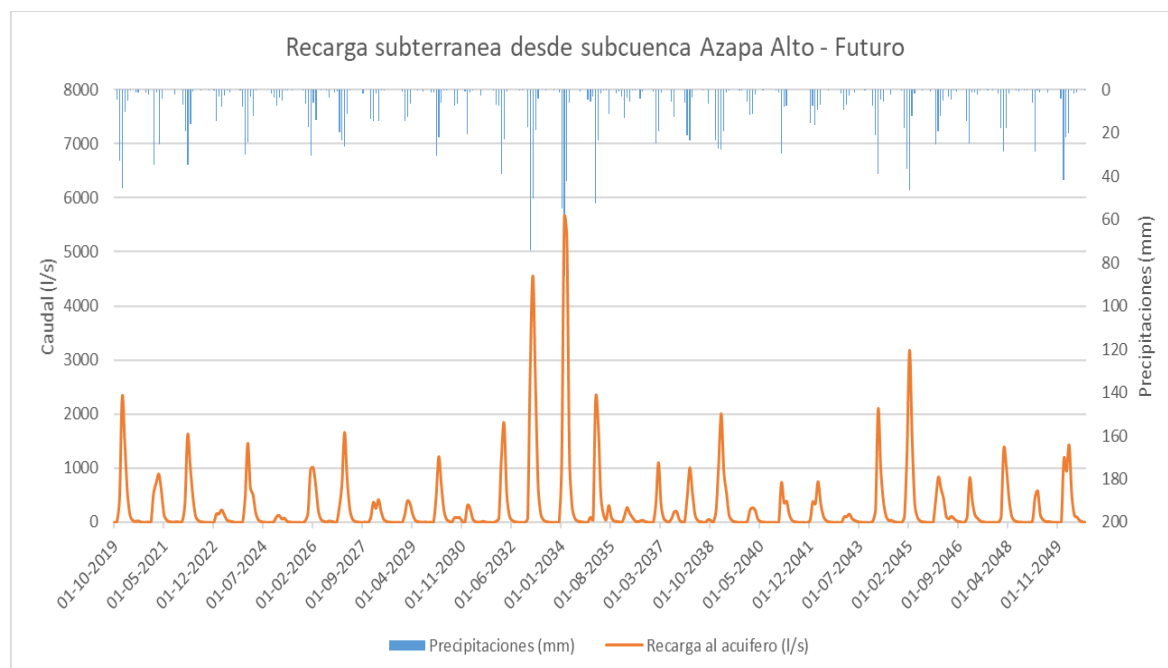


Figura 4-24. Recarga subterránea en subcuenca Azapa Alto (2020-2050).

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el valle de Azapa (subcuenca río San José) también existe un comportamiento similar al registrado durante el periodo histórico, pero con la particularidad de una mayor recarga promedio y una menor precipitación en la zona (Figura 4-25). El caudal promedio para el periodo futuro es de 608,8 L/s, el que aumenta en un 35,3%. Sin embargo, el *peak* simulado futuro es de 6.217 L/s en el mes de marzo de 2034, disminuyendo en un 6,3% respecto al *peak* histórico registrado en marzo 2001. A su vez, las precipitaciones presentan una disminución con respecto al periodo histórico en un 6,8%, cuyo promedio futuro es 1,03 mm, con un registro de su máximo en 34,9 mm en febrero de 2034. Cabe destacar que estos valores provienen de la modelación por lo cual sólo se deben utilizar de forma referencial en el periodo y orden de magnitud y no como datos reales.

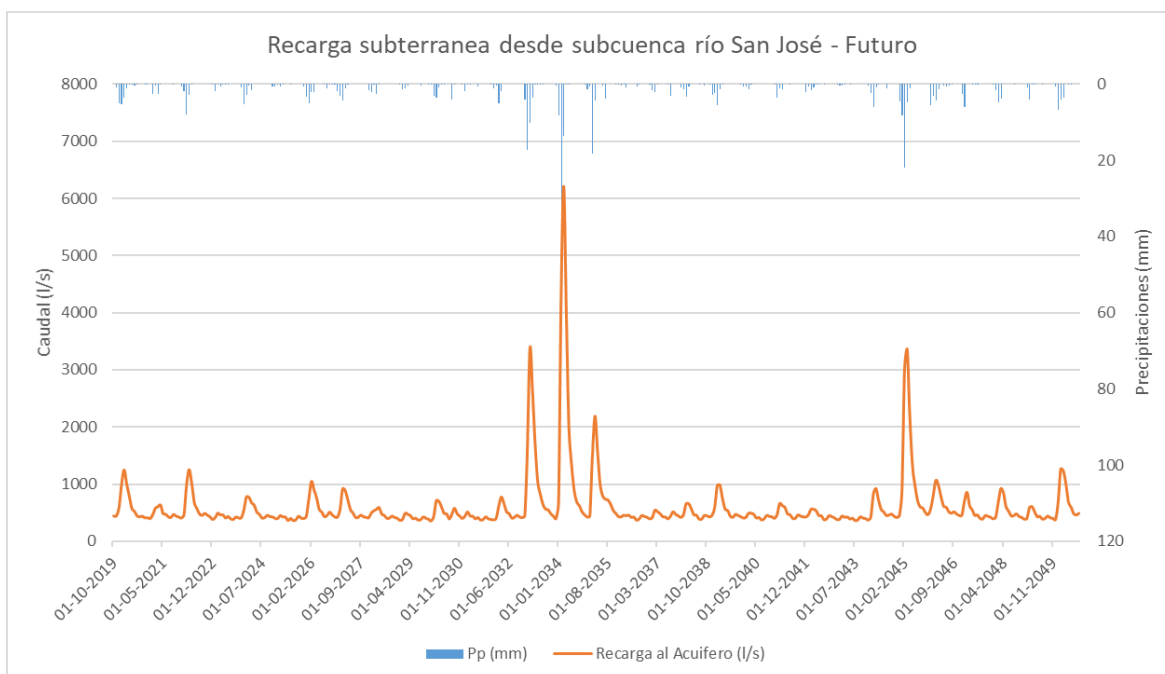


Figura 4-25. Recarga subterránea en subcuenca río San José (2020-2050).

Fuente: Elaboración propia (2022).

A modo de análisis, la recarga en el acuífero del valle de Azapa no se genera principalmente por las precipitaciones que existe en la zona, sino más bien por la potencial intrusión marina que entraría al acuífero en la zona urbana y por infiltración que se genera desde la actividad agrícola por irrigación (el detalle de las fuentes recarga se presenta en la sección 5.1.4). Al observar la Tabla 4-8, las recargas en los distintos sectores del acuífero (SH) definidos previamente en este capítulo, se puede observar que las recargas desde la ciudad de Arica aumentan en un 150% respecto al periodo histórico, donde las recargas de agua de mar aumentan en promedio de 20 L/s a 156 L/s en el futuro (capítulo 5.1.4). Por otro lado, el sector agrícola aumenta en un 2,6% pese a la mayor superficie estimada a futuro y finalmente el sector de la quebrada de Acha disminuye su recarga en un 7,1%.

Tabla 4-8. Recargas promedio del acuífero en el periodo futuro (2020-2050).

Sectores Hidrogeológicos del Acuífero del valle de Azapa	Recarga Promedio (L/s)
SH1 (Ciudad de Arica)	238
SH2 (Sector Agrícola del valle de Azapa)	870
SH2 (Quebrada de Acha)	92
Total	1.200

Fuente: Elaboración propia (2022).

Como anteriormente se mencionó, en el capítulo de balance de aguas se detalla la dinámica hídrica que existe en el acuífero, tanto para su periodo histórico y futuro. Esto

se debe principalmente a que en la cuenca del río San José y principalmente en la zona del valle de Azapa, la oferta superficial es casi nula, implicando que las demandas en la zona baja de la cuenca del río San José sean abastecidas principalmente por el recurso hídrico subterráneo, junto con al trasvase de aguas superficiales desde el Lago Lauca.

4.2.5 Calidad de aguas

Para la caracterización relativa a calidad de aguas subterráneas presentada a continuación, se construyó a partir de información levantada en otros estudios o investigaciones, las cuales realizaron su propio levantamiento de información (información primaria), dado que no existen suficientes datos públicos de calidad de aguas para analizar. La caracterización de la calidad de aguas subterráneas se desarrolla a partir de parámetros fisicoquímicos, análisis hidroquímicos, elementos minoritarios y trazas, y las distintas fuentes de contaminación de las aguas subterráneas.

4.2.5.1 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos que se presentan a continuación corresponden a temperatura, conductividad eléctrica (CE), pH y sólidos disueltos totales (SDT). Esta información ha sido recopilada del estudio DGA-ICASS (2016) específicamente del Anexo "parámetros in situ" y del estudio DGA-GP Consultores (2022), quienes levantaron y analizaron información de calidad de aguas subterráneas del acuífero del valle de Azapa. Para ambos estudios es posible observar los puntos de muestreo en el Anexo J.4.

En las mediciones realizadas en 2015- 2016, la temperatura de las aguas subterráneas (Figura 4-26), se encuentran entre los 17°C y 29°C, un rango menor si se compara con los datos obtenidos de aguas superficiales, lo que se puede explicar por el efecto que provoca el sustrato para mantener la temperatura.

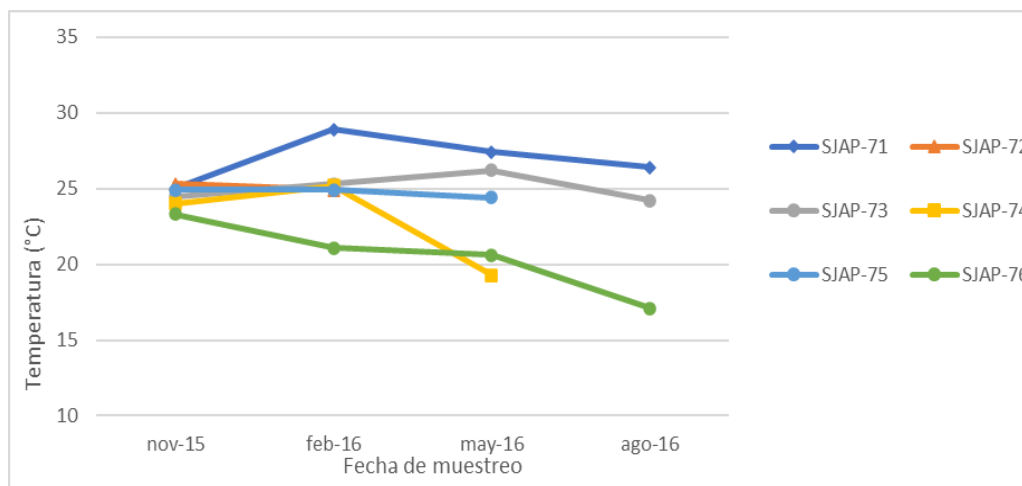


Figura 4-26. Valores de temperatura registrados en aguas subterráneas en las campañas de terreno 2015 - 2016.

Fuente: DGA-ICASS, 2016.

En la Figura 4-27 que representa información del año 2021 se observa que las temperaturas fluctúan entre 21°C y 25°C, siendo más homogéneas que las muestras tomadas por DGA-ICASS (2016).

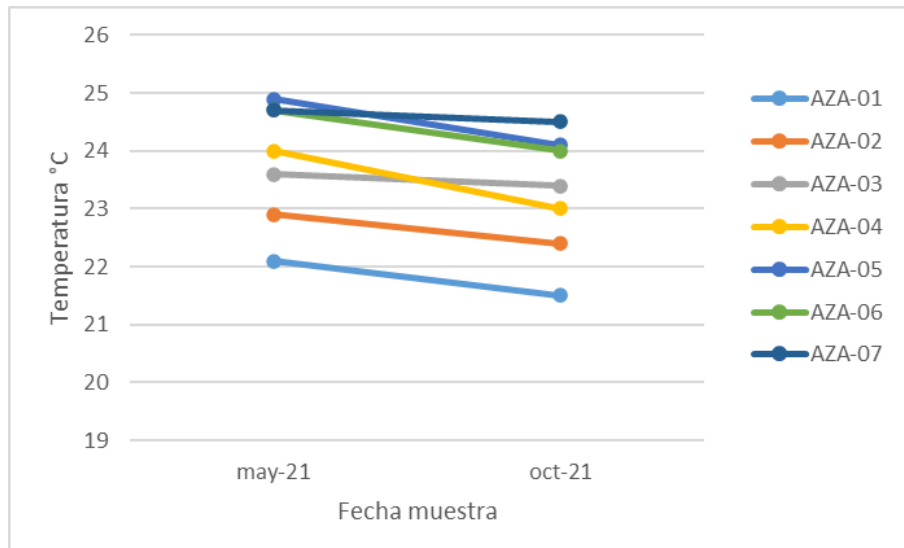


Figura 4-27. Valores de temperatura registrados en aguas subterráneas en las campañas de terreno 2021.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-GP Consultores, 2022.

Respecto al pH (Figura 4-28), las aguas subterráneas son más bien neutras bordeando valores entre 6 y 7,8. Si bien los valores de pH son un poco más bajos en agosto, no se identifica una gran variación por estacionalidad. En las muestras tomadas por DGA-GP Consultores (2022) tampoco existe una gran diferencia entre los valores de pH de las muestras tomadas en otoño y primavera (Figura 4-29). Según la NCh 409 de agua potable los valores de pH se deben encontrar entre 6,9 y 7,7, donde las muestras de 2022 se encuentran todas en los rangos establecidos. Cabe destacar que gran parte de estas muestras son de sistemas de APR, siendo un factor adicional para mantener la buena calidad de estas aguas.

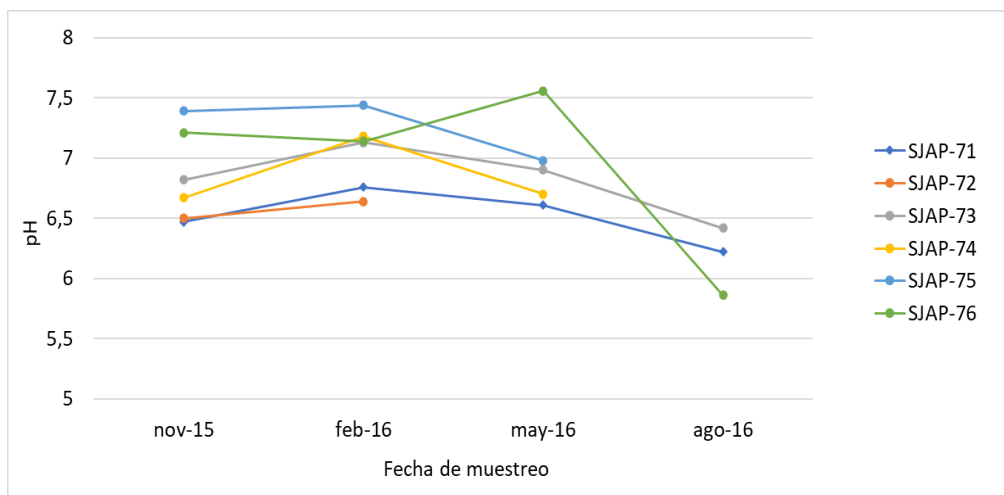


Figura 4-28. Valores de pH de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2015-2016.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-ICASS, 2016

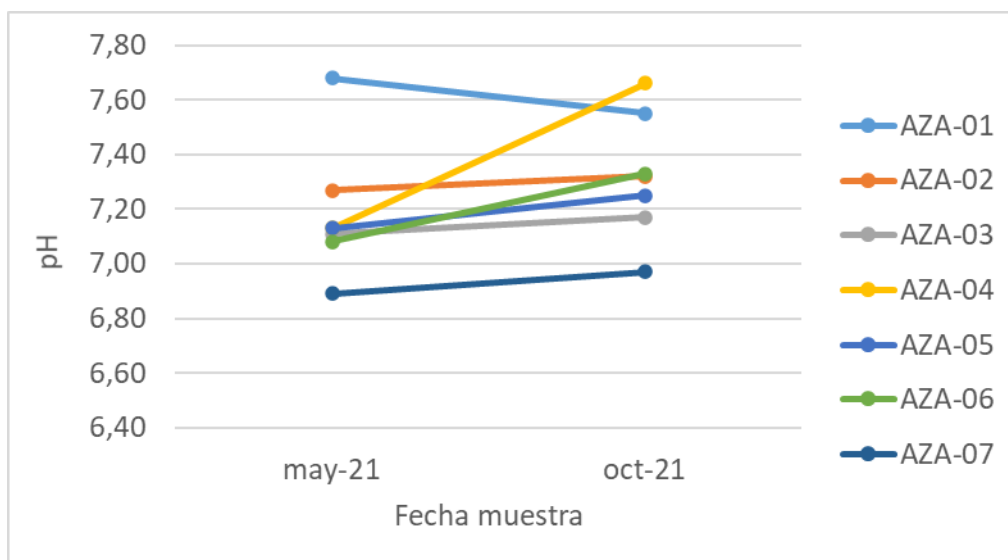


Figura 4-29. Valores de pH de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: Elaboración propia en base a GP Consultores, 2022.

La conductividad eléctrica a diferencia de los parámetros anteriores si presentó una variación importante en términos espaciales en las muestras tomadas en 2015-2016. Los valores de conductividad en la parte alta del acuífero – zona media de la cuenca- (sector Los Molinos – SJAP-76) presenta valores menores a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sin embargo, desde el sector de Los Molinos hacia aguas abajo se observa un incremento de la conductividad eléctrica hasta alcanzar 5.000 y 8.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en un pozo próximo a la ciudad de Arica, indicando un aumento notorio de la salinidad de las aguas subterráneas. No se presenta gráfico de conductividad eléctrica dado que los valores proporcionados por ICASS (2016) tienen problemas de consistencia respecto de los valores de muestras analizadas.

Respecto a la información proporcionada por DGA-GP Consultores (2022) se condice que la muestra más cercana a la línea de costa (AZA-07) es aquella que presenta los valores de CE más elevados y la muestra tomada en la parte más alta del acuífero (AZA-01) es la que presenta menores niveles de CE (Figura 4-30).

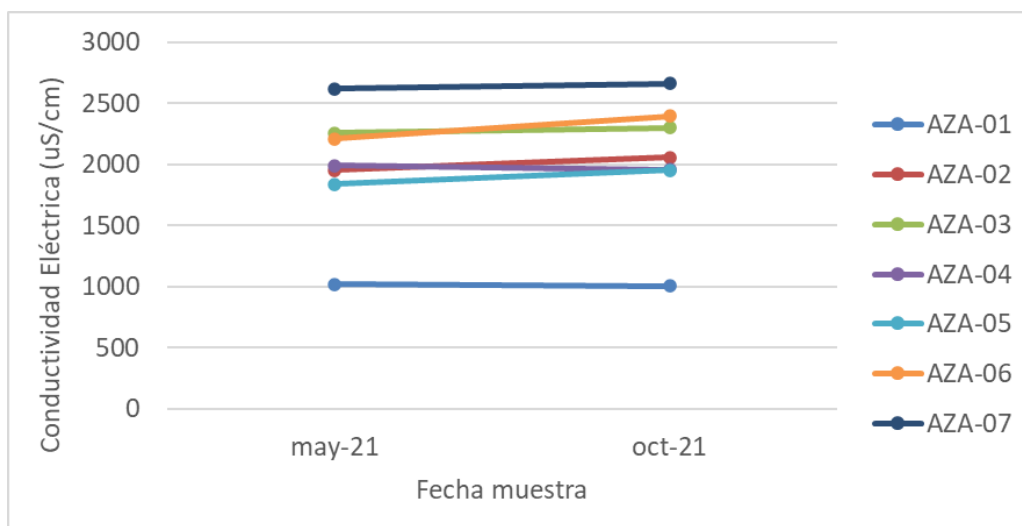


Figura 4-30. Valores de CE de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de DGA-GP Consultores, 2022.

Según ICASS (2016) los valores de sólidos disueltos totales para la muestra SJAP-71 (más cercana a ciudad de Arica), superan los 5.000 mg/L. Respecto a las muestras analizadas por DGA-GP consultores (2022) no existen muestras que presenten valores de SDT tan elevados, siendo los mayores valores los correspondientes a la muestra AZA-07 con 1738 mg/L y 1852 mg/L, siendo la misma muestra que presenta valores más elevados de CE y valores más bajos de pH (Figura 4-31). Según la OMS (2011) los valores máximos permitidos para SDT son de 1000 (no por temas de salud, sino más bien por temas de sabor y daño a infraestructura), siendo superados los valores recomendados en estas muestras. Los SDT contienen las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica, estos contenidos aumentan la salinidad, como se observó en los parámetros de CE.

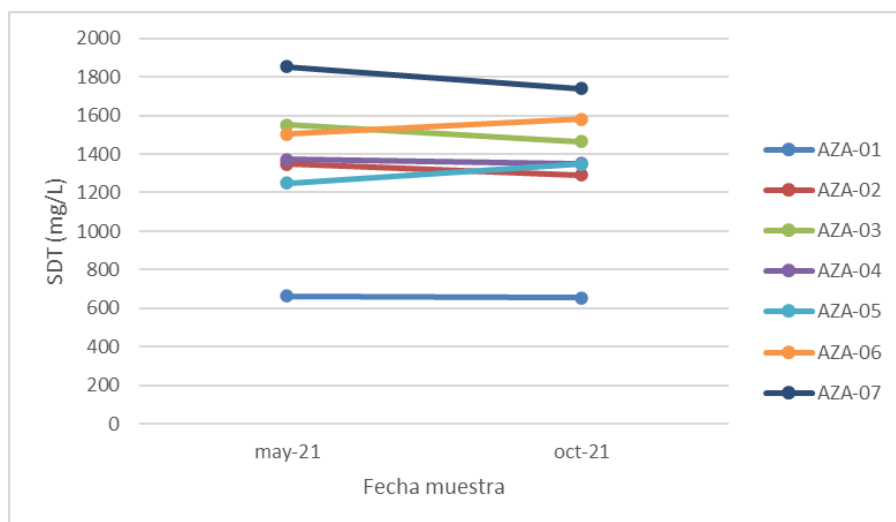


Figura 4-31. Valores de CE de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de DGA-GP Consultores, 2022.

4.2.5.2 Análisis hidroquímicos

Según información proporcionada en el estudio de DGA-GP consultores (2022) se observa que las aguas subterráneas en el SHAC Azapa presentan variaciones en el tipo de agua. La Figura 4-32 muestra el diagrama de Piper de las muestras tomadas en otoño y primavera, y Figura 4-33 muestra el diagrama de Stiff de manera de geoespacializar la información de la hidro química de las aguas.

Como se observa en el diagrama de Piper hay dos marcas hidro químicas, una señalada por el pozo AZA-01, que presenta aguas del tipo cloruradas-sulfatadas cálcicas y los pozos AZA-02, AZA-03, AZA-04, AZA-05, AZA-06 y AZA-07, que presentan aguas del tipo cloruradas-cálcica. Esto se observa también en el diagrama de Stiff (DGA-GP consultores, 2022).

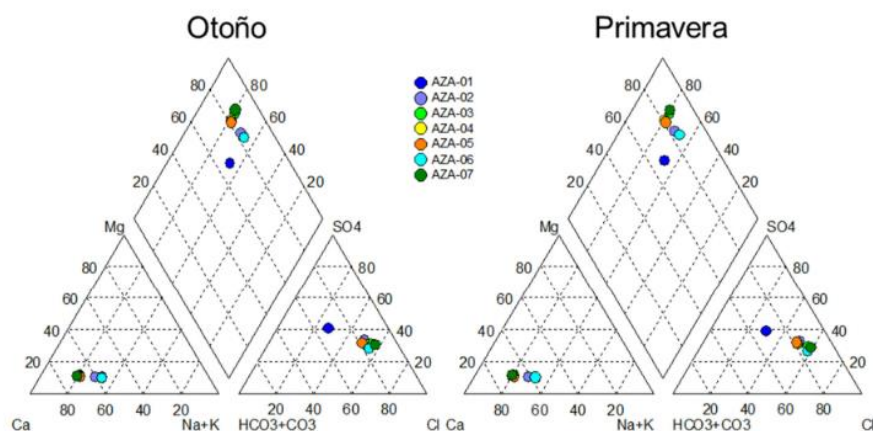


Figura 4-32. Diagrama de piper de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

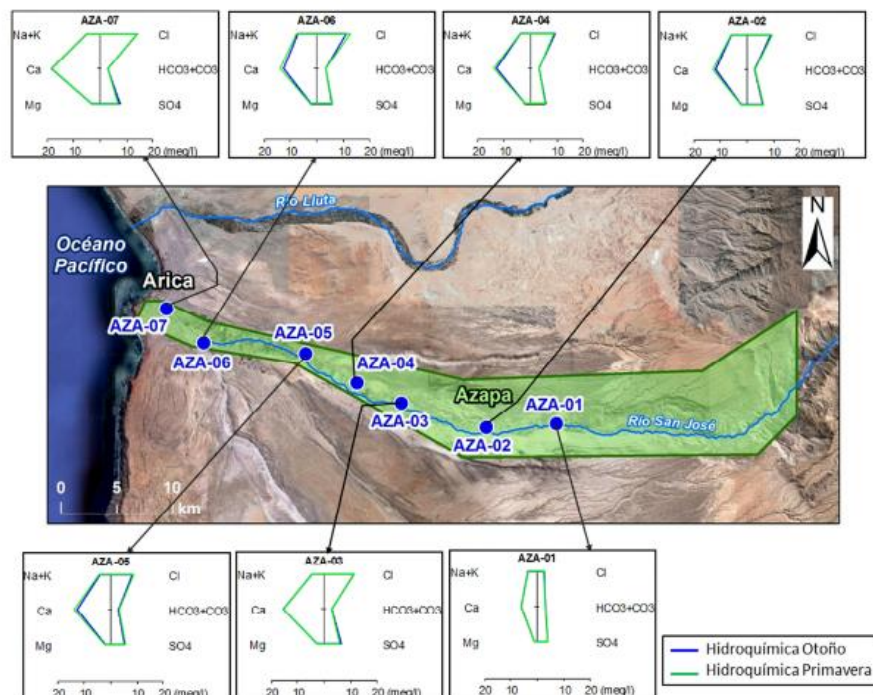


Figura 4-33. Diagrama Stiff de aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

Esta información es concordante con lo presentado en el estudio DGA-ICASS (2016), donde se indica que las aguas del acuífero del valle de Azapa son cloruro-sulfatadas a cloruradas cálcicas. Sin embargo, se señala que las aguas del pozo SJAP-76 (parte alta del acuífero – similar a AZA-01) son bicarbonatadas cálcicas con alto contenido en sulfatos y cloruros, similar a las aguas superficiales del río San José. Se señala además que aguas abajo de este pozo, a medida que avanza hacia la línea de costa las aguas subterráneas son cloruradas cálcicas y van enriqueciéndose en elementos mayoritarios (DGA-ICASS, 2016), como en calcio y sodio, pasando de ser aguas dulces a salobres en desembocadura.

En la Figura 4-34 se observa lo anteriormente mencionado por el estudio DGA-ICASS (2016), donde las concentraciones de cloruros tienden a aumentar a medida que las muestras se acercan a la línea de costa, y donde en la campaña realizada en primavera de 2021, por DGA-GP consultores (2022), muestran que los valores de las concentraciones fueron superiores a lo establecido por la NCH409 de agua potable.

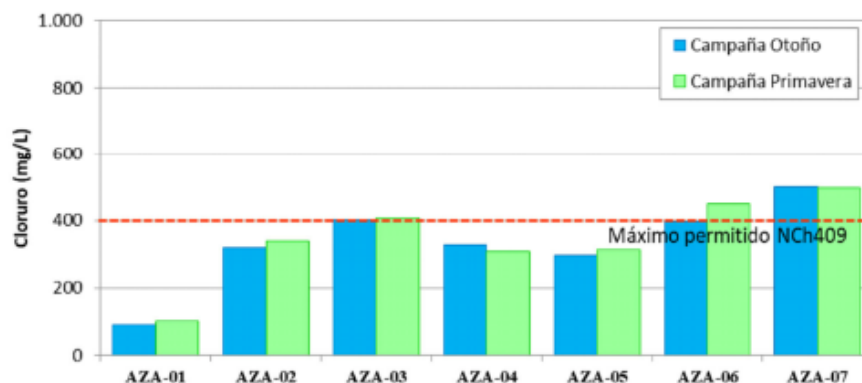


Figura 4-34. Concentración de cloruros en aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

4.2.5.3 Elementos minoritarios y trazas

Según lo informado en el estudio DGA-ICASS (2016), las aguas subterráneas presentan un alto nivel de nitratos y nitritos. En la Figura 4-35 se muestran los resultados obtenidos por DGA-GP consultores (2022) donde tres de los seis puntos de muestreo superan el valor permitido por la NCh409, donde AZA-03 llega incluso a concentraciones de 80 mg/L. Además, se muestra un incremento progresivo del contenido de litio, bromuros, aumentando la concentración de sales en la parte baja de la cuenca (DGA-ICASS, 2016).

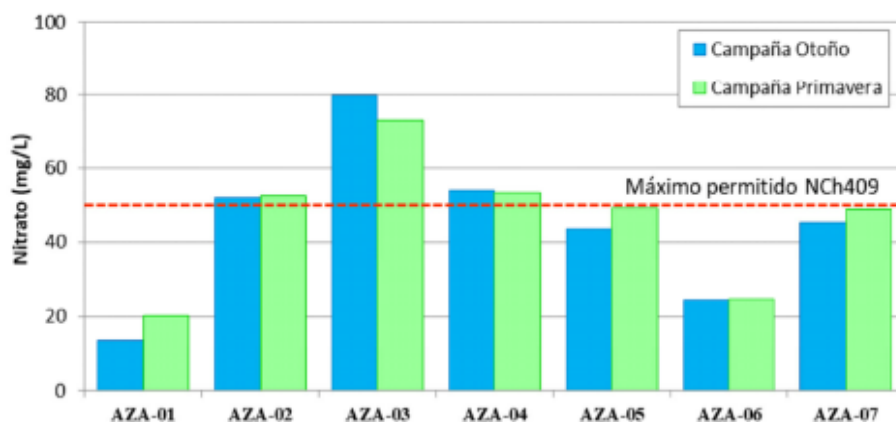


Figura 4-35. Concentración de nitratos en aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

Por otro lado, según DGA-ICASS (2016) las aguas subterráneas no contienen concentraciones de arsénico, sin embargo, el estudio DGA-GP Consultores (2022) presenta a cinco de sus seis puntos de muestreo con concentraciones de arsénico superiores a lo permitido por la NCh409 (0.001 mg/L) como se observa en la Figura 4-36. Estos valores se encuentran en un rango aproximado de 0,009 a 0,033 mg/L (Figura 4-36).

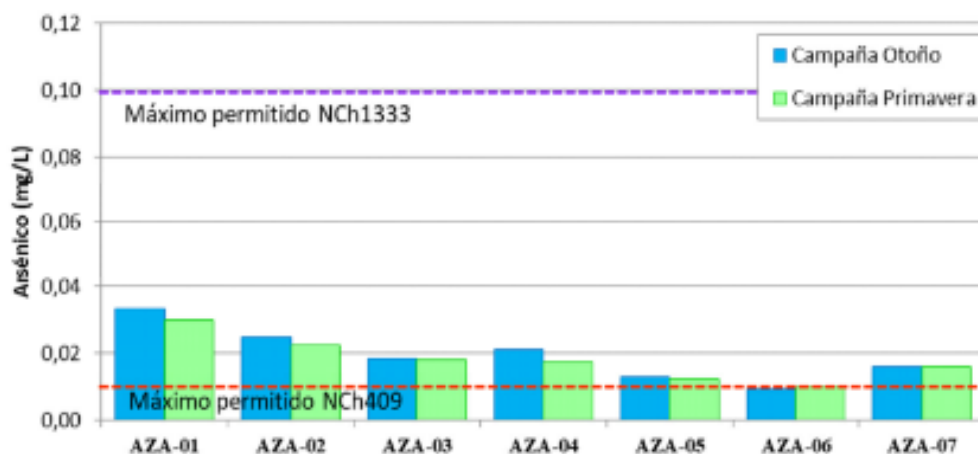


Figura 4-36. Concentración de arsénico en aguas subterráneas registradas en campaña de terreno 2021.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

4.2.5.4 Fuentes de contaminación y contaminación de aguas

En el estudio DGA-GP Consultores (2022) se construyó un índice de calidad del agua (ICA) para los diferentes puntos de muestreo, el que indica la potencialidad de la utilización de estas aguas para el consumo de la población o su uso en riego. Las categorías en las cuales se describen las aguas se observan en la Tabla 4-9, donde el valor 1 trata de un agua excepcional y el valor 5 de un agua intratable.

Tabla 4-9. Categorías Índice de Calidad de Agua.

1	Excepcional	El agua es apta para consumo humano. La calidad del agua cumple en general con las directrices de calidad de Agua Potable (Guidelines for Drinking-water Quality) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que en general es más estricta que la Norma Chilena de Agua Potable NCh409.
2	Buena	El agua es apta para consumo humano. La calidad del agua cumple en general con la normativa chilena de calidad de Agua Potable (NCh409).
3	Regular	El agua no es apta para el consumo humano, pero puede ser utilizada para el agua de riego. La calidad del agua los requerimientos de la FAO (Water Quality for Agriculture), y la NCh1333 (agua para riego)
4	Insuficiente	El agua no es apta ni para el consumo humano ni para el riego agrícola. Puede ser tratada para alcanzar la calidad de agua potable definida por la NCh409
5	Intratable	El agua no es apta ni para el consumo humano ni para el riego agrícola. Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serian mediante procesos muy costosos o complejos.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

De acuerdo con los resultados evaluados del Índice de Calidad del Agua (ICA), se observa que, en este SHAC, todos los pozos presentan un ICA=3, identificado como Regular para ambas campañas, por lo que el agua no es apta para el consumo humano directo, pero puede ser utilizada en riego (Tabla 4-10).

Tabla 4-10. Índice de Calidad de Agua por Parámetro y por pozo.

ID Pozo	Campaña	SDT	Cl	SO4	Ca	Na	Mg	NO3	As	Mn	Pozo
AZA-01	Otoño	1	1	1	2	1	1	2	3	1	3
AZA-02	Otoño	2	2	2	3	1	1	3	3	1	3
AZA-03	Otoño	3	3	2	3	1	1	3	3	1	3
AZA-04	Otoño	2	2	2	3	1	1	3	3	1	3
AZA-05	Otoño	2	2	2	3	1	1	2	3	1	3
AZA-06	Otoño	3	2	2	3	1	1	2	1	1	3
AZA-07	Otoño	3	3	2	3	1	1	2	3	1	3
AZA-01	Primavera	1	1	1	2	1	1	2	3	1	3
AZA-02	Primavera	2	2	2	3	1	1	3	3	1	3
AZA-03	Primavera	2	3	2	3	1	1	3	3	1	3
AZA-04	Primavera	2	2	2	3	1	1	3	3	1	3
AZA-05	Primavera	2	2	2	3	1	1	2	3	1	3
AZA-06	Primavera	3	3	2	3	1	1	2	1	1	3
AZA-07	Primavera	3	3	2	3	1	1	2	3	1	3

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

En la zona de la desembocadura existirían problemas de salinidad de las aguas subterráneas. Esto sería producto de la intrusión marina debido a la sobreexplotación del acuífero y por el aumento de la extensión de riego de los campos de cultivo que provocan el lavado de suelos salinos y del cultivo intensivo en el valle de Azapa durante las últimas décadas (ICASS, 2016). Según DGA-DICTUC (2020), el uso intensivo del acuífero en las últimas décadas ha provocado una disminución del caudal y, por lo tanto, una disminución en el aporte de aguas desde el acuífero hacia el mar, favoreciendo la entrada de agua proveniente del mar. Dicho estudio estimó que históricamente la entrada de agua desde el mar fue de 20 L/s mientras que la salida hacia el mar fue 81 L/s. En la actualidad, se mantendría el excedente de desembalse desde el acuífero, sin embargo, este aporte ha presentado una disminución constante causando el aumento de intrusión salina, efecto que se ha vuelto relevante en los últimos cinco años y se proyecta mayor hacia el futuro (mayor detalle de aumento de entradas de aguas desde el mar hacia el acuífero en el futuro en sección 5.1.4).

Por otro lado, el análisis de calidad de las aguas de la cuenca del río San José al año 2016 concluía que no son aptas para el consumo humano por exceder los límites de varios elementos que indica la norma NCh 409, excepto en la quebrada Lupica que tiene aguas aptas para el consumo humano y para riego (DGA-ICASS, 2016). El agua para consumo humano no se puede usar sin tratamiento. También para cultivos el uso es problemático: tanto el agua que proviene del canal Lauca y así como también el agua que se extrae desde el acuífero DGA (1998).

4.2.6 Derechos concedidos

A partir de los registros del CPA levantados por DGA-DICTUC (2020), para aguas subterráneas del acuífero del valle de Azapa, al año 2020, existían 433 DAA catastrados, todos de carácter consuntivos y de ejercicio permanente, totalizando un caudal otorgado

de 2.012 L/s aproximadamente. La distribución espacial de los DAA subterráneos se muestra en la Figura 4-36. Los datos desagregados se presentan en el Anexo J.5.

Tabla 4-11. Resumen de DAA subterráneos otorgados para distintos ejercicios del derecho y con su respectivo caudal ubicados en el acuífero del valle de Azapa al 2020.

Ejercicio del derecho	Número de DAA	Caudal Anual Promedio
Permanente y Alternado	5	105,00
Permanente y Continuo	422	1.896,42
Permanente y Discontinuo	6	10,96
Total	433	2.012,38

Fuente: Elaboración propia en base a DGA-DICTUC (2020).

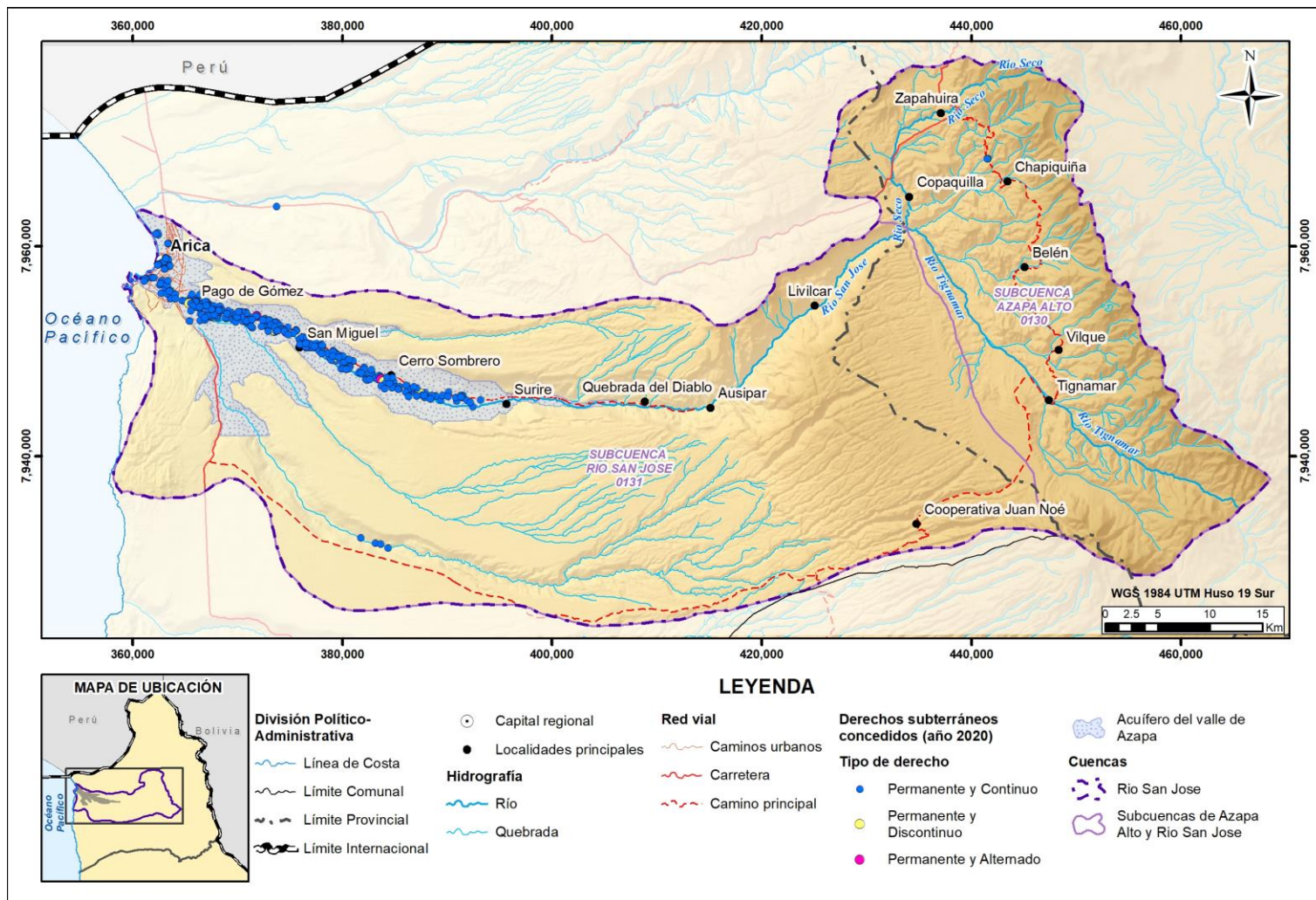


Figura 4-37. Distribución geoespacial de DAA subterráneos concedidos al año 2020.

Fuente: Elaboración propia (2022).

4.3 BRECHAS DE INFORMACIÓN DE OFERTA

Es el presente acápite se mencionan las principales brechas de información relacionadas al capítulo precedente y que condicionan una completa y precisa caracterización de la oferta hídrica del área de estudio. Estas se encuentran divididas en la estimación del uso efectivo de caudales, calidad de aguas, cuestiones de modelación y lo relativo a la intrusión marina. Además, se complementan las brechas con algunas recomendaciones, las que se abordan de forma más precisa con acciones dentro del plan de acción (sección 6).

- Estimación del uso efectivo de caudales:

La extracción de caudal subterráneo asociada a la demanda agrícola fue estimada indirectamente y para el consumo urbano se utilizaron los registros SISS. Para cuantificar de manera más verídica las extracciones de caudal, considerando las extracciones ilegales que se realizan en la zona, las cuales no están cuantificadas y contribuyen al deterioro y disminución de la disponibilidad de agua en el valle, se espera un plan de monitoreo de extracciones efectivas que entregue acceso a mediciones reales de caudales extraídos por los usuarios.

- Información de calidad de aguas:

La información que actualmente existe sobre la calidad de las aguas subterráneas y superficiales es escasa. No es suficiente contar solo con informes que caractericen las aguas de manera puntual en diversas muestras mientras duren los estudios. Es necesario contar con información periódica de la evolución de las características de calidad para poder analizar su comportamiento durante los diferentes periodos del año. La calidad del agua puede variar si existen agentes contaminantes.

Estos agentes pueden ser constantes o afectar en ciertas condiciones o momentos del año, por lo cual las mediciones puntuales no satisfacen la necesidad de control de la calidad del agua, principalmente superficial. En el caso de la calidad del agua subterránea, donde la velocidad del movimiento del fluido es relativamente baja (Oyarzún, R. 2007) existe la posibilidad de detener los procesos de contaminación a mayor escala de manera anticipada, no obstante, un evento de contaminación no podrá ser visualizado si no existen controles periódicos, por lo que no será factible tomar medidas precautorias en su uso. Es importante destacar que el transporte de sustancias contaminantes en aguas subterráneas es muy complejo de analizar, se requiere un conocimiento acabado de los procesos químicos que influyen en el estado de los compuestos y la interacción con el medio y gran cantidad de información y tecnología para analizar estos procesos (Oyarzún, R. 2007), por lo cual se reitera la necesidad de control como una estrategia precautoria.

Tal como se ha mencionado en otros estudios, por ejemplo, en DGA-ICASS (2016), se necesita complementar la red de monitoreo de calidad de aguas, con estaciones autónomas, respecto a la batería (uso de panel solar) y un *datalogger* que logre registrar datos, al menos durante 30 días enviando además la información en forma satelital a un receptor de la DGA, permitiendo así aportar a futuros Planes de Alerta temprana.

En la Figura 4-38 se muestra la distribución espacial de los puntos de las campañas de monitoreo 2021 del estudio DGA-GP Consultores (2022), donde se observa que los pozos utilizados en el muestreo presentan una distribución homogénea, ya que están

distribuidos con densidades más o menos constantes en el sector, lo que podría ser útil para mantener el monitoreo de calidad en el acuífero del valle de Azapa.

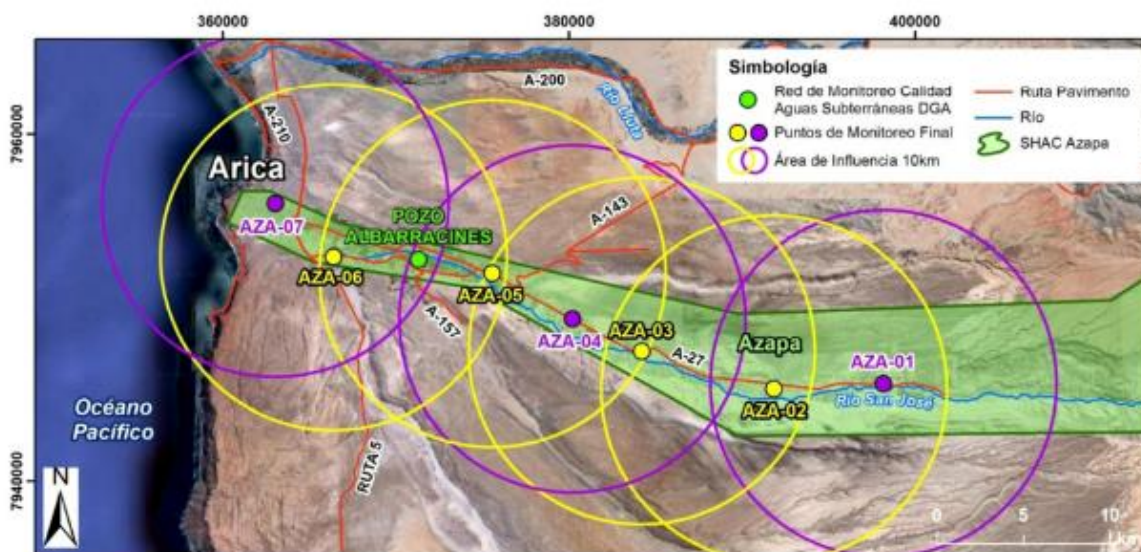


Figura 4-38. Densidad de puntos de monitoreo.

Fuente: DGA-GP Consultores, 2022.

Tal como se ha mencionado en otros estudios, por ejemplo, en DGA-ICASS (2016), se necesita complementar la red de monitoreo de calidad de aguas, con estaciones autónomas, respecto a la batería (uso de panel solar) y un datalogger que logre registrar datos, al menos durante 30 días enviando además la información en forma satelital a un receptor de la DGA, permitiendo así aportar a los Planes de Alerta temprana.

- Modelación de escenarios futuros:

Respecto a la intrusión marina, se recomienda llevar a cabo una campaña de muestreo hidro geoquímico y una modelación de intrusión salina para identificar la actual de la cuña o interfaz salina y la proyección de la evolución de la interfaz salina de acuerdo con el potencial escenario de intrusión marina.

En complemento, se propone avanzar en la información respecto a la intrusión salina, dado que se ha señalado como un problema que puede intensificarse a futuro. Para esto es necesario contar con pozos de monitoreo cercanos a la línea de costa, y verificar que el nivel piezométrico del acuífero en esas zonas no descienda para evitar el aumento del flujo marino.

- Intrusión marina:

Los altos niveles de explotación (legales o ilegales) supone una grave amenaza para las aguas subterráneas y por consiguiente la intrusión de agua salobre. Este problema puede derivar en un problema social mayor con el abandono de pozos y territorios.

El modelo señala escenarios futuros complejos, sin embargo, actualmente no existen datos concretos que indiquen que este fenómeno esté ocurriendo. Existen valores altos de CE y Cloruros, sin embargo, también existe contaminación antrópica (agrícola) que puede ser motivo por el cual estos valores son elevados. Será importante llevar a cabo estudios geofísicos y geoquímicos para estudiar el riesgo de contaminación de las aguas

subterráneas producto de la intrusión marina, estudios que indiquen el material de composición del acuífero y sus características como la resistividad y conductancia. estudio científico periódico de este tipo es de suma importancia para monitorear, prevenir y remediar las amenazas de contaminantes (Yusuf y Abiye, 2019).

Este punto de intrusión marina se abordará en las acciones, con un estudio extra que actualice la modelación e incorpore esta componente (puede que por la tipología o diseño del modelo aparezca la intrusión marina, que hasta ahora entiendo no se ha activado por una condición geológica del borde costero).

5. BALANCE DE AGUA

El desarrollo de un plan estratégico de gestión hídrica en el valle de Azapa requiere de una herramienta de modelación integrada superficial-subterránea que permita simular el balance hídrico de la cuenca, con énfasis en el acuífero. Además, es indispensable evaluar la efectividad e implicancias de escenarios de gestión en la cuenca tanto en el balance superficial como subterráneo. Por tanto, en el presente capítulo se describirá brevemente las características principales de la modelación en la cuenca del río San José (las que se describen en detalle a lo largo del Anexo H), el cual permita evaluar los siguientes elementos, con base a los insumos y resultados del estudio DGA-DICTUC (2020):

- Un balance de agua considerando la situación actual (histórica).
- Proyecciones de cambio climático bajo distintos escenarios de emisiones.
- Brechas de agua para distintos usos de la cuenca.
- Criterios de sustentabilidad en el acuífero.
- Escenarios de gestión.

Como parte del presente estudio, se realizó una revisión del modelo disponible en la cuenca del río San José desarrollado por DGA-DICTUC (2020), con foco en evaluar la capacidad del modelo para cumplir con los cinco aspectos antes descritos. A partir de lo anterior, y luego de replicar los resultados obtenidos por dicho estudio (considerando los parámetros de modelación, la configuración, las reglas de operación y los resultados del modelo base), al final del presente capítulo se describen las principales brechas de la modelación, como aporte para futuras mejoras al modelo del acuífero del valle de Azapa. Por último, es preciso reiterar que lo expuesto en este capítulo se basa en gran medida en lo desarrollado en el estudio base DGA-DICTUC (2020).

5.1 MODELOS DE SIMULACIÓN

La cuenca del valle Azapa se ubica en la región de Arica y Parinacota, limitada en la zona oeste por el Océano Pacífico y en la zona oriente por las cuencas altiplánicas. El principal curso de agua de la cuenca corresponde al río San José, originado por la unión de los ríos Seco y Ticnamar, que reciben aportes de diferentes quebradas cordilleranas. Desde el año 1962, el río San José recibe alrededor de 600 L/s provenientes del trasvase del río Lauca, mientras que, en la zona baja, recibe aportes de las quebradas de las Llosyas y Achs con caudales medios de 49 L/s y 2 L/s respectivamente. De esta forma, el río San José drena alrededor de 1,05 m³/s en la zona de Ausipar.

De acuerdo con el modelo conceptual desarrollado por DGA-ICASS (2016) y presentado en la Figura 5-1, la cuenca se divide en una zona alta (subcuenca Azapa Alto), que recibe las mayores precipitaciones de la zona concentrada en los meses estivales (diciembre a febrero), y una zona baja, caracterizada por menores precipitaciones y donde se generan las mayores descargas del sistema por evapotranspiración del suelo y la vegetación asociada a las actividades agrícola e industrial de la cuenca.

La principal unidad hidrogeológica en las zonas de recargas (zona baja de la cuenca) corresponde a los materiales detríticos no consolidados o semi consolidados, que

conforman los depósitos aluviales y fluviales de edad Holocena y Pleistocena y a los depósitos litorales.

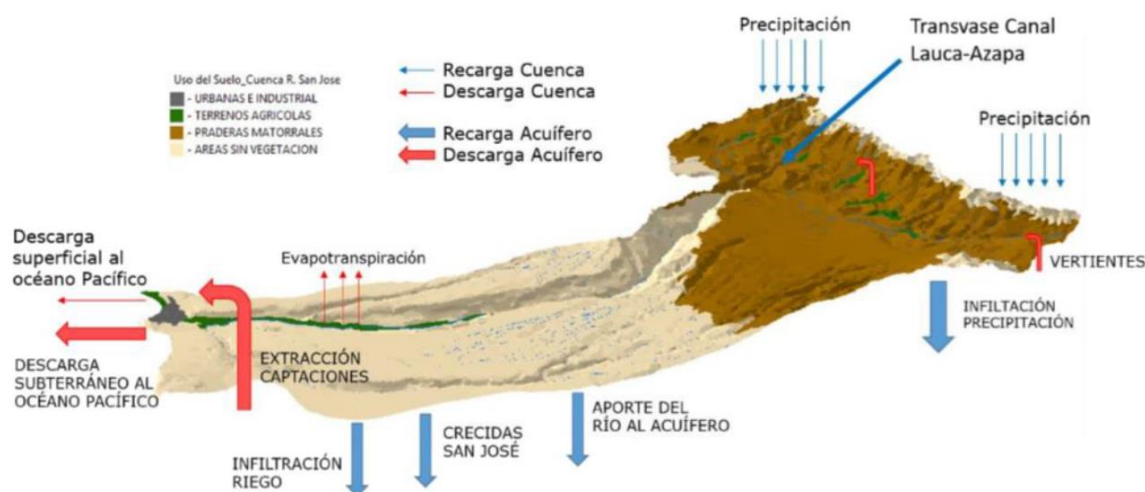


Figura 5-1. División zona baja y media denominada, Valle Azapa, zona alta denominada, Azapa Alto.

Fuente: DGA-ICASS (2016).

Las principales entradas de agua de la zona alta son las precipitaciones y el trasvase del canal Lauca. El promedio del caudal de entrada a través del Canal Lauca es de $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$, entre 1986 y 2018. A su vez, parte del total de la escorrentía superficial en la zona alta se evapora o sublima entregando una recarga promedio por infiltración al acuífero de $0,34 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mismo periodo de tiempo. Estos resultados fueron estimados en el modelo WEAP "Azapa Alto" elaborado por DGA-DICTUC (2020). A su vez, en la zona baja las principales recargas se originan por el caudal drenado hacia el río San José, las pérdidas desde canales sin revestimiento, desde las zonas de riego y posibles infiltraciones desde alcantarillados o sistemas de distribución de agua potable. Mientras que las principales salidas superficiales del sistema se conforman por la toma del canal de Azapa en Ausipar, la evapotranspiración y la salida al mar, y las salidas subterráneas corresponden a las extracciones desde norias y pozos (800 L/s) más afloramientos de vertientes desde el acuífero.

El presente estudio (PEGH del acuífero del valle de Azapa) se basa y toma los resultados de las simulaciones (con datos calibrados y validados) del modelo de balance hídrico desarrollado en el estudio DGA-DICTUC (2020), que corresponde a un modelo acoplado superficial-subterráneo desarrollados en las plataformas WEAP⁶ y MODFLOW⁷, según el

⁶ WEAP es una herramienta que facilita la planificación de recursos hídricos a través de un balance entre oferta y demanda, donde iguala el flujo de agua superficial, subterráneo y almacenado. Para ello, define distintos usos de suelo en una cuenca, como también, la eficiencia hídrica, reutilización de aguas, demandas requeridas y asignaciones en base a la oferta, permitiendo finalmente evaluar alternativas de desarrollo y de gestión de aguas (SEI, 2022).

⁷ MODFLOW es un modelo tridimensional de aguas subterráneas de diferencia finita creado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Este modelo posibilita simular el flujo del agua subterránea completamente distribuida, por medio de grillas, lo que en mayor detalle permite conocer la evolución de los niveles en sectores de bombeo, afloramientos a la superficie e infiltración de las precipitaciones. Este modelo

objetivo específico 7 del presente estudio). Así, para adaptar y complementar el estudio DGA-DICTUC (2020) a la estructura de un Plan Estratégico, se replicaron los resultados de modelación para estimar el balance y brechas hídricas (sección 5.1.3, 5.1.4, 5.2) actuales y proyectadas, se describió en detalle la metodología utilizada por DGA-DICTUC (2020) para la construcción del modelo de modo de facilitar su uso futuro (Anexo H), se complementó el análisis de sustentabilidad del acuífero (sección 5.4) y se agregaron, unieron y complementaron escenarios de gestión (sección 5.3). Cabe destacar que no se hicieron modificaciones de fondo de la modelación con respecto al modelo base de DGA-DICTUC (2020), no obstante, se realizó un análisis del modelo acoplado para sugerir mejoras futuras a ser abordadas en un estudio de modelación de mayor profundidad (sección 5.5).

5.1.1 Descripción del modelo elaborado

La simulación de los flujos del río San José se desarrolló mediante el acople de un modelo superficial y un modelo subterráneo, usando como base el estudio DGA-DICTUC (2020), el que utilizó las plataformas *Water Evaluation And Planning* (WEAP) y MODFLOW, respectivamente (Figura 5-2). El periodo histórico del modelo comprende desde octubre de 1985 a septiembre de 2018, mientras que el periodo futuro es de octubre de 2019 a septiembre de 2050.

basado en la simulación de procesos físicos ha sido ampliamente utilizado para la gestión del recurso subterráneo (USGS, 2022).

MODELOS DE SIMULACIÓN

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL / NUMÉRICO

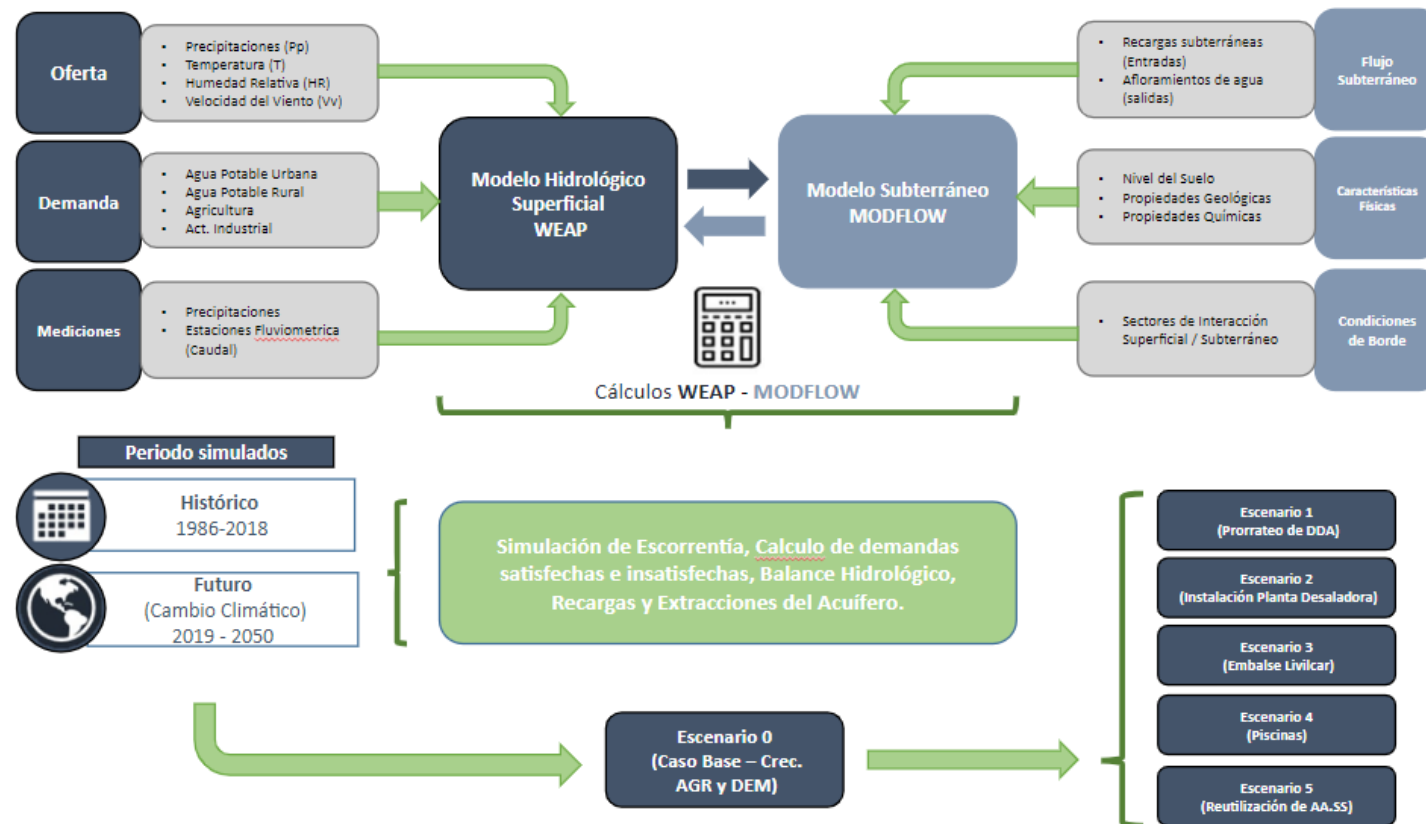


Figura 5-2: Esquema General de modelación integral WEAP - MODFLOW en acuífero del valle de Azapa y cuenca asociada en el trabajo de DGA-DICTUC (2020).

Fuente: Elaboración propia (2022).

Debido a las diferencias climatológicas de la cuenca, DGA-DICTUC (2020) generó dos modelos que caracterizan los flujos superficiales: 1) "Azapa Alto", en adelante denominado "WEAP Azapa Alto", que corresponde a los ríos Ticnamar y Seco caracterizados por lluvias estivales intensas asociadas a un clima altiplánico y que posee una escala temporal diaria, 2) "valle de Azapa", denominado "WEAP valle de Azapa", que contempla la zona media y baja del río San José (subcuenca del río San José), caracterizado por un clima desértico con estación árida prolongada, simulado a una escala temporal mensual.

Sin embargo, dada la importancia por el uso de las aguas subterráneas en la zona del valle de Azapa, para esta zona se calibró un modelo integrado o acoplado entre WEAP valle de Azapa y MODFLOW, siendo este último un modelo de aguas subterráneas especializado. La Figura 5-3 muestra las zonas que abarcan cada modelo en WEAP y el sector acoplado con el acuífero del valle de Azapa en la subcuenca del río San José.

De esta forma, primero el modelo WEAP Azapa Alto simula los flujos de la parte alta de la cuenca que forman parte del input al modelo WEAP-MODFLOW del valle de Azapa. En el modelo WEAP Azapa Alto se consideró una discretización de 23 subcuencas o unidades de respuesta hidrológicas (HRU), a partir de las estaciones fluviométricas de los dos principales cursos de agua (río Seco y río Ticnamar) y la división por bandas de elevación (cada 500 m).

El modelo considera la operación de la Central Hidroeléctrica Chapiquiña que recibe un flujo externo del río Lauca por medio del Canal Lauca en la Quebrada de Luco, y que drena hacia el río San José por el río Seco. Por otra parte, las principales demandas de agua contempladas corresponden a consumos del sistema de potable rural (APR) y de riego agrícola de pequeñas localidades que, ubicadas en la zona alta de la cuenca, las cuales utilizan el recurso hídrico superficial.

En el caso del modelo WEAP Valle Azapa, se discretiza la cuenca considerando 51 HRU basadas en las estaciones fluviométricas de la zona, las principales quebradas y cursos de agua (Río San José, Quebrada Del Diablo, Quebrada de Llosyas y Quebrada de Acha), las bandas de elevación (cada 1500 m), la zona activa del acuífero y sus zonas de riego. Las demandas de agua consisten en agricultura, agua potable urbana, agua potable rural y uso industrial.

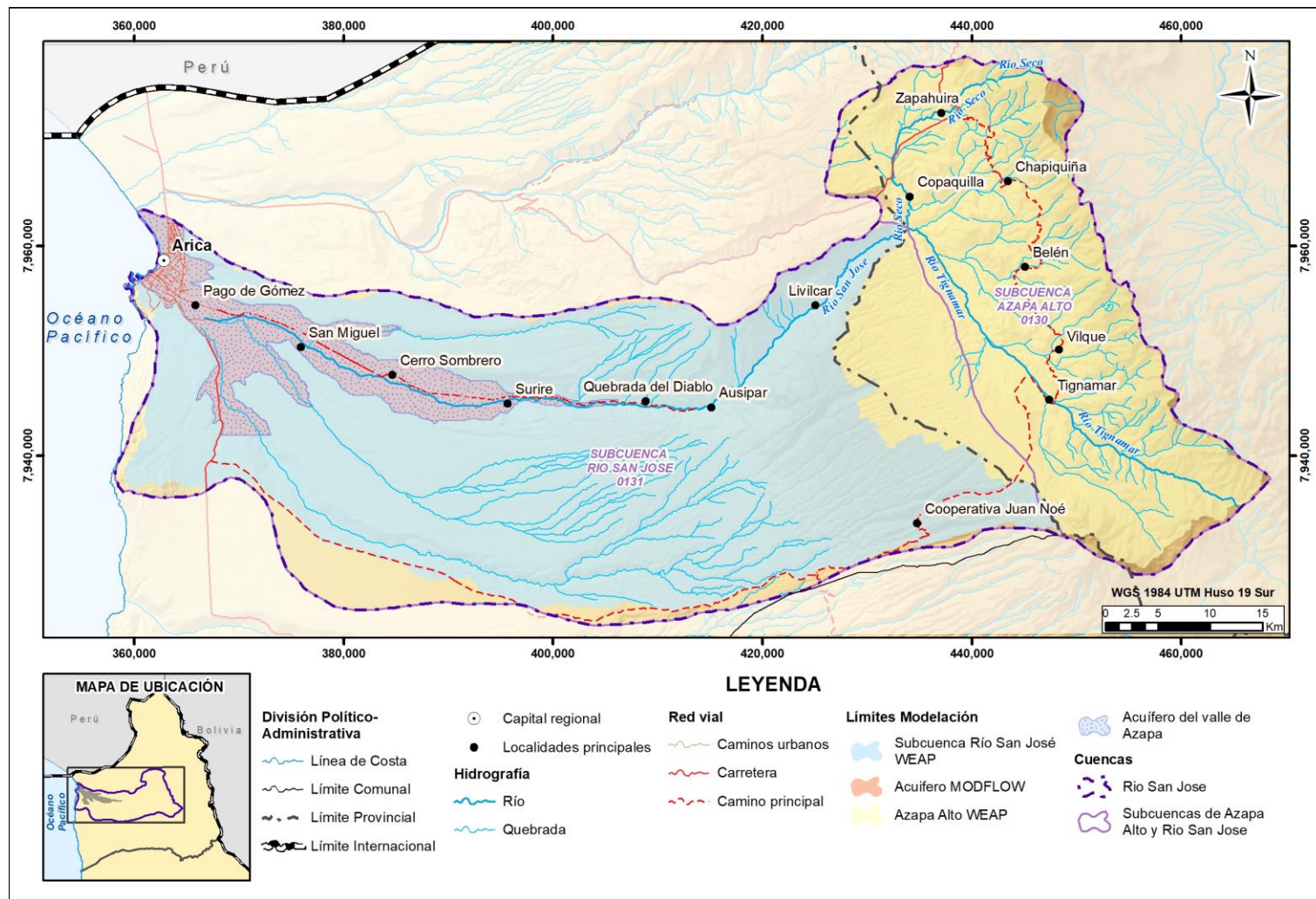


Figura 5-3. División zona baja y media denominada, Valle Azapa, zona alta denominada, Azapa Alto, según DGA-DICTUC (2020).

Fuente: Elaboración propia (2022).

Los modelos en WEAP requieren de información meteorológica para la simulación de escorrentía superficial y subterránea. Principalmente la información utilizada corresponde a series de Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del viento y Fracción de nubosidad a escala mensual. Los datos climáticos provienen del producto grillado desarrollado por el Centro de Ciencias del Clima y Resiliencia (CR2), ajustado a los valores puntuales (detalle en el anexo H sección 1.7) registrados en las estaciones meteorológicas disponibles, presentadas en la Figura 2-16 y Figura 2-17 del capítulo 2.4.1 Caracterización climática.

El modelo subterráneo del estudio realizado por DGA-DICTUC (2020), ubicado en la subcuenca del río San José, utilizó el programa *GroundWater Vistas* versión 7.17 Build 15 (MODFLOW), representando al acuífero del valle de Azapa o zona activa (Figura 2-2) mediante una discretización variable: más gruesa en la zona de menor intervención antrópica (100 m de Norte-Sur y 200 m de Este – Oeste), y una más fina en las zonas de actividad agrícola (100 m Norte – Sur y 100 m Este - Oeste).

El acuífero simulado en el modelo considera como caracterización la conductividad hidráulica, las condiciones de almacenamiento y rendimiento específico del acuífero, las que permiten a la vez simular la interacción río-acuífero.

Dada la configuración acoplada del modelo, la calibración del modelo acoplado WEAP valle Azapa se realiza considerando la evaluación de la simulación de los flujos superficiales y de los niveles del acuífero. Mientras que en el caso del modelo superficial WEAP Azapa Alto, la calibración sólo considera evaluación de los caudales observados versus simulados.

Para el caso de la subcuenca Azapa Alto, la calibración se realizó a partir de los caudales observados en las estaciones fluviométricas de Ticnamar en Ticnamar y Ticnamar en Angostura, cuyos resultados posteriores comparados a los caudales simulados se presentan en la Figura 5-4 y Figura 5-5. Los resultados indican que en la subcuenca de Ticnamar en Ticnamar el modelo tiende a sobreestimar los caudales observados (460%), mientras que en Ticnamar en Angostura se subestiman (16%).

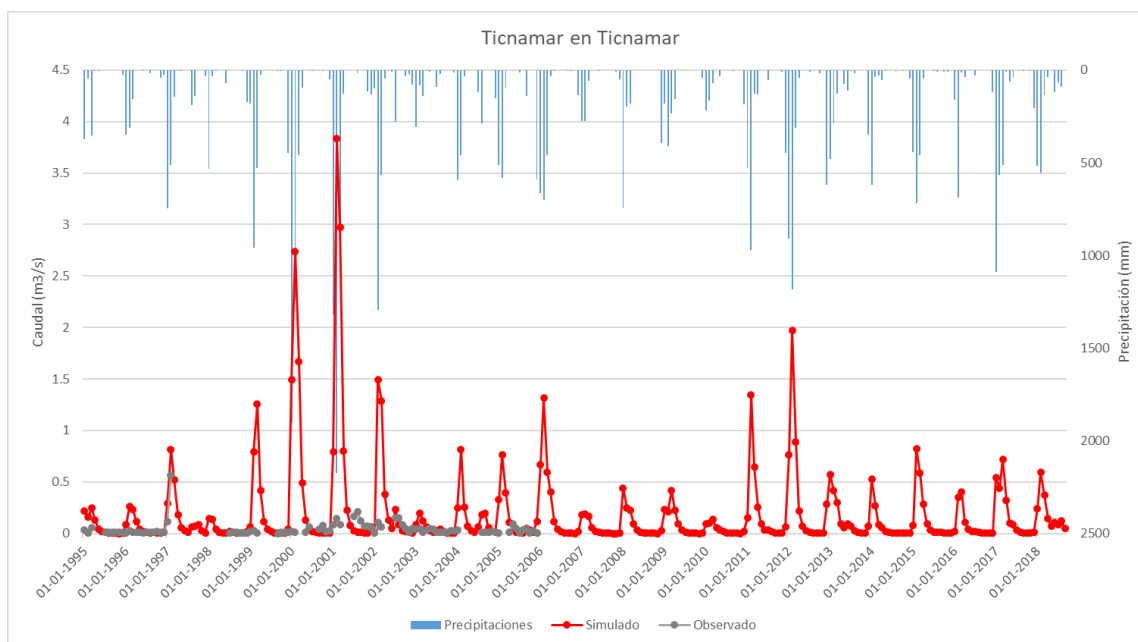


Figura 5-4. Caudal Simulado versus Caudal Observado en EF Ticnamar en Ticnamar.

Fuente: Elaboración propia (2022).

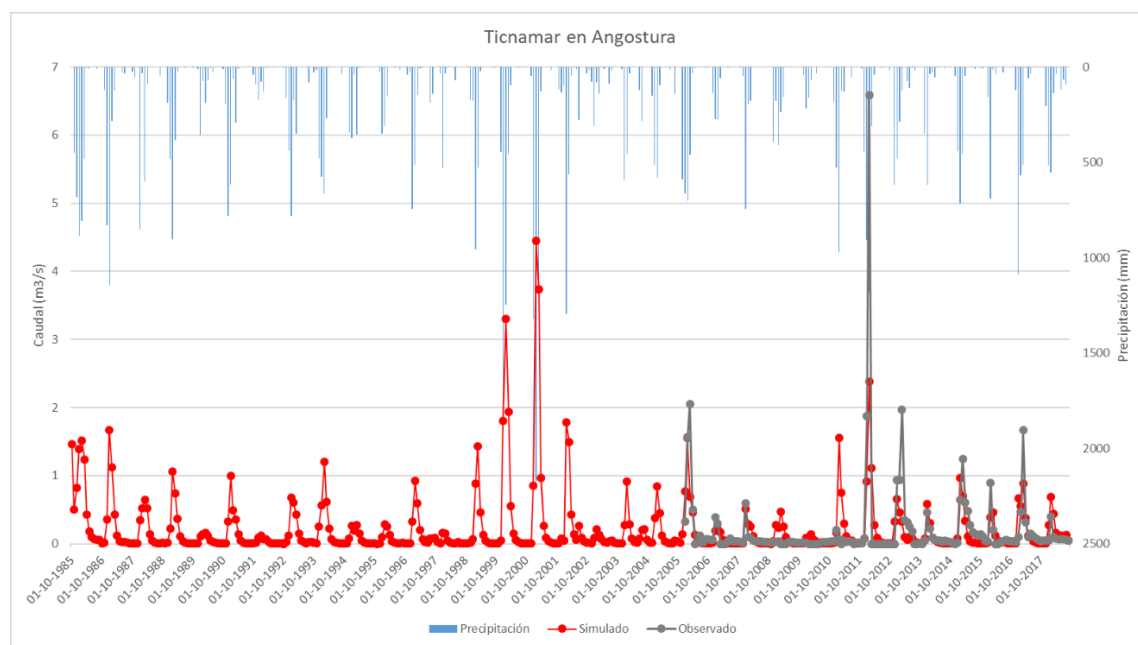


Figura 5-5. Caudal Simulado versus Caudal Observado en EF Ticnamar en Angostura.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Para evaluar los resultados simulados de los datos observados a nivel superficial, se utilizaron dos índices de ajustes: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e Índice de Kling-Gupta (KGE). Ambos evalúan la representatividad que poseen los datos simulados con

la variación de los datos observados, siendo uno de los criterios más usados en modelos hidrológicos (Coy Murcia, 2017) (Cabrera Oradines, 2021). La fórmula de ambos coeficientes se detalla en Anexo H, acápite 5.4.2.

Los resultados para el modelo superficial Azapa Alto se muestran en la Tabla 5-1, donde los índices de ajuste Nash-Sutcliffe (NSE) y Kling-Gupta (KGE) reflejan un bajo ajuste. La razón principal de lo anterior se debe a la falta de datos observados en la estación fluviométrica de Ticnamar en Ticnamar, ya que esta no posee un registro de caudales en meses del periodo estival y también por el corto periodo de registro de datos desde 1992 a 2005 (ver subcapítulo 5.5).

Tabla 5-1. Indicadores de ajuste para la calibración del modelo superficial WEAP Azapa Alto.

Estación Fluviométrica	NSE (Nash-Sutcliff)	KGE (Kling-Gupta)
Ticnamar en Ticnamar	-134,1	-20,57
Ticnamar en Angostura	-0,82	-0,9

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el caso de la subcuenca del río San José, el modelo acoplado WEAP valle de Azapa, la calibración superficial se realizó a partir de los caudales observados en la estación fluviométrica Azapa en Ausipar, cuyos resultados se muestran en la Figura 5-6, existiendo en la simulación de los datos una sobrestimación de los resultados versus los observados (11%). Asimismo, la Tabla 5-2 presenta los índices de ajuste del modelo, los cuales presentan un mejor ajuste a los datos observados.

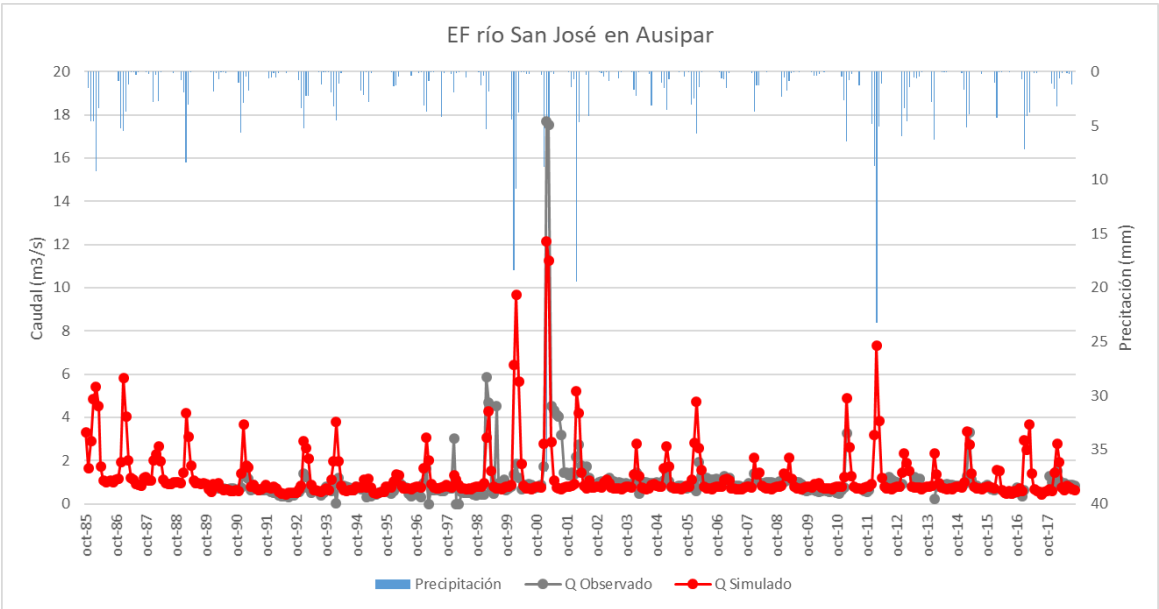


Figura 5-6. Caudal Simulado versus Caudal Observado en EF Río San José en Ausipar.

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Tabla 5-2. Indicadores de ajuste para la calibración del modelo acoplado WEAP valle de Azapa, sector superficial.

Estación Fluviométrica	NSE (Nash-Sutcliff)	KGE (Kling-Gupta)
Azapa en Ausipar	0,06	0,3

Fuente: Elaboración Propia (2022)

Por otro lado, a nivel subterráneo, el modelo acoplado WEAP valle de Azapa se calibró por medio de las estaciones de información relacionadas a los niveles freáticos, considerando 18 pozos de observación de la Dirección General de Aguas (DGA). Los índices de ajustes se presentan en la Tabla 5-3 y Figura 5-7, mientras que los resultados de niveles estáticos de pozos simulados versus observados se muestran en la Figura 5-11.

Tabla 5-3. Indicadores de ajuste de la calibración del modelo acoplado WEAP valle de Azapa, sector subterráneo.

Parámetros	Calibración (1986-2018)
Número de pozos	18
Error medio absoluto (MAE) (metros)	10,37
Raíz del error cuadrático medio (RMSE) (metros)	0,995

Fuente: Elaboración Propia (2022).

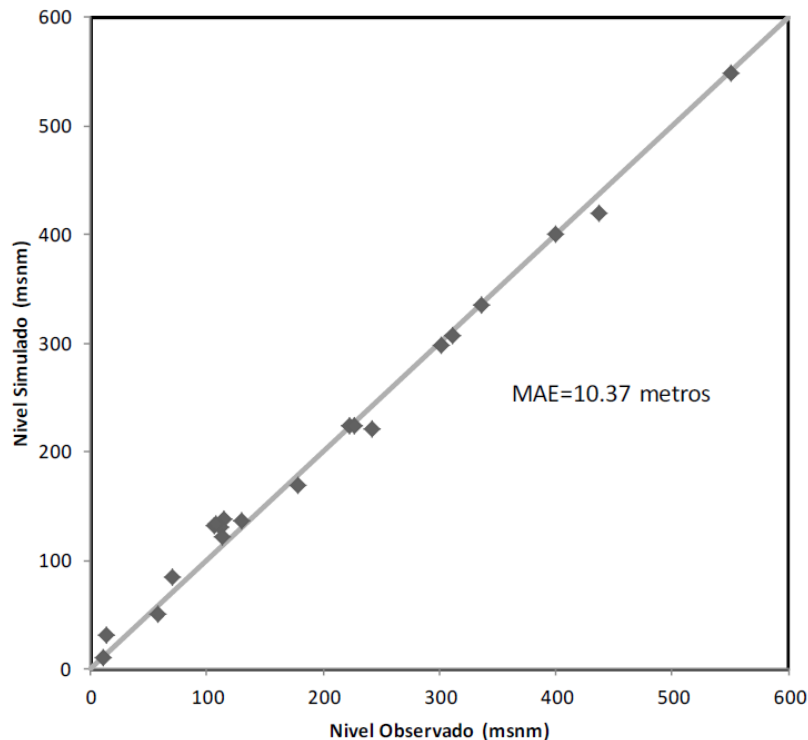


Figura 5-7. Análisis estadístico de los niveles de pozos de observación.

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

De los resultados relacionados a los niveles de pozos observados (Figura 5-8; Figura 5-9; Figura 5-10; Figura 5-11) se puede observar que existe un buen comportamiento en general por parte de los valores simulados en el modelo acoplado. Los pozos ubicados en la zona urbana (Figura 5-8) muestran que los valores simulados presentan un buen ajuste a los valores observados donde se mantiene una profundidad de los pozos en torno a los 5 metros en la zona más cercana a la costa y de 20 metros en sector céntricos de la ciudad de Arica.

A los inicios del valle de Azapa, en el sector de Pago de Gómez y Cerro Sombrero (Figura 5-9) las profundidades de los pozos simulados se encuentran sobreestimados en relación con los datos observados, pero logran mantener la misma tendencia. Los valores observados muestran que existe una profundidad en torno a los 30 metros a inicios del periodo histórico hasta llegar a superar los 40 metros a fines de este mismo periodo. Mientras que los datos simulados oscilan entre los 2 a 20 metros de profundidad donde luego de una crecida el año 2001 comienzan a disminuir hasta alcanzar los 38 metros de profundidad.

Además, es importante evidenciar que los niveles simulados de los pozos ubicados en esta zona poseen una sobrestimación por parte del modelo acoplado, por tanto, es necesario mejorar el comportamiento de aquella área con mayor número de datos observados. Además, se observa el comportamiento simulado de un del pozo las Animas que registra niveles muy profundos comparados a los datos observados, generando una diferencia de 60 metros en los meses donde existen datos observados, lo que representa una brecha de modelación para el futuro.

Luego, en el sector de Albarracín y San Miguel de Azapa (Figura 5-10) se genera una sobrestimación del nivel de los pozos del museo Juan Noé y la escuela pública G9, mientras que hay una subestimación en los pozos del sector de las Maitas, pero mantienen el mismo comportamiento de los datos observados. Algo que es importante destacar es el registro de los niveles del pozo Las Maitas con Las Violetas ya que existen variaciones muy abruptas en algunos periodos de tiempo existiendo diferencias de profundidad en torno a los 55 metros entre 1993 y 1998.

Por último, los pozos ubicados en el sector de Cerro Moreno hasta Sobraya (Figura 5-11) mantienen un buen comportamiento entre los valores simulados y observados, salvo el pozo de la escuela Chitita n°28 donde existe una sobrestimación en los valores simulados cuya diferencia promedio es de 10 metros. También es importante mencionar que el pozo con mayor fluctuación de los valores simulados es el pozo de Cabuza 1ª que posee pocos datos observados y genera que exista una disminución importante en los valores simulados a finales del periodo histórico.

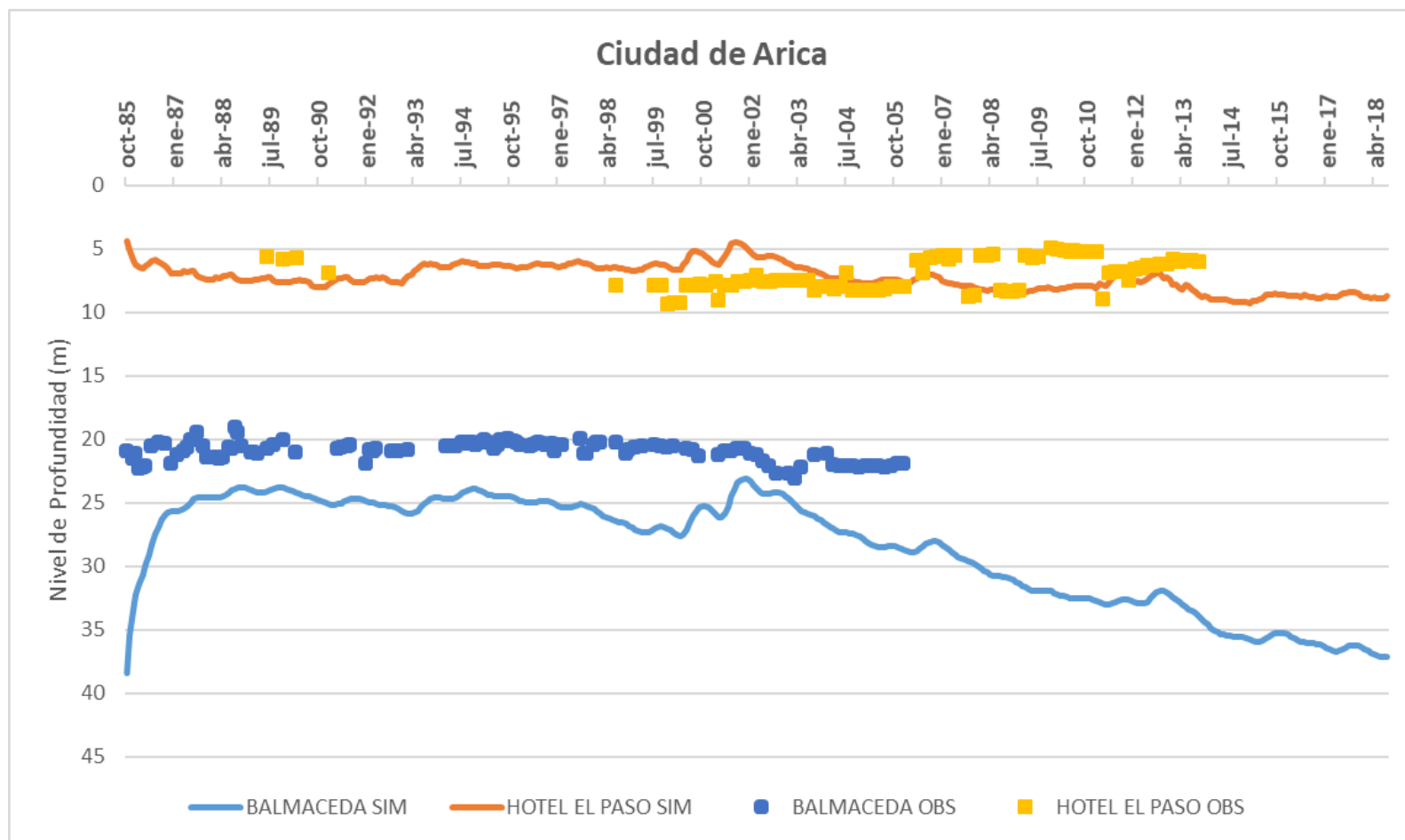


Figura 5-8. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en la ciudad de Arica.

Fuente: Elaboración propia (2022).



163

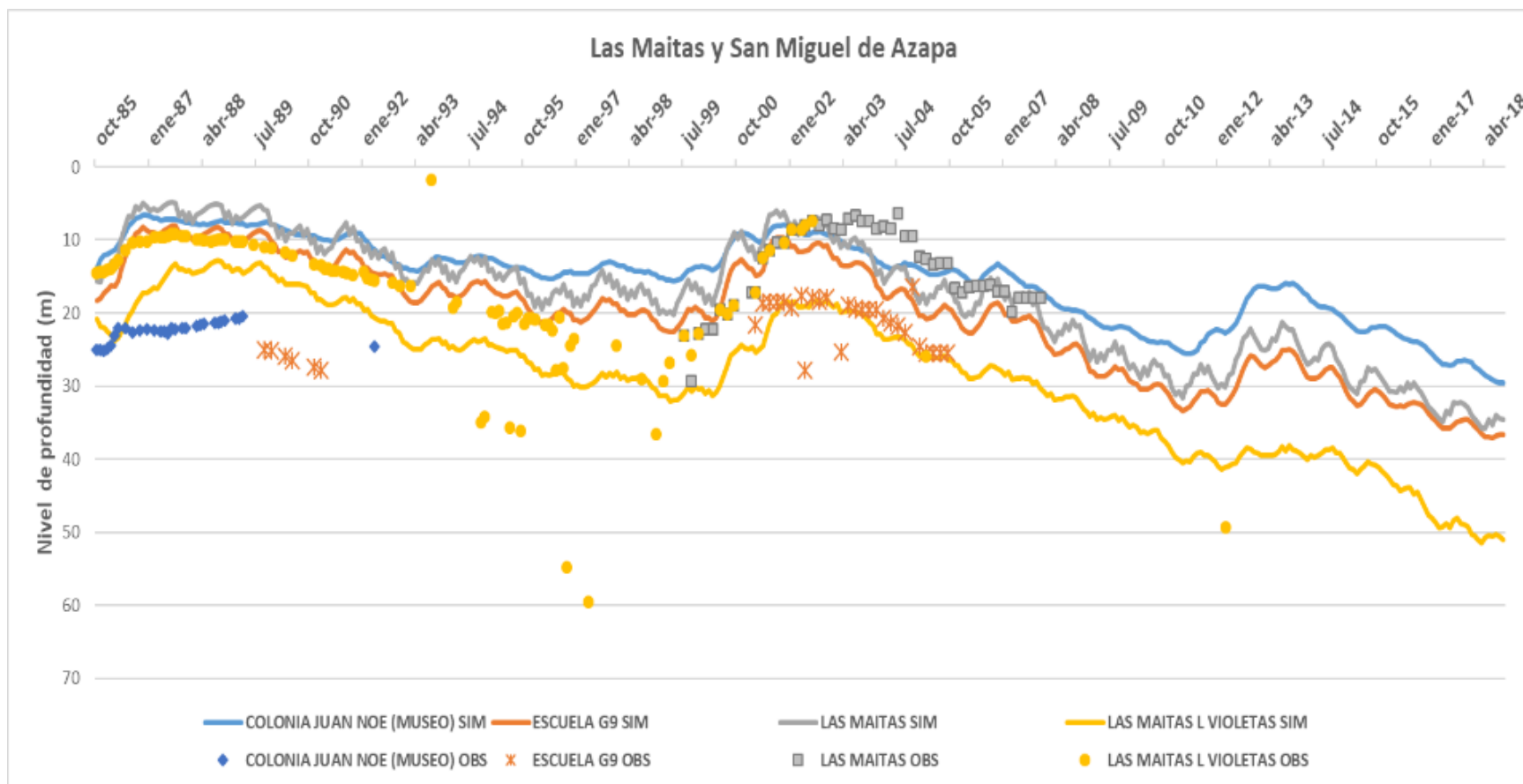


Figura 5-10. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en los sectores de Las Maitas y San Miguel de Azapa.

Fuente: Elaboración propia (2022).

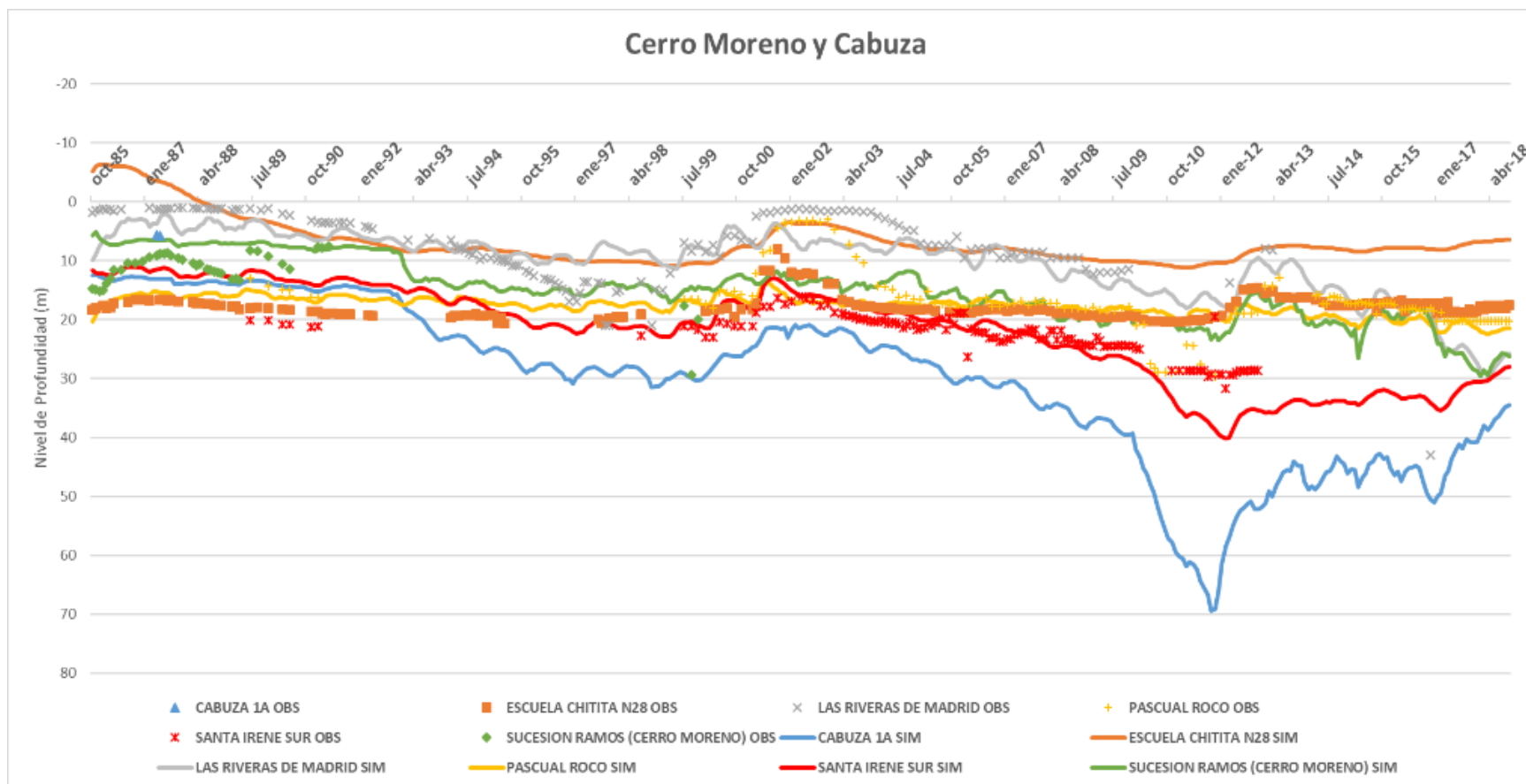


Figura 5-11. Valores observados versus simulados para dos estaciones de monitoreo de pozos en los sectores de Cerro Moreno y Cabuza.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.1.2 Escenarios de cambio climático

Las simulaciones del balance superficial y subterráneo se realizaron corriendo los modelos calibrados (WEAP y MODFLOW), con forzantes climáticas representativas del clima futuro (2019-2050), obtenidas desde modelos generales climáticos (GCM).

Para el presente estudio, el clima futuro (precipitaciones y temperaturas) se obtuvo mediante el método *Delta Change*, que ajusta las series de las forzantes meteorológicas del periodo histórico (1986-2018) por una tasa de variación, generalmente negativa para las precipitaciones y positiva para las temperaturas. Este método se recomienda generalmente por la literatura para este tipo de climas, caracterizados por tener muchos datos de precipitación 0 a lo largo de la serie histórica, lo que impide ajustar una distribución de probabilidad estadística para la proyección futura. Las tasas de variación se obtienen a partir del ensamble de 19 GCMs utilizados en el estudio MMA (2016) considerados bajo un escenario pesimista o de alta carga de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5). Es importante mencionar que el ajuste de las precipitaciones futuras se genera a partir del producto de las series históricas por la tasa de variación, mientras que a la serie de temperaturas se aplica una adición a los valores históricos.

Debido a que los datos del MMA (2016) son a escala comunal, se obtuvo la tasa de cambio de precipitación y temperatura en las comunas de Putre y Arica, dado que la delimitación de los modelos WEAP Azapa Alto y WEAP valle de Azapa predominan respectivamente a cada comuna.

La Tabla 2-5, de la sección 2.4.3, muestra las tasas de cambio anual al año 2050 de la precipitación y temperatura del estudio del MMA (2016), mientras que la Figura 2-19 y Figura 2-20 (de la sección 2.4.2.2) muestran la variación de Precipitación y Temperatura para el modelo WEAP Azapa Alto y WEAP valle de Azapa, respectivamente.

El detalle de la variación a nivel mensual de las precipitaciones de Azapa Alto y valle de Azapa se muestran en la Figura 5-12 y Figura 5-13 respectivamente. En las precipitaciones, de acuerdo con las estimaciones, se observa que la zona alta de la cuenca presentaría dos *peak* importantes durante los primeros tres años de la década del 2000 y en el futuro en la década de 2030, alcanzando magnitudes en torno a los 92 mm en febrero de 2001 y 86 mm en febrero de 2034.

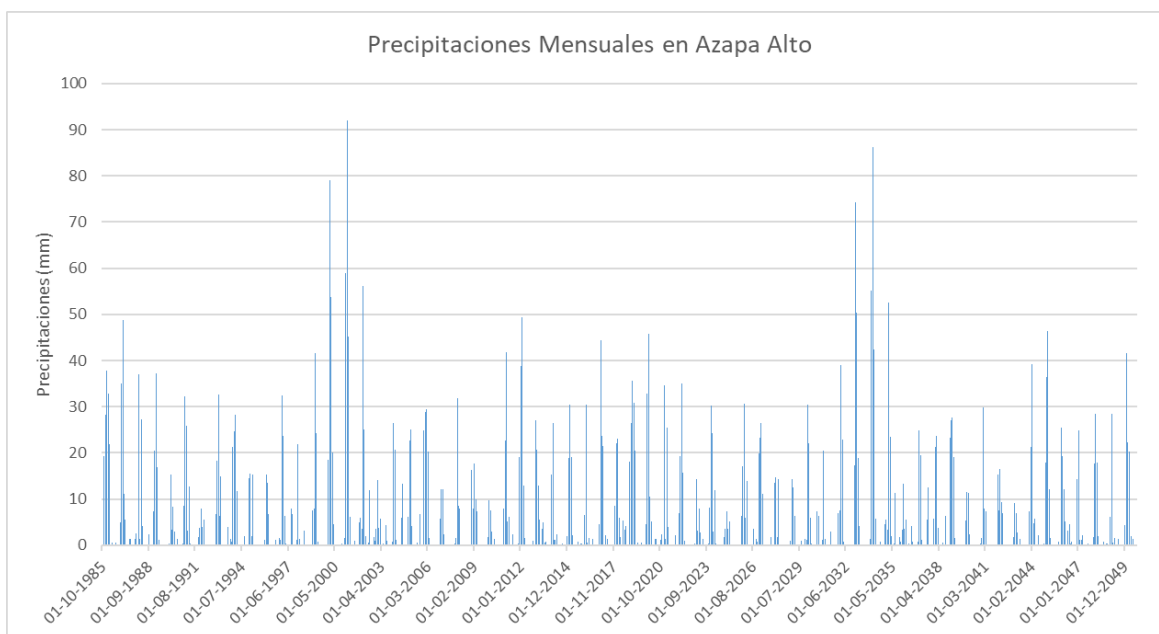


Figura 5-12. Precipitación histórica y futura en Azapa Alto simulada en WEAP.

Fuente: Elaboración Propia (2022).

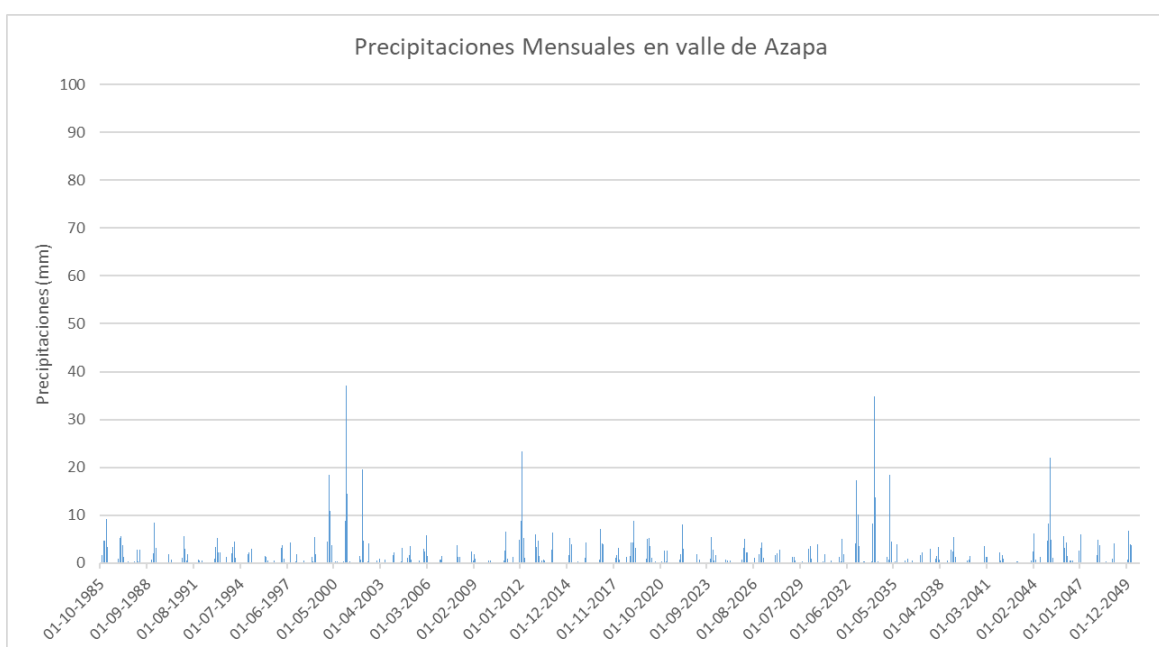


Figura 5-13. Precipitación histórica y futura en valle Azapa simulada en WEAP.

Fuente: Elaboración Propia (2022).

5.1.3 Balance de agua. Situación histórica (1986-2018)

El balance hídrico de la cuenca considera la estructura de modelación descrita sección 5.1.1 del presente capítulo, dividiendo la cuenca en la subcuenca Azapa Alto y subcuenca río San José. Dado que el modelo superficial de la subcuenca Azapa Alto tuvo el objetivo

de representar la escorrentía superficial y subterránea que constituye un flujo de entrada a la subcuenca del río San José, los resultados no son presentados en esta sección (ver Anexo H sección 2).

Por otra parte, el balance hidrológico se centró en el sector del acuífero del valle de Azapa y fue calculado a partir del modelo acoplado WEAP – MODFLOW. Lo anterior se debe por dos razones: 1) las principales demandas requieren extracción de agua subterránea, dependiendo del volumen del acuífero, debido a los limitados caudales superficiales que escurren por el río San José y 2) el área de estudio a nivel superficial representa una zona con escasas y nulas precipitaciones, con escasa vegetación y también bajos niveles de escorrentías desde los cursos principales de agua. Por lo tanto, el área de estudio definido es la zona activa del acuífero del valle de Azapa y su interacción con la subcuenca del río San José.

El balance del periodo histórico simulado en el modelo acoplado WEAP MODFLOW del acuífero del valle de Azapa se muestra en la Tabla 5-4. De ahí se identifican las principales Entradas y Salidas de agua que presenta el acuífero y la diferencia de almacenamiento promedio registrada durante el periodo histórico (1986-2018). También es importante mencionar que el Error en el Balance es 0%, dado que las entradas menos las salidas más la diferencia de almacenamiento resultan en cero, no existiendo errores en alguno de los distintos elementos del balance desde esta forma de estimación.

Tabla 5-4. Balance Hidrogeológico del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Histórico (1986-2018).

Entradas L/s	Histórico
Recarga desde Río San José (River)	16,9
Infiltración Subcuenca (SC) río San José	314,7
Recarga Lateral	189,5
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9
Entrada desde el Mar	19,8
Total	1.050,9
Salidas L/s	Histórico
Afloramientos	276,7
Bombeos	840,2
Salida al mar	82,4
Total	1.199,3
ΔAlmacenamiento	-148,4
Error balance	0,0%

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Es posible de observar que el acuífero del valle de Azapa se recargaría principalmente por medio de la infiltración proveniente de la actividad agrícola (509 l/s). Lo anterior se debe a la extensa superficie con actividad agrícola que se encuentra sobre el acuífero principal del valle de Azapa la cual genera pérdidas por la baja eficiencia del canal principal y canales secundarios, y las pérdidas provocadas en los sistemas de riego que transportan agua subterránea que se ha bombeado.

Otro factor de recarga de agua al acuífero sería la infiltración de una parte de las precipitaciones en la zona sin vegetación y las laderas de la subcuenca del río San José las cuales recargan alrededor de 315 l/s y 190 l/s respectivamente, debido a las escasas lluvias que existen en la zona. Además, se registra la presencia de una recarga al acuífero proveniente del mar, correspondiente a 19,8 l/s, la cual podría generar un deterioro a la calidad de las aguas en el acuífero, que son utilizadas principalmente para el consumo humano y la actividad agrícola.

Por el lado de las salidas, se observa que la extracción subterránea, a través del bombeo de aguas, es la principal salida que provoca una disminución del volumen total de agua en el acuífero, registrando un caudal de 840 l/s. En segundo y tercer lugar está la presencia de sectores del acuífero que generan afloramientos de agua hacia la superficie, que son provocadas cuando existen importantes precipitaciones que provocan crecidas, y también existe un flujo de 82 l/s de caudal del acuífero que sale al Océano Pacífico a nivel subterráneo.

Al realizar el balance entre entradas y salidas de agua que posee el acuífero del valle de Azapa, se observa que existe una variación negativa en el balance hidrológico con una disminución de 148 l/s promedio anual. Esto ha mostrado que el nivel piezométrico y por lo tanto el volumen del acuífero estaría disminuyendo (Figura 5-14), lo que además estaría generado una entrada de agua salobre desde el mar al interior del acuífero.

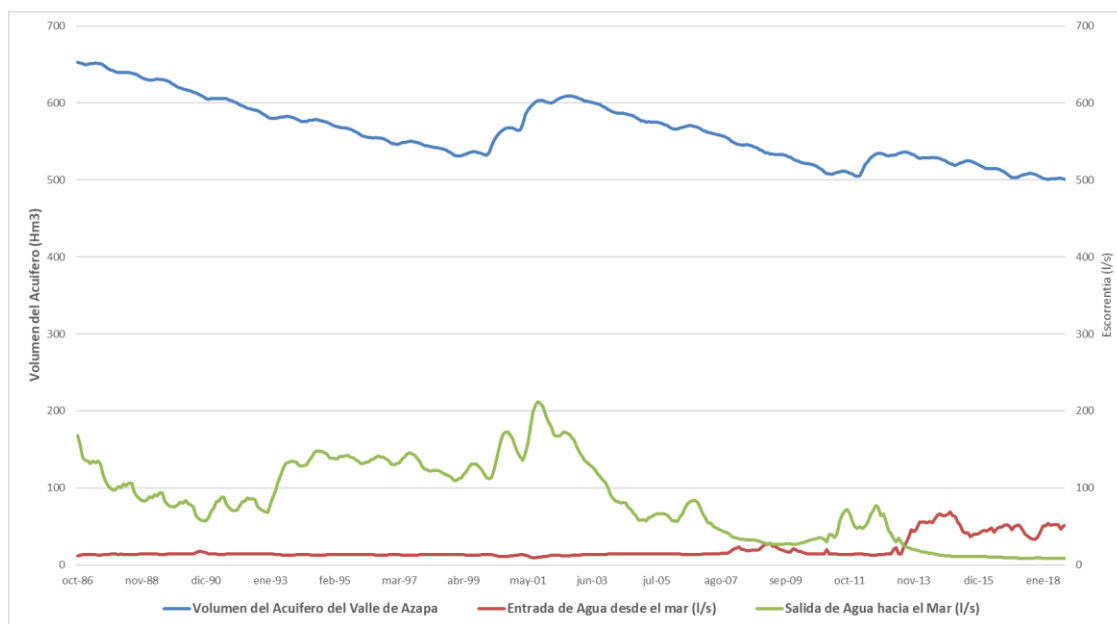


Figura 5-14. Variación del nivel del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Histórico (1986-2018).

Fuente: Elaboración Propia (2022).

5.1.4 Balance de Agua. Situación Proyectada

Las distintas tomas de acción que actualmente se discuten en la subcuenca del río San José frente a la sobreexplotación que posee el acuífero del valle de Azapa, generó que el presente plan considere distintas variaciones futuras del escenario base (E0) frente a diferentes preocupaciones por parte de los actores recogidas en diversas reuniones que se han llevado a cabo durante el proceso. El presente acápite consideró importante

mostrar y replicar los resultados del balance hidrogeológico obtenido por el modelo diseñado por DGA-DICTUC (2020) a través del E0. Posteriormente, en base al primer escenario base E0 (con Cambio Climático, aumento de la eficiencia de riego y entubación del Canal de Azapa), se consideró necesario, como ejercicio, realizar dos variaciones. La primera estuvo guiada por conocer el balance hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa si es que el aporte del río Lauca disminuye su caudal en un 50% a futuro. La segunda, fue realizada para estimar el balance del acuífero en una situación donde no se utilice el entubamiento del Canal de Azapa por algún desacuerdo social. Una mayor descripción del Escenario Base y sus variaciones se muestra a continuación.

5.1.4.1 Escenario Base (E0) con Cambio Climático, aumento de la eficiencia de riego y entubación del Canal de Azapa

El escenario futuro base simuló el balance del acuífero del valle de Azapa considerando la proyección futura de las forzantes climáticas al año 2050 (precipitación y temperatura), bajo un escenario pesimista de cambio climático (RCP 8.5), el crecimiento de la demanda de agua para los principales sectores del área de estudio (Agricultura, Agua Potable Rural, Agua Potable Urbana y Uso Industrial) obtenidos de estudios anteriores de DGA-Hídrica-Aquaterra (2017) e INE (2017), mejoras en la eficiencia de riego, proyectadas por DGA-DICTUC (2020) en base a INE (1997,2007) y AGRIMED (2019) (Anexo H acápite 6.1.2) y una disminución en la infiltración de agua desde el Canal de Azapa producto de la obra de entubamiento que se construyó en la zona, la cual está a la espera de ser recepcionada por la Comunidad de Aguas del Canal de Azapa (COMCA) según lo comunicado por la propia organización. La proyección a futuro del balance hidrogeológico para el acuífero del valle de Azapa sin la toma de medidas de gestión e instalación de infraestructuras de obras mayores se muestra en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Balance Hidrogeológico del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro (2020-2050).

Entradas L/s	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José (River)	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	70,5	292,0	148,0	170,2
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	582,3	572,6	582,9	579,3
Entrada desde el Mar	19,8	90,8	162,9	217,1	156,9
Total	1.050,9	1.014,9	1.408,3	1.163,7	1.195,6
Salidas L/s	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	164,2	313,8	208,6	228,9
Bombeos	840,2	1.039,2	966,8	999,8	1.002,0
Salida al mar	82,4	3,0	0,1	0,0	1,0
Total	1.199,3	1.206,5	1.280,8	1.208,4	1.231,9
ΔAlmacenamiento	-148,4	-191,5	127,5	-44,7	-36,3
Error balance	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0

Fuente: Elaboración Propia (2022).

En base a los resultados del balance, es posible observar que existiría un delta promedio de almacenamiento menor durante el periodo futuro respecto al promedio histórico, lo que se puede concluir como positivo, no obstante, es necesario conocer el volumen de agua almacenada para determinar si efectivamente el acuífero ha logrado un nivel de recuperación o sólo la brecha entre entrada y salida es la que disminuye.

El primero responde a una mayor recarga en la subcuenca producto de una estimación al aumento de las precipitaciones (estimación sujeta a la incertidumbre propia de las proyecciones climáticas) lo que genera una mayor recarga desde sectores como el río, laderas y zonas sin vegetación de la subcuenca, pero que disminuye nuevamente durante el periodo 2040-2050.

El segundo motivo, sería el aumento de intrusión marina en el acuífero del valle de Azapa. Este fenómeno, según las estimaciones del modelo, aumenta significativamente a futuro, en torno a un 792% con respecto al promedio del periodo histórico. Por lo tanto, el escenario futuro sin una toma de acción urgente ante la sobreexplotación del acuífero proyecta efectos costosos a los distintos usuarios (revisar acápite 4.2.4.2).

Asimismo, la Figura 5-15 muestra la variación del volumen del acuífero a futuro en el cual existiría una disminución aún mayor durante la siguiente década. Luego, debido al potencial aumento de las precipitaciones, que se estimaron previamente, ocurriría una recarga en el acuífero, la cual frenaría la constante disminución del volumen del acuífero, pero que no lograría alcanzar niveles observados durante la primera década del periodo histórico.

Lo anterior es provocado por el incremento de la demanda para satisfacer el consumo humano y por la acción agrícola producto del aumento de la actividad misma en el valle de Azapa. Esto se puede observar en el balance del escenario futuro base donde la principal entrada de recarga al acuífero es aproximadamente la mitad de su principal salida (bombeo).

Por último, como se mencionó anteriormente, las entradas de agua de mar aumentarían significativamente, debido al descenso del volumen total del acuífero, lo que provocaría problemas graves de calidad de agua subterránea y por ende la potencial inutilización de esta para distintas demandas presentes y futuras.

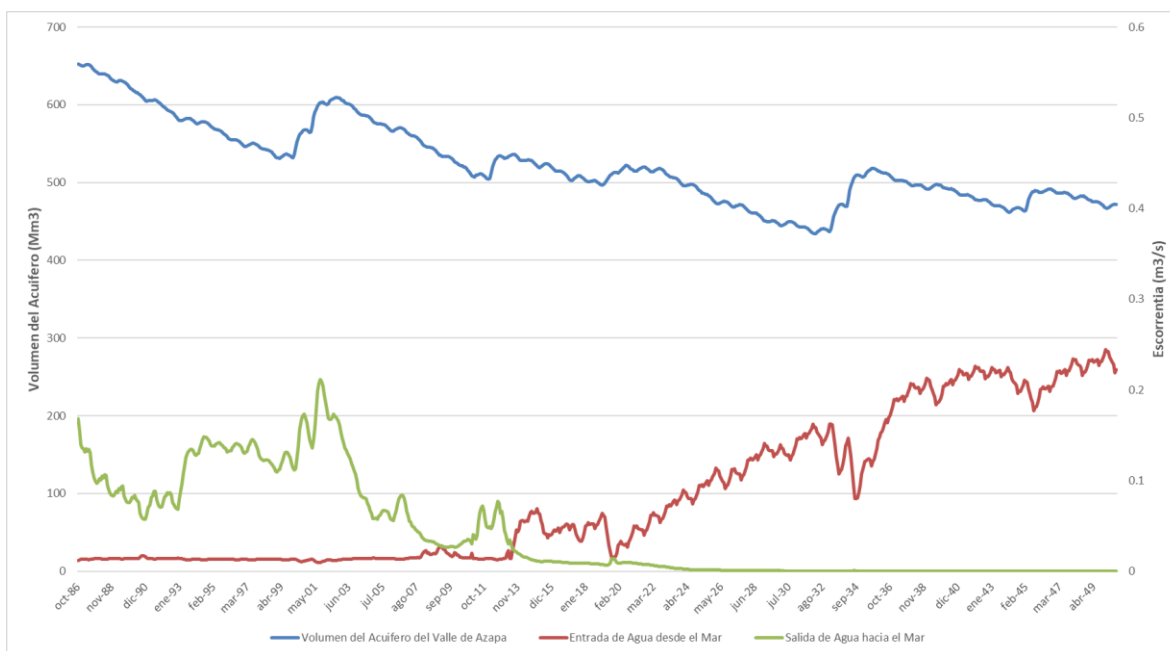


Figura 5-15. Variación del nivel del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro (1986-2050).

Fuente: Elaboración Propia (2022).

5.1.4.2 Escenario Base alternativo 1 con Cambio Climático, aumento de la eficiencia de riego y entubamiento del Canal de Azapa y disminución del caudal desde el río Lauca.

Para este escenario alternativo, es importante tener en consideración que el caudal que escurre por la subcuenca del río San José y recarga el acuífero del valle de Azapa depende directamente del aporte de agua que entrega el Canal Lauca en la zona altiplánica de la cuenca, equivalentes a 600 L/s en promedio los últimos tres años del periodo histórico.

Ante tal realidad, se estimó pertinente modificar el escenario base para evaluar el efecto en el acuífero del valle de Azapa ante la posibilidad de que el caudal del Canal Lauca disminuya a contar del periodo futuro en un 50% debido a condiciones de cambio climático. Los resultados del Balance hidrogeológico ante una disminución del Canal Lauca en un 50% se presentan en la Tabla 5-6.

A modo general se observa que las recargas desde las zonas sin vegetación de la subcuenca del río San José y del caudal del río con el mismo nombre disminuyen en comparación al escenario futuro base en torno a un 50%. Las recargas desde las zonas agrícolas del valle de Azapa también disminuyen 40 L/s y las entradas de agua desde el mar aumentan alrededor de 74 L/s en promedio durante el periodo futuro.

Lo anterior genera que haya un menor nivel de afloramientos de agua desde el acuífero al río, afectando las recargas, ya que la necesidad de bombeo de agua subterránea se mantiene producto de una falta de disponibilidad por parte del acuífero. Cabe destacar que debido a los parámetros del modelo que limitan la extracción subterránea en un 80% el DAA subterráneo, el balance negativo del acuífero aumenta en 60 L/s en

promedio para el periodo futuro (95 L/s), en relación con el escenario base futuro (36 L/s).

Tabla 5-6. Balance Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro ante una disminución del 50% del caudal del Canal Lauca.

Entradas (L/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José (River)	16,9	6,9	10,1	5,5	7,5
Infiltración SC río San José	314,7	94,5	226,3	89,3	136,7
Recarga Lateral	189,5	74,4	295,2	150,5	173,4
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	510,0	551,2	534,5	528,7	538,1
Entrada desde el Mar	19,8	135,0	245,6	313,4	231,3
Total	1.050,9	862,0	1.311,6	1.087,3	1.087,0
Salidas (L/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,5	127,1	241,4	165,4	178,0
Bombes	840,4	1.042,4	978,1	990,1	1.003,6
Salida al mar	82,6	1,4	0,0	0,0	0,5
Total	1.199,5	1.171,0	1.219,5	1.155,5	1.182,0
ΔAlmacenamiento	-148,6	-309,0	92,1	-68,2	-95,1
Error balance	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración Propia (2022).

5.1.4.3 Escenario Base alternativo 2 con Cambio Climático, aumento de la eficiencia de riego sin entubamiento en el Canal de Azapa

Por último, una segunda variación del escenario base para el análisis consistente en la no consideración de la entubación del canal de Azapa ante la posibilidad de no haber acuerdo por parte de los distintos regantes en la operación de esta nueva obra. Lo anterior implica que se mantenga el porcentaje de infiltración establecido por DGA-DICTUC (2020) del periodo histórico, hacia el periodo futuro. A su vez, producto de que el escenario base del canal Azapa entubado genera que el modelo subterráneo provoque celdas secas que limitan la disponibilidad de agua a demandas agrícolas y de agua potable (ver subcapítulo 5.5), se requiere que el escenario donde el canal de Azapa no está entubado replique ese mismo comportamiento, de forma tal que ambos escenarios puedan ser comparables. Los detalles de los ajustes de este nuevo escenario se describen en el Anexo H acápite 6.1.3.

Como resultado principal, el balance hidrogeológico de este escenario muestra un aumento en la recarga desde la zona de riego y el canal de Azapa durante el periodo futuro, cuyo aumento promedio es de 70 L/s respecto al escenario base donde el canal esta entubado. Lo anterior provoca que un aumento total desde las entradas, lo que, a su vez, genera que aumente los afloramientos de agua desde las salidas en 36 L/s a futuro respecto al escenario base. Otro aspecto importante de este nuevo escenario es el aumento de la extracción subterránea producto de una menor disponibilidad de agua superficial dado que hay mayor infiltración desde el canal. En promedio, a futuro los bombes aumentan 23 L/s respecto al escenario base (Tabla 5-7).

Tabla 5-7. Balance Hidrogeológico del Acuífero del valle de Azapa para el periodo Futuro ante una disminución del 50% del caudal del Canal Lauca.

Entradas (L/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José (River)	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	70,5	292,3	148,4	170,4
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	639,9	648,5	657,2	648,5
Entrada desde el Mar	19,8	90,1	159,6	213,0	154,2
Total	1.050,9	1.071,8	1.481,1	1.234,2	1.262,4
Salidas (L/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	182,0	361,7	251,2	265,0
Bombes	840,2	1.060,3	991,4	1.024,1	1.025,3
Salida al mar	82,4	3,1	0,1	0,0	1,1
Total	1.199,3	1.245,3	1.353,2	1.275,3	1.291,3
ΔAlmacenamiento	-148,4	-173,5	127,9	-41,1	-28,9
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Desde el punto de vista de la intrusión marina, existiría una disminución de ella en el presente escenario en torno a 3 L/s, lo que no influye de forma significativa el aumento de la recarga al acuífero por la infiltración que posee el canal de Azapa, sino que responde ante el mayor requerimiento que poseen las demandas del sector dado que deben ser abastecidas y por tanto buscar fuentes superficiales o subterráneas para ello.

En relación con el balance general del acuífero del valle de Azapa, se muestra un mejor resultado total respecto al escenario base, debido principalmente a la mayor infiltración de agua superficial desde el canal de Azapa, cuya variación promedio a futuro es de 7 L/s más respecto al escenario base. Sin embargo, este escenario muestra que las brechas hídricas resultan ser muy similares comparadas al escenario base, existiendo diferencias en la cantidad de caudal entregado subterráneo debido a la mayor o menor disponibilidad de agua que entrega el canal de Azapa a nivel superficial (Anexo H acápite 6.2.2).

Así también, los problemas relacionados a la intrusión marina, y en consecuencia a la calidad de las aguas, en el acuífero no serían mitigadas, lo que a futuro significaría un problema mayor ante el requerimiento de agua por los agricultores que influirá en una mayor explotación del acuífero si no se cuenta con otras fuentes alternativas de agua que se complementen entre sí.

A modo de síntesis, la actual situación y la alta sensibilidad que existe en los volúmenes de agua que mantiene el acuífero del valle de Azapa, requiere urgencia en la implementación de medidas de gestión que disminuyan la sobreexplotación de la fuente subterránea a través de fuentes alternativas o de una gestión y coordinación de los actores adecuada para promover la sustentabilidad del uso de agua de la principal fuente de agua de la zona bajo estudio.

5.2 BRECHAS HÍDRICAS DE DEMANDA

En el presente apartado se buscó describir y mostrar los resultados de modelación del escenario base (E0) (el detalle se encuentra en la sección 5.1.4.1) en relación con las Brechas Hídricas. Este escenario es propuesto por DGA-DICTUC (2020). Las Brechas Hídricas son entendidas para efectos de este estudio como la diferencia entre la Demanda Requerida por los principales usos que requieren la extracción de agua subterránea del acuífero del valle de Azapa (Agua Potable Urbana, Agua Potable Rural, Producción Agrícola) y la Demanda Entregada, que representa la disponibilidad hídrica (oferta) entregada por el modelo a los principales usos. Además, asociado a la brecha hídrica, también se detalla el porcentaje de satisfacción de demanda, similar a la Brecha Hídrica, pero en términos relativos (cociente porcentual entre Demanda Requerida y Demanda Entregada).

5.2.1 Brechas de agua para consumo de Agua Potable Urbano

Las brechas de Agua Potable Urbana (APU) se estimaron a partir de la comparación entre la demanda requerida y la demanda entregada simulada por el modelo para el periodo histórico y futuro. La configuración del modelo indica que la extracción de agua para consumo urbano es de primera prioridad, por tanto, el modelo tiende a priorizar la entrega a esta demanda en base a la disponibilidad en un determinado momento.

La proyección de la demanda APU futura consideró un crecimiento hasta los 730 L/s para la década 2040 – 2050, basado en las tasas de crecimiento históricas de la población obtenidas del CENSO 2017 (INE, 2017) (Capítulo 3.1.1 Consumo Humano urbano y rural), mientras que la demanda entregada se estima a partir de la disponibilidad hídrica del acuífero del valle de Azapa calculada en el balance hidrogeológico.

Es importante mencionar que en la configuración del modelo acoplado WEAP-MODFLOW valle de Azapa se establece que toda demanda de agua potable se satisface usando como fuente el acuífero del valle, sin embargo, la empresa sanitaria que opera en la cuenca, posee otras fuentes de agua externas a la subcuenca del río San José, utilizando como fuente complementaria, agua superficiales del río Lluta para este fin, pero que genera un mayor costo la potabilización del recurso dada la menor calidad de las aguas debido a la mayor concentraciones de metales en ella. Por lo tanto, las estimaciones de brecha hídrica presentadas en este capítulo podrían estar sobreestimadas debido a la existencia de otras fuentes de agua que posee la empresa sanitaria.

La demanda requerida y demanda entregada para todo el período analizado se presenta en la Figura 5-16, junto con el porcentaje de satisfacción de la población de la zona urbana. A su vez, la brecha hídrica del agua potable urbana se detalla en la Tabla 5-8, a partir de la cual se observa que la brecha hídrica aumenta a futuro debido a la ausencia de otras fuentes de agua en la subcuenca, existiendo teóricamente una satisfacción del 65,4% entre los años 2030-2050, con una demanda insatisfecha de 250 L/s.

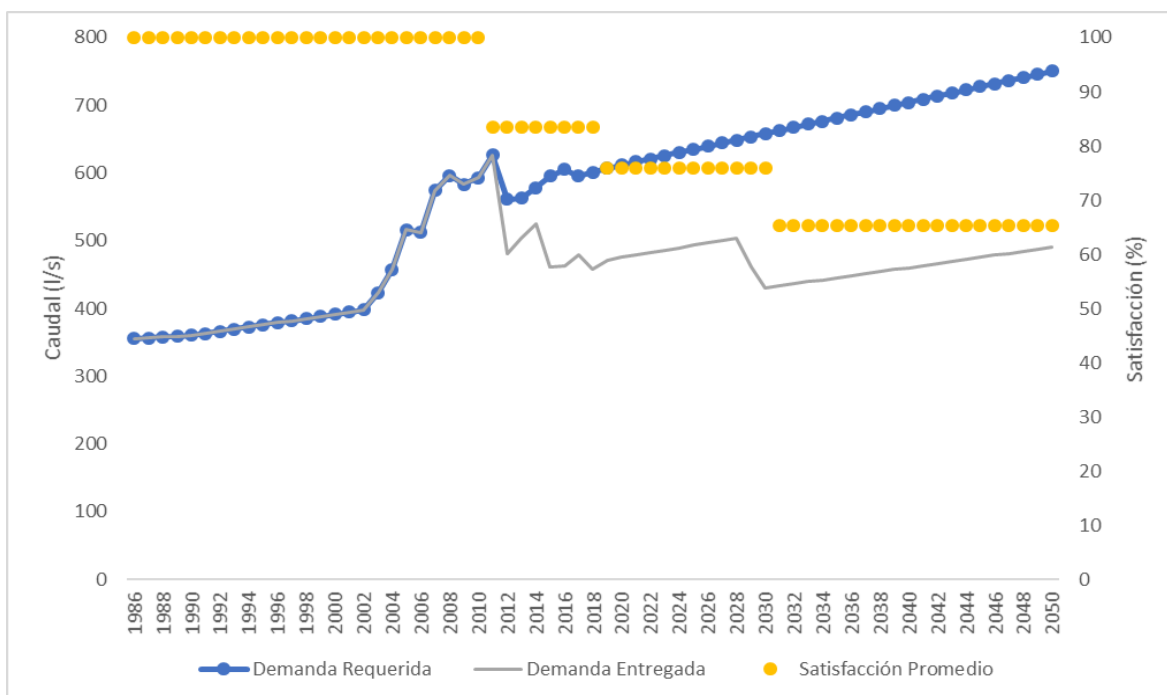


Figura 5-16. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de APU en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Tabla 5-8. Brecha Hídrica para demanda de APU en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

	1986-2000	2001-2010	2011-2018	2019-2030	2031-2040	2041-2050
Demanda Requerida (L/s)	370	500	590	630	680	730
Demanda Entregada (L/s)	370	500	500	480	450	480
Brecha Hídrica (L/s)	0	0	90	150	230	250
Satisfacción (%)	100	100	83,5	76	65,4	65,4

Fuente: Elaboración Propia (2022).

5.2.2 Brechas de agua para consumo de Agua Potable Rural

Dentro del modelo acoplado WEAP valle de Azapa se identificaron cuatro nodos de demanda relacionados al Agua Potable Rural (APR) las cuales extraen todo su requerimiento hídrico por medio de pozos en el acuífero del valle. La población definida en el modelo que se abastece por esta vía es de 4.018 habitantes al año 2016 (DGA-ICASS, 2016), la cual fue proyectada, tanto para el periodo pasado y futuro, en base a datos del Censo 2002 y 2017 (INE, 2002 y INE, 2017) y el estudio DGA-ICASS (2017), para obtener la variación de la demanda de agua potable rural. El consumo de agua por

habitante fue descrito en el Capítulo 3 Demanda Física y Legal de agua para diferentes usos.

Al igual que la demanda por agua potable urbana, dentro de la operación del modelo DGA-DICTUC (2020) se configuró que los nodos de demanda que representan las APR también cuenten con prioridad 1 para extraer agua del acuífero. Esto se suma a otra característica definida para las APR, representada por el bajo consumo de agua para su satisfacción, equivalentes a 6,8 L/s aproximadamente fines del periodo histórico, la que fue proyectada a la década 2040-2050 con 7,9 L/s. En la Figura 5-17 se puede observar que la demanda requerida y demanda entregada poseen el mismo comportamiento, lo que generaría una satisfacción de un 100% durante el periodo histórico y futuro. Por otro lado, la Tabla 5-9 detalla los resultados en décadas y muestra que la brecha hídrica en las APR es 0 L/s, según los supuestos comentados anteriormente.

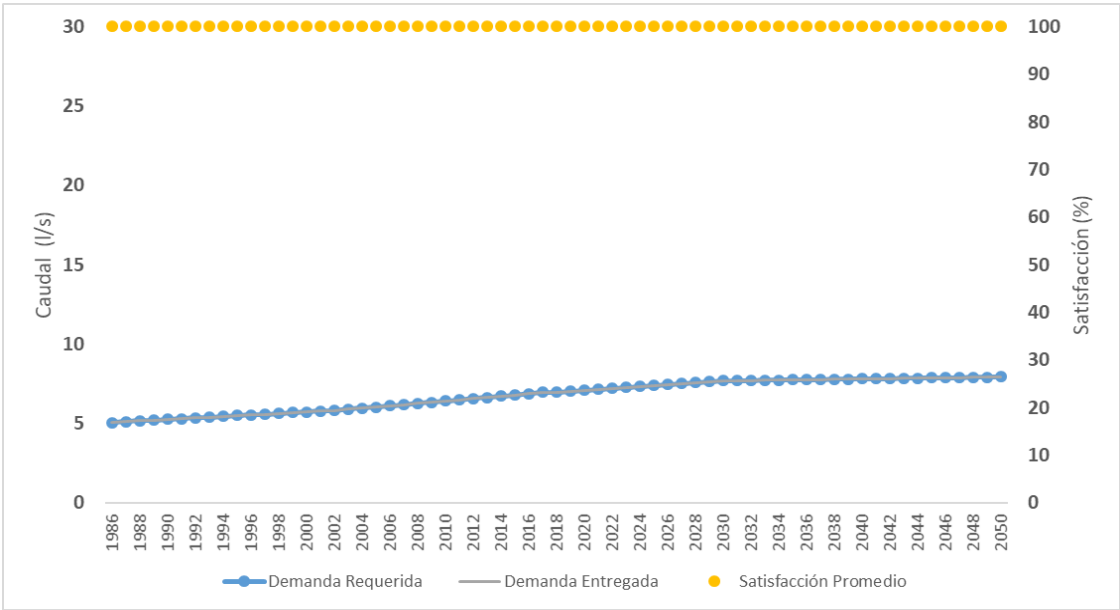


Figura 5-17. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de APR en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Tabla 5-9. Brecha Hídrica para demanda de APR en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

	1986-2000	2001-2010	2011-2018	2019-2030	2031-2040	2041-2050
Demanda Requerida (L/s)	5,4	6,1	6,8	7,4	7,8	7,9
Demanda Entregada (L/s)	5,4	6,1	6,8	7,4	7,8	7,9
Brecha Hídrica (L/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Satisfacción (%)	100	100	100	100	100	100

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Es importante mencionar que revisado el catastro de entidades rurales en el último Censo 2017 (INE, 2017) la población rural dentro de la subcuenca del río San José, es de 12.710 habitantes, mayor a la cantidad de habitantes rurales consideradas en el estudio de DGA-DICTUC (2020), pues se basan en el estudio DGA-ICASS (2016). Bajo un marco legislativo actual que promueve la seguridad hídrica en el abastecimiento de agua potable a toda la población del país, en el presente estudio se hizo el ejercicio de considerar esta mayor demanda de APR de modo de complejizar el análisis de la brecha hídrica. Así, se simuló el balance incorporando en el modelo un nuevo nodo de demanda en representación de los usuarios que no fueron considerados parte de las APR del modelo DGA-DICTUC (2020), manteniendo las mismas configuraciones establecidas respecto a prioridad de extracción para consumo humano.

Los resultados relacionados a la identificación de brechas hídricas para el agua potable rural frente a los dos escenarios descritos anteriormente se exponen en la Figura 5-18 y Tabla 5-10. A primera vista se observa que la demanda en zonas rurales de la subcuenca del río San José aumenta 21,7 L/s en el periodo histórico y se proyecta a 25,5 L/s la última década del periodo futuro. En cuanto a la satisfacción de la demanda, esta se mantiene cubierta en su totalidad para todo el período modelado, no representando brechas hídricas por demanda de agua potable rural representadas en el modelo, considerando la regla de operación de prioridad 1 para la satisfacción de la demanda de APR.

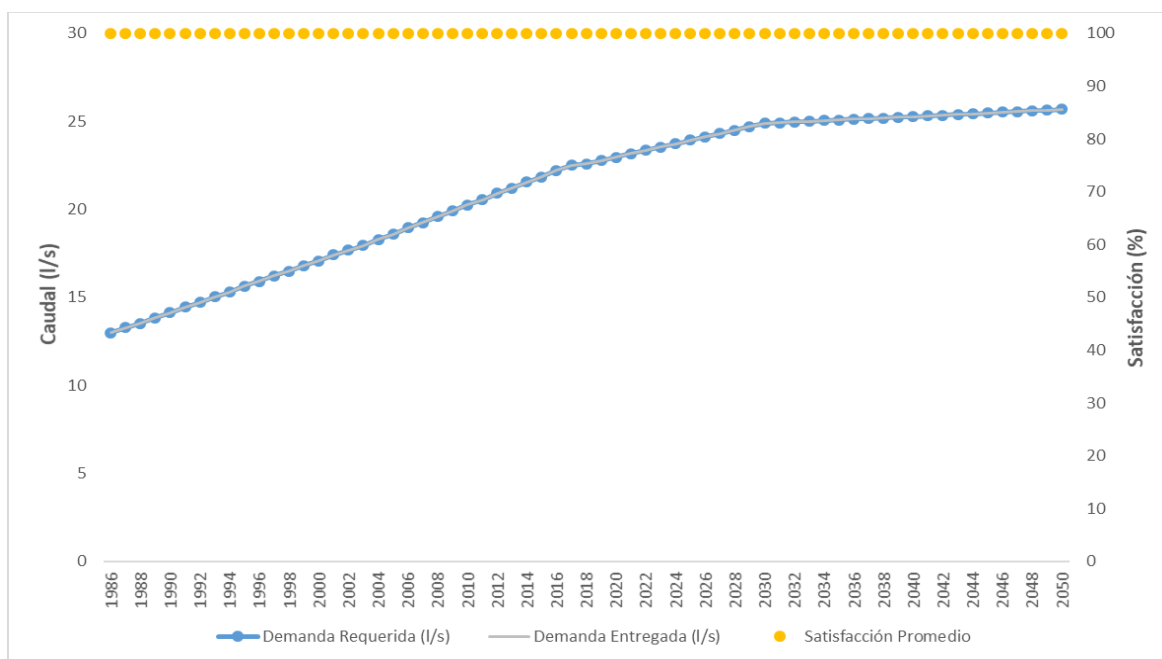


Figura 5-18. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de APR y Población en sectores Rurales en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050)

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Tabla 5-10. Brecha Hídrica para demanda de APR y Población en sectores Rurales en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

	1986-2000	2001-2010	2011-2018	2019-2030	2031-2040	2041-2050
Demanda Requerida (L/s)	15,0	18,8	21,7	23,8	25,1	25,5
Demanda Entregada (L/s)	15,0	18,8	21,7	23,8	25,1	25,5
Brecha Hídrica (L/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Satisfacción (%)	100	100	100	100	100	100

Fuente: Elaboración Propia (2022).

A pesar de haber estimado una brecha hídrica nula para APR utilizando el modelo, igualmente se revisó el nivel freático para los pozos de los cuatro APR incorporadas el modelo subterráneo diseñado por DGA-DICTUC (2020) para evaluar cómo sería la variación durante periodo futuro. La intención de ello radica en lograr identificar la profundidad de los pozos para extraer el caudal requerido, siendo otra aproximación a la brecha hídrica para APR, cuyos resultados se muestran en la Figura 5-19.

Los cuatro pozos de APR configurados en el modelo son APR1, APR2, APR3 y APR4 (Tabla 3-2), los cuales se ubican en las Zonas de Riego (ZR) 5, 3, 2 y 1 respectivamente (Tabla 3-3). Es importante recordar que la ZR1 se ubica en la zona más baja del valle de Azapa, cercana a la ciudad de Arica, contrario a la ZR5 que se ubica en el sector medio-alto del valle.

Bajo el escenario base, la Figura 5-19 muestra que el nivel del APR4 es el más afectado, alcanzando una profundidad máxima de 46 metros durante la década de 2030-2040, el que se recupera ligeramente la próxima década estabilizando en 40 metros de profundidad.

Por otra parte, los APR 2 y 3 mantienen una tendencia a la disminución hasta la década 2020-2030, ya que producto de las precipitaciones proyectadas (bajo incertidumbre) en la década 2030-2040, el nivel del pozo volvería a tener 14 metros el año 2035. Esta tendencia se mantendría por un corto periodo de tiempo, volviendo a tener una tendencia a la baja hasta el 2050.

Por último, el APR 1 ubicado en uno de los sectores más altos del valle de Azapa, durante su periodo futuro presentaría una menor profundidad a la registrada en su periodo histórico, manteniendo un promedio de 16 metros. Una de las razones de este comportamiento se puede deber al cambio de cultivos que se realizan en la zona, donde disminuiría la superficie de hortalizas y se incrementaría significativamente la superficie de invernaderos. Junto con lo anterior, la eficiencia de riego de hortalizas, invernaderos y frutales aumentaría, siendo la ZR5 una de las zonas con mejor eficiencia de riego en frutales comparado al resto del valle.

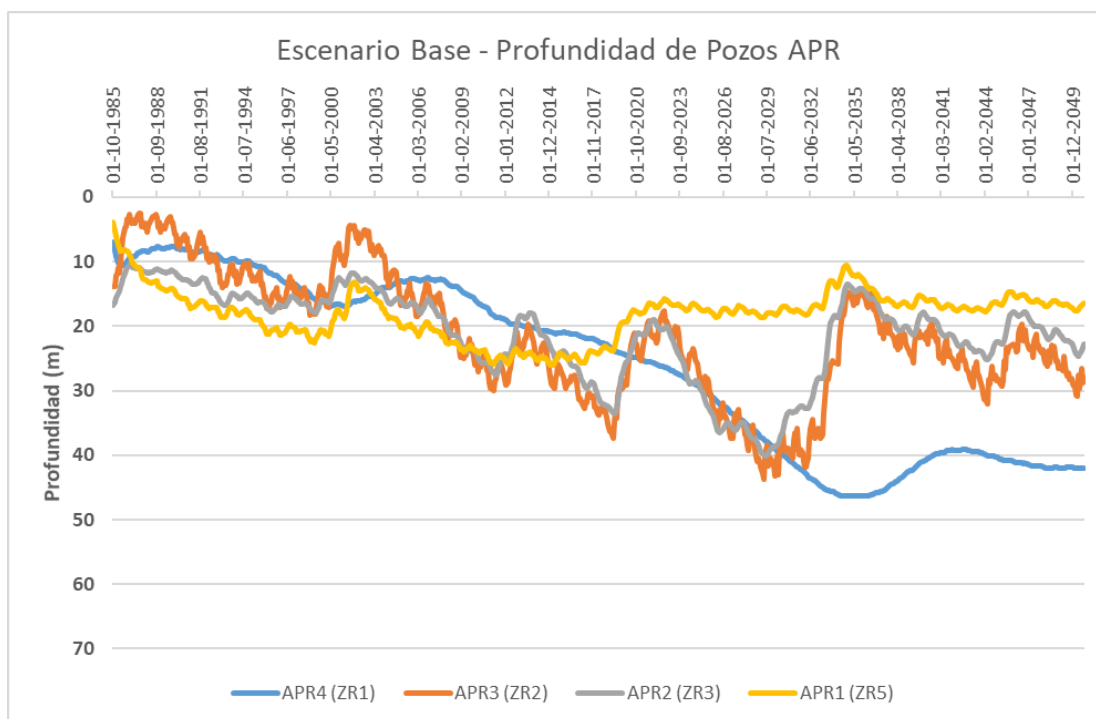


Figura 5-19. Variación de profundidad en los pozos APR – Escenario Base.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.2.3 Brechas de agua para uso agrícola

La brecha hídrica para la demanda agrícola estimada por el modelo consideró la variación de las forzantes meteorológicas futuras, el crecimiento de la superficie agrícola en el valle de Azapa y una mejor eficiencia del riego en los cultivos, basados en los estudios DGA-Hídrica-Aquaterra (2017) y DGA-DICTUC (2020) (acápites 6.1.2 del Anexo-H).

Las variaciones de la demanda requerida versus la demanda entregada por el modelo se muestran en la Figura 5-20, mientras que la Tabla 5-11 detalla en distintos periodos de tiempo las brechas hídricas. En esta última se puede ver que durante el periodo 2011-2018 la demanda requerida es de 890 L/s promedio anual, existiendo una brecha de 140 L/s. Después, la última década de la modelación 2040-2050 estima que la demanda requerida será de 1.320 L/s, de la cual 960 L/s podrán ser entregados, existiendo una brecha de 360 L/s.

De esta forma, el modelo muestra que ante un escenario en el cual no se opte por conseguir fuentes alternativas de agua, se mejore aún más la eficiencia hídrica o se disminuyan las hectáreas cultivadas del valle, la demanda hídrica solo podría ser satisfecha en torno a un 72% promedio durante el periodo futuro (2020-2030). A esto se suma el hecho de que existiría una mayor entrada de agua de mar al acuífero hacia el futuro, por lo que está el riesgo de que la calidad de las aguas se deteriore más y genere que el agua del acuífero no sea apta para la producción agrícola.

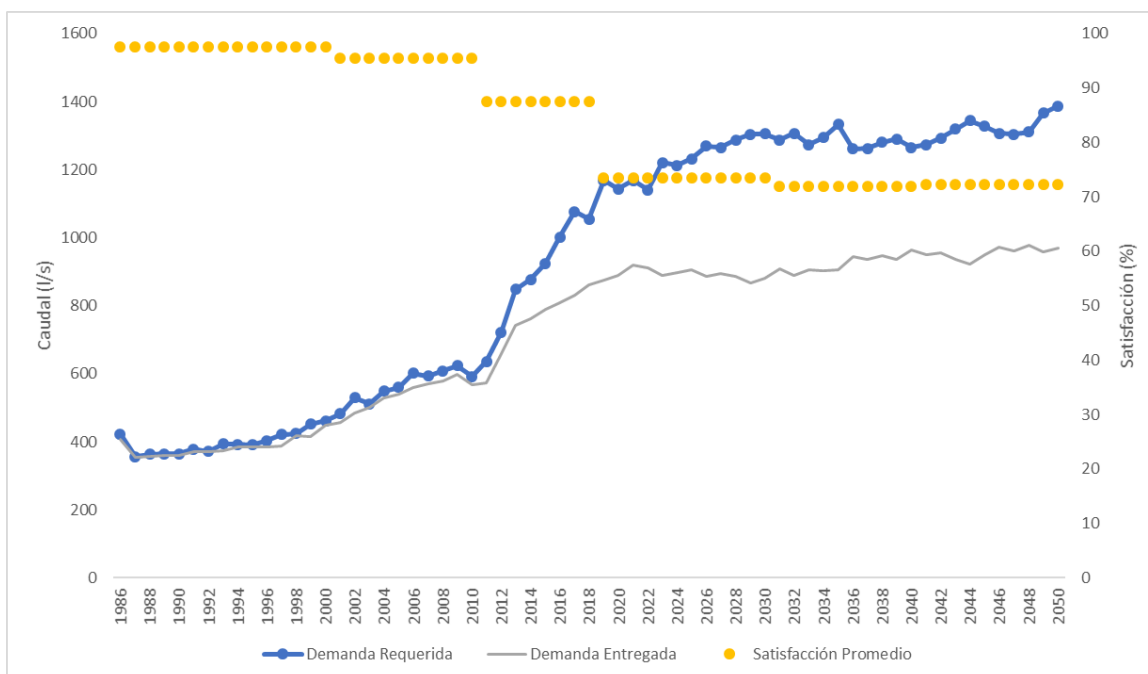


Figura 5-20. Porcentaje de Satisfacción entre Demanda Requerida y Demanda Entregada para consumo de producción Agrícola en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

Fuente: Elaboración Propia (2022).

Tabla 5-11. Brecha Hídrica para demanda Agrícola en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

	1986-2000	2001-2010	2011-2018	2019-2030	2031-2040	2041-2050
Demanda Requerida (L/s)	397,2	565,0	892,2	1.226,0	1.285,0	1.322,9
Demanda Entregada (L/s)	385,0	539,1	753,0	891,4	923,7	955,1
Brecha Hídrica (L/s)	12,2	25,9	139,2	334,6	361,3	367,8
Satisfacción (%)	97,58	95,53	87,46	73,33	71,97	72,18

Fuente: Elaboración Propia (2022).

5.3 ESCENARIOS DE GESTIÓN

La subcuenca del río San José se enfrenta a un escenario base donde el volumen de la subcuenca del río San José se enfrenta a un escenario base donde el volumen del acuífero del valle de Azapa está disminuyendo. Debido a los distintos usos que requiere agua subterránea se ha generado un balance negativo en el acuífero, pese a ser categorizado por la DGA como una zona de prohibición el año 1996 ante la entrega de nuevos derechos de aprovechamiento. Es fundamental dar respuestas al sistema del acuífero a través de distintas estrategias que disminuyan la brecha hídrica actual, como

también, detener aguas salobres desde el mar que provoquen una contaminación irreversible a la principal fuente hídrica de la subcuenca del río San José.

En base a lo anterior, y en base al estudio de DGA-DICTUC (2020), se definieron cinco escenarios de gestión hipotéticos que fueron modelados con el objetivo de entregar una respuesta al sistema que disminuya el balance negativo que actualmente posee el acuífero y genere una recuperación del nivel del volumen y una disminución en la brecha hídrica relacionada a las demandas.

Los resultados que se entregan a continuación representan una síntesis de estos, principalmente dando a conocer la variación del volumen del acuífero, la brecha hídrica total que tiene la demanda en el valle de Azapa, el nivel de profundidad al cual se encuentran los pozos de agua potable rural y el balance hidrogeológico del acuífero. Una mayor descripción y análisis de los resultados de cada escenario se describe en el Anexo H capítulo 6. Por último, cabe destacar que los resultados son teóricos y buscan dar una orientación sobre ordenes de magnitudes para el proceso de toma de decisiones en materia de gestión hídrica a nivel de cuenca.

5.3.1 Escenario 1 (E-1): Gestión y Mitigación – CAS

Desde una perspectiva basada en la gestión, este escenario propone disminuir los bombeos permitidos del agua subterránea con la finalidad de disminuir las entradas de agua subterránea desde el mar hacia el acuífero. A su vez, permite cuantificar los impactos provocados en los usuarios ante la disminución de la extracción de caudal desde el acuífero.

En el modelo, se implementó un prorrateo de los derechos de agua subterránea disminuyendo en un 50%, para el periodo futuro. Por lo tanto, es requerido que cada usuario compense el caudal restante de su operación de otras fuentes de agua. Por ejemplo, que la empresa de Servicios Sanitarios (Aguas del Altiplano) construya plantas desaladoras o que la agricultura use aguas servidas tratadas. Los cambios en el modelo base implican una disminución de los derechos de agua subterránea, el cual era de un 80% en el periodo histórico (Anexo H acápite 3.4.5) a un 40% como el máximo de extracción para el periodo futuro (Anexo H acápite 6.1.3). Además, no se diseñó una fuente de agua externa que reemplace el caudal restante de su operación histórica. Los resultados principales se muestran en la Figura 5-21.

La reducción de la extracción de flujo subterránea puede ser factible, toda vez que los actores lo consideren, por medio de la aplicación del Artículo 62 del Código de Aguas. Así también, ya han sido presentadas distintas recomendaciones y resoluciones por parte de la DGA, que son parte de los antecedentes para llevar a cabo una disminución de la extracción subterránea, tales como: 1) Resolución N° 202 del 19 de marzo de 1996, que define un área de prohibición en el valle de Azapa para la explotación, donde también se indicó que el caudal de explotación en el área es de 700 L/s, 2) Ordenanza N° 338 de abril 2007, donde recomienda a la empresa sanitaria disminuir la extracción subterránea a un caudal de 215 L/s y 3) Resolución N° 27 del 22 de julio del 2021 en la cual se modifica la Resolución N° 202 de 1996 ampliando la zona de prohibición a todo el acuífero de valle de Azapa, prohibiendo otorgar nuevos derechos de aprovechamientos permanentes y provisorios, y manteniendo la indicación del volumen sustentable disponible de 700 L/s anuales.

A modo de síntesis, la aplicación de un prorrateo de derechos de agua subterránea en los usuarios a un 40% del máximo permitido, genera que el balance del acuífero disminuye en promedio 21,6 L/s en el periodo futuro, comparado al escenario base (Tabla 5-5). Lo anterior se debe principalmente a la reducción de bombeo de agua subterránea, generando que las salidas del acuífero sean menores. En este mismo sentido, la reducción de caudal extraído genera que el acuífero posea un caudal de salida al mar, el que impide la intrusión salina, manteniendo controlado los potenciales efectos que se generan en la calidad de las aguas subterráneas al presentar un aumento de agua salobre.

Sin embargo, el no contar con otras fuentes de aguas en la subcuenca provoca que las demandas agrícolas y de agua potable urbana aumenten, principalmente en el periodo estival donde la agricultura requiere un mayor riego de cultivos.

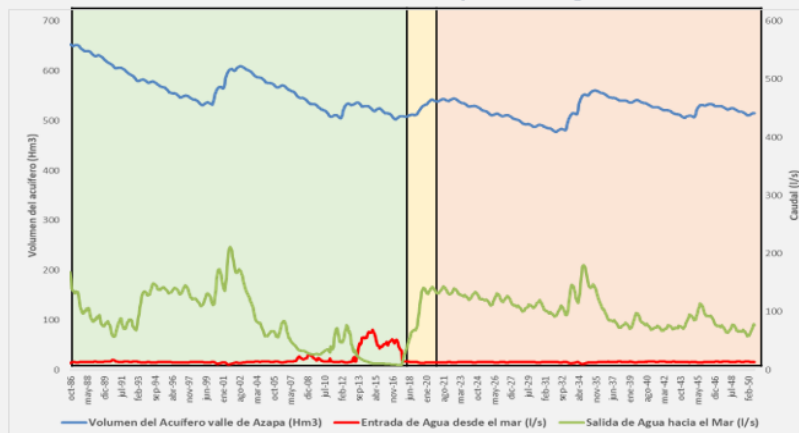
En relación con variación de la profundidad en los pozos de Agua Potable Rural, el escenario 1 genera que los niveles de profundidad de los pozos de APR se vean favorecidos en todas las Zonas de Riego. El pozo más afectado, el escenario base (APR 4) disminuye su profundidad hasta los 32 metros. En cuanto a los pozos APR 2 y 3, alcanzan una profundidad máxima de 27 metros durante la década 2020-2030. A su vez, los periodos donde el nivel de profundidad es menor estos pozos alcanzan profundidades de 12 y 6 metros respectivamente. Por último, el APR 1 es el pozo con menor fluctuación y la profundidad promedio disminuye 1,3 metros durante todo el periodo futuro.

Como resultado del análisis, este escenario no sería viable de aplicar sin asumir las pérdidas productivas que provoca la disminución de oferta hídrica subterránea. Pero a la vez, representa una medida de gestión posible de ser complementada por medio de la conformación de la Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS) del acuífero del valle de Azapa, junto a la implementación de fuentes alternativas, disminuyendo los niveles de profundidad en los pozos de APR y evitar la contaminación de las aguas subterráneas que son requeridas por diversos usuarios en la cuenca, sin requerir un alto costo de infraestructura.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 1

Cambio Climático con crecimiento – Gestión y Mitigación – Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS)

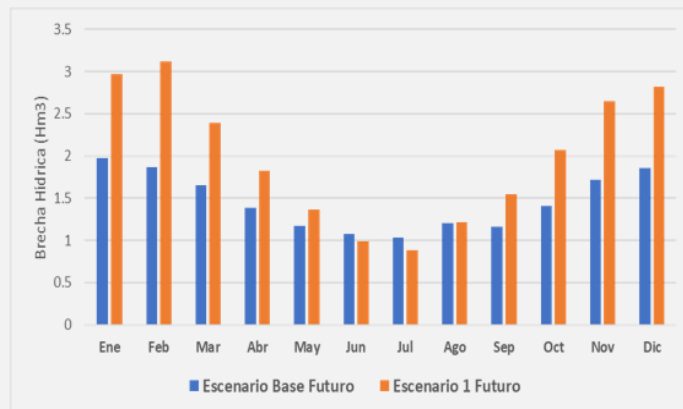
Variación del Acuífero – Entradas y Salidas de Agua al Mar



Balance Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración SC San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	70,6	292,1	148,1	170,2
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	493,8	501,4	516,0	503,7
Entrada desde el Mar	19,8	13,2	13,3	13,8	13,4
Total	1.050,9	848,9	1,187,6	893,6	976,7
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	231,6	329,0	219,8	260,1
Bombes	840,2	616,8	623,8	647,2	629,2
Salida al mar	82,4	123,4	105,0	77,5	102,0
Total	1.199,3	971,7	1,057,7	944,5	991,3
ΔAlmacenamiento	-148,4	-122,8	129,8	-50,9	-14,7
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

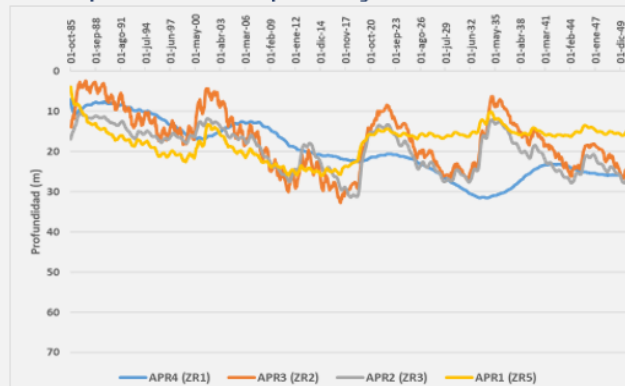


Figura 5-21. Principales resultados del Escenario de Gestión E-1.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.2 Escenario 2 (E-2): Planta Desaladora Agua de Mar

Una solución a la sobreexplotación del agua subterránea, desde la perspectiva de obras e infraestructuras, es la instalación de una planta de tratamiento a aguas superficiales, tales como agua salobre o aguas con alta concentración de metales, que permita sustituir, la extracción de agua subterránea de la demanda de agua potable urbana.

A la fecha, la instalación de una planta desaladora se mantiene en discusión y en base al estudio “Análisis Integral de Soluciones a la Escasez Hídrica” elaborado por DGA-ICASS (2017), la construcción de una planta considera un caudal de 200 L/s que operaría de forma intermitente. Por otro lado, la planta de tratamiento de aguas con mayor concentración de metales ya está operando en el río Lluta de manera discontinua.

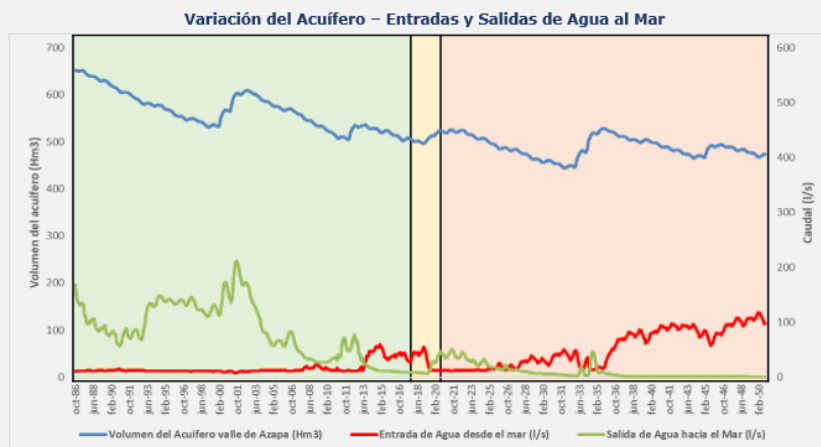
Por tanto, para disminuir la sobreexplotación de agua subterránea se propone la entrada en operación de una planta desaladora de 200 L/s. No obstante, puede ser una alternativa el complemento entre ambas plantas de tratamiento de aguas, de modo que operen en conjunto y puedan otorgar un caudal de 200 L/s al requerimiento de agua potable urbana. En cualquier caso, los resultados en el balance de la implementación de una fuente de agua externa que otorgue 200 L/s de forma constante y reemplace la misma magnitud de caudal desde el acuífero se muestra en la Figura 5-22.

En primer lugar, al observar la brecha hídrica de las demandas que tiene la subcuenca del río San José, se distingue una disminución de estas al ser comparadas con el escenario base. Los mayores cambios ocurren el periodo estival, donde los meses de diciembre y enero disminuyen la brecha alrededor de $0,5 \text{ Hm}^3$, en relación con el escenario Base Futuro.

En segundo lugar, al conocer el balance hidrogeológico del acuífero, se observa que la diferencia promedio de almacenamiento es igual al del escenario base. Sin embargo, la dinámica interna del acuífero cambia al reducirse el bombeo en 75 L/s promedio, lo que significa que, ante un menor requerimiento desde el agua potable urbana, el acuífero dispone de más volumen para entregar a la demanda agrícola (en función de las reglas de operación para la demanda agrícola del modelo de DGA-DICTUC (2020), las que son explicadas en el Anexo H sección 3.4.5). A su vez, esta al incrementar con el tiempo, reduce las salidas de agua al océano y por ende aumenta la intrusión salina al acuífero.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 2-1

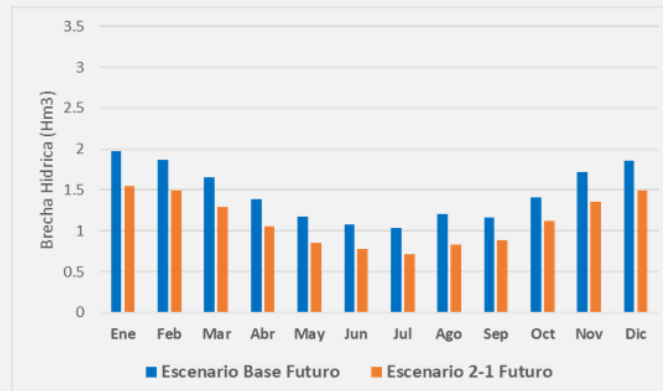
Planta Desaladora de Agua de Mar– Oferta 200 l/s



Balace Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración SC San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	70,5	292,0	148,1	170,2
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	588,8	585,3	587,4	587,2
Entrada desde el Mar	19,8	21,6	58,6	107,2	62,5
Total	1.050,9	952,2	1.316,7	1.058,3	1.109,1
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	178,0	274,2	175,6	209,3
Bombes	840,2	912,6	925,3	941,9	926,6
Salida al mar	82,4	22,2	5,9	0,7	9,6
Total	1.199,3	1.112,8	1.205,4	1.118,1	1.145,4
ΔAlmacenamiento	-148,4	-160,6	111,3	-59,8	-36,4
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

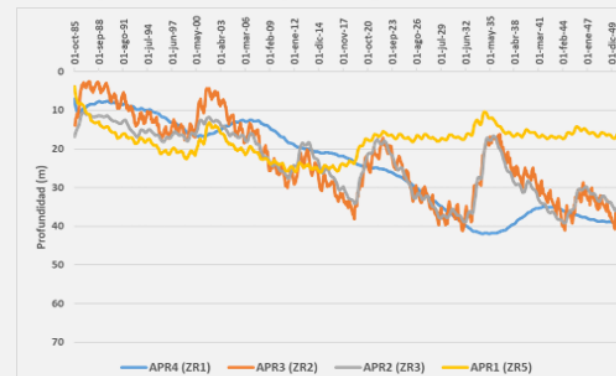


Figura 5-22. Principales resultados del Escenario de Gestión E-2.1.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Por otra parte, el estudio DGA-DICTUC (2020) consideró necesario evaluar en el modelo un segundo subescenario donde exista la posibilidad de poseer una fuente alternativa de agua que otorgue 400 L/s en sustitución del bombeo de agua subterránea desde la empresa sanitaria para abastecer de agua potable al sector urbano, debido a que se proyecta un aumento de esta misma que no es capaz de ser satisfecha desde el acuífero sin aumentar su sobreexplotación. Los resultados a este segundo subescenario se muestran en la Figura 5-23.

Desde el punto de vista de la brecha hídrica para la demanda, los resultados indican que se mantiene la tendencia obtenida en el primer subescenario pero que logra disminuir aún más la brecha a nivel mensual, siendo julio el mes donde la brecha disminuye a la mitad respecto al escenario base. En cuanto a los meses de diciembre y enero la brecha logra disminuir 0,15 Hm^3 adicionales, en relación con el escenario Base Futuro.

El mayor efecto que genera aumentar la oferta de agua desde una fuente externa está en el balance del acuífero. En primer lugar, se observa que la diferencia promedio de almacenamiento en el periodo futuro disminuye 19,8 L/s respecto al escenario base. Lo anterior se produce por un menor bombeo en el acuífero, que al mismo tiempo logra cubrir más la superficie de riego generando mayor recarga desde la zona agrícola. Además, la disminución en la extracción subterránea genera que exista mayor caudal que salga al océano permitiendo mantener controlado el ingreso de intrusión marina al acuífero y por ende la calidad del agua.

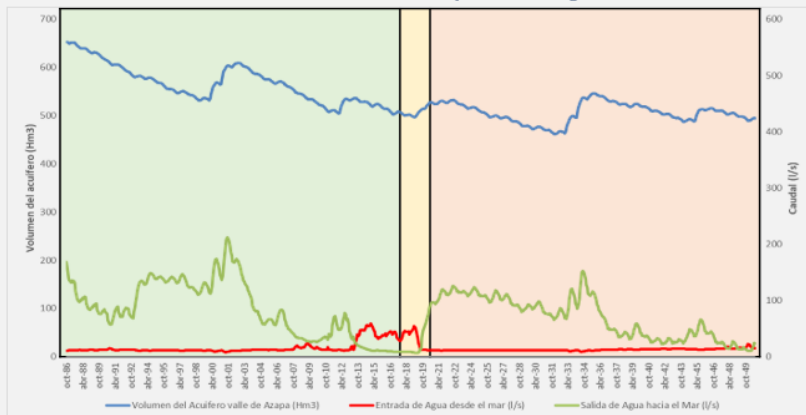
En cuanto a la variación de los pozos de APR, la Figura 5-21 y Figura 5-22, muestran que no existe un cambio significativo en el nivel de profundidad de los pozos cuando se posee una fuente externa de agua de 200 L/s o 400 L/s.

El pozo APR 4 alcanza una profundidad máxima de 42 metros en el escenario 2.1 y una profundidad de 37 metros en el escenario 2.2. La máxima profundidad de los pozos APR 2 y APR 3 es de 39 y 41 metros respectivamente, durante la década 2040-2050 en el escenario 2.1. A su vez, para el escenario 2.2 el nivel de profundidad máximo es de 34 y 37 metros. Por último, el APR 1 no muestra un cambio importante en su profundidad de los pozos ante la implementación de nuevas fuentes de agua externas. En el escenario 2.1 y 2.2 el nivel de profundidad promedio durante su periodo futuro es de 16 y 15 metros respectivamente.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 2-2

Planta Desaladora de Agua de Mar- Oferta 400 l/s

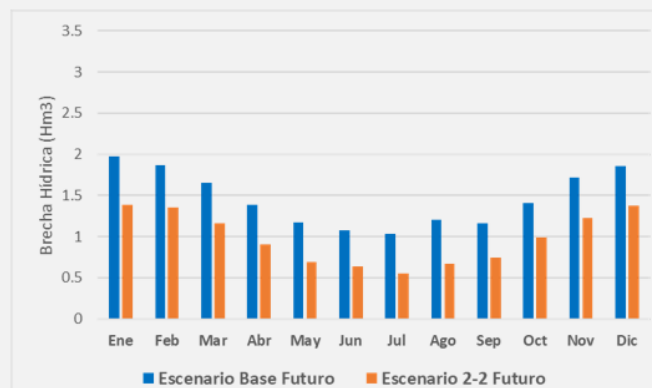
Variación del Acuífero – Entradas y Salidas de Agua al Mar



Balance Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración SC San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	70,6	292,2	148,1	170,3
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	588,7	585,3	597,7	590,6
Entrada desde el Mar	19,8	13,3	13,8	16,7	14,6
Total	1.050,9	943,8	1.272,1	978,1	1.064,7
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	200,8	305,7	198,1	234,9
Bombeos	840,2	757,4	770,3	807,2	778,3
Salida al mar	82,4	102,5	72,4	29,0	68,0
Total	1.199,3	1.060,8	1.148,5	1.034,3	1.081,2
Almacenamiento	-148,4	-116,9	123,6	-56,1	-16,5
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

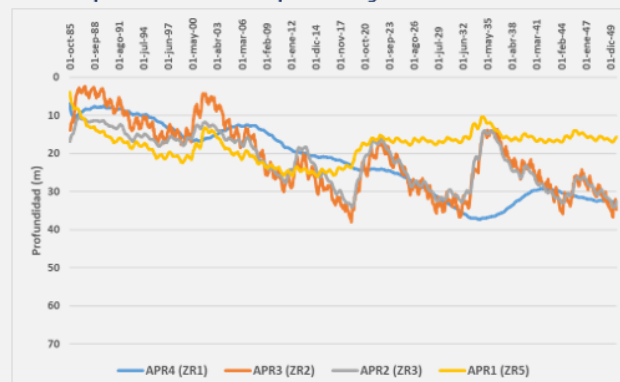


Figura 5-23. Principales resultados del Escenario de Gestión E-2.2.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.3 Escenario 3 (E-3): Embalse Livilcar

Otro escenario evaluado, desde el aporte que entrega la construcción de obras e infraestructuras, es la instalación de un Embalse en el sector alto de la subcuenca del río San José (Livilcar). Su objetivo es regular las crecidas del cauce superficial que provienen del sector altiplánico de la cuenca (Azapa Alto) con el fin de mitigar los daños producidos a la infraestructura y zonas agrícolas en el valle de Azapa, la ciudad de Arica y el borde costero. Además, permite aumentar la recarga del acuífero, regular el caudal de riego aguas abajo del embalse y generar energía eléctrica eventualmente.

La implementación del Embalse Livilcar en el modelo WEAP valle de Azapa se instaló en la zona más alta del río San José a través de un nodo de Fuente de Agua la cual cuenta con dos nodos extra de demanda que procuran asegurar el agua requerida por el Canal de Azapa aguas abajo y también garantizar la infiltración del río en esa zona. Todo el detalle se describe en el Anexo H sección 6.1.4. Los resultados principales del presente escenario se muestran en la Figura 5-24.

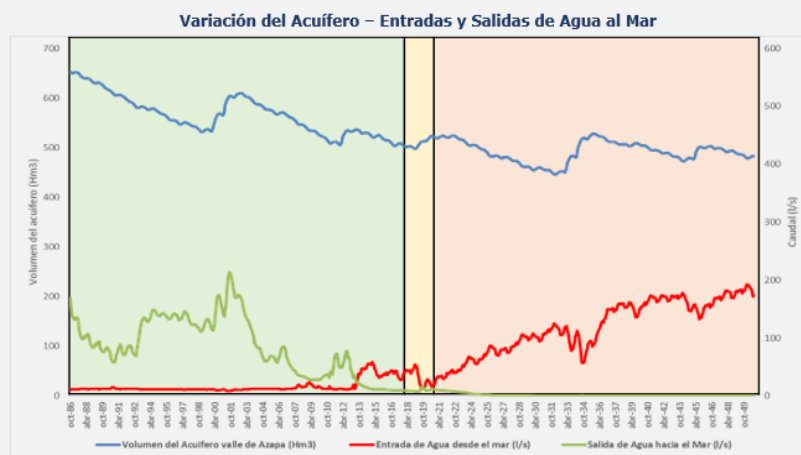
Al observar el balance del acuífero, la implementación del embalse muestra un aumento en la recarga en la subcuenca del río San José, adicional al total general. Esto generó que la diferencia promedio del almacenamiento disminuya 9,3 L/s durante el periodo futuro a diferencia del escenario base. Sin embargo, la recarga adicional producto del embalse no provoca que la intrusión marina que se proyecta a futuro en el acuífero disminuya de forma significativa, sino que alcanza a disminuir en un 11,5% respecto al escenario base.

En relación con la brecha hídrica de la demanda requerida por el acuífero del valle de Azapa, se observa disminuye ligeramente con la construcción del Embalse Livilcar, siendo los meses de invierno (junio, julio y agosto) donde se distingue más la disminución en la brecha hídrica, la que no logra superar los 0,1Hm³.

Por último, los pozos de las APR generan una ligera disminución de la profundidad del nivel de agua. El APR 4 registra su nivel más profundo durante la década 2030-2040 con 44 metros, en vez de 46 que posee el escenario base. En los APR 2 y 3 ocurre una situación similar. La profundidad máxima en este escenario es de 38 y 39 metros durante la década 2020-2030 disminuyendo la profundidad de los pozos de 2 y 5 metros respectivamente. El APR 1 posee una variación poco significativa, con una disminución en su profundidad de apenas 0,7 metros, pese a ser la zona más alta y cercana a la recarga del Embalse Livilcar. Lo último se debe a que el Embalse Livilcar recarga el acuífero en periodos de crecidas de caudal del río San José, las cuales solo se proyectan para un periodo de tiempo entre los años 2030 y 2034 pero a una menor magnitud registrada en el periodo histórico.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 3

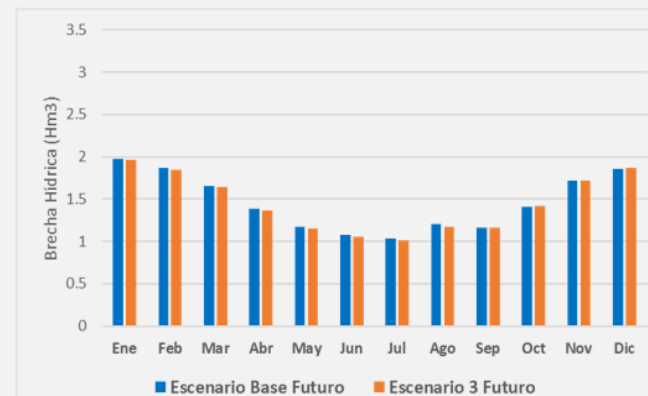
Implementación de Embalse en sector de Livillar



Balace Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	16,8	18,6	14,0	16,5
Infiltración SC San José	314,7	325,0	404,7	242,6	324,1
Recarga Lateral	189,5	68,9	291,0	147,1	169,0
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	587,3	572,7	583,5	581,2
Entrada desde el Mar	19,8	77,0	143,9	195,7	138,9
Total	1.050,9	1.074,9	1.430,9	1.183,0	1.229,6
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	183,5	337,8	228,7	250,0
Bombes	840,2	1.046,9	965,6	999,8	1.004,1
Salida al mar	82,4	4,0	0,3	0,0	1,4
Total	1.199,3	1.234,5	1.303,7	1.228,5	1.255,6
ΔAlmacenamiento	-148,4	-159,6	127,2	-45,5	-26,0
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

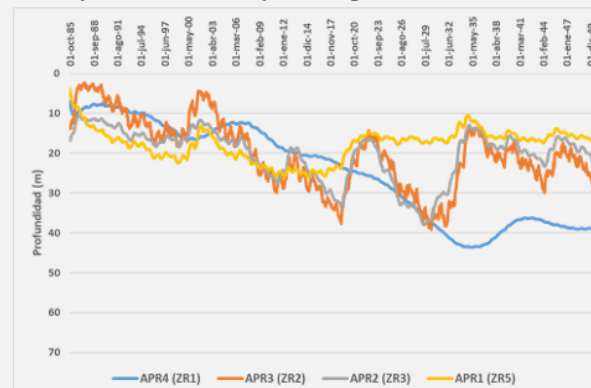


Figura 5-24. Principales resultados del Escenario de Gestión E-3.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.4 Escenario 4 (E-4): Barreras de Goma para infiltración hacia el acuífero (Recarga Artificial)

Distintas instituciones como el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), han elaborado informes en el área de estudio que proponen generar recargas en el acuífero a través de aguas provenientes de crecidas que permitan reponer el volumen subterráneo. De hecho, el informe de INH (2014) delimita áreas de recarga superficial adecuadas y parcialmente adecuadas (Figura 2-29).

Otra alternativa a la creación de un embalse en la zona alta de la cuenca es la instalación de barreras de goma (*rubber dams*) como una posible infraestructura que genere una acumulación parcial ante una crecida y que forme lagunas de infiltración al acuífero.

La representación en la modelación fue a través de tres nodos de demanda que inyectan al acuífero del modelo MODFLOW, un caudal de 41,2 m³/s por cada barrera, cuyo valor fue presentado por DGA-ICASS (2017). Además, se diseñaron dos opciones para la ubicación de las barreras de goma, buscando evaluar el beneficio en el balance del acuífero y la disminución de la brecha hídrica ante la satisfacción de la demanda.

Los resultados que se presentan en este informe corresponden al primer subescenario, que ubicó tres barreras de goma en la caja del río, entre el kilómetro 5 y 21 del camino de Azapa. El principal motivo de la decisión se debe producto de no existir diferencias significativas en los principales resultados vistos anteriormente entre ambos subescenarios, a excepción de una mejora relación a la variación de profundidad que tienen los pozos de agua potable rural, cuyos resultados se ven en la Figura 5-25. El detalle de la modelación y sus resultados son descritos en el Anexo H sección 6.1.4.

Los resultados en el balance del acuífero reflejan un aumento en la recarga desde sectores laterales, existiendo en el periodo futuro un incremento de 74 L/s respecto al escenario base. No obstante, la focalización de sectores de infiltración ante crecidas generó en el balance del acuífero que la infiltración en la subcuenca completa del río San José disminuya en promedio 54 L/s respecto al escenario base.

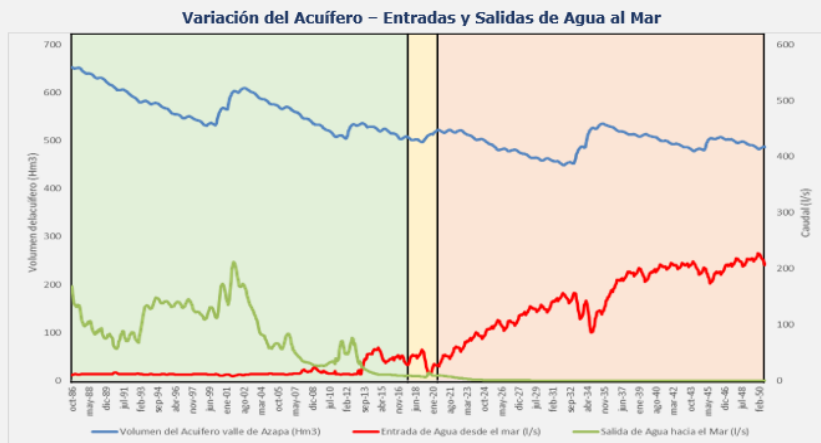
Por otro lado, al analizar y comparar las brechas hídricas de demanda entre escenarios, se aprecia que no hay una disminución en algún momento del año, sino al contrario, donde meses del periodo estival (diciembre, enero, febrero) registran un ligero aumento en la brecha hídrica.

La razón de tal comportamiento se debe a un adelanto en la creación de celdas secas en el modelo subterráneo del escenario con piscinas de infiltración, lo que genera que exista menos disponibilidad de agua subterránea de la cual se abastecen los nodos de demanda. Además, en el balance hidrogeológico, provoca una mayor intrusión salina al acuífero, aumentando en promedio 18 L/s en relación con el escenario base.

Sin embargo, respecto a la variación en los pozos de agua potable rural, la ubicación de las barreras de goma en los sectores más bajos de la subcuenca genera que disminuya la profundidad para obtener agua desde las APR 2 y 3 a diferencia de otros escenarios revisados previamente.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 4

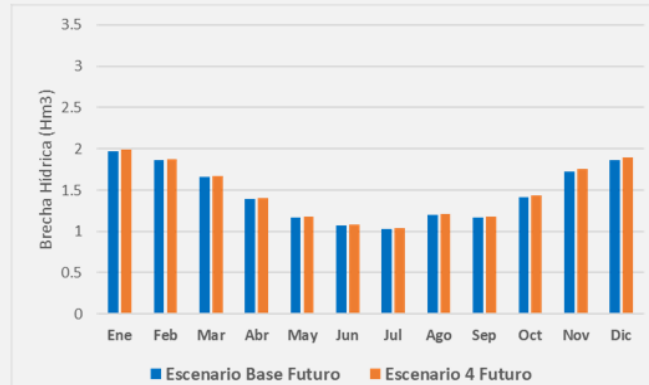
Piscinas de Infiltración artificial por medio de Barreras de Goma (*Rubber Dams*)



Balance Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración SC San José	314,7	190,1	311,1	156,5	219,2
Recarga Lateral	189,5	154,2	363,3	215,3	244,3
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	582,4	573,2	583,6	579,7
Entrada desde el Mar	19,8	102,3	183,8	238,9	175,0
Total	1.050,9	1.043,9	1.449,7	1.207,8	1.233,8
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	168,7	348,7	255,3	257,6
Bombes	840,2	1.026,2	967,5	1.000,1	997,9
Salida al mar	82,4	2,7	0,0	0,0	0,9
Total	1.199,3	1.197,6	1.316,2	1.255,4	1.256,4
ΔAlmacenamiento	-148,4	-153,6	133,4	-47,5	-22,6
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

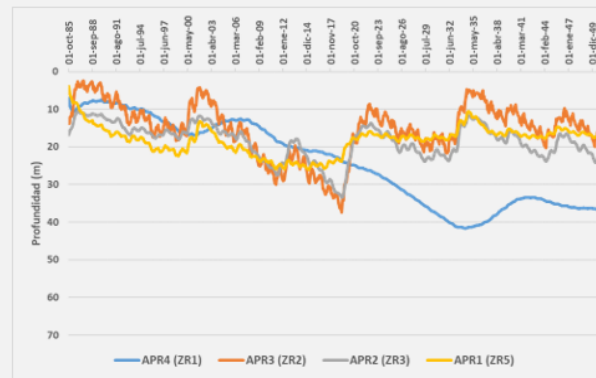


Figura 5-25. Principales resultados del Escenario de Gestión E-4.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.5 Escenario 5 (E-5): Reúso de Aguas Servidas

considerar implementar una planta de tratamiento de aguas servidas para la ciudad de Arica e inyectar las aguas tratadas. Actualmente, las aguas servidas de la ciudad de Arica tienen un tratamiento primario (rejillas de filtración) que luego son descargadas al mar mediante un emisario submarino. El caudal medio horario de aguas servidas es de aproximadamente 400 L/s.

Dentro de la modelación, la ubicación de los pozos de inyección y los supuestos metodológicos se obtuvieron en base al Proyecto INOVA CORFO COD. 12BPC2-12504 (INH, 2014) "Caracterización de la Cuenca del río San José para la implementación de un Programa de recarga Artificial de Acuífero", cuyo detalle se describe en el Anexo – H, acápite 6.1.7. En cuanto a los principales resultados, la Figura 5-26 muestra los principales a nivel de acuífero del valle de Azapa.

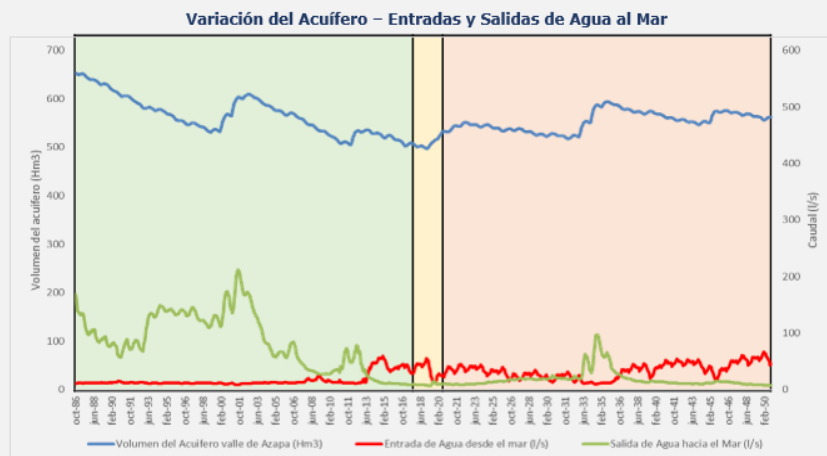
En el balance del acuífero, la recarga lateral aumenta en 400 L/s promedio producto de la reinyección de aguas servidas tratadas, durante el periodo futuro. A su vez, en las salidas, existe un mayor afloramiento de agua desde el nivel freático hacia la superficie, junto a un aumento del bombeo en 58 L/s promedio más un caudal con salida al mar de 18 L/s. Lo anterior genera que las entradas de agua de mar al acuífero registren un caudal promedio de 39 L/s, aumentando en 10 L/s su ingreso respecto al periodo histórico. Pese a ello, lo más destacado se ubica en la diferencia de almacenamiento que posee el acuífero, generando un balance positivo a futuro de 49,6 L/s promedio, proyectando al año 2050 que el volumen del acuífero se mantenga en orden a los registros de la década del año 2000, con aproximadamente 600 Hm^3 , provocando que la explotación del acuífero sea más sostenida.

En relación con la brecha hídrica por demandas insatisfechas, se muestra que hay una disminución general que mantiene el mismo patrón del escenario futuro base. Además, durante los meses de mayor demanda y explotación del acuífero (periodo estival) existe una disminución en la brecha hídrica de aproximadamente 0,3 Hm^3 .

Por último, la variación de la profundidad en los pozos de APR muestran un efecto positivo en los pozos de APR 2, 3 y 4. El más evidente según la Figura 5-25 es el APR 3 de la ZR2, dado que durante el periodo futuro existe un afloramiento de las aguas en su pozo, superando el nivel del terreno en 1,5 metros promedio. A su vez, el APR 4, ubicado en la zona más baja del valle, disminuye su nivel de profundidad en relación con la última década del periodo histórico, recuperando sus niveles y manteniendo un promedio de 12 metros de profundidad durante el periodo futuro. Por otro lado, el APR 2 mantiene una profundidad promedio de 17,6 metros en el periodo futuro, disminuyendo en 6,8 metros respecto al escenario base. Por último, el APR 1 no sufre variación en su nivel de pozo.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 5

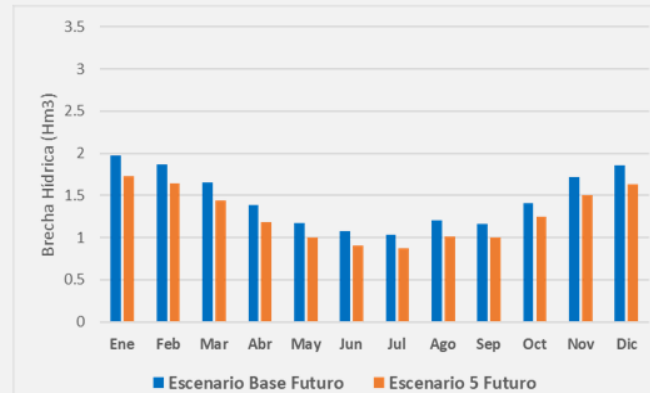
Reusó de Aguas Servidas e Inyección hacia el acuífero del valle de Azapa



Balace Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración SC San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	470,5	692,0	548,0	570,2
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	587,8	585,2	597,7	590,2
Entrada desde el Mar	19,8	34,3	29,1	53,6	39,0
Total	1.050,9	1.363,9	1.687,1	1.414,9	1.488,6
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	254,1	458,7	365,0	359,3
Bombeos	840,2	1.067,4	1.080,2	1.037,4	1.061,6
Salida al mar	82,4	14,0	29,7	10,7	18,1
Total	1.199,3	1.335,5	1.568,6	1.413,1	1.439,1
ΔAlmacenamiento	-148,4	28,4	118,5	1,8	49,6
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

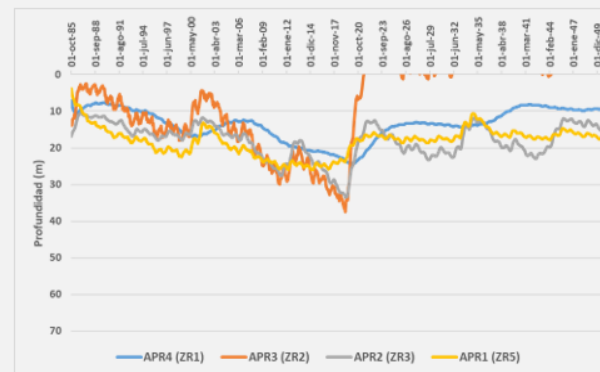


Figura 5-26. Principales resultados del Escenario de Gestión E-5

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.6 Comparación de Escenarios

A modo de resumen, los distintos escenarios descritos anteriormente muestran que el balance del acuífero del valle de Azapa mantiene un balance negativo para el periodo futuro que significa una prolongación a la baja del volumen total que ocurre durante el periodo histórico (Tabla 5-12). No obstante, escenarios que implementan el prorrato de derechos de agua subterráneos -en función de la regla de operación del límite del 80% de los DAA- (E1), la instalación de una Planta Desalinizadora de 400 L/s (E2-2) o la inyección de aguas servidas (E5), muestran que son medidas que generan una notoria diferencia en el almacenamiento futuro, en relación con el escenario histórico.

Al ordenar los resultados de mayor a menor balance hídrico futuro del acuífero, primero está la implementación de una planta de tratamiento de aguas servidas (E5) que permita reinyectar aguas tratadas al acuífero. El balance promedio futuro es positivo con 49,6 L/s, siendo la mejor alternativa ante las necesidades de disminución del volumen del acuífero. No obstante, es importante considerar los costos que requiere la implementación de una planta de tratamientos y la impulsión del caudal al subsuelo.

En segundo lugar, está el escenario de Gestión y Mitigación (E1), donde se puede ver que hay un balance negativo de 14,6 L/s promedio futuro, existiendo una diferencia de 21,6 L/s con el balance del escenario base periodo futuro. Sin embargo, hay que considerar que bajo este escenario no se plantean fuentes alternativas de agua ante la disminución de un 50% en la extracción de agua subterránea, por lo que genera aumento en las brechas hídricas relacionadas a las demandas requeridas o bien un costo económico en pérdidas que produciría en términos de producción.

Como tercera alternativa es la implementación de una planta desaladora de agua de mar con una fuente de abastecimiento de 400 L/s (E2-2). Este escenario entrega una fuente alternativa de agua ante la demanda requerida por la empresa sanitaria para abastecer a la población urbana de agua potable, generando una disminución de la extracción de agua subterránea y también un impacto positivo en el acuífero dado que su balance futuro alcanza a disminuir en 19,8 L/s respecto al escenario base futuro. No obstante, el proyecto inicial plantea una desalinización de agua de mar con un aporte de 200 L/s a la demanda requerida de agua potable urbana, la cual genera una disminución en la brecha hídrica en relación con el periodo base futuro, pero no produce un impacto positivo en el balance del acuífero, sino manteniendo un muy similar balance negativo que presenta el acuífero en un escenario futuro sin implementación de obras y medidas de gestión.

Es cuarta opción esta la implementación de barreras de gomas para implementación de piscinas de infiltración ante crecidas del río San José (E4). Esta medida permite generar una recarga en el acuífero que disminuye 14 L/s el balance del acuífero respecto al escenario base futuro. Además, es importante conocer bien los potenciales sectores de ubicación sin provocar daños o efectos negativos, tanto económicos o de riesgos, en sectores poblados y agrícolas.

La última opción es la implementación del Embalse Livilcar (E3). Si bien presenta una diferencia de 10 L/s menos sobre el balance negativo del escenario base futuro, no está exento de ser una obra más costosa en mantención y operación, que la implementación de piscinas de infiltración en la zona media y baja de la subcuenca del río San José.

Además, no muestra ser una solución que disminuya la brecha hídrica ante las demandas requeridas para el periodo futuro.

Por otra parte, en la Tabla 5-13 y en la Figura 5-27, se presenta un resumen de las brechas de demanda hídrica por cada escenario de modelación. Se observa que la brecha histórica para los dos principales usos del acuífero es de 0,18 Hm³, mientras que para el escenario futuro se proyecta una brecha de 1,46 Hm³.

Como último punto, es importante recalcar que las alternativas presentadas debiesen ser implementadas en el corto plazo para evitar un deterioro de la calidad de aguas que signifiquen problemas mayores en la producción agrícola que se desarrolla en el valle de Azapa.

Tabla 5-12. Balance Hidrogeológico de escenarios de gestión y mitigación ante el descenso de volumen en el acuífero del valle de Azapa.

Entradas (L/s)	Histórico	E0 2020- 2050	E1 2020- 2050	E2-1 2020- 2050	E2-2 2020- 2050	E3 2020- 2050	E4-1 2020- 2050	E4-2 2020- 2050	E5 2020- 2050
Recarga desde Río San José (River)	16,9	15,5	15,5	15,5	15,5	16,4	15,5	15,5	15,5
Infiltración San José	314,7	273,6	273,6	273,6	273,6	324,0	273,5	219,2	273,6
Recarga Lateral	189,5	170,1	170,2	170,2	170,2	168,9	293,4	244,2	570,1
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	579,2	503,7	587,1	590,5	581,1	590,2	579,7	590,2
Entrada desde el Mar	19,7	156,9	13,4	62,4	14,5	138,8	139,4	174,9	39,0
Total	1.050,8	1.195,6	976,67	1.109,07	1.064,6	1.229,5	1.312,3	1.233,8	1.488,6
Salidas (L/s)	Histórico	E0 2020- 2050	E1 2020- 2050	E2-1 2020- 2050	E2-2 2020- 2050	E3 2020- 2050	E4-1 2020- 2050	E4-2 2020- 2050	E5 2020- 2050
Afloramientos	276,6	228,8	260,1	209,2	234,9	250,0	245,1	257,5	359,2
Bombeos	840,1	1.001,9	629,2	926,6	778,3	1.004,1	1.088,0	997,9	1.061,6
Salida al mar	82,4	1,0	101,9	9,5	67,9	1,4	1,1	0,8	18,1
Total	1.199,3	1.231,	991,3	1.145,4	1.081,1	1.255,5	1.334,3	1.256,4	1.439,0
ΔAlmacenamiento	-148,4	-36,3	-14,6	-36,4	-16,4	-25,9	-22,0	-22,5	49,5
Error balance	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 5-13. Resumen de brechas hídricas (Hm³) por cada escenario de gestión para el acuífero del valle de Azapa.

Demand a	Histórico	E0		E1		E2-1		E2-2		E3		E4		E5		E6	
		Futuro	Var %	Futuro	Var %	Futuro	Var %	Futuro	Var %	Futuro	Var %	Futuro	Var %	Futuro	Var %	Futuro	Var %
AGR	0,12	0,92	649%	1,79	96%	0,84	-8%	0,81	-12%	0,90	-1%	0,92	0%	0,81	-12%	0,81	-12%
APU	0,06	0,54	852%	0,20	-64%	0,28	-48%	0,17	-69%	0,55	0%	0,56	3%	0,46	-16%	0,28	-48%
Total	0,18	1,46	714%	1,99	36%	1,12	-23%	0,97	-33%	1,45	-1%	1,48	1%	1,26	-13%	1,09	-26%

Fuente: Elaboración propia (2022).

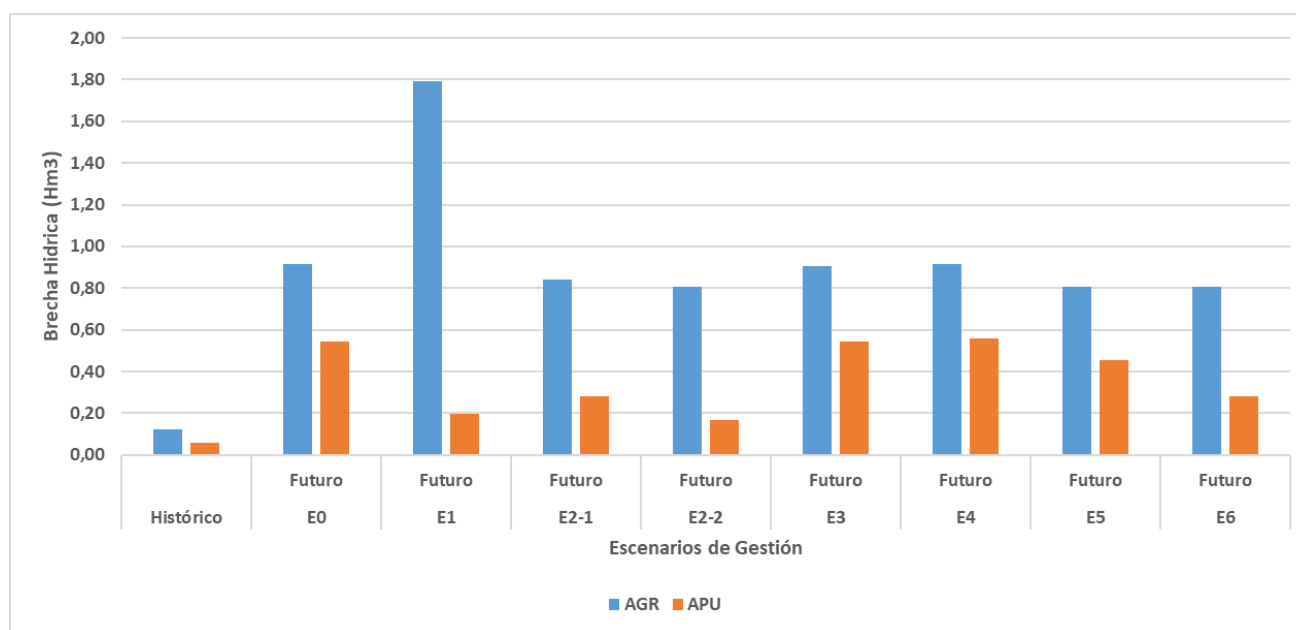


Figura 5-27. Resumen comparativo de brechas hídricas (Hm³) por cada escenario de gestión para el acuífero del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.3.7 Unión de Escenarios (E-6): Instalación de Planta Desaladora y Planta de Tratamiento de Aguas Servidas

Como anteriormente se describió, los escenarios que logran disminuir más la brecha hídrica a los distintos usuarios de agua y también generar un menor impacto a la disminución del volumen del acuífero hacia el futuro son la instalación de una planta de tratamientos de aguas servidas que permita reinyectar las aguas al acuífero (en sectores bajos) y la instalación de una planta de tratamiento de aguas superficiales tal como agua salobre o con una alta concentración de minerales como fuente hídrica alternativa ante la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo.

Dentro de la modelación se diseñó un escenario donde se instala el proyecto de reutilización de agua potable, que inyecta 400 L/s al acuífero, y el proyecto de planta desaladora que aporta un caudal de 200 L/s a la demanda de agua potable. Dentro de este escenario no se contempla una gestión de los distintos propietarios para implementar un prorrateo de los derechos de agua subterráneo que poseen. Los principales resultados se muestran en la Figura 5-28.

Como resultado principal, el balance hidrogeológico muestra que la implementación de ambas obras genera un tenue aumento en la diferencia de almacenamiento durante el futuro, respecto al escenario de gestión número 5, cuyo aumento en el presente escenario es de 2 L/s adicionales. Desde las recargas, el sector que más aumenta es la infiltración lateral del acuífero relacionado a los pozos de inyección que recargan el caudal de aguas servidas con tratamiento.

También se observa una mayor recarga desde el sector agrícola del valle de Azapa, existiendo un aumento de 11 L/s en promedio. En cuanto a las recargas desde el río San José y la infiltración en la subcuenca, estas se mantienen iguales en el escenario base futuro y el escenario con instalaciones de obras de mitigación. En las salidas, se registra una disminución de 68 L/s promedio en los bombeos, dado la presencia de una fuente externa. A su vez, los afloramientos de aguas subterráneas también aumentarán en promedio 130 L/s en el periodo futuro.

Con respecto a la intrusión marina en el acuífero, se muestra que hay un significativo aumento de las salidas de agua dulce al océano, cuyo promedio futuro es 85 L/s, provocando frenar la entrada de agua salada al acuífero a magnitudes de 13 L/s.

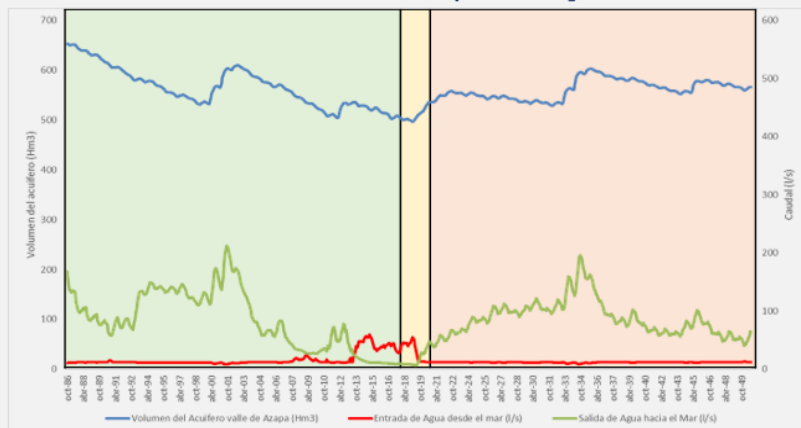
Desde el punto de vista de la brecha hídrica, hay una significativa reducción del volumen de agua que no se podía proveer. Principalmente durante los meses de verano, donde la brecha hídrica es mayor, esta logra disminuir en torno a un 25% en relación con el periodo base futuro. Por otra parte, los meses de invierno muestran que hay una reducción de la brecha hídrica en torno al 33% en meses como junio y julio.

Los resultados en el nivel de profundidad de los pozos de APR mantienen el comportamiento general presentado en el escenario 5. No obstante, existe una disminución aún mayor en el pozo del APR 2 que mantiene una tendencia muy semejante al APR 1 durante el periodo futuro, donde el promedio de profundidad es de 16 metros. Por otro lado, la APR 3 muestra un afloramiento del agua subterránea, cuyo promedio de altura es en torno a los 1,6 metros. En cuanto al APR 4 existe una disminución en su profundidad promedio respecto al Escenario 5, con una diferencia de 1 metro.

ESCENARIOS DE GESTIÓN 6

Escenarios Combinados: Reusó e inyección de Aguas Servidas más Tratamiento de Aguas superficiales (200 l/s)

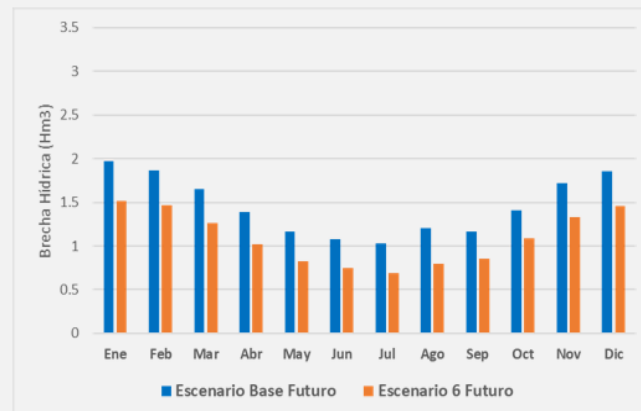
Variación del Acuífero – Entradas y Salidas de Agua al Mar



Balance Hidrogeológico del acuífero del valle de Azapa

Entradas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Recarga desde Río San José	16,9	14,9	18,2	13,6	15,6
Infiltración SC San José	314,7	256,4	362,6	202,1	273,7
Recarga Lateral	189,5	470,5	692,0	548,1	570,2
Recarga desde ZR + Inf Canal Azapa	509,9	588,7	585,4	597,7	590,6
Entrada desde el Mar	19,8	13,7	13,2	14,0	13,6
Total	1.050,9	1.344,2	1.671,4	1.375,4	1.463,7
Salidas (l/s)	Histórico	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Promedio Futuro
Afloramientos	276,7	292,1	519,8	366,7	392,9
Bombes	840,2	912,9	925,4	961,6	933,3
Salida al mar	82,4	80,5	112,5	64,8	85,9
Total	1.199,3	1.285,5	1.557,8	1.393,1	1.412,1
ΔAlmacenamiento	-148,4	58,7	113,7	-17,7	51,6
Error balance (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brecha Hídrica Futura del Total de Demandas – SC Río San José



Nivel de disponibilidad hídrica en pozos de Agua Potable Rural – SC río san José

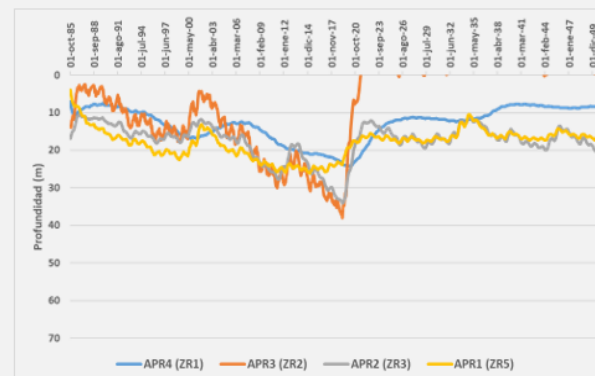


Figura 5-28. Principales resultados del Escenario de Gestión E-6.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Los resultados descritos anteriormente, principalmente las brechas de demanda hídrica, permiten ver que para enfrentar la escasez hídrica no solo se requeriría la instalación de nuevas obras que permitan captar agua de otras fuentes o inyectar aguas tratadas, sino que es fundamental también una coordinación y gestión entre diferentes actores que provoquen un uso sustentable del recurso hídrico, acompañado de políticas que determinen prioridades ante distintas realidades locales y también aumentar la fiscalización y control a los titulares de derechos de agua, logrando así mejorar la estimación de extracción ilegal de aguas que actualmente presentan una mayor complejidad de ser detectadas y pueden provocar que los escenarios futuros estén más cerca de lo esperado.

5.4 ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD

La sustentabilidad de los acuíferos ha sido abordada por la Dirección General de Aguas con el fin de estimar el volumen de explotación máximo sustentable, parámetro básico para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Para ello, y según la doctrina de DGA desarrollada en el "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos" (Resolución Exenta DGA N°3504/2008) son aplicados cinco criterios a cada Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) que evalúan la demanda histórica y determinan la continuidad de explotación o restricción en el acuífero. Los criterios definidos por la DGA son:

1. Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero
2. Interferencia río – acuífero
3. Satisfacción de la demanda
4. Pozos secos
5. Afección a sectores abiertos

La aplicación de los criterios fue definida para un único SHAC en el modelo WEAP – MODFLOW Valle Azapa. En el Anexo J.6 se presentan las planillas con los resultados de cada criterio de sustentabilidad, en el Anexo H sección 1.7 se presenta el detalle metodológico de cálculo con mayor detalle.

Dadas las características propias del área de estudio, se estiman los resultados para los tres primeros criterios. El criterio cuatro no aplica pues se desconoce la profundidad de los pozos que existen en el valle y en el caso del criterio cinco no aplica pues existe solo un SHAC, no pudiendo demostrar afectación sobre otros SHAC abiertos. Es importante mencionar que SHAC del acuífero del valle de Azapa no cumple con ningún criterio de sustentabilidad evaluado, lo que se condice con su condición de zona de prohibición para la entrega de nuevos DAA subterráneos (Resolución DGA N°202, fecha 19 de marzo de 1996).

- Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero

Tener un volumen del acuífero con un descenso sostenido significa que en un periodo de 50 años el volumen total del acuífero no debe descender más del 5% (Ecuación 5-1). En caso de que el acuífero no cumpla con esa condición, será considerado con afección y se deberá dejar de entregar permisos de extracción.

En el caso que los descensos sean sostenidos y no se cumpla la condición de cierre del acuífero, se deberán aumentar las extracciones hasta alcanzar la condición del 5%.

$$(V_0 - V_{50}) / V_0 < 0,05$$

Ecuación 5-1

Donde:

V_{50} = Volumen del acuífero a los 50 años de operación indicado por el modelo

V_0 = corresponde al volumen inicial en el acuífero antes de la operación del modelo.

Para el acuífero modelado del valle de Azapa, los resultados de la aplicación del criterio 1 de sustentabilidad se muestra en la Tabla 5-14, donde se compara la variación histórica actual y el caudal que se debe extraer para cumplir con el concepto de sustentabilidad DGA.

Tabla 5-14. Demanda Requerida versus Demanda Entregada para consumo de producción Agrícola en Acuífero del valle de Azapa (1986-2050).

Bombeo Total (L/s)	Volumen Inicial Acuífero valle de Azapa (Hm³)	Volumen final Acuífero valle de Azapa (Hm³)	Años de Operación	Delta %
840	667 (año 1986)	503 (año 2018)	32 años	23%
91	609 (año 2000)	576 (año 2050)	50 años	5%

Fuente: DGA-DICTUC (2020).

Para poder cumplir con el primer criterio de sustentabilidad de los acuíferos, debería extraerse aproximadamente un 10,8% del bombeo actual (91 L/s). Tal situación, en la práctica, resulta impracticable debido al daño a la producción agrícola e industrial que produciría la zona, sin considerar que la cuenca del río San José importa agua desde cuencas vecinas, como por ejemplo la inyección de caudal del río Lauca a la producción agrícola y también la extracción de caudal desde la cuenca del río Lluta para el abastecimiento de agua potable urbana.

Es importante mencionar que la DGA estimó el caudal de explotación sustentable del acuífero en 700 L/s, basados en el Informe Técnico "Modelo de Simulación de los Recursos Hídricos en el valle de Azapa" (DGA-AC, 1989). Las diferencias respecto de los resultados presentados en DGA-DICTUC (2020) y el presente estudio radican en las distintas metodologías empleadas en ambos casos. Mientras que en DGA-DICTUC (2020) se consideró un balance hídrico histórico para la estimación de la explotación sustentable, el estudio DGA-AC (1989) basa el resultado en un análisis exploratorio del comportamiento del acuífero frente a distintos bombeos observados (DGA, 1996). El estudio DGA-DICTUC (2020), en este sentido, sugiere que ante tal escenario tiene más sentido preservar la calidad del agua del acuífero ante el ingreso de agua salobre desde el Océano Pacífico, a través de distintos escenarios de gestión, más que restringir de forma irreal los bombeos históricos registrados desde el acuífero.

- Criterio 2: Interferencia río acuífero

Este criterio tiene como objetivo evitar la afectación de los recursos superficiales ya comprometidos por parte de nuevos DAA subterráneos. El grado de interacción debiera ser menor al 10% de los flujos superficiales pasantes en cada área analizada. El flujo

superficial se aproxima a partir del caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

La afección sobre el cauce superficial se define como ΔQ , término compuesto por dos variables (Ecuación 5-2): 1) el aumento de infiltración en el sector acuífero debido al aumento de la explotación, 2) la disminución de los afloramientos del río.

$$\Delta Q \leq 10\% Q_{anual,85\%}$$

Ecuación 5-2

En la Tabla 5-15 se presenta los resultados del criterio tres, el que fue evaluado contemplando el escenario base y también los distintos escenarios de gestión presentados en la sección 5.3). Se observa que no se cumple con el criterio de no interferencia entre río y acuífero para ningún escenario de gestión.

Tabla 5-15. Resultado criterio interferencia río acuífero para el SHAC del acuífero del valle de Azapa, para los distintos escenarios de gestión.

Escenario	Q85 Promedio anual (m ³ /s)	10% Q85 (m ³ /s)	(ΔQ) Disminución en infiltración de ríos (m ³ /s)	% Interferencia 1986-2050	¿Cumple criterio?
E0	0,020	0,002	0,293	14840	No
E1	0,020	0,002	0,292	14786	No
E2-1	0,020	0,002	0,293	14849	No
E2-2	0,020	0,002	0,292	14807	No
E3	0,020	0,002	0,293	14867	No
E4	0,020	0,002	0,292	14805	No
E5	0,020	0,002	0,288	14613	No
E6	0,020	0,002	0,287	14551	No

Fuente: Elaboración propia (2022).

- Criterio 3: Satisfacción de la demanda

Este criterio busca, para cada SHAC (en este caso solo un SHAC), que la demanda sea satisfecha en un porcentaje del 95% en promedio, para el periodo de análisis, según la oferta disponible. En otras palabras, se busca que la demanda subterránea del SHAC sea suplida en un 95% en promedio para el periodo de análisis, según la Ecuación 5-3.

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

Ecuación 5-3

En la Tabla 5-16 se presentan los resultados del criterio tres de satisfacción de demanda. Se observa que, el porcentaje de satisfacción tanto en el escenario base como en los diferentes escenarios de gestión no supera el 65% de satisfacción y, por tanto, no se cumple con el criterio tres de sustentabilidad.

Tabla 5-16. Resultado criterio satisfacción de la demanda para el SHAC del acuífero del valle de Azapa, para los distintos escenarios de gestión.

Escenario	Oferta/Demanda (%)	Cumple Q oferta > 95% Q demanda? (Años 1985-2050)
E0	63,0	No
E1	55,1	No
E2-1	61,3	No
E2-2	57,7	No
E3	63,1	No
E4	62,9	No
E5	64,8	No
E6	61,6	No

Fuente: Elaboración propia (2022).

5.5 BRECHAS Y MEJORAS A LA MODELACIÓN

La modelación hidrológica e hidrogeológica diseñada en el presente plan prioriza mantener el enfoque del estudio previo realizado por DGA-DICTUC (2020), donde evalúan distintos escenarios de gestión ante la utilización del recurso hídrico principal que poseen la cuenca del río San José, siendo este el acuífero del valle de Azapa y la ciudad de Arica.

A modo de reiteración, el estudio mencionado anteriormente realizó un diagnóstico del acuífero en la zona del valle de Azapa y ciudad de Arica, ubicado dentro de la cuenca del río San José. No obstante, en virtud de representar un modelo más cercano a las dinámicas hidrológicas de la cuenca, se modelaron las entradas de agua a nivel superficial y subterráneo de la zona alta (altiplano).

Lo anterior significó separar el modelo superficial en dos diferentes modelos, con escalas de tiempo distintas, debido principalmente por las diferencias en las características climáticas que se presentan en la zona alta y en la zona baja producto de la geografía física de la cuenca y su nivel de altitud. A modo de ejemplo, en el sector altiplano de la cuenca existen mayores niveles de altitud que generan temperaturas más bajas y precipitaciones más intensas a las registradas en la zona del valle y costa, donde las temperaturas son mayores y las precipitaciones muy escasas.

En consecuencia, la primera brecha detectada en la modelación es la imposibilidad de representar en un solo modelo las dinámicas climáticas e hídricas que se presentan en una cuenca producto de la incompatibilidad de poder representar escalas temporales distintas que caracterizan un fenómeno hídrico.

Una segunda brecha, también mencionada por el trabajo realizado por DGA-DICTUC (2020), es la ausencia de mayores datos meteorológicos y fluviométricos registrados en la cuenca del río San José. Esto impidió un mejor ajuste de las forzantes climáticas en las zonas del altiplano. Así también, en el mismo sector, generó que la calibración del modelo Azapa Alto muestre malos resultados de los indicadores NSE y KGE al no encontrarse una relación entre los datos de escorrentía simulados a los datos observados, como es el caso de la estación fluviométrica Ticnamar en Ticnamar. En la zona del valle de Azapa tampoco se cuenta con estaciones fluviométricas en el río San

José aguas debajo de la bocatoma del canal de Azapa lo que genera mayor incertidumbre del modelo de la oferta superficial.

Con respecto a los datos grillados del CR2 que fueron utilizados para representar las características climáticas de la cuenca, se tuvo que realizar una serie de ajustes para poder obtener un comportamiento más cercano a los datos meteorológicos observados. Uno de ellos fue aplicar un Factor de amplificación a la serie de precipitaciones en momentos determinados de la serie de tiempo histórica debido a que se registran episodios con altas precipitaciones dentro de un territorio que se caracteriza por poseer un clima desértico y semiárido en la zona media y baja de la cuenca. No obstante, estas modificaciones buscan disminuir el nivel de incertidumbres que poseen los datos climáticos en la zona, pero de igual forma son parte de una brecha en la modelación el no poder contar con datos climáticos más certeros.

En relación con lo anterior, una tercera brecha de la modelación es la incertidumbre en la proyección futura de las forzantes climáticas. Por las características climáticas de la cuenca que se mencionaron anteriormente, existe mayor incertidumbre en la proyección de cambio climático simulada por los modelos de circulación general (GCM) al no existir una clara relación entre las forzantes climáticas y otros factores, como, por ejemplo, la altitud. Es por estos motivos particulares del área de estudio que se optó por aplicar el método *Delta Change* para proyectar las forzantes climáticas a futuro, en donde se aplicó un porcentaje de variación a la serie de datos históricos, donde se mantiene el mismo comportamiento histórico en la serie de tiempo futura, existiendo una variación de la magnitud de las forzantes climáticas.

Por consiguiente, la proyección futura de las forzantes meteorológicas debe ser entendida como una tendencia posible del futuro, que, a su vez, influye directamente en la dinámica hídrica de la cuenca a nivel superficial y subterráneo. Consecuentemente, es fundamental continuar evaluando otras metodologías de proyección futura en la cuenca del río San José con mayores datos recopilados por las estaciones meteorológicas presentes.

Como cuarta brecha, y dentro de las mejoras identificadas para el modelo acoplado del acuífero del valle de Azapa está la actualización de los datos de las distintas demandas de agua (agua potable, agricultura, industrias). Principalmente se debe actualizar la población que se abastece por agua potable rural (APR) dentro de la subcuenca del río San José, debido a que se identificó que la población que se abastece de APR en el modelo acoplado no coincide con la población que habita dentro de los límites de la subcuenca del río San José identificada por el INE en el último Censo de población el año 2017. Lo anterior se debe relacionar con los desafíos relacionados a la Seguridad Hídrica que están en discusión actualmente.

Por otro lado, también es relevante actualizar en el modelo el comportamiento que posee la actividad industrial de la zona, ya que a falta de información se tuvo que definir de forma constante la demanda durante el periodo histórico en base a un estudio elaborado por DGA-ICASS (2016). También, es pertinente considerar los nuevos datos que serán publicados por el Censo silvoagropecuario este año, que permitirán actualizar las superficies agrícolas y las diferencias en sus distintos tipos de cultivo.

Otro aspecto importante que requiere una mayor profundidad de estudio es la intrusión marina que se detecta desde el modelo acoplado del acuífero del valle de Azapa, representando la quinta brecha. A partir de distintos testimonios por parte de los actores locales, no se reconoce la presencia de agua salobre en el acuífero. No obstante, los

agricultores mencionan que es necesario mezclar aguas superficiales y subterráneas para eliminar contaminantes de las aguas subterráneas. Por lo tanto, es relevante ahondar en estudios que permitan conocer la dinámica de agua en el borde costero a nivel subterráneo, lo que permitirá perfeccionar un modelo de aguas subterráneas.

Sin embargo, el comportamiento del acuífero en el borde costero está directamente relacionado al volumen que se encuentra almacenado en él, junto también, a la extracción de agua subterránea exigida. Actualmente, el último punto mencionado posee la dificultad de ser realmente conocido, debido a la extracción ilegal de aguas subterráneas en el área de estudio.

En el presente modelo, una sexta brecha identificada tiene relación a la extracción subterránea que fue estimada de forma indirecta en base a los derechos de agua subterránea catastrados y la medición de pozos de observación registrados en la DGA. La razón de la estimación se debe al desbalance en el acuífero que se produce en el modelo al considerar el catastro de derechos de agua subterránea que posee la DGA, provocando que no exista un ajuste de los niveles observados en los pozos. Así también, el volumen inicial del acuífero definido en el modelo (Anexo H acápite 5.4.4) se estimó en virtud de lograr que los niveles simulados se parezcan a los observados (Figura 5-8, Figura 5-9, Figura 5-10, Figura 5-11). Es por ello, la urgencia de un monitoreo efectivo de los pozos a los usuarios titulares de derecho. A su vez, conocer con mayor realidad la extracción de los usuarios de agua que cuentan con derechos, permitiría estimar de mejor manera la extracción ilegal en el área de estudio.

En base a lo anterior, la fiscalización y medición de los pozos de los distintos usuarios con derechos de agua subterránea es fundamental para mejorar la estimación de las extracciones ilegales desde el acuífero del valle de Azapa. Dado que lo anterior aún no es posible de aplicar, no se incorporó dentro del escenario base una estimación de la extracción ilegal histórica y futura. Por lo tanto, los resultados presentados durante el periodo futuro pueden anticiparse en el tiempo o ser aún más malos.

Actualmente en el valle de Azapa, está la tramitación y futura operación la Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS) la cual tendría dentro de sus responsabilidades mantener el registro de extracción subterránea de los usuarios con derecho de aprovechamiento de agua. Con la puesta en marcha de esta entidad, aumenta el conocimiento de operación por parte de los usuarios en el acuífero y por consiguiente existe una nueva fuente de información que permitirá alimentar al modelo hidrológico.

En este mismo sentido, la conformación de la CAS permite conocer una mejor gestión del recurso hídrico subterráneo, la que permitiría modificar las reglas de operación actuales del modelo hidrológico, ya que actualmente el modelo prioriza la extracción de aguas por parte de la empresa sanitaria de agua potable y las diferencias comunidades de agua potable, estando por sobre la extracción de agua para la agricultura y actividad industrial. Esto ha generado que la satisfacción de las comunidades de agua potable rural sea de un 100%, lo que en la práctica no es de tal forma. Otra regla de operación actual del modelo es la sustitución de la fuente hídrica subterránea al ya no existir mayor disponibilidad hídrica a nivel superficial, lo que en la práctica los usuarios usan ambas conjuntamente. Por tanto, las reglas de operación en el modelo afectan la estimación de las brechas hídricas de distintas demandas, y en consecuencia los resultados.

Un tema muy relevante identificado en el modelo acoplado es la creación de celdas secas desde el modelo subterráneo, la que constituye la séptima brecha de modelación. La creación de celdas secas ocurre cuando el traspaso de caudales entre el modelo

superficial y subterráneo generan que el nivel freático del acuífero sea menor al fondo de la celda, dejándola inactiva o “seca” por el resto del periodo de simulación. El motor de cálculo MODFLOW- 2005, que posee el modelo acoplado del acuífero del valle de Azapa, no genera la posibilidad de volver activar una celda que quedó inactiva, provocando la restricción de disponibilidad hídrica al requerimiento de una demanda, lo que se traduce en una brecha de demanda hídrica.

El escenario base del modelo acoplado genera un total de 17 celdas secas. Dentro del periodo histórico (1986-2018) se generan 7 celdas secas, de las cuales 4 afectan a 3 *catchment* agrícolas y 2 nodos de demanda de agua potable urbana. En el periodo futuro (2019-2050), 10 son las celdas secas generadas, donde 4 limitan la disponibilidad hídrica a 4 *catchment* agrícolas y 2 nodos de agua potable urbana. Este resultado del modelo es uno de los factores que influyen directamente en los resultados presentados anteriormente en el subcapítulo 5.2. También es la razón principal que el escenario 4 (Barreras de Goma) muestre un aumento del 1% de las brechas hídricas respecto al escenario base, producto de una anticipación temporal en la creación de celdas secas.

La octava brecha de modelación identificada, relacionada a la creación de celdas secas, es la corrección de modelación realizadas al escenario que no contempla un canal Azapa entubado a futuro, debido a las diferencias de entrega de agua que existen con el escenario base (Anexo H, acápite 6.1.3). La solución requerida para abordar los problemas de modelación subterránea es la actualización del motor de cálculo de MODFLOW (Anexo H acápite 4.2.1). Los autores Hunt & Feinstein (2012) discuten sobre el problema generado por los modelos subterráneos al secarse una celda y proponen utilizar una versión de MODFLOW más actualizada tal como MODFLOW- NWT, principalmente en entornos naturales tradicionalmente más difíciles (Hunt & Feinstein, 2012). El estudio “Desarrollo de herramientas para el análisis de gestión en el marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos” elaborado por DGA (2019) menciona que en las versiones de MODFLOW que pueden ser usadas en WEAP son MODFLOW-2000, MODFLOW-2005 y MODFLOW-NWT (DGA, 2019). Por lo tanto, se recomienda que en un futuro próximo los encargados de la modelación logren resolver este punto en beneficio de disminuir la incertidumbre de los resultados que el modelo posee.

Un aspecto que se intentó corroborar al comparar el escenario base y el escenario sin entubación del canal de Azapa es la declaración entregada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) el año 2015 y 2018 donde se indica que entubar el canal de Azapa permitiría a los regantes recuperar 120 L/s anuales producto de pérdidas por el transporte de agua al aire libre (MOP, 2015) (MOP, 2018). Como resultado de la modelación, la diferencia entre de las pérdidas por infiltración y evaporación de agua desde el canal de Azapa fueron de 72 L/s. El resultado anteriormente indicado muestra una brecha de modelación en la representación de los beneficios del entubamiento, en comparación a la situación actual (sin entubamiento) debido a que en el modelo con el canal Azapa sin entubar la satisfacción de la demanda al no ser satisfecha por el caudal superficial aumenta la extracción de agua subterránea.

Para lograr obtener un valor cercano a lo estimado por el MOP, se identificó que aumentando el porcentaje de evaporación del canal de Azapa principal a 0,8%, se genera una diferencia en pérdidas de agua de 119 L/s entre ambos escenarios. No obstante, modificar el porcentaje de evaporación en ambos escenarios produce un cambio en el balance del acuífero, principalmente en el periodo histórico, producto de una menor recarga de este por infiltración. Por tanto, se sugiere que los profesionales encargados de mantener y modificar el modelo hidrológico puedan revisar a futuro los resultados del

modelo y sus escenarios con esta modificación en el porcentaje de evaporación del canal de Azapa.

En último lugar, y como novena brecha, es importante mencionar que dentro de la modelación no se evalúan los costos económicos ni el potencial impacto ambiental que generan las distintas obras planteadas para disminuir las brechas hídricas. Estos aspectos son evaluados en mayor detalle en el capítulo 7.2.

6. ACCIONES

El Plan de Acción del acuífero del valle de Azapa que aborda las principales problemáticas hídricas comentadas y analizadas en los capítulos precedentes, se presenta a continuación. 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. En primer lugar, se detalla tanto el marco conceptual y los ejes estratégicos que fundan en Plan de Acción, junto a la metodología de árbol de problemas utilizada para dar coherencia a pertinencia de las acciones propuestas. Posteriormente, se presenta un detalle de las 22 acciones propuestas en el contexto del PEGH, divididas en una tipología de cuatro categorías de acciones.

6.1 SEGURIDAD HÍDRICA PARA EL ACUÍFERO DEL VALLE DE AZAPA

En el país, y durante el último año (2022), se han aprobado normativas tendientes a 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 (PERH) (que reemplazarán los PEGH) 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.

Para efectos del plan, se entenderá por Seguridad Hídrica como el “acceso al agua en un nivel de cantidad y calidad adecuada, 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” (MMA-LAT, 2017). En la Figura 6-1 se presenta un esquema resumen de las interrelaciones entre el concepto de Seguridad Hídrica como una meta a alcanzar, la gestión del agua como el medio para alcanzar la Seguridad Hídrica (a través de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, por ejemplo) y cuatro factores que condicionan el logro de la Seguridad Hídrica en alguna cuenca en particular. En el Anexo F sección 6.1 se presenta una descripción más detallada de los conceptos y del enfoque metodológico general basado en la seguridad hídrica.

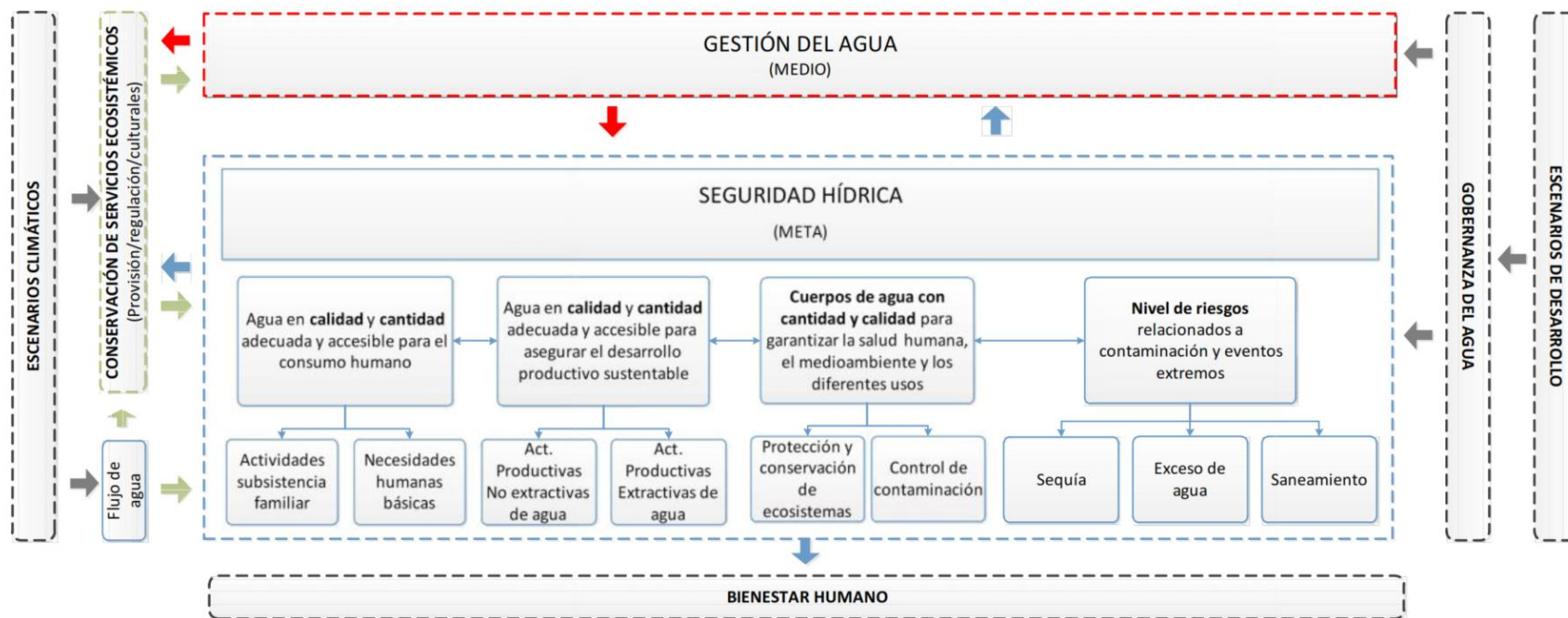


Figura 6-1. Esquema resumen del marco conceptual de seguridad hídrica a utilizar de base para estructurar el plan de acción.

Fuente: MMA-LAT (2017).

A partir de lo anterior, se delimitan siete ejes estratégicos del Plan de Acción, en línea con la definición de Seguridad Hídrica, de los factores condicionantes, y de los objetivos prioritarios de los PEGH.

Eje 1. Seguridad hídrica para el consumo humano: Agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para el consumo humano.

Eje 2. Seguridad hídrica para las actividades productivas: Agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para asegurar el desarrollo productivo sustentable

Eje 3. Seguridad hídrica para los ecosistemas: Cuerpos de agua con cantidad y calidad para garantizar la salud humana, el medioambiente y los diferentes usos

Eje 4. Seguridad hídrica ante eventos extremos y contaminación: Aumentar los niveles de resiliencia para disminuir la vulnerabilidad de la población ante episodios de eventos extremos de exceso y déficit de agua.

Eje 5. Balance hídrico: Garantizar disponibilidad de agua, en cantidad, de manera sostenible para diferentes usos, incluido los ecosistemas.

Eje 6. Gobernanza: Fortalecer los organismos participantes de la gobernanza e implementar medidas que faciliten la gobernanza para el Plan Estratégico.

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.

6.2 ÁRBOL DE PROBLEMAS Y TIPOLOGÍA DE ACCIONES

Las acciones descritas y analizadas en el presente capítulo responden a una brecha y/o problema identificado en el diagnóstico previo (capítulos 2, 3, 4 y 5), coherentes con la realidad hídrica del valle de Azapa y, en específico, del acuífero. El análisis de la relación entre la problemática central, las causas de dichas problemáticas y las acciones posibles que aborden dichas causas, se basa en la herramienta del árbol de problemas de la metodología de marco lógico (Ortegón, Pacheco y Prieto, 2005), que permite analizar una situación o problemática con sus causas y efectos principales, y a partir de ésta identificar posibles acciones que permitan avanzar en la solución del problema central (CCG, 2019). Para la delimitación de acciones (soluciones propuestas), se construyeron brechas síntesis, las que resumen las causas principales del problema central pertinentes a cada acción, y de este modo simplificar la justificación de cada acción propuesta (Figura 6-2) (Anexo F 6.3).

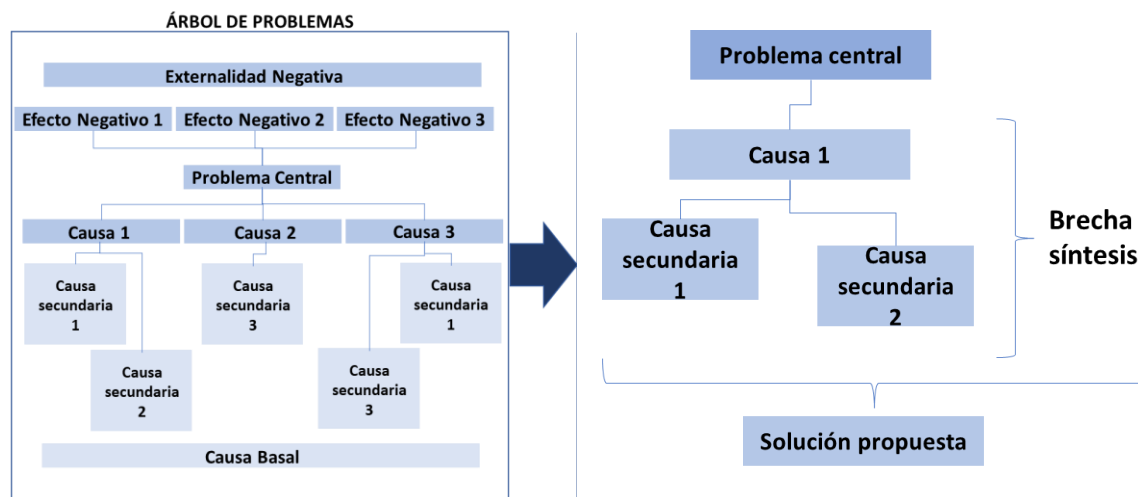


Figura 6-2. Esquema resumen del árbol de problemas y soluciones.

Fuente: Elaboración propia (2022).

En la Figura 6-3 se presenta el esquema de árbol de problemas empleado en la elaboración del plan de acción del presente PEGH. El árbol de problemas fue construido y sugerido por el equipo de trabajo, y posteriormente fue validado y retroalimentado durante las actividades participativas. De hecho, fue la base para el primer ciclo de talleres participativos (Anexo I sección 7.3).

La problemática central presentada en este esquema, y que es reconocida por los actores involucrados en la gestión y explotación del acuífero del valle de Azapa, fue el aumento sostenido de la escasez de agua subterránea, tanto en la actualidad como en relación con las proyecciones futuras, situación que afecta la seguridad hídrica del acuífero del valle de Azapa. Ante esto, se han generado respuestas administrativas, como la declaración del acuífero como zona de prohibición desde 1996, sin embargo, desde ese año a la fecha se ha evidenciado un aumento en la demanda de agua y disminución de la oferta, sin mostrar grandes impactos esta declaración. Durante las actividades participativas se mencionó, al respecto, que se otorgaron DAA fuera de la delimitación acuífera declarada en zona de prohibición, y luego se pidió el traslado de dichos DAA dentro de la zona de prohibición.

Los principales efectos que ya se viven en el territorio tienen que ver con un sostenido descenso de los niveles de pozos, pozos "colgados" y la profundización de pozos. Además, se ha visto en el último tiempo la llegada de camiones aljibes para uso de agua potable rural, la activación del "mercado de aguas" a través del arriendo y compra de DAA, y una creciente conflictividad entre usuarios, en especial entre los grandes usos del acuífero y del valle de Azapa: Agua Potable Urbana y Agricultura. Todos estos efectos que se han ido identificando repercuten finalmente en la afectación de la calidad y sistemas de vida, de los sistemas naturales y de los sistemas socioeconómicos y culturales.

Dentro de las causas identificadas del aumento sostenido de la escasez, y de la afectación de la sustentabilidad futura del acuífero, se pueden diferenciar aquellas provenientes de la oferta de agua, de la demanda y de la gestión. En el caso de la oferta,

existe una incertidumbre en la precipitación futura y eventos extremos desconociéndose si se contarán con los aportes históricos para la recarga del acuífero. Asimismo, la promoción de la eficiencia hídrica, bajo una mirada parcial o sectorial, no integrada que no considera sus efectos en la recarga, por parte de los servicios públicos responsables, puede afectar la recarga por ineficiencia en conducción, distribución y riego. También en el caso de la oferta, existe un desconocimiento o poca visibilización de servicios ecosistémicos (del tipo de provisión, soporte y regulación) ligados a los recursos hídricos en la cuenca que repercute en una toma de decisiones poco sustentable. Ejemplo de ello es el hecho de que la calidad de aguas subterráneas está disminuyendo consistentemente hace años, tanto por el aumento de concentración de contaminantes por contaminación difusa de la agricultura y por las aguas residuales provenientes de servicios de agua potable sin tratamiento, como por la intrusión marina que, aunque no hay indicios aún de intrusión al acuífero, existe un escenario futuro potencial (que ha sido modelado) donde la intrusión es un problema considerable e irreparable. En el caso del deterioro de la calidad de aguas subterráneas, se conceptualiza como una causa de la problemática de escasez, dado que afecta la cantidad de agua disponible para ser utilizada.

En el caso de la demanda, las extracciones del acuífero del valle de Azapa son cada vez mayores, con mayores requerimientos de agua desde la agricultura de riego como el agua potable para la población urbana y rural. Este aumento de demanda, sumado a numerosas extracciones ilegales, que son insuficientemente fiscalizadas y una ineficiencia en el uso y distribución del agua que aumenta las necesidades de agua para la actividad agrícola principalmente, afecta progresivamente la sustentabilidad de la explotación del acuífero.

Sumado a las causas ligadas a la dinámica de la oferta y demanda de agua, un contexto de desinterés en soluciones conjuntas y una insuficiente coordinación entre usuarios del agua y entre usuarios y organismos públicos ha profundizado la condición de escasez. Existen, en efecto, múltiples problemas de desconfianza hacia propuestas de acciones estatales que no han sido correctamente socializadas ni se les ha hecho el suficiente seguimiento, lo que repercute en el desinterés de participar en acciones conjuntas sobre el problema colectivo de escasez hídrica. Junto a ello, tanto la falta de información relevante en materia de oferta, demanda y servicios ecosistémicos, como la accesibilidad a la misma por parte de todos los actores, afecta la toma de decisiones la que en ocasiones adolece de una mirada integral generándose externalidades como la extracción irregular de agua, la contaminación del agua subterránea a través del uso de contaminantes en la agricultura o el aumento proyectado de la demanda en un futuro con menor disponibilidad o provisión de agua. A esto también se suma la baja visión de responsabilidad a nivel de actores, puesto los usuarios tienden solo a atribuir a terceros (en general a los usuarios más grandes), el problema de la sobreexplotación, cuestión que viene acompañado a su vez de un contexto de sobre otorgamiento de derechos y de aumento de población en el valle, todo lo cual intensifica la demanda.

Por último, la baja adaptación al cambio climático también repercute y contribuye a la construcción de la escasez de agua. Una mayor incertidumbre en el escenario futuro, modificando la dinámica de eventos extremos y climatología, puede generar una menor disponibilidad de agua que, de no existir acciones de mitigación y adaptación, puede profundizar la escasez de agua subterránea.

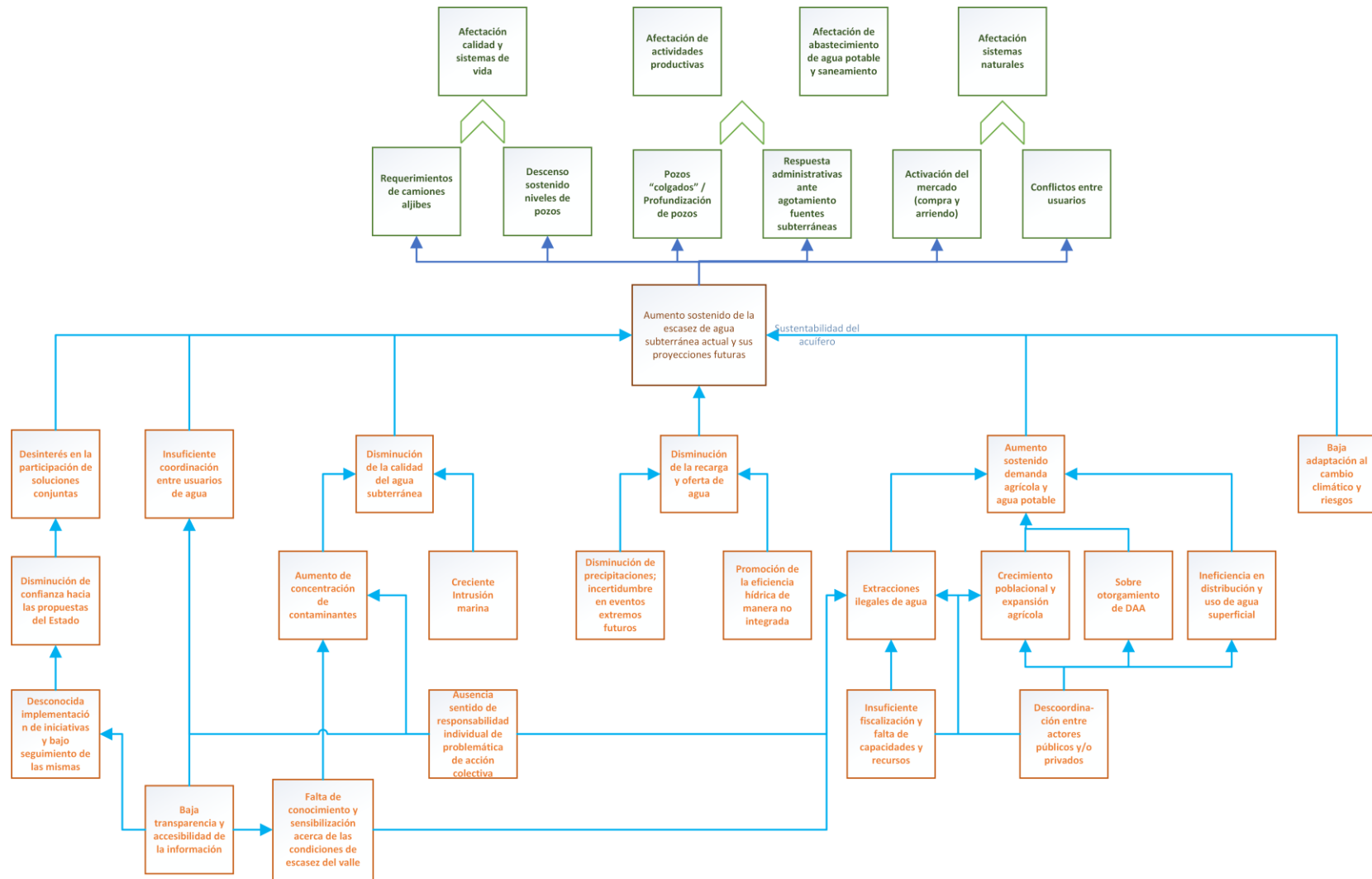


Figura 6-3. Esquema de árbol de problemas utilizado como base para el desarrollo del Plan de Acción.

Fuente: Elaboración propia (2022).

A partir de lo anterior, se delimitaron conceptualmente cuatro categorías en las cuales se clasificaron las acciones posibles a realizar en el valle de Azapa (Tabla 6-1) para abordar la problemática central a través de las causas primarias y secundarias (y su consecuente brecha síntesis). Las cuatro categorías de la tipología reúnen tipos de acciones según el objetivo para el cual están diseñadas (Anexo F sección 6.2). Cabe destacar que se evaluó la pertinencia de cada temática dentro del presente PEGH, encontrando temáticas que no necesariamente tienen acciones relacionadas dado que no son pertinentes a la zona estudiada según la información y el conocimiento de base.

1. Obras Hidráulicas (OH): Acciones relacionadas a infraestructura y construcción, tales como obras hidráulicas mayores, menores, de tecnificación y revestimiento.
2. Medidas de Gestión (MG): Acciones en torno a la gestión y gobernanza de las aguas.
3. Nuevas Fuentes (NF): Acciones que incorporan nuevas fuentes de agua al valle de Azapa.
4. Otras medidas (OM): Acciones asociadas a estudios que apoyen la toma de decisiones en la gestión del agua en el valle de Azapa o habilitantes de otras acciones.

Tabla 6-1. Tipologías y temáticas de clasificación de las posibles acciones a realizar en el valle de Azapa.

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

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el siguiente acápite, se presenta el análisis y descripción de las acciones propuestas del Plan de Acción según su tipología y temática, y a partir de las problemáticas y brechas identificadas en el análisis de árbol de problemas. En el Anexo K.1 se encuentra el compilado de todas las acciones del PEGH obtenidas de las actividades participativas, iniciativas existentes en el valle de Azapa o de otros estudios. Paralelamente, en el Anexo K.2 se presentan las fichas resumen de cada una de las acciones. Cabe destacar que en

el Anexo J.7 y Anexo J.8 se presentan el compilado de todas las acciones recopiladas que sirvieron de base para el presente PEGH (más detalles en sección 6.5 del Anexo F

6.3 OBRAS HIDRÁULICAS

6.3.1 Obras mayores

Las obras hidráulicas consideradas como obras mayores comprenden: los embalses con más de 50 mil metros cúbicos de capacidad o un muro con más de 5 metros de altura; acueductos que conduzcan más de dos metros cúbicos por segundo; acueductos que conduzcan más de medio metro cúbico por segundo, que se proyecten a menos de un kilómetro del límite de zonas urbanas; y los sifones y canoas que crucen cauces naturales.

Las obras hidráulicas mayores que destacan en la cuenca del río San José son el canal Lauca y el canal Azapa, ambos imprescindibles en la gestión hídrica de la cuenca (ver acápite 2.5.1). Por el contrario, en la actualidad no existen embalses de gran capacidad activos que aporten y aseguren disponibilidad de agua para los usos productivos o de consumo humano.

Acción OH-01: Embalse regulador y/o de control de crecidas de agua superficial para aprovechamiento de riego y agua potable

Esta iniciativa consiste en la construcción de un embalse en la parte alta de la cuenca del río San José, con el objetivo multipropósito de regular eventuales crecidas, favoreciendo la recarga de acuíferos aguas abajo del embalse, y aprovechar de gestionar el agua superficial para riego y agua potable. Surge debido a las causas de disminución de la recarga y oferta de agua y la baja adaptación y mitigación al cambio climático y riesgos, sintetizadas en la brecha Disminución de la recarga y oferta de agua por el descenso de las precipitaciones y la incertidumbre de eventos extremos futuros.

La medida regula los caudales superficiales y eventuales crecidas en el territorio, posibilitando la infiltración de agua a napas subterráneas y mitigando daños a la infraestructura y zonas agrícolas. Esta iniciativa condiciona el estado del balance hídrico durante el año hidrológico y la disponibilidad de agua para diferentes usos en la cuenca. Los resultados del potencial de aporte al balance, junto con su contribución a la brecha hídrica a partir de la modelación se presenta en el acápite 5.3.3.

Cabe destacar que en la cuenca se encuentra el proyecto embalse Livilcar, con el objetivo de regular crecidas y recargar el acuífero, que al 2017 se encontraba en la carpeta de compromisos de la Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas (DGA-ICASS, 2017). En la actualidad aún no se ha ejecutado la obra, ya que se encuentra en etapa de licitación dentro del SEIA. En la Figura 6-4 se muestra el árbol de problema y solución asociado a la iniciativa.

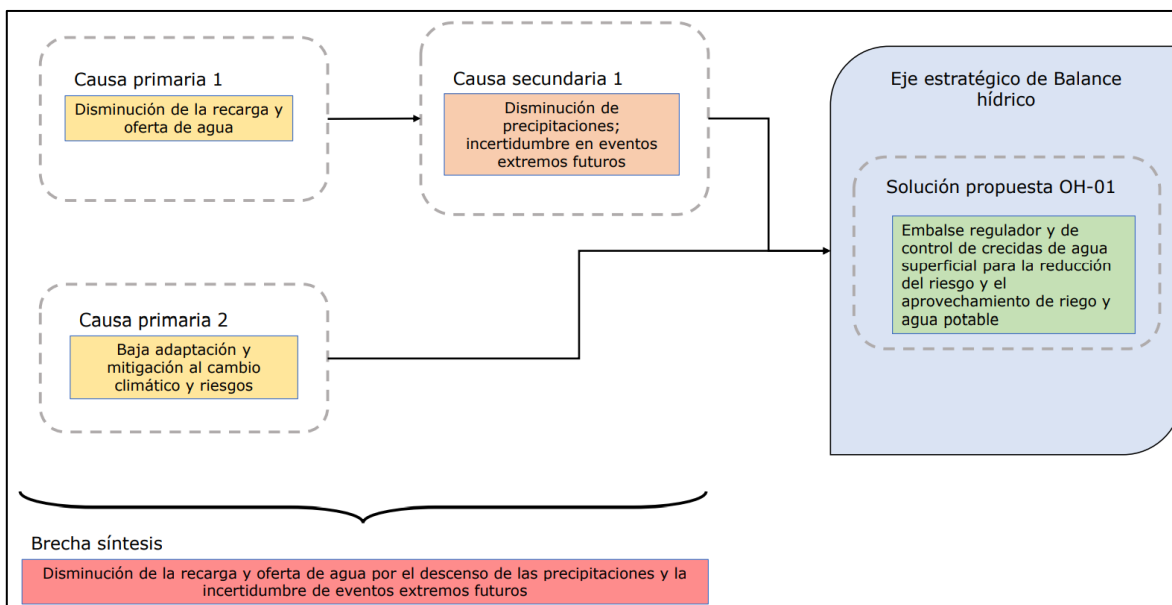


Figura 6-4. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-01.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.3.2 Obras menores

Entre las medidas incluidas como obras menores se consideran aquellas relativas a abastecimiento de agua potable y tratamiento de aguas servidas, construcción, modificación, cambio y unificación de bocatomas, canales, embalses menores a 50 mil metros cúbicos, obras de defensa fluvial y obras de ampliación y/o mejora de la Red Hidrométrica de la DGA, entre otros.

i. Infraestructura de riego y otros fines agropecuarios

En este acápite se incluyen las obras de riego, canales, bocatomas, sistemas de riego, invernaderos, acumulación de agua para riego, entre otras. Dentro del plan de acción propuesto en este PEGH, no se identifican iniciativas de construcción de infraestructura de riego y otros fines agropecuarios, considerando que en la cuenca ya se han desarrollado diversos proyectos de esta índole. Sin embargo, se plantean iniciativas de mejoramiento de redes de canales e instalaciones agrícolas y programas para la tecnificación de riego, las cuales se abordan más adelante. De todos modos, la iniciativa OH-01 se relaciona con el abastecimiento de agua para riego y otros fines pecuarios.

ii. Obras de abastecimiento de agua potable, saneamiento y tratamiento de aguas servidas

En este acápite se incluyen las obras relativas a abastecimiento de agua potable, tratamiento de aguas servidas (PTAS, SSR ex-APR, Sanitaria de aguas, etc.), mejoramiento en la red de distribución y sistemas de tratamiento, etc.

En la cuenca de estudio, la empresa sanitaria Aguas del Altiplano es la encargada de abastecer y gestionar el agua potable urbana, mientras que en la zona rural de la cuenca el abastecimiento de agua potable se realiza mediante siete Servicios Sanitarios Rurales ubicados en diferentes puntos de la cuenca. Para mayor detalle revisar el acápite 2.6.3.

Acción OH-02: Implementación y mejoramiento de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas para SSR en localidades rurales concentradas en el valle de Azapa

Esta iniciativa consiste en la construcción y mejoramiento de sistema de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas en zonas rurales concentradas, abordando las desigualdades en infraestructura entre sector urbano y rural, con relación a la cobertura de evacuación y tratamiento de aguas servidas, y evitar la potencial contaminación del acuífero. Plantea un mejoramiento mediante el reemplazo de tuberías, matrices, válvulas y grifos en mal estado, junto con programas de uso y mantención rutinaria de la red. En el acápite 3.1.1 se presentan los SSR (ex APR) de la cuenca en estudio.

La acción propuesta, obtenido de referencia desde en el “Plan director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del río San José” (DGA, 1998), se enmarca en el eje estratégico de Seguridad hídrica ante eventos extremos y contaminación, y pretende subsanar el aumento en la concentración de contaminantes antrópicos en las aguas superficiales y subterráneas.

Cabe destacar que parte de la localidad de San Miguel de Azapa cuenta con sistema de tratamiento de aguas servidas, en alianza con la Universidad de Tarapacá, con la finalidad de reutilizar las aguas para riego de los jardines de la Facultad. En la Figura 6-5 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

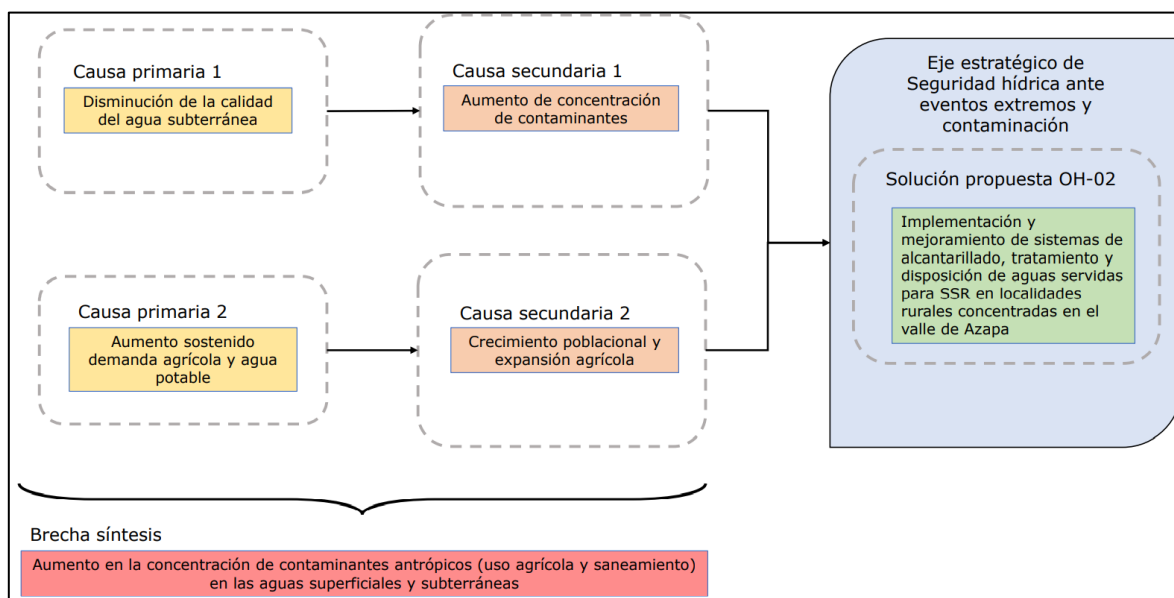


Figura 6-5. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-02.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción OH-03: Programa de mejoramiento y mantenimiento de la red de distribución de agua potable urbana

Dadas las causas identificadas sobre el aumento sostenido de demanda agrícola y agua potable y la disminución de la recarga y oferta de agua en el área de estudio, relacionadas directamente con la eficiencia hídrica en el uso y distribución, es que se propone un programa de mejoramiento y mantenimiento de la red de distribución de agua potable urbana.

Esta iniciativa consiste en la fiscalización sobre el estado de la infraestructura hídrica y evaluación de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas grises, previo al reemplazo de tuberías, matrices, válvulas y grifos en mal estado. La acción se enmarca en la Seguridad Hídrica para el consumo humano, en específico para el agua potable urbana, disminuyendo potencialmente la extracción de agua mediante el aumento de eficiencia en su distribución. En la Figura 6-6 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

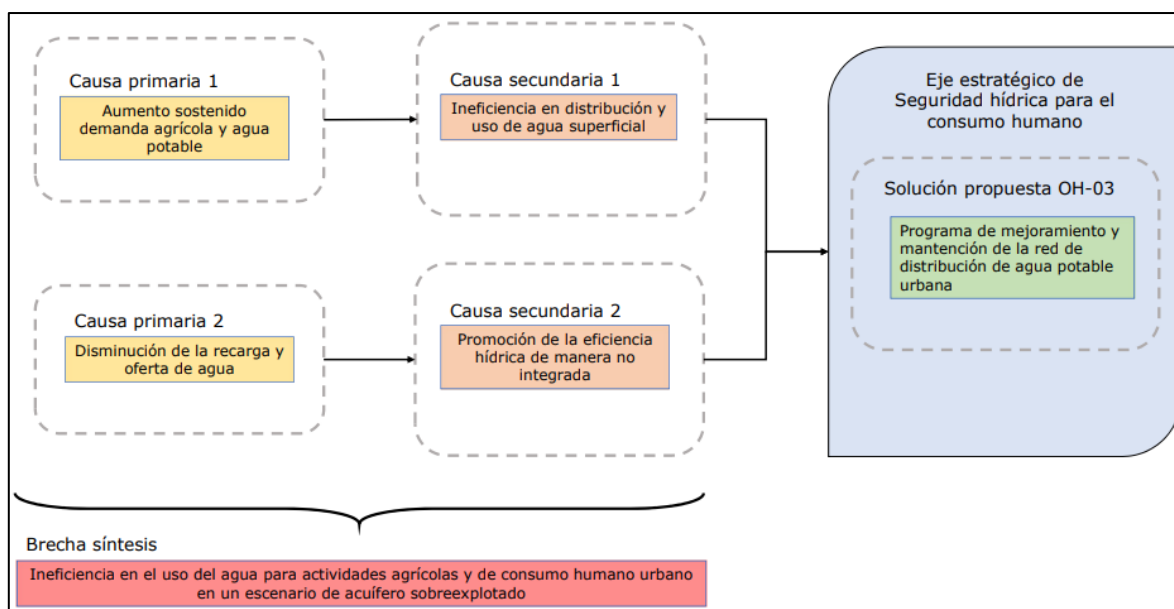


Figura 6-6. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-03.

Fuente: Elaboración propia (2022).

iii. Obras de defensa fluvial

Se define como obra de defensa fluvial a toda obra destinada a controlar las crecidas y los eventos aluvionales que puedan poner en riesgo viviendas, infraestructura o terrenos.

Acción OH-04: Construcción de obras fluviales para control aluvional y recarga del río San José en valle de Azapa

Dada las causas identificadas de disminución de la recarga y oferta de agua y la baja adaptación y mitigación al cambio climático y riesgos, sintetizadas en la brecha incertidumbre sobre los impactos, magnitud y frecuencia de los efectos derivados del cambio climático, se propone esta acción que busca proteger las zonas vulnerables a

inundación y generar la oportunidad de aprovechamiento de manera eficiente los eventos de lluvia.

La iniciativa propuesta, obtenida referencialmente desde el documento “Análisis Integral de Soluciones a la Escasez Hídrica, Región de Arica y Parinacota” (DGA-ICASS, 2017), propone la construcción de barreras de goma, que permiten mejorar la capacidad de respuesta ante eventos aluvionales y generar una parcial retención de crecidas, protegiendo a la población y bienes inmuebles, junto con favorecer la recarga del acuífero con aguas proveniente de estas crecidas. Esta acción va en línea con la iniciativa OH-01, que propone la construcción de embalses con el mismo fin (OH-01). Los resultados del potencial de aporte al balance, junto con su contribución a la brecha hídrica a partir de la modelación se presenta en el acápite 5.3.4. En la Figura 6-7 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

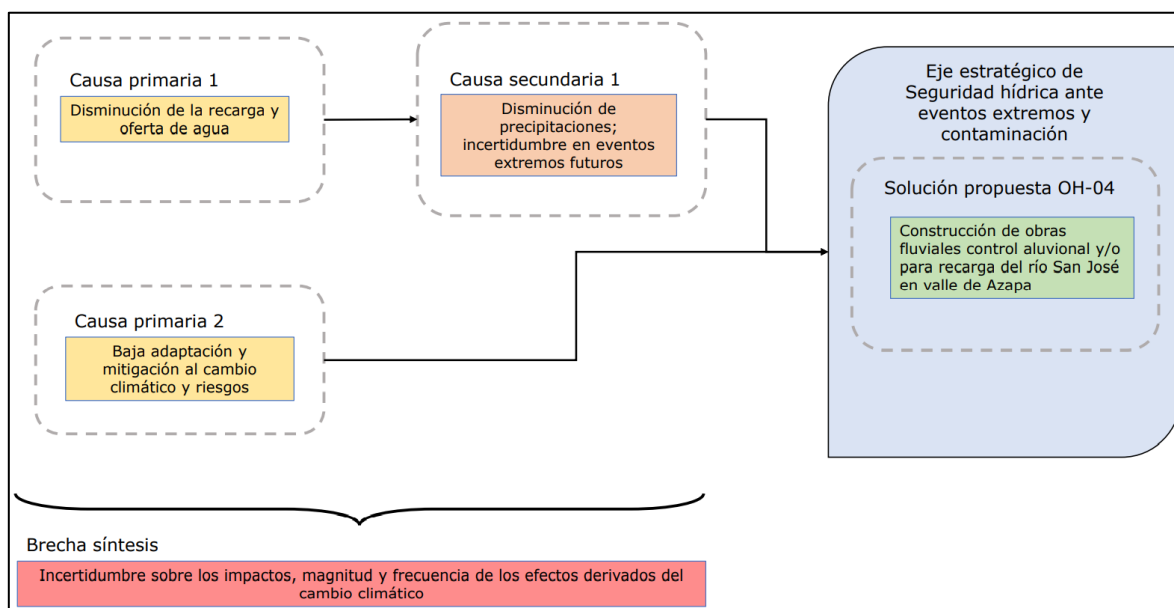


Figura 6-7. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-04.

Fuente: Elaboración propia (2022).

iv. Red Hidrométrica de la DGA

Se refiere a las acciones en torno a las obras en implementación, construcción, mejoras, ampliación, etc. de las estaciones hidrométricas de la DGA, enfocado en la cobertura de generación de datos, tanto la calidad como cantidad de la información.

En la cuenca del río San José existen once estaciones fluviométricas a lo largo de la cuenca, concentradas en las cercanías de la ciudad de Arica y en la parte alta de la cuenca, seis estaciones meteorológicas con información de precipitación, y ninguna estación de calidad. Más detalle en el acápite 2.5.2.

Acción OH-05: Obras de ampliación y mejora de las estaciones de monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río San José

Dada la baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial, se propone esta iniciativa con el objetivo de mejorar y fortalecer la red hidrométrica DGA de la cuenca del valle de Azapa.

Se propone realizar un mejoramiento y mantención rutinaria de las estaciones de calidad y red hidrométrica subterránea y superficial, junto con aumentar y establecer la frecuencia en las mediciones de calidad. De esta manera, aumenta la disponibilidad de información del balance hídrico subterráneo y superficial.

Para la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas, considerando lo planteado en el ítem 4.1.6, 4.2.5 y en base al estudio “Diagnóstico de calidad de aguas subterráneas en la macrozona norte regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Copiapó y propuesta de red de monitoreo” (DGA-GP Consultores, 2022), se propone la instalación de tres estaciones de monitoreo de niveles subterráneos y de calidad para el acuífero del valle de Azapa. Cabe destacar que el único pozo con datos más actuales de calidad, según la base de datos en línea de la DGA, es el pozo Albarracines, ubicado en el valle de Azapa cercano a la ciudad de Arica.

Por otro lado, en esta misma acción se plantea la instalación de dos estaciones meteorológicas y una estación de monitoreo superficial, considerando además un programa de monitoreo en terreno. Las estaciones meteorológicas se ubicarían en la parte central del valle, mientras que la estación superficial estaría antes del traspaso en el canal del Lauca. En la Figura 6-8 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

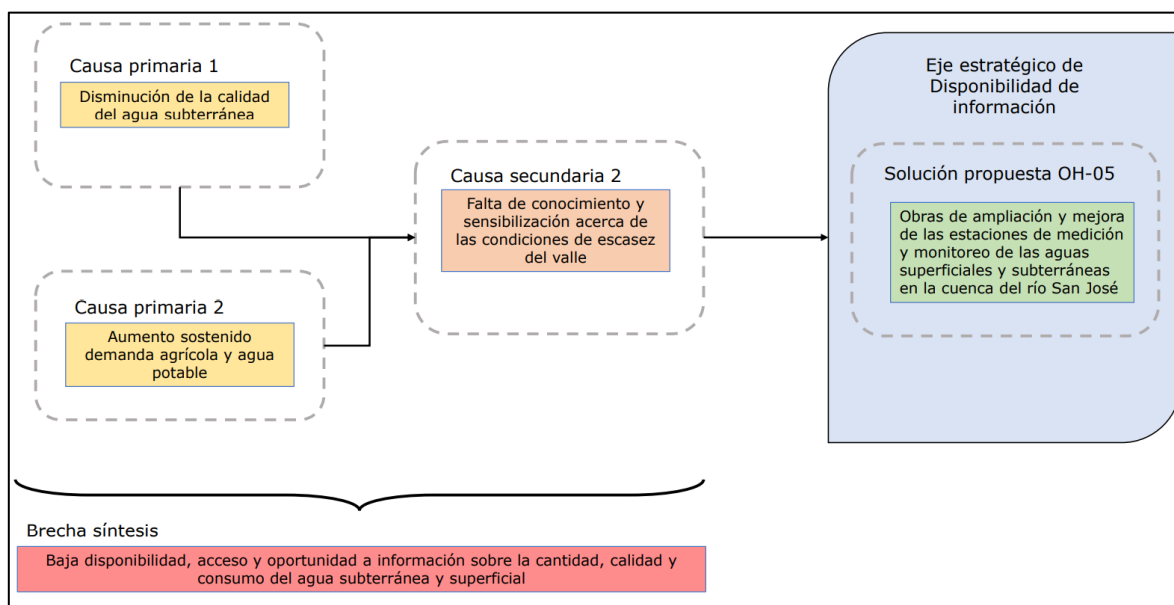


Figura 6-8. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-05.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.3.3 Tecnificación y revestimientos

Acciones e iniciativas referidas a las obras sobre mejoras en la tecnificación del riego, eficiencia hídrica, revestimientos e impermeabilización, entre otras.

Acción OH-06: Programa de capacitación, mejoramiento y tecnificación de la infraestructura de riego

Esta iniciativa tiene como objetivo disminuir la extracción de agua mediante la incorporación y mejoras en la infraestructura de riego, implementando un programa

para perfeccionar diferentes infraestructuras de riego, incluyendo la red secundaria de conducción y distribución de aguas, mediante fondos concursables y capacitaciones en instalación, implementación y mantenimiento de riego tecnificado a los regantes.

Cabe destacar que el valle de Azapa cuenta con la mayoría de su superficie cultivada con riego tecnificado, sin embargo, estos sistemas no necesariamente operan con las eficiencias de diseño, debido a problemas de mantención de los equipos, así como de operación por parte de los mismos usuarios.

La medida mejora la eficiencia en el uso del agua y disminuye la presión sobre el acuífero. De esta forma, se busca apalear las causas del aumento sostenido de la demanda agrícola y agua potable y la disminución de la recarga y oferta de agua, aportando a la seguridad hídrica de las actividades productivas.

Es necesario mencionar que un aumento en la eficiencia puede significar una menor recarga de agua del acuífero y un aumento de la superficie agrícola, por lo que se recomiendan implementar zonas de recarga de acuífero para disminuir esta externalidad. En la Figura 6-9 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

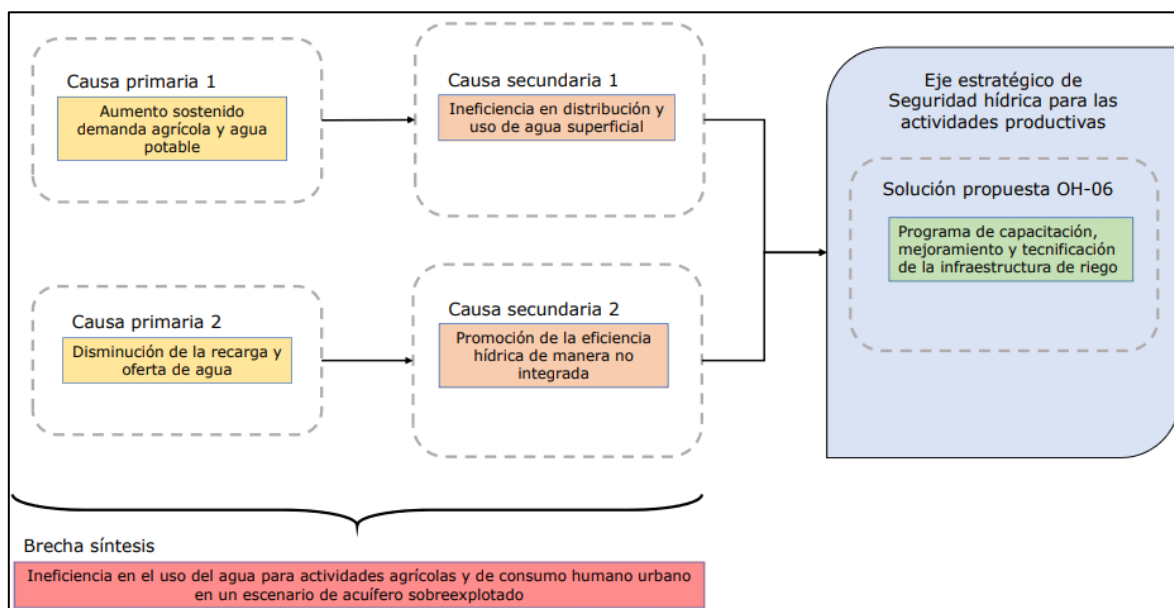


Figura 6-9. Árbol de problema y solución asociado a la medida OH-06.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.4 MEDIDAS DE GESTIÓN

6.4.1 Fortalecimiento y Formalización de las Organizaciones de Usuarios

La temática agrupa acciones para fortalecer y formalizar las Organizaciones de Usuarios en el valle de Azapa, considerando iniciativas de resolución de conflictos, desarrollo de organizaciones, entre otros.

Acción MG-01: Programa de sensibilización y apoyo legal, técnico y organizacional para la conformación de una Junta de Vigilancia del río San José

La acción propone la formación de una Junta de Vigilancia en la cuenca del río San José que agrupe a los usuarios de las aguas subterráneas y superficiales, para estudiar formas y mecanismos para el control y monitoreo de niveles, caudales y parámetros físicoquímico de las aguas subterráneas, entre otros, facilitando una acción coordinada entre los usuarios de agua en la cuenca y fortaleciendo sus vínculos.

La iniciativa surge desde el desinterés de la población en la participación de soluciones conjuntas y de la insuficiente coordinación entre usuarios de agua. El diagnóstico sobre la necesidad de formar nuevas organizaciones que consideren la administración conjunta de las aguas subterráneas y superficiales está presente en la cuenca desde hace más de 20 años (DGA, 1998). Sin embargo, se considera que previo a la aplicación de esta acción, la Comunidad de Aguas Subterránea (CAS) del acuífero del valle de Azapa debería estar en funcionamiento, y a su vez, se considera necesario evaluar la pertinencia de la conformación de una CAS en la parte alta de la cuenca de río San José, ya que actualmente la única organización de usuarios de aguas es la COMCA. En la Figura 6-10 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

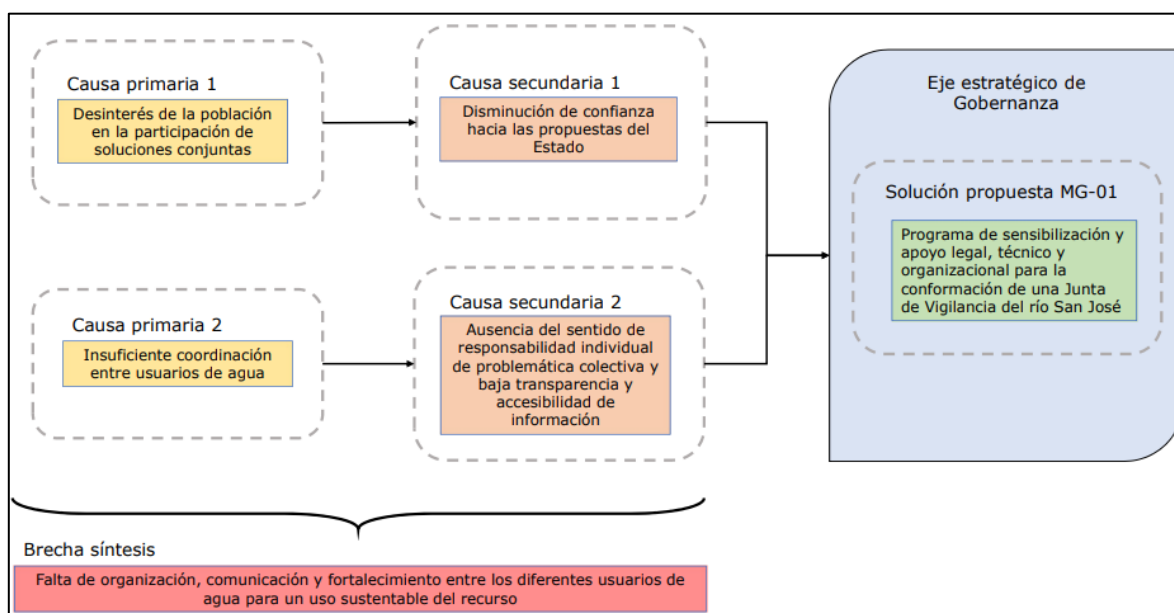


Figura 6-10. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-01.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción MG-02: Programa de fortalecimiento organizacional y de apoyo técnico para el funcionamiento inicial de la Comunidad de Agua Subterránea del acuífero del valle de Azapa

La medida surge desde las causas identificadas como la insuficiente coordinación entre usuarios de agua y la disminución de la recarga y oferta de agua, sintetizadas en la brecha de falta de organización, comunicación y fortalecimiento entre los diferentes usuarios de agua para un uso sustentable del recurso.

Se espera que esta medida fortalezca a las organizaciones de usuarios de agua y directores para mejorar la gestión hídrica de la cuenca del río San José, en particular al apoyo del funcionamiento organizacional en la implementación de la Comunidad de Aguas Subterránea (CAS) del acuífero del valle de Azapa. Con ello, mejorar los procesos

de coordinación y regulación, considerando a su vez, iniciativas complementarias el saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Agua inscritos (Iniciativa MG-08).

Cabe destacar, que actualmente la CAS ya se encuentra constituida legalmente, por esta acción apunta directamente al fortalecimiento organizacional en la implementación de esta organización. En la Figura 6-11 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

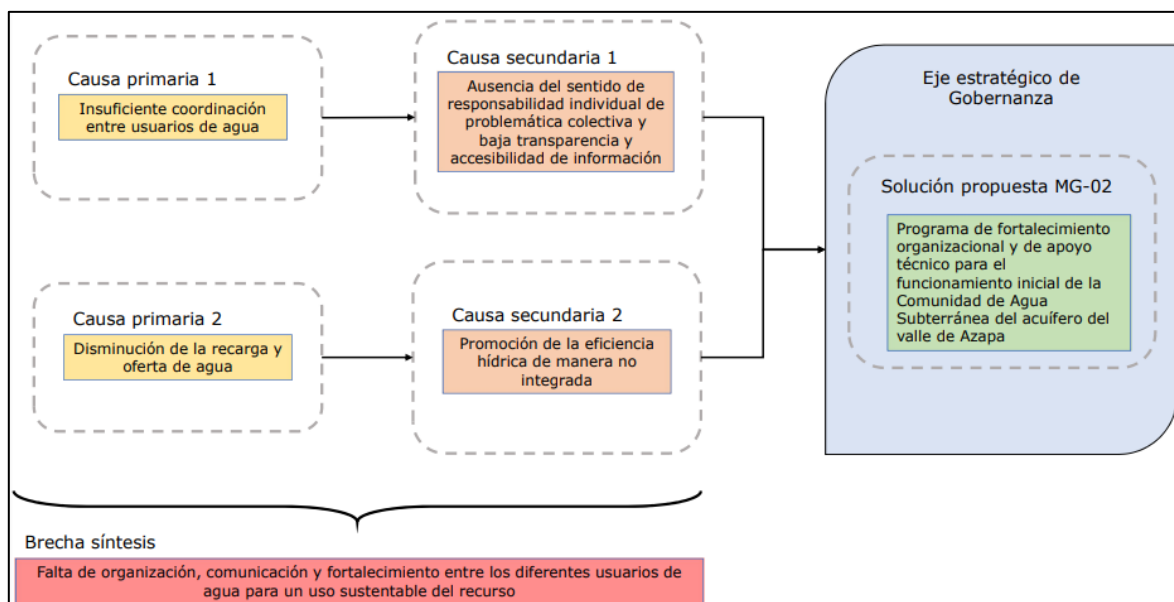


Figura 6-11. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-02.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.4.2 Capital Humano

En el presente acápite se agrupan las acciones relacionadas a formar o fortalecer el uso sustentable del agua en el valle de Azapa, mediante la transferencia de herramientas y conocimiento sobre el agua y su gestión a los usuarios de agua del valle.

Acción MG-03: Programa de capacitación en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas

La iniciativa propuesta, obtenida referencialmente en el "Diagnóstico para desarrollar plan de riego en la región de Arica y Parinacota" (CNR-ARRAU, 2016), consta en capacitar a los regantes y usuarios de agua en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas, especialmente aquellos ligados a la contaminación difusa generada por la agricultura y la intrusión marina. Junto con ello, se propone realizar estudios sobre mejoras en la calidad del agua y un programa de formación y transferencia tecnológica entre los distintos usuarios de agua.

La medida se propone para subsanar las causas de disminución de la calidad del agua subterránea y el aumento sostenido de la demanda agrícola y agua potable. La ejecución de esta acción busca asegurar cuerpos de agua con calidad adecuada para garantizar la salud humana, el medioambiente y los diferentes usos. En la Figura 6-12 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

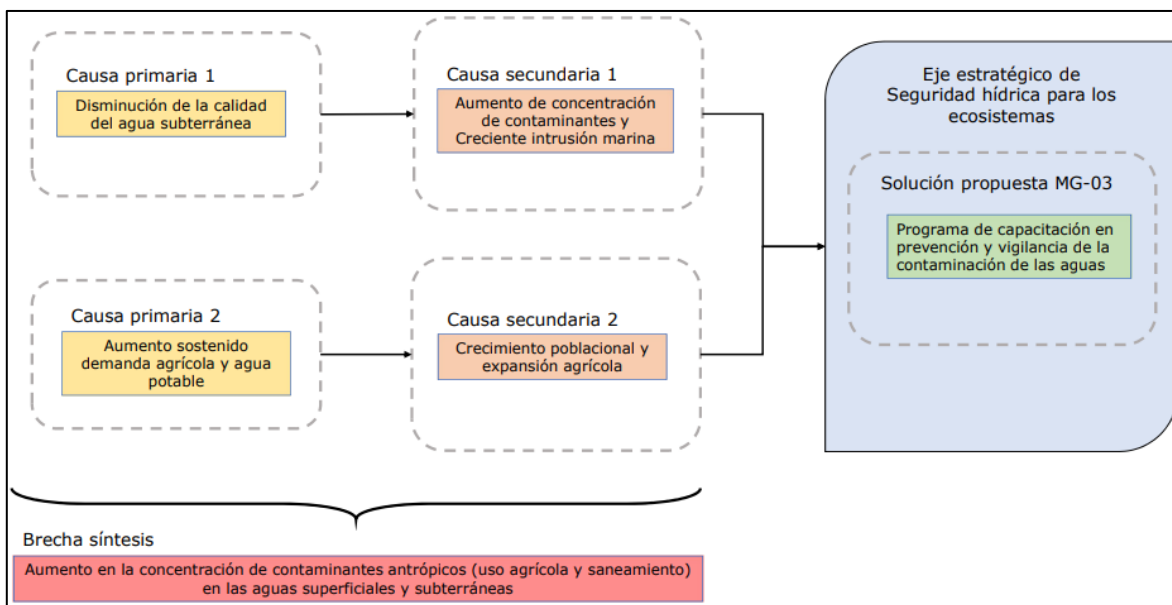


Figura 6-12. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-03.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción MG-04: Programa de apoyo al monitoreo de extracciones subterráneas efectivas de usuarios estándar menor, medio y mayor en capacitación y cofinanciamiento

En el valle se identifica un aumento sostenido de demanda agrícola y agua potable, relacionado principalmente por las extracciones ilegales de agua, por la insuficiente fiscalización, y la falta de conocimiento sobre el estado de escasez en la cuenca. Estas causas se sintetizan en la brecha de baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial, cuya disponibilidad es condicionante de un monitoreo y seguimiento efectivo del estado de la realidad hídrica y de las metas de Seguridad Hídrica en el valle.

Para propiciar la disponibilidad de información sobre la realidad hídrica, la acción propone apoyar la implementación y seguimiento del monitoreo de extracciones efectivas en el valle de Azapa, dado lo dispuesto en la ley N°21.064 (2018) que "Introduce Modificaciones al Marco Normativo que rige las Aguas en Materia de Fiscalización y Sanciones". Cabe destacar que con mayor disponibilidad de información de extracciones se puede mejorar la identificación de extracciones ilegales en el valle de Azapa.

La acción propone implementar un programa de control de extracciones de agua predial, el cual capacite a los usuarios de estándar menor en la implementación y seguimiento de las extracciones monitoreadas, y el cofinanciamiento en la instalación de sistemas de control de extracciones para usuarios de estándar medio y mayor, ya que la instalación de un sistema de medición con telemetría requiere de una alta inversión. En la Figura 6-13 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

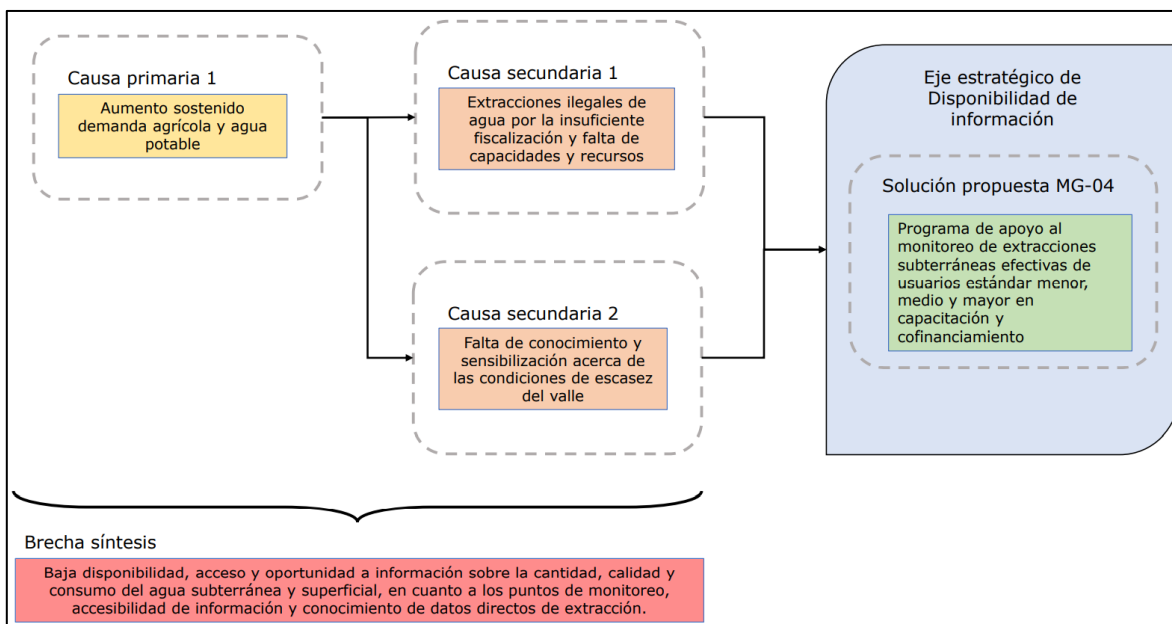


Figura 6-13. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-04.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción MG-05: Programas de mentorías para el fortalecimiento y modernización de Servicios Sanitarios Rurales

Esta iniciativa surge desde las brechas sintetizadas sobre la falta de organización, comunicación y fortalecimiento entre los diferentes usuarios de agua para un uso sustentable del recurso y el crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola. Se ha intensificado la presión en el acuífero debido la extracción de agua en cantidad como la disminución de la calidad de aguas subterráneas por la falta de saneamiento de las aguas servidas en el área rural.

Es por ello, que esta acción propone fomentar el aprendizaje mutuo entre Servicios Sanitarios Rurales con distintos niveles organizativos, generando redes de apoyo para modernizar las funciones de estos, y otorgando asesorías profesionales y programas de mejoramiento en la gestión hídrica desde la Dirección de Obras Hidráulicas.

Se prioriza el compartir experiencias de la misma subcuenca u otras, incentivando principalmente la modernización de los servicios administrativos, técnicos o legales; gestión financiera; gestión de usuarios/clientes; uso de modelos y red de monitoreo disponible, entre otros. En la Figura 6-14 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

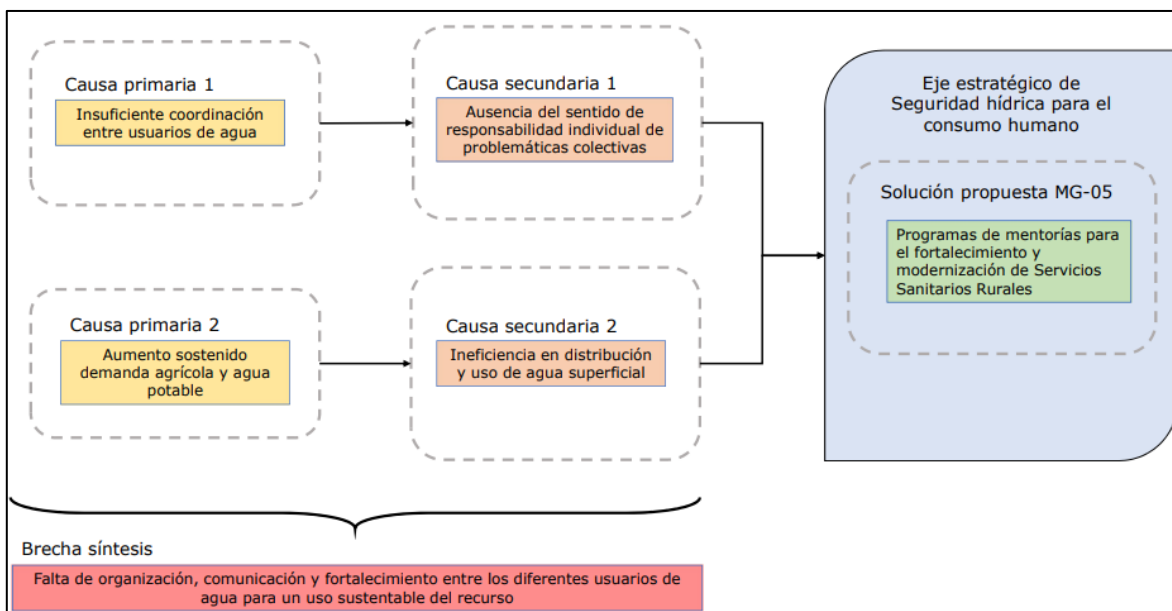


Figura 6-14. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-05.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.4.3 Recuperación de acuíferos

Acciones enfocadas en mejorar el estado de las aguas subterráneas en calidad y en cantidad. La demanda de agua desde acuífero del valle de Azapa es mayor a la recarga de este, por ende, el agua disponible en el acuífero ha ido disminuyendo en calidad y cantidad. Además, a pesar de ser un acuífero declarado Zona de Prohibición (Res. DGA N°202/1996) la demanda de agua desde el mismo ha ido en aumento a través del tiempo, lo cual incrementa la presión sobre las aguas subterráneas en el valle.

Si bien no se presentan acciones particulares para la recuperación del acuífero, la construcción de un embalse (OH-01) y obras fluviales (OH-04) se relaciona directamente con el aumento de infiltración de aguas hacia el acuífero, por ende, fomentan la recuperación de éste en el tiempo.

6.4.4 Gobernanza

Las iniciativas levantan instancias y herramientas para mejorar la coordinación y gestión entre los distintos usuarios de interés en la toma de decisiones sobre el agua en el valle de Azapa.

Acción MG-06: Creación y fortalecimiento de la Oficina de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal

La iniciativa pretende impulsar la conformación de una Oficina de Asuntos Hídricos (OAH) desde la municipalidad de Arica, con el objetivo de promover la participación comunitaria y proporcionar información oportuna en materia de transparencia de la gestión hídrica en el territorio.

La OAH corresponde a una unidad del municipio, que permite acercar la gestión municipal con los requerimientos de agua existentes en la comuna, promoviendo capacitaciones y prácticas de uso y producción con eficiencia hídrica, junto con entregar

información oportuna y orientar hacia la gestión y el desarrollo de acciones que permitan asegurar el acceso al agua, tanto en cantidad como en calidad para los habitantes de la comuna.

Esta iniciativa surge por el aumento de desconfianza hacia el sector público, privado y OUA, debilitando voluntad de interactuar con estas instituciones, y aporta al eje estratégico de Gobernanza. Cabe destacar que la unidad debe disponer de financiamiento para su funcionamiento, lo cual debe ser considerado en su estructura organizacional. En la Figura 6-15 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

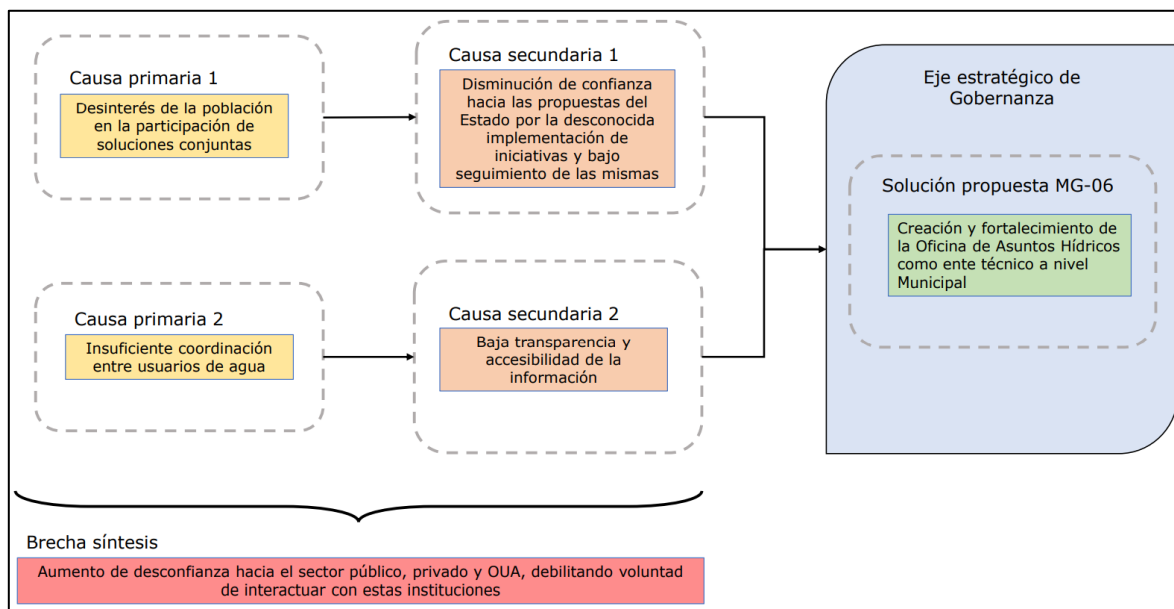


Figura 6-15. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-06.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción MG-07: Creación y promoción de un Consejo de cuenca que integre a los actores públicos y privados⁸

Esta iniciativa busca generar instancias a nivel de cuenca deliberativas y de coordinación para garantizar una planificación en la gestión hídrica desde lo local, integrando y coordinando a los usuarios de agua públicos-privados con las autoridades regionales y nacionales. Surge de la importancia de reforzar el rol de las entidades públicas territoriales relacionadas a la gestión hídrica como garantes de una planificación a nivel local, aportando a mejorar deficiente coordinación entre los actores públicos para la implementación de acciones en gestión hídrica, considerando el sobre otorgamiento de DAA en la cuenca. Se enmarca en el eje estratégico de Gobernanza.

Este consejo coordinador tiene como objetivo el objetivo de garantizar una planificación a nivel local, a través de aportes financieros, tutoriales técnicos, y otros recursos que

⁸ El nombre de la iniciativa original ("Creación y promoción de un Comité coordinador regional a nivel de cuencas que integre a los actores públicos y privados") fue modificado según lo priorizado en la actividad participativa, dándole un énfasis a la GIRH a nivel de cuenca.

faciliten su participación. Contará con acciones deliberativas a nivel de cuenca representando diversos intereses, desde una gestión coordinada e integrada de los recursos hídricos dentro del área de competencia. Para que se lleve a cabo este Consejo, se plantea la creación de una secretaría técnica que trabaje bajo su alero en la materialización de las acciones definidas por esta, brindando apoyo logístico, administrativo y facilitando las instancias de diálogo que la componen, junto con una mesa técnica con el fin de representar localmente los territorios en las instancias resolutorias, recopilando insumos técnicos, incorporando los usos y costumbres en torno al agua que existen en el territorio, dar recomendaciones sobre acciones para la toma de decisiones en el Consejo y participar en instancias de gobernanza hídrica regionales.

En el capítulo 8.1.6 del presente PEGH, se abordan los aspectos a considerar en la implementación de esta iniciativa, desde los institucionales a los normativos, mientras que en el capítulo 8.3.1 se presenta un esquema de la propuesta orgánica del Consejo de Cuenca. En la Figura 6-16 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

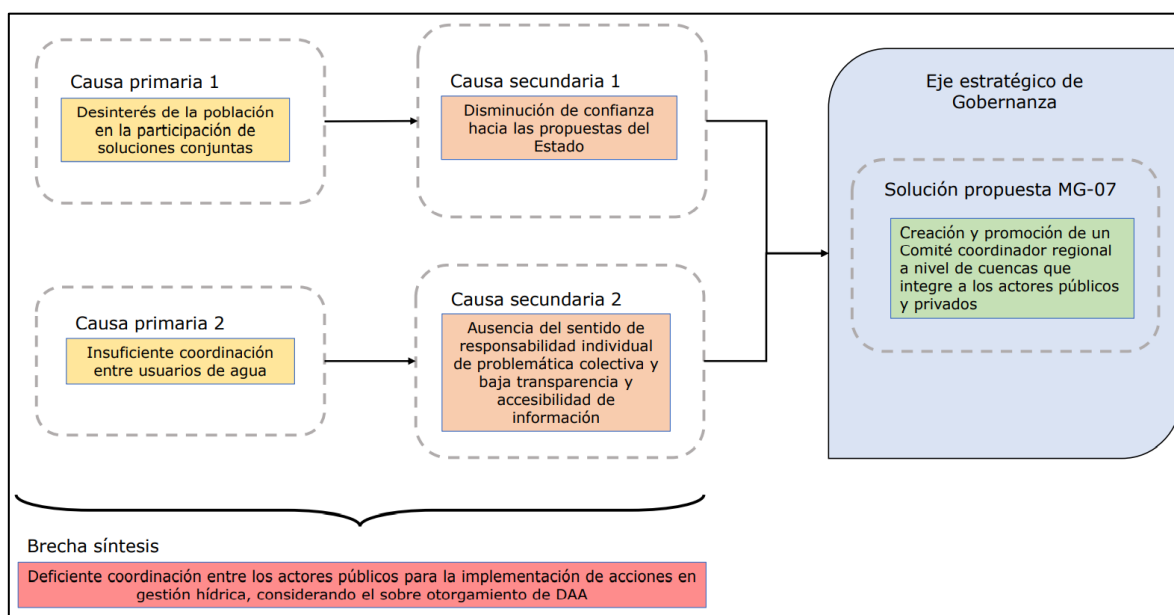


Figura 6-16. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-07.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.4.5 Sistemas de información

Acciones que busquen mejorar, actualizar, aumentar la frecuencia, transparentar, entre otros, de los sistemas y herramientas de información sobre disponibilidad y demanda de agua en el valle de Azapa, dado que la disponibilidad de información apoya la toma de decisiones sobre las aguas.

En el valle se presenta una baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información relevante, por lo que además de incorporar nuevas estaciones de monitoreo (desarrollado en el acápite de la tipología obras hidráulicas) se considera necesario mejorar el acceso de los usuarios del agua a información relevante, potenciando el conocimiento de la realidad hídrica en el territorio.

Acción MG-08: Programa de saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) en el acuífero del valle de Azapa

Debido a la problemática de la baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial, es que se propone este programa para regularizar y perfeccionar los DAA en el acuífero del valle de Azapa, abordando el problema desde el eje estratégico Disponibilidad de información.

En el escenario actual de incertidumbre sobre el sobre otorgamiento y uso efectivo de los DAA, las extracciones ilegales y un mercado de agua activo con falta de regularización, debido a la falta de información, es que se plantea contribuir a la mejora de la gestión y administración del agua mediante el saneamiento y actualización de la base de datos de los DAA y su estado legal actual. En la Figura 6-17 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

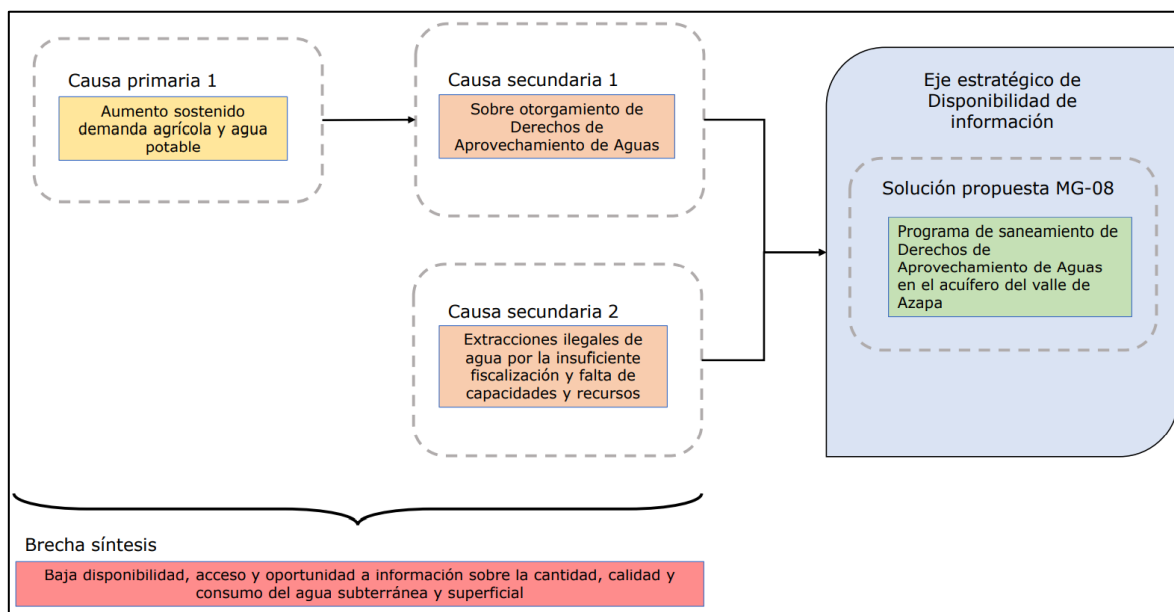


Figura 6-17. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-08.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción MG-09: Creación y capacitación en torno a la "Plataforma de Información Hídrica" integrado de la cuenca del río San José

Esta iniciativa consiste en la implementación de una plataforma en tiempo real, en línea y centralizada que integre diferentes fuentes de información pública y privada sobre aguas, tanto de calidad como cantidad, con su debida capacitación a los usuarios y homologación de variables, facilitando el acceso de información, toma de decisiones y procesos de denuncia de extracciones.

Para el desarrollo de esta plataforma se deberá generar acuerdos con diferentes laboratorios y usuarios del agua para centralizar la información y homologar las variables de medición, junto con capacitar a la ciudadanía para su funcionamiento, en cuanto al uso de la plataforma como a la toma de datos. Se plantea que la Universidad de Tarapacá cumpla este rol integrador y tenga participación vinculante en la gestión del sistema.

Además, se propone incluir y retomar en esta nueva plataforma el Observatorio de Sequía⁹, sitio web de la DGA desarrollado en el documento DGA-ICASS (2017) que, mediante información histórica y actual de caudales, precipitaciones y análisis de imágenes satelitales, permite obtener información del estado de las cuencas de la región frente a eventos de escasez hídrica.

Esta medida se complementa con otras acciones propuestas como OH-06, MG-03, MG-06, entre otras, en relación con la mejora de estaciones de monitoreo, capacitación para control de contaminación, etc.

Es importante mencionar que esta iniciativa responde a las brechas de baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial, y la de incertidumbre sobre los impactos, magnitud y frecuencia de los efectos derivados del cambio climático. En la Figura 6-18 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

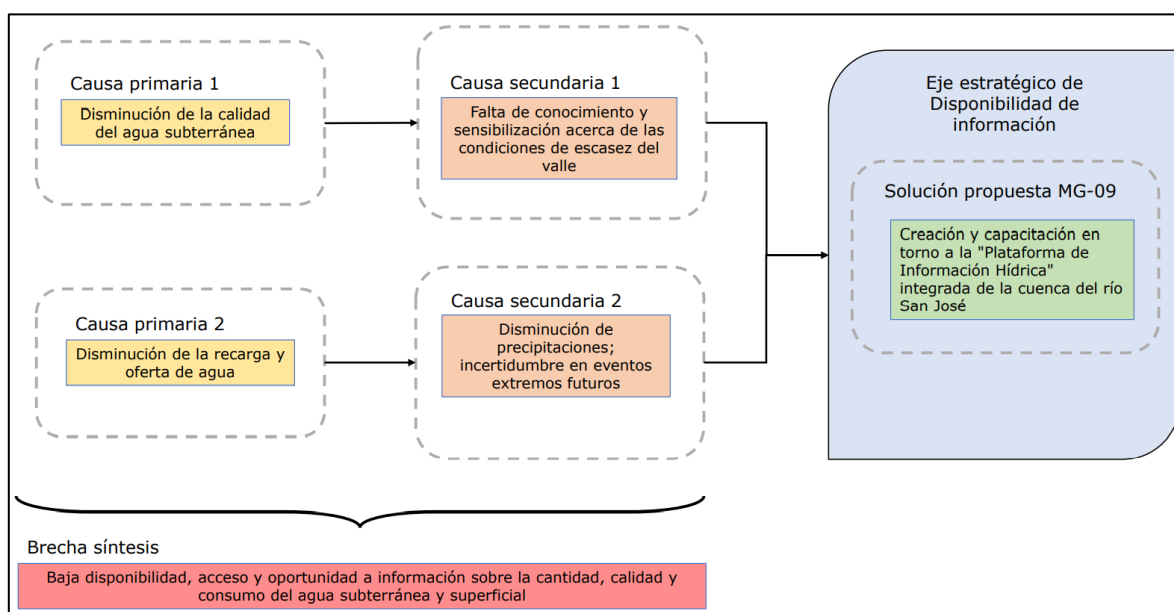


Figura 6-18. Árbol de problema y solución asociado a la medida MG-09.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.4.6 Tecnologías habilitantes

Acciones referentes a la implementación de tecnologías que favorecen y/o permiten una mejor gestión, administración y distribución del agua, tales como telemetría, actualización de tecnologías, mecanismos automáticos, implementación de software, entre otras. Dentro del Plan de acción del presente PEGH no se proponen iniciativas respecto a las tecnologías habilitantes, debido a que acciones como la automatización de compuertas o la instalación de medidores de agua a nivel predial propuestas en CNR-

⁹ Sitio web disponible en: <http://icass.zteeo.com/>

ARRAU (2016) están contenidas con las acciones de control de extracciones por la naturaleza de las aguas subterráneas.

6.5 NUEVAS FUENTES DE AGUA

Las medidas relativas a nuevas fuentes comprenden iniciativas que apuntan al aumento de la oferta hídrica en la cuenca, tal como la desalinización, la explotación de acuíferos profundos, cosecha de aguas lluvia, uso de aguas servidas tratadas, etc.

6.5.1 Desalinización

Iniciativas que apuntan al uso de agua de mar como nueva fuente de abastecimiento en el valle de Azapa.

Acción NF-01: Planta desaladora para agua potable urbana

Esta acción surge desde las causas identificadas del aumento sostenido de demanda agrícola y agua potable y la disminución de la recarga y oferta del agua, sintetizadas en la brecha de crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola, frente al importante crecimiento poblacional y disminución de oferta hídrica del valle de Azapa. Se enmarca en el eje estratégico del Balance hídrico.

En el acápite 5.3.2 se desarrolla el escenario de gestión que se propone en esta iniciativa, planteada originalmente por el estudio DGA-DICTUC (2020), la cual trata sobre la implementación de una planta desaladora en la zona baja del valle de Azapa como nueva fuente de agua para consumo humano, con un caudal de extracción de 400 L/s. La planta desaladora se ubicaría al sur de Arica en la zona de industrias pesqueras, con el objetivo de utilizarla como soporte en lugar de reemplazo de fuente, para abastecer de agua potable al sector urbano, disminuyendo y descomprimiendo la extracción de agua desde el acuífero.

Cabe destacar que, la disminución en la extracción subterránea genera que exista mayor caudal que salga al océano permitiendo mantener controlado el ingreso de intrusión marina al acuífero y por ende la calidad del agua. Sin embargo, se recomienda previo a la ejecución de la desaladora, realizar estudios sobre el impacto de la disposición de la salmuera y posibles medidas para mitigar los efectos nocivos de esta.

Actualmente, el terreno para la concesión ya está asignado y revisado, y se esperaba que la planta comenzara su operación al año 2020, no obstante, en el presente no se ha iniciado la construcción de la desaladora. En la Figura 6-19 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

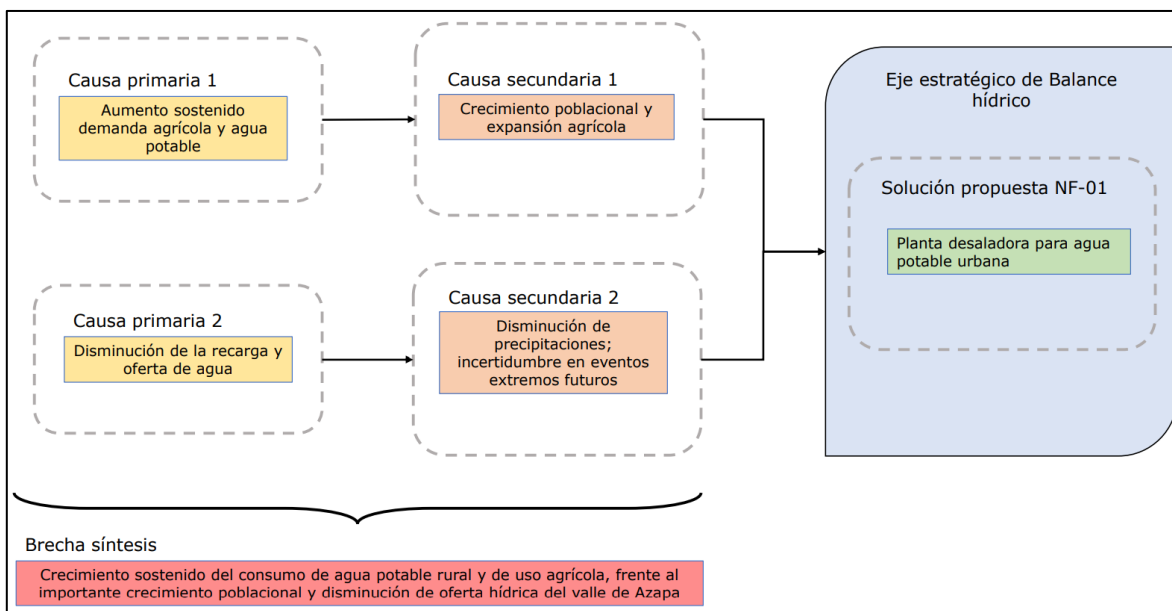


Figura 6-19. Árbol de problema y solución asociado a la medida NF-01.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.5.2 Acuíferos profundos

Dentro del Plan de acción del presente PEGH no se proponen iniciativas respecto a la profundización de pozos, debido a que no existen antecedentes contundentes de la presencia de acuíferos profundos a lo largo del valle de Azapa y tampoco en la zona costera, en función del área del acuífero incluida en la modelación por DGA-DICTUC (2020). En el caso específico del sector costero, según INH (2014), el medio principal del sector costero son los depósitos litorales, con la presencia de una unidad rocosa de baja permeabilidad que ha impedido la intrusión marina y de unidades singulares emplazadas localmente que no tienen mucha conexión entre sí. Así, para explorar esta opción se requerirían estudios futuros, los que pueden ser contextualizados dentro de la acción OM-04, de modo de actualizar las herramientas de modelación con estudios geofísicos en la zona costera, y evaluar presencia de recursos hídricos profundos (en acuíferos confinados o semi confinados en la zona costera) y su impacto sobre la condición de sobreexplotación del acuífero.

6.5.3 Recarga de acuíferos

Dentro del Plan de acción del presente PEGH no se proponen iniciativas respecto a la recarga de acuíferos propiamente tal. Sin embargo, en este mismo acápite de Nuevas fuentes de Agua se plantean iniciativas que derivan a una recarga de acuíferos para un posterior uso de esta fuente, como lo es la acción NF-01 y NF-02. Además, dentro del plan de acción se presentan las iniciativas OH-01 y OH-04, las que consideran un aumento en la infiltración subterránea y un potencial uso de ellas como una nueva fuente de agua.

6.5.4 Uso aguas servidas tratadas

Iniciativas que incluyan herramientas, infraestructura o acciones enfocadas al uso de aguas servidas tratadas para aumentar la oferta hídrica de la cuenca.

Acción NF-02: Reúso de aguas servidas tratadas urbanas para usos no agrícolas ni consumo humano

Debido a la problemática del crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola, frente al importante crecimiento poblacional y disminución de oferta hídrica del valle de Azapa, es que se propone como nueva fuente de agua el reúso de aguas servidas tratadas urbanas, abarcando la brecha desde el eje estratégico del Balance Hídrico.

La iniciativa consta de un tratamiento de las aguas servidas de la ciudad de Arica, utilizando esta agua para recargar el acuífero, riego de áreas verdes en los sectores bajo del valle de Azapa, uso industrial, e inclusive para infiltrarla en zonas cercanas a la ciudad para reducir el riesgo de intrusión salina. La idea es aumentar la oferta hídrica, reinyectando al acuífero un caudal de 400 l/s de aguas tratadas, y disminuir la contaminación antrópica de los acuíferos. En el acápite 5.3.5 se desarrolla el escenario de gestión para esta acción.

Es necesario mencionar que, según el Decreto N°46 del 8 de marzo de 2002 que establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas, ante un tratamiento de aguas grises secundario, estas pueden ser infiltradas en el acuífero y ser utilizadas para riego. En la Figura 6-20 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

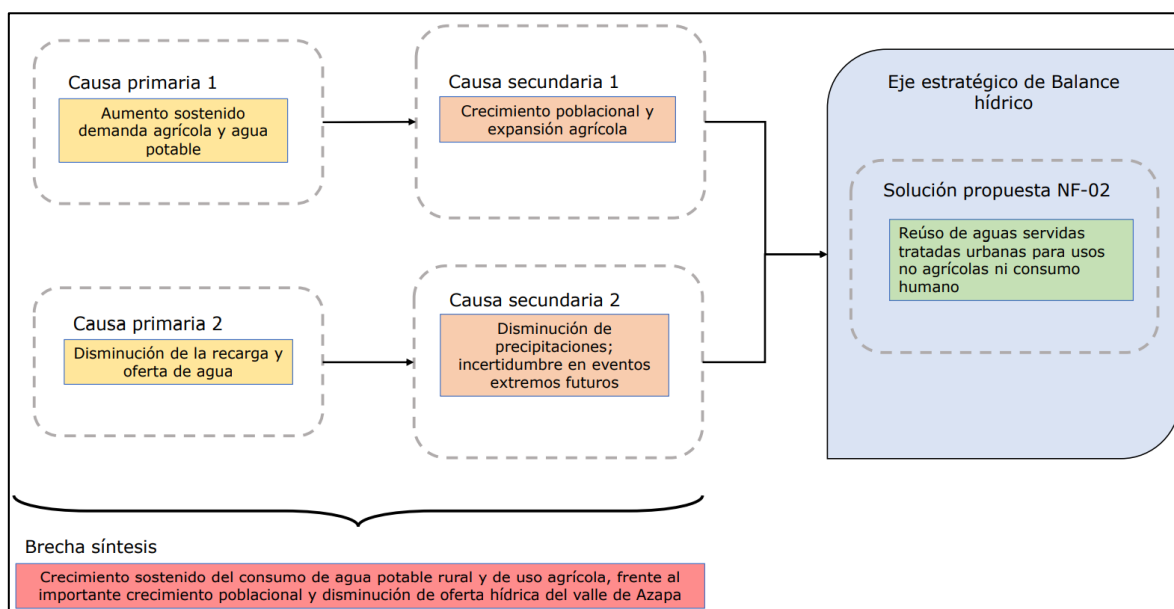


Figura 6-20. Árbol de problema y solución asociado a la medida NF-02.

Fuente: Elaboración propia (2022).

6.6 OTRAS MEDIDAS

La tipología Otras Medidas corresponde a acciones e iniciativas orientadas a la realización de estudios, informes, divulgación y generación de información faltante para una adecuada implementación y complementación de las medidas propuestas anteriormente y facilitar la toma de decisiones.

6.6.1 Generación de estudios, informes y diagnósticos para la gestión hídrica

Esta temática tiene que ver con la generación de estudios que apunten a disminuir diversas brechas de conocimiento para la toma de decisiones relativa a la gestión de los recursos hídricos.

Acción OM-01: Identificación de sitios para el desarrollo de micro tranques para la acumulación de aguas para su uso comunitario

Esta iniciativa tiene como objetivo contribuir a aumentar la seguridad hídrica y disponibilidad de agua de riego para los agricultores de la cuenca, mediante estudios y análisis que permitan identificar potenciales sitios para instalar micro tranques de uso comunitario. Para ello, se propone la identificación de zonas agrícolas que tengan factibilidad de utilizar obras de acumulación, junto con evaluar y seleccionar las alternativas óptimas para el abastecimiento de aguas para cada caso, previo estudio hidrológico del punto de interés.

Esta acción busca enfrentar la problemática del crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola, frente al importante crecimiento poblacional y disminución de oferta hídrica del valle de Azapa, enfrascada en el eje estratégico de Seguridad hídrica para las actividades productivas. Esta medida utiliza referencialmente la propuesta del “Diagnóstico para desarrollar Plan de Riego en la región Arica y Parinacota” solicitado por la CNR. En él, se señala que la tecnología debe ser distinta a los tranques Sobraya y Bocatoma, pues la geomembrana de éstos no permite su limpieza. En la Figura 6-21 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

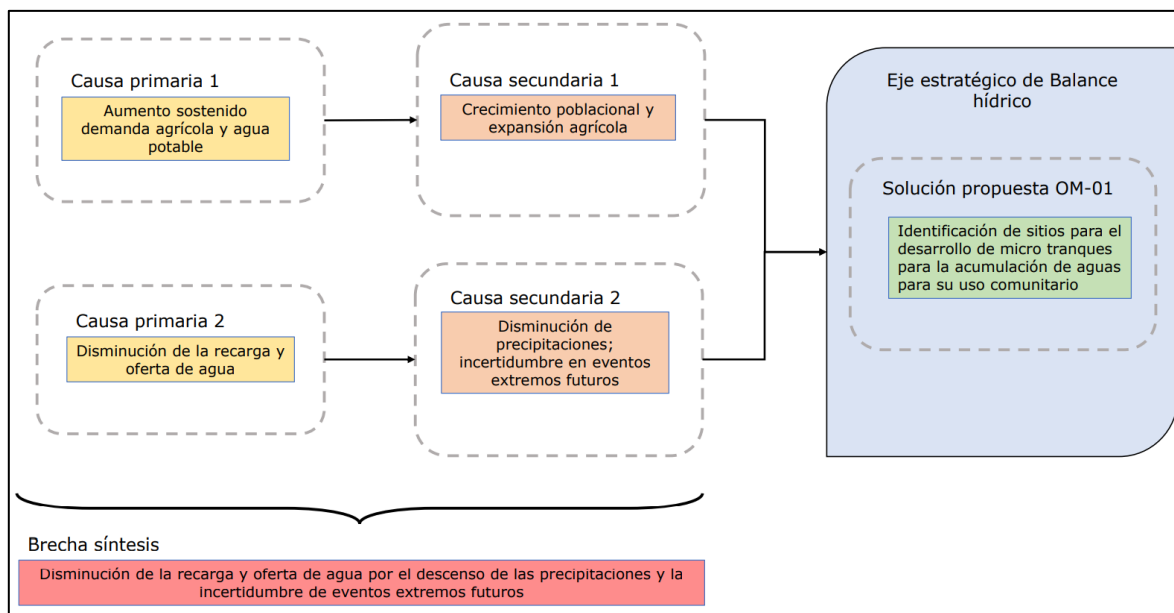


Figura 6-21. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-01.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción OM-02: Estudios sobre los servicios ecosistémicos de la cuenca y evaluación del estado de los ecosistemas

Esta iniciativa busca identificar y caracterizar componentes ambientales del sistema hídrico que entreguen servicios ecosistémicos al valle, con el propósito de generar estudios para la toma de decisiones en la gestión hídrica, comprendiendo la relación de causalidad entre el ecosistema y el bienestar social, a distintas escalas (acuífero, valle, cuencas). Se propone estudiar e integrar el sistema hídrico total de la cuenca del río San José, considerando las distintas cuencas que se interrelacionan y componen. Se desarrollará una estructura marco que aborda desde la consecución de fuentes de financiamiento, la definición de las líneas de investigación y desarrollo, y el esquema metodológico y desarrollo del estudio mismo, con el fin de contribuir de manera significativa a la regulación del ciclo hidrológico, consecuencias sobre el aumento de extracción hídrica en zonas altiplánicas, y aportar antecedentes en la elaboración de Planes de Conservación Ambiental (PCA) o Planes de Restauración Ambiental (PRA), asegurando una participación público-privada. Además, tiene como fin evaluar el estado de los ecosistemas, identificar amenazas y planificar estudios de conservación en la cuenca del río San José.

Surge desde la problemática del desconocimiento sobre los servicios ecosistémicos hídricos del valle de Azapa, enmarcándose en asegurar la seguridad hídrica para la protección y conservación de los ecosistemas. En la Figura 6-22 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

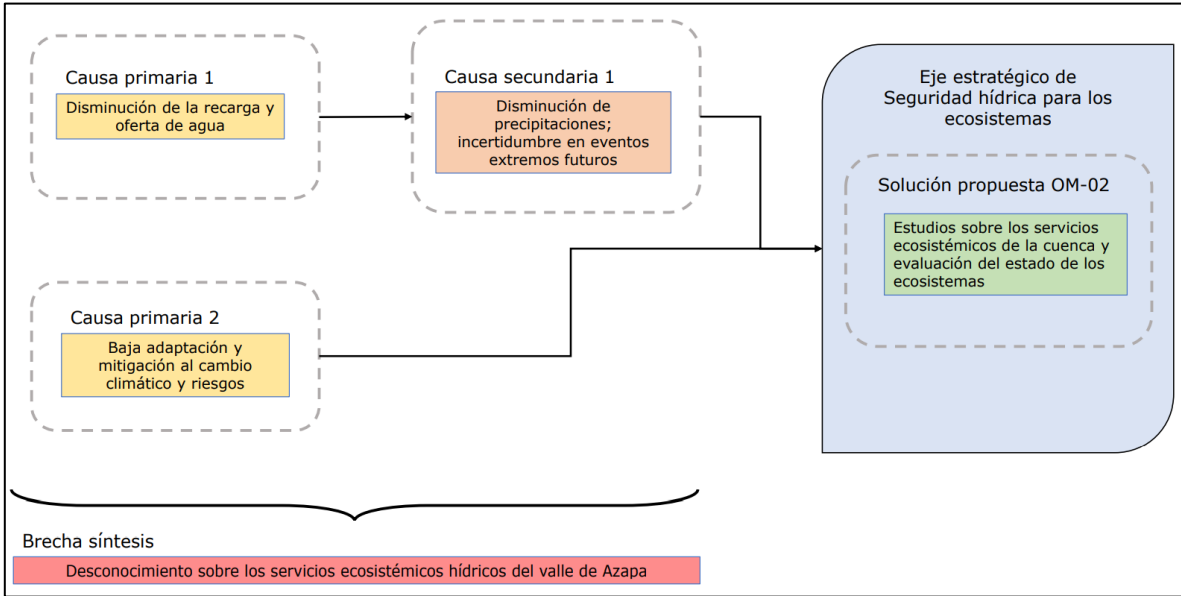


Figura 6-22. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-02.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción OM-03: Estudio de los cambios del sistema hídrico del Lauca sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río San José

La iniciativa se sitúa en el supuesto y proyecciones de una posible disminución del caudal del río Lauca y los afluentes de este de las cuencas altiplánicas, desarrollado en la sección 5.1.4.2 del presente PEGH. En ese escenario es que se propone un estudio para

dimensionar el impacto que tendría esta disminución en la cantidad y calidad de las aguas abajo del canal.

Surge desde las causas identificadas de disminución de la recarga y oferta de agua y la baja adaptación y mitigación al cambio climático y riesgos, sintetizadas en la brecha de Disminución de la recarga y oferta de agua por el descenso de las precipitaciones y la incertidumbre de eventos extremos futuros. Su ejecución aporta al eje estratégico de balance hídrico, dada la importancia del trasvase para el balance completo.

Esta acción cumple un rol importante al integrar el sistema hídrico del valle de Azapa, evidenciando que cambios en la zona alta de la cuenca, e inclusive cuencas más arriba, podría afectar las aguas en la parte baja de ella, atendiendo la relación inherente entre el sistema superficial y subterráneo de la cuenca. Como antecedente, cabe mencionar la dependencia casi exclusiva que tiene el agua superficial de la cuenca del río San José con el canal Lauca. En la Figura 6-23 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

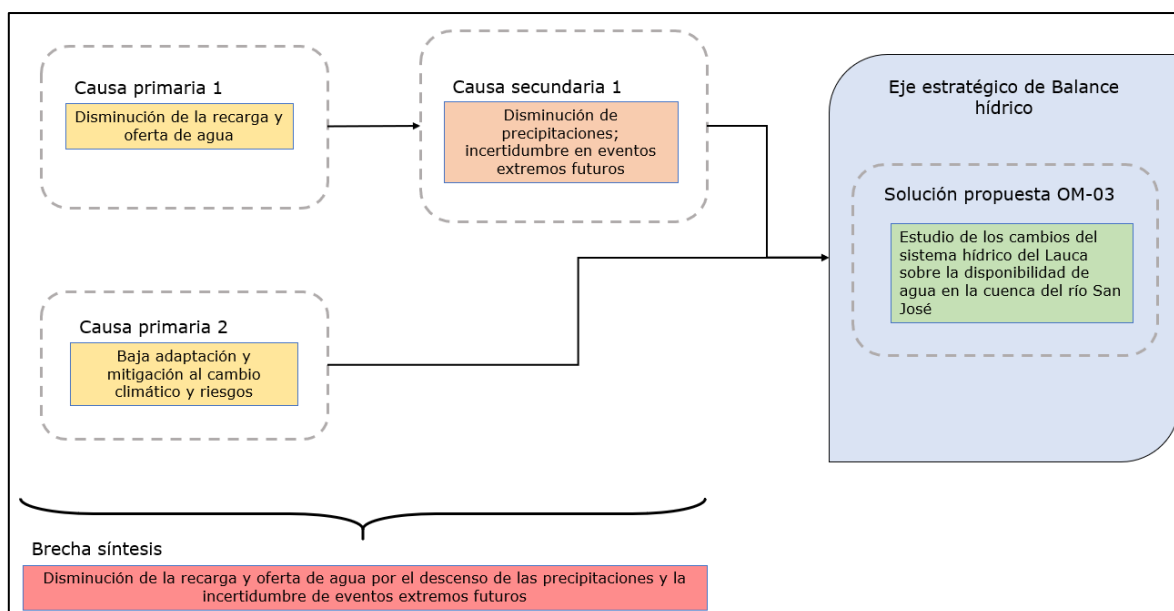


Figura 6-23. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-03.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción OM-04: Revisión y actualización de las herramientas de modelación de acuerdo con las brechas identificadas

Esta acción surge desde la brecha de baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial, enmarcándose en el eje estratégico de Disponibilidad de información. Tiene como finalidad ahondar y resolver brechas identificadas en la modelación del balance hídrico de la cuenca, actualizando y mejorando los aspectos deficientes de la modelación hídrica desarrollados en el acápite 5.5 del presente informe.

La importancia de esta acción radica en contar con información sobre la disponibilidad, consumo de agua y proyecciones de estas lo más actualizada posible y cercano a la realidad, fortaleciendo la modelación y aportando en una eficiente gestión del recurso

hídrico. Algunas de las actualizaciones y mejoras que se proponen son las demandas a lo largo de todo el valle, los cambios en la operación del modelo para integrar exitosamente las dinámicas climáticas e hídricas; la actualización de la versión de MODFLOW para el modelo acoplado; la incorporación de estudios de dinámica de la intrusión marina y su incorporación en el modelo acoplado como condición de borde, entre otros. En la Figura 6-24 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

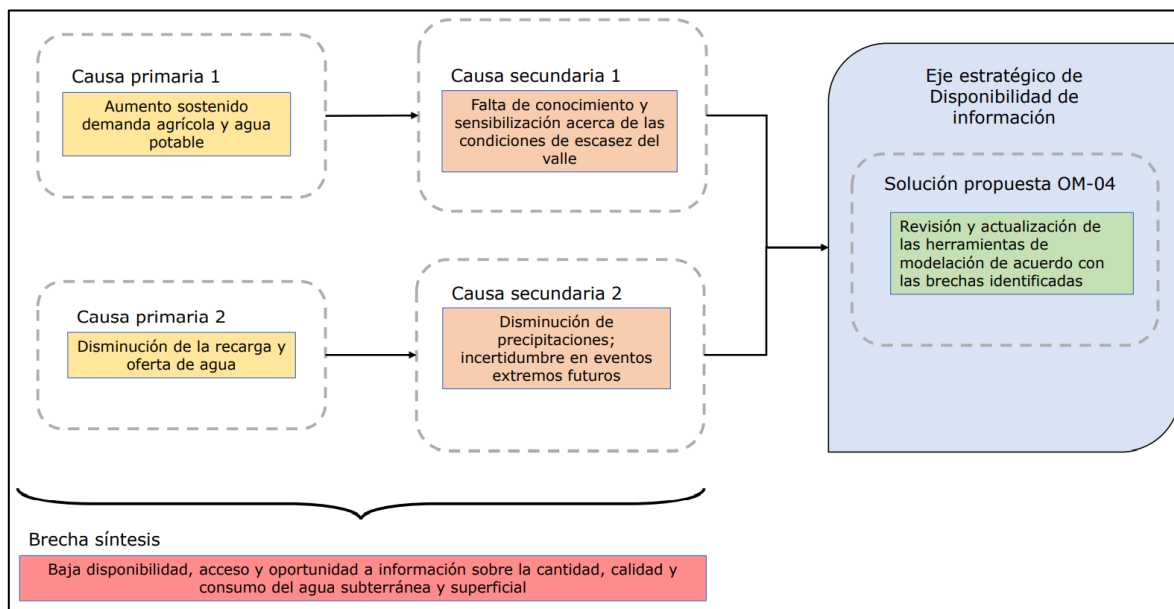


Figura 6-24. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-04.

Fuente: Elaboración propia (2022).

Acción OM-05: Estudios para el mejoramiento de la infraestructura y capacidades de los SSR

Esta medida surge desde el aumento sostenido de demanda agrícola y agua potable, debido al crecimiento poblacional y expansión agrícola y la ineficiencia en distribución y uso de agua superficial. Pretende aportar al eje estratégico de seguridad hídrica para el consumo humano, en particular a las necesidades básicas humanas.

La iniciativa tiene como objetivo el identificar debilidades de los Servicios Sanitarios Rurales en la cuenca para fortalecerlos y mejorar su funcionamiento. Para ello, se plantea realizar estudios para evaluar las capacidades técnicas, logísticas, infraestructura y funcionamiento de los SSR, abordando e integrando las ineficiencias en el consumo para aportar soluciones a la falta de agua y aumento sostenido del consumo hídrico. En la Figura 6-25 se presenta en árbol de problema y solución asociado a la iniciativa propuesta.

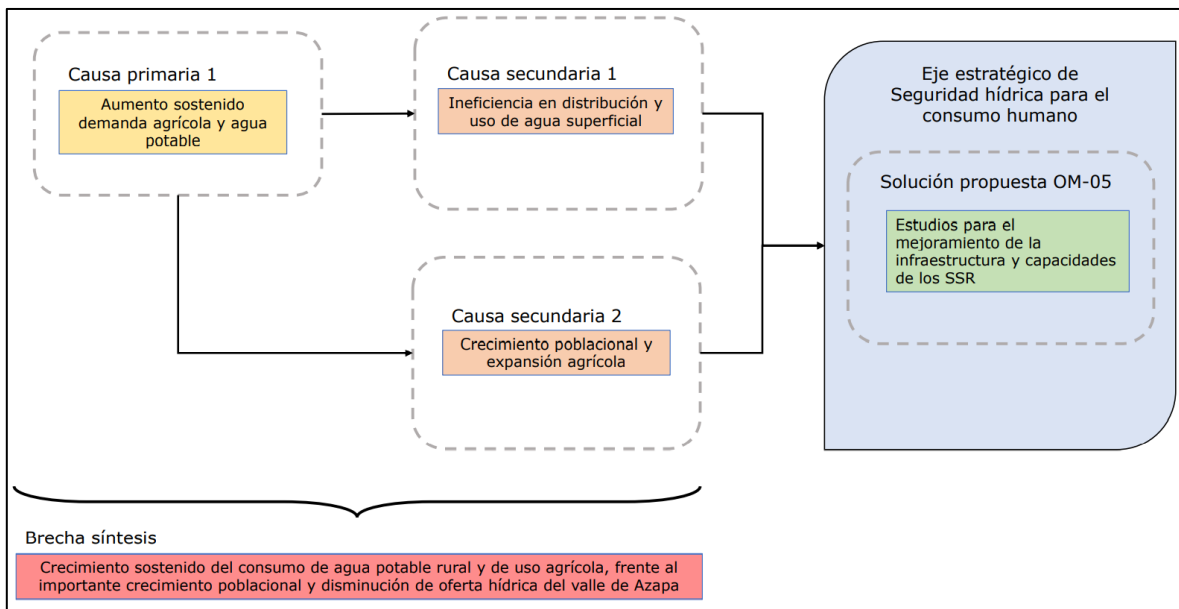


Figura 6-25. Árbol de problema y solución asociado a la medida OM-05.

Fuente: Elaboración propia (2022).

7. CARTERA DE INICIATIVAS PROPUESTAS

El presente capítulo entrega la cartera de iniciativas para el PEGH el acuífero del valle de Azapa (y algunas con alcance de cuenca), con la evaluación económica, social y ambiental, así como la priorización, valorización y cronograma propuesto para la implementación.

7.1 SÍNTESIS DE LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

La síntesis de las iniciativas se presenta a continuación organizadas según los Ejes estratégicos del PEGH (Tabla 7-1): Seguridad hídrica para consumo humano, Seguridad hídrica para actividades productivas, Seguridad hídrica para Ecosistema, Eventos extremos y Contaminación, Balance Hídrico, Gobernanza, Disponibilidad de información.

Tabla 7-1. Síntesis de acciones por Eje Estratégico, detallando la tipología, objetivo y brecha síntesis asociada.

Eje estratégico	Código PEGH	Nombre de la Acción	Tipología	Objetivo	Brecha síntesis
Seguridad hídrica para el consumo humano	OH-03	Programa de mejoramiento y mantención de la red de distribución de agua potable urbana	Obras Hidráulicas (OH)	Reducir pérdidas en la red de distribución de agua y optimizar la extracción para el uso hídrico urbano	Ineficiencia en el uso del agua para actividades agrícolas y de consumo humano urbano en un escenario de acuífero sobreexplotado
	MG-05	Programas de mentorías para el fortalecimiento y modernización de Servicios Sanitarios Rurales (SSR)	Medidas de gestión (MG)	Fomentar el aprendizaje, entre los SSR y desde la DOH, para fortalecer la gestión hídrica en la cuenca	Falta de organización, comunicación y fortalecimiento entre los diferentes usuarios de agua para un uso sustentable del recurso
	OM-05	Estudios para el mejoramiento de la infraestructura y capacidades de los SSR	Otras Medidas (OM)	Identificar debilidades de los SSR de la cuenca del río San José para fortalecer y mejorar su funcionamiento	Crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola, frente al importante crecimiento poblacional y disminución de oferta hídrica del valle de Azapa
Seguridad hídrica para las actividades productivas	OH-06	Programa de capacitación, mejoramiento y tecnificación de la infraestructura de riego	Obras Hidráulicas (OH)	Disminuir la extracción de agua mediante incorporación y mejoras en la infraestructura de riego	Ineficiencia en el uso del agua para actividades agrícolas y de consumo humano urbano en un escenario de acuífero sobreexplotado
	OM-01	Identificación de sitios para el desarrollo de micro tranques para la acumulación de aguas para su uso comunitario	Otras Medidas (OM)	Aumentar la seguridad y disponibilidad de agua de riego para los agricultores de la cuenca.	Disminución de la recarga y oferta de agua por el descenso de las precipitaciones y la incertidumbre de eventos extremos futuros
Seguridad hídrica para los ecosistemas	MG-03	Programa de capacitación en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas	Medidas de gestión (MG)	Disminuir y prevenir la contaminación antrópica de las aguas desde los usuarios con DAA otorgados	Aumento en la concentración de contaminantes antrópicos (uso agrícola y saneamiento) en las aguas superficiales y subterráneas

Eje estratégico	Código PEGH	Nombre de la Acción	Tipología	Objetivo	Brecha síntesis
	OM-02	Estudios sobre los servicios ecosistémicos de la cuenca y evaluación del estado de los ecosistemas	Otras Medidas (OM)	Identificar y caracterizar componentes ambientales del sistema hídrico que entreguen servicios ecosistémicos al valle	Desconocimiento sobre los servicios ecosistémicos hídricos del valle de Azapa
Seguridad hídrica ante eventos extremos y contaminación	OH-02	Implementación y mejoramiento de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas para SSR en localidades rurales concentradas en el valle de Azapa	Obras Hidráulicas (OH)	Prevenir la potencial contaminación del acuífero abordando las desigualdades en infraestructura hídrica entre sector urbano y rural, en relación a la cobertura de evacuación y tratamiento de aguas servidas	Aumento en la concentración de contaminantes antrópicos (uso agrícola y saneamiento) en las aguas superficiales y subterráneas
	OH-04	Construcción de obras fluviales para control aluvional y recarga del río San José en valle de Azapa	Obras Hidráulicas (OH)	Proteger las zonas vulnerables a inundación y generar la oportunidad de aprovechar de manera eficiente los eventos de lluvia	Incertidumbre sobre los impactos, magnitud y frecuencia de los efectos derivados del cambio climático
Balance Hídrico	OH-01	Embalse regulador y de control de crecidas de agua superficial para la reducción del riesgo y el aprovechamiento de riego y agua potable	Obras Hidráulicas (OH)	Regular crecidas y favorecer la recarga de aguas abajo del embalse	Disminución de la recarga y oferta de agua por el descenso de las precipitaciones y la incertidumbre de eventos extremos futuros
	NF-01	Planta desaladora para agua potable urbana	Nuevas Fuentes (NF)	Implementar una planta desaladora que aumente la oferta hídrica para agua potable urbana en condiciones de calidad aceptables	Crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola, frente al importante crecimiento poblacional y disminución de oferta hídrica del valle de Azapa
	NF-02	Reúso de aguas servidas tratadas urbanas para usos no agrícolas ni consumo humano	Nuevas Fuentes (NF)	Aprovechar el recurso hídrico previamente utilizado una o más veces en alguna actividad, para suplir las necesidades hídricas de los usuarios, sectores productivos que lo requieran o recargar el acuífero	Crecimiento sostenido del consumo de agua potable rural y de uso agrícola, frente al importante crecimiento poblacional y disminución de oferta hídrica del valle de Azapa

Eje estratégico	Código PEGH	Nombre de la Acción	Tipología	Objetivo	Brecha síntesis
	OM-03	Estudio de los cambios del sistema hídrico del Lauca sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río San José	Otras Medidas (OM)	Identificar los efectos de los cambios en la disponibilidad de agua del sistema Lauca sobre los caudales de la cuenca del río San José	Desconocimiento sobre los servicios ecosistémicos hídricos del valle de Azapa
Gobernanza	MG-01	Programa de sensibilización y apoyo legal, técnico y organizacional para la conformación de una Junta de Vigilancia del río San José	Medidas de gestión (MG)	Fortalecer vínculo entre los usuarios de agua para coordinar y organizar la gestión hídrica de la cuenca del río San José	Falta de organización, comunicación y fortalecimiento entre los diferentes usuarios de agua para un uso sustentable del recurso
	MG-02	Programa de fortalecimiento organizacional y de apoyo técnico para el funcionamiento inicial de la Comunidad de Agua Subterránea del acuífero del valle de Azapa	Medidas de gestión (MG)	Fortalecer a las organizaciones de usuarios de agua y directores para mejorar la gestión hídrica de la cuenca del río San José	Falta de organización, comunicación y fortalecimiento entre los diferentes usuarios de agua para un uso sustentable del recurso
	MG-06	Creación y fortalecimiento de la Oficina de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	Medidas de gestión (MG)	Promover la participación comunitaria y proporcionar información oportuna en materia de transparencia de la gestión hídrica en el territorio	Aumento de desconfianza hacia el sector público, privado y OUA, debilitando voluntad de interactuar con estas instituciones
	MG-07	Creación y promoción de un Consejo de cuenca que integre a los actores públicos y privados	Medidas de gestión (MG)	Generar instancias de trabajo y coordinación entre diferentes actores de la cuenca bajo una organización deliberativa	Deficiente coordinación entre los actores públicos para la implementación de acciones en gestión hídrica, considerando el sobre otorgamiento de DAA
Disponibilidad de Información	OH-05	Obras de ampliación y mejora de las estaciones de medición y monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río San José	Obras Hidráulicas (OH)	Mejorar y fortalecer la infraestructura de la Red Hidrométrica DGA, de manera de incrementar la cantidad y la calidad de los datos de monitoreo de las aguas	Baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial
	MG-04	Programa de apoyo al monitoreo de extracciones subterráneas efectivas de	Medidas de gestión (MG)	Establecer un programa de instrumentación, verificación, concientización y seguimiento de los	Baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y

Eje estratégico	Código PEGH	Nombre de la Acción	Tipología	Objetivo	Brecha síntesis
		usuarios estándar menor, medio y mayor en capacitación y cofinanciamiento		volúmenes utilizados en las extracciones	consumo del agua subterránea y superficial
	MG-08	Programa de saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) en el acuífero del valle de Azapa	Medidas de gestión (MG)	Perfeccionar los DAA a usuarios del acuífero del valle de Azapa	Baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial
	MG-09	Creación y capacitación en torno a la "Plataforma de Información Hídrica" integrada de la cuenca del río San José	Medidas de gestión (MG)	Fortalecer la gestión sustentable del agua en la cuenca del río San José a través de la complementación de la plataforma "en tiempo real" que integre las diferentes fuentes de información hídrica pública y privada disponibles y/o potenciales	Baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial
	OM-04	Revisión y actualización de las herramientas de modelación de acuerdo con las brechas identificadas	Otras Medidas (OM)	Actualizar, mejorar y abordar las brechas de modelación hídrica en la cuenca del río San José	Baja disponibilidad, acceso y oportunidad a información sobre la cantidad, calidad y consumo del agua subterránea y superficial

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.2 EVALUACIÓN DE LAS INICIATIVAS

La cartera de iniciativas propuestas se sometió a una evaluación social (a través de un proceso participativo con actores públicos y privados), económica (estimando costos e indicadores económicos), ambiental (criterio experto del equipo elaborador del PEGH) y estratégica (acorde a criterios definidos en cuanto al balance hídrico), permitiendo analizar la viabilidad de implementación y los costos y beneficios sociales, económicos y ambientales de la ejecución del Plan de acción.

7.2.1 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, que, para tener un indicador económico comparable entre las iniciativas propuestas, se utilizó el Valor Actual de Costos (VAC) y Costo Anual Equivalente (CAE).

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. El resumen de la evaluación económica se presenta en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Resumen de evaluación económica de iniciativas.

ID	Acción	VAC [UF]	CAE [UF]
MG-01	Programa de sensibilización y apoyo legal, técnico y organizacional para la conformación de una Junta de Vigilancia del río San José	6.555	3.281
MG-02	Programa de fortalecimiento organizacional y de apoyo técnico para el funcionamiento inicial de la Comunidad de Agua Subterránea del acuífero del valle de Azapa	1.943	648
MG-03	Programa de capacitación en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas	16.569	4.148

ID	Acción	VAC [UF]	CAE [UF]
MG-04	Programa de apoyo al monitoreo de extracciones subterráneas efectivas de usuarios estándar menor, medio y mayor en capacitación y cofinanciamiento	7.025	3.516
MG-05	Programas de mentorías para el fortalecimiento y modernización de Servicios Sanitarios Rurales (SSR)	37.148	3.727
MG-06	Creación y fortalecimiento de la Oficina de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	18.014	1.807
MG-07	Creación y promoción de un Consejo de cuenca que integre a los actores públicos y privados	4.688	470
MG-08	Programa de saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) en el acuífero del valle de Azapa	3.888	1.297
MG-09	Creación y capacitación en torno a la "Plataforma de Información Hídrica" integrada de la cuenca del río San José	7.022	704
NF-01	Planta desaladora para agua potable urbana	1.349.711	135.416
NF-02	Reúso de aguas servidas tratadas urbanas para usos no agrícolas ni consumo humano	1.329.210	133.360
OH-01	Embalse regulador y de control de crecidas de agua superficial para la reducción del riesgo y el aprovechamiento de riego y agua potable	543.653	54.544
OH-02	Implementación y mejoramiento de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas para SSR en localidades rurales concentradas en el valle de Azapa	21.351	2.142
OH-03	Programa de mejoramiento y mantención de la red de distribución de agua potable urbana	9.477	3.163
OH-04	Construcción de obras fluviales para control aluvional y recarga del río San José en valle de Azapa	2.248.217	225.564
OH-05	Obras de ampliación y mejora de las estaciones de medición y monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río San José	9.839	987
OH-06	Programa de capacitación, mejoramiento y tecnificación de la infraestructura de riego	50.410	10.100
OM-01	Identificación de sitios para el desarrollo de micro tranques para la acumulación de aguas para su uso comunitario	4.827	1.611

ID	Acción	VAC [UF]	CAE [UF]
OM-02	Estudios sobre los servicios ecosistémicos de la cuenca y evaluación del estado de los ecosistemas	1.704	852
OM-03	Estudio de los cambios del sistema hídrico del Lauca sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río San José	19.068	2.125
OM-04	Revisión y actualización de las herramientas de modelación de acuerdo con las brechas identificadas	4.916	2.460
OM-05	Estudios para el mejoramiento de la infraestructura y capacidades de los SSR	4.916	2.460

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.2.2 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 sección 7.

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. El detalle de la metodología se presenta en el Anexo F (sección 7.2) y a continuación se detalla la escala original de priorización.

En la Tabla 7-3 se presenta el resultado de la priorización por cada una de las iniciativas propuestas, donde se observa que las acciones con mayor votación ponderada fueron las relacionadas a nuevas fuentes y obras hidráulicas, seguidas por medidas de gestión y estudios.

Tabla 7-3. Resumen de evaluación social de las iniciativas.

ID	Acción	Resultado priorización ponderado
NF-01	Planta desaladora para agua potable urbana	1
OH-01	Embalse regulador y de control de crecidas de agua superficial para la reducción del riesgo y el aprovechamiento de riego y agua potable	1
OH-04	Construcción de obras fluviales para control aluvional y recarga del río San José en valle de Azapa	1
OH-06	Programa de capacitación, mejoramiento y tecnificación de la infraestructura de riego	1
MG-05	Programas de mentorías para el fortalecimiento y modernización de Servicios Sanitarios Rurales (SSR)	0,93
OH-05	Obras de ampliación y mejora de las estaciones de medición y monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río San José	0,93
OM-05	Estudios para el mejoramiento de la infraestructura y capacidades de los SSR	0,91
MG-08	Programa de saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) en el acuífero del valle de Azapa	0,89
OM-01	Identificación de sitios para el desarrollo de micro tranques para la acumulación de aguas para su uso comunitario	0,89
OH-02	Implementación y mejoramiento de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas para SSR en localidades rurales concentradas en el valle de Azapa	0,87
MG-03	Programa de capacitación en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas	0,82
MG-04	Programa de apoyo al monitoreo de extracciones subterráneas efectivas de usuarios estándar menor, medio y mayor en capacitación y cofinanciamiento	0,8
MG-07	Creación y promoción de un Consejo de cuenca que integre a los actores públicos y privados	0,8
OH-03	Programa de mejoramiento y mantención de la red de distribución de agua potable urbana	0,78

ID	Acción	Resultado priorización ponderado
OM-03	Estudio de los cambios del sistema hídrico del Lauca sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río San José	0,74
OM-02	Estudios sobre los servicios ecosistémicos de la cuenca y evaluación del estado de los ecosistemas	0,71
MG-09	Creación y capacitación en torno a la "Plataforma de Información Hídrica" integrado de la cuenca del río San José	0,71
MG-01	Programa de sensibilización y apoyo legal, técnico y organizacional para la conformación de una Junta de Vigilancia del río San José	0,7
MG-02	Programa de fortalecimiento organizacional y de apoyo técnico para el funcionamiento inicial de la Comunidad de Agua Subterránea del acuífero del valle de Azapa	0,67
NF-02	Reúso de aguas servidas tratadas urbanas para usos no agrícolas ni consumo humano	0,64
OM-04	Revisión y actualización de las herramientas de modelación de acuerdo con las brechas identificadas	0,62
MG-06	Creación y fortalecimiento de la Oficina de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	0,6

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.2.3 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: 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. En el Anexo F sección 7.3 se presenta la metodología de evaluación. La evaluación ambiental ponderada se presenta en la Tabla 7-4 junto con las demás evaluaciones del multicriterio.

7.2.4 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.

En el Anexo K.4 y Anexo F sección 7.4 se encuentra el detalle metodológico de la evaluación estratégica y en la Tabla 7-4 se presenta el resultado ponderado de la evaluación, junto con las demás evaluaciones del multicriterio y el puntaje final de la evaluación.

7.2.5 Priorización de las medidas según líneas de acción

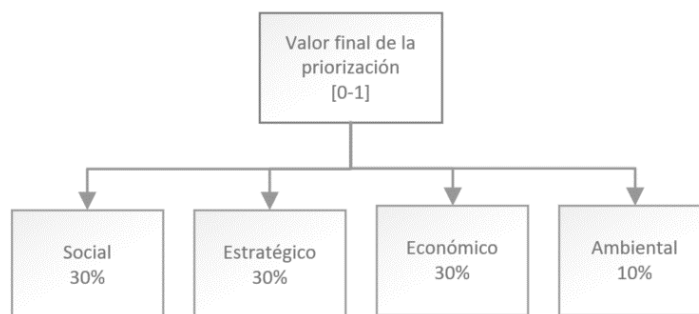
La priorización de las iniciativas busca definir una planificación para la implementación del plan de acción de acuerdo con el orden de prioridad de cada una de las medidas, acorde a los objetivos del PEGH y la seguridad hídrica, considerando la caracterización de la cuenca (en sus diferentes dimensiones), 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 con un enfoque multicriterio (detalle metodológico en el Anexo F sección 7.6).

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 7-1). Las puntuaciones asignadas y el resultado de priorización se presentan en la Tabla 7-4, organizadas de mayor prioridad a menor. Se excluyen de la priorización a las iniciativas que tienen asociadas un escenario de gestión simulado, dado que se priorizan de forma diferenciada según lo expuesto en las secciones 7.2.6 y 7.2.7.

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 7-1. Detalle de la construcción del valor ponderado final para la priorización multicriterio de acciones.



Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 7-4. Resultado de priorización de iniciativas sin balance hídrico según evaluación multicriterio.

ID	Eje estratégico	Iniciativa	Econ.	Social	Estra.	Ambie.	Prioriz. final
MG-05	Consumo humano	Programas de mentorías para el fortalecimiento y modernización de Servicios Sanitarios Rurales (SSR)	0,2	0,28	0,3	0,05	0,83
OM-05	Consumo humano	Estudios para el mejoramiento de la infraestructura y capacidades de los SSR	0,2	0,27	0,25	0,05	0,77
MG-04	Disponibilidad de información	Programa de apoyo al monitoreo de extracciones subterráneas efectivas de usuarios estándar menor, medio y mayor en capacitación y cofinanciamiento	0,2	0,24	0,25	0,08	0,77
MG-07	Gobernanza	Creación y promoción de un Consejo de cuenca que integre a los actores públicos y privados	0,15	0,24	0,3	0,08	0,77
OH-06	Actividades productivas	Programa de capacitación, mejoramiento y tecnificación de la infraestructura de riego	0,15	0,3	0,23	0,05	0,73
MG-03	Ecosistemas	Programa de capacitación en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas	0,2	0,25	0,18	0,1	0,72
OM-02	Ecosistemas	Estudios sobre los servicios ecosistémicos de la cuenca y evaluación del estado de los ecosistemas	0,2	0,21	0,18	0,1	0,69
MG-02	Gobernanza	Programa de fortalecimiento organizacional y de apoyo técnico para el funcionamiento inicial de la Comunidad de Agua Subterránea del acuífero del valle de Azapa	0,2	0,2	0,2	0,08	0,68
MG-08	Disponibilidad de información	Programa de saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) en el acuífero del valle de Azapa	0,2	0,27	0,12	0,05	0,64
MG-01	Gobernanza	Programa de sensibilización y apoyo legal, técnico y organizacional para la conformación de una Junta de Vigilancia del río San José	0,15	0,21	0,2	0,08	0,63
MG-06	Gobernanza	Creación y fortalecimiento de la Oficina de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	0,2	0,18	0,18	0,08	0,63
OH-05	Disponibilidad de información	Obras de ampliación y mejora de las estaciones de medición y monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río San José	0,15	0,28	0,12	0,05	0,6
OM-01	Actividades productivas	Identificación de sitios para el desarrollo de micro tranques para la acumulación de aguas para su uso comunitario	0,2	0,27	0,08	0,05	0,59
OH-03	Consumo humano	Programa de mejoramiento y mantención de la red de distribución de agua potable urbana	0,15	0,23	0,12	0,08	0,58

ID	Eje estratégico	Iniciativa	Econ.	Social	Estra.	Ambie.	Prioriz. final
OM-03	Balance hídrico	Estudio de los cambios del sistema hídrico del Lauca sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río San José	0,2	0,22	0,05	0,1	0,57
MG-09	Disponibilidad de información	Creación y capacitación en torno a la "Plataforma de Información Hídrica" integrado de la cuenca del río San José	0,15	0,21	0,12	0,08	0,56
OH-02	Eventos extremos y contaminación	Implementación y mejoramiento de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas para SSR en localidades rurales concentradas en el valle de Azapa	0,1	0,26	0,1	0,1	0,56
OM-04	Disponibilidad de información	Revisión y actualización de las herramientas de modelación de acuerdo con las brechas identificadas	0,15	0,19	0,12	0,08	0,54

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.2.6 Evaluación 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. 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 (acorde al escenario modelado). En todos los criterios se utiliza el promedio futuro del escenario de gestión simulado (2020-2050) para compararlo con el escenario base promedio futuro (2020-2050).

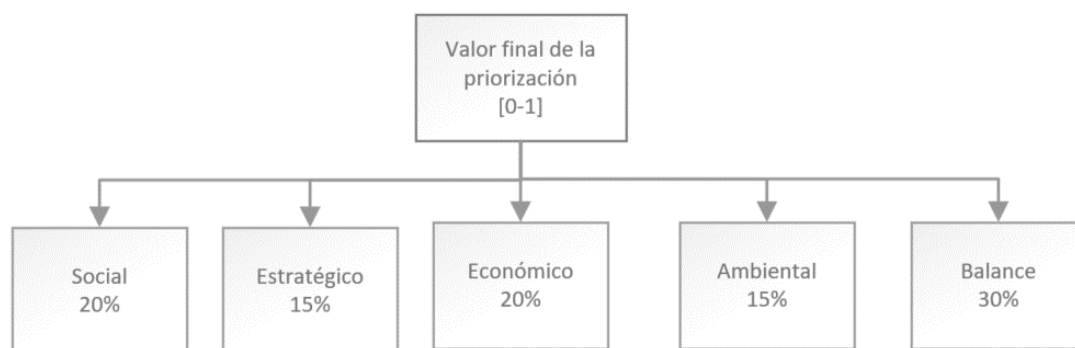
En el Anexo K.4 y Anexo F sección 7.5 se encuentra el detalle metodológico de la evaluación de balance y en la Tabla 7-5 se presenta el resultado ponderado de la evaluación considerando este quinto criterio, junto con las demás evaluaciones del multicriterio y el puntaje final de la evaluación.

7.2.7 Priorización de las medidas con resultados de balance según líneas de acción

Como se señala en los apartados del capítulo 5.3, sobre los escenarios de modelación, hay iniciativas dentro del plan de acción que presentan impactos cuantificados al balance hídrico del valle, en base al estudio DGA-DICTUC (2020). Estas iniciativas, en general, consisten en la instalación de obras grises de gran envergadura, por lo que contemplan altos costos económicos y largo plazo en la temporalidad de aplicación que afectaban la comparación con las demás acciones en una misma priorización.

Cada uno de los factores a evaluar presentan una ponderación diferente para el resultado final de la priorización, incorporando el criterio del balance, de acuerdo con el criterio experto del equipo consultor (Figura 7-2), mientras que en la Tabla 7-5 con una priorización paralela que considera sólo estas acciones. El detalle metodológico se presenta en el Anexo F, capítulo 7.6.

Figura 7-2. Detalle de la construcción del valor ponderado final para la priorización multicriterio de acciones.



Fuente: Elaboración propia (2022).

Tabla 7-5. Resultado de priorización de iniciativas con balance hídrico según evaluación multicriterio.

ID	Eje Estratégico	Iniciativa	Código escenario de gestión relacionado del capítulo 5.3	Económico	Social	Estratégico	Ambiental	Balance	Puntaje final
NF-02	Balance Hídrico	Reúso de aguas servidas tratadas urbanas para usos no agrícolas ni consumo humano	Escenario 5 (E-5): Reúso de Aguas Servidas e inyección	0,20	0,08	0,06	0,15	0,30	0,79
OH-01	Balance Hídrico	Embalse regulador y de control de crecidas de agua superficial para la reducción del riesgo y el aprovechamiento de riego y agua potable	Escenario 3 (E-3): Embalse Livilcar	0,14	0,11	0,03	0,15	0,17	0,60
NF-01	Balance Hídrico	Planta desaladora para agua potable urbana	Escenario 2 (E-2-1): Planta Desaladora Agua de Mar 200 L/s	0,13	0,13	0,02	0,15	0,13	0,56
OH-04	Eventos extremos y contaminación	Construcción de obras fluviales para control aluvional y recarga del río San José en valle de Azapa	Escenario 4 (E-4-1): Tres Barreras de Goma para infiltración hacia el acuífero (Recarga Artificial)	0,05	0,11	0,07	0,04	0,21	0,48

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.3 VALORIZACIÓN ECONÓMICA DEL PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA

Las medidas contempladas en el presente Plan de Acción ascienden a un valor actual de costos de 5.700.151 UF, donde todas las acciones están evaluadas a un máximo de 10 años. El costo anual equivalente total asciende a 594.382 UF, con las mismas consideraciones de horizonte de evaluación indicadas.

La implementación de las iniciativas consideradas en el presente PEGH dependen casi exclusivamente de la inversión fiscal, por lo que toma especial relevancia la estrategia de financiamiento que permita implementar el Plan de Acción con éxito. Para ello, es necesario una coordinación con las entidades públicas, reasignación de presupuesto público, y la gestión de los fondos y/o programas en forma consistente a los objetivos y medidas del Plan. Junto con considerar la posibilidad de que las iniciativas se acojan a subsidios y herramientas de política existente, o en su defecto, definir programas específicos acorde a lo planteado en cada medida. De esta manera, la estrategia de financiamiento para la implementación de las medidas debe considerar las principales fuentes de financiamiento nacionales, pero también debe tener a la vista las fuentes internacionales, como fondos de acción climática enfocados en, por ejemplo, la construcción de obras de gestión de agua y obras adaptativas y de gestión de riesgo frente a desastres. Por ello, se recomienda evaluar la aplicabilidad de dichos fondos internacionales durante la implementación del presente Plan.

A continuación, en base al financiamiento nacional, se resumen las acciones según el responsable de su ejecución, quien deberá asegurar la implementación de la iniciativa a través de la coordinación de distintos actores, asignando presupuesto público, y/o gestionando los fondos y/o programas relacionados.

7.3.1 Acciones según ejecutor o institución responsable

Sobre las iniciativas propuestas en que se ha identificado a la DGA como institución responsable (ver Tabla 7-6), es importante destacar que muchas de ellas dependen directamente de dicha institución. Esto debe ser un aspecto clave a considerar en la implementación, dado que la DGA Regional debiera asumir un aumento en sus tareas cotidianas por la gran responsabilidad para llevar adelante las acciones propuestas.

Tabla 7-6. Iniciativas ejecutadas por DGA.

ID	Acción	Institución responsable
MG-02	Programa de fortalecimiento organizacional y de apoyo técnico para el funcionamiento inicial de la Comunidad de Agua Subterránea del acuífero del valle de Azapa	DGA
MG-04	Programa de apoyo al monitoreo de extracciones subterráneas efectivas de usuarios estándar menor, medio y mayor en capacitación y cofinanciamiento	DGA
MG-09	Creación y capacitación en torno a la "Plataforma de Información Hídrica" integrada de la cuenca del río San José	DGA
OH-05	Obras de ampliación y mejora de las estaciones de medición y monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río San José	DGA
OM-04	Revisión y actualización de las herramientas de modelación de acuerdo con las brechas identificadas	DGA

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.3.2 Acciones ejecutadas por otras instituciones

De acuerdo con las acciones ejecutadas por otras instituciones ejecutoras, sobre el desarrollo de diversos estudios y la participación en mesas de coordinación entre actores, destaca principalmente la CNR y el DOH, seguido del GORE, MMA y la Municipalidad de Arica. En la Tabla 7-7 se presentan las iniciativas según la institución responsable.

Tabla 7-7. Iniciativas ejecutadas por otras instituciones.

ID	Acción	Institución responsable
MG-01	Programa de sensibilización y apoyo legal, técnico y organizacional para la conformación de una Junta de Vigilancia del río San José	CNR
MG-08	Programa de saneamiento de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) en el acuífero del valle de Azapa	CNR
OH-06	Programa de capacitación, mejoramiento y tecnificación de la infraestructura de riego	CNR
OM-01	Identificación de sitios para el desarrollo de micro tranques para la acumulación de aguas para su uso comunitario	CNR
MG-05	Programas de mentorías para el fortalecimiento y modernización de Servicios Sanitarios Rurales (SSR)	DOH
NF-01	Planta desaladora para agua potable urbana	Aguas del Altiplano y DOH
OH-01	Embalse regulador y de control de crecidas de agua superficial para la reducción del riesgo y el aprovechamiento de riego y agua potable	DOH
OH-02	Implementación y mejoramiento de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas para SSR en localidades rurales concentradas en el valle de Azapa	DOH

ID	Acción	Institución responsable
OH-04	Construcción de obras fluviales control aluvional y/o para recarga del río San José en valle de Azapa	DOH
OM-05	Estudios para el mejoramiento de la infraestructura y capacidades de los SSR	DOH
NF-02	Reúso de aguas servidas tratadas urbanas para usos no agrícolas ni consumo humano	DOH y Municipalidad de Arica
MG-07	Creación y promoción de un Consejo de cuenca que integre a los actores públicos y privados	Gobierno Regional
MG-03	Programa de capacitación en prevención y vigilancia de la contaminación de las aguas	MMA
OM-02	Estudios sobre los servicios ecosistémicos de la cuenca y evaluación del estado de los ecosistemas	MMA
OM-03	Estudio de los cambios del sistema hídrico del Lauca sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río San José	MMA y DGA
MG-06	Creación y fortalecimiento de la Oficina de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	Municipalidad de Arica

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.3.3 Distribución de costos por actores

Con respecto a los resultados de la evaluación económica y la responsabilidad de los actores en llevar adelante las iniciativas priorizadas, destaca que el MOP es la institución que mayor inversión debe realizar, en cuanto a las subdivisiones de DOH y DGA. Le sigue Aguas Altiplano y la CNR. En la Tabla 7-8, Figura 7-3 y Figura 7-4 se presentan los costos asociados (VAC y CAE) para cada una de las instituciones en la ejecución del presente PEGH.

Cabe destacar, que en el caso de las iniciativas MG-03, NF-02 y OM-03, que cuentan con más de un organismo financiador para la ejecución de la acción, este se asoció totalmente a los entes del Ministerio del Medioambiente (MG-03 y OM-03) y a Aguas Altiplano (NF-02).

Tabla 7-8. Distribución de costos según responsable.

Institución	VAC [UF]	CAE [UF]
DGA	23.723	7.611
Otras instituciones:		
CNR	65.680	16.289
DOH	4.204.996	423.853
CORFO	7.022	704
Gobierno Regional	22.702	2.277
Aguas Altiplano	1.338.687	136.523
MMA	37.341	7.124
TOTAL	5.700.151	594.381

Fuente: Elaboración propia (2022).

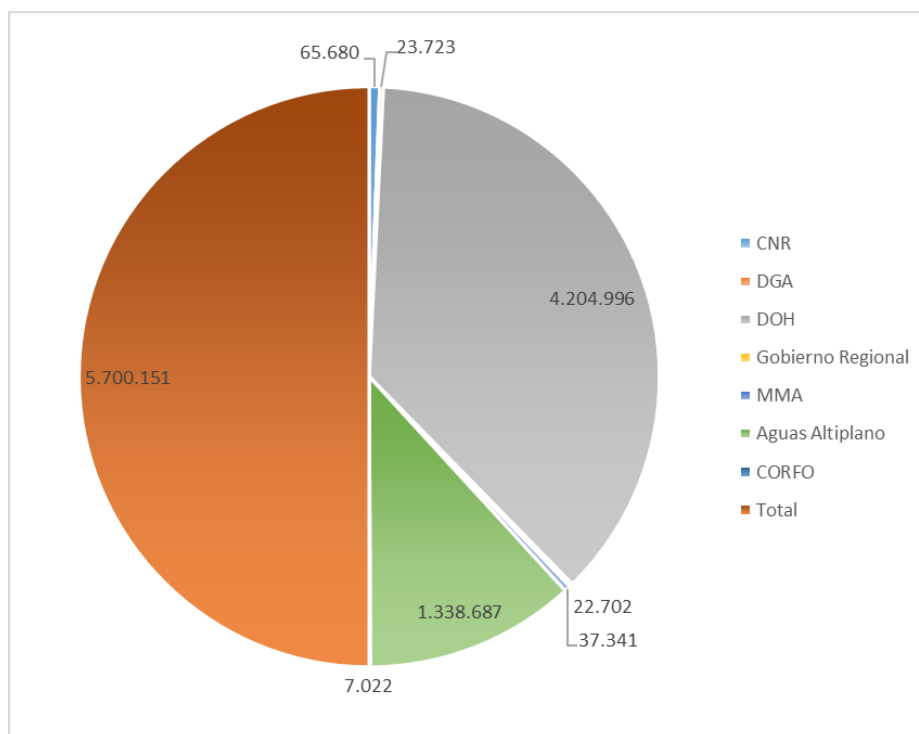


Figura 7-3. VAC [UF] por entidad responsable.

Fuente: Elaboración propia (2022).

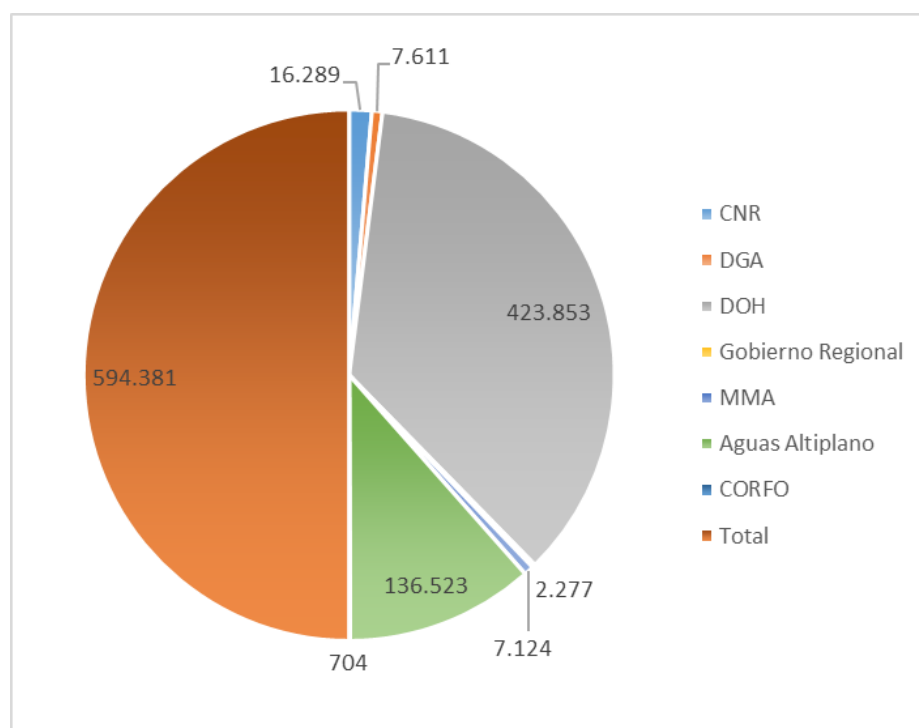


Figura 7-4. CAE [UF] por entidad responsable.

Fuente: Elaboración propia (2022).

7.4 CRONOGRAMA DE SOLUCIONES

El cronograma de ejecución del Plan de acción es el resultado del análisis e integración de los diversos componentes trabajados, priorizados y seleccionados a través de todo el estudio. En él se establecen los plazos para la puesta en práctica de las distintas iniciativas, teniendo en cuenta la priorización de acciones realizada con anterioridad. Este cronograma se propone sea validado y ajustado en el proceso de implementación del plan. En la Figura 7-5 se presentan las 22 iniciativas propuestas con el plazo indicado para cada una de ellas.

8. IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

En el presente capítulo se presenta la propuesta de implementación del Plan, es decir, la planificación asociada a la Cartera de Iniciativas, teniendo en cuenta el cronograma del Plan de acción y sus horizontes (corto, mediano y largo plazo) y los actores responsables de estas iniciativas agrupados en una propuesta de estructura de gobernanza.

También incluye algunas directrices a considerar apuntando a una implementación efectiva del Plan, que consideran tanto los obstáculos como oportunidades derivadas de los aspectos institucionales y de la cultura del agua del territorio en cuestión, así como las fuentes de financiamiento necesarias para su puesta en práctica y aspectos legales relevantes que habilitan o condicionan la implementación. Además, se presenta una propuesta de estrategia de comunicación para este proceso de implementación.

Para continuar con la lógica conceptual propuesta en la sección 6.1, la estrategia de implementación del plan es desarrollada por cada Eje Estratégico del Plan. La descripción por eje da cuenta de las distintas iniciativas señalando cada vez que corresponda la identificación de hitos de referencia, aspectos institucionales, culturales -esto incluye prácticas asentadas y reconocidas, tensiones/conflictos de mayor temporalidad, etc.-, de financiamiento y aspectos normativos. Luego, se presenta una estructura de gobernanza base para implementar el plan, para finalizar con la estrategia de comunicación y difusión de éste.

8.1 IMPLEMENTACIÓN POR EJES ESTRATÉGICOS DEL PLAN

Considerando la problemática central de creciente escasez hídrica de aguas subterráneas para el acuífero del valle de Azapa, y considerando el plan de acción y la priorización de iniciativas presentadas en el capítulo precedente, a continuación, se detallan aspectos relevantes de mencionar para la implementación de las iniciativas según los siete ejes estratégicos del PEGH del acuífero del valle de Azapa.

8.1.1 Seguridad Hídrica para el consumo humano

Este eje de seguridad hídrica se basa en la premisa de que exista agua en calidad y cantidad adecuada y accesible para el consumo humano, tanto urbano como rural. Además, busca resguardar el 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.

En el presente PEGH se proponen tres acciones directamente ligadas con este Eje, dividiendo dos enfocadas en agua potable rural (MG-05 y OM-05) y una para agua potable urbana (OH-03).

En el caso del agua potable rural, una de las acciones se relaciona con el funcionamiento de las APR, ante lo cual es importante mencionar que estas se deben regir en la actualidad por la Ley 20.998 que regula los servicios sanitarios rurales, estableciendo exigencias relevantes como el saneamiento de las aguas servidas y otras que resultan de preocupación para estas organizaciones. Si bien es cierto que esta temática se aborda en el Eje 4 de seguridad hídrica (OH-02, sobre los sistemas

de tratamiento para los sistemas de agua potable rural), en este Eje se considera una acción (MG-05) para intercambiar experiencias entre los distintos servicios de agua potable rural que operan en el valle, considerando por ejemplo que el APR de San Miguel de Azapa cuenta desde el año 2000 con un sistema de tratamiento de aguas servidas tratadas. El mismo programa de mentorías apunta a que la DOH capacite y asesore a los distintos APR del área de estudio en coherencia con los desafíos de la Ley de SSR, para fortalecer la gestión del agua en la cuenca. Cabe destacar que los servicios de agua potable rural son conocidos en el valle como APR y no como SSR (definidos en la nueva ley), puesto que constituye un cambio reciente, cuestión que debe ser considerado en cualquier programa de mentoría.

Por otro lado, el aumento de población en el valle de Azapa representa un desafío relevante para asegurar el consumo humano a todos los nuevos habitantes del valle. Esto resulta complejo en un contexto ya casi cultural, en que existe un reconocimiento social amplio del alto nivel de extracciones ilegales, a lo que se suma el aumento de las extracciones para la actividad productiva (agricultura) y para el consumo humano urbano (por el aumento de la población futura del valle) y las alternativas para satisfacer la demanda de agua potable rural creciente. Este tipo de estudios (OM-05) es de gran importancia para nutrir la coordinación interinstitucional en torno a la gestión integrada de la cuenca del río San José y la planificación territorial, de modo de no sobrepasar la capacidad de carga del valle en cuanto al número de personas a las que se les puede asegurar el agua en cantidad y calidad adecuadas. Es importante señalar, que estas acciones, aunque son relevantes no lograrán resolver los problemas derivados de un aumento no regulado de población rural, para lo cual es requerido proceso de ordenamiento territorial que al 2022 no cuenta con los instrumentos suficientes para abordar de manera eficaz esta clase de desafíos.

En el caso del agua potable urbana, se propone una acción directa que apunta al mejoramiento y mantención de la red de distribución (OH-03), la que demanda una coordinación interinstitucional público y privada entre la SISS y Aguas del Altiplano, considerando que la pérdida estimada es del orden del 40%, por lo que esta medida apunta a mejorar la eficiencia y disminuir la demanda. Esto es relevante no solo en términos de reducción de demanda para el valle de Azapa sino también para reducir las tensiones entre actores. Desde hace algunos años en el valle existe un conflicto relevante entre los agricultores del valle de Azapa y la empresa Aguas del Altiplano, pues gran parte de la extracción de agua potable para la ciudad de Arica viene de la extracción de aguas subterráneas desde el acuífero del valle de Azapa, por lo que medidas que apunten a disminuir la presión sobre el acuífero son relevantes para mermar la tensión entre los actores del área de estudio, siendo un objetivo secundario. Por último, y en términos financieros, esta medida de eficiencia podría ser amortiguada mediante el cobro en las tarifas del agua potable de la ciudad de Arica a través de algún mecanismo que no signifique un aumento considerable de las tarifas mensuales.

En términos de hitos, es importante destacar que las tres iniciativas propuestas para este eje están altamente priorizadas (sección 7.2), por lo que se propone comenzar en el corto plazo con las tres medidas, dado que las de agua potable rural estarían dirigidas por la DOH y la de agua potable urbana por la SISS. No obstante, es importante considerar que la OH-03 tendría un plazo de implementación más cercano al mediano plazo.

8.1.2 Seguridad Hídrica para las actividades productivas

Los usos productivos relacionados con el acuífero de Azapa se vinculan principalmente a la actividad agrícola, por lo cual la seguridad hídrica productiva del valle se relaciona especialmente con la disponibilidad de agua en calidad y cantidad para sus requerimientos.

La agricultura y el agua de uso para riego en la cuenca tienen una gran importancia, no tan sólo desde el ámbito económico y productivo en los mercados regional, nacional y de exportación, sino que también en la cultura y economía de subsistencia de las y los habitantes del Valle. En las actividades participativas las y los agricultores, han priorizado este uso de agua por sobre los demás.

Medidas para mejorar la disponibilidad de agua para la agricultura desde la calidad se abordan desde la seguridad hídrica para los ecosistemas, mientras que, para la cantidad, hay posibilidades de disminuir la presión en el acuífero en la medida que las aguas superficiales sean usadas más eficientemente, dada la práctica asentada de recurrir a las aguas subterráneas como suplemento en caso de escasez de agua superficial e inclusive mezclar ambas fuentes de agua como una forma de mejorar la calidad del agua para riego. Así, la medida de capacitación y tecnificación y mejoramiento de la infraestructura de riego resulta relevante para este fin (OH-06). Asimismo, la acción para identificar sitios para la construcción de microtranques (OM-01) es una base que permitirá orientar el desarrollo de esta infraestructura de forma más rápida que una obra como un embalse, y que se han impulsado por CNR en otras zonas y que fue propuesto para esta Región en el pasado Plan de Riego, pudiendo ayudar a mejorar la eficiencia en el uso de agua de riego.

La eficiencia de riego a nivel intra-predial aunque aún tiene brechas que disminuir, resulta una temática cercana y conocida en esta cuenca y región en general, por ser un aspecto promovido desde el Estado desde varias décadas atrás para adaptarse a la escasa disponibilidad hídrica, lográndose inclusive en algunos casos niveles de productividad destacados en algunos rubros como el tomate. Con todo, sigue siendo un desafío el correcto uso de los sistemas de riego tecnificados.

La eficiencia en el aprovechamiento del agua superficial vista como un mecanismo para disminuir la presión sobre las aguas subterráneas, debe ir acompañado por acciones institucionales provenientes de la política pública agrícola, en cuanto a que esta eficiencia vaya en favor de la sustentabilidad hídrica y no de la expansión agrícola, cuestión que requiere cambios normativos (en la ley 18.450 por ejemplo), y de política pública, que garantice que estos efectos expansivos no ocurrirán, descartándolo como un criterio favorable al menos en territorios como los del valle de Azapa.

Esto debiese además ir acompañado con fomento desde la CNR orientado a la recarga de acuíferos, cuestión ya promovida por este servicio en otras zonas del país. Estas acciones a nivel de política pública requieren coordinaciones entre instituciones: DGA, CNR, DOH y BBNN, toda vez que este último tiene incidencia indirectamente en la expansión agrícola a través de la entrega de tierras fiscales para nuevos emplazamientos de viviendas.

Cabe señalar también la ya existencia de una obra que busca mejorar la eficiencia en la conducción y esta es el entubamiento de parte del canal Azapa, proyecto controversial por las dificultades que han existido para ponerlo en funcionamiento, y la disconformidad

presente en la OU a cargo de administrarlo en el futuro (COMCA). Se debe evaluar si esta situación puede tener algún efecto en la acogida de nuevas iniciativas de mejoramiento de infraestructura, las cuales deberán realizarse con participación de los beneficiarios de modo de disminuir situaciones como las constatadas respecto al proyecto de entubamiento.

Por otra parte, la disposición desde el sector agrícola empresarial de mayor escala, así como semilleras es más favorable por su orientación al logro de estándares mayores en materia de sustentabilidad, como certificaciones u otros, siendo un aspecto que puede ser abordado a través de la coordinación interinstitucional entre organismos públicos y los privados, promoviendo certificaciones de sustentabilidad, acuerdos de producción limpia u otros instrumentos de gestión.

8.1.3 Seguridad Hídrica para los ecosistemas

La seguridad hídrica para los ecosistemas viene dada por la posibilidad de contar con agua en calidad y cantidad para su mantención en el tiempo, lo cual genera a su vez beneficios sociales a través de los servicios que generan (servicios ecosistémicos).

En esta línea, la medida que propone su estudio (OM-02) resulta clave para reconocer el estado de un ámbito algo invisibilizado en el contexto de la gestión hídrica de la cuenca. A este respecto, cabe destacar que entre los actores locales involucrados en los procesos participativos no se evidenció preocupación por el estado de los ecosistemas, salvo por la disponibilidad hídrica -ya fuera en cantidad o calidad- y sus efectos en el uso/interés que representaban. Tampoco se evidenció una mirada de cuenca o de sistema, que pudiera poner en valor los sistemas ecológicos, salvo para dar cuenta de que existen fuentes de agua en las zonas altas, pero sin poner énfasis en los equilibrios necesarios para la sustentabilidad hídrica del valle.

Es posible que esta sea solo una observación parcial de lo que ocurre socialmente en el valle de Azapa respecto al valor de los ecosistemas existentes, o es quizás una condición más bien cultural, presente en la sociedad regional en general. Cabe preguntarse si será necesario incorporar esta sensibilización a nivel de colegios, especialmente en la educación rural, que se enfoque en el valor de los sistemas ecológicos de la Cuenca y la Región.

En este sentido, esto se condice con la observación a nivel institucional de una Seremi de Medio Ambiente algo aislada de las otras entidades públicas o el GORE, en cuanto a su consideración en las políticas hídricas las que se restringen al ámbito productivo y de consumo humano. Desde esta Seremi del MMA se evidencia una puesta en valor de los ecosistemas más allá de su valor productivo, pero esto no ha permeado hacia los otros actores institucionales. Esto resulta un aspecto crítico a considerar en la gobernanza del Plan y de otras iniciativas relacionadas con los recursos hídricos en la Región.

Por último, es importante mencionar que la implementación OM-02 y OM-03 (del eje Balance Hídrico), al corto plazo, generará información relevante además para el diseño posterior de capacitaciones (MG-03) de una manera más integradora y que no se reduzca solo a la relación de la contaminación con los usos antrópicos.

8.1.4 Seguridad Hídrica ante eventos extremos y contaminación

La búsqueda de seguridad hídrica debe traer consigo acciones en la línea de abordar los riesgos, los cuales en este caso se relacionan con la ocurrencia de eventos extremos y de contaminación, de modo de aumentar la resiliencia territorial.

En este sentido las medidas para prevenir la contaminación (OH-02) y la protección contra potenciales aluviones (OH-04), son acciones pertinentes que además guardan toda coherencia con las políticas y acciones actuales desde el Estado, previéndose que su financiamiento pudiera estar asociado a la DOH o a SUBDERE con su Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR). En el caso de la acción de protección contra aluviones y crecidas (OH-04) es importante mencionar que posee una sinergia con los objetivos del Eje de Balance Hídrico, de mejorar la disponibilidad general de agua a través de la recarga, combinando por tanto el objetivo de control de crecidas y aluviones con la recarga de acuíferos, por lo que se propone como hito al mediano plazo para su implementación.

Por otro lado, la iniciativa para implementar y mejorar los sistemas de alcantarillado (OH-02), a pesar de que es coherente además con la nueva legislación vigente que regula los SSR (Ley 20.998 del MOP), se requieren múltiples estudios y trabajos a realizar para su implementación, involucrando a diversos organismos públicos. Así, a pesar de que su implementación se prevé que sea en el largo plazo (hito), será clave la coordinación interinstitucional a nivel de cuenca y región para lograr esta tarea.

8.1.5 Balance Hídrico

Complementario a los ejes de seguridad hídrica, existen diversas iniciativas que guardan relación con la reducción de la brecha entre la oferta y demanda de agua, lo que condiciona transversalmente a los Ejes de Seguridad Hídrica anteriormente abordados. En este caso, las iniciativas relacionadas al balance guardan relación en su mayoría con buscar reducir el escenario de sobre explotación del acuífero (*delta* entre oferta y demanda que se oriente a un balance positivo idealmente), y cuentan con la particularidad que constituyeron escenarios de gestión simulados a través del modelo numérico acoplado (sección 5.3).

La iniciativa vinculada al control de crecidas e infiltración (OH-01) está en línea con prever un riesgo de menor recarga natural, por lo que evidentemente es positivo para abordar la sobreexplotación del acuífero, así como también mitigar los efectos del cambio climático como son los eventos extremos (lluvias altiplánicas). No obstante, cabe destacar que esta iniciativa en la cuenca ha estado representada por el Embalse Livilcar, el que, dado que no tiene por objetivo directo el aumentar la seguridad de riego, enfrenta un escenario de dificultad de financiamiento. En efecto, de acuerdo con los aportes recibidos de parte de la DOH en el contexto de este estudio, el embalse Livilcar no se puede implementar en el marco del DFL 1123 que regula las obras de riego financiados por el Estado. Se espera cuente con financiamiento 100% del Estado generando numerosos impactos positivos, por mitigación de daños de crecidas y sedimentos, recarga de la napa, entre otros.

Por su parte, la medida que busca la reutilización de aguas servidas tratadas (NF-02) deberá considerar el cumplimiento de la normativa vigente si se considerase su infiltración posterior en el acuífero (DS 46, 2002, MINSEPRES) para contrarrestar, por ejemplo, la intrusión marina o el desbalance del acuífero en el sector del valle de Azapa.

Con o sin recarga posterior, esto requiere de una importante coordinación institucional entre quienes se relacionan al tratamiento de las aguas y quienes las usen -DOH, SISS, Municipio, si se usara para riego de áreas verdes-, que asegure el cumplimiento de los estándares requeridos para los distintos usos.

La acción relacionada a la planta desaladora (NF-01) es una medida que desde el sector sanitario (público y privado) se mira con cautela por los costos que puede conllevar a un aumento de tarifa a los usuarios. Por otra parte, en el mundo rural, los usuarios de agua -al menos aquellos que participaron en el proceso participativo- ven como positivo esta acción toda vez que conllevaría a que la empresa sanitaria -la responsable de los problemas de escasez a juicio de estos actores- extraería una menor cantidad de agua subterránea desde el acuífero del valle de Azapa.

Por último, es importante mencionar la iniciativa que estudia los efectos del sistema hídrico del Lauca en la disponibilidad hídrica (OM-03) dentro del Eje, ya que puede ayudar a revalorizar no solo los sistemas ecológicos -siempre que sus resultados sean debidamente difundidos- sino que también los efectos dentro del Balance de cambios en la disponibilidad del Lauca, lo que debiera realizarse a corto plazo, en sinergia con la acción OM-04 (Eje Disponibilidad de Información).

En cuanto a los hitos, la acción OM-03 es una de las acciones de menor plazo de implementación, no obstante, no fue altamente priorizada en el análisis multicriterio, por lo que puede ser implementada en el mediano plazo. No obstante, por la relevancia de dichos datos para la planificación estratégica de la cuenca, es importante que sea ejecutada al corto plazo.

Por otro lado, en los casos de las acciones NF-01 y OH-01, estas representan iniciativas de gran inversión económica que, además, cuentan con incertidumbre del plazo final de implementación, por los múltiples estudios y trabajos a realizar, los que requieren sortear diversos desafíos administrativos donde será clave la coordinación interinstitucional a nivel de cuenca y región. Por lo tanto, son acciones de largo plazo, por lo que los hitos correspondientes debieran estar considerados para siete años o más.

8.1.6 Gobernanza

Dentro de los aspectos institucionales condicionantes que pueden afectar la implementación del Plan se destaca la falta de instancias interinstitucionales para resolver los problemas y gestionar eficientemente la cuenca, en donde se podría mejorar la coherencia, organización y capacidad institucional. Por ello la propuesta de un Consejo de Cuenca (MG-07) puede ser una buena respuesta para abordar esta necesidad.

No obstante, las instancias interinstitucionales han existido previamente en el territorio (mesas del agua, consejo hídrico). El Gobierno Regional desarrolló desde 1998 al menos, estas instancias de interacción: primero con el Plan director de la Cuenca del Río San José. Fruto de ese trabajo surge formalmente la Comisión Regional de Recursos Hídricos. Años después, en 2006, surge la Mesa del Agua de Arica y Parinacota (MOP, 2011¹⁰).

Estas instancias han tenido diferentes características en cuanto a la diversidad de actores involucrados y su orientación, pasando de estructuras que involucran actores públicos,

¹⁰ Ministerio de Obras Públicas. (2011). Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2018.

privados y sociales, como espacios de diálogo más amplio, más políticos, a otros más acotados y de orden técnico, más de gestión. En cualquier caso, se han caracterizado por ser instancias en las cuales que el Estado ha podido mejorar su conocimiento sobre la situación de escasez del valle, sobre los intereses de los afectados, pero no necesariamente transfiriendo su poder de toma de decisiones a los actores privados o sociales involucrados.

Además, han sido instancias formalizadas en horizontes de corto y mediano plazo, pero que siempre se han visto limitados por la temporalidad del gobierno de turno, lo cual no ha permitido que se consoliden en el tiempo, mermando su eficacia en la generación de acciones en el largo plazo y en su adecuado seguimiento. Esto resulta un aspecto crítico a tener en consideración, sobre cómo generar estructuras más estables en el tiempo, ante lo cual las experiencias pasadas pueden resultar un insumo de utilidad para estos nuevos diseños de estructuras de coordinación a nivel de cuenca.

Hoy en día (2022) se reconoce (a partir de las instancias de participación con los organismos públicos), una voluntad para coordinarse a nivel de funcionarios, quienes conocen estas experiencias previas y su valor, pero se pone en evidencia la necesidad que se incorporen recursos humanos exclusivamente para la coordinación de estas instancias, y que no resida en ninguno de las entidades sectoriales, sino que venga de orden superior que pudiese ser encabezado desde el GORE, a lo que además se podría adicionar que pudieran trascender de alguna forma a los gobiernos de turno, es decir que pudieran institucionalizarse.

Esta propuesta, sin embargo, no estará exenta de obstáculos importantes, como las tensiones existentes -tanto internas como con otros actores- a nivel de organizaciones de usuarios, en particular la COMCA, que es la principal organización de usuarios de aguas presente en el valle, la cual además tiene una participación relevante en los derechos de agua subterráneas del acuífero, siendo un actor clave para la gestión hídrica en su conjunto.

Esto también se vincula a la iniciativa de fortalecimiento organizacional y apoyo técnico a la nueva CAS (MG-02) que deberá además sensibilizar sobre su importancia y los beneficios que pueden obtenerse de su adecuado funcionamiento, pues al menos desde el proceso participativo llevado a cabo en el marco de este Plan, se percibe un bajo sentido de lo colectivo y desconfianza entre usuarios de agua de distintos sectores del valle. Esto se refuerza con la condición ilegal de una parte de las extracciones, que se verían perjudicadas con el funcionamiento efectivo de la CAS, poniendo en evidencia la importancia de un acompañamiento inicial para su funcionamiento. Es importante que la CAS termine su proceso de conformación, para evitar perjuicios administrativos como la limitación de aprobar el cambio de punto de captación por parte de DGA a quienes no se hagan parte de la CAS (para más detalles ver artículo 63 del Código de Aguas reformado en 2022). Siguiendo con las iniciativas en torno a las OU, se percibió en este proceso que la conformación de una JV a nivel de cuenca no es bien recibida por todos los actores, puesto que a 2022, no se opera en la cuenca como una sola unidad y su transformación es un asunto no deseado, en particular desde las zonas más altas de la cuenca, aunque no se puede asegurar tampoco que esto será bien acogido por la zona baja de la cuenca. Por ello la iniciativa que opera en esta materia, también debe incluir acciones de sensibilización (MG-01) que ayude a reconocer los beneficios de una gestión coordinada a nivel de cuenca.

Frente a todos estos desafíos, y de modo de involucrar a más actores, una Oficina de Asuntos Hídricos a nivel municipal (MG-06) puede contribuir en materia de sensibilización acerca de la importancia de las OU que se propone conformar y fortalecer, y pueda aclarar las dudas de usuarios e interesados en general. En este sentido, que esta propuesta se establezca a nivel municipal, se considera positivo, toda vez que el municipio es visto como una entidad que contribuye a la resolución de problemas locales. No obstante, tal como ocurre a nivel central/regional, la permanencia de estas instancias dependerá mucho de la importancia política que se le asigne desde el territorio y de la Municipalidad en particular.

8.1.7 Disponibilidad de Información

El último eje estratégico del plan condiciona la certidumbre sobre el estado de Seguridad Hídrica en un momento y territorio determinado, así como también 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 a través de un proceso de toma de decisiones acertadas y basada en el conocimiento en materia de gestión hídrica.

A este respecto se proponen una serie de acciones que buscan mejorar la cobertura geográfica de los datos de monitoreo a través de más estaciones (OH-5) que permitan contar con mejor información. Si bien esta acción se espera concretarla por completo en el mediano plazo, es necesario cumplir hitos en el corto plazo con la generación de información a través de estaciones de calidad y meteorológicas. Esto no debiese ser un desafío mayor para la institucionalidad responsable (la DGA) dado que esto ya es parte de su accionar, existiendo a la fecha requerimientos de consultorías para pozos de monitoreo y estaciones a través del sistema de compras públicas. No obstante, los recursos económicos siempre son una limitante.

En esta misma línea también resulta importante la debida actualización de las herramientas de modelación (OM-04), de modo que no pierda su vigencia y su utilidad como instrumento que integra múltiples variables para orientar sobre el equilibrio hídrico de la cuenca. Es muy importante que, junto con la generación y actualización de nueva información, ésta se vuelva accesible para los tomadores de decisión públicos y privados en materia de gestión hídrica, en sus distintas escalas, inclusive para los usuarios, bajo un lenguaje y medios pertinentes.

Otra línea de información relevante guarda relación con la demanda existente. La demanda física del recurso es necesaria monitorearla, y por lo menos desde el 2020 existe un marco normativo (desde el Código de Aguas hasta los reglamentos respectivos) que ha ido exigiendo el Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE) tanto a nivel superficial como subterráneo. Este monitoreo permitirá a su vez generar información que alimente el uso de los modelos, al poder cuantificarse con mayor veracidad sus niveles. En este sentido la iniciativa que busca sensibilizar y apoyar económicamente a la implementación de los sistemas de medición (MG-04), resulta pertinente con las exigencias normativas actuales. La CNR ha sido la entidad que ha dado financiamiento en esta materia en otros territorios, razón por la cual se requerirá una coordinación con la DGA para que estos apoyos se focalicen en territorios como el valle de Azapa donde las exigencias de MEE ya se han materializado. Junto con ello, se hará necesario contar

con consultores que puedan prestar el servicio de instalación de estos sistemas, cuestión que al parecer aún no ha llegado al valle según fue comentado en el proceso participativo.

Sin embargo, uno de los aspectos preocupantes de la cultura del agua en esta región está relacionadas, desde la visión del equipo consultor, por la naturalización de las extracciones ilegales y en relación con esto último, la falta de responsabilidad individual o como uso, en las condiciones hídricas del valle. Esto representa un escenario en que muchos usuarios del acuífero no se adherirán a esta exigencia e iniciativa, razón por la cual la fiscalización de la DGA será muy necesaria para avanzar en esta dirección. Desde los usuarios esta acción se considera necesaria dada las suspicacias existentes, pero para la cual no existen mayores incentivos sociales, por el contrario, los usuarios no están disponibles para denunciar a un vecino, por ejemplo, lo cual merma el accionar de la DGA. Esta es una función propia de este servicio que tanto aquí como en otras regiones ha sido insuficientemente implementada por la falta de recursos humanos y tecnológicos (como drones, por ejemplo) que faciliten estas acciones. Por cierto, la fiscalización también debiese fortalecerse a nivel del Bienes Nacionales, para impedir la expansión irregular de loteos en tierras fiscales.

Por último, las modificaciones al Código de Aguas no solo están haciendo exigibles el MEE, sino que también la importancia de tener información de la demanda legal de agua en orden. Para ello, el Código exige que los DAA sean debidamente regularizados en plazos establecidos corriéndose el riesgo de perderse ese derecho pasado ese plazo. En este sentido, la iniciativa de saneamiento de DAA (MG-08) responde al contexto normativo actual, apoyando al cumplimiento de estos procedimientos en los plazos establecidos.

Toda esta información y los datos derivados, requiere ser accesibles para que puedan tener un efecto en la toma de decisiones. Esto puede resolverse con la iniciativa de la plataforma de información hídrica (MG-09) que pudiera quedar bajo la administración de una entidad como SINIA, pero con fuerte coordinación con la DGA y entregando un rol importante a la UTA (u otra organización que tenga relevancia en la materia) en la generación de conocimiento. Es clave que la plataforma sea de origen público, para contribuir a darle mayor legitimidad a los datos que allí se administren.

8.2 HITOS DE REFERENCIA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

A continuación, se presenta una propuesta de los principales hitos a considerar, en función de la temporalidad establecida para cada medida del Plan de Acción. Este análisis temporal debe ser conectado con el resultado de la priorización, de modo de decidir políticamente los hitos de mayor relevancia según las prioridades de los actores incumbentes a la gestión hídrica del acuífero del valle de Azapa, de la cuenca del río San José y de la región de Arica y Parinacota.

8.2.1 Corto plazo

Las iniciativas de corto plazo que se consideran claves o hitos de referencia en la implementación del Plan de acción tienen que ver con acciones de gobernanza y gestión. Principalmente, destaca los estudios y mejoras a los programas de agua potable rural, así como la creación de la oficina de asuntos hídricos a nivel municipal y mejorar la información sobre las extracciones efectivas de agua (y los derechos potenciales). Por último, el apoyo al funcionamiento de la CAS es uno de los hitos más relevantes del

corto plazo, y tributa directamente al consejo de cuencas que se espere esté implementado en el mediano plazo.

8.2.2 Mediano plazo

Las iniciativas de mediano plazo que se consideran claves o hitos de referencia en la implementación del Plan de acción tienen que ver con acciones de estudios, implementación de sistemas de infraestructura. En específico, destacan acciones ligadas a las obras hidráulicas como el control de crecidas, tecnificación del uso de agua de riego y nuevas fuentes como el reúso de aguas servidas tratadas. Destaca también la creación y puesta en marcha de la plataforma de información hídrica, y la actualización del estudio de modelación integrada que aborde las brechas de modelación y conocimiento levantadas en el presente estudio, a partir de la mejora de la red de medición y monitoreo de aguas superficiales y subterráneas. Además, al mediano plazo se espera contar con el estudio de servicios ecosistémicos y el programa de capacitación para prevenir y vigilar la contaminación de aguas, ambos prioritarios para la seguridad hídrica de ecosistemas. Todos estos hitos al mediano plazo debieran estar bajo el marco de acción del consejo de cuencas, hito en términos de gobernanza que es clave para la gestión sustentable del acuífero del valle de Azapa.

8.2.3 Largo plazo

Las iniciativas de largo plazo que se consideran claves o hitos de referencia en la implementación del Plan de acción tienen que ver con obras mayores principalmente. Uno de los principales hitos sería la puesta en marcha de sistemas de alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas en zonas rurales, el Embalse Livilcar y la entrada de la planta desaladora para quitar presión al acuífero del valle de Azapa.

8.3 SISTEMA DE GOBERNANZA PARA LA IMPLEMENTACIÓN

La implementación del plan dependerá de diversos factores condicionantes, como el nivel de involucramiento institucional (públicos y/o privados), la acogida por parte de beneficiarios, el financiamiento del que se disponga, el sistema de gobernanza empleado (estructura y proceso), y la disposición a aceptar o no diversas externalidades de las iniciativas. Así, a continuación, se detalla tanto la estructura como el proceso de gobernanza para la implementación del PEGH y la transición hacia el PERH de la cuenca del río San José.

8.3.1 Estructura de Gobernanza

Considerando que la cuenca es la unidad territorial básica para la gestión integrada de los recursos hídricos, es que la presente propuesta considera una estructura de gobernanza basada en la cuenca del río San José, con un enfoque participativo e intersectorial. En cuanto a los actores convocados a ser parte de la estructura de gobernanza para implementar el PEGH, y de acuerdo con la experiencia del equipo consultor y a las actividades participativas, serían a lo menos los siguientes:

- Servicios Públicos:
 - MOP: DGA, DOH, SISS, SEREMI
 - MINAGRI: CNR, INDAP, SEREMI
 - SEREMI MMA
 - CONADI
 - GORE

- Municipio de Arica, Oficina de Asuntos Hídricos (propuesta en el presente PEGH)
 - ONEMI
 - Ministerio de Bienes Nacionales
- Organizaciones de Usuarios y titulares de DAA:
 - Junta de Vigilancia no constituida
 - Comunidad de Aguas del Canal Azapa
 - Comunidad de Aguas Subterráneas acuífero del valle de Azapa (en conformación)
 - SSR/APR
- Actores privados, representantes de los distintos usos o asociaciones gremiales:
 - Grandes y medianos productores agrícolas
 - Pequeños productores agrícolas
 - Empresas sanitarias
 - Empresas mineras e industrias
- Otras organizaciones, de la sociedad civil y de carácter académico, relacionados con el agua por motivos ambientales, económicos, sociales y/o culturales:
 - ONG
 - Organizaciones indígenas
 - Academia

Considerando la gran diversidad de actores involucrados, se proponen tres organismos o instancias para llevar adelante la planificación estratégica de recursos hídricos a nivel de cuenca, con miras al logro de la meta de seguridad hídrica: Consejo de Cuenca, Mesas técnicas y Secretaría técnica. A continuación, se detalla brevemente cada instancia.

- Consejo de Cuenca: En línea con los planteamientos del Comité Interministerial de Transición Hídrica Justa¹¹, se propone que este organismo tenga un carácter político y una conformación público-privada. Este Consejo estaría enfocado en propender hacia la seguridad hídrica para la cuenca del río San José, guiando la actualización del PEGH (y su paso a los PERH), participando del proceso de toma de decisiones de priorización de acciones, mandando estudios, tomando decisiones de financiamiento vía acuerdos público-privados, concordando la visión de largo plazo de la cuenca, incorporando diversas voces de la gestión y administración del agua en la toma de decisiones, entre otras labores. La idea central sería buscar alcanzar acuerdos voluntarios a través de procesos de gobernanza que involucre a personas naturales y jurídicas, posean o no DAA. También puede tener sesiones temáticas, así como relacionarse con mesas técnicas de alguno de los siete ejes estratégicos del presente PEGH. Es importante destacar que será clave la conexión entre los consejos de cuenca del río Lluta y del río Lauca, dada su interconexión hídrica. Además, y de ser necesario, el Consejo de Cuenca puede elegir un directorio, que tenga una labor ejecutiva y que permita facilitar los acuerdos del Consejo, guiar la postulación a fondos, guiar

¹¹ Más información disponible en: <https://mma.gob.cl/comite-interministerial-de-transicion-hidrica-justa-avanza-en-el-diseno-de-los-consejos-de-cuenca/>

y hacer el seguimiento de las mesas técnicas, dirigir las reuniones del Consejo, participar de instancias de coordinación de mayor nivel (nacional, regional). De ser llevada a cabo esta estructura, requerirá de la definición de reglas de funcionamiento claras, en torno a los alcances de su quehacer, los límites de qué actores pueden conformarlo, la incidencia en la toma de decisiones de sus integrantes, roles directivos, entre otros, así como sus potenciales fuentes de financiamiento que permitan su funcionamiento prolongado en el tiempo. Esto como se señaló inicialmente es un aspecto crítico, pues se requiere romper con las dinámicas de interacción de corto plazo o sujeto a cambios de gobierno.

- Mesas técnicas: Mesas de carácter técnico, donde se propone que tengan por finalidad elaborar insumos técnicos, desarrollar diagnósticos y levantar propuesta de solución de problemáticas relevantes para la cuenca, en función de lo mandatado por el Consejo de Cuenca. En esta instancia se propone que asistan los representantes técnicos de los actores incumbentes, de modo que tenga un carácter más operativo y de soporte técnico del Consejo. En términos operativos, se pueden utilizar los siete ejes estratégicos propuestos en el presente PEGH para delimitar las sesiones o el número de instancias de reunión por tema.
- Secretaría técnica: Para esta instancia, se propone que se constituya una secretaría técnica que, de soporte al desarrollo tanto del Consejo de Cuenca como de cada mesa técnica, de modo que se encargue de cuestiones logísticas y administrativas. Entre sus funciones estarían la de recopilar y presentar información relativa a los recursos hídricos a nivel de cuenca, apoyar el proceso de coordinación interinstitucional, proponer estrategias de participación y difusión de resultados a la sociedad en general, gestionar encuentros y facilitar los diálogos y el proceso de toma de decisiones a través de metodologías pertinentes, comunicar resultados relevantes, aportar en la resolución de los disensos, dar garantías de ejecución de acciones, dar seguimiento a los planes de acción. Esta secretaría se recomienda que pueda ser comandada por alguna universidad u organismo público, que pueda destinar profesionales de múltiples disciplinas con dedicación exclusiva.

Considerando los planteamientos anteriores, en la Figura 8-1 se resume la estructura interrelación entre las instancias de gobernanza propuestas para la implementación del PEGH del acuífero del valle de Azapa a nivel de cuenca. En cuanto a la representación cada actor dentro de las distintas instancias (% de representantes de cada actor relevante), se propone que sea el mismo Consejo, con apoyo de la Secretaría Técnica, que delimite un Estatuto donde se detalle lo anterior. Es relevante que dentro de la conformación del Consejo se tenga en cuenta la representación de los diversos intereses dentro de la cuenca, a través de un porcentaje de representatividad por cada uno de los cuatro tipos de actores delimitados.

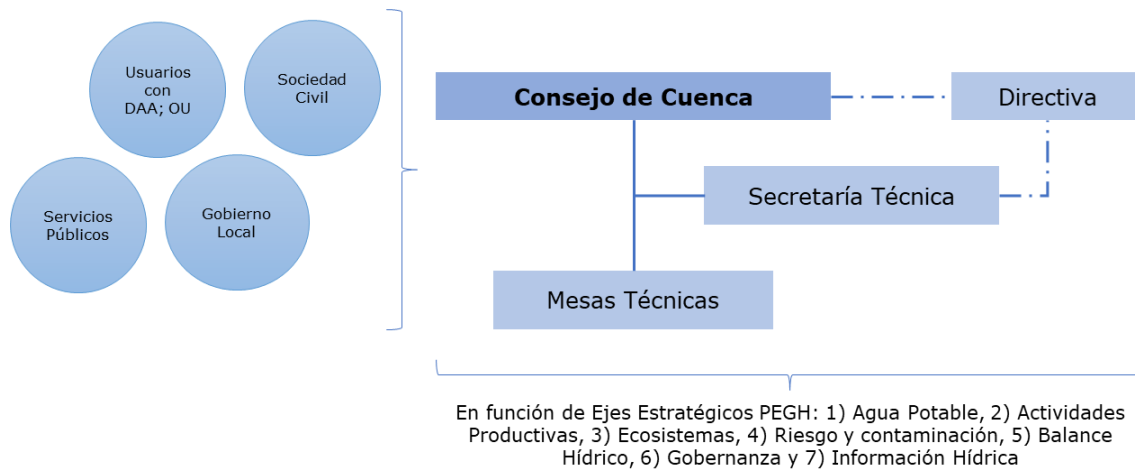


Figura 8-1. Diagrama resumen de la estructura de funcionamiento de las tres instancias de gobernanza propuestas para la implementación del PEGH.

Fuente: Elaboración propia (2022).

8.3.2 Proceso de Gobernanza

En líneas generales, se puede identificar que la implementación (proceso de gobernanza) debiera iniciar con una etapa de reuniones y colaboración entre las autoridades entrantes de las distintas seremías y desde el Gobierno Regional, dado que el logro de metas de seguridad hídrica son transversales y no solo atingentes a organismos públicos relacionados directamente al agua (por ejemplo, la planificación territorial para evitar la expansión de la frontera agrícola y el control de tomas de terreno son aspectos transversales). En esta etapa de reuniones, se visualiza además que se debiera concordar la visión a largo plazo de la cuenca, que guíe los ajustes y adaptaciones al presente Plan de Acción.

Junto a ello, es importante socializar aún más los resultados del plan, y los alcances de las iniciativas propuestas, así como también ajustarlas, lo que debiera ser comandado naturalmente por la Dirección Regional de Aguas. Dicha colaboración se propone que sea a partir de una mesa de trabajo (consejo de cuenca del río San José), que integre a los principales responsables tanto en términos de capacidad humana y en términos de recursos económicos a invertir, y que convoque a actores más allá de los propietarios de DAA. Será relevante un monitoreo y seguimiento constante del plan (sección 9), de modo de actualizar las acciones y sus alcances, sobre todo considerando el paso desde los PEGH a los PERH establecidos en la ley de cambio climático y en la reforma al Código de Aguas.

Por otra parte, y a partir de la experiencia relacionada al desarrollo del presente PEGH, y en función de los aprendizajes del equipo consultor del proceso participativo ejecutado, es que se propone que el proceso de toma de decisiones a nivel de cuenca considere una coordinación a nivel regional, de acuerdo con los siguientes planteamientos:

- Existen temáticas hídricas transversales a la región, y que no son propias de la cuenca del río San José ni del acuífero del valle de Azapa. Ejemplo de aquello es el monitoreo de extracciones efectivas, la fiscalización de

extracciones ilegales, la planificación y el ordenamiento territorial, y la promoción y apoyo a las organizaciones de usuarios de agua de la región.

- Existen seis cuencas presentes en la región (agrupando las cuatro cuencas altiplánicas, y sumado a la cuenca del río Camarones, Lluta, San José, Quebrada Concordia, Quebrada Chaca-Vitor) y casi en su totalidad están dentro de la región. Además, varias cuencas están interconectadas hídricamente (de forma natural o artificial), como es el caso de la conexión de la cuenca altiplánica del Lauca (Canal Lauca-Azapa) y la cuenca del río Lluta (extracción de agua para agua potable) con la cuenca del río San José, o la conexión subterránea entre la cuenca del Lago Chungará y la cuenca del Lauca.
- Al ser una región para las distintas cuencas, los organismos públicos tienen jurisdicción en todas las cuencas, por lo que de esta forma se evitaría la repetición de instancias, la pérdida de información y la duplicación de canales de comunicación.
- Al tener un comité coordinador a nivel regional, se pueden orientar fondos regionales de mejor manera, con los debidos ajustes de representación de cuencas con menor importancia política o de otra índole.
- A nivel regional, sería menos engorroso dotar de participación ciudadana al desarrollo de fondos con pertinencia local, como por ejemplo en el desarrollo de Términos de Referencias de licitaciones públicas con participación de actores relevantes o en la delimitación de prioridades de fondos. Además, esto permitiría llevar adelante un proceso centralizado de seguimiento de los PEGH de las distintas cuencas de la región.

8.4 ESTRATEGIA DE COMUNICACIÓN

La estrategia comunicacional propuesta para la implementación y futura actualización del PEGH contempla el universo de actores del territorio relacionados a la materia hídrica en la cuenca del río San José. Para establecer esta estrategia, se consideran las actividades llevadas a cabo durante la elaboración del presente plan, la información que caracteriza a los actores y la gobernanza de la cuenca en estudio, y la experiencia misma del proceso participativo. En este sentido, la Estrategia de Comunicación del PEGH busca mantener a los actores vinculados a la gestión hídrica de la cuenca, involucrados y conscientes del Plan de Acción y los cambios que están ocurriendo como parte de los esfuerzos que permiten su ejecución.

8.4.1 Comunicación y difusión del PEGH en fases posteriores

Para asegurar que los procesos participativos relacionados con la estrategia comunicacional para implementar y actualizar el PEGH del acuífero del valle de Azapa se realice de forma efectiva y sea validado y conocido por la actores asociados al acuífero del valle de Azapa, se requiere poner gran atención a la forma en que por distintos medios se difunden estas actividades, no sólo dando a conocer las reuniones y talleres realizados y por realizar (garantizando una adecuada asistencia, conocimiento y validación del proceso), sino que también expandiendo el proceso participativo más allá instancias concretas (reuniones y talleres) y llevando así información del estudio a la comunidad más general del territorio de Azapa.

Para lograr esto es que debe diseñarse un plan de medios para la difusión de la implementación y seguimiento del PEGH a través distintas plataformas: sitio web, redes

sociales, prensa local, radios locales, afiches., entre otros, de acuerdo con los públicos objetivo de dichas comunicaciones.

El plan de medios debiera contribuir a generar dos efectos. Por una parte, se orienta a contribuir a la conformación de las instancias de gobernanza, reforzando el involucramiento de los actores sociales y privados convocados a éstas y buscando que estén empoderados para que se hagan parte de las actividades a desarrollar por el PEGH. Por otra parte, se busca mantener adecuadamente informada a la ciudadanía en general, y en particular a los grupos representados por los actores que participan de la gobernanza, generando espacios de interacción con esta, para aclarar consultas y rendir cuentas (*accountability*) de modo de favorecer procesos transparentes y retroalimentar en torno a la urgencia de la implementación de acciones y a la corrección de cursos de acción en torno a acciones en proceso de implementación.

Esto es sumamente importante en el contexto del Valle de Azapa donde una dificultad relevante es la desconfianza existente entre actores sociales. Ante esto, la necesidad de comunicar el estado de implementación de las acciones es clave para mejorar las relaciones y no solo comunicar el resultado final de la ejecución de la iniciativa.

Los canales existentes para informarse y aclarar dudas debieran ser conocidos, expresando la disposición del equipo a cargo para dar respuesta a las inquietudes que se generen en las distintas interacciones establecidas con la comunidad.

Los mecanismos más apropiados de difusión, convocatoria y comunicación debieran definidos a partir del primer análisis de antecedentes sobre experiencias previas de participación ciudadana, así como de la caracterización y mapeo de actores clave, del que puede ser servir de base el desarrollado en este estudio. Así también, el plan de medios estará influenciado por las preferencias de los actores, la complejidad de los mensajes, y los tiempos y recursos disponibles.

Sin perjuicio de lo anterior, es posible que algunos actores requieran aproximaciones preliminares a las de participación activa, requiriéndose primeros acercamientos que favorezcan la generación de relaciones de confianza con los actores que ejecuten el PEGH y poder aclarar abiertamente cualquier duda o abordar cualquier aprehensión con el estudio. Estas se debieran realizar como primeras visitas presenciales de preferencia y estarán basadas también en los antecedentes recabados.

El plan de medios y difusión se debiera desarrollar en el contexto de la estrategia comunicacional con los actores identificados, para promover su participación, reconocimiento y confianza de modo de contar con las retroalimentaciones necesarias para la adecuada implementación del plan. Así, se espera que las comunicaciones establecidas permitan:

- Generar entregas oportunas de información que favorezcan la participación informada de los actores.
- Contar con mecanismos de convocatoria eficientes y eficaces.
- Establecer un sistema de recepción de consultas y opiniones sobre el desarrollo del proyecto.

La estrategia debiera buscar que el público conozca el proceso metodológico con el que se desarrolló e implementará el plan, sin que se desconozcan los procesos anteriormente desarrollados en la cuenca. También debiera apuntar a que el público comprenda los

actores que ejecuten el plan tiene un rol técnico y de apoyo en el proceso de desarrollo del PEGH, buscando integrar distintos intereses, canalizando propuestas de distintos actores, y contribuyendo también con su experiencia en términos técnicos, legales y organizacionales en torno a la gestión sustentable del agua.

Para dar cumplimiento a la estrategia, se debiera contar con varios hitos comunicacionales que pueden estar asociados a las actividades participativas más relevantes de la implementación del PEGH. Así, se puede considerar

- la entrega de material de difusión;
- la entrega de folletos;
- el envío de correos electrónicos;
- recepción de invitaciones mediante una estrategia redundante, que utilice de forma complementaria otros medios (como invitaciones presenciales, por vía telefónica, o vía correo tradicional) en caso de identificar actores que no se conecten a internet con la frecuencia requerida, cuidando de este modo que esta condición no constituya un obstáculo para la participación de actores vinculados a la gobernanza del agua del acuífero del valle de Azapa.

8.4.2 Comunicación y difusión durante la actualización del estudio

Durante la actualización del estudio, los pasos e instancias de participación que debiera desarrollarse propuestas serían las siguientes:

- Promover la coordinación y de las diversas intervenciones con una visión multiescalar e integrada, para así orientar las decisiones públicas y privadas de los proyectos, programas y planes relacionados directa o indirectamente con el recurso hídrico.
- Generar nueva información a través de instancias de participación que estén dirigidas a conocer las realidades y percepciones de los participantes en materias claves sobre la gestión de recursos hídricos en la cuenca, tales como institucionalidad, gobernanza, problemas medioambientales, estado de infraestructura hidráulica, disponibilidad, calidad del agua.
- Validar en conjunto con los actores relevantes, el planteamiento de estrategias adecuadas de gestión hídrica identificadas y propuestas para el nuevo PEGH Azapa.

8.5 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE FINANCIAMIENTO

En general, el financiamiento de las acciones propuestas es de carácter público, por lo que será relevante la capacidad de coordinación interinstitucional para priorizar el financiamiento de acciones en función del financiamiento de carteras regionales amplias. Será de relevancia contar con una mesa de coordinación a nivel regional, que permita priorizar y conducir recursos económicos para la consecución del presente PEGH.

Las instituciones que debieran generar la inversión más alta para la implementación del PEGH del acuífero del valle de Azapa están relacionadas al MOP, por tanto, dicha institución deberá gestionar las fuentes de financiamiento, que se proponen sean vía licitaciones y contratos directos en caso de requerirse mayor premura.

Con respecto al Código de Aguas, se hace hincapié en la reforma promulgada durante el 2022, la cual indica expresamente que: "Cada cuenca del país deberá contar con un Plan Estratégico de Recursos Hídricos tendiente a propiciar la seguridad hídrica en el contexto de las restricciones asociadas al cambio climático, el cual será público." (Art. 293 bis), junto con la creación de un fondo a cargo del Ministerio de Obras Públicas el cual estará "... destinado a financiar las investigaciones necesarias para la adopción de medidas para la gestión de recursos hídricos y, en particular, para la elaboración, implementación y seguimiento de los planes estratégicos de recursos hídricos en cuencas, establecidos en el artículo 293 bis y se distribuirá entre las regiones del país, para la elaboración de dichos planes." (Art. 293 ter). De esta manera se oficializan los PERH, asegurando el financiamiento adecuado para que se puedan llevar a cabo.

9. MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN

En el presente capítulo se presenta una propuesta de monitoreo y evaluación del Plan. Este proceso es un componente importante en el marco de la elaboración del PEGH, donde el monitoreo de la evolución de las acciones a realizar permite una retroalimentación y adaptación que mejore la pertinencia y oportunidad de las propuestas de acción existentes evaluando también cuál ha sido el nivel de desarrollo y de impacto de las acciones, razón por la cual se propone un sistema de monitoreo y evaluación que se considera el más adaptable a realidad del área de estudio.

9.1 PLAN DE MONITOREO

El Plan de Monitoreo (PM) tiene por objetivo establecer el seguimiento, control y evaluación de la implementación del PEGH, con el fin de asegurar la efectividad del Plan de Acción en relación con los objetivos planteados y controlando las consecuencias de la implementación de la cartera de iniciativas, desde un enfoque de mejora continua. Se establecen indicadores e índices que permiten trazar el grado de cumplimiento de las iniciativas y de los objetivos del PEGH, bajo una perspectiva crítica de Seguridad Hídrica.

Para llevar a cabo el plan de monitoreo resulta importante identificar las estructuras y actores existentes en el territorio quienes puedan llevar a cabo este plan. Esto está vinculado con las responsabilidades que tienen los ejecutores, pues debe existir una coordinación y *feedback* entre ambas partes.

Se propone la creación de un comité técnico que no esté conformado por actores de los servicios públicos, y que sea de carácter regional que pueda llevar a cabo esta labor. La DGA y otros servicios tendrán la misión de ejecutar las acciones del Plan, pero debe ser otro organismo quien pueda monitorear el avance de este. De acuerdo con las competencias de los actores identificados se presenta una propuesta de las acciones y responsabilidades asignadas de manera de asegurar un proceso que se acerque a lo planificado y que a la vez pueda ser flexible orientado a una mejora continua de los procesos que se llevan a cabo. La Figura siguiente muestra el ciclo de monitoreo, seguimiento, control y evaluación que debiese ser aplicado a cada iniciativa y al Plan en general.

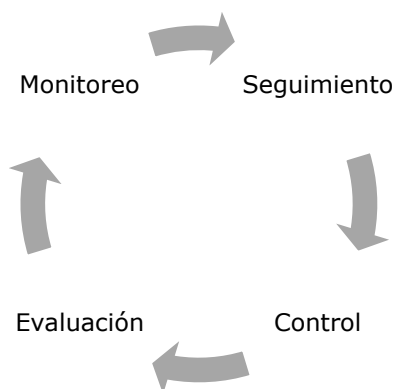


Figura 9-1: Ciclo del monitoreo para el PEGH del acuífero del valle de Azapa.

Fuente: Elaboración propia en base a CNR (2016).

Este ciclo está conformado por las siguientes etapas (CNR, 2016):

- Monitoreo: Corresponde al análisis continuo asociado al cumplimiento de resultados parciales del Plan, para la cual es necesario levantar y sistematizar información sobre el grado de ejecución del Plan y de las iniciativas.
- Seguimiento: Corresponde al grado de ejecución del Plan que permite comprobar en qué medida se cumplen las metas propuestas en el sentido de eficiencia, eficacia y calidad, evaluando los resultados intermedios para ver si son congruentes con los alcances del Plan.

Dentro de las acciones a que se propone considerar en esta etapa se encuentra:

- Revisar la vigencia del diagnóstico del Plan
- Identificar las iniciativas que han sido desarrolladas y analizar el cumplimiento de los objetivos de éstas.
- Categorizar el origen de los fondos de las iniciativas ejecutadas.
- Analizar el cronograma
- Identificar y analizar las iniciativas que se han pospuesto y su efecto en el territorio.
- Analizar las actividades de coordinación entre actores y los conflictos asociados.

Control: Corresponde a las modificaciones necesarias para el mejoramiento continuo del Plan, basado en la implementación de medidas preventivas, correctivas y sancionatorias. Se identifican los aspectos del seguimiento al cual se le debiese realizar el control: Alcance del Plan (vigencia), Resultado de iniciativas (impacto esperado), Estrategias de coordinación.

Evaluación: Corresponde a la aplicación de indicadores que permitan avaluar los procesos de gestión, resultados, operación e impactos producidos, tanto del desarrollo del Plan como de las iniciativas que se han llevado a cabo. Además, se hace una revisión sobre si los problemas identificados en el diagnóstico del Plan siguen vigentes.

9.1.1 Indicadores para el PEGH del acuífero del valle de Azapa

Los indicadores hídricos develan el estado de la cuenca en un momento determinado, mediante datos obtenidos del diagnóstico (información primaria y secundaria) y los resultados del modelo hidrológico. Esto permite realizar un seguimiento a la ejecución del Plan de forma específica, en cuanto al estado de las metas relacionadas a la Seguridad Hídrica (ejes estratégicos del Plan), la ejecución de acciones descritas en el Plan, y el grado de avance de la implementación del PEGH en su totalidad.

De esta forma se proponen tres tipos de indicadores para el monitoreo y seguimiento de la implementación del plan de acción en el valle de Azapa, indicadores de impacto, de proceso y de seguimiento. Además, se detallan fuentes de información y organismos proveedores de datos para cada eje estratégico del plan (Anexo K.5 Indicadores de impacto).

- **Indicadores de Impacto:** Corresponden a indicadores que estiman el estado de la cuenca en base al logro de los objetivos establecidos por eje estratégico del PEGH (Anexo F 6.2). En el Anexo K.5 se presenta el detalle de cada

indicador de impacto, además de las memorias explicativas de indicadores relacionados con las metas ODS.

- **Indicadores de Proceso:** Cuantifica el grado de avance de la implementación cada una de las iniciativas priorizadas en el plan de acción. En cada iniciativa se propone un indicador de proceso, ya sea una iniciativa de ejecución única, eventual o permanente (Ver Anexo K.2).
- **Indicadores de Seguimiento:** Cuatro indicadores que establecen el porcentaje de avance en la implementación del plan de acción, mediante la relación entre la programación de las iniciativas priorizadas en la carta Gantt del PEGH, y las iniciativas en ejecución y/o finalizadas al momento de estimar los indicadores (Tabla 9-2).

A continuación, se presentan los indicadores de impacto, proceso y seguimiento p del Plan.

9.1.1.1 Indicadores de Impacto

En la Tabla 9-1 se presenta una propuesta de indicadores de evaluación de las acciones del PEGH del acuífero del valle de Azapa, totalizando 21 indicadores de impacto distribuidos en seis Ejes Estratégicos propuestos para el presente estudio.

Cabe destacar que dentro de los indicadores de impacto el equipo consultor no agregó un indicador específico para calidad (distinto del tratamiento de aguas servidas), dado que faltan datos para ello, lo que dificulta el diseño de un indicador. En el caso de emisión de contaminantes, analizado por uso, y en la actualidad, es monitoreada el agua potable, sin embargo la emisión de contaminantes desde el agro proviene de contaminación difusa (y no se encuentran mecanismos para su monitoreo actualmente en la región, está la norma chilena de calidad de agua para riego en general pero no se encontró un medio de fiscalización estandarizado para cada predio); del sector industrial se pueden obtener los informes del RETC (que monitorea la concentración máxima de los contaminantes), sin embargo la fuente es poco rigurosa y no se presentan todas las industrias. Por ende, la propuesta fue más al monitoreo de esos datos, o es dependiente de las estaciones de monitoreo de calidad necesarias en el valle, de modo de poder ver la variabilidad de dichos datos en el tiempo. Tampoco hay una norma de calidad de agua secundaria en la cuenca con la cual se podría determinar su calidad natural. Lo mismo para intrusión marina, falta monitoreo y sin datos es complejo proponer un indicador.

Tabla 9-1. Indicadores de Impacto del PEGH del acuífero del valle de Azapa.

Eje estratégico	Indicador	Unidad	Definición	Meta ODS
Balance Hídrico	Caudal total	Hm ³ /año	Caudal superficial total disponible por nodo y en la cuenca	-
	Volumen embalsado en SHAC	Hm ³ /año; Hm ³ ; m.n.s.n	Volumen de agua contenido en los SHAC de la cuenca	-
	Reutilización del agua	Hm ³	Volumen de agua reutilizada dentro de la cuenca	-

Eje estratégico	Indicador	Unidad	Definición	Meta ODS
	Nivel de Estrés Hídrico	%	Extracción de agua dulce en proporción al agua dulce disponible	Meta ODS 6.4.2
	Brecha hídrica total	Hm ³ /año	Brecha hídrica anual de agua para las personas, ecosistemas, y actividades productivas	-
	Sobreexplotación del acuífero	Hm ³ /año	Diferencia entre el volumen sustentable del acuífero y la extracción total de este	-
Seguridad Hídrica para el consumo humano	Población que utiliza servicios de suministro de agua potable gestionados sin riesgos	%	Corresponde a la proporción de población que utiliza como fuente de agua potable una "Red Pública" o "Pozo"	Meta ODS 6.1.1
	Población que utiliza servicios de saneamiento gestionados sin riesgos	%	Personas que tienen acceso a la gestión de Aguas Servidas, urbanas o rurales	Meta ODS 6.2.1
	Brecha hídrica para consumo humano	Hm ³ /año	Volumen de agua no provisto a las personas	-
Seguridad Hídrica para los ecosistemas	Proporción de aguas residuales tratadas de manera adecuada	%	Volumen de aguas tratado en relación con el volumen consumido total	Meta ODS 6.3.1
	Cambio en los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo	%	Variación en superficie de los ecosistemas acuáticos.	Meta ODS 6.6.1
	Superficie vegetacional no degradada en proporción a la superficie total	%	Variación de la superficie vegetacional no degradada en dentro de la cuenca dividido por el área forestal como fracción del área total de tierra	Meta ODS 15.1.1
	Proporción de tierras degradadas en comparación con la superficie total	%	Variación de la superficie erosionada severa o muy severa dentro de la cuenca	Meta ODS 15.3.1
	Brecha hídrica para los ecosistemas	Hm ³ /año	Volumen de agua no provisto para los ecosistemas	-
Seguridad Hídrica para las actividades productivas	Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo	USD/m ³	Eficiencia de uso del agua medida entre el valor en dólares agregado y el volumen de agua utilizada	Meta ODS 6.4.1

Eje estratégico	Indicador	Unidad	Definición	Meta ODS
	Cambio en el uso eficiente de las actividades productivas	m ³ /ton	Eficiencia de uso del agua medida entre el volumen de agua requerida para producir una tonelada de producto	-
	Brecha hídrica para actividades productivas	Hm ³ /año	Volumen de agua no provisto para la agricultura y la actividad industrial en la cuenca	-
Seguridad Hídrica ante eventos extremos de agua	Promedio de personas fallecidas en 5 años producto de desastres asociados a los recursos hídricos	Número entero	Número de personas fallecidas en 5 años por cada 100.000 personas	Meta ODS 13.1.2
	Número de personas afectadas en 5 años producto de desastres asociados a los recursos hídricos	Número entero	Número de personas afectadas en 5 años por cada 100.000 personas	Meta ODS 13.1.2
Gobernanza	Proporción de agua gestionada por Juntas de Vigilancia registradas por la DGA	%	Proporción de agua superficial que se gestiona en forma adecuada según el estándar actual	-
	Proporción de agua subterránea gestionada por Comunidades de Aguas Subterráneas	%	Proporción de agua subterránea que se gestiona en forma adecuada según el estándar actual	-

Fuente: Elaboración propia, 2022.

9.1.1.2 Indicadores de Proceso

Una propuesta de indicadores de Proceso que evalúan la implementación de las acciones del PEGH del acuífero del valle de Azapa es propuesta en el Anexo K.2, donde se presentan las fichas de las 22 acciones propuestas en el presente PEGH, y sus respectivos indicadores de proceso.

9.1.1.3 Indicadores de Seguimiento

En la Tabla 9-2 se presentan los indicadores de seguimiento, junto al umbral propuesto para cada indicador, lo que se encuentran basados en la propuesta de DGA-HIDRICA-ERIDANUS (2020a).

Tabla 9-2. Seguimiento del PEGH del acuífero del valle de Azapa.

Indicador de seguimiento	Umbral
PIC Nº de iniciativas en ejecución/Nº iniciativas planificadas al año	Umbral PIC 80% de las iniciativas propuestas proyectadas a comenzar al año i hasta $i+4$
PICa Nº de iniciativas en ejecución acumuladas/Nº iniciativas acumuladas planificadas al año	Umbral PICa 1) 80% de las iniciativas propuestas proyectadas a comenzar al año i hasta $i+3$ (valor acumulado) 2) 100% de las iniciativas propuestas proyectadas a comenzar su implementación hasta el año $i+4$ (valor acumulado)
PIF Nº de iniciativas finalizadas/Nº iniciativas finalizadas planificadas al año	Umbral PIF 80% de las iniciativas propuestas proyectadas a finalizar al año i hasta $i+4$
PIFa Nº de iniciativas finalizadas acumuladas/Nº iniciativas finalizadas acumuladas planificadas al año	Umbral PIFa 1) 80% de las iniciativas propuestas proyectadas a finalizar su implementación el año i hasta $i+3$ (valor acumulado) 2) 100% de las iniciativas propuestas proyectadas a finalizar su implementación hasta el año $i+4$ (valor acumulado)

Fuente: Elaboración propia, basado en DGA-HIDRICA-ERIDANUS (2020a).

9.2 MECANISMOS PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES

El carácter dinámico de la gestión de los recursos hídricos impone un desafío relevante para el diseño, implementación y monitoreo de los PEGH a nivel de cuenca. Dicho dinamismo se evidencia en los cambios en la oferta hídrica por cuestiones como el cambio climático o el impacto de las actividades antrópicas sobre ecosistemas relevantes para la provisión y regulación de las aguas; los cambios en la demanda de agua por parte de diversos usos, por cambios en la matriz productiva y económica, el crecimiento poblacional, las nuevas tendencias mundiales de producción de alimentos, los cambios culturales asociados al uso eficiente y sustentable del agua; y las relaciones territoriales entre actores, que delimitan nuevos conflictos entre usos, afectando las dinámicas de uso y explotación de los recursos hídricos. Es por lo anterior, que la primera premisa para usar este plan es pensar en sus posibilidades de adaptación, en periodos estimados de cinco años, de modo que no sea una herramienta rígida de planificación, sino dinámica y adaptativa según los nuevos tiempos. En este sentido, se propone la actualización y reflexión constante sobre los contenidos de este plan en, a lo menos, las siguientes temáticas:

- Actualización de la línea de base de oferta y demanda, sobre todo considerando nuevas fuentes de datos y los acuerdos de extracción y gestión del agua.

- Actualización del modelo numérico acoplado, en relación con las brechas identificadas en los capítulos precedentes, utilizando los nuevos datos de monitoreo y extracción que existan y abordando el potencial problema de la intrusión marina. También es deseable utilizar el modelo para la toma de decisiones, y adaptarlo en función de los nuevos escenarios de gestión que puedan resultar de utilidad.
- Por último, actualizar y revalidar la cartera de iniciativas, sobre todo la prioridad y los plazos, dado que en este plan se hace una primera propuesta, que puede ser fortalecida tanto por el trabajo de DGA como de terceros públicos privados que vayan actualizando sus carteras de iniciativas propias que tengan algún impacto sobre la gestión de recursos hídricos.

10. CONSIDERACIONES FINALES

El desarrollo del presente PEGH permitió constatar que el acuífero del valle de Azapa posee un nivel de sobreexplotación importante, situación que amenaza la sustentabilidad futura de todas las actividades que dependen directa o indirectamente de los recursos hídricos del acuífero y de la cuenca del río San José, cuestión que debiera conducir las gestiones e interacciones en torno a la gobernanza del agua.

A partir del trabajo de modelación, que estuvo basado en la modelación base desarrollada por DGA-DICTUC (2020), se confirma esta situación de sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, sobre todo al analizar los distintos resultados sobre satisfacción de las demandas, balance del acuífero, variaciones en el volumen, identificación de brechas y la sustentabilidad del acuífero. De hecho, día a día se observan los efectos de la sobreexplotación del acuífero, como la presencia de pozos colgados, la extensión de los turnos de riego, la activación del mercado del agua, el aumento de conflictos socioambientales, entre otros. Esta situación ha generado y generaría una disminución significativa del volumen subterráneo de agua, provocando incluso una potencial intrusión marina, lo que debe ser estudiado en el futuro. En base a los datos históricos, se observó que existe un balance negativo de 148,5 L/s (-4,6 Hm³) y también una brecha en las demandas de 0,18 Hm³. A futuro, se prevé que existiría un balance negativo promedio de 36,3 L/s (-1,1 Hm³) pero que no distingue la recarga o entrada de agua salada al sistema subterráneo por intrusión salina, que aumentaría en un 793% respecto al periodo histórico. Además, las brechas hídricas de las demandas aumentarían a 1,46 Hm³. Estos datos muestran la urgencia de tomar acciones diversas para combatir el déficit hídrico del valle de Azapa. Si bien se presentaron dos escenarios de gestión (E-5 y E-6) que generarían una disminución en las brechas de agua potable y un aumento en la recarga en el acuífero, igualmente no se lograría satisfacer las demandas futuras en un 100%. Este hecho refuerza la idea de que se requieren medidas de gestión y de gobernanza entre usuarios que permitan administrar, monitorear y gestionar el recurso subterráneo y las fuentes de agua de forma sustentable, con mejoras en las eficiencias de uso y la incorporación de nuevas fuentes. Cabe destacar que el modelo desarrollado por DGA-DICTUC (2020) y empleado en este estudio es la mejor aproximación a nivel integral, sin embargo, es importante mencionar que estos resultados están sujetos a la incertidumbre climática y socioeconómica futura, así como a la falta de datos históricos y a las reglas de modelación propias de la simplificación de la realidad (lo que debe ser considerado al interpretar los datos).

En este contexto es que el equipo del Laboratorio de Análisis Territorial de la Universidad de Chile elaboró, mediante una estrategia participativa, el Plan de Acción del acuífero del valle de Azapa. Este Plan de Acción usó como base el modelo construido en el estudio de DGA-DICTUC (2020), por lo que se puede entender el presente PEGH como una continuación del citado estudio. A pesar de que este PEGH estuvo enfocado en el acuífero del valle de Azapa, igualmente se abordaron problemáticas y acciones a nivel de cuenca, dada la interconexión natural entre las aguas superficiales y subterráneas. El Plan de Acción considera 22 acciones de diversos tipos (Obras Hidráulicas, Medidas de Gestión, Nuevas Fuentes, Otras Medidas), en siete ejes estratégicos basados en la meta de Seguridad Hídrica para el acuífero, concepto empleado en las nuevas reformas a la

normativa ambiental e hídrica del país, de modo de estar a la vanguardia en dichas temáticas. Además, el Plan se basó en un proceso de participación ciudadana con perspectiva de género, donde se pudo realizar un proceso de recopilación de información y generación de acciones mediante la validación de los actores a través de una serie de etapas (reuniones, entrevistas y talleres participativos).

Dentro de los principales temas relevados en el proceso participativo, y que fueron recogidos por el Plan de Acción, se encuentra la baja participación de los actores debido al desinterés y desconfianza que muchos de ellos tienen hacia otros, por ejemplo, cuando los servicios públicos hacen compromisos con ellos o cuando priorizan las necesidades de grandes agricultores o empresarios, en desmedro de pequeños agricultores o las comunidades. Adicionalmente, se percibe que muchos de los actores no visualizan la necesidad de trabajar de manera colaborativa problemáticas que son comunes a todos, algunos incluso señalan que existe una falta de compromiso y responsabilidad.

También se repitió reiteradas veces el problema de la extracción ilegal de aguas, lo cual se ha incrementado con el tiempo producto de la baja capacidad humana y económica por parte de la DGA, la baja cantidad de denuncias y también debido a la baja coordinación entre instituciones, ya que pese a situación de gran escasez hídrica que afecta a la zona, se han entregado terrenos en los cerros como vivienda y con ello han aumentado las plantaciones. El aumento de los loteos ha traído consigo problemas de contaminación de agua, ya que se señala que se hacen pozos negros, y además los usuarios aguas arriba botan grandes cantidades de agua. Pese a los intentos por limpiar no se ha mejorado esta situación. Respecto a las propuestas, algunos actores han mencionado la necesidad de cambiar la cultura del valle a través de educación ambiental, y si bien es una medida a largo plazo, es un tema que se debe poner atención de manera urgente. Aun así, urge mejorar considerablemente la fiscalización de la zona, ya que como mencionan los actores, de nada sirve buscar fuentes alternativas de agua o mejorar su eficiencia si las extracciones ilegales continúan.

El equipo consultor considera que es preciso atender las relaciones de confianza entre usuarios y la mayor coordinación entre estos. Una gran cantidad participantes mencionaron que no se sienten representados o que la administración de quienes lideran es deficiente. Tampoco existe un organismo encargado de aunar todas las dimensiones en torno a la gestión del agua, por lo tanto, cada institución actúa reiteradamente de manera descoordinada, comprendiendo conceptos de manera diferente, lo cual hace repetir esfuerzos y obtener resultados que no son deseados.

Por último, es preciso mencionar que el equipo consultor no pretende, a través de este PEGH, dar una receta de cómo resolver el problema de sobreexplotación de acuífero del valle de Azapa, considerando que es una problemática que se arrastra hace más de 20 años. En contraposición, el presente PEGH busca dar orientaciones técnicas y estratégicas para que, a través de un proceso de toma de decisiones basado en el conocimiento, se busque la Seguridad Hídrica del acuífero del valle de Azapa, y por ende de todo el sistema humano y ecológico que depende de él. Esta búsqueda no solo debiera ser desde las ideas que se han propuesto en múltiples estudios desde hace décadas realizados, sino que también desde las propias ideas emanadas de los diversos actores territoriales. Cabe mencionar al cierre que este estudio puede ser robustecido con mejores datos, mejoras en el modelo numérico acoplado y con ampliar el público objetivo

para el proceso participativo (incluyendo a la subcuenca de Azapa Alto), de acuerdo con lo expuestos en los diversos acápite del Informe Principal y de sus Anexos.

11. ANEXOS DIGITALES

Anexo A - Abreviaciones

Anexo B - Referencias

Anexo C - Glosario

Anexo D - Figuras

Anexo E – Antecedentes recopilados

Anexo F – Aspectos metodológicos

Anexo G - SIG

Anexo H – Modelo

Anexo I – Detalle de actividades PAC

Anexo J – Información complementaria

Anexo K – Plan de acción e iniciativas