

SimCopiapó: Modelación Participativa para la Gestión del Agua

Informe Final

Gabriella Bennison, Rodrigo Rojas, Juan Carlos Castilla, Camilo Prats, Robert Bridgart, Víctor Gálvez, Alexis Medina y Edmundo Claro

Junio de 2019

Financiado con aportes del Fondo de Innovación para la Competitividad de Asignación Regional FIC- R 2016 del Gobierno Regional de Atacama, código BIP N° 30486475



Cita

Bennison G, Rojas R, Castilla J, Prats C, Bridgart R, Galvez V, Medina A, Claro E (2019) SimCopiapó: Modelación Participativa para la Gestión del Agua: Informe Final. Fundación CSIRO Chile Research.

Derechos de Autor

© Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation 2018. El derecho a publicar y divulgar los contenidos de este documento a terceras partes está sujeto al cumplimiento de las siguientes condiciones:

- a) los contenidos deben ser publicados y/o divulgados de manera no adulterada y de modo que reflejen lo más precisamente posible lo expresado en este documento, indicando siempre la fuente tal como se explicita en el acápite “Cita” más arriba y
- b) quien publique y/o divulgue los contenidos debe asegurarse de que no sean usados de modo que sugieran que CSIRO, y/o CSIRO Chile, apoya sus actividades o estén vinculados a ninguna publicidad, propaganda, resolución de disputas, anuncio comercial, sesión de inversionistas o levantamiento de capital.

Descargo Importante

CSIRO indica que la información contenida en esta publicación comprende declaraciones de carácter general basadas en investigación científica. Se advierte al lector, quien debe considerar, que dicha información puede estar incompleta o que es posible que no resulte útil para alguna situación específica. Por ende, no se debe confiar ni se deben ejecutar acciones basándose en la información sin buscar consejo previo experto, de tipo profesional, científico y técnico. Hasta donde esté permitido por la ley, CSIRO (incluyendo a sus empleados y consultores) se excluye de toda responsabilidad civil ante cualquier persona debido a cualquier consecuencia, incluyendo, pero sin limitarse a, toda pérdida, daño, costo, gasto y otras compensaciones, que surjan directa o indirectamente del uso de esta publicación (en parte o en su totalidad) y cualquier información o material contenido en ella.

CSIRO está comprometido a entregar contenido accesible en la web cuando sea posible. Si tiene dificultades para acceder a este documento, póngase en contacto con enquiries@csiro.au.

Contenidos

Contenidos	4
Figuras	7
Tablas	11
Agradecimientos	12
Resumen Ejecutivo	13
1 Introducción	17
1.1 GIRH y procesos participativos	17
1.2 Alcance del proyecto y objetivos	20
2 Antecedentes	21
2.1 Contexto social y económico	21
2.2 Clima e hidrología	22
2.3 Marco legislativo.....	23
2.4 Grupos de interés	24
2.4.1. Actores	24
2.4.2. Gobernanza.....	24
2.5 Uso del agua y sobreexplotación.....	26
2.6 Gestión del agua y desafíos	28
2.6.1 Desafíos económicos	28
2.6.2 Desafíos sociales.....	29
2.6.3 Desafíos ambientales.....	29
2.6.4 Desafíos para la colaboración.....	30
2.7 Necesidad de un enfoque integrado	30
3 Metodología	32
3.1 Desarrollo del modelo conceptual de SimCopiapó	32
3.2 Proceso participativo	33
3.3 Modelos hidrológicos	35
3.3.1 Revisión y selección de los modelos hidrológicos	35

3.3.2	Acople de los modelos.....	45
3.4	Modelo Basado en Agentes (ABM).....	64
3.4.1	Antecedentes.....	64
3.4.2	Parametrización del ABM	69
3.5	Estrategias hídricas	79
3.5.1	Levantamiento y definición de estrategias hídricas.....	79
3.5.2	Impacto de las estrategias en el modelo acoplado	99
3.6	Indicadores de Impacto	100
3.6.1	Caudal urbano entre 0 y 5000 L/s	100
3.6.2	Caudal ecológico sobre 50 L/s	100
3.6.3	Volumen Lautaro > 50%	100
3.6.4	Volumen acuífero S2	100
3.6.5	Volumen acuífero S3	100
3.6.6	Volumen acuífero S4	101
3.6.7	Volumen acuífero S5	101
3.6.8	Volumen acuífero S6	101
3.6.9	% cumplimiento prorata	101
3.7	Interfaz web	102
3.7.1.	Marco general.....	102
3.7.2.	Marco de modelamiento	102
3.7.3.	Tecnología.....	103
3.7.4.	El modelo SimCopiapó	104
3.7.5.	Interfaz de usuario – general.....	104
3.7.6.	Interfaz de usuario – específico.....	107
3.7.7.	Utilización	109
3.7.8.	Instalación y uso	112
3.7.9.	Detalles avanzados sobre instalación y ejecución de SimCopiapó	113
4	Resultados	114
4.1	Verificación de modelos hidrológicos.....	114
4.2	Estrategias hídricas	117
4.2.1	Impactos de cada estrategia hídrica (simulada).....	117
4.2.2	Combinatoria de estrategias	143

5	Conclusiones	145
	Anexo A Programación de gastos	147
A.1	Programación de gastos hasta la fecha (31-05-2019)	147
	Anexo B Metodología	149
B.4.	Información acerca de la biblioteca en desarrollo para la cuenca del río Copiapó	149
B.5.	Listado de actores participantes.....	152
	Listado inicial	152
	Listado final.....	153
B.6.	Talleres de modelación participativa.....	154
	Taller 1	154
	Taller 2	157
	Taller 3	160
	Taller 4	163
B.7.	Lista de artículos de prensa y material de difusión del proyecto.....	168
	Lista de difusión del proyecto en medios de prensa	168
	Material de difusión.....	169
B.8.	Instalador de SimCopiapó.....	173
	Anexo C Resultados	174
C.1.	Impactos de cada estrategia simulada	174
C.2.	Combinatoria de estrategias	175
	Bibliografía	176

Figuras

Figura 1 Ubicación de la cuenca del río Copiapó	23
Figura 2 Consumo de agua subterránea en la cuenca del río Copiapó (DGA-DICTUC, 2010)	27
Figura 3 Precio del agua bruta y potable (Bitran, et al., 2014; SISS, s.f.).....	28
Figura 4 Niveles de aguas subterráneas promedio por sector acuífero (ver Figura 2) (DGA, 2018). 29	
Figura 5 Modelo conceptual de la implementación del proyecto de investigación.....	32
Figura 6 Distribución de asistencia e instituciones representadas por actividad de SimCopiapó	35
Figura 7 Modelo conceptual del funcionamiento del sistema hídrico del río Copiapó desarrollado por DGA-DICTUC (2010) como base para el modelo AQUATOOL	37
Figura 8 Sectores de riego considerados en el modelo AQUATOOL (DGA-DICTUC, 2010)	39
Figura 9 Demanda de riego actualizada al año 2013 incorporada en el modelo DGA-HIDROMAS (2013)	43
Figura 10 Demanda de agua potable actualizada al año 2013 incorporada en el modelo DGA-HIDROMAS (2013).....	43
Figura 11 Demanda de agua para minería actualizada al año 2013 incorporada en el modelo DGA-HIDROMAS (2013).....	44
Figura 12 Esquema conceptual del desarrollo de la herramienta SimCopiapó.....	45
Figura 13 Grilla numérica de los modelos originales y modelo acoplado SimCopiapó.....	47
Figura 14 Mejoras en la representación de afloramientos en modelo acoplado SimCopiapó con respecto a los modelos originales.....	48
Figura 15 Mejoras en la representación del secado y mojado de celdas del modelo de flujo subterráneo usando el código MODFLOW-NWT	49
Figura 16 Pozos y derechos de aprovechamiento proyecto Caserones	50
Figura 17 Conceptualización de flujos de entrada y salida modelo de operación embalse Lautaro	51
Figura 18 Series hidrológicas que pueden ser empleadas en la simulación de estrategias	52
Figura 19 Ajuste de los modelos al caudal de descarga controlada en la estación fluviométrica DGA en Lautaro: (a) modelo original, y (b) SimCopiapó	54
Figura 20 Puntos de control modelo conceptual operación distritos de riego de la Junta de Vigilancia del río Copiapó (JVRC)	58
Figura 21 Modelo conceptual balance y reparto de aguas distritos JVRC.....	59
Figura 22 Reducción de bombeos implementado en SimCopiapó mediante MODFLOW-NWT: (a) archivo LIST de MODFLOW indicando las reducciones aplicadas, (b) balance hídrico mostrando las reducciones por sector acuífero	60
Figura 23 Demandas mineras aplicadas al modelo de aguas subterráneas en SimCopiapó.....	62
Figura 24 Cronograma de operación de la planta desaladora para la situación base.....	63

Figura 25 Dinámicas de decisión de los agentes según los tres tipos de indicadores: (E) utilidades económicas, (M) multas institucionales e (S) interacciones sociales	67
Figura 26 Esquema del marco conceptual de escalas de decisión del ABM	69
Figura 27 Participación del CARRH según sector	71
Figura 28 Mapa de distribución y participación de APECO	73
Figura 29 Resultados de encuestas para CARRH y APECO.....	74
Figura 30 Parametrización de encuestas para CARRH.....	76
Figura 31 Parametrización para encuestas APECO	77
Figura 32 World Value Survey (WVS) y GCG para CARRH y APECO	78
Figura 33 Fotografías del proceso participativo en la definición de estrategias, primera jornada...	80
Figura 34 Estrategia SWAP - Minera Candelaria traspasa agua desalada a Aguas Chañar y esta deja de extraer de sus pozos de los sectores 5 y 6	82
Figura 35 Estrategia SWAP - Caserones deja de explotar pozos del sector 2 y extrae agua del río Ramadilla.....	84
Figura 36 Agricultores de los Distritos 8 y 9 dejan de explotar sus aguas y estas son redistribuidas o devueltas al río Copiapó.....	86
Figura 37 Estrategia infraestructura – Impermeabilización Embalse Lautaro.....	88
Figura 38 Estrategia Infraestructura – Entubamiento	90
Figura 39 Estrategia Infraestructura - Desaladora Estatal	92
Figura 40 Estrategia Gestión de Recarga de Acuíferos	94
Figura 41 Estrategia Prorrata	96
Figura 42 Estrategia Reutilización de Aguas Grises	98
Figura 43 Ejemplo de gráfico de radar que resume los indicadores de impacto del escenario base y escenario simulado.....	102
Figura 44 Principales secciones de la GUI de SimCopiapó.....	105
Figura 45 Resultados del modelo con capas espaciales visibles.....	108
Figura 46 Ventana de salida (outputs) y selector de capas de mapa	110
Figura 47 Ventana de información de capa	111
Figura 48 Buscador de características.....	112
Figura 49 Ajuste de caudales superficiales en condiciones históricas (1991-2016), SimCopiapó (simulado) vs estaciones fluviométricas de la DGA (observado).....	115
Figura 50 Ajuste de caudales superficiales en condiciones históricas (1971-2007) modelo original DGA-DICTUC (2010) (simulado) vs estaciones fluviométricas de la DGA (observado).....	115
Figura 51 Verificación del acople (caudal afloramiento subterráneo en sector La Puerta) del modelo MODFLOW-NWT y el modelo de aguas superficiales	116

Figura 52 Variación promedio de los niveles freáticos y volumen embalsado para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.1	117
Figura 53 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.1	118
Figura 54 Porcentaje de capacidad embalsada en Embalse Lautaro para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.2	119
Figura 55 Indicador de caudal urbano aceptable (0-5000 L/s) en la ciudad de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.2	119
Figura 56 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.2	120
Figura 57 Evolución de los niveles freáticos en pozos de monitoreo de la DGA para los sectores acuíferos 3 y 4 para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3a	121
Figura 58 Recarga natural sectores acuíferos producto de infiltración en el río Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3a.....	121
Figura 59 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3a	122
Figura 60 Variación de la profundidad promedio de los niveles freáticos en el tiempo para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3b	123
Figura 61 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3b	123
Figura 62 Series hidrológicas en estaciones de la DGA, y resúmenes de cinco números para los caudales y sectores acuíferos del valle de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3c..	125
Figura 63 Caudal urbano registrado en la estación río Copiapó en Ciudad de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3c.....	125
Figura 64 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3c.....	126
Figura 65 Variación promedio de los niveles freáticos (fila superior) y variación promedio volumen embalsado (fila inferior) para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3d	127
Figura 66 Caudal superficial en el sector Angostura para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3d	128
Figura 67 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3d	128
Figura 68 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3e	129
Figura 69 Evolución niveles freáticos en estaciones de monitoreo DGA para el sector acuífero 2 para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.1	130
Figura 70 Análisis de la operación y el balance hídrico del Embalse Lautaro para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.1	131
Figura 71 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 2.1	132
Figura 72 Satisfacción de la demanda en predios que utilizan solo canal y bombeo adicional requerido debido a insatisfacción de la demanda para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.2	133
Figura 73 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 2.2	134
Figura 74 Caudales de agua desalada requeridos para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.3	135
Figura 75 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 2.3	135

Figura 76 Valores de recarga artificial para: a) escenario base, y b) Estrategia 3.1	136
Figura 77 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 3.1	137
Figura 78 Variación volumen embalsado (con respecto al volumen inicial) en sectores acuíferos del valle de Copiapó para a) escenario base, y b) Estrategia 4.1.....	138
Figura 79 Evolución niveles freáticos en estaciones de monitoreo DGA en los sectores acuíferos para: a) escenario base, y b) Estrategia 4.1	139
Figura 80 Costo del bombeo referencial en Pesos Chilenos por sector acuífero en el valle de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 4.1	140
Figura 81 Resumen indicadores de impacto para la Estrategia 4.1 (sub-escenario a).....	140
Figura 82 Resumen indicadores de impacto para la Estrategia 4.1 (sub-escenario b).....	141
Figura 83 Resumen indicadores de impacto para la Estrategia 5.1.....	142
Figura 84. Costo del bombeo referencial en Pesos Chilenos por sector acuífero en el valle de Copiapó para escenario base, y Estrategia 5.1	142
Figura 85 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la combinatoria de estrategias	144

Tablas

Tabla 1 Demografía y acceso al agua en CRC (ODEPA, 2018; DOH, 2018; DGA, s/f; INE, 2017)	21
Tabla 2 Descripción climatológica en Copiapó (AGRIMED, 2017)	22
Tabla 3 Miembros del CARRH	25
Tabla 4 Sesiones y actividades participativas realizadas durante el proyecto SimCopiapó.....	34
Tabla 5 Elementos de diseño para el modelo conceptual implementado en AQUATOOL para la cuenca de Copiapó.....	37
Tabla 6 Correspondencia entre sectores acuíferos DGA y sectores acuíferos modelo AQUATOOL (DGA-DICTUC, 2010)	38
Tabla 7 Sectores de riego en el valle de Copiapó implementados en el modelo AQUATOOL	39
Tabla 8 Relación elementos del modelo conceptual de la cuenca del río Copiapó, incluyendo los distritos de riego administrados por la JVRC (DGA-DICTUC, 2010)	40
Tabla 9 Localización de demandas y valores estimados sobre la base de los derechos otorgados y los correspondientes factores de uso	41
Tabla 10 Resumen explotación de aguas subterráneas documentada y modelada en previos estudios.....	44
Tabla 11 Factores de ajuste para las descargas controladas desde el embalse Lautaro	54
Tabla 12 Demandas y pérdidas de agua de riego por fuente de riego para los distritos de la JVRC	55
Tabla 13 Factores de ajuste usados para calcular las demandas instantáneas mensuales	56
Tabla 14 Coeficientes de infiltración de los distintos tramos del río Copiapó	61
Tabla 15 Demandas de agua potable, cronograma de operación de los pozos de producción de Aguas Chañar, producción de la planta desaladora, y pérdidas por distribución para la situación base	63
Tabla 16 Representatividad de organizaciones y cantidad de encuestas con respuestas	71
Tabla 17 Estrategias implementadas en SimCopiapó y su impacto en los componentes del modelo acoplado.....	99

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a los miembros del Gobierno Regional (GORE) de Atacama y los miembros del Consejo Regional de Atacama (CORE) por respaldar el financiamiento de este proyecto a través del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) (FIC- R 2016, código BIP N° 30486475), y por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo del proyecto.

Un agradecimiento especial a las instituciones y actores locales que formaron parte de la gobernanza hídrica del proyecto por su constancia e importantes contribuciones técnicas, sin las cuales no hubiera sido posible recoger el valioso conocimiento local sobre la gestión de los recursos hídricos. Dentro de estas instituciones/actores se encuentra el **Sector Público** de la Región de Atacama donde agradecemos el apoyo de las siguientes instituciones: Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) del Ministerio de Medio Ambiente, SEREMI Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas de Atacama, Superintendencia de Servicios Sanitarios de Atacama, SEREMI MINECON, SEREMI Minería, SEREMI de Agricultura, Comisión Nacional de Riego de Atacama, Instituto de Desarrollo Agropecuario de Atacama, SEREMI MINVU, Corporación de Fomento Productivo de Atacama, División de Planificación y Desarrollo del GORE Atacama; agradecemos a los actores de la **Sociedad Civil** en especial a la Universidad de Atacama, Universidad de Chile, Consejo Nacional del Pueblo Colla, Unión Comunal de Juntas de Vecinos de Copiapó, Asociación de Consumidores y Usuarios de Copiapó, y actores de la sociedad civil en general; y finalmente agradecemos a los actores del **Sector Privado y Organizaciones de Usuarios de Agua de la cuenca del Río Copiapó**, en especial a las siguientes organizaciones: Comunidad de Aguas Subterráneas sectores 1-2-3; Comunidad de Aguas Subterráneas sector 4; Comunidad de Aguas Subterráneas sector 5-6; Junta de Vigilancia del Río Copiapó y sus afluentes; Asociación de Productores y Exportadores Agrícolas del Valle de Copiapó; Empresa Sanitaria Aguas Chañar; Proyecto Caserones de Lumina Copper; Corporación para el Desarrollo Regional de Atacama; Cámara de Comercio de Copiapó. Un especial agradecimiento dentro del sector privado a la directiva y socios de la Asociación de Productores y Exportadores Agrícolas del Valle de Copiapó por su colaboración en el proceso de levantamiento de información.

Finalmente, un agradecimiento a los actores y medios de comunicación que permitieron la difusión del proyecto durante su desarrollo.

Aunque este trabajo se publica como un informe de CSIRO, el desarrollo de este proyecto ha contado con el apoyo técnico de la Universidad de Wollongong (UOW) (Australia) y la Universidad de Tecnología de Sídney (UTS) (Australia).

Resumen Ejecutivo

La cuenca del río Copiapó está ubicada en la ecorregión del desierto de Atacama, el más árido del mundo, en la Región de Atacama. La cuenca cubre un área de 18.704 km² y su río homónimo da vida a un valle que sostiene importantes ecosistemas del territorio dentro del clima semiárido.

Agricultura, minería y uso doméstico (consumo humano) son los principales sectores que compiten por los escasos recursos hídricos disponibles en la cuenca del río Copiapó. La agricultura es la actividad que consume la mayor proporción de agua – alrededor del 80% del uso de agua subterránea se utiliza con fines agrícolas, mientras que el resto se distribuye casi por igual entre los usos minero y doméstico. Esta escasez y fuerte competencia por los recursos hídricos ha generado importantes limitantes para el desarrollo sostenible a nivel regional. Relacionado a esto, existen antecedentes históricos en la cuenca del río Copiapó – que datan desde la fundación de los primeros asentamientos españoles en el territorio – los cuales relatan ya las complejidades e intentos por administrar el agua en el contexto desértico de la zona (Berríos & Lucero, 2010; Sayago, 1984; Broll & Pinto, 1988). Esto indica lo relevante del problema hídrico en la cuenca en el contexto histórico y social a través del tiempo.

La historia reciente de los procesos de gobernanza hídrica en la cuenca del río Copiapó, enmarcados en el concepto de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) (Cardwell, et al., 2006), se inicia con lo que se denominaron las Mesas del Agua desarrolladas entre los años 2006 y 2010. Desde entonces diversas iniciativas han reconocido la necesidad de avanzar en la GIRH sin mejoras sustantivas en el balance hídrico de la cuenca, lo que ha ido desgastando el capital social frente a los procesos de gobernanza. La referencia más reciente, en cuanto a la gobernanza para la GIRH, es la conformación del Comité Asesor Regional de Recursos Hídricos (CARRH) el cuál operó formalmente para el período 2014-2018, y que actualmente ha sido rearticulado para el desarrollo del proyecto SimCopiapó.

El presente informe corresponde al informe final del proyecto **“SimCopiapó: Modelación Participativa para la Gestión del Agua”**, financiado por el Gobierno Regional de la Región de Atacama, y su Consejo Regional mediante el Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) 2016, código BIP N° 30486475.

Este proyecto incluye una serie de entregables entre los que destacan: el presente informe final; un paquete computacional (Software) denominado SimCopiapó disponible para su libre y gratuita utilización; un detallado tutorial sobre la implementación y aplicación de la herramienta SimCopiapó; una página web (<https://research.csiro.au/gestion-copiapo/>) detallando el desarrollo del proyecto, sus productos, resultados preliminares y la difusión de actividades; y una serie de trabajos científicos presentados (o en proceso de desarrollo) en congresos nacionales e internacionales, y revistas científicas internacionales.

El proyecto ha permitido el desarrollo de una herramienta conceptual innovadora de apoyo a la toma de decisiones, cuyo objetivo ha sido la promoción y facilitación de la gobernanza del agua en la cuenca del río Copiapó. SimCopiapó acopla diversos modelos de tipo hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Copiapó, también un modelo basado en agentes (ABM por sus siglas en inglés)

que parametriza decisiones de los usuarios del agua del territorio frente a distintos escenarios hídricos posibles. La herramienta fue co-desarrollada en un proceso de modelación participativa con los actores de la cuenca del río Copiapó, enmarcados por el CARRH.

El foco de esta herramienta es fortalecer la GIRH en la Región de Atacama y específicamente en la cuenca del río Copiapó. La GIRH ha sido conceptualizada en términos generales como un proceso que promueve de manera coordinada el desarrollo y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los sistemas vitales (GWP, 2000). El proyecto se enmarca en los esfuerzos nacionales, regionales y locales por avanzar en la GIRH, como lo son: la Política de Recursos Hídricos de Chile (1999), Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2015, Política Nacional de Recursos Hídricos 2015, las Mesas del Agua, el CARRH, entre otros.

El proceso participativo tuvo por objetivo principal involucrar a los actores en la co-construcción de SimCopiapó en tres niveles: formulación en conjunto de estrategias de gestión hídrica para la cuenca; la parametrización del modelo de agentes (ABM); y el levantamiento de indicadores de impacto relevantes a los usuarios. Este proceso ha permitido una integración amplia de actores e instituciones y una validación del modelo hídrico-social conceptualizado. Los actores han podido priorizar y evaluar de manera transparente un grupo de estrategias hídricas actualmente en discusión en la cuenca del río Copiapó y explorar sus impactos en los recursos hídricos, así como también en aspectos de carácter social y económico. También la aplicación de SimCopiapó ha permitido aportar a una evaluación transparente por parte de los actores sobre los potenciales impactos de la implementación de distintas estrategias hídricas y sus combinaciones.

Las estrategias hídricas en el contexto de este proyecto tienen por objetivo explorar potenciales mejoras a la situación actual, en cuanto al sistema hídrico-social de la cuenca. Las estrategias fueron seleccionadas y priorizadas a lo largo del proceso participativo iterando con distintas metodologías (sesiones de trabajo, talleres ampliados, encuestas, focus-group) las cuales facilitaron el diálogo y debate de distintos puntos de vista de los actores clave de la cuenca. Los 5 grupos principales de estrategias identificados mediante el proceso participativo por los actores fueron: intercambio (SWAP) de agua (en sectores alto, medio y bajo de la cuenca); infraestructura regularizada (impermeabilización Embalse Lautaro, entubamiento de canales de riego, planta desaladora sanitaria); gestión de recarga de acuíferos; prorrata de aguas subterráneas, y reutilización de aguas grises.

Para el desarrollo del modelo de agentes (ABM), se utilizó como marco de referencia los resultados de la *World Value Survey* (WVS) – un esfuerzo científico global que ha buscado comprender y caracterizar valores, creencias y motivaciones de la sociedad (Inglehart, et al., 2014) –, y el levantamiento de información específica sobre el contexto valórico-social de los principales actores (o grupos de actores) relacionados al uso del agua en la cuenca del río Copiapó. Esto implicó el desarrollo de una encuesta a los socios de la Asociación de Productores y Exportadores Agrícolas del Valle Copiapó (APECO) y el CARRH, la cual permitió recopilar información acerca de las percepciones sobre el mercado del agua; la tolerancia a la regulación y normativas que lo rigen; y la propensión a romper o seguir reglas previamente acordadas relacionadas con la gestión del recurso hídrico, por parte de los actores relevantes en la gestión hídrica de la cuenca. La implementación de SimCopiapó, permite en ese marco, explorar la incidencia de los actores en la efectividad de las distintas estrategias. En el contexto del ABM, la estrategia analizada ha sido la prorrata de aguas

subterráneas y su grado de cumplimiento potencial para dos niveles de monitoreo y fiscalización implementados por el ente regulador.

Los indicadores de impacto que proporciona SimCopiapó, tienen por objetivo facilitar la comparación de resultados entre las estrategias y el escenario base, en cuanto a impactos ambientales, sociales y económicos. Para facilitar la comprensión de los resultados se desarrolló una interfaz gráfica que muestra los siguientes indicadores de impacto: Indicador de caudal urbano, indicador de caudal ecológico, volumen del Embalse Lautaro, volumen de los sectores acuíferos, y grado de cumplimiento de la prorrata de aguas subterráneas.

Desde la perspectiva de los modelos hidrológicos utilizados en SimCopiapó, el proyecto implicó la revisión, mejora y uso de modelos hidrológicos existentes, calibrados y validados por estudios anteriores. La revisión de antecedentes consideró las siguientes estudios de modelación: DGA-Álamos y Peralta (1987); DGA-Álamos y Peralta (1995); DGA (2003); Golder (2006), DGA-DICTUC (2010); SERNAGEOMIN (2012); DGA-HIDROMAS (2013). DGA-DICTUC (2010) y DGA-HIDROMAS (2013) han sido los principales modelos considerados en la implementación de SimCopiapó, por representar el modelo más actualizado en términos de recolección de información sobre las propiedades físicas del acuífero del valle de Copiapó.

Para integrar la información en SimCopiapó, se reescribieron, mejoraron y acoplaron los modelos originales calibrados usando código abierto desarrollado en lenguaje Python. Lo anterior permite fomentar la mantención y personalización de la herramienta por organizaciones académicas y/o colaboraciones entre universidades y organismos públicos, sin requerir una licencia para su uso o actualización. Además, la herramienta está desarrollada de manera modular, lo que facilita su fácil actualización, por ejemplo, con nuevos modelos hidrológicos, información de contexto, etc. Las modificaciones realizadas a los modelos hidrológicos permitieron entre otras mejoras: una representación más precisa del balance de agua y operación del Embalse Lautaro; mejor caracterización de la oferta y demanda de los distritos de riego bajo el embalse; mejor representación del escenario de bombeo de los sectores 5 y 6 del acuífero; mejoras en la representación de los flujos superficiales del río Copiapó.

La interfaz web de SimCopiapó posee capacidades de despliegue similares a un Sistema de Información Geográfico (SIG), y los motores de simulación reflejados en un modelo de aguas superficiales y un modelo de aguas subterráneas completamente acoplados en tiempo y espacio. La herramienta interactiva permite recrear y explorar escenarios futuros probables de fenómenos hidro-sociales complejos dentro de la cuenca del río Copiapó, permitiendo una evaluación integrada de estas realidades.

Los resultados obtenidos de la herramienta pueden ser revisados dentro de la misma plataforma o compilados automáticamente en un reporte (formato Word, *.docx), que sintetiza de manera gráfica los principales indicadores para la estrategia o el set de estrategias seleccionadas. A pesar del diseño intuitivo de la herramienta para quienes están familiarizados con entornos SIG, se ha desarrollado un manual de usuario para facilitar la interpretación de los resultados y mejorar la comprensión de la herramienta.

Los resultados de la aplicación de SimCopiapó al análisis de las estrategias hídricas indican que la definición de estas estrategias tendrá impactos sectoriales claramente definidos y acotados. Por ejemplo, para el plazo analizado (25 años), la implementación de ciertas estrategias esta acotada a los sectores acuíferos sobre los cuales se interviene y, por lo tanto, impactos a escala de cuenca

requieren de un mayor tiempo de análisis o la combinación de múltiples estrategias en el corto-mediano plazo. Cabe destacar que los resultados están condicionados a los supuestos asumidos para la implementación de estas estrategias, así como también a la limitación en la recolección y levantamiento de datos para describir la cuenca del río Copiapó.

En términos de sustentabilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó, claramente las aguas subterráneas poseen un rol fundamental al suplir gran parte de la demanda de recursos hídricos observada en la cuenca. Una disminución de la demanda de aguas subterráneas del 40 % mediante prorrata en los sectores acuíferos 3-4-5 con un alto nivel de cumplimiento (88 % de los usuarios), no permite que el sistema de aguas subterráneas se estabilice en el largo plazo (25-30 años). La excepción a este comportamiento se observa sólo para el sector acuífero 3, el cual muestra una estabilización y/o leve tendencia hacia la recuperación hacia el final del período de simulación (2043). Esto último indicaría que distintos niveles de prorrata, sujetos potencialmente a distintos niveles de monitoreo y/o fiscalización, pueden ser necesarios de implementar para distintos sectores acuíferos.

Resulta evidente que la combinación de estrategias hídricas presenta los mayores beneficios a la sociedad desde el punto de vista de la sustentabilidad hídrica en el largo plazo. Estos beneficios, sin embargo, deben ser analizados mediante contabilidad del tipo Triple Línea de Resultados (Social, Ambiental y Económico), la cual permita visualizar potenciales compromisos (trade-offs) que la sociedad en su conjunto esté dispuesta a asumir como cargo por la implementación de dichas estrategias. Al mismo tiempo, sería extremadamente útil diseñar un ejercicio de priorización de las estrategias hídricas definidas en SimCopiapó en términos de beneficios sociales, ambientales y económicos. Esta actividad, sin embargo, ha estado fuera del alcance de este proyecto y se plantea como una actividad de investigación futura.

El objetivo último de SimCopiapó es ayudar a visualizar potenciales compromisos y contribuir al dialogo constructivo y participativo para aportar al diseño de políticas públicas que permitan implementar una gestión sustentable de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó con una mirada multisectorial de largo plazo.

1 Introducción

1.1 GIRH y procesos participativos

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) ha capturado el interés de investigadores, profesionales, departamentos gubernamentales e instituciones de investigación desde principios del siglo XX. Sin embargo, no fue hasta en la década de 1990 que la GIRH comenzó a dominar el discurso sobre la gestión y la política de recursos hídricos (Saravanan, et al., 2009). En efecto, actualmente la GIRH ocupa un lugar destacado en las publicaciones académicas y en los informes e iniciativas de importantes organizaciones internacionales como la Agenda 21 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Cumbre Mundial de la Organización de Naciones Unidas (ONU) sobre el Desarrollo Sostenible en 2002, y otros eventos y publicaciones globales (Mukhtarov & Gerlak, 2014).

A pesar de que existen más de treinta definiciones de GIRH que compiten y/o se complementan entre sí, el concepto es generalmente concebido como un enfoque que permite alcanzar un desarrollo de los limitados recursos hídricos de manera eficiente, equitativa y sustentable. Más específicamente, más que un conjunto de contenidos substanciales, la GIRH es considerada como un *proceso que promueve de manera coordinada el desarrollo y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los sistemas vitales* (GWP, 2000). Recientemente, la GIRH ha sido entendida como el proceso cuyo fin es la *seguridad hídrica*, la que puede ser concebida como la *disponibilidad sostenible de cantidades y calidades adecuadas de agua para sociedades y ecosistemas resilientes enfrentados a cambios globales inciertos* (López-Gunn, et al., 2014).

De acuerdo con Mukhtarov y Gerlak (2014), la versión más moderna de GIRH tiene como punto de partida dos elementos: a) el progresivo consenso en torno a que la sectorización y fragmentación de la gestión del agua está en el centro de los problemas de los recursos hídricos, y b) la creciente conciencia de que las causas de la crisis del agua residen menos en limitaciones financieras o tecnológicas y más en la pobreza, la desigualdad y las relaciones desiguales de poder, así como en la aplicación de políticas de gestión deficientes que agravan la escasez del agua. Para abordar estas deficiencias, los mismos autores indican que lo que distingue a la GIRH de esfuerzos anteriores es un énfasis en: a) la integración de los diversos aspectos de la gestión del agua, tales como los usos del agua por distintos sectores (industria, agricultura, sector sanitario y medio ambiente), y los múltiples niveles de gobierno (local, regional, nacional e internacional); b) la promoción de las cuencas hidrográficas como unidades de gestión; y c) una mayor participación de los usuarios e interesados en los procesos de toma de decisión.

Por su parte, debido a la cantidad y variedad de información necesaria para implementar una GIRH, es imprescindible contar con procedimientos de recolección, almacenamiento, provisión y disseminación de datos confiables y precisos, los que luego deben ser transformados en un sistema de información que apoye la toma de decisiones, de modo que éstas sean mejores y más comprensivas (López-Gunn, et al., 2014). En efecto, la información es considerada como la piedra angular en la toma de decisiones hídricas funcionales, lógicas y racionales (Timmerman & Langaas,

2005). Estos sistemas, los cuales deben ser nutridos por información recolectada de manera regular cubriendo la disponibilidad, los flujos, la demanda y el uso del agua en una cuenca determinada, permiten la diseminación regular y actualizada de sus descubrimientos a los usuarios, autoridades y público en general (Tefry, et al., 2012).

A nivel nacional, la *Política del Recurso Hídrico de Chile* de 1999 establece como uno de sus objetivos la implementación de la GIRH. Más específicamente, propone un “estilo de gestión integrada que permitiría internalizar en las decisiones, teniendo presente un horizonte de mediano y largo plazo, las externalidades ambientales y económicas que generan los distintos sectores en su accionar”, en donde “la cuenca se constituye de suyo en unidad fundamental de gestión de los recursos naturales” (DGA, 1999). De manera similar, la *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 – 2025* indica que para lograr una gestión eficiente y sustentable del recurso hídrico “es clave la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) y la gestión integral de cuencas” (DGA, 2013). Más recientemente, la *Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015* indica como una línea de acción “La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos como Política Nacional”, la que tiene como objetivo establecer a la cuenca hidrográfica como unidad de ordenamiento territorial y mejorar la gestión de la información sobre los recursos hídricos (DPRH, 2015). Sin embargo, los avances en Chile en materia GIRH son escasos. Si bien al alero de la propuesta “Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas”, que fue aprobada en 2007 por el Consejo Directivo de la CONAMA, se constituyeron los Organismos de Cuencas en tres cuencas piloto (Copiapó, Rapel y Baker), y se elaboró la primera versión de los Planes de Gestión de Cuenca en las mismas, éstos no tenían carácter normativo y no fueron usados para tomar decisiones en la gestión del agua (Banco Mundial, 2011). Como expresan algunos autores, esta iniciativa “no pasó de algunas acciones incipientes en tres cuencas piloto” (Borregaard, et al., 2012).

Esta falta de avances en GIRH a nivel nacional se debe en buena parte al contexto legislativo e institucional vigente, ya que favorece la planificación y la gestión hídrica por sector económico de manera independiente y dificulta un enfoque multisectorial enraizado territorialmente a nivel de cuenca. En este marco, los objetivos de política se han establecido sin tener en cuenta las implicaciones para otros usuarios del agua y sin consulta intersectorial (Donoso, 2014).

De acuerdo con el Banco Mundial (2011), los principales desafíos que enfrenta Chile en materia de GIRH son: i) adoptar un enfoque de cuenca como unidad de análisis, ii) planificación y gestión, iii) fomentar la participación de los grupos interesados, y iv) mejorar los sistemas de información y comunicación. Ideas similares a las anteriores son expresadas por el Banco Mundial (2013) al momento de hacer un diagnóstico comprehensivo para mejorar el marco institucional de la gestión del agua en Chile. En efecto, según este estudio uno de los principales desafíos que Chile enfrenta para progresar hacia una gestión del agua sustentable y eficiente es “lograr una gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca”. Más específicamente, indica que para avanzar en esta línea es necesario: a) incluir y coordinar la participación de todos los usuarios e interesados de la cuenca en cuestión en la gestión del recurso hídrico; b) generar una visión de la cuenca coherente de mediano y largo plazo que oriente políticas, programas y proyectos; y c) mejorar la obtención de información, el manejo de datos y la generación del conocimiento de los recursos hídricos.

Hoy en día, la facilitación de procesos que promuevan la participación de las partes interesadas (usuarios, organismos reguladores, sociedad civil, entre otros) se presenta como uno de los ejes principales para el éxito de la GIRH. Ciertos principios claves para una participación efectiva de las

partes interesadas en la GIRH han sido identificados y corresponden a: i) asegurar la transparencia acerca del proceso de participación y el nivel de toma de decisión otorgado a las partes interesadas, ii) ser inclusivo y empoderar a aquellos actores en desventaja de participar, y iii) desarrollar procesos que permitan a las partes interesadas/actores apreciar otras perspectivas y, por lo tanto, actuar “razonablemente” en vez de “racionalmente” (Aslin & Brown, 2002; Curtis, et al., 2016).

Al mismo tiempo, un elemento clave en el desarrollo de una participación efectiva de las partes interesadas como pilar fundamental de la GIRH es el denominado “capital social” (López-Gunn, et al., 2014). Entenderemos por capital social a las relaciones sociales, redes de comunicación, nivel de confianza mutua, normas y reglas de operación (explícitas o tácitas), que emergen entre las partes interesadas /actores clave en la gestión del agua cuando estos interactúan entre sí, y cuya existencia y puesta en operación resulta en beneficios adicionales para todos los actores (Curtis, et al., 2016). En este contexto, la definición de procesos participativos que faciliten el diálogo, aprendizaje y acción promoverán la construcción del capital social cuando éste sea inexistente o esté fuertemente erosionado, facilitando de esta manera los procesos participativos dentro de la GIRH (Curtis, et al., 2016).

Desde el punto de vista del capital social existente en la cuenca del río Copiapó se han identificado entre otros problemas: un aumento en los conflictos intersectoriales productos de los mecanismos de regulación del mercado de aguas, falta de cooperación entre las partes interesadas para buscar soluciones integradas a la escasez hídrica resultando en medidas de carácter sectorial y aisladas (por ejemplo, desalación de agua de mar para el sector minero, aumento de la eficiencia de riego en el sector agrícola, desarrollo de nuevos pozos para agua potable), diferencias en la base de conocimiento sobre el funcionamiento de la cuenca, diferencias de opinión/apreciación en términos del valor del uso del agua, y bajos niveles de confianza entre los usuarios de agua. Todos esto ha derivado en la identificación de un capital social limitado o inexistente en la cuenca del río Copiapó (CSIRO Chile, 2012). Al mismo tiempo, Galvez et al. (2019) analizan importantes barreras y facilitadores para la colaboración en el contexto de la GIRH en la cuenca de Copiapó. Como barreras se identifican la falta de una visión compartida para la cuenca, falta de liderazgo efectivo y voluntad política, y asimetrías de recursos, conocimiento y poder entre los actores clave.

En este contexto, es posible identificar para la cuenca del río Copiapó la falta de herramientas que nos permitan visualizar el impacto del uso de los recursos hídricos sobre los sectores productivos claves de la región bajo el contexto hídrico-social existente en la cuenca; la falta de mecanismos/herramientas que promuevan la participación ciudadana en la toma de decisiones de manera equitativa, transparente e inclusiva; la falta de herramientas que ayuden a construir y consolidar el capital social como base fundamental para facilitar los procesos participativos dentro de la GIRH; y la falta de herramientas que nos permitan evaluar el diseño e implementación de estrategias de gobernanza del agua para alcanzar consensos y enfrentar la persistente crisis hídrica instalada en la cuenca.

El alcance de este proyecto es contribuir a reducir estas brechas de conocimiento y proponer una herramienta que permita abordar estos desafíos.

1.2 Alcance del proyecto y objetivos

El objetivo del proyecto es promover y facilitar la gobernanza del agua en la Región de Atacama, específicamente en la cuenca del río Copiapó, mediante el uso de una herramienta conceptual innovadora de apoyo a la toma de decisiones denominada SimCopiapó. La herramienta se pondrá a disposición del Consejo Asesor Regional de Recursos Hídricos (CARRH) para fortalecer la GIRH en la Región de Atacama, específicamente, en la cuenca del río Copiapó.

Este proyecto persigue:

- Facilitar la relación e interacción de los integrantes del CARRH, y otros actores en caso de ser apropiado, en temas de gestión hídrica mediante un proceso de toma de decisiones transparentes, efectivas e inclusivas.
- Fomentar el capital social asociado a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó mediante un ejercicio de modelación participativa.
- Conceptualizar y diseñar el modelo hídrico-social de la cuenca del río Copiapó a través de un ejercicio de modelación participativa dirigido a los miembros del CARRH.
- Implementar la plataforma computacional SimCopiapó como herramienta de apoyo a la toma de decisiones del CARRH. SimCopiapó será la primera aplicación de FlowLogo para modelación participativa en Chile en temas de gobernanza de aguas.
- Evaluar estrategias y/o escenarios que faciliten la gobernanza del agua y ayuden a fomentar el capital social, y que respondan a la realidad del modelo hídrico-social identificado en la cuenca del río Copiapó.

La programación de gastos financieros (hasta el 31 de mayo de 2019) se presenta en el Anexo A.

2 Antecedentes

2.1 Contexto social y económico

La cuenca del río Copiapó (CRC) en el norte de Chile se encuentra en la Región de Atacama cubriendo un área de 18.704 km² (GORE ATACAMA, 2019) (Figura 1). La ciudad de Copiapó es la capital regional de la Región de Atacama, y la Provincia de Copiapó (incluyendo Tierra Amarilla) posee una población aproximada de 167.956 habitantes (INE, 2017), mostrando un crecimiento demográfico anual estimado de 1,2 % (INE, 2017). La Tabla 1 presenta algunas características sobre la demografía y acceso al agua en la cuenca. En la actualidad, la cuenca del río Copiapó abastece con agua potable a las zonas urbanas de Tierra Amarilla, Copiapó, Caldera y Chañaral.

Tabla 1 Demografía y acceso al agua en CRC (ODEPA, 2018; DOH, 2018; DGA, s/f; INE, 2017)

Ítem	Urbano	Rural
Población (Provincia Copiapó + Tierra Amarilla)	160.952	7004
Cobertura de agua potable (% de población que tiene acceso al servicio)	99,7%	54%*
Cobertura de alcantarillado (% de población que tiene acceso al servicio)	96,8%	82%
Cobertura de tratamiento de aguas residuales (% de población que tiene acceso al servicio)	94,6%	82%
Porcentaje de población indígena nativa a la región de Atacama (Colla y Diaguita)	15%	7%

*: basado en informe Fundación Amulen (2019) sobre datos INE (2017).

En cuanto a la economía regional, el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita promedio anual es de aproximadamente USD 17.000 (ODEPA, 2018), mientras que el ingreso mensual promedio per cápita es USD 729 (INE, 2017), y el 21,6 % de los hogares viven en condiciones de pobreza (MDS, 2018).

Si bien la información no está disponible a escala de cuenca, la agricultura contribuye con el 3% del PIB de la región de Atacama derivado principalmente de las exportaciones de frutas. Alrededor del 70% de los cultivos en la cuenca son uvas de mesa y 15% de los cultivos corresponde a aceitunas (ODEPA, 2018). Además, es posible observar en menor escala, la producción de frutas y verduras por parte de pequeños agricultores y un mínimo de ganado en la parte alta de la cuenca de Copiapó para la agricultura de subsistencia (ODEPA, 2018). Cerca del 30% del PIB regional proviene de actividades mineras, representadas por exportaciones de cobre y oro (BCC, 2017).

El consumo de agua para uso potable y minero se concentra principalmente en los sectores acuíferos 4 y 5. Sin embargo, la compañía proveedora de agua potable en la región, Aguas Chañar, ha efectuado cambios de puntos de captación utilizando los recursos subterráneos del sector acuífero 6 (Figura 1). Al mismo tiempo, las principales compañías mineras han comenzado a bombear agua desalada a más de 1.000 metros sobre el nivel del mar (msnm), mientras que la empresa sanitaria Aguas Chañar espera utilizar agua desalada para el consumo humano en el año 2020 (Rinaudo & Donoso, 2017).

2.2 Clima e hidrología

La cuenca del río Copiapó está ubicada en el desierto más árido del mundo. La precipitación media anual en Copiapó es de 19,3 mm (DGA, 2016), alcanzando entre 100 y 500 mm/año a elevaciones que varían entre 3.000 y 5.000 msnm (DGA, 2016). La Tabla 2 proporciona una descripción general de las condiciones climatológicas en el área de estudio.

Tabla 2 Descripción climatológica en Copiapó (AGRIMED, 2017)

Variable / Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp. Max (°C)	28,2	27,7	26,2	24,2	22,3	20,8	20,3	20,4	21,6	23,6	25,8	27,5	24,1
Temp. Min (°C)	14,5	14	12,7	10,9	9,1	7,8	7,3	7,8	8,7	10,5	12,4	13,9	10,8
Temp. Prom. (°C)	20,4	19,9	18,6	16,8	15	13,7	13,2	13,4	14,5	16,3	18,3	19,8	16,6
Hum. Relativa (%)	72	71	68	64	59	56	55	56	59	63	68	71	64
EVT Potencial (mm)	180	175	163	147	131	119	114	119	131	147	163	175	1763

El río Copiapó comienza aguas abajo de la confluencia de los ríos afluentes Manflas, Jorquera y Pulido, y muestra un régimen hidrológico mixto (nival-pluvial) acentuado en las cuencas superiores (Figura 1). Los registros fluviométricos muestran un caudal medio anual de 2,6 KL/s en la cuenca superior, con la misma cantidad otorgada en derechos de aguas superficiales, lo que significa que el río está totalmente asignado para el consumo de agua superficial (DGA, 2016). Como consecuencia, y debido a que prácticamente no hay aportes superficiales en las cuencas intermedias, el río tiende a dejar de escurrir hacia la mitad de su recorrido hasta el océano durante algunos períodos del año debido a las extracciones del recurso hídrico aguas arriba (Bauer, 2015). En estas condiciones, los usuarios de agua dependen en gran medida de las aguas subterráneas, la cual muestra tasas de recarga anual promedio de 3,0 KL/s (DGA-DICTUC, 2010).

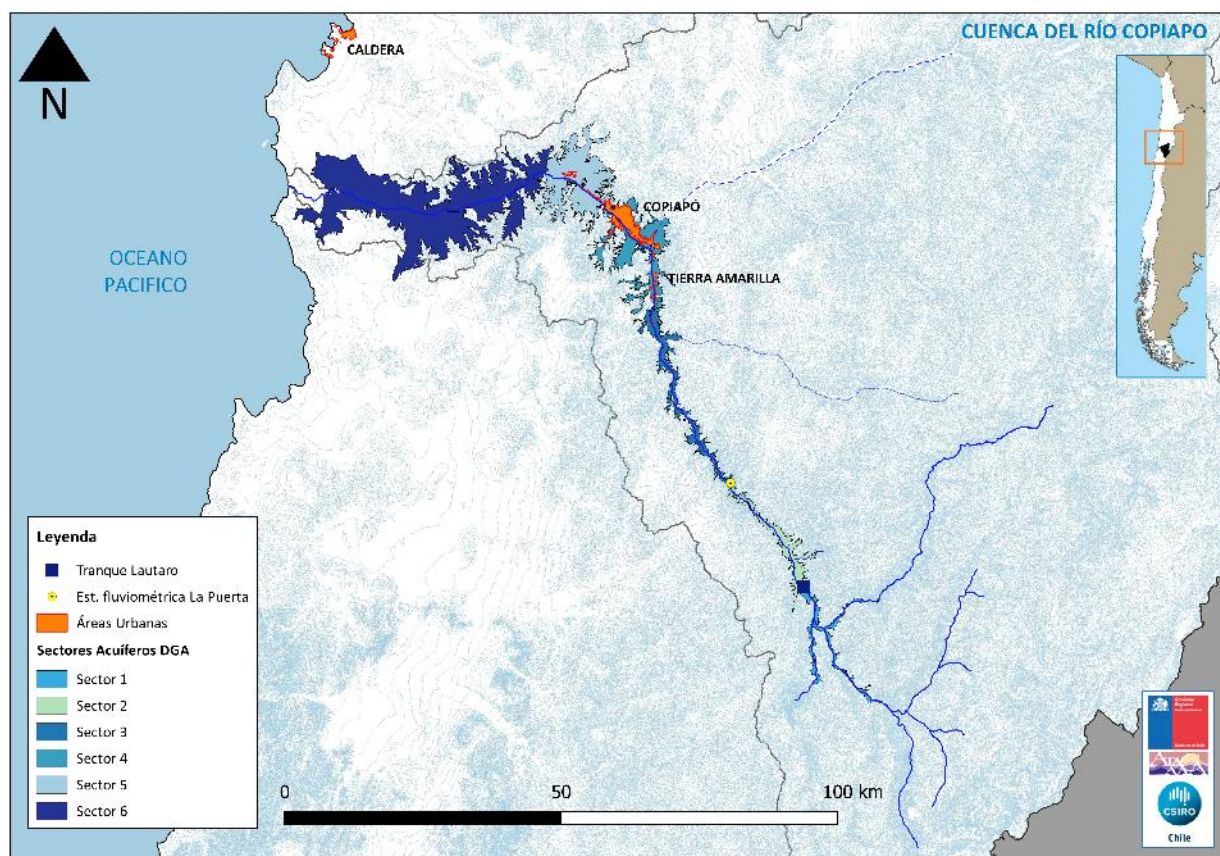


Figura 1 Ubicación de la cuenca del río Copiapó

2.3 Marco legislativo

La regulación del uso del agua en Chile se basa en las reglas del libre mercado. El cuerpo legal que rige el uso del agua es el Código del Agua de 1981, y está enmarcado en la implementación de políticas neoliberales enfocadas en el desarrollo económico (Larrain, 2006). El Código de Aguas de 1981 establece la propiedad de los derechos de aprovechamiento de agua (DAA) que se entienden como bienes comerciables transables entre diferentes usuarios (Bauer, 1998). Una vez que se han otorgado los DAA, éstos se rigen por la legislación de derecho civil privado (Vergara, 2018). Por lo tanto, las agencias gubernamentales son responsables de la regulación mientras que el sector privado está a cargo de la operación (Larrain, 2006). Bajo el alero del Código de Aguas de 1981, los usuarios del agua pueden crear organizaciones de usuarios para facilitar la toma de decisiones y resolver conflictos operativos entre sus usuarios (Bauer, 2004). Esta legislación fue planeada esencialmente para gestionar el uso de aguas superficiales, por lo tanto, minimizando el uso sostenible y la gestión de las aguas subterráneas (Vergara, 2018).

En el año 2005 se introdujo la primera reforma del Código de Aguas. Este conjunto de reformas apuntaba a regular el uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, y apuntalar las limitaciones económicas como la especulación de los precios de los DAA (Rinaudo & Donoso, 2017). Actualmente, una nueva reforma del Código de Agua está en discusión en el parlamento para definir las prioridades de uso del agua, y para revisar la forma de los derechos del agua, entre otras deficiencias.

2.4 Grupos de interés

2.4.1. Actores

Se han identificado más de 50 partes interesadas en la cuenca del río Copiapó (CSIRO Chile, 2015), que incluyen:

- **Sector Público:** corresponden a instituciones gubernamentales reguladoras (DGA, SISS, MMA, DOH, MINAGRI, etc.); agencias sectoriales (CNR, INDAP, CORFO, etc.); Municipios; organismos dependientes del Gobierno Regional (SEREMIs, DIPLADE, etc.); empresas estatales como ECONSSA, así como entidades público-privadas como CCIRA. Actualmente, se reconocen más de 40 instituciones gubernamentales que tienen algún tipo de responsabilidad y rendición de cuentas en términos de gestión del agua (Banco Mundial, 2013)
- **Sociedad Civil:** corresponden a comunidades indígenas urbanas y rurales (Coya y Diaguita, principalmente); grupos de la sociedad civil como asociaciones de consumidores, movimientos socio-ambientales, organizaciones territoriales y funcionales. Dentro de la sociedad civil se contabilizan también la participación de Universidades (UDA, UCH, PUC, etc.), ONGs, así como actores del ámbito científico. Otras organizaciones de la sociedad civil a considerar también son las Organizaciones de Agua Potable Rural (APR).
- **Sector Privado:** corresponden a los principales actores como la agroindustria (uva de mesa y olivos principalmente); la empresa sanitaria "Aguas Chañar"; empresas mineras (con los proyectos de "Candelaria" y "Caserones" dentro de los más relevantes en la cuenca del río Copiapó) e industrias. El sector privado cuenta además con representación en las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUAs) (Junta de Vigilancia del río Copiapó, Asociaciones de Canalistas y Comunidades de Aguas Subterráneas), así como en asociaciones gremiales como APECO, CORPROA, CORESEMIN, Cámara de Comercio, etc.
- **Medios de comunicación:** los principales medios de comunicación locales son el Diario Atacama, Diario Chañarillo, las radios (Nostálgica, Madero, UDA) y un creciente número de medios digitales (Atacama Viva, Tierra Culta, Letra Brava).

2.4.2. Gobernanza

Existen antecedentes históricos en la cuenca del río Copiapó que datan desde la fundación de los primeros asentamientos españoles en el territorio y que relatan ya las complejidades e intentos de administrar el agua en el contexto desértico de la zona (Berríos & Lucero, 2010).

La historia reciente de los procesos de gobernanza hídrica en la cuenca, enmarcado en el concepto de GIRH, se inicia en la cuenca del río Copiapó con lo que se denominaron las Mesas del Agua desarrolladas entre los años 2006 y 2010. Los objetivos de las Mesas del Agua estaban enmarcados en el proceso de la Estrategia Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (Dourojeanni & Chevaleraud, 2009). Si bien existe entre los actores una valoración de este proceso, la ausencia de resultados concretos en materia de gestión hídrica ha generado a la fecha una merma en la validación local de este trabajo y una fatiga de los procesos de participación en torno a la gestión del agua. Durante el período 2010-2014, no existió un trabajo regular ni formal de gobernanza

hídrica en la CRC, salvo para proyectos específicos como el Proyecto COROADO¹ que buscó a través de procesos de participación con actores en la cuenca, desarrollar un modelo de toma de decisiones para reutilizar y reciclar agua.

La referencia más reciente en cuanto a la gobernanza para la GIRH es la conformación del Comité Asesor Regional de Recursos Hídricos (CARRH) el cuál operó formalmente para el período 2014-2018 (Tabla 3). El CARRH tuvo como objetivo inicial liderar un proceso participativo relacionado con las modificaciones al Código de Aguas que se plantearon en el período, tomando Copiapó como una de las tres cuencas pilotos para su implementación. Los objetivos del CARRH, dada la complejidad de asociarlo a un proceso de modificación legal complejo y del cual se carecía de definiciones sustantivas, fueron reemplazados por agendas particulares asociadas a proyectos específicos como el “Programa Estratégico Regional (PER) de Cuencas Sustentables” (financiado por CORFO). El foco del PER fue la eficiencia hídrica, siendo uno de los proyectos que se mantuvo sesionando regularmente en los años siguientes al CARRH. Los focos del CARRH y las mesas sucesivas de trabajo en los proyectos se han ido ampliando con la entrada de nuevos actores interesados en el tema hídrico, donde hoy por ejemplo la mantención de un caudal ecológico o la calidad-costeo del agua potable son temáticas de relevancia en la discusión.

Algunos de los elementos claves expuestos a través de las sesiones del CARRH (CCIRA, 2014) han sido la búsqueda de la validación funcional del CARRH y su “consolidación como una red de cooperación y generador de capital social que permita toma de decisiones y que valide frente al resto de la comunidad que representa”, y la necesidad de “romper la desconfianza general instalada entre los actores presentes en el territorio, para que puedan utilizar este nuevo organismo (CARRH) como espacio para plantear, colaborativamente, propuestas concretas a incorporar en el plan de gestión hídrica de la Región de Atacama”. Claramente, estos elementos muestran la relevancia que posee la creación de confianzas y espacios donde discutir abiertamente distintas estrategias para enfrentar la permanente crisis hídrica instalada en la cuenca del Río Copiapó.

El CARRH es una organización de participación voluntaria, no vinculante en sus decisiones, promovida por el Gobierno Regional, con representación de 3 sectores: privado, público y de la sociedad civil, en igual número (6 por sector) y elegidos dentro de cada sector en las primeras sesiones de conformación de la instancia (CCIRA, 2014). En la Tabla 3, se muestran los actores que originalmente formaron parte del Directorio del CARRH. Es importante destacar que, dado a que el CARRH es una entidad Regional, existen algunas instituciones que no fueron consideradas por no pertenecer a la cuenca del río Copiapó, por ejemplo, la Junta de Vigilancia río Huasco o la Comisión de Defensa del Agua de Diego de Almagro.

Tabla 3 Miembros del CARRH

Grupo de interés	Subsector
Sector Privado	
APECO	Agricultura
Aguas Chañar	Sanitaria

¹ El proyecto “Tecnologías para el reciclaje y reutilización del agua en el contexto de América Latina: Evaluación, herramientas de decisión y estrategias a implementar frente a un futuro incierto” fue financiado por la UE e implementado en el período 2011-2014 a través de un consorcio académico el cual contó como asociado en el proyecto en Chile (Copiapó) con la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Caserones	Minería
CASUB	
Junta de Vigilancia Río Copiapó	Organizaciones de Usuarios
Junta de Vigilancia Río Huasco	
Sector Público	
Intendente	
SEREMI Obras Públicas	
SEREMI Minería	Autoridades Gubernamentales
SEREMI Medio Ambiente	
SEREMI Agricultura	
SEREMI de Economía	
Sector Sociedad Civil	
Universidad de Chile	Academia
Unión Comunal J.V Copiapó	Organizaciones sociales y de Usuarios
Consejo Comunal Diaguita	Pueblos Originarios
Consejo del Pueblo Colla	
ONG Independiente	ONG
Comisión de Defensa del Agua de Diego de Almagro	Movimientos Ciudadanos

2.5 Uso del agua y sobreexplotación

La agricultura es la actividad que consume la mayor proporción de agua superficial disponible en la región. Durante la temporada de no riego (abril-octubre), el agua superficial se almacena en el Embalse Lautaro (26 millones de m³) ubicado aguas abajo de la confluencia de los afluentes de la cuenca (MOP, 2018). Alrededor del 80% del agua subterránea se utiliza con fines agrícolas, mientras que el resto se distribuye casi por igual entre la minería y el consumo humano (Figura 2). El 88% de los cultivos usan riego tecnificado, mayormente, riego por goteo (Partarrieu, et al., 2009).

El consumo de agua depende en gran medida de los recursos de agua subterránea disponibles con una demanda estimada de 6 KL/s, casi el doble de las tasas de recarga estimadas (DGA-DICTUC, 2010). Si bien el acuífero de Copiapó se puede considerar como una sola unidad física que muestra diferentes grados de interconexión longitudinal (Bitran, et al., 2014), se subdivide en 6 sectores para fines administrativos (Figura 1).

Bauer (2015) sugiere que la sobreexplotación de los recursos hídricos en el acuífero de Copiapó se ha debido a la sobreasignación de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Esto se originó a partir de la década de 1980 con las políticas económicas gubernamentales de la fruta para la exportación, acompañado por el boom minero de la década de 1990, lo que provocó un aumento de la población urbana de Copiapó y un crecimiento explosivo de la construcción de pozos (Rinaudo & Donoso, 2017). Actualmente, el acuífero ha sido declarado "área de restricción" desde 1993 y no se pueden otorgar nuevos derechos de agua. En la actualidad, se han otorgado 21,63 KL/s derechos de agua y la demanda excede la oferta de agua en un 62% (DGA, 2016; FCH, 2018).

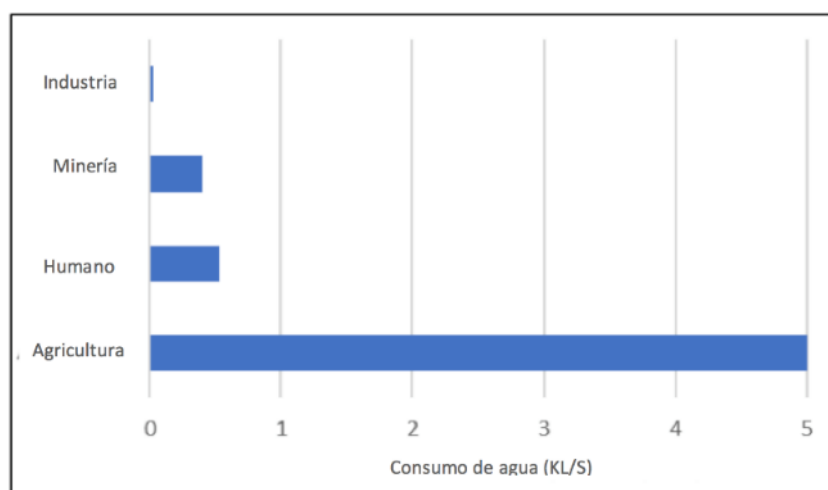


Figura 2 Consumo de agua subterránea en la cuenca del río Copiapó (DGA-DICTUC, 2010)

Algunos autores argumentan que la sobreasignación de derechos de agua se debió a: a) fallas en la implementación de instrumentos reguladores por parte de las agencias reguladoras y usuarios privados, b) la falta de adaptación cuando se detectaron problemas, c) la forma en que se definen los derechos de aguas subterráneas, y d) la imposibilidad de alcanzar consenso (Bitran, et al., 2014). Por ejemplo, la Dirección General de Aguas, en su rol responsable de otorgar los derechos de uso del agua, esperaba que solo el 20% de estos derechos otorgados serían usados efectivamente (Bitran, et al., 2014). En otras palabras, la asignación se basó en la subutilización por parte de los propietarios de los derechos de agua. Además, Rinaudo y Donoso (2017) identifican cinco factores que desencadenaron la sobreasignación de los derechos de agua en la cuenca:

- conocimiento limitado del agua subterránea;
- complejidad legal y presión política;
- derechos de agua mal definidos;
- problemas de cumplimiento y ejecución; e
- inconsistencia entre la gestión de agua superficial y subterránea.

En cuanto a la inconsistencia entre la gestión de aguas superficiales y subterráneas, un claro ejemplo es que el gobierno ha promovido y financiado proyectos de revestimiento de canales y sistemas de riego más eficientes, sin medir las consecuencias que la implementación de estos proyectos tienen sobre el acuífero. Como resultado, la superficie cultivada ha aumentado gradualmente con el tiempo debido al aumento de la eficiencia. Sin bien, este aumento en la superficie cultivada podría generar aumentos en las tasas de recarga, esto no ha sido observado. Específicamente, la superficie de riego aumentó de 3.400 hectáreas en 1960 a 7.000 hectáreas en 1990 y 15.000 hectáreas en 2015 (Rinaudo & Donoso, 2017). Esta incoherencia también fue observada por el Banco Mundial (2011), que señala que las aguas subterráneas y superficiales se manejan de forma independiente a pesar de que su conexión está reconocida en la legislación chilena, destacando la necesidad de implementar una perspectiva de GIRH en la planificación de cuencas, no solo para la cuenca del río Copiapó, sino también en el resto del país.

2.6 Gestión del agua y desafíos

2.6.1 Desafíos económicos

El mercado del agua ha sido activo y parcialmente eficiente en la cuenca del río Copiapó. La operación del mercado ha revelado imperfecciones debido a la falta de transparencia, lo cual se ha traducido en cierta especulación (Bitran, et al., 2014). Los retrasos en el proceso de transacción, sin embargo, han motivado a las compañías mineras a desalinizar y bombear agua de mar en lugar de usar el mercado como elemento regulador del uso (Hearne, 2018).

Como resultado, la escasez y la competencia por los escasos recursos de agua han elevado el precio de ésta (Figura 3).

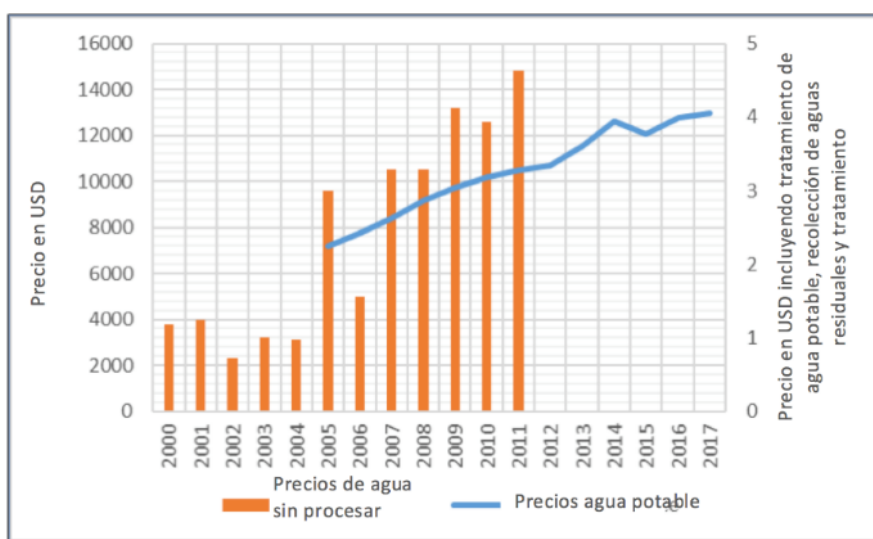


Figura 3 Precio del agua bruta y potable (Bitran, et al., 2014; SISS, s.f.)

Indudablemente, el principal efecto de la sobreexplotación del acuífero ha sido la continua disminución de los niveles de agua subterránea (Figura 4), el secado de pozos, el deterioro de la calidad del agua, y el aumento de los costos de bombeo (Bitran, et al., 2014). Por ejemplo, Aguas Chañar reubicó sus pozos de producción de agua potable al Sector 5, debido a las bajas tasas de extracción observadas en el Sector 4 (Rinaudo & Donoso, 2017). Sin embargo, la reubicación aguas abajo junto a una menor calidad del agua subterránea en ese sector han aumentado los costos de bombeo/tratamiento y tarifas de agua potable, contribuyendo a una disminución en la percepción de la calidad del servicio en la comunidad.

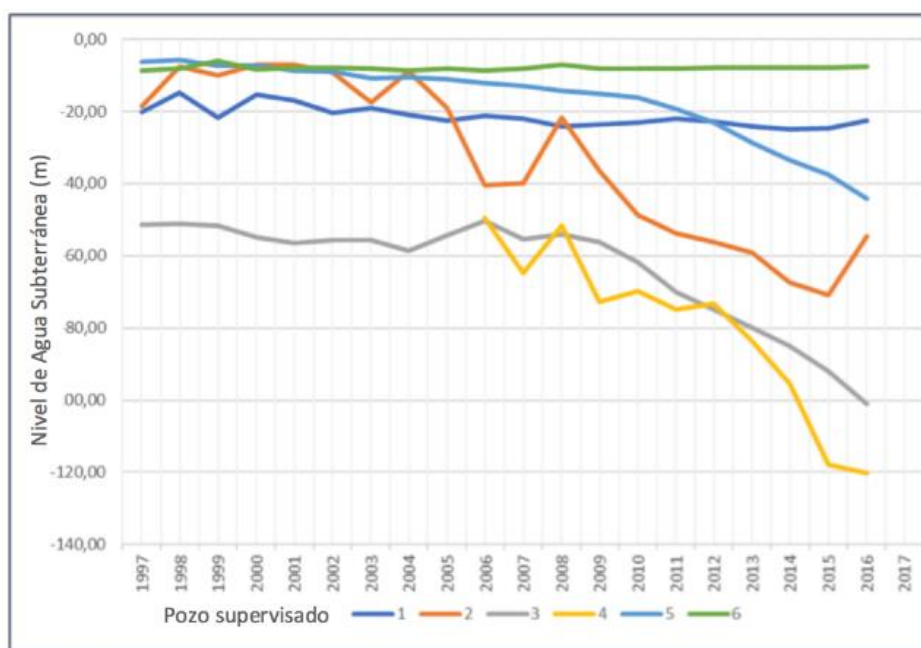


Figura 4 Niveles de aguas subterráneas promedio por sector acuífero (ver Figura 2) (DGA, 2018)

2.6.2 Desafíos sociales

Bajo este escenario, los sectores vulnerables en las áreas rurales han experimentado los impactos de la sobreexplotación del recurso hídrico. Por ejemplo, los niveles de agua subterránea en el único pozo que abasteció al pueblo rural de Nantoco, con una población de 285 habitantes, han disminuido de tal manera que el pozo se ha secado y actualmente la población es abastecida por camiones aljibe (DOH, 2018). Hasta la fecha, no hay planes para rehabilitar el servicio de agua potable rural en esa localidad.

La escasez y la competencia por el agua han generado conflictos entre los agricultores en las cuencas de cabecera y aquellos en los sectores bajos de la cuenca de Copiapó. Además, el aumento en los costos de bombeo también ha afectado a la producción agrícola, particularmente en los pequeños agricultores, quienes tienden a culpar a la minería y a la agricultura de exportación como la causa de la sobreexplotación (Zamorano, 2014; INDH, 2015).

El retorno del escurrimiento superficial en el río de Copiapó en la ciudad de Copiapó desde los aluviones del 2015 transformó el paisaje urbano que había dominado los últimos años. A esto se han sumado proyectos de renovación urbana como el Parque Kaukari. Esta nueva realidad ha generado un interés ciudadano sobre el tema del caudal del río Copiapó. Esto último se ha traducido en movimientos socioambientales y ciudadanos que hoy ven como un tema fundamental en términos de mejoras a los estándares de calidad de vida mantener este caudal superficial. Este desafío ha sido plasmado en el levantamiento de estrategias e indicadores de impacto en este proyecto por parte de los actores.

2.6.3 Desafíos ambientales

Los problemas ambientales relacionados con las actividades mineras en el norte de Chile, como la contaminación del aire y el manejo inadecuado de tranques de relaves que potencialmente contaminan el agua superficial, el agua subterránea y los ambientes marinos (Cienfuegos, et al.,

2015), son percibidos como factores contribuyentes que impactan negativamente a los usuarios del agua y a los habitantes de la región (INDH, 2015).

Con respecto a los desastres naturales, la cuenca se ha visto afectado por sequías y eventos extremos de inundación repentina en los últimos años. Por ejemplo, la baja precipitación a gran altura provocó el vaciado total del Embalse Lautaro en 2007 (Bitran, et al., 2014), mientras que en marzo de 2015 las inundaciones repentinas dejaron 35.000 habitantes afectados y más de 30 víctimas fatales (Izquierdo, et al., 2016).

En términos de los desafíos asociados al cambio climático, es posible esperar un aumento de 2°C en la ciudad de Copiapó y una disminución de la precipitación cercana al 10% en la parte superior de la cuenca para 2070 (AGRIMED, 2017). Estos desafíos contribuirán a aumentar la presión sobre los limitados recursos hídricos disponibles en la actualidad.

2.6.4 Desafíos para la colaboración

Como resultado de numerosas entrevistas con actores clave de la cuenca durante el proyecto, se identificó una serie de barreras para una gestión colaborativa de recursos hídricos en la cuenca (Galvez, et al., 2019). Siguiendo la metodología de Ansell y Gash (2008), estas barreras fueron agrupadas en 3 aspectos principales: i) barreras a las condiciones iniciales para la colaboración; ii) barreras al liderazgo facilitador; y iii) barreras al diseño institucional.

- i) Barreras a las condiciones iniciales
 - a. Desbalances de poder, conocimiento y recursos
 - Propietarios vs no propietarios de DAA
 - Alta capacidad organizativa de algunos grupos
 - Bajo conocimiento técnico de grupos minoritarios
 - Desbalance recursos financieros (grupos comunitarios vs mineras)
- ii) Barreras al liderazgo facilitador
 - a. Falta de visión compartida
 - b. Falta de liderazgo y voluntad política
- iii) Barreras al diseño institucional
 - a. Fragmentación institucional
 - b. Centralización de toma de decisiones

En paralelo a este proyecto, los autores generaron un artículo en inglés que fue publicado en el *International Journal of River Basin Management* en julio de 2019 (*Collaborate or perish: water resources management under contentious water use in a semiarid basin*). Este artículo resume el proceso de entrevistas con los actores clave y los resultados completos levantados.

2.7 Necesidad de un enfoque integrado

A pesar de la existencia del CARRH, en la actualidad no existe una autoridad legal responsable de la acción coordinada entre las partes interesadas o encargada de promover los intereses comunes en la cuenca. En los últimos años, diversos investigadores han solicitado la creación e implementación de "Autoridades de Cuenca" como formas administrativas para enfrentar los desafíos relacionados

con el agua (Dourojeanni & Chevaleraud, 2009; Fuster, et al., 2009). Numerosos intentos por establecer comités de agua, mesas redondas, mesas regionales, entre otros, en la cuenca han sido infructuosos y no han logrado resultados permanentes.

Para resolver los desafíos actuales relacionados con la gestión del agua en la cuenca del río Copiapó, se considera necesario la implementación de un enfoque integrado de gestión hídrica. También parece razonable asumir que las condiciones adecuadas y necesarias para implementar dicho enfoque integrado (por ejemplo, GIRH) requieren de recursos financieros, voluntad y tiempo para ser llevadas a cabo. En consecuencia, la colaboración efectiva entre los actores clave de la cuenca parece ser una condición indispensable para respaldar cualquier esfuerzo significativo para implementar una GIRH en la cuenca, y para abordar los desafíos actuales y futuros relacionados con el agua.

En base a entrevistas con los actores, se reconoce la necesidad de abordar la problemática del agua, y que esta requiere un trabajo integrado dada la complejidad de abordar este desafío de manera individual. También se ha valorado, a pesar de la falta de resultados en instancias anteriores, una valoración del proceso y el interés de los actores a lo largo del tiempo. En general, se han observado tres facilitadores a la gobernanza colaborativa del agua en la cuenca del río Copiapó: i) conciencia de los actores sobre la problemática de los recursos hídricos; ii) interdependencia y conectividad de los actores; y iii) historia preliminar de cooperación (Galvez, et al., 2019).

3 Metodología

3.1 Desarrollo del modelo conceptual de SimCopiapó

El modelo conceptual del proyecto SimCopiapó abarca dos componentes. Primero, una componente relacionada al proceso participativo; y segundo, una componente relacionada al desarrollo de la herramienta computacional SimCopiapó. La Figura 5 muestra un esquema del modelo conceptual implementado para el desarrollo de este proyecto de investigación.

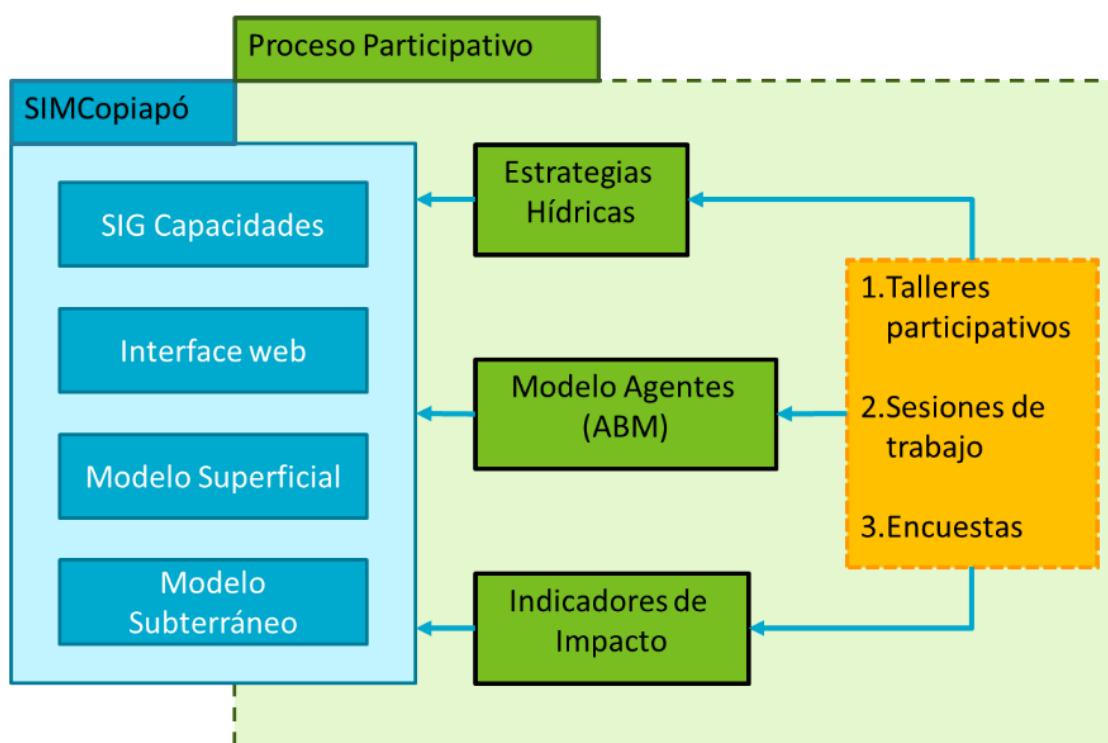


Figura 5 Modelo conceptual de la implementación del proyecto de investigación

A través del proyecto se realizaron distintas instancias de participación donde los diferentes actores de la cuenca del río Copiapó tuvieron la oportunidad de ser parte activa del desarrollo de la herramienta SimCopiapó. Se realizaron talleres participativos cuya finalidad fue la de recoger información, conocimiento local, y socializar las actividades realizadas por el equipo del proyecto, y presentar resultados parciales obtenidos a ese momento. Estas instancias a su vez sirvieron de plataforma catalizadora para la interacción entre los actores clave de la cuenca, donde se manifestaron las inquietudes y problemáticas atinentes a la realidad de la cuenca. En paralelo se efectuaron sesiones de trabajo con subgrupos de actores clave (focus group) donde se levantó información sobre potenciales estrategias hídricas. Finalmente, con la finalidad de parametrizar el modelo basado en agentes (Agent-Based Model) se efectuaron encuestas enfocadas en recoger información sobre la predisposición de los usuarios de agua a cumplir con la normativa vigente. Estas encuestas se efectuaron sobre la base de una metodología aplicada en casos de estudio en

Australia, India, Pakistán y Estados Unidos analizados por investigadores participando en este proyecto (Castilla-Rho, et al., 2017).

La información recopilada mediante el proceso participativo permitió alimentar las estrategias hídricas, el modelo basado en agentes utilizado en la estrategia hídrica “prorrata de aguas subterráneas” (ver Sección 3.4), y la definición de indicadores de impacto relevantes para los actores clave de la cuenca.

La segunda componente del modelo conceptual del proyecto corresponde al desarrollo de la herramienta computacional SimCopiapó. A modo general, esta herramienta se compone de: una interfaz web que posee capacidades de despliegue similares a un Sistema de Información Geográfico (SIG), y los motores de simulación reflejados en un modelo de aguas superficiales y un modelo de aguas subterráneas completamente acoplados en tiempo y espacio.

En las siguientes secciones cada uno de estos componentes se describe en detalle.

3.2 Proceso participativo

El proceso participativo fue un elemento integral del proyecto, lo cual fue implementado a través de diversos mecanismos: talleres participativos, sesiones de trabajo, encuestas y entrevistas. El proceso tuvo por objetivo principal involucrar a los actores en la co-construcción de SimCopiapó en tres niveles: formulación en conjunto de estrategias de gestión hídrica para la cuenca, la parametrización del modelo basado en agentes (ABM) y el levantamiento de indicadores de impacto relevantes a los usuarios. A su vez, el proceso participativo continuo permitió que los alcances del proyecto respondan a las necesidades de la cuenca y sus usuarios, y promueve que los resultados generados por el proyecto se validen y sean sustentables en el futuro, más allá del término del proyecto.

El proyecto logró incrementar de manera importante tanto la cantidad de actores como la cantidad de instituciones involucradas a la gestión hídrica de la cuenca del río Copiapó. El Proyecto contempló como base, los actores del CARRH², además de algunos actores adicionales relevantes a la gestión hídrica en la cuenca, los que generaron un listado inicial de 22 instituciones; 7 del sector privado, 10 del sector público y 5 de la Sociedad Civil (ver Anexo B.2). Durante el curso del proyecto se sumaron otros participantes sugeridos dentro de las sesiones de trabajo por los mismos actores, finalizando con un total de 62 actores de 31 instituciones involucradas a lo largo del proceso de trabajo. Adicionalmente, para parametrizar el ABM a la realidad de la cuenca, se aplicó una encuesta a dos grupos de actores: i) los miembros del CARRH (19 participantes), y ii) los socios de La Asociación de Productores y Exportadores Agrícolas del Valle de Copiapó (APECO) (25 participantes) con una representatividad territorial de los distintos sectores hidrológicos de la cuenca.

Para el desarrollo de SimCopiapó se realizaron cuatro talleres con participación de todos los actores; y 5 sesiones de trabajo con grupos de 4 a 6 actores para el levantamiento y priorización de las estrategias. Posterior al desarrollo de cada sesión de trabajo se enviaron minutas a todos los participantes, donde se resumieron los principales acuerdos y observaciones. Adicionalmente para

² Originalmente 18 instituciones

fortalecer la discusión y el levantamiento de información, se utilizaron encuestas, se desarrolló material de avance y síntesis de resultados intermedios. En la Tabla 4 se resume las sesiones participativas realizadas durante el proyecto.

Tabla 4 Sesiones y actividades participativas realizadas durante el proyecto SimCopiapó

Fecha	Sesión participativa	Descripción
10 enero 2018	Taller 1	Lanzamiento del proyecto
29 enero 2018 (am)	Sesión grupal	Grupos de 4-6 personas para levantar potenciales estrategias hídricas y entender roles de actores involucrados.
29 enero 2018 (pm)	Sesión grupal	Grupos de 4-6 personas para levantar potenciales estrategias hídricas y entender roles de actores involucrados.
30 enero 2018	Sesión grupal	Grupos de 4-6 personas para levantar potenciales estrategias hídricas y entender roles de actores involucrados.
11 abril 2018 (am)	Sesión grupal	Grupos de 3-6 personas para revisar y validar estrategias hídricas propuestas.
11 abril 2018 (pm)	Sesión grupal	Grupos de 3-6 personas para revisar y validar estrategias hídricas propuestas.
6 junio 2018	Taller 2	Presentación de estrategias hídricas levantadas.
9 enero 2019	Taller 3	Resultados de encuestas y Modelo Basado en Agentes (ABM).
29 junio 2019	Taller 4	Presentación de SimCopiapó. Ejercicio de modelación participativo. Revisión y análisis de resultados.

Finalmente, el resumen de instituciones representadas en cada una de las jornadas antes descritas, junto con el número total de asistentes se presenta en la Figura 6. En los Anexos B.3 y B.4 se encuentran las listas de asistencia y fotos de los cuatro talleres y los links a artículos de prensa difundiendo los talleres y el proyecto.

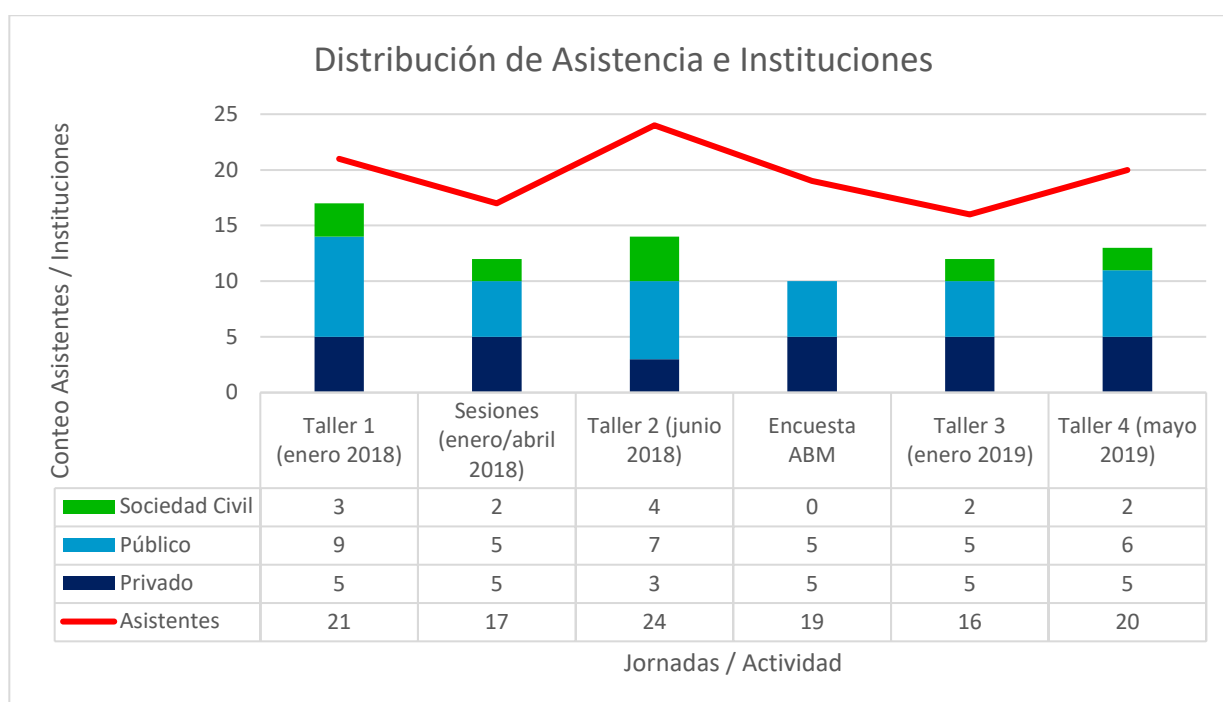


Figura 6 Distribución de asistencia e instituciones representadas por actividad de SimCopiapó

3.3 Modelos hidrológicos

3.3.1 Revisión y selección de los modelos hidrológicos

La cuenca del río Copiapó ha sido estudiada intensivamente durante las últimas décadas. Diferentes estudios han desarrollado herramientas de modelación para la evaluación de los recursos hídricos disponibles en esta cuenca. El alcance de este proyecto es utilizar herramientas disponibles y que hayan sido calibradas y validadas en estudios anteriores. Con esto en mente, en el contexto de este proyecto no se han desarrollado nuevas herramientas de modelación. Sin embargo, aquellas herramientas existentes han sido mejoradas en numerosos aspectos los cuales son documentados en las siguientes secciones.

DGA-Álamos y Peralta (1987) desarrolla los primeros modelos de aguas superficiales y subterráneas para el valle de Copiapó. El modelo superficial se basa en la aplicación de la ecuación de continuidad en un grupo de nodos, los cuales están conectados mediante tramos de río. El valle se subdividió en 8 sectores de riego (demanda) desde aguas arriba del Embalse Lautaro hasta la desembocadura del río Copiapó. El modelo fue calibrado para el período 1962-1986 concentrándose principalmente en el ajuste de las infiltraciones y recuperaciones de los tramos de río. El modelo de aguas subterráneas presenta la primera sectorización documentada del acuífero. Este estudio presenta un modelo mono-capa de diferencias finitas para cada uno de los siguientes seis sectores acuíferos: S01 (Aguas Arriba Embalse Lautaro), S02 (Embalse Lautaro-La Puerta), S03 (La Puerta –Mal Paso), S04 (Mal Paso-Copiapó), S05 (Copiapó-Piedra Colgada), y S06 (Piedra Colgada-Desembocadura). Ambos modelos (Subterráneo y Superficial) operan a escala anual para el período de análisis 1962-1987. A febrero del año 1987 la explotación de aguas subterráneas era de aproximadamente 1.460 l/s (60% riego, 25% agua potable, 15% industria/minería), con 291 pozos catastrados como activos y una superficie bajo regadío cercana a 7.900 ha. Este estudio considera un escenario de explotación

donde las demandas aumentan debido al incremento de la superficie de riego a 13.117 ha, concentrándose aguas abajo de la ciudad de Copiapó. En general este estudio concluye que existe una fuerte dependencia del sistema de aguas subterráneas sobre las recargas superficiales mediante pérdidas de los tramos de río y el sistema de riego. A su vez, este estudio concluye que con un apropiado manejo el sistema soporta el aumento de la superficie de riego a un horizonte de 50 años aún bajo condiciones hidrológicas adversas (sequías).

La Dirección General de Aguas el año 2003 (DGA, 2003) actualiza la modelación del acuífero del valle de Copiapó sobre la base de los nuevos antecedentes recopilados en el estudio de DGA-Álamos y Peralta (1995) y el estudio hidrogeológico de Aguirre et al. (1999). Este último estudio recopiló información detallada sobre la geofísica e hidrogeoquímica del sistema de aguas subterráneas lo cual permitió actualizar el modelo conceptual desarrollado por DGA-Álamos y Peralta (1987). Sobre esta base, DGA (2003) propuso dos modelos mono-capa: a) sector Embalse Lautaro-Copiapó, y b) Copiapó- Angostura, desarrollados en el paquete computacional MODFLOW (Harbaugh & McDonald, 1996). El sistema superficial se consideró en gran parte sobre la conceptualización de DGA-Álamos y Peralta (1995) pero actualizado al año 2002. Por ejemplo, al año 2002 se catastraron 397 pozos activos, representando una extracción de 10.461 l/s (68% riego, 16% agua potable, 13% minero/industrial), y una superficie de riego permanente de 6.820 ha (potencialmente 7.930 ha). El modelo de aguas superficiales se basa en el modelo de DGA-Álamos y Peralta (1987) actualizado con la información base de DGA-Álamos y Peralta (1995).

Golder (2006) realiza una actualización de los componentes del balance hídrico donde destacan las estimaciones de las pérdidas por infiltración desde el embalse Lautaro (aproximadamente 954 l/s) y la definición de caudales sustentables para cada sector hidrogeológico. La superficie de riego al año 2005 es igual a 9.299 ha, con un 83% de esta superficie siendo vides, y una demanda de aproximadamente 2.267 l/s (71,5 Mm³/año). La demanda total de agua subterránea ha sido estimada en 140 Mm³/año (4.440 l/s caudal continuo). Si bien este estudio no presenta un modelo de simulación hidrogeológico, discute la actualización de los componentes del modelo conceptual del sistema hídrico en el valle del río Copiapó.

DGA-DICTUC (2010) presenta la modelación del valle del río Copiapó mediante el acoplado (off-line) del modelo AQUATOOL (superficial) (Andreu et al., 1996) y el modelo MODFLOW (subterráneo). Este estudio se considera la representación más actualizada del funcionamiento del sistema hídrico y su modelo conceptual se presenta en la Figura 7. Los elementos incluidos en esta conceptualización corresponden a:

- Caudales aportantes desde cuencas de cabecera y laterales
- Cauces naturales y canales
- Embalse Lautaro
- Zonas de demanda agrícola, minera y de agua potable
- Sectores acuíferos

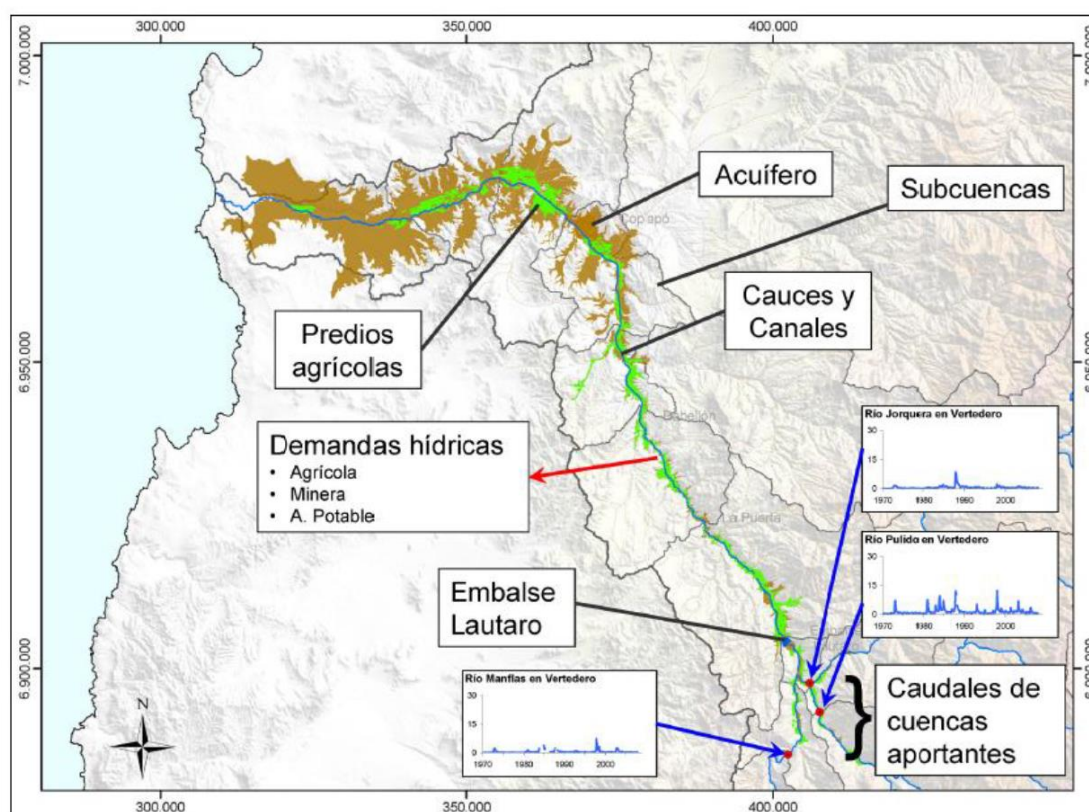


Figura 7 Modelo conceptual del funcionamiento del sistema hídrico del río Copiapó desarrollado por DGA-DICTUC (2010) como base para el modelo AQUATOOL

La Tabla 5 muestra los elementos incluidos en el modelo AQUATOOL desarrollado por DGA-DICTUC (2010):

Tabla 5 Elementos de diseño para el modelo conceptual implementado en AQUATOOL para la cuenca de Copiapó

Elemento	Tipo	Número elementos
Nodos	Puntos que requieren balances de agua	87
Aportes	Laterales o de cabecera	35
Conducciones	Tipo 1 – transferencia de agua entre elementos	5
	Tipo 2 – contemplan pérdidas por filtración en el cauce	63
	Tipo 3 – contemplan conexión hidráulica entre río-acuífero	11
Embalses	Lautaro	1
Retornos	Reintegración de aguas superficiales excedentes	1
Zonas de demanda	Riego	20
	Agua Potable	5
	Minería	5
	Industria	2
Acuíferos	Sobre la base de la sectorización original (6 sectores)	11

La correspondencia entre los sectores acuíferos definidos por la Dirección General de Aguas, sobre la base de DGA-Álamos y Peralta (1987), y la sectorización implementada en AQUATOOL se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Correspondencia entre sectores acuíferos DGA y sectores acuíferos modelo AQUATOOL (DGA-DICTUC, 2010)

Sector Acuífero DGA	Sector AQUATOOL	Nombre sector
1	1a	Río Manflas – Junta
	1b	Río Pulido
	1c	Río Jorquera
	1d	Junta – Embalse Lautaro
2	2a	Embalse Lautaro – La Puerta
3	3a	La Puerta – Pabellón
	3b	Pabellón – Mal Paso
4	4a	Mal Paso – Copiapó
5	5a	Copiapó – Piedra Colgada
6	6a	Piedra Colgada – Valle Fértil
	6b	Valle Fértil – Angostura

La Figura 8 y la Tabla 7 resumen los 20 sectores de riego representados en el modelo conceptual del sistema hídrico del río Copiapó. La superficie de riego indicada en este estudio alcanza las 12.494 ha, con parronales (71%), olivos (10%) y hortalizas (10%) cubriendo el 91% de la superficie regada. Es importante considerar que las zonas de riego consideradas posteriormente en la herramienta SimCopiapó corresponden a la totalidad desde aguas abajo del embalse Lautaro (10.908 ha), es decir descontando los sectores R1a-01, R1b-02, R1c-03 y R1d-04 en la Tabla 7.

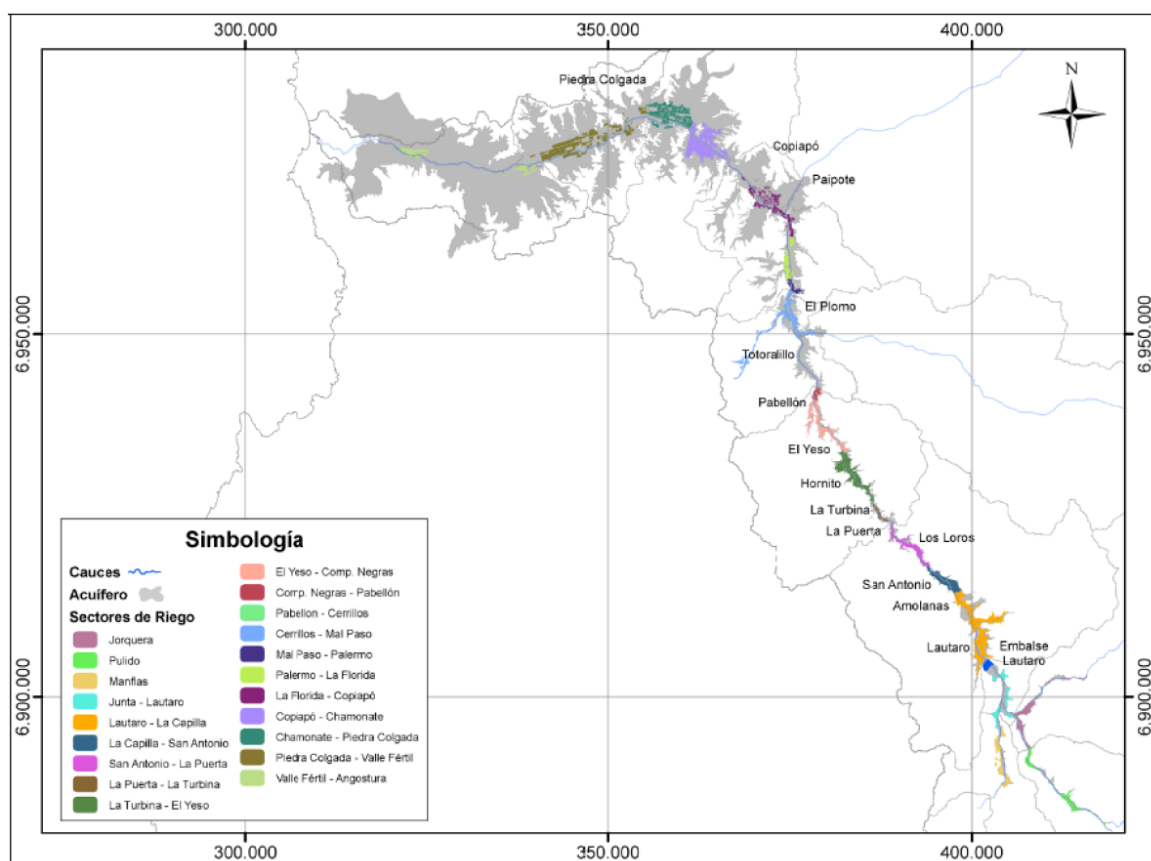


Figura 8 Sectores de riego considerados en el modelo AQUATOOL (DGA-DICTUC, 2010)

Tabla 7 Sectores de riego en el valle de Copiapó implementados en el modelo AQUATOOL

Código Modelo	Sector de riego	Área regada (ha)
R1a-01	Manflas	421
R1b-02	Pulido	344
R1c-03	Jorquera	404
R1d-04	Junta – Embalse Lautaro	417
R2a-05	Embalse Lautaro – La Capilla	1.449
R2a-06	La Capilla – San Antonio	453
R2a-07	San Antonio – La Puerta	415
R3a-08	La Puerta – La Turbina	73
R3a-09	La Turbina – El Yeso	711
R3a-10	El Yeso – Compuertas Negras	616
R3a-11	Compuertas Negras – Pabellón	95
R3b-12	Pabellón – Cerrillos	759
R3b-13	Cerrillos – Mal Paso	943
R4a-14	Mal Paso – Palermo	130
R4a-15	Palermo – La Florida	280
R4a-16	La Florida – Copiapó	709
R5a-17	Copiapó – Chamonate	1.383
R5a-18	Chamonate – Piedra Colgada	1.043
R6a-19	Piedra Colgada – Valle Fértil	1.393
R6a-20	Valle Fértil – Angostura	485
TOTAL		12.494

Al mismo tiempo, la Junta de Vigilancia del Río Copiapó (JVRC) administra las aguas superficiales para nueve (9) distritos listados a continuación:

1. Distrito 1: Sector Rodeo hasta Goyo Díaz
2. Distrito 2: Sector Goyo Díaz hasta San Antonio
3. Distrito 3: Sector San Antonio hasta La Puerta
4. Distrito 4: Sector La Puerta hasta Sector Pabellón
5. Distrito 5: Sector Pabellón hasta Sector Cerrillos
6. Distrito 6: Sector Cerrillos hasta Sector Nantoco
7. Distrito 7: Sector Nantoco hasta la Fundición Hernán Videla Lira
8. Distrito 8: Fundición Hernán Videla Lira hasta la Ciudad de Copiapó
9. Distrito 9: Ciudad de Copiapó hasta Estación Fluviométrica de Copiapó

Finalmente, la relación entre los elementos descritos anteriormente (acuíferos DGA, subcuencas, sectores de riego, y distritos administrativos de la JVRC) se presenta en la Tabla 8. Esta tabla es la base para la implementación del modelo de simulación de aguas superficiales implementado en SimCopiapó y detallado en las próximas secciones.

Tabla 8 Relación elementos del modelo conceptual de la cuenca del río Copiapó, incluyendo los distritos de riego administrados por la JVRC (DGA-DICTUC, 2010)

Sector DGA	Acuífero	Cuenca	Sector Riego	Distrito
1	-	Manflas	-	-
	1a. Manflas	Intermedia Manflas-Junta	R1a-01. Manflas	-
	1b. Pulido	Pulido	R1b-02. Pulido	-
	1c. Jorquera	Jorquera	R1c-03. Jorquera	-
	1d. Junta-Lautaro	Intermedia Junta-Lautaro	R1d-04. Junta-Lautaro	1
2	2a. Lautaro-La Puerta	Intermedia Lautaro-La Puerta	R2a-05. Lautaro-La Capilla	1
			R2a-06. La Capilla-San Antonio	2
			R2a-07. San Antonio-La Puerta	3
3	3a. La Puerta-Pabellón	Intermedia La Puerta-Pabellón	R3a-08. La Puerta-La Turbina	3
			R3a-09. La Turbina-El Yeso	4
			R3a-10 El Yeso-Comp. Negras	4
			R3a-11. Pabellón	5
	3b. Pabellón-Mal Paso	Intermedia Pabellón-Mal Paso	R3b-12. Pabellón-Cerrillos	5
			R3b-13. Cerrillos-Mal Paso	6
			-	Lateral Quebrada Carrizalillo
4	4a. Mal Paso-Copiapó	Intermedia Mal Paso-Copiapó	R4a-14. Mal Paso-Palermo	6
			R4a-15. Palermo-La Florida	7
			R4a-16. La Florida-Copiapó	8, 9
	-	Lateral Quebrada Paipote	-	-
5	5a. Copiapó-Piedra Colgada	Intermedia Copiapó-Piedra Colgada	R5a-17. Copiapó-Chamonte	-
			R5a-18. Chamonte-Piedra Colgada	-
6	6a. Piedra Colgada-Valle Fértil	Intermedia Piedra Colgada-Valle Fértil	R6a-19. Piedra Colgada-Valle Fértil	-
	6b. Valle Fértil-Angostura	Intermedia Valle Fértil-Angostura	R6b-20. Valle Fértil-Angostura	-

El Sector 1 DGA (N01-N09: Aguas arriba Embalse Lautaro) corresponde a las cuencas de cabecera e intermedias aguas arriba del Embalse Lautaro. Posee una sección del Distrito 1 de riego entre La Junta y el Embalse Lautaro. En la conceptualización implementada en SimCopiapó el Sector aguas arriba del embalse Lautaro no ha sido incluido. El Sector 2 DGA (N09-N13: Lautaro – La Puerta) incluye el Sector R2a-05 (Distrito 1) con demandas de aguas subterránea y superficiales (Amolanas, Abello Norte y Abello Sur); el Sector R2a-06 (Distrito 2) con demanda superficial (La Capilla y El Carmen) y subterránea; el Sector R2a-07 (Distrito 3): con demanda subterránea y superficial (El Milagro y La Puerta). El Sector 3 DGA (N13-N19: La Puerta – Mal Paso): en este sector el río Copiapó es canalizado mediante el canal Mal Paso en Compuertas Negras y se encuentran los Distritos de Riego 3, 4, 5 y 6. La Quebrada Carrizalillo aporta aguas subterráneas al sector acuífero 3b: los sectores de riego R3a-08 (Canal La Turbina), R3a-09 (El Sauce, El Naranjo, El Carrizo, La Cantera y El Jardín), R3a-10 (Sin canales), R3a-11 (Compuertas Negras), R3a-12 (Compuertas Negras 1 y 2), R3a-13 (Canal Cerrillos, Nantoco y Urbina) se alimentan de un régimen combinado de aguas superficiales y aguas subterráneas. En el Sector 4 DGA (N19-N21: Mal Paso – Copiapó): R4a-14 (Las Arayas, San Ramos, Cancha Carrera), R4a-15 (Palermo, La Florida), existen numerosos canales secundarios que toman aguas desde el canal matriz Mal Paso. Al mismo tiempo, existen predios que sólo usan aguas subterráneas. Finalmente, Sector 5 (N21-N23: Copiapó – Piedra Colgada) y Sector 6 (N23-N26: Piedra Colgada – Angostura) han sido conceptualizados como usuarios de aguas subterráneas.

En términos de demandas/usos de aguas, la Tabla 9 muestra la sectorización de la demanda sobre la base de los derechos otorgados y los factores de uso obtenidos en DGA-DICTUC (2010). En general, las demandas de riego se distribuyen a lo largo de todo el valle (Sectores R1a-1 hasta R6b-20), las demandas mineras e industriales se concentran en los Sectores 1b, 2a, 3b, 4a y 5a, y las demandas de agua potable se concentran en los Sectores 2a, 4a, 5a y 6a. La demanda hídrica actual es de 6.027 l/s (84% riego, 9% agua potable, 7% minero/industrial).

Tabla 9 Localización de demandas y valores estimados sobre la base de los derechos otorgados y los correspondientes factores de uso

Sectores	Riego	Minero	Agua Potable	Industrial
1a	✓			
1b	✓	✓		
1c	✓			
1d	✓			
2a	✓	✓	✓	✓
3a	✓		✓	
3b	✓	✓		
4a	✓	✓	✓	
5a	✓	✓	✓	✓
6a	✓	✓	✓	
6b	✓			
Total (l/s)	5.071	398	525	33

El período de calibración para la herramienta de modelación integrada AQUATOOL-MODFLOW corresponde a 1971-2007. Este estudio considera la simulación de cinco (5) escenarios (línea base, reducción uniforme demanda hídrica, reducción sectorizada demanda hídrica, gestión de la

demanda hídrica con reducción uniforme, y gestión de la demanda hídrica con reducción sectorizada) a partir de la hidrología histórica proyectada en el futuro (2007-2044). Este estudio concluye que reducciones planificadas del orden del 30% de la demanda hídrica y el traslado de la explotación de aguas subterráneas desde el Sector 04 hacia los sectores acuíferos aguas abajo (Sector 05 y 06) son alternativas para alcanzar la sustentabilidad del acuífero del valle de Copiapó en el largo plazo.

SERNAGEOMIN (2012) desarrolló un modelo hidrogeológico sobre la base de la actualización de antecedentes geofísicos, hidroquímicos y de niveles de aguas subterráneas para el valle de Copiapó. Este estudio generó un modelo MODFLOW, comprendido por dos submodelos abarcando desde la cabecera hasta el sector La Puerta (Modelo Alto), y desde La Puerta hasta Angostura (Modelo Bajo). Los valores de recarga y descarga se obtuvieron de DGA-DICTUC (2010), y su calibración abarcó el período 1993-2006. Este estudio consideró el impacto sobre el balance hídrico y los niveles de aguas subterráneas de la puesta en marcha del proyecto minero Caserones, y la evaluación del impacto en el acuífero del cambio de fuente del agua potable, desde el acuífero hacia agua desalada.

Este modelo ha sido la principal herramienta considerada en la implementación de SimCopiapó, por representar el modelo más actualizado en términos de recolección de información sobre las propiedades físicas del acuífero del valle de Copiapó.

Finalmente, DGA-HIDROMAS (2013) implementó una serie de actualizaciones y correcciones al modelo integrado AQUATOOL desarrollado por DGA-DICTUC (2010) y al modelo hidrogeológico del acuífero desarrollado por SERNAGEOMIN (2012). En general, se realizaron dos grupos de correcciones:

1. Representación de la recarga por pérdidas del sistema de agua potable en AQUATOOL

- La recarga producto de las pérdidas del sistema de agua potable se aplica al sector acuífero 4, y representa un 30% del agua producida por los pozos de aguas chañar;
- Existe una recarga de agua proveniente de la Planta de tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) en el sector acuífero 5. Este volumen se ha estimado como sigue: el 60% del agua de pozos producida se destina a consumo en las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla, de este volumen se ha definido un factor de uso del 80% (agua servida tratada), la cual se infiltra mediante descarga al río Copiapó aguas abajo de la ciudad de Copiapó;
- A contar del año 2010, 175 l/s del agua servida tratada se recupera y se canaliza hacia minera Candelaria aguas arriba.

2. Topología sector alto (Embalse Lautaro y zona de recuperaciones) y sector bajo (Copiapó en Angostura)

- La topología definida en el estudio DGA-DICTUC (2010) se corrige para representar las recuperaciones en el sector acuífero 2;
- La topología en el estudio DGA-DICTUC (2010) se corrige para representar la estacionalidad del flujo base en la estación de Copiapó en Angostura.

Al mismo tiempo este estudio actualiza las demandas de riego hasta el año 2013 (Figura 9). En cuanto a las demandas de agua potable y para uso minero, este estudio incluye valores reales medidos y reportados por estos dos sectores durante el período 2007-2012 (Figura 10, Figura 11).

Este estudio ha analizado un período de simulación comprendido entre 2013-2053, para el cual se han desarrollado tres escenarios: a) plan de explotación de la empresa Aguas Chañar en los sectores acuíferos 5 y 6 y operación conjunta de la planta desalinizadora; b) efecto en el sector acuífero 5 de la venta de agua efluente de la PTAS a Minera Candelaria; y c) efecto del proyecto minero Caserones en el acuífero de Copiapó. Los resultados indican una situación deficitaria para el acuífero especialmente en los sectores 3, 4 y 5 bajo el escenario a). El escenario b) limita los impactos al sector acuífero 5 manifestándose como descensos en los niveles de aguas subterráneas de hasta 30 m en el acuífero. Finalmente, la operación de minera Caserones genera una disminución de la oferta hídrica superficial en La Puerta y una disminución en la recarga del orden de 220 l/s.

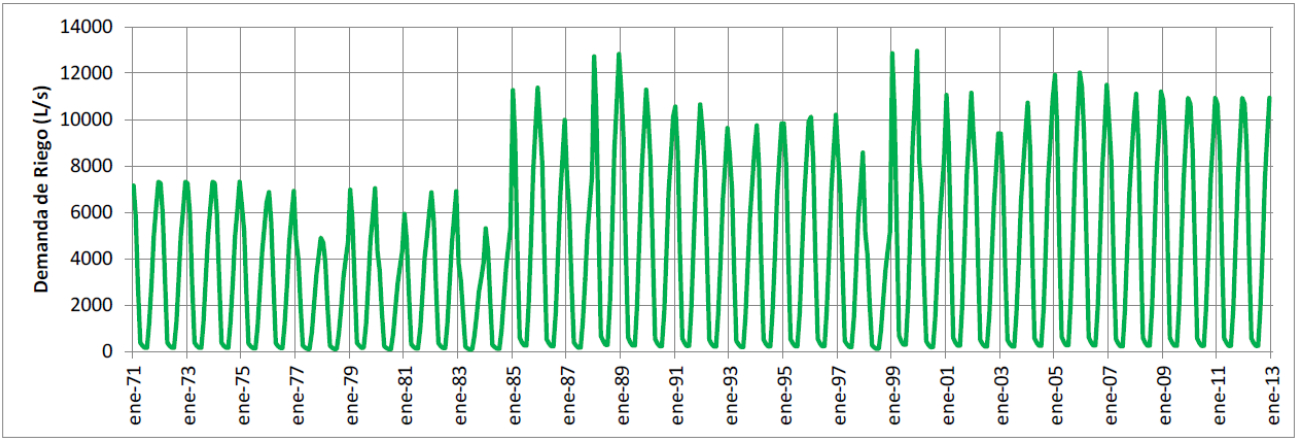


Figura 9 Demanda de riego actualizada al año 2013 incorporada en el modelo DGA-HIDROMAS (2013)

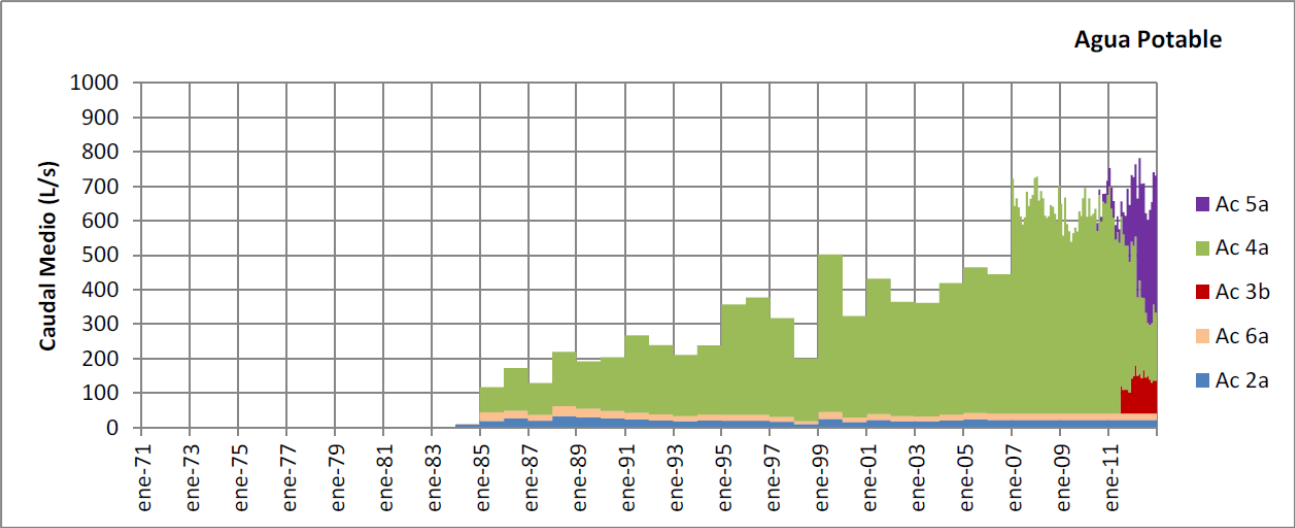


Figura 10 Demanda de agua potable actualizada al año 2013 incorporada en el modelo DGA-HIDROMAS (2013)

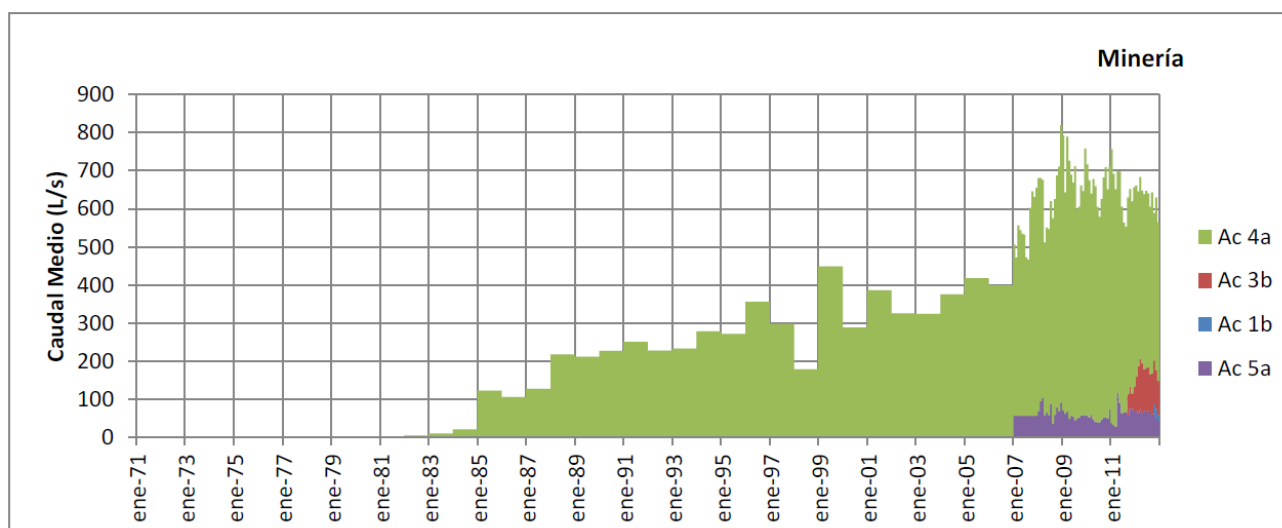


Figura 11 Demanda de agua para minería actualizada al año 2013 incorporada en el modelo DGA-HIDROMAS (2013)

Conceptualización del sistema hídrico del valle del río Copiapó

La Tabla 10 resume la explotación de aguas subterráneas documentada y reportada en estudios previos. Esta tabla claramente indica un sistema altamente estresado donde la explotación de aguas subterráneas supera las tasas de recargas ($4,4 \text{ m}^3/\text{s}$) y por lo tanto se ha generado una disminución sostenida del volumen embalsado a tasas promedio de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (1993-2012) (DGA-HIDROMAS, 2013).

Tabla 10 Resumen explotación de aguas subterráneas documentada y modelada en previos estudios

Estudios	Año	Explotación ($\text{Mm}^3/\text{año}$)
Italconsult	1963	5,0
Uri Hammer	1980	25,1
DGA - Álamos y Peralta	1987	45,5
DGA - Álamos y Peralta	1995	124,5
DGA	2003	140,0
Golder	2006	140,0
DGA-DICTUC	2010	190,1
DGA-HIDROMAS	2013	182,6

En resumen, el sistema hídrico del valle del río Copiapó muestra la relevancia en términos de recarga hacia los acuíferos de los cauces superficiales, y el transporte y aplicación de agua para el riego de predios. Al mismo tiempo, el embalse Lautaro juega un rol relevante al regular el limitado volumen superficial disponible almacenado durante la estación húmeda. La interrelación entre los flujos subterráneos pasantes desde el sector acuífero 01, las pérdidas por infiltración en el embalse Lautaro, las recuperaciones del río Copiapó en el sector de Los Loros – La Puerta, y la oferta superficial disponible aguas abajo del sector La Puerta, parecen estar fuertemente relacionadas y por tanto, parece razonable contar con un modelo continuo para el acuífero de Copiapó que considere esta interrelación y dependencia sobre las tasas de recargas superficiales y flujos subterráneos pasantes.

3.3.2 Acople de los modelos

Filosofía y metodología de acople

Uno de los objetivos principales de este proyecto es crear un software que pertenezca a quienes lo usen (los actores con un interés en el uso, gestión, y manejo sustentable de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó) y que pueda ser adaptado a sus necesidades por ellos mismos. Existe una tendencia importante a implementar en instituciones oficiales u organizaciones estatales Software Libre, reemplazando así programas protegidos por derechos de autor que generan gastos anuales en renovación de licencias. Esto, además de ahorrar dinero, les brinda una mayor autonomía en el manejo de su información y les permite evitar riesgos a su soberanía, ya que el código libre de estas piezas de software puede ser adaptado gratuitamente a sus necesidades puntuales.

Con este fin, y a modo de resolver las dificultades conceptuales, técnicas y numéricas de operar de manera conjunta e interactiva modelos desarrollados por distintos equipos profesionales y utilizando distintos códigos de simulación, se optó por reescribir y acoplar los modelos originales calibrados usando código abierto desarrollado en lenguaje Python. Lo anterior permite fomentar la mantención de la herramienta por organizaciones académicas y/o colaboraciones entre universidades y organismos públicos. La Figura 12 muestra el esquema conceptual del desarrollo de este acople en la herramienta SimCopiapó.

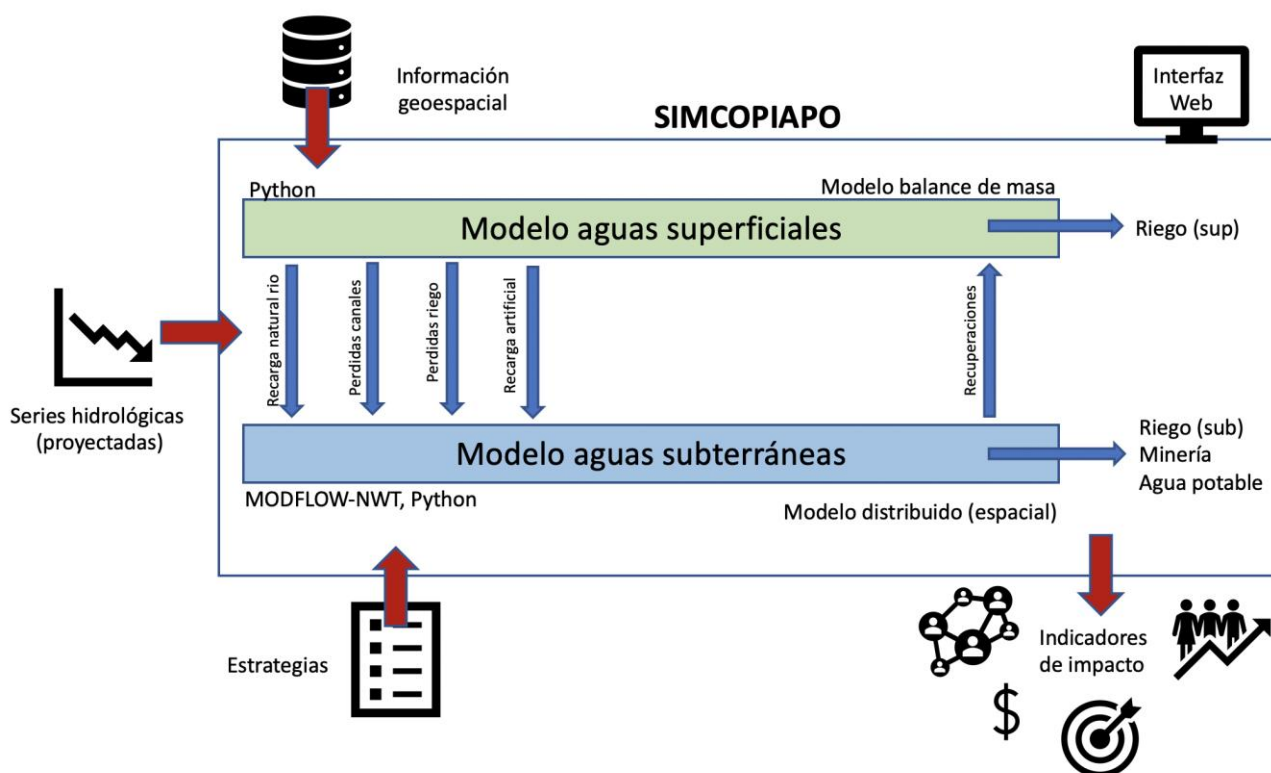


Figura 12 Esquema conceptual del desarrollo de la herramienta SimCopiapó

Modelo de flujo aguas subterráneas

El modelo hidrogeológico originalmente desarrollado por SERNAGEOMIN (2012), posteriormente utilizado y actualizado por DGA-HIDROMAS (2013), consta de dos modelos numéricos que funcionan de manera independiente. El primero corresponde al sector alto de la cuenca,

denominado Modelo Sector Alto, abarcando los sectores acuíferos 1 y 2 justo antes de la confluencia de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido hasta la estación fluviométrica DGA ubicada en La Puerta (Sector acuífero 2), lugar en que existe un alzamiento del basamento rocoso que limita el paso de flujo subterráneo al acuífero siguiente. El segundo modelo corresponde al sector bajo de la cuenca, denominado Modelo Sector Bajo, abarcando los sectores acuíferos 3-4-5-6 entre las estaciones fluviométricas de la DGA La Puerta y Angostura. En la zona terminal del acuífero en el sector 6 (Angostura) también existe un alzamiento del basamento rocoso, que genera afloramientos medidos en la estación fluviométrica DGA en Angostura.

Si bien la revisión y actualización del modelo hidrogeológico conceptual y su recalibración se encuentran fuera del alcance original del presente proyecto, durante el proceso de revisión de los modelos calibrados por DGA-HIDROMAS (2013) se detectó y fue necesario corregir una serie de problemas conceptuales y numéricos, entre ellos:

- **Los modelos numéricos Sector Alto y Sector Bajo no generaban afloramientos históricos observados y medidos en las estaciones DGA La Puerta y Angostura.** Solo fue posible reproducir los afloramientos observados, tanto en su magnitud y distribución espacial, luego de “unir” ambos modelos numéricos. Para ello se extendió la grilla numérica del Modelo Sector Bajo 14 km hacia el oeste (70 celdas) y 20 km hacia el sur (100 celdas), lo que ahora permite simular un gradiente hidráulico continuo entre el Sector 1 y 6 del acuífero Figura 13. Esta mejora permite reproducir los afloramientos (magnitud y distribución espacial) correctamente en el Sector La Puerta. En el sector Angostura existe un problema conceptual en el modelo original debido a la falta de suficientes celdas con condición “dren” que sean capaces de simular los aportes del acuífero al flujo superficial del río Copiapó. Por lo tanto, para reproducir los flujos observados en la estación fluviométrica DGA en Angostura, fue necesario aumentar la conductancia de las celdas tipo dren con un factor de 40 (Figura 14).

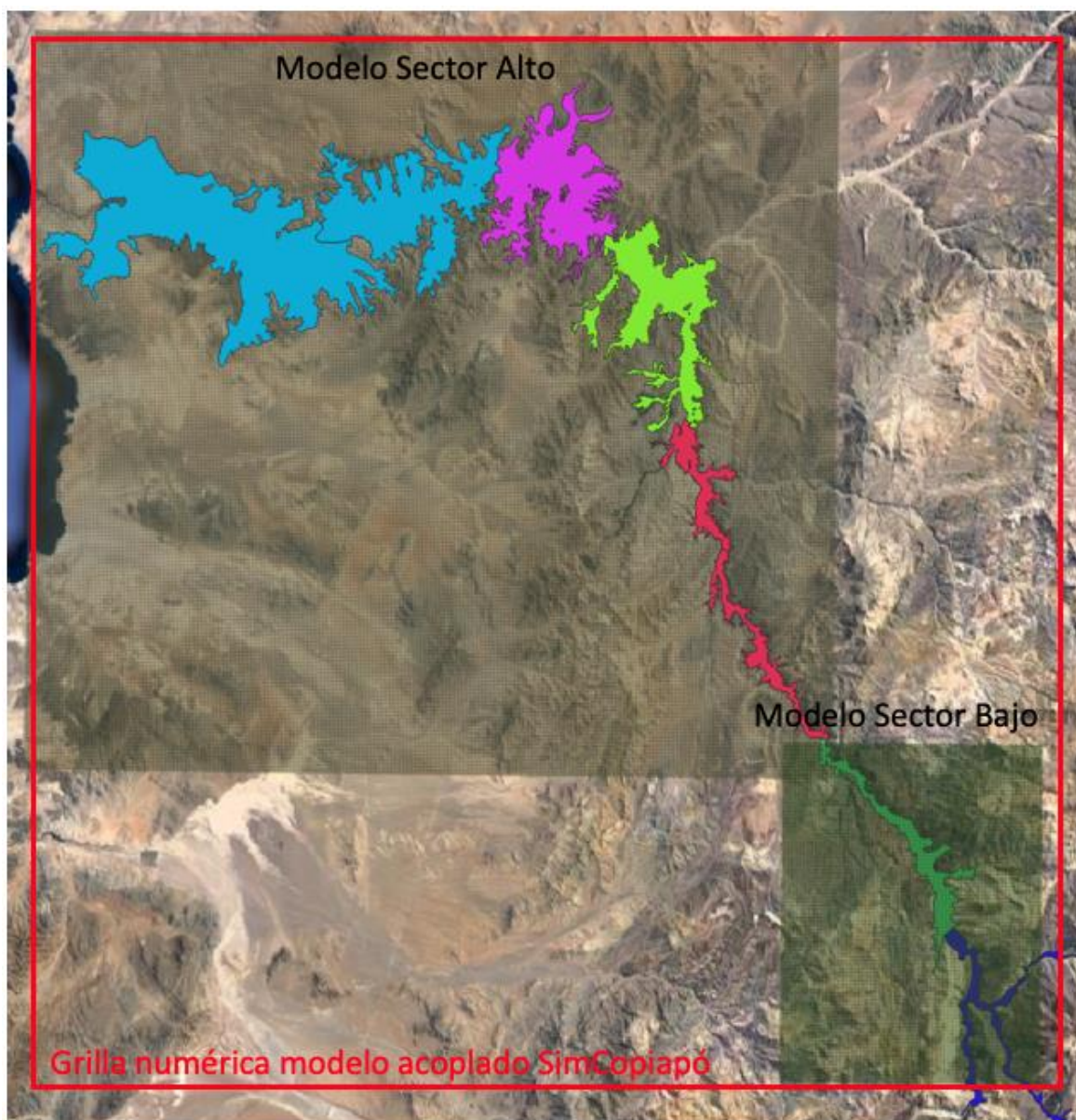


Figura 13 Grilla numérica de los modelos originales y modelo acoplado SimCapiapó

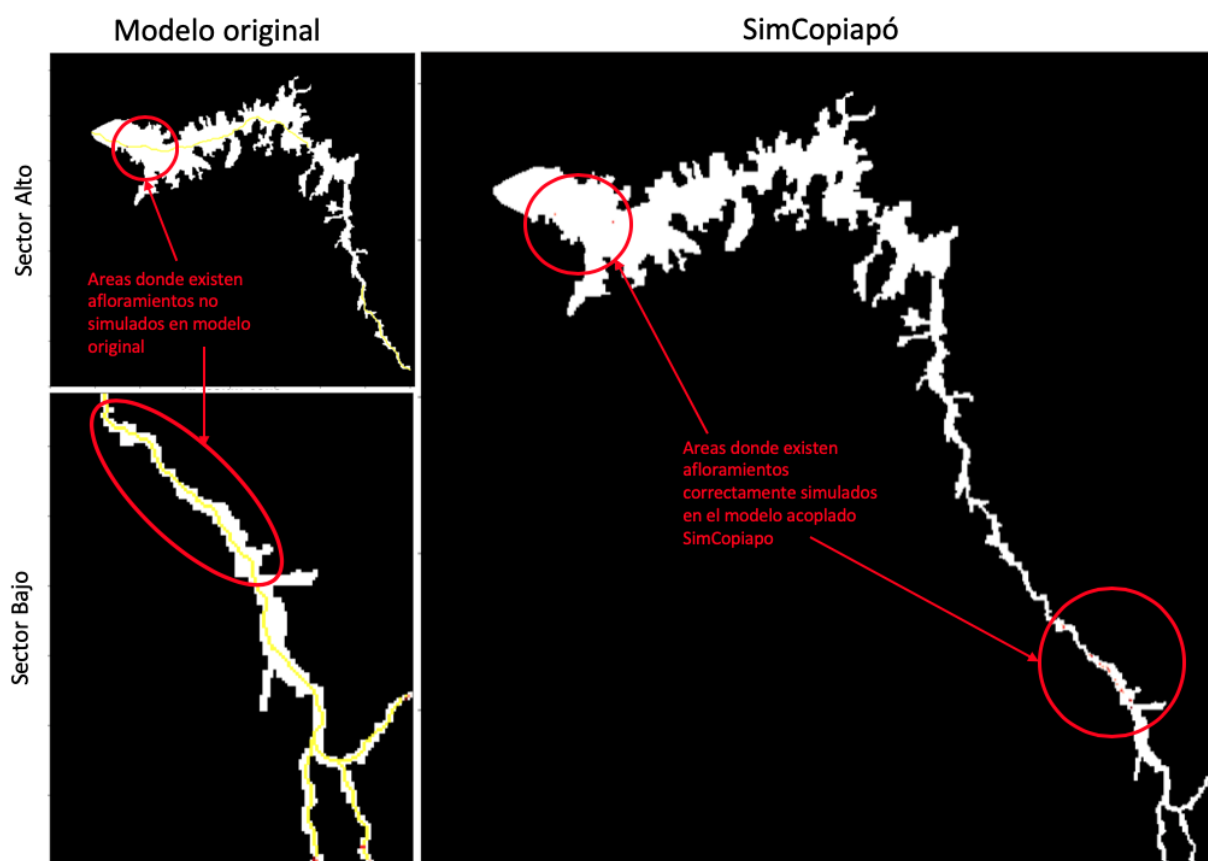


Figura 14 Mejoras en la representación de afloramientos en modelo acoplado SimCopiapó con respecto a los modelos originales

- Solucionador numérico.** El modelo DGA-HIDROMAS (2013) fue implementado utilizando la versión MF-2005 del código de simulación de flujo subterráneo MODFLOW. Esta versión de MODFLOW utiliza el solucionador PCG (Preconditioned Conjugate Gradient) el cual puede producir problemas de convergencia en zonas del modelo donde se produce el secado o mojado de las celdas. El principal problema se produce cuando hay celdas que se secan. En este caso MF-2005 desactiva las celdas y estas dejan de contribuir al balance de masa en el modelo durante el resto de la simulación. Considerando que SimCopiapó busca explorar escenarios que generen importantes recuperaciones del acuífero—y por lo tanto el mojado de celdas que actualmente se encuentran secas—se decidió traspasar el modelo numérico desarrollado por DGA-HIDROMAS (2013) a una versión actualizada de MODFLOW (Figura 15). El modelo original fue desarrollado en MF-2005 utilizando la interfaz gráfica Visual MODFLOW 4.6. El motor numérico de SimCopiapó fue actualizado a la última versión de MODFLOW, MF-NWT, cuyo solucionador numérico resuelve las inestabilidades y problemas de convergencia causados por el secado y mojado de celdas. Además, el modelo MODFLOW de SimCopiapó es manejado en su totalidad utilizando el lenguaje de programación Python a través de la librería Flopy (desarrollada por el US Geological Survey, creadores y mantenedores del código MODFLOW). A diferencia del software Visual MODFLOW (el cual requiere una licencia comercial), tanto Python como Flopy son librerías gratuitas y de acceso “libre”, facilitando la posibilidad de que cualquier servicio público y/o institución académica pueda liderar la mejora continua o actualizaciones de la herramienta SimCopiapó en el futuro.

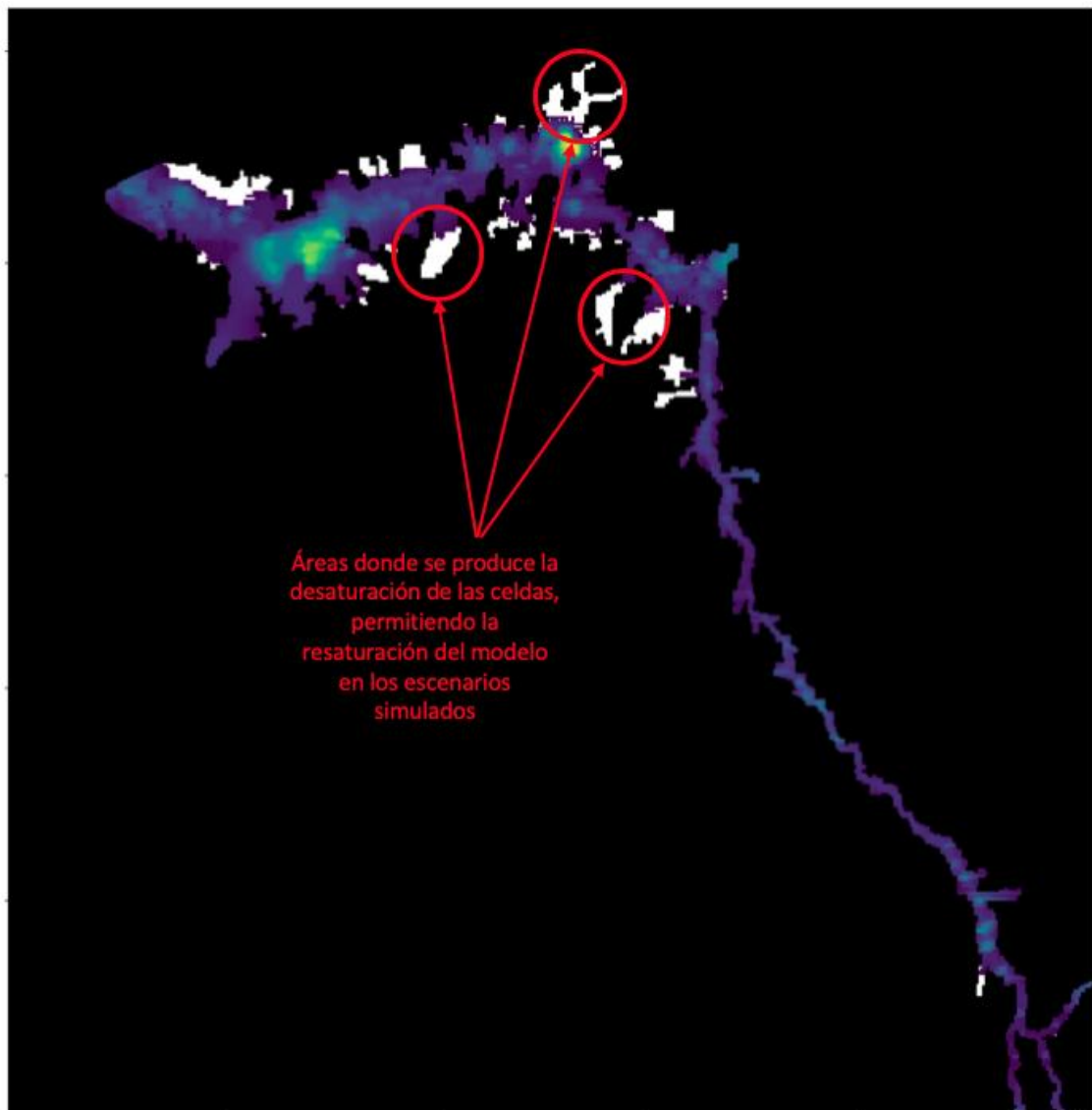


Figura 15 Mejoras en la representación del secado y mojado de celdas del modelo de flujo subterráneo usando el código MODFLOW-NWT

- **Paquete evapotranspiración.** En los modelos originales desarrollados por DGA-HIDROMAS (2013) el paquete MODFLOW que simula la evapotranspiración (EVT) se encontraba desactivados. Para corregir lo anterior, y permitir una correcta representación de las interacciones del acuífero con los flujos superficiales (recuperaciones en La Puerta y Angostura) se agregó el paquete EVT utilizando un valor de evaporación media de 10 mm/día y una profundidad de extinción de 1m. El valor de evaporación media fue calibrado manualmente para lograr un buen ajuste con los caudales superficiales históricos medidos en las estaciones de la DGA en La Puerta y Angostura.
- **Pozos Minera Caserones.** El modelo DGA-HIDROMAS (2013) no incluye el bombeo desde los pozos de extracción del proyecto Caserones ubicados en el Sector 2 del acuífero (300 L/s). Se procedió a incluir estos pozos manualmente en base a la información proporcionada por la empresa Figura 16.

emergencia intentando mantener un volumen de amortiguación de aproximadamente 5 Hm³³ (80% capacidad máxima), y así evitar o minimizar la posibilidad de que ocurran vertidos del embalse al superarse su capacidad máxima. Considerando lo anterior, se optó por representar el balance de masa del embalse usando un paso de tiempo de seis horas. Dicha discretización temporal permite representar de mejor manera los rebalses, infiltraciones y los caudales superficiales históricos en las estaciones fluviométricas de la DGA a lo largo de la cuenca del río Copiapó (ver validación del modelo, Sección 4.1). A continuación, se describe la conceptualización de los flujos de entrada, salida y la dinámica de acopio del Embalse Lautaro (Figura 17).

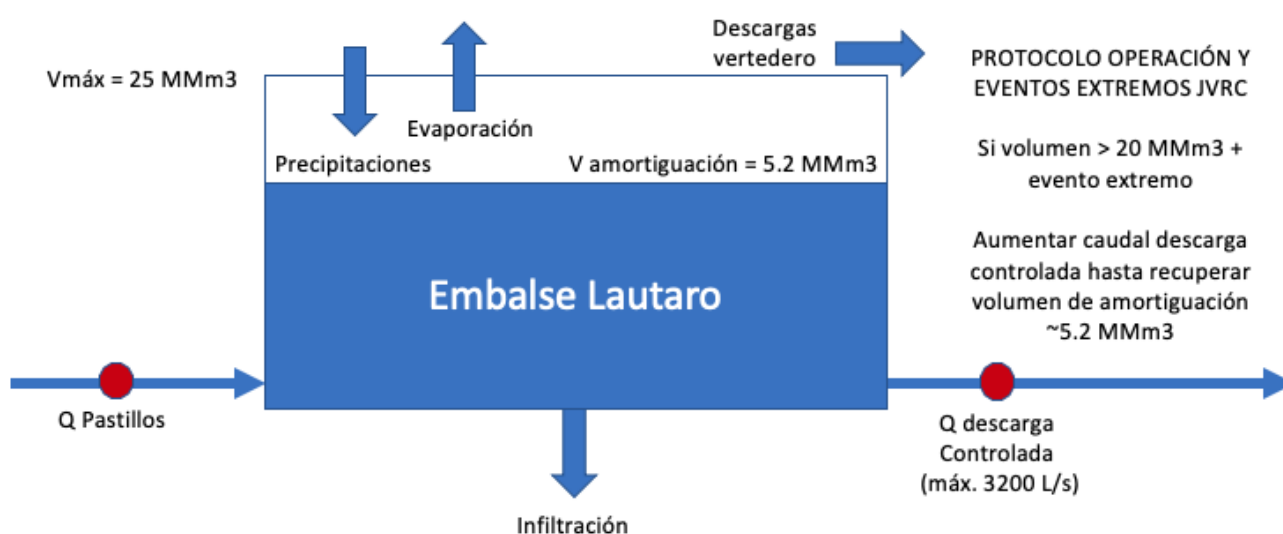


Figura 17 Conceptualización de flujos de entrada y salida modelo de operación embalse Lautaro

Flujos de entrada

- **Q Pastillos.** Se consideró el caudal superficial en la estación fluviométrica DGA Río Copiapó en Pastillos como condición de borde y principal aporte al acopio del Embalse Lautaro. Como condición base para las simulaciones futuras se seleccionó la serie hidrológica histórica del período 1991-2016 (25 años). Dicha serie representa una secuencia de cinco períodos: (1) 5 años secos, (2) dos años anormalmente húmedos (correspondientes al fenómeno de El Niño 1997-1998), (3) cinco años normales (1998-2003), (4) dos años húmedos (2003-2004), y finalmente (5) once años de sequía (2005-2016). SimCopiapó también permite seleccionar otras series hidrológicas a través de la interfaz web (referir a Figura 44 en Sección 3.7). La versión actual de SimCopiapó permite seleccionar la serie 1991-2016 reducida en un 50%, y la serie hidrológica invertida (otras series hidrológicas pueden agregarse a través de un archivo Excel). En la Figura 18 se muestran las tres series hidrológicas que pueden ser usadas en las simulaciones.

³³ Hm³ significa millones de metros cúbicos

SimCopiapo — Series hidrológicas

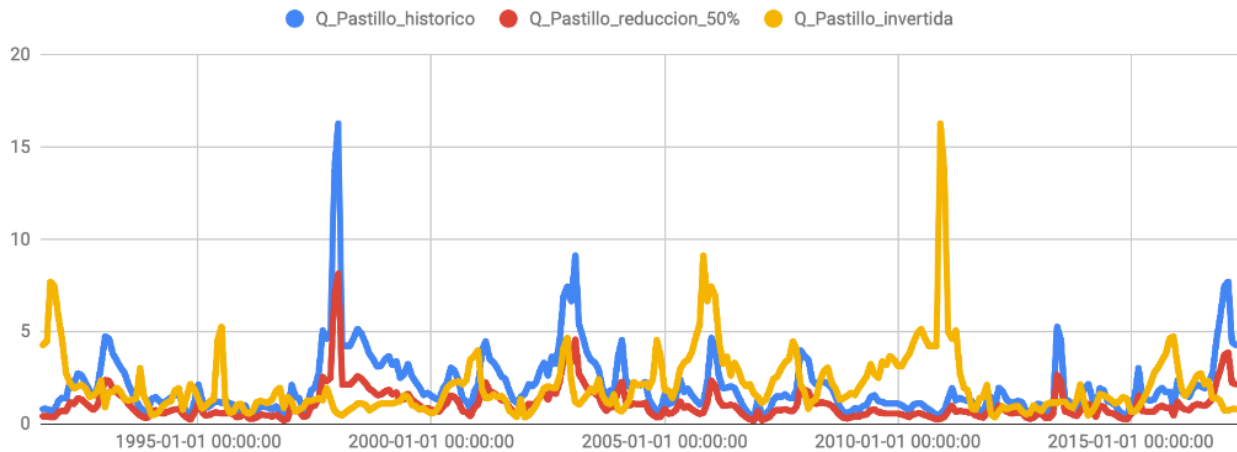


Figura 18 Series hidrológicas que pueden ser empleadas en la simulación de estrategias

- **Q precipitación.** El Embalse Lautaro también recibe aportes de las precipitaciones que caen sobre el espejo de agua del volumen embalsado. Para calcular dicho aporte, se ocupa la precipitación media mensual histórica medida en la estación meteorológica DGA en Lautaro, multiplicada por la superficie (variable) del espejo de agua proveniente de la batimetría realizada el año 2007.

Flujos de salida

- **Q descarga controlada.** La entrega de agua controlada a través de la torre de válvulas principal se conceptualizó en base al documento *Protocolo Operación Embalse*, disponible en la librería digital de la JVRC (<http://jvrc.cl/documentos-de-procedimiento/>). Dicho protocolo define cuatro escenarios de operación, los cuales han sido implementados (con algunas modificaciones) en la actual versión de SimCopiapo:
 - **Escenario de escasez.** Ante escenarios de un embalse sin acopio, se simula el cierre al 100% de la válvula de chorro hueco (para evitar daño en sus componentes, debido al flujo más espeso y con materiales de arrastre, con objeto de evitar que algo se obstruya en la válvula principal) y se procede a la apertura de las dos válvulas laterales por completo, las cuales son capaces de descargar un caudal máximo de 5.000 L/s. Es decir, cuando el embalse está sin acopio, el caudal de descarga del embalse corresponde al caudal en la estación fluviométrica DGA en Pastillos, menos la pérdida por infiltración (según se explica a continuación).
 - **Escenario de normalidad.** Ante escenarios donde no existe un estado de alerta por crecidas, y estando el Embalse Lautaro con capacidad de acopio, se simula la regulación de la descarga a través de la válvula de chorro hueco, la cual permite regular la entrega de agua de acuerdo con el requerimiento de agua descargando caudales entre los 200 y 3.200 L/s.
 - **Escenario de emergencia ante crecidas (< 80% de acopio).** En caso de que el volumen almacenado en el embalse sea inferior a los 20,5 Hm³ (entre los 8 y hasta los 22,4 metros de cota), se simula un embalse operando en un escenario de normalidad. Cuando el embalse

supera los 22,4 metros (de acuerdo con la batimetría realizada el 2007) se simula el resguardo del denominado *volumen de amortiguación* en el embalse ante eventuales crecidas, cuyo objetivo es resguardar los intereses de sus socios y disminuir el riesgo de amenaza de la vida humana hacia las localidades que se encuentran bajo el Embalse Lautaro. El volumen de amortiguación es de 5,2 Hm³, equivalente a un 20% de la capacidad máxima de acopio del Embalse Lautaro.

- **Escenario de emergencia tras un evento (> 80% de acopio).** En caso de haberse producido un evento extremo, y en donde el Volumen de Amortiguación sea igual o menor a los 5,2Hm³, se simula la recuperación de dicha capacidad de amortiguación, abriendo al máximo la válvula de chorro hueco, es decir, descargando aproximadamente 3.200 L/s, con lo cual es posible evacuar 276.480 m³/día hasta llegar a la cota 22,4 metros.
- **Q evaporación.** La pérdida de agua por evaporación se calculó de manera análoga a los aportes de las precipitaciones, en este caso, se toma la evaporación media mensual histórica medida en la estación meteorológica DGA en Lautaro y se multiplica por la superficie (variable) del espejo de agua proveniente de la curva batimétrica levantada el año 2007.
- **Q infiltración.** Las pérdidas por percolación a través del fondo del embalse fueron simuladas de manera análoga al modelo AQUATOOL, es decir, en proporción al volumen de acopio. Como mejora al modelo original, se analizaron los registros diarios del Embalse Lautaro que la JVRC viene recopilando desde el año 2017. A partir del balance de masa del embalse se pudo determinar que las infiltraciones alcanzan valores máximos de aproximadamente 3.500 L/s cuando el embalse se encuentra lleno. Se estableció además una infiltración mínima de 500 L/s, valor que permite lograr un buen ajuste a eventos extremos en que el embalse ha rebalsado por el vertedero o ha quedado completamente seco. El caudal de infiltración se incorpora al modelo de flujo subterráneo MODFLOW a través del paquete RCH, distribuyendo el flujo total de manera equitativa sobre las celdas del modelo que abarcan el espejo de agua del Embalse Lautaro.
- **Q vertedero.** Finalmente se mejoró la representación de vaciados (rebalses) por el vertedero de descarga en condiciones de acopio máximo. Se implementó la curva de descarga de vertedero.

2. Operación Distritos de Riego de la Junta de Vigilancia del Río Copiapó (JVRC)

El modelo de reparto de las aguas de acopio del Embalse Lautaro que la JVRC gestiona para los nueve distritos de riego del río Copiapó fue implementado en lenguaje de programación Python, usando como base a la topología del modelo original AQUATOOL. Este modelo consta de dos componentes: la descarga controlada del Embalse Lautaro, y el balance oferta-demanda de los distritos de riego:

- **Descarga controlada Embalse Lautaro.** Para determinar el valor de las entregas controladas del embalse necesarias para satisfacer la demanda, el modelo original elaborado por DGA-DICTUC (2010) adoptó un valor de 2,3 Hm³/mes (875 L/s), y una regla de operación del embalse que consiste en que los meses de octubre a marzo el embalse entrega el máximo entre lo disponible y el valor máximo de entrega controlada, y en los meses de abril a septiembre la entrega del embalse es prácticamente nula. Este supuesto genera un buen ajuste durante la temporada de riego (octubre a marzo) en años normales a secos, pero no así para períodos de invierno y cuando el embalse está por sobre el 50% de su capacidad (ver Figura 19). Las entregas

controladas en el modelo original tampoco consideran el protocolo de operación que prescribe la JVRC para mantener un volumen de amortiguación en el embalse ante eventos extremos.

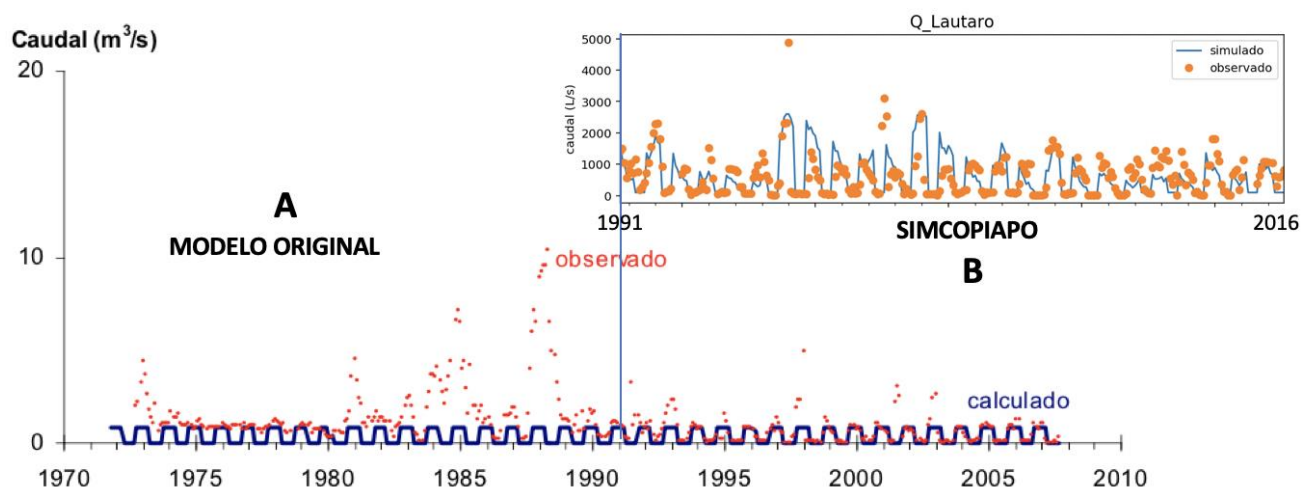


Figura 19 Ajuste de los modelos al caudal de descarga controlada en la estación fluviométrica DGA en Lautaro: (a) modelo original, y (b) SimCopiapó

Con el fin de representar de mejor manera las entregas controladas y el balance de masa en el Embalse Lautaro, SimCopiapó implementa una regla de operación (a escala diaria) que permite simular de mejor manera las variables que intervienen en el caudal que la JVRC reparte a sus miembros:

- Se considera un volumen inicial de 12,5 Hm³, es decir, un embalse a 50% de capacidad para todas para las simulaciones.
- Cada mes, la JVRC establece un **caudal nominal medio** de descarga en base al volumen de acopio acumulado a la fecha (es decir, el caudal que permite una entrega continua de agua durante los próximos seis meses).
- El **caudal instantáneo de descarga** se calcula multiplicando el **caudal nominal medio** por un factor de descarga que se obtiene del análisis de la serie histórica de caudales en la estación fluviométrica DGA en Lautaro:

Tabla 11 Factores de ajuste para las descargas controladas desde el embalse Lautaro

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Factor descarga controlada	1,50	0,50	0,25	0	0	0	0	0	0,25	0,50	1,50	1,50

- Para ajustar los caudales simulados a los caudales mínimos observados en la estación Lautaro fuera de la temporada de riego (abril a agosto), se incrementa el *caudal instantáneo* en 100 L/s.
- **Balance oferta-demanda de los distritos de riego.** La **oferta** de agua disponible para los distritos de riego se cuantifica de la siguiente manera:
 - Para los distritos 1 al 7, el **caudal de reparto**, es decir el caudal que la JVRC entrega a sus miembros en base a las acciones que posee cada distrito, se calcula como el 10,8% del

caudal medido en la estación fluviométrica DGA en La Puerta (90% caudal oferta en La Puerta multiplicado por 12% cuota de reparto).

- Los distritos 8 y 9 se modelan en conjunto, y en este caso el **caudal de reparto** se calcula como el 14,4% del caudal medido en la estación fluviométrica DGA en La Puerta (90% caudal oferta en La Puerta multiplicado por 12 % cuota de reparto).

Por otra parte, la demanda de agua de los distritos de riego se cuantifica utilizando la siguiente lógica:

- Para cada distrito, se calcula el área cultivada según método de riego: canal (C), mixto (M), y pozo (P) en base al catastro de predios levantado por DGA-DICTUC (2010). Con la finalidad de mantener la consistencia de la conceptualización, se utilizaron imágenes satelitales de Google Earth para eliminar del cómputo los predios en los distritos 8 y 9 que han sido urbanizados durante los últimos años y que por lo tanto ya no imponen una demanda de riego.
- Para cada distrito y clasificación de áreas cultivadas bajo cada una de las tres fuentes de riego, se determina:
 - a) la **demanda de riego** (en L/s) considerando una demanda nominal media de 0,3 L/s/ha para riego tecnificado (goteo, aspersión, y microaspersión) y 1 L/s/ha para riego no tecnificado (surco, y tendido);
 - b) las **pérdidas de riego** (en L/s), considerando una tasa de pérdida del 70% para tendido, 55% para surco, 25% para aspersión, y 10% para riego por microaspersión y goteo;
 - c) las **pérdidas de canales** (en L/s), en base a los coeficientes de pérdidas calibrados para los distintos sectores de riego catastrados por DGA-DICTUC (2010), ver Tabla 12;
 - d) la **demanda bruta** (en L/s) a nivel de bocatoma, es decir, la suma de a) y c);

La Tabla 12 resume los valores empleados en SimCopiapó:

Tabla 12 Demandas y pérdidas de agua de riego por fuente de riego para los distritos de la JVRC

Distrito	Fuente riego	% pérdidas canales*	área (ha)	demanda riego (L/s)	pérdidas riego (L/s)	pérdidas canales (L/s)	demanda bruta (L/s)
1	C	10%	239,3	71,8	7,0	7,2	79,0
	M		363,0	108,9	10,9	10,9	119,8
	P		816,3	244,9	24,5	24,5	269,4
2	C	10%	117,5	35,3	3,5	3,5	38,8
	M		36,7	11,0	1,1	1,1	12,1
	P		299,2	89,8	9,0	9,0	98,7
3	C	1-12%	27,2	8,2	0,8	1,0	9,1
	M		56,1	16,8	1,7	1,5	18,3
	P		404,4	121,3	12,1	1,4	122,7
4	C	12%	16,7	5,0	0,5	0,6	5,6
	M		471,8	141,5	14,2	17,0	158,5
	P		833,6	250,1	25,0	30,0	280,1
5	C	12-25%	14,6	4,4	0,2	1,1	5,5
	M		397,5	119,2	11,9	29,8	149,0

	P		442,6	132,8	13,3	29,5	162,3
6	C	25%	297,0	111,8	30,4	28,0	139,8
	M		345,2	103,6	10,4	25,9	129,5
	P		431,0	129,3	12,9	32,3	161,6
7	C	25%	206,5	93,5	32,4	23,4	116,8
	M		48,5	14,5	1,5	3,6	18,2
89	C	25%	326,5	268,4	166,0	67,1	335,6
	M		188,2	111,7	58,5	27,9	139,6

*valores calibrados por DGA-DICTUC (2010)

Para el cálculo de las demandas y pérdidas instantáneas (mensuales) de riego se multiplican los valores de la Tabla 13 por las curvas de demanda determinadas a partir de la Tabla 4-17 del estudio DGA-DICTUC (2010):

Tabla 13 Factores de ajuste usados para calcular las demandas instantáneas mensuales

Sector de Riego	Distrito	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lautaro - La Capilla	1	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,0	1,6	1,9	2,2
La Capilla - San Antonio	2	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,0	1,6	1,9	2,2
San Antonio - La Puerta	3	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,0	1,6	1,9	2,2
La Puerta - La Turbina	3	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	1,9	2,3
La Turbina - El Yeso	4	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	1,9	2,3
El Yeso - Comp. Negras	4	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,9	1,6	1,9	2,2
Comp. Negras - Pabellón	5	2,1	1,8	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,9	1,4	1,8	2,1
Pabellón - Cerrillos	5	2,2	1,7	0,8	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	0,8	1,3	1,6	2,2
Cerrillos - Mal Paso	6	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	2,0	2,3
Mal Paso - Palermo	6	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	1,9	2,3
Palermo - La Florida	7	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	1,9	2,3
La Florida - Copiapó	89	2,1	1,8	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,4	0,9	1,5	1,9	2,2
Copiapó - Chamonate	S5	2,2	1,7	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	0,8	1,4	1,7	2,3
Chamonate - Piedra Colgada	S5	2,2	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	1,9	2,3
Piedra Colgada - Valle Fértil	S6	2,1	1,7	0,9	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5	0,7	1,1	1,4	2,0
Valle Fértil - Angostura	S6	1,9	1,6	1,0	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,8	1,1	1,4	1,9

Finalmente, para cuantificar el balance oferta-demanda correspondiente a cada uno de los distritos de riego, se procede desde aguas arriba hacia aguas abajo—respetando la topología del diagrama unifilar de la JVRC considerando solo los canales y bocatoma principales del sistema—comparando los siguientes tres componentes: (1) el **caudal de reparto** (la oferta teórica establecida por la JVRC a través de sus estatutos), (2) el **caudal disponible a nivel de bocatoma** (la oferta real en el punto de entrega de cada distrito, ya sea en el Copiapó o Canal Mal Paso), y (3) la **demanda bruta** de cada distrito. La distinción entre el **caudal de reparto** y el **caudal disponible a nivel de bocatoma** permite simular la entrega de agua

durante períodos de extrema sequía, en los cuales el caudal en bocatoma puede ser menor al caudal que le correspondería al distrito en base al sistema de reparto que administra la JVRC. En estos casos, el caudal a repartir no puede ser mayor al caudal que escurre por el río. Previo a cuantificar el balance oferta-demanda, se descuentan las infiltraciones naturales a lo largo del cauce del río Copiapó en trayecto aguas arriba del distrito en cuestión (detalles en punto D más abajo). Al realizar el balance oferta-demanda a nivel de distritos, pueden darse los siguientes escenarios:

a) Caudal de reparto > 0 & < caudal demanda predios C. El caudal de reparto satisface parcialmente la demanda de predios con fuente canal (C), por ende, toda la demanda de predios con fuente mixta (M) debe ser satisfecha con agua de pozo:

- $Q_{entrega} = Q_{reparto}$
- $Satisfacción_{dda_C} = Q_{entrega} / Q_{dda_bruta_C}$
- $Satisfacción_{dda_M} = 0$
- $Pérdidas_{riego} = Q_{pérdidariego_C} * Satisfacción_{dda_C} + (Q_{pérdidariego_M} + Q_{pérdidariego_P})$
- $Pérdidas_{canales} = Q_{pérdidacanales_C} * Satisfacción_{dda_C}$
- $Q_{dda_M_a_P} = Q_{dda_bruta_M}$

b) Caudal de reparto > 0 & < caudal demanda predios C + M. El caudal de reparto satisface completamente la demanda de predios con fuente canal (C), y solo parcialmente la demanda de predios con fuente mixta (M), por ende, la demanda insatisfecha de predios M debe satisfacerse con agua de pozo:

- $Q_{entrega} = Q_{reparto}$
- $Satisfacción_{dda_C} = 1$
- $Satisfacción_{dda_M} = (Q_{entrega} - Q_{dda_bruta_C}) / Q_{dda_bruta_M}$
- $Pérdidas_{riego} = Q_{pérdidariego_C} + Q_{pérdidariego_M} * Satisfacción_{dda_M} + (Q_{pérdidariego_M} * (1 - Satisfacción_{dda_M}) + Q_{pérdidariego_P})$
- $Pérdidas_{canales} = Q_{pérdidacanales_C} + Q_{pérdidacanales_M} * Satisfacción_{dda_M}$
- $Q_{dda_M_a_P} = (Q_{dda_bruta_C} + Q_{dda_bruta_M}) - Q_{entrega}$

c) Caudal de reparto > 0 & > caudal demanda predios C + M. El caudal de reparto satisface completamente la demanda de riego de predios con fuente canal (C) y mixta (M).

- $Q_{entrega} = Q_{dda_bruta_C} + Q_{dda_bruta_M}$
- $Satisfacción_{dda_C} = 1$
- $Satisfacción_{dda_M} = 1$
- $Pérdidas_{riego} = Q_{pérdidariego_C} + Q_{pérdidariego_M} + (Q_{pérdidariego_P})$
- $Pérdidas_{canales} = Q_{pérdidacanales_C} + Q_{pérdidacanales_M}$
- $Q_{dda_M_a_P} = 0$

Una vez cuantificado el balance oferta-demanda, es posible generar las series temporales (mensuales) para todas las variables que describen la operación de los distritos de riego de la JVRC. Las series temporales de los flujos de recarga—las pérdidas de los canales y las pérdidas de riego—

Modelo Conceptual Operación JVRC

The diagram illustrates the conceptual model for the JVRC operation. It shows the flow of water from the Lautaro Reservoir through a series of dams and turbines. The flow is controlled by the reservoir's discharge rate, which is limited to a maximum of 1000 L/s. The flow is then distributed among the various dams and turbines, which are labeled with their respective capacities and names. The flow continues through the Copiapó River, which is shown as a blue line with a red dot indicating the flow rate. The flow is then distributed among the various dams and turbines, which are labeled with their respective capacities and names.

Dam Capacities:

- D1 — 12%
- D2 — 12%
- D3 — 12%
- D4 — 12%
- D5 — 12%
- D6 — 12%
- D7 — 12%
- D89 — 16%

Flow Timeline:

- Q descarga controlada** (Controlled discharge)
- Q La Puerta** (Flow at La Puerta)
- Q Copiapó en** (Flow at Copiapó)
- Q Copiapó en Ciudad** (Flow at Copiapó City)

Maximum Flow Rate: máx. 1000 L/s

58 | SimCopiapó: Modelación Participativa para la Gestión del Agua

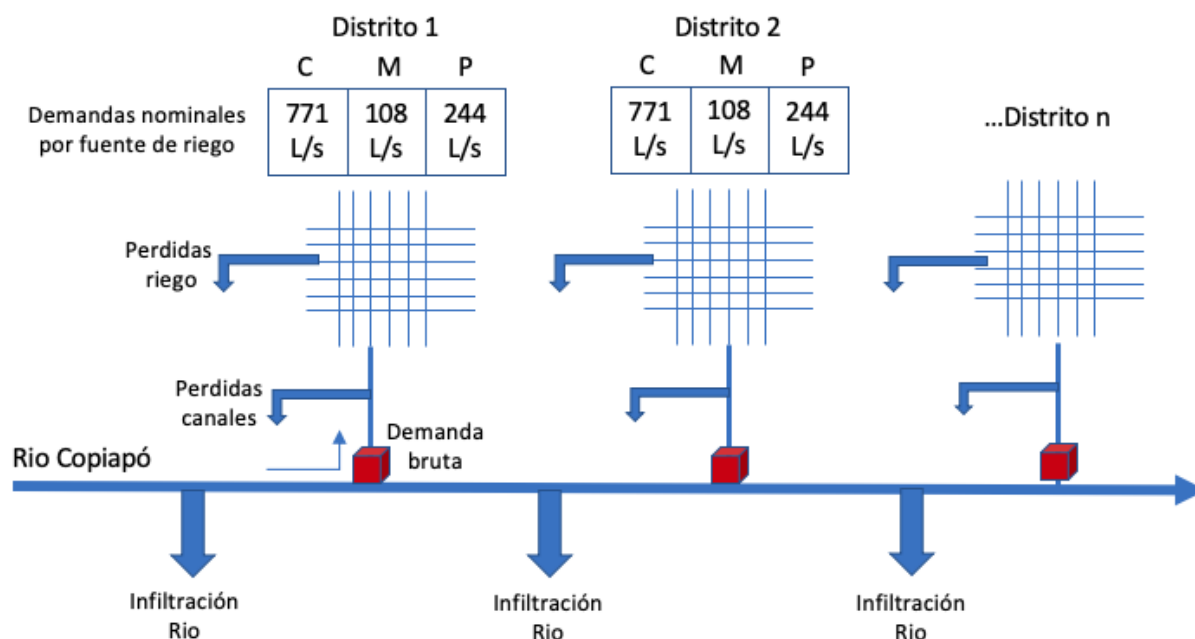


Figura 21 Modelo conceptual balance y reparto de aguas distritos JVRC

3. Operación predios fuera de la jurisdicción de la Junta de Vigilancia del Río Copiapó (JVRC)

En base a la información predial catastrada por DGA-DICTUC (2010), se asumió que la totalidad de la demanda de los predios ubicados en los sectores acuíferos 5 y 6 es satisfecha mediante pozos. Para estos predios, las demandas de riego, pérdidas de riego, y demandas brutas se calculan de manera análoga a los predios de la JVRC. Considerando que la gran mayoría de los predios cuentan con riego tecnificado (goteo) se asumió que no existen pérdidas de distribución de canales.

Debido a que no se cuenta con información detallada sobre la profundidad de todos los puntos de extracción, no fue posible simular escenarios donde ciertos pozos deban dejar de bombear debido a la profundización del nivel freático por bajo el nivel de las cribas. No obstante, la versión de MODFLOW (MF-NWT) empleada en SimCopiapó reduce automática y paulatinamente el bombeo en aquellas celdas en que la napa cae bajo un nivel prescrito (en este caso, bajo el 5% del espesor del acuífero). La magnitud de la reducción de los bombeos debido a desaturación del acuífero puede extraerse de dos maneras: (1) del archivo LIST generado por MODFLOW (Figura 22A), o bien (2) inferirse de los balances hídricos entregados en el reporte de simulación (Figura 22B).

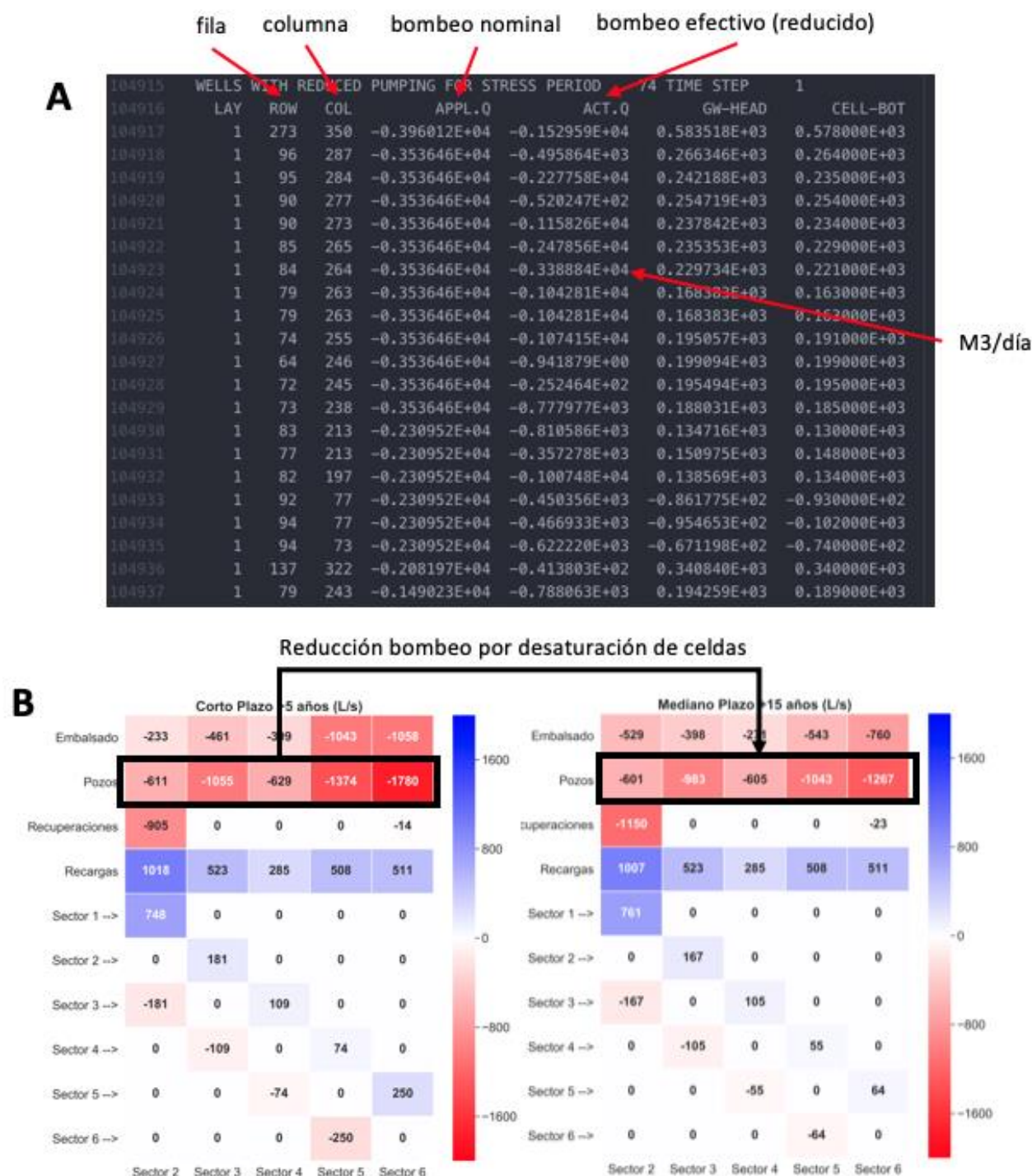


Figura 22 Reducción de bombeos implementado en SimCopiapó mediante MODFLOW-NWT: (a) archivo LIST de MODFLOW indicando las reducciones aplicadas, (b) balance hídrico mostrando las reducciones por sector acuífero

4. Flujos superficiales río Copiapó

El modelo de flujos superficiales del río Copiapó sigue la misma lógica y mantiene los puntos de control, y parámetros de infiltración del modelo original AQUATOOL, salvo algunas mejoras:

- Usando las series históricas de caudales superficiales en las estaciones fluviométricas DGA Copiapó en Mal Paso, Ciudad de Copiapó y Angostura como referencia, se establecieron caudales críticos bajo los cuales no se observan escurrimientos en la estación fluviométrica inmediatamente aguas abajo. Para la estación río Copiapó en Mal Paso se asumió un caudal crítico de 1.000 L/s y para la estación río Copiapó en Ciudad se asumió un valor de 3.000 L/s.

- Usando la serie histórica de caudales de la estación Mal Paso en Canal y considerando la capacidad nominal de esta obra de conducción, se asumió que la JVRC puede desviar un caudal máximo de 1.000 L/s desde el río Copiapó.
- Para las infiltraciones naturales a lo largo del trayecto del río, se ocupa la misma ecuación del modelo AQUATOOL (recarga = coeficiente_infiltración * caudal ^{0.9}), y los siguientes coeficientes de infiltración:

Tabla 14 Coeficientes de infiltración de los distintos tramos del río Copiapó

Tramo río	Coeficiente de infiltración
I_Lautaro_Capilla	1%
I_Capilla_SanAntonio	1%
I_SanAntonio_LosLoros	0%
I_LosLoros_LaPuerta	0%
I_LaPuerta_LaTurbina	14%
I_LaTurbina_ElYeso	14%
I_ElYeso_CNegras	12%
I_CNegras_Pabellon	5%
I_Pabellon_Cerrillos	22%
I_Cerrillos_Nantoco	0%
I_Nantoco_TAmarilla	20%
I_TAmarilla_CCopiapo	20%
I_CCopiapo_Chamonate	30%
I_Chamonate_PColgada	30%
I_PColgada_SanJuan	30%
I_SanJuan_VFertil	30%
I_VFertil_Angostura	30%
I_CNegras_MalPaso	25%

5. Demandas mineras

Para las simulaciones, se extrapolaron las demandas mineras del modelo DGA-HIDROMAS (2013) del año 2012, es decir, las demandas del último año del modelo original calibrado (512 L/s) se mantienen fijas durante un período de 25 años. Además, se encontró que 300 L/s de bombeo del proyecto minero Caserones (Sector acuífero 2) no estaban incluidas en el modelo original. Dichas extracciones fueron incorporadas al modelo de flujo subterráneo (paquete WEL) en base a información de los pozos de derechos de aprovechamiento incluidos en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto (ver Figura 16 y Figura 23).

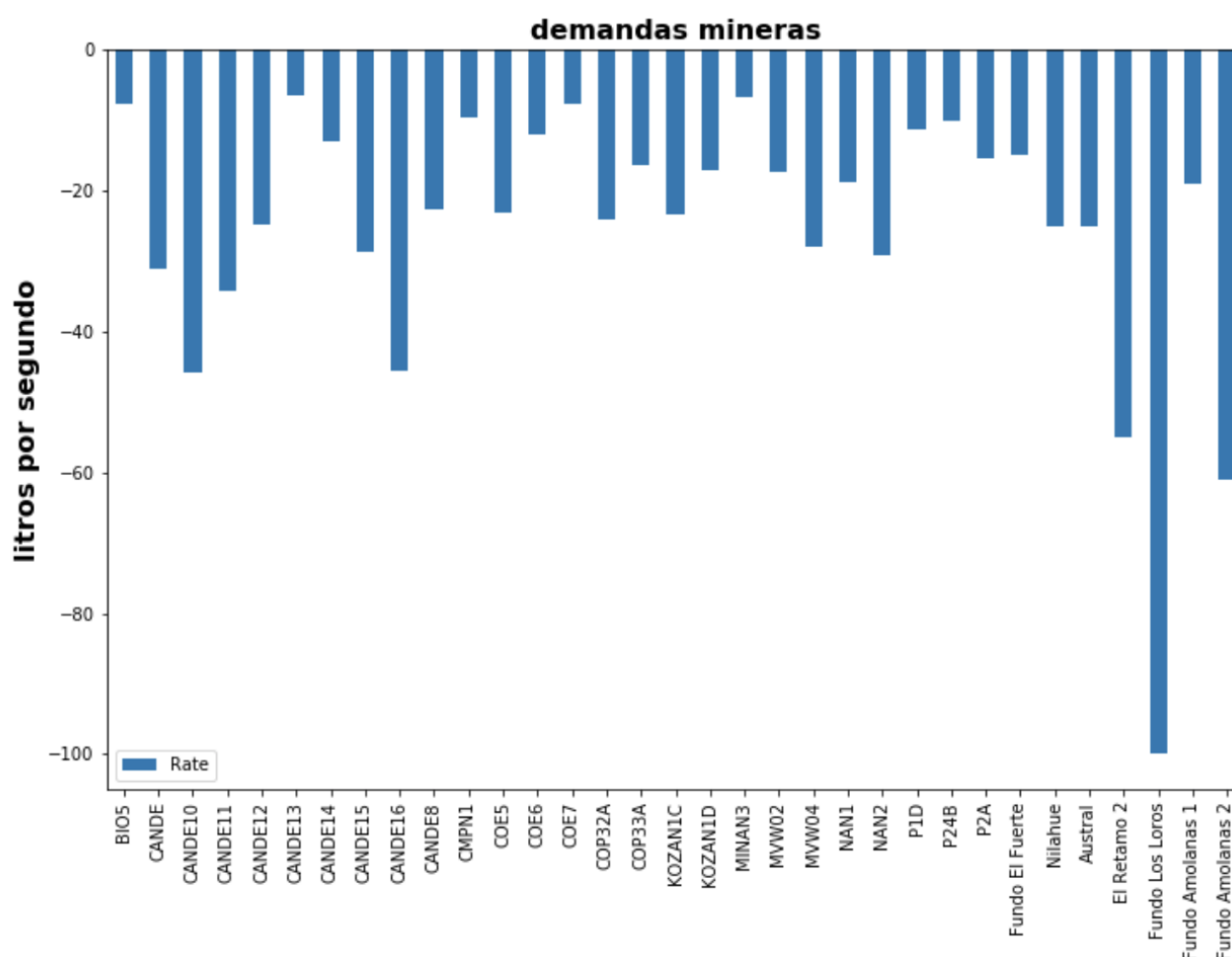


Figura 23 Demandas mineras aplicadas al modelo de aguas subterráneas en SimCopiapó

6. Demandas y pérdidas de agua potable

Para modelar la demanda futura de agua potable, la operación de la planta desaladora (actualmente en construcción con 60% de avance a la fecha), y los bombeos de la empresa sanitaria Aguas Chañar, se adoptó la siguiente lógica:

- Se toman como base la proyección de demandas y los puntos de captación considerados en el estudio DGA-HIDROMAS (2013).
- Se asume que la planta desaladora comienza a operar a partir del año 2020 y a partir de entonces Aguas Chañar implementa un plan para ir retirando de servicio los pozos de producción. El plan define cuando se apaga, o retira de servicio, cada uno de los pozos (de manera secuencial, escalonada, etc.). Se definió una situación base donde la empresa sanitaria va retirando de servicio sus pozos de manera secuencial (uno cada año) partiendo de los pozos que se encuentran más alejados de la ciudad de Copiapó (PU, sector 6), y continuando con los pozos más cercanos (PC, sector 5).
- Se asume que la diferencia entre la demanda de explotación (i.e., la demanda de agua potable incluyendo las pérdidas de transmisión) y el bombeo de pozos se satisface mediante agua desalada. La planta desaladora cuenta con tres etapas de 450 L/s, 900 L/s, y 1.200 L/s.

La situación base se muestra en la Tabla 15 y Figura 24:

Tabla 15 Demandas de agua potable, cronograma de operación de los pozos de producción de Aguas Chañar, producción de la planta desaladora, y pérdidas por distribución para la situación base

Nombre pozo y demanda [L/s]																
Demanda										Desaladora						
Año	[L/s]	PC01	PC02	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PU01	PU02	PU03	CE01	[L/s]	Etapas	Desaladora	Perdidas [L/s]
2019	811	70	71	67	72	85	74	77	68	68	68	50	41	1		243
2020	825	70	71	67	72	85	74	77	0	68	68	50	123	1		248
2021	837	70	71	67	72	85	74	77	0	0	68	50	203	1		251
2022	848	70	71	67	72	85	74	77	0	0	0	50	282	1		254
2023	858	70	71	67	72	85	74	77	0	0	0	0	342	1		257
2024	866	0	71	67	72	85	74	77	0	0	0	0	420	1		260
2025	874	0	0	67	72	85	74	77	0	0	0	0	499	2		262
2026	881	0	0	0	72	85	74	77	0	0	0	0	573	2		264
2027	887	0	0	0	0	85	74	77	0	0	0	0	651	2		266
2028	893	0	0	0	0	0	74	77	0	0	0	0	742	2		268
2029	898	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	821	2		269
2030	902	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	902	3		271
2031	906	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	906	3		272
2032	910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	910	3		273
2033	913	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	913	3		274
2034	915	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	915	3		275
2035	918	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	918	3		275
2036	920	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	920	3		276
2037	922	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	922	3		277
2038	924	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	924	3		277
2039	925	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	925	3		278
2040	927	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	927	3		278
2041	928	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	928	3		278
2042	929	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	929	3		279
2043	930	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	930	3		279
2044	931	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	931	3		279

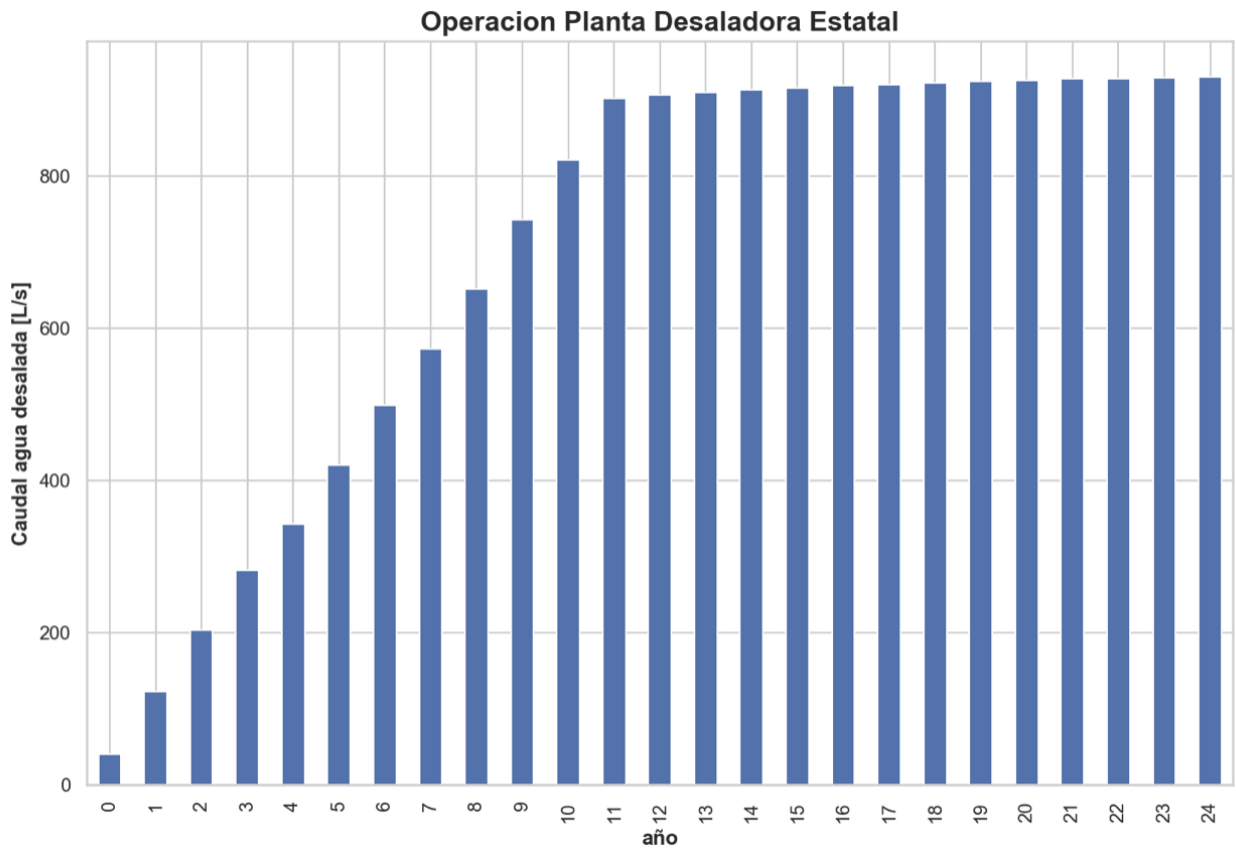


Figura 24 Cronograma de operación de la planta desaladora para la situación base

3.4 Modelo Basado en Agentes (ABM)

3.4.1 Antecedentes

Castilla-Rho et al. (2015) desarrollaron una plataforma en un entorno interactivo para la construcción de modelos basados en agentes “Agent-Based Model” (ABM por sus siglas en inglés), la cual permite acoplar un simulador social (interacción entre agentes) y un simulador físico (hidrología e hidrogeología). El modelo facilita la simulación de acciones e interacciones de individuos autónomos (agentes) dentro de un entorno (o paisaje), permitiendo determinar qué efectos tienen sus acciones, decisiones e interacciones (individuales y/o grupales) sobre el conjunto del sistema hidro-social. El modelo simula las operaciones simultáneas de entidades múltiples (agentes) en un intento de recrear y predecir las acciones de fenómenos complejos, a través de un proceso que destaca la aparición de interacciones desde el nivel más elemental (micro) al más elevado (macro). Estos agentes pueden representar entes individuales como, por ejemplo, agricultores, compañías mineras, sanitarias, organizaciones de usuarios, comunidades/organizaciones civiles, entre otros, los cuales funcionan sobre la base de diversas reglas de operación, interacción con otros agentes, búsqueda de beneficio económico y/o sometidos a diversos elementos regulatorios (límite en extracciones, multas, fiscalización).

Estructuralmente, el tipo de plataforma desarrollada por Castilla-Rho et al. (2015) es la implementación de un primer componente de simulación hidrológica (ver modelos hidrológicos e hidrogeológicos que se desarrollan en profundidad en el punto 3.3) sumado a un segundo componente de simulación social en base a agentes individuales. Es justamente este segundo módulo el que resulta de especial interés, ya que entrega la posibilidad de integrar las ciencias económicas, sociales y antropológicas, a las ciencias exactas y ambientales aplicadas a modelos ecosistémicos de interés, representando un nuevo paradigma que Axelrod (1997) sostiene es una “tercera forma de hacer ciencia”, aumentando el razonamiento deductivo e inductivo tradicional como métodos de descubrimiento.

Castilla-Rho et al. (2017) entregan un marco de referencia en torno a la conceptualización del comportamiento humano y su integración a la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) conocido como “The Groundwater Commons Game (GCG)”, donde categorizan el actuar de las personas de acuerdo a 4 tipos de organización o “estilos de vida”: Fatalista (prefiere la rutina, no suele preocuparse por otros ni por su entorno, actúa de mala fe), Jerárquico (sigue normas sociales, suele evitar el riesgo y confía tanto en la normativa como en los expertos), Individualista (defiende la libertad de acción, propenso a romper reglas y suele ser bastante competitivo), e Igualitario (desconfía de la institucionalidad, siente presión grupal y tiene desarrollado el sentido de lo colectivo). Estos tipos de organización coexisten con diferentes grados de dominancia en todas las sociedades según la Teoría Cultural (también conocida como Teoría de la Racionalidad Plural), la cual postula la relación entre la población y dos aspectos de la vida social: Norma y Grupo. El primer aspecto representa la confianza en los estándares comunes para alcanzar objetivos o cumplir las reglas, en otras palabras, la tolerancia al incumplimiento normativo (e.g., moral, vergüenza, costumbres), y el segundo aspecto representa la cohesión o fuerza de unión de las personas en una sociedad, o también, la importancia que adquiere la reputación. La combinatoria en dos dimensiones de estas dos variables de comportamiento (plano cartesiano red-grupo), entrega una clasificación organizacional gráfica clara, según los 4 estilos de vida (cuadrantes) mencionados

previamente, que sirve de base para la superposición de ciertos indicadores de interés según una función objetivo de bienestar definida a priori, por ejemplo, desde la esfera económica (índice de Gini o utilidades de un rubro afín a la demanda hídrica), la esfera social (normas sociales) y la esfera ambiental (altura del nivel freático o caudales de consumo). Esto entrega una alta flexibilidad de análisis, ya que los objetivos a evaluar pueden ser definidos bajo consenso participativo de los actores involucrados, incluyendo la cuantificación del alcance (o no) de estos objetivos.

La inherente complejidad de la gestión hídrica, exige un enfoque integrado de diferentes desafíos en materias económicas, ambientales y sociales. Desde esta perspectiva, la Teoría Cultural ofrece una base teórica adecuada para realizar comparaciones o contrastes entre las dinámicas sociales o patrones de comunicación que rigen a una comunidad. Sin embargo, resulta fundamental tener una base de información homogénea y estandarizada para poder realizar mediciones o estimaciones adecuadas como insumos para el ABM de la sociedad o comunidad en estudio.

La World Value Survey (WVS) es una red mundial de investigadores sociales que estudian cambios en los valores, creencias y motivaciones de la población, para ayudar a los tomadores de decisiones y elaboradores de políticas a entender las implicancias de estos cambios en la vida social y política de una comunidad. Corresponde a la mayor investigación no comercial y transnacional de series de tiempo en temas valóricos jamás ejecutada, abarcando más de 100 países con un 90% de la población mundial incluyendo más de 400.000 encuestas realizadas (Inglehart, et al., 2014). Así, este proyecto adopta la función de línea de base, para que a través de métodos empíricos de obtención de información en el área de estudio (entrevistas, encuestas, trabajo de campo, etc.) se puedan realizar análisis estadísticos para evaluar la consistencia y validar los resultados obtenidos desde el modelamiento.

La simulación social debe incluir canales de retroalimentación entre los mismos agentes y el modelo hidrológico-hidrogeológico a través de un marco conceptual adecuado para definir las diferentes escalas en la toma de decisiones y las interacciones entre los agentes. Estas interacciones pueden corresponder a dos tipos: Interferencias, entendidas como mecanismos indirectos de coordinación que dejan alguna traza ambiental que podría afectar al mismo u otro actor (e.g. extracción hídrica en la napa que deja un cono de depresión variando el nivel freático), y Comunicación, entendida como un mecanismo directo de transmisión de información o de observación del comportamiento en un vecindario definido (e.g. persuasión o disuasión a realizar extracciones o denunciar comportamientos inadecuados de vecinos a autoridades) (Castilla-Rho, et al., 2015).

Toda esta narrativa del proceso principal o estructural para elaborar el ABM tiene distintos submodelos enfocados en procesos particulares del marco general de modelamiento: submodelo de decisión de agentes; submodelo económico; submodelo institucional; submodelo social y submodelo hidrológico-hidrogeológico (Castilla-Rho, et al., 2017). Cada uno de estos aspectos es explicado a continuación.

Submodelo de decisión de agentes

Cada agente (agricultor) posee una estrategia única e individual de comportamiento en un momento en particular, en función de su “Audacia” (A) y “Castigo” (C). La audacia corresponde a la probabilidad de extraer agua ilegalmente durante la temporada (variable continua de 0 a 1), mientras que el castigo corresponde a la probabilidad de denunciar a un vecino que extrae agua ilegalmente. Basado en la definición de Axelrod (1986): una Norma Social (NS) de cumplimiento,

calculada como $NS = \text{media}(C) - \text{media}(A)$, emerge cuando $A \sim 0$ y $C \sim 1$ se vuelve una condición estable y de largo plazo entre los agentes. Lo anterior adquiere sentido al evaluar que el máximo beneficio social se adquiere cuando la usurpación de agua tiende a cero ($A \sim 0$) y la denuncia alcanza su máximo ($C \sim 1$). A su vez, el mínimo beneficio social ocurre en la situación inversa (Axelrod, 1986).

Vale destacar que estas estrategias individuales tienen la posibilidad de cambiar selectivamente bajo los principios evolucionarios de “imitación” y “exploración” en base a la información disponible o por simple heurística. Al final de cada período de evaluación (en nuestro caso, cada temporada de riego), los agentes miran a sus vecinos y copian la estrategia con mayor éxito utilizando como métrica la Función de Utilidad Socioeconómica (FUSE) posteriormente explicada. Si el agente posee un puntaje mayor a su vecino, sigue utilizando la misma estrategia por la siguiente temporada. Los agentes también pueden explorar una nueva estrategia bajo una probabilidad dada (mutación) hacia un valor aleatorio de (A,C) por sobre la imitación. No existe ninguna asunción de correlación a priori entre la Audacia y el Castigo (Castilla-Rho, et al., 2017).

La cuantificación de las decisiones de los agentes se realizó a través de la FUSE, definida según la Ecuación 1. Cada agente busca maximizar su función de utilidad.

Ecuación 1 Función de Utilidad Socioeconómica (FUSE)

$$FUSE = E \times M \times S$$

Donde (E) corresponde a las utilidades económicas, (M) corresponde a la interacción institucional representada a través de multas y (S) corresponde a las relaciones sociales. Cada indicador es representado por una función de utilidad o costo-beneficio (explicado a continuación), las cuales se mantuvieron lo más simple posible. En la Figura 25 se representan los tres componentes de la FUSE como “fuerzas” empujando las decisiones de los agentes en diferentes direcciones, mostrando los beneficios (+) y costos (-) aplicados al vecindario de un incumplimiento (Castilla-Rho, et al., 2017).

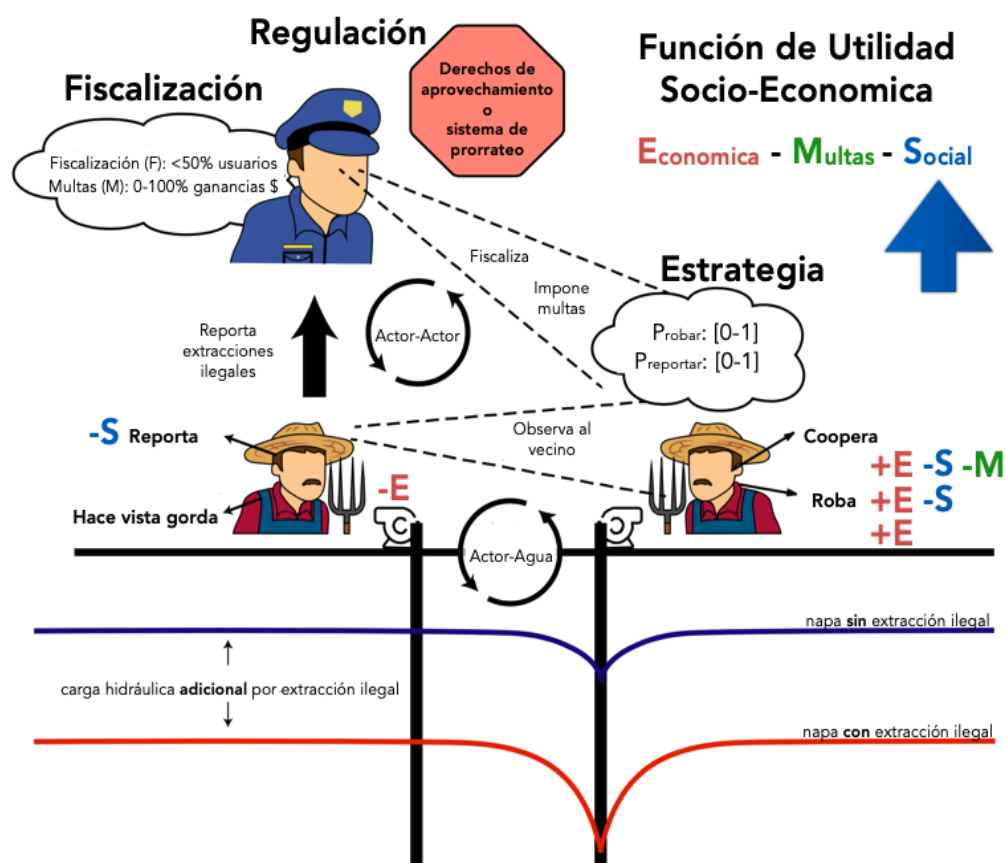


Figura 25 Dinámicas de decisión de los agentes según los tres tipos de indicadores: (E) utilidades económicas, (M) multas institucionales e (S) interacciones sociales

Submodelo económico

A priori, se asumió que los agricultores riegan los cultivos a requerimientos nominales completos de agua (no existe riego deficitario) y, por ende, ante restricciones de bombeo (prorrata) ellos están forzados a reducir la superficie de riego, proporcionalmente al porcentaje de restricción. Por otra parte, si el agricultor decide incumplir la restricción de bombeo, la superficie restante será regada proporcionalmente a su Audacia. Por ejemplo, una prorrata del 40%, para un granjero con Audacia del 70%, implica que el agricultor regaría del 100% de su superficie; un 60% (por restricción) + 40% (restante) por un 70% (de su audacia), lo que entrega un 88% de la superficie total de riego (Castilla-Rho, et al., 2017).

El presupuesto marginal bruto, se obtuvo a partir de estadísticas agroeconómicas para la cuenca del río Copiapó como un simple balance entre ingresos totales menos costos totales, sin incluir los costos energéticos por bombeo. Este costo de bombeo (CB) fue calculado e incorporado a la función objetivo para los agentes usando la Ecuación 2.

Ecuación 2 Costo eléctrico de una bomba centrífuga

$$CB = \frac{P_e \times g \times W \times H}{\eta}$$

Donde CB corresponde al costo de bombeo en (US\$/ha), P_e corresponde al precio de la electricidad (US\$/kWh), g es gravedad, W corresponde al requerimiento hídrico (ML/ha) y H corresponde a la profundidad del nivel freático (m).

Cabe mencionar, que esta versión podría ser extendida e incluir mayores detalles sobre el funcionamiento de las granjas (rotación de cultivos, déficit de riego, etc.) ampliando el contexto de cultivo en el que es aplicable el modelo que, a la vez, asumió que las decisiones de los agentes son relacionadas sólo a costos de bombeo y no de cultivos.

Submodelo social

La función de utilidad social (S) entrega una representación numérica de los costos y beneficios individuales que los agentes obtienen de sus interacciones. S fue construida en base a los siguientes requerimientos:

- Utilidades deben ubicarse en una escala común y comparable.
- Sigue una forma funcional Cobb-Douglas, comúnmente utilizada en la creación de indicadores de bienestar humano.
- El costo intrínseco de denunciar un incumplimiento vecino, disminuye al aumentar en valor posicional en el eje Redes e incrementa al tiempo que un agente decide reportar a un vecino no cumplidor.
- El costo intrínseco de desarrollar una mala reputación, disminuye al aumentar en valor posicional en el eje Grupo e incrementa al tiempo que un agente es visto por otros extrayendo agua ilegalmente (decida o no, el otro agente denunciar, la afección en la reputación es de igual modo).

Cada temporada los agentes se ven ante la decisión de acatar la restricción impuesta por la autoridad o incumplir extrayendo por sobre lo establecido. La oportunidad de incumplir viene con la probabilidad de ser visto por un vecino y es representada por la probabilidad de Castigo: Prob(C), obtenida desde una distribución uniforme aleatoria en el intervalo (0, 1) y cuando $C < \text{Prob}(C)$, es decir, cuando el Castigo es menor a la probabilidad de Castigar ante la presencia de un incumplimiento, el agente decide castigar al vecino en cuestión. Así también, existe una probabilidad de que un agente decida incumplir en función de su Audacia: Prob(A) con la misma distribución uniforme aleatoria entre (0, 1) y cuando $A < \text{Prob}(A)$ la probabilidad de incumplir es mayor que la propia Audacia y el agente decide incumplir (Castilla-Rho, et al., 2017). La utilidad social se cuantificó según la Ecuación 3.

Ecuación 3 Utilidad social

$$S = (Norma)^m (1 - Grupo)^n$$

Donde, m es el número de veces que un agente reporta a un vecino en incumplimiento y n es el número de veces que un agente es visto incumpliendo el límite de extracción.

Escalas de interacción

En cuanto a la escala, la agregación de los agentes individuales en grupos, influye localmente en el comportamiento individual hacia una mirada colectiva de acuerdos formales: cuotas, impuestos, contratos, compra-venta, etc.; o informales: normas sociales de cumplimiento y monitoreo mutuo de extracciones. Un ejemplo de estos grupos son las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUA) como asociaciones de canalistas o Juntas de Vigilancia (JV), el mercado de aguas con sus compradores y vendedores, o incluso agentes institucionales – autoridades locales o centrales – que definen políticas, zonas de protección, distribución de incentivos según la visión institucional

(Castilla-Rho, et al., 2015). Un esquema del marco conceptual de escalas de decisión se puede observar en la Figura 26. Esta figura muestra las escalas de decisión desde el nivel micro (agentes) hasta el nivel macro (institucional) y la potencial interacción entre diferentes agentes en el contexto hidro-social de la cuenca del río Copiapó.

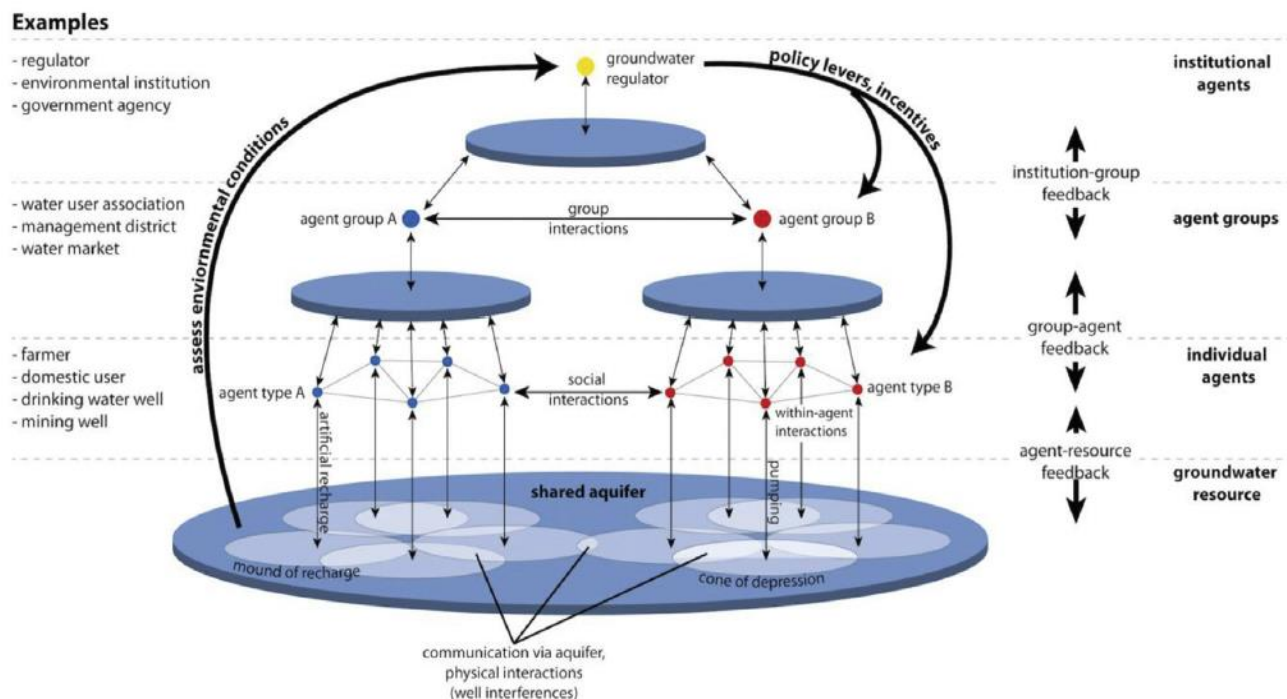


Figura 26 Esquema del marco conceptual de escalas de decisión del ABM

3.4.2 Parametrización del ABM

La obtención de información local en la cuenca del río Copiapó se realizó mediante la aplicación de una encuesta cuyo propósito fue generar una base de datos de entrada para parametrizar el ABM de la plataforma SimCopiapó. Esta encuesta, estructurada desde el trabajo realizado por Castilla-Rho et al. (2017) en la cuenca Murray-Darling en Australia – contextualizada a la realidad de la cuenca del río Copiapó –, recopiló información acerca de las percepciones sobre el mercado del agua; la tolerancia a la regulación y normativas que lo rigen; y la propensión a romper o seguir reglas previamente acordadas relacionadas con la gestión del recurso, por parte de los actores relevantes en la gestión hídrica de la cuenca.

Previo a la aplicación de esta encuesta, se realizó un proceso de revisión ética por parte de CSIRO Australia (Initial Ethics Review) donde se evaluó la idoneidad metodológica en la aplicación de la encuesta y si es que existiese alguna inconsistencia o invasión al espacio privado de los encuestados por parte de las preguntas. Este proceso finalizó con la aprobación de las preguntas definidas por el equipo y expuestas en la encuesta.

Por simpleza operacional se ajustaron 2 estructuras de encuestas para dos grupos de actores de particular interés con el fin de maximizar la representatividad en cuanto a la gestión hídrica y la gobernanza en la cuenca. Estos grupos correspondieron al Comité Asesor Regional de Recurso Hídrico (CARRH) y a la Asociación de Productores y Exportadores Agrícolas del Valle de Copiapó

(APECO). Si bien estas encuestas se aplicaron en circunstancias diferentes – que se explican a continuación – las preguntas, en su generalidad, correspondieron a las mismas para todos los actores salvo en un par de preguntas específicas cuya redacción fue realizada convenientemente para la obtención de información en particular.

La metodología de aplicación de las encuestas fue distinta según el grupo, dada las condiciones y calendarización de las actividades propias de los mismos. La encuesta realizada a los miembros del CARRH (Figura 27) fue en formato digital-online mediante la plataforma Google Forms, enviada al correo de los diversos actores o profesionales asistentes a los talleres, de los cuales, se recibió un total de 21 respuestas. Por su parte, la encuesta aplicada a los miembros de APECO (Figura 28) se realizó en formato físico durante la celebración de una reunión administrativa gracias a la gestión de APECO y remitida por correo al equipo de CSIRO. Se recibieron un total de 25 respuestas correspondientes a agricultores cuyos predios se ubican en distintos sectores del acuífero, entendiendo que existen agricultores con presencia en más de un sector.

De un total de 14 preguntas, la primera buscó la identificación de la institución a la cual pertenece y/o el sector o localidad donde eventualmente posee capacidad de gestión el actor encuestado en el caso del CARRH; y el sector del acuífero donde tiene su predio el agricultor encuestado en el caso de APECO con opción de respuesta abierta, las 13 preguntas restantes fueron enfocadas en obtener las percepciones sobre las temáticas antes mencionadas y dispuestas en un orden desde lo general (cumplimiento de la normativa) a lo específico (casos hipotéticos de gestión). Cabe destacar que las preguntas efectivamente correspondieron a expresiones u oraciones que los encuestados debieron responder en una escala de valorización de 1 a 7, donde 1 significa “muy en desacuerdo” y 7 significa “muy de acuerdo”.

Así, las 4 primeras preguntas trataron sobre la normativa del agua en términos generales; la percepción de la importancia de su cumplimiento, de su necesidad para el logro de una gestión sustentable en la cuenca, de su necesidad para la protección misma de los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA) (esta pregunta sólo se realizó en CARRH) y su necesidad para la supervivencia a largo plazo de las comunidades existentes en la cuenca. La siguiente pregunta buscó evaluar la justificación de la extracción ilegal de agua, o en su defecto extracción por sobre los DAA otorgados, en caso de condiciones económicas adversas. Otras 3 preguntas fueron enfocadas directamente en el cumplimiento de la normativa asociada a los DAA y las eventuales consecuencias de su transgresión; perjuicio sobre otros usuarios, debilitamiento de ecosistemas y daño en la propia reputación. Las restantes preguntas se trataron sobre elementos particulares de la gestión hídrica o situaciones hipotéticas ante las que podrían verse expuestos los encuestados; utilidad de las sanciones o multas para evitar ilegalidad, obtención de beneficios económicos por acciones ilegales, la alternativa de venta de DAA ante una oferta conveniente y la alternativa de crear un mercado temporal de aguas sin perder titularidad. Finalmente, se agregaron 2 preguntas a la encuesta de APECO para evaluar la justificación ante la extracción por sobre DAA otorgados por parte de los agricultores; si es que podría ser por problemas de disponibilidad del recurso o por problemas de institucionalidad. El énfasis que se hace en la extracción ilegal o por sobre los DAA otorgados, es precisamente para evaluar con mayor profundidad el comportamiento o justificación que realizan los agricultores sobre esta acción, entendiendo que son los usuarios del recurso hídrico que mayores volúmenes manejan en cuanto a derechos consuntivos.

Para el entendimiento más adecuado de estos resultados, vale destacar que valores extremos cercanos a 1 o 7 de las medias implican una tendencia en las respuestas en “desacuerdo” o “acuerdo”, respectivamente. Valores medios cercanos a 4 implican divergencia de opiniones, así, las desviaciones estándar vienen a complementar este análisis ya que mientras mayor sea su valor mayor será la dispersión de las respuestas con respecto a la media. En específico con respecto a esta muestra que se discretiza en una escala a valores enteros, una desviación estándar cercana a valor 1 (unidad) representa una medición con baja dispersión. De las 21 respuestas recibidas, 19 fueron efectivas ya que hubo dos respuestas de abstención. En cuanto a la representatividad de la muestra, se cubre un total de 15 instituciones, en las cuales existe proporcionalidad de representatividad con 5 instituciones de la sociedad civil/academia, 4 actores privados y 5 instituciones públicas. Estos resultados pueden observarse en la Figura 27 y Tabla 16.

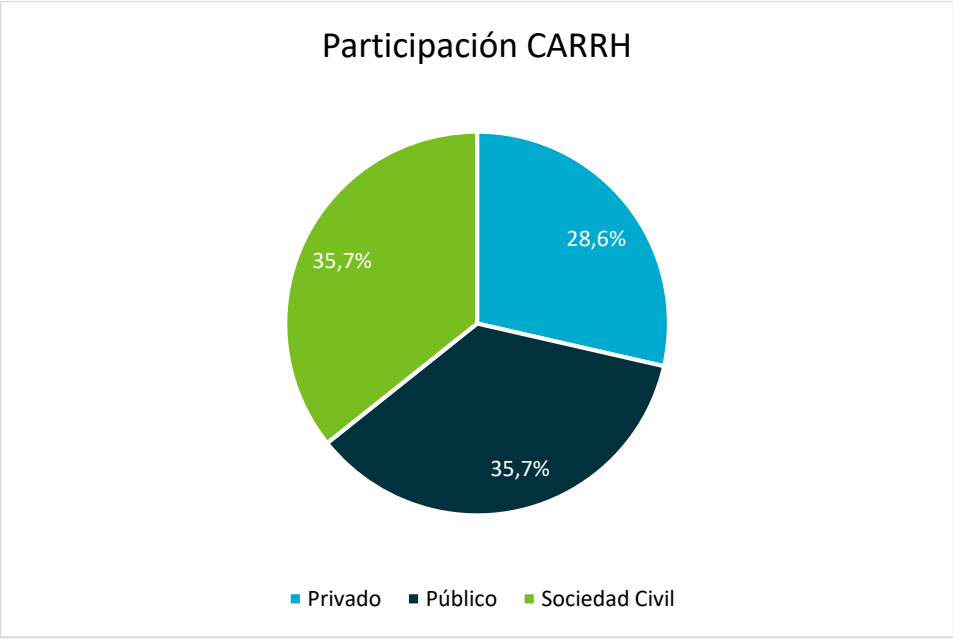


Figura 27 Participación del CARRH según sector

Tabla 16 Representatividad de organizaciones y cantidad de encuestas con respuestas

Sector	Actor / organización	Número de respuestas
Pública	GORE Atacama	2
	SEREMI Medio Ambiente	3
	SEREMI Agricultura	1
	DGA	2
	SISS	1
Privada	Aguas Chañar	1
	CAS 4	1
	APECO	2
	JV Río Copiapó	1
Sociedad Civil	Universidad Atacama	1
	Asociación Consumidores Copiapó	1
	Consejo Provincial Coya	1
	Unión Comunal de Juntas de Vecinos Copiapó	1
	Consultores Independientes	1

Para las encuestas realizadas por el CARRH, existe una clara tendencia en validar la importancia del cumplimiento normativo y su necesidad a la hora de gestionar de manera sustentable el recurso hídrico, con valores sobre 6 y desviaciones estándar cercanas a 1. Sin embargo, se evidencia una leve discrepancia cuando la importancia radica en la protección de los DAA. También existe una evidente tendencia en discrepar sobre la justificación bajo argumentos económicos de la extracción ilegal de aguas, donde la mayoría de los encuestados son categóricos al responder con valores de 1 o 2 alcanzando una media cercana a 2,5 y una desviación estándar alrededor de 2. Otro resultado destacable, en cuanto al acuerdo, corresponde a las preguntas relacionadas al cumplimiento normativo relacionado a los DAA, ya que cuando existe afección a otros usuarios o debilitamiento de los ecosistemas existen medias cercanas a 6,5 y desviación estándar bajo 1, lo que muestra la importancia de estos temas para los actores del CARRH. Sin embargo, cuando el argumento se relaciona a la reputación frente a los pares no existe una tendencia y las respuestas divergen ya que la media baja de 5 y la desviación supera el valor 2. Estos resultados evidencian la preponderancia que entregan los actores del CARRH a la normativa y su estricto cumplimiento, aun cuando existen argumentos económicos que podrían justificar una eventual flexibilización de esta.

El resto de las preguntas entregaron resultados claramente divergentes, tanto en la efectividad de las sanciones ante el incumplimiento normativo, como en la justificación bajo argumentos económicos de extracciones ilegales, como en realizar transacciones de DAA ante ofertas convenientes como en un mercado temporal. Esto es un resultado inherente a la heterogeneidad de actores que constituyen el CARRH, ya que cuando se supera la etapa del cumplimiento normativo para entrar en casos particulares de gestión, las visiones son variadas. Estos resultados pueden apreciarse en la Figura 29, en conjunto con los resultados de APECO.

Se obtuvieron respuestas de 25 agricultores, todos con respuesta completa. En cuanto a la representatividad espacial de la muestra, existe una asimetría de resultados ya de los 25 encuestados, hay 4 de ellos con presencia en 2 sectores (predios en más de un sector) y el resto con presencia en 1 sólo sector (un solo predio), donde 24 de los 29 predios se ubican en los sectores 1, 2 y 3 cuenca arriba, quedando así, sólo 5 predios representativos de los sectores 4, 5 y 6 cuenca abajo. La distribución espacial y el número de encuestas realizadas a APECO se pueden apreciar en la Figura 28.

Con respecto a las primeras preguntas generales sobre normativa, existe un amplio acuerdo y tendencia en que es importante su cumplimiento y su necesidad para una gestión sustentable con valores cercanos a 6,5 y una baja desviación estándar (menor a 1), caso similar ocurre con las tres preguntas relacionadas al cumplimiento normativo asociado a los DAA con resultados cercanos a 6 y desviación estándar sobre 1, lo mismo ocurre con la pregunta acerca de la efectividad de las sanciones o multas para evitar ilícitos con media 6 y desviación estándar cercana a 1. Esto demuestra un entendimiento común en la importancia del cumplimiento normativo y las sanciones asociadas a su no cumplimiento. Sin embargo, cuando se integra la variable económica a las acciones de los agricultores existe divergencia de opiniones, como puede apreciarse en la pregunta relacionada a la justificación de la extracción por sobre los DAA otorgados bajo condiciones económicas adversas. En este caso la media ronda el valor 3 y una desviación estándar cercana a 2,5, muestra una clara polarización de opiniones ya que 10 encuestados son categóricos en cuestionar esta acción con valor 1 muy en desacuerdo, pero existen a lo menos 9 encuestados que

si tienen un grado de acuerdo con esta práctica al responder con valores sobre 5. También existe divergencia de opiniones en las preguntas referentes a la justificación de la extracción por sobre los DAA otorgados, tanto por beneficios económicos o por disponibilidad del recurso o por problemas institucionales, no existe un acuerdo claro ya que las medias rondan el valor 4,5 con desviaciones estándar cercanas a 2. Caso similar ocurre con la posibilidad de transar económicamente los DAA, tanto ante una oferta conveniente como en un mercado temporal sin pérdida de titularidad.

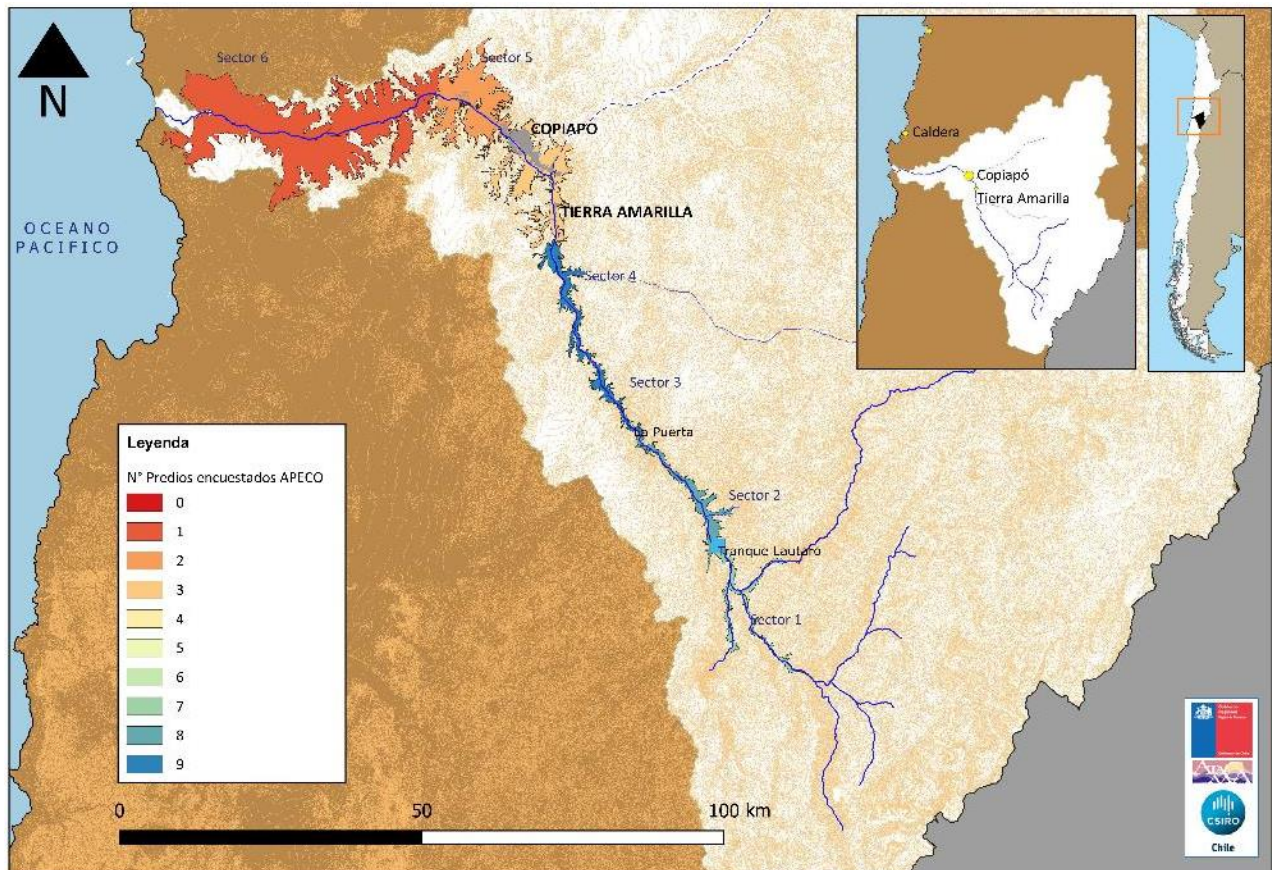


Figura 28 Mapa de distribución y participación de APECO

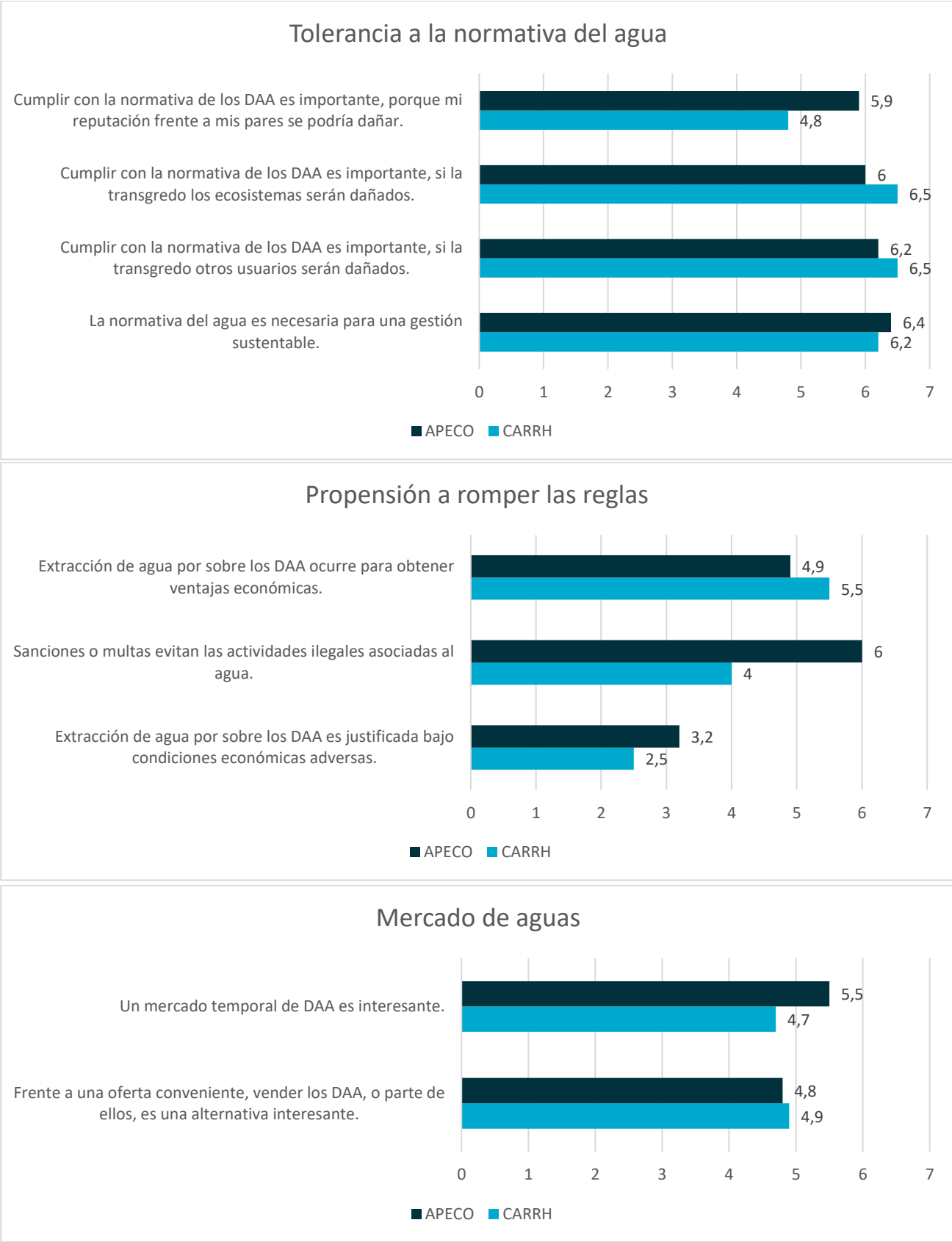


Figura 29 Resultados de encuestas para CARRH y APECO

Los resultados obtenidos desde las encuestas fueron ajustados a una escala de 0 a 1 con la finalidad de integrarlos al ABM y así ubicar a ambas organizaciones (CARRH y APECO) en el plano Grupo-Norma siguiendo la metodología general explicada en los antecedentes y que se detalla a continuación.

En la Sección 3.4.1 se menciona la función de utilidad socioeconómica (FUSE) que rige las interacciones entre los agentes e integra 3 tipos de indicadores: (E) utilidades económicas, (M) multas corresponden a tipo institucional, e (S) interacciones sociales. A cada uno de estos aspectos se le asigna un signo (+, -) según su utilidad o costo para el agente. Esta simple asignación de tipo de indicador y valor es clave para normalizar los valores obtenidos desde las encuestas y tuvo dos fines: primero, obtener los márgenes de comportamiento para los agentes en el modelo (recuadro rojo en la Figura 30), y segundo, obtener valores para las estrategias individuales (Audacia, Castigo) como condiciones de borde para el modelamiento. Esto en cuanto a la clasificación de las preguntas.

En cuanto al manejo numérico de los datos obtenidos, se obtuvieron 3 grupos de clasificación de datos correspondientes a comportamiento promedio (todas), individual y colectivo, de cada organización respectivamente. Se diferenciaron las preguntas realizadas en las encuestas según su naturaleza de acción o respuesta, es decir, si es que su ejecución o cumplimiento requiere un esfuerzo individual o colectivo, por ejemplo, la sentencia *“Cumplir con la normativa que rige los derechos de aprovechamiento de agua es importante, ya que si la transgreda otros usuarios de la cuenca se verían perjudicados”* la propia redacción deja en claro que requiere un esfuerzo individual para ser cumplida, en cambio, la sentencia *“Las sanciones o multas evitan las actividades ilegales asociadas al agua”* se lleva a cabo en un contexto colectivo ya que el concepto de fiscalización es general para todos los actores.

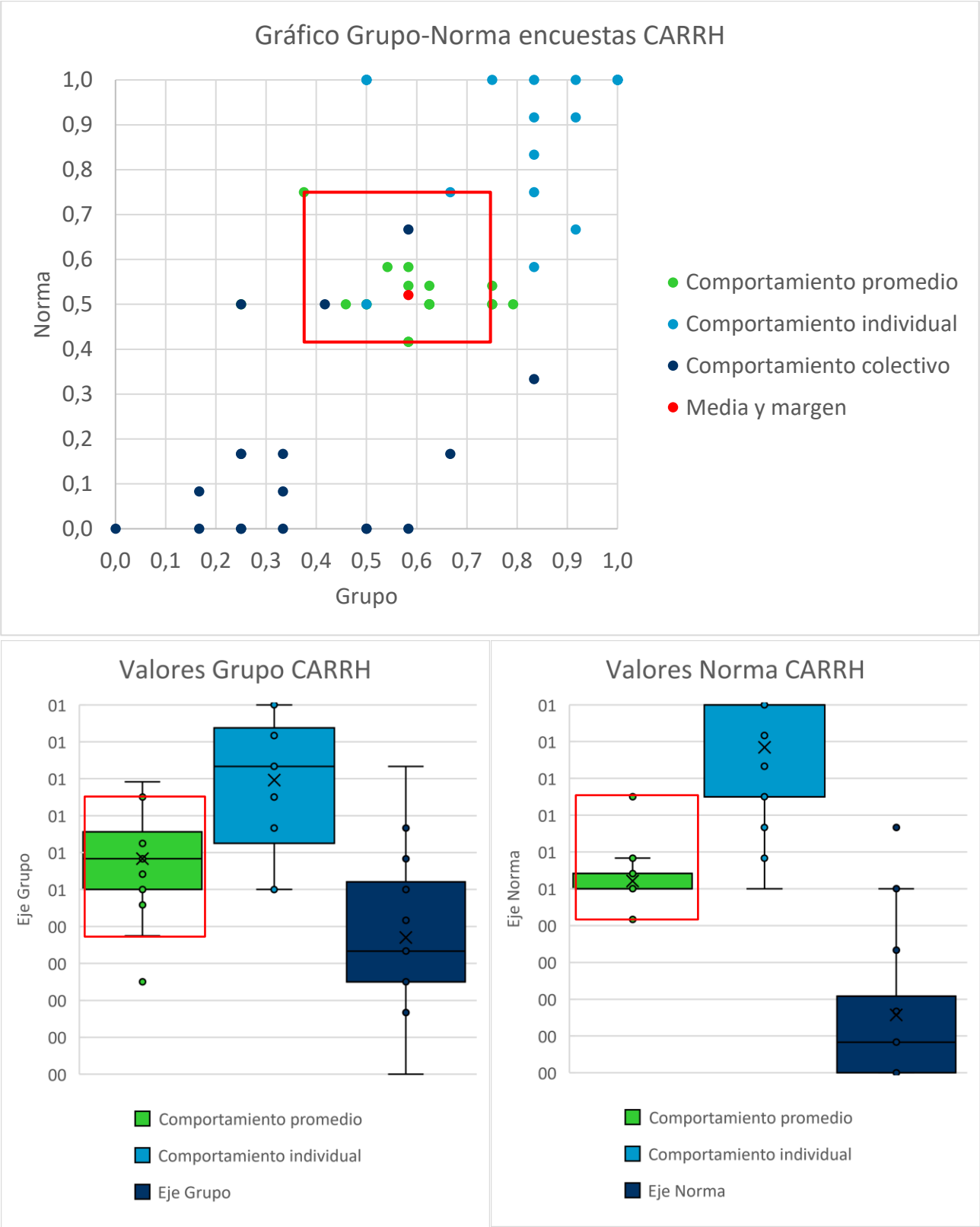
Esta diferenciación es fundamental para definir los puntajes que definirán posición en el eje Grupo (abscisa) o el eje Norma (ordenada), donde la primera refleja los resultados de opiniones personales o individuales – es decir, el grado en que sus elecciones están limitadas por las reglas impuestas y la descripción de sus roles –, y la segunda refleja los resultados de opiniones colectivas – es decir, el valor que las personas ponen en relaciones comunitarias y su compromiso con la unidad social mayor –, respectivamente.

La ponderación de cada pregunta con respecto al puntaje final fue equitativa (todas las respuestas valen lo mismo), así, se obtuvo una dispersión de puntos, según las 3 clasificaciones de comportamiento que se pueden apreciar en la Figura 30 a Figura 32.

Para ambas organizaciones (CARRH y APECO), es bastante clara la tendencia al cumplimiento para el comportamiento individual, preguntas en las cuales los agentes se verían impulsados a cumplir la normativa bajo apercibimiento de beneficios personales (principalmente utilidades económicas y mejoras en la reputación o relaciones sociales). El caso contrario ocurre con el comportamiento colectivo, donde existe menor tendencia al cumplimiento ya que no hay una obtención tangible de beneficios (mejoras ambientales, cumplimiento normativo o sancionamiento) ya que se necesita de una ejecución colectiva para que todos los agentes se vean beneficiados.

De esta dispersión de puntos, bajo un simple manejo estadístico, se eliminaron puntos extremos que eventualmente generaron un ruido no ajustado a una distribución normal, y en base a los máximos y mínimos para cada organización, se fijó un margen de acción (rectángulo rojo). Este

margen se acopló sobre el mapa de la WVS desarrollado por Castilla-Rho et al. (2017) en el GCG el cual se observa en la Figura 32.



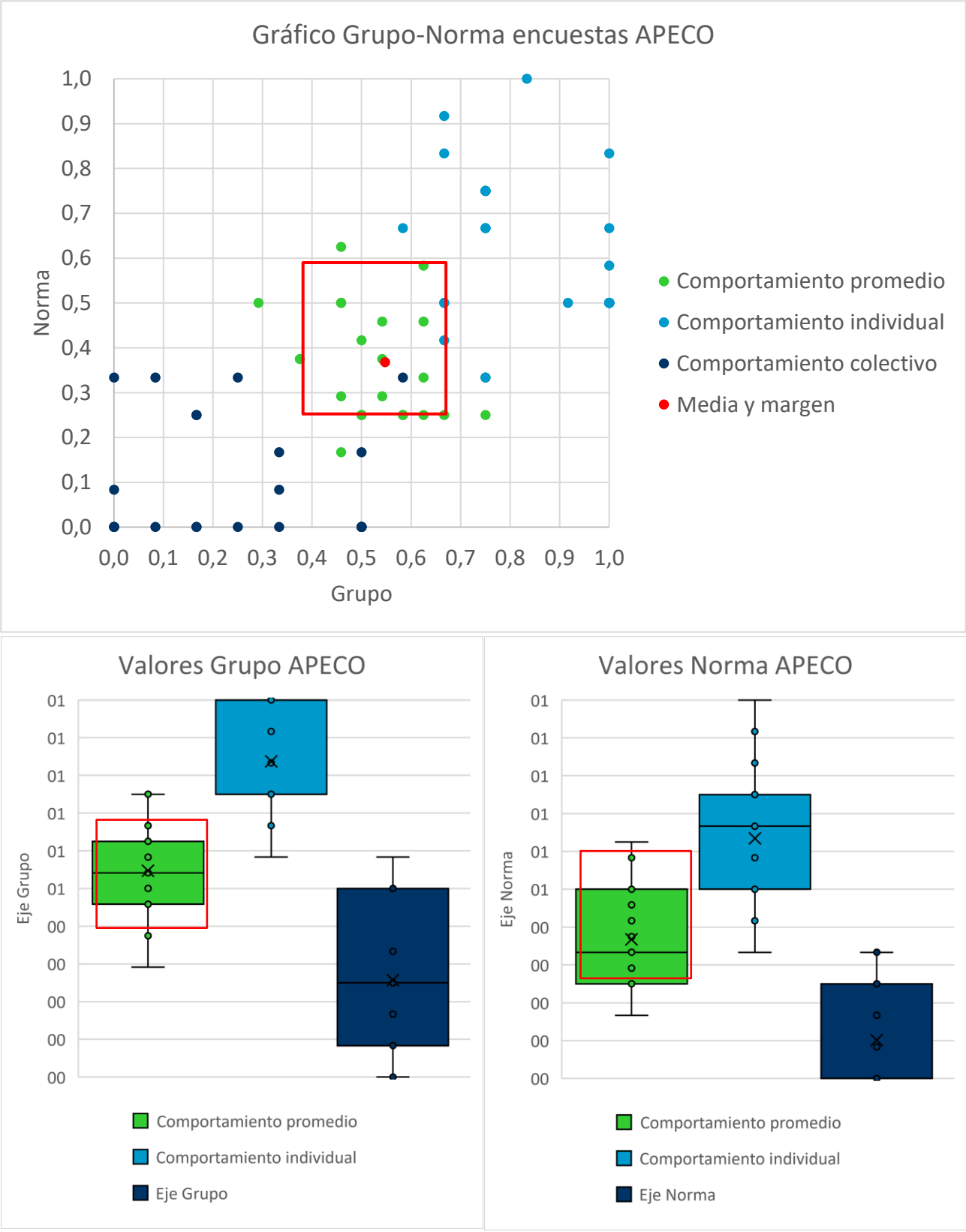


Figura 31 Parametrización para encuestas APECO

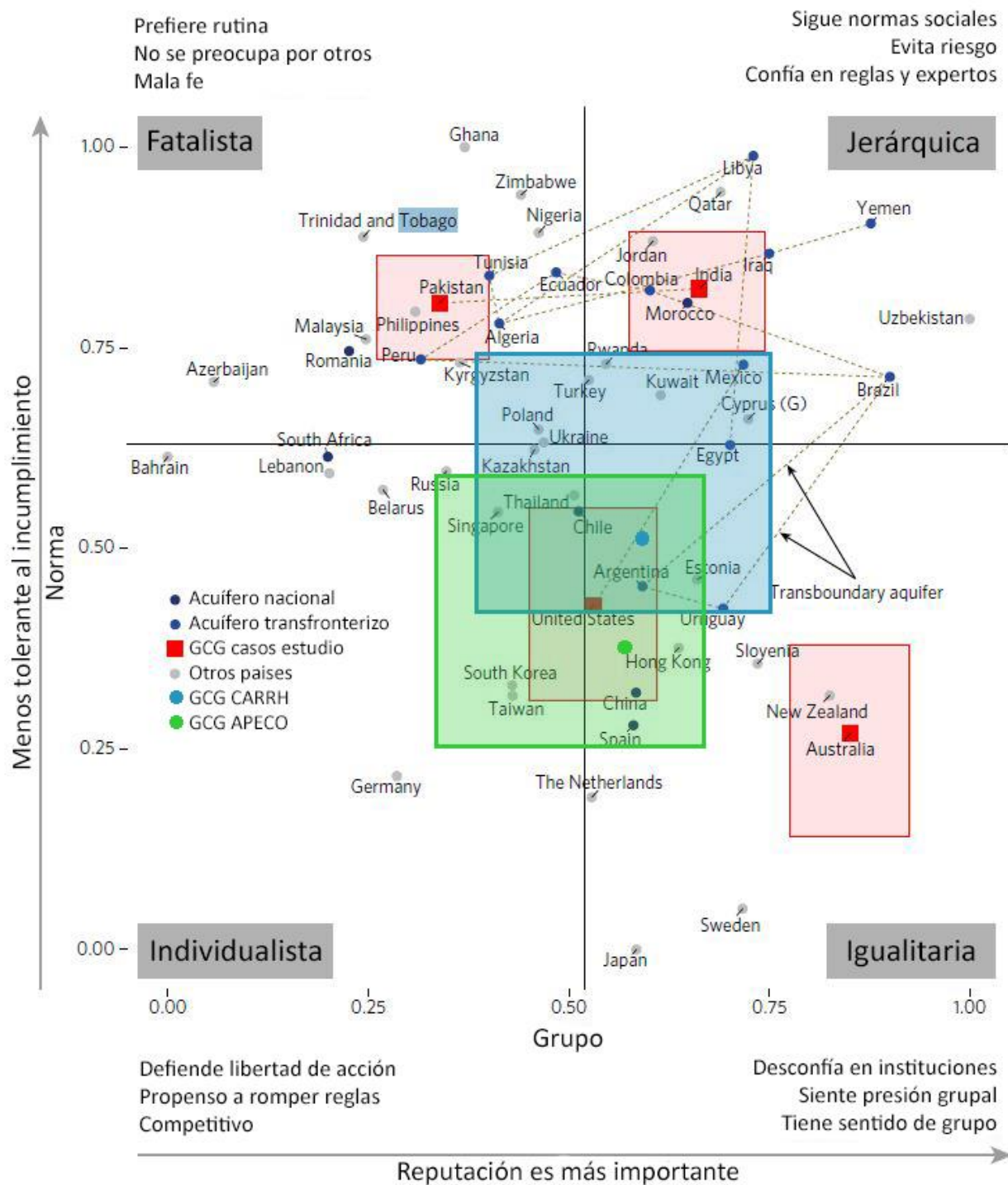


Figura 32 World Value Survey (WVS) y GCG para CARRH y APECO

La obtención de las métricas Norma y Grupo ayudó a caracterizar el comportamiento de los agricultores frente a la imposición de multas y fiscalización por parte de la Dirección General de Aguas. Esta implementación se materializó en la definición de una estrategia de prorrata de aguas subterráneas a lo largo del acuífero de Copiapó, la cual se describe en las siguientes secciones.

3.5 Estrategias hídricas

3.5.1 Levantamiento y definición de estrategias hídricas

Las estrategias hídricas en el contexto de este proyecto tienen por objetivo explorar potenciales mejoras a la situación actual en cuanto al sistema hídrico-social de la cuenca. Más allá de los potenciales impactos (positivos o negativos) de cada estrategia, el desarrollo de estrategias multisectoriales dentro del proceso participativo de este proyecto facilitó un espacio para generar diálogo, debatir y entender diferentes puntos de vista y llegar a acuerdos entre los actores clave de la cuenca. El desarrollo de las estrategias fue un proceso iterativo durante el proyecto, creando instancias para levantar y discutir ideas, y posteriormente validar las estrategias finales.

El proceso de levantamiento de estrategias hídricas comenzó durante el primer taller en enero de 2018. Se agruparon estrategias mencionadas por los asistentes por tema: i) SWAP Hídrico; ii) Eficiencia; iii) Ambiental; iv) Regulación de derechos; v) Infraestructura regularizada (conducción/almacenamiento); vi) Nuevas fuentes; y vii) Recarga artificial de acuíferos. Luego, para profundizar en el tema, los días de 29 y 30 de enero de 2018 se ejecutó los primeros ejercicios grupales con actores representando distintos sectores clave de la cuenca (Figura 33). Cada grupo tuvo que seleccionar las estrategias que querían analizar, partiendo con una discusión guiada para entender cuáles son los actores / instituciones relevantes a cada estrategia, su rol en el desarrollo o ejecución de la estrategia, y las relaciones entre los diferentes actores involucrados. Luego, se profundizó en la conceptualización de las estrategias seleccionadas, en términos de volúmenes de agua relevantes, lugares específicos en la cuenca para enfocar u otra información relevante a su desarrollo. Para facilitar y contextualizar la discusión, cada grupo recibió un mapa de la cuenca y se les animó a dibujar los aspectos clave discutidos. En las figuras abajo se muestra la configuración de los ejercicios. La información recopilada durante estos ejercicios sirvió como base para el diseño del modelo conceptual hídrico-social de la cuenca de Copiapó que fue implementado en la herramienta SimCopiapó. Se acordó que otra visita sería necesaria para profundizar aún más en las diferentes estrategias hídricas.





Figura 33 Fotografías del proceso participativo en la definición de estrategias, primera jornada

En la segunda jornada de trabajo, el día miércoles 11 de abril de 2018, se realizó 2 reuniones con grupos de actores clave. En esta jornada se definió en más detalle las relaciones entre los actores de la cuenca y el alcance de las estrategias, explorando su viabilidad y realizando ajustes para poder implementarlas en SimCopiapó.

Los 5 temas principales a nivel de estrategia que quedaron definidos después de las reuniones con los actores fueron:

1. SWAP (intercambios) de agua (3 sub-estrategias):
 - 1.1 Minera Candelaria traspasa agua desalada a Aguas Chañar y esta deja de bombear desde sus pozos en los sectores 5 y 6;
 - 1.2 Caserones deja de explotar pozos del sector 2 y extrae agua del río Ramadilla;
 - 1.3 Agricultores de los Distritos 8 y 9 dejan de explotar sus aguas y estas son redistribuidas o devueltas al río Copiapó.
2. Infraestructura regularizada (3 sub-estrategias):
 - 2.1 Impermeabilización Embalse Lautaro;
 - 2.2 Entubamiento de canales de riego;
 - 2.3 Planta Desaladora para el sector sanitario.
3. Conservación ambiental; reducción de uso del agua de distintos sectores permite la entrega de un caudal ambiental, se espera también la mantención del humedal de desembocadura.
4. Gestión de recarga de acuíferos.
5. Prorrata de aguas subterráneas.

El taller nº2 tuvo lugar el día 6 de junio de 2018, lo cual tuvo por objetivo revisar y validar las estrategias hídricas definidas entre los actores clave. A la lista anterior, se agregó una estrategia adicional, la reutilización de aguas grises en Copiapó. Para la discusión, se desarrolló un mapa de cada sub-estrategia para facilitar la sensibilización de la información a los asistentes del taller. Cada mapa describe la estrategia espacialmente, destacando los impactos positivos y negativos esperados, los principales sectores acuíferos y actores involucrados, y la cantidad de agua implicada. Por ejemplo, se espera que la estrategia de la desaladora estatal tenga un impacto positivo en los sectores acuíferos 4, 5 y 6 de la cuenca porque se estima que Aguas Chañar reducirá

su bombeo de dichos acuíferos, complementando su suministro con agua desalada y permitir la recuperación de las napas.

Durante el proceso de desarrollo e implementación de las estrategias hídricas en SimCopiapó, la estrategia de orden ambiental se materializó en gran medida como una consecuencia del desarrollo de estrategias o grupos de éstas. Por lo tanto, se decidió no incluir “Conservación Ambiental” como una estrategia individual y se decidió en vez reemplazarlo por un indicador de impacto que puede ser comparado con los resultados de la simulación de diferentes estrategias en la herramienta.

A continuación, se describe en detalle cada estrategia desarrollada e implementada en SimCopiapó.

1.1 Estrategia SWAP - Minera Candelaria traspasa agua desalada a Aguas Chañar y esta deja de extraer de sus pozos de los sectores 5 y 6

Descripción:

Los actores directos relacionados a esta estrategia son la compañía Minera Candelaria (Lundin Mining)⁴ y la empresa sanitaria Aguas Chañar. Candelaria tiene su faena (cobre) en la comuna de Tierra Amarilla, próximo a la localidad del mismo nombre. En la actualidad parte de su suministro proviene de agua desalada a través de su planta ubicada en la comuna de Caldera y es elevada a través de un ducto hasta Tierra Amarilla. Por su parte la empresa sanitaria, extrae agua mayoritariamente de pozos en los sectores 5 y 6 del acuífero del río Copiapó desde donde abastece a las zonas urbanas de las comunas de Tierra Amarilla, Copiapó, Caldera y Chañaral. La estrategia de SWAP propuesta considera un traspaso de agua desalada de Candelaria a la sanitaria en Copiapó, en compensación, la sanitaria le traspasaría el agua servida tratada a la minera.

Supuestos:

- Impacto negativo en los ecosistemas marinos asociados a la salmuera de los procesos de desalinización.
- Impactos positivos en la recuperación de los acuíferos de los sectores 5 y 6 del río Copiapó. Esto supondría un impacto positivo para los regantes de los sectores como CASUB.
- Mayor seguridad hídrica para la provisión de agua potable urbana.
- Mejor calidad de agua potable urbana.

⁴ Producción: 135.439 toneladas de cobre fino y 81.885 onzas de oro. Fuente: Consejo Minero (2016).

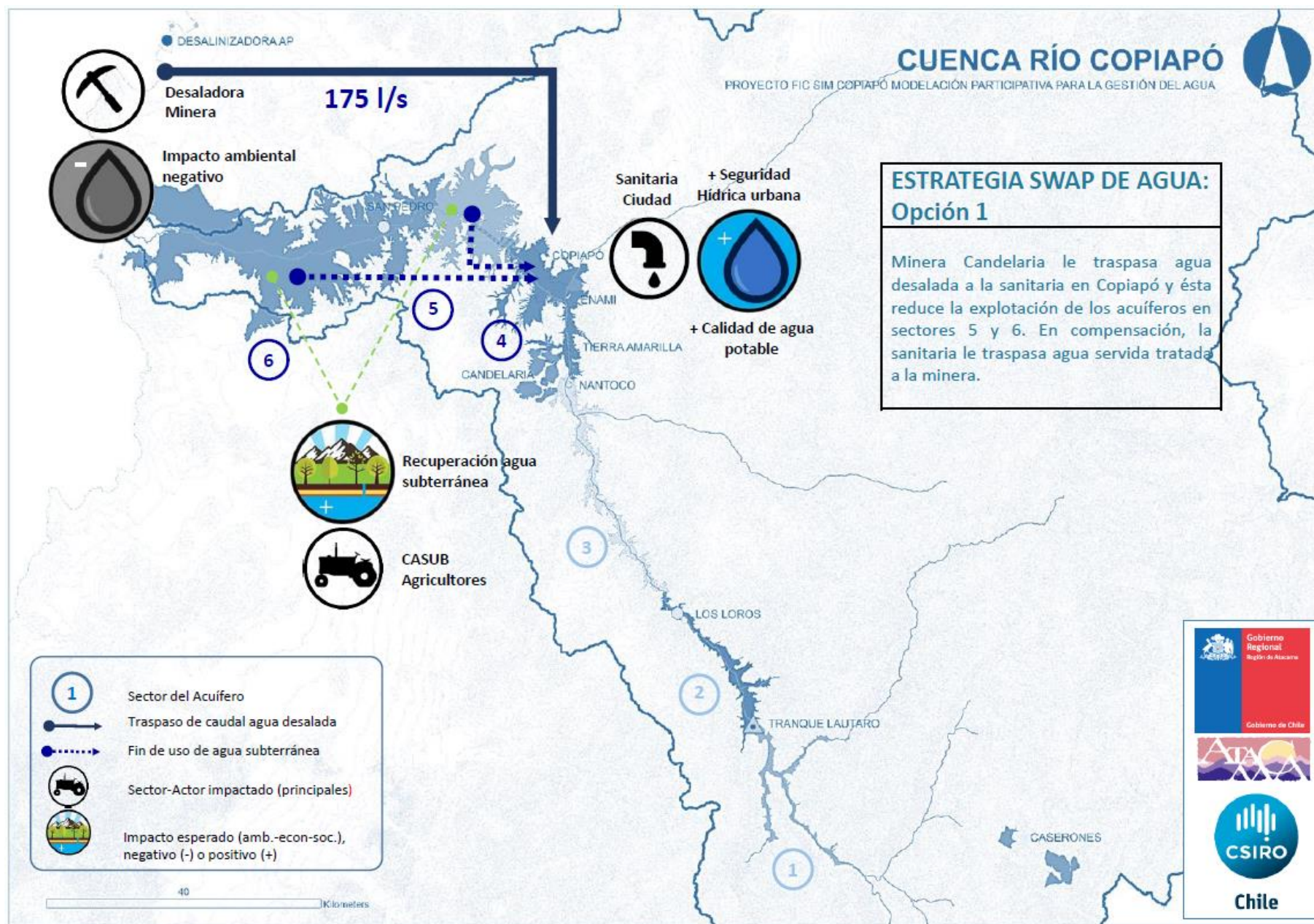


Figura 34 Estrategia SWAP - Minera Candelaria traspasa agua desalada a Aguas Chañar y esta deja de extraer de sus pozos de los sectores 5 y 6

1.2 Estrategia SWAP – minera Caserones deja de explotar pozos del sector 2 y extrae agua del río Ramadilla

Descripción:

El proyecto de la Minera Caserones (SCM Minera Lumina Copper Chile) tiene sus operaciones⁵ en la parte alta de la cuenca del río Copiapó en la comuna de Tierra Amarilla, siendo el asentamiento de Los Loros el principal centro poblado más cercano. La estrategia propone un SWAP de agua para que Caserones deje de explotar sus pozos en el sector 2 del acuífero y en compensación extraiga agua superficial del río Ramadilla afluente del río Pulido el cual está priorizado por la estrategia Regional de Biodiversidad.

Supuestos:

- Impacto negativo sobre el caudal superficial del río Ramadilla. Impacto negativo en las comunidades indígenas y ecosistemas del río Ramadilla. También se espera un impacto negativo en los niveles del Embalse Lautaro afectando a los regantes (JVRC).
- Impactos positivos en la recuperación del acuífero del sector 2. Esto supondría un impacto positivo para los regantes de los sectores como CAS 123 lo que se traduciría en menores costos de bombeo.
- Esto se traduciría en potencialmente menores costos de bombeo para la minera.

⁵ Producción: cátodos de cobre (30.000 toneladas anuales), cobre fino contenido en concentrados (110.000 a 150.000 toneladas anuales); molibdeno contenido en concentrados (3.000 toneladas anuales). Fuente: www.caserones.cl

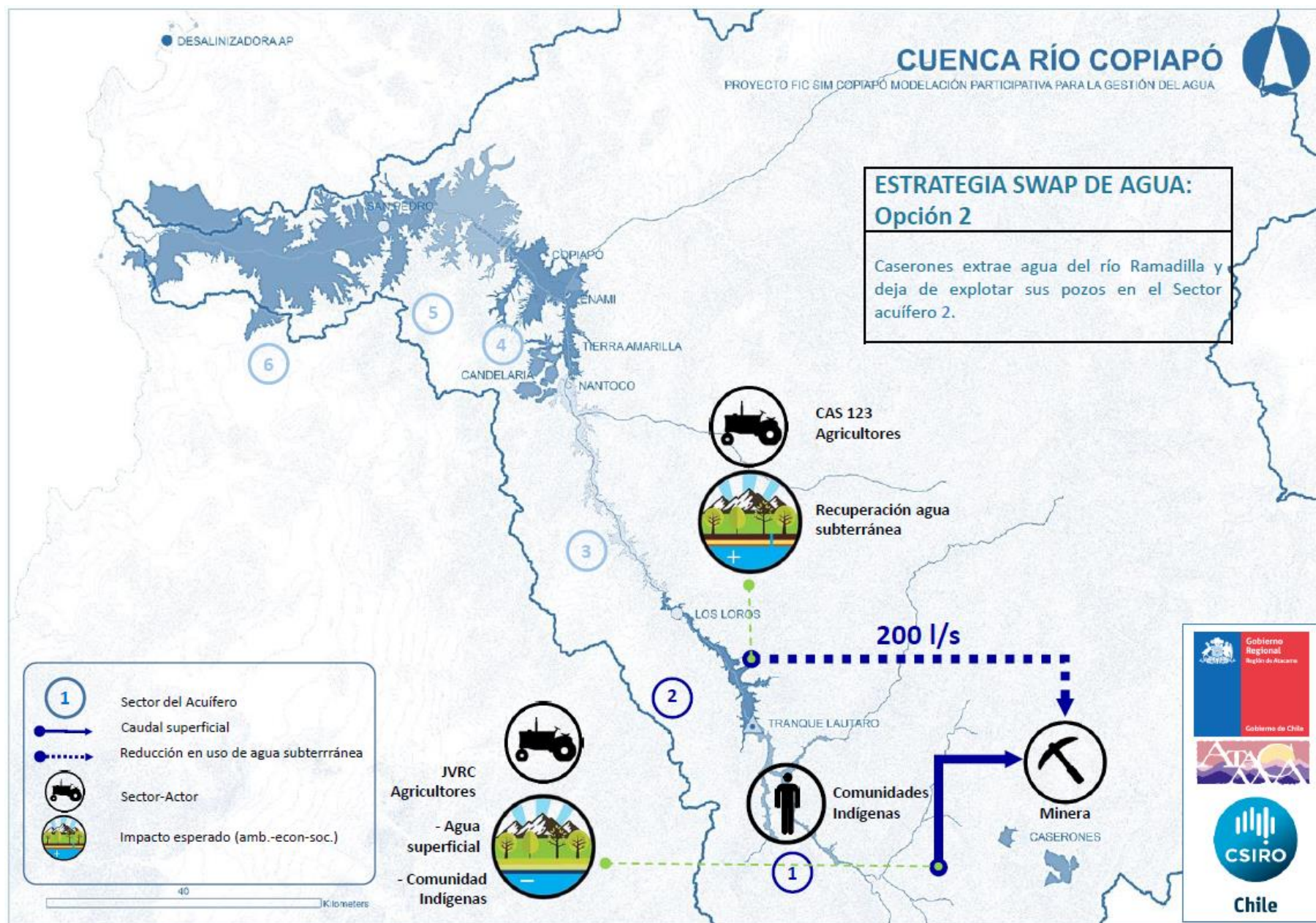


Figura 35 Estrategia SWAP - Caserones deja de explotar pozos del sector 2 y extrae agua del río Ramadilla

1.3 Estrategia SWAP - agricultores de los distritos 8 y 9 dejan de explotar sus aguas y estas son redistribuidas o devueltas al río Copiapó

Descripción:

Existe un crecimiento urbano acelerado en los últimos años producto de los altos precios de los metales⁶ lo que ha expandido la ciudad hacia sectores rurales siendo el actual límite norte oriente de Copiapó el sector de Paipote. En ese proceso, la reconversión urbana del sector del pueblo de San Fernando de la ciudad de Copiapó, lleva a los agricultores del distrito de riego 8 y 9 con derechos de aprovechamiento de agua (DAA) superficial a traspasar el agua disponible durante el año a otro sector-actor:

- a) Distrito riego 1-7;
- b) Aguas Chañar;
- c) Recarga natural de sectores acuíferos 5 y 6 a través del río;
- d) Agricultores del sector acuífero 5 por tubería, excedentes al río;
- e) Agricultores del sector acuífero 5 por tubería, excedentes recarga artificial.

Supuestos:

- Aportaría a mayor seguridad de riego para actores de la cuenca (JVRC – CASUB).
- Aportaría mayor seguridad hídrica para la provisión de agua potable.
- Puede generar impactos positivos en la recuperación de los sectores del acuífero 5 y 6.
- Puede traducirse en un mayor caudal superficial mejorando las condiciones del ecosistema de la cuenca.
- Se asume que la superficie bajo riego superficial no aumenta.

⁶ Para mayor referencia del proceso de crecimiento urbano de Copiapó y su relación con el desarrollo minero ver: Carrasco, P. 2010. Crecimiento Urbano de Copiapó: causales, patrones y perspectivas. Cámara Chilena de la Construcción.

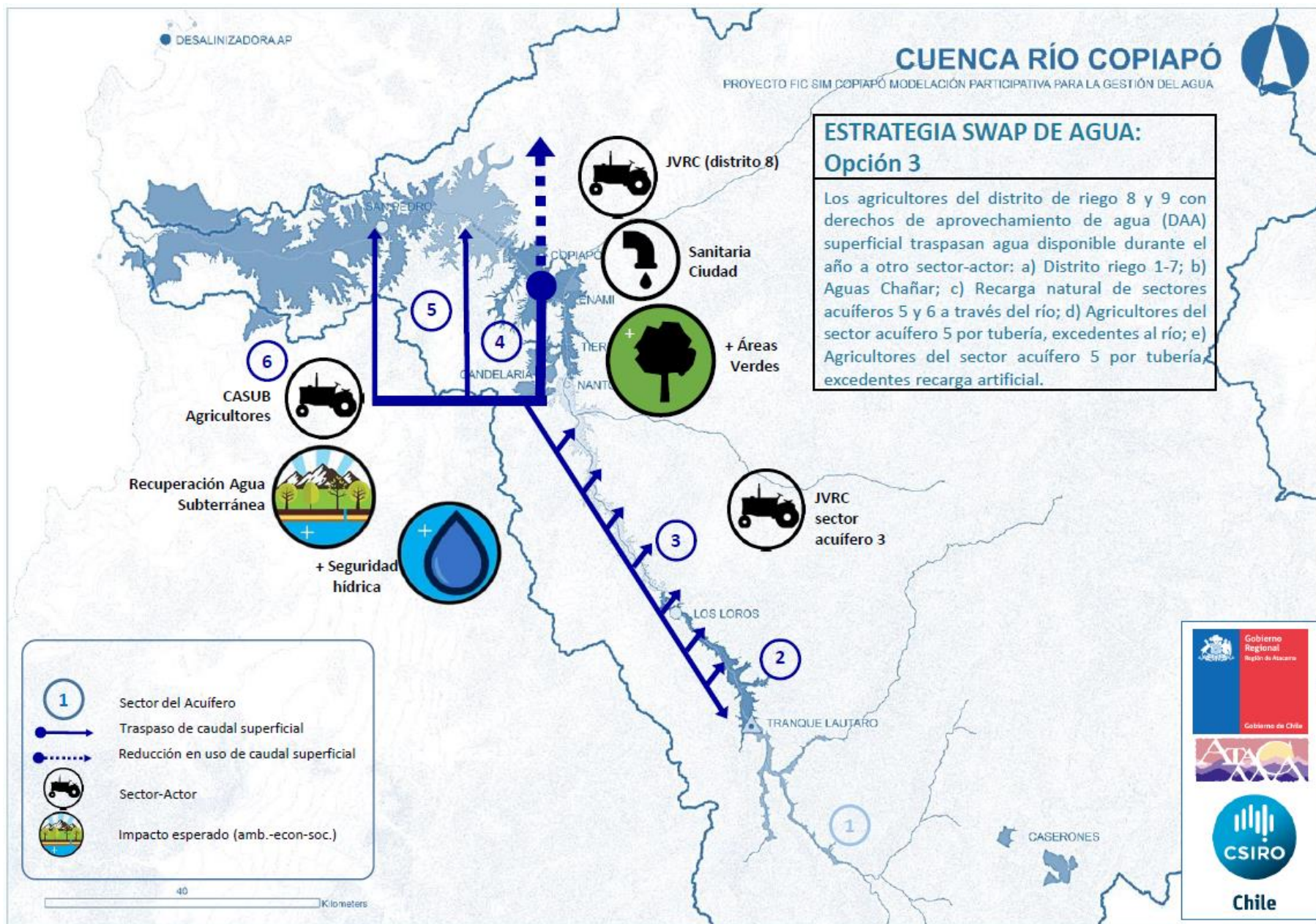


Figura 36 Agricultores de los Distritos 8 y 9 dejan de explotar sus aguas y estas son redistribuidas o devueltas al río Copiapó

2.1 Estrategia infraestructura – impermeabilización Embalse Lautaro

Descripción:

El Embalse Lautaro tiene una capacidad actual máxima⁷ de 25.4 Hm³, con valores de infiltración cercanos al 50% del agua embalsada⁸. La estrategia tiene por objetivo impermeabilizar un porcentaje de la superficie de fondo del Embalse Lautaro para disminuir su infiltración y asegurar más agua superficial a repartir igualmente entre los nueve distritos de riego existentes. Esta infraestructura está administrada por la Junta de Vigilancia del Río Copiapó y sus afluentes.

Supuestos:

- Se reduce la recarga y flujos subterráneos pasantes al sector acuífero 2. Potencialmente en el largo plazo puede impactar negativamente al resto de los sectores del acuífero (4-5-6)
- Mayor disponibilidad de agua superficial para riego (JVRC). Mayor seguridad hídrica.
- Potencialmente la mayor disponibilidad de agua superficial puede permitir la presencia de un caudal ambiental de forma más regular. Esto podría impactar positivamente en los acuíferos de los sectores 3-4-5-6.

⁷ El Embalse fue construido entre los años 1928 y 1942 con una capacidad inicial de 42 millones de m³.

⁸ Fuente: Junta de Vigilancia del Río Copiapó y sus afluentes.

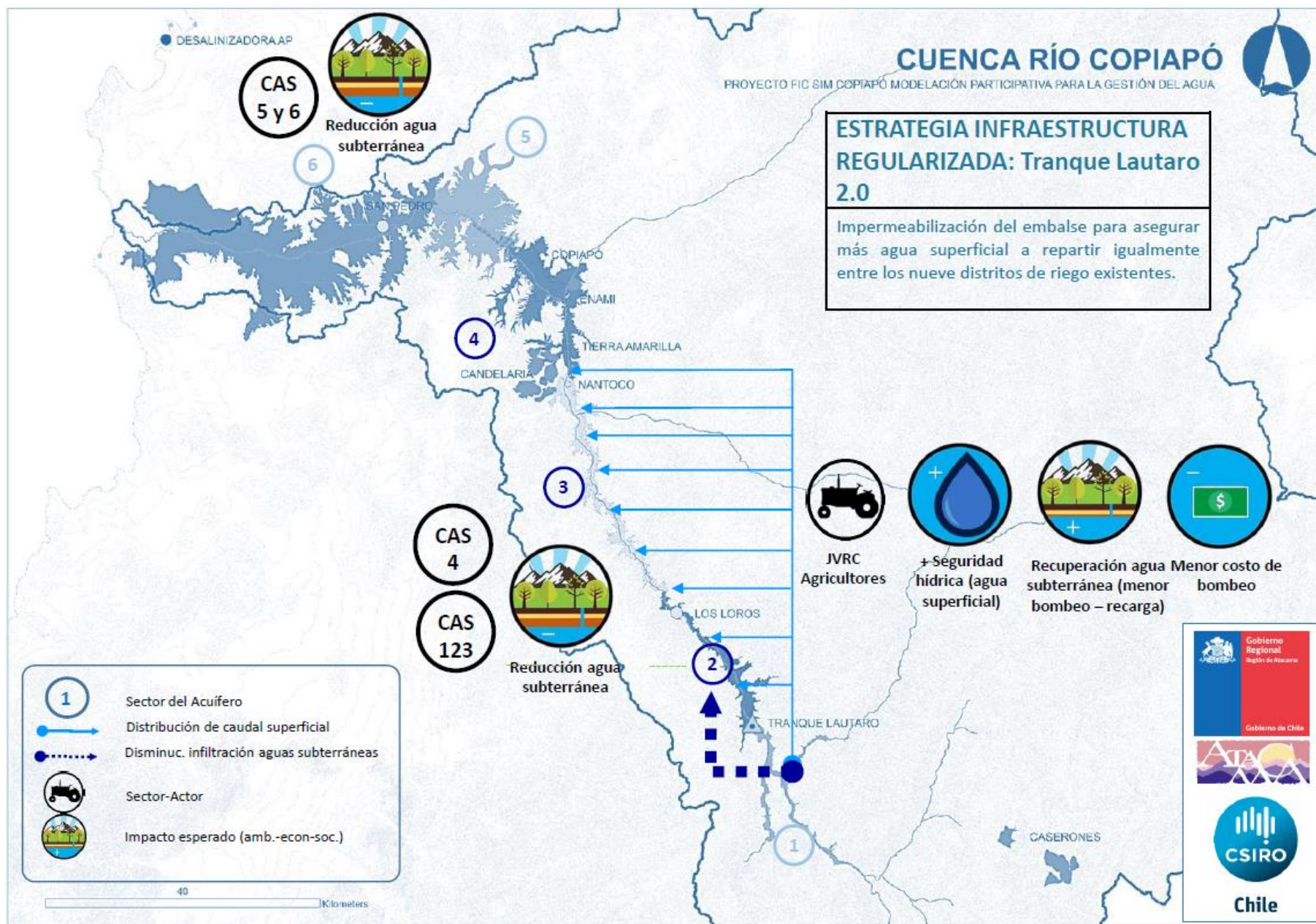


Figura 37 Estrategia infraestructura – Impermeabilización Embalse Lautaro

2.2 Estrategia infraestructura – entubamiento canales de riego

Descripción:

Actualmente existe una “pérdida” de 42% (promedio)⁹ de agua en los canales causada por infiltración y evaporación. La estrategia contempla el entubamiento de todos los canales de riego para mejorar su eficiencia.

Supuestos:

- No hay expansión de la superficie regada.
- Se espera una reducción de la infiltración a los acuíferos de los sectores 1-2-3-4 con potenciales mayores costos de bombeo para la CAS 123 y CAS 4.
- Se espera un impacto positivo de mayor agua de riego disponible para la JVRC.

⁹ Proyecto Innova Chile – CIREN “Optimización de Sistemas de Riego en las Cuencas Copiapó y Huasco” (junio 2007)

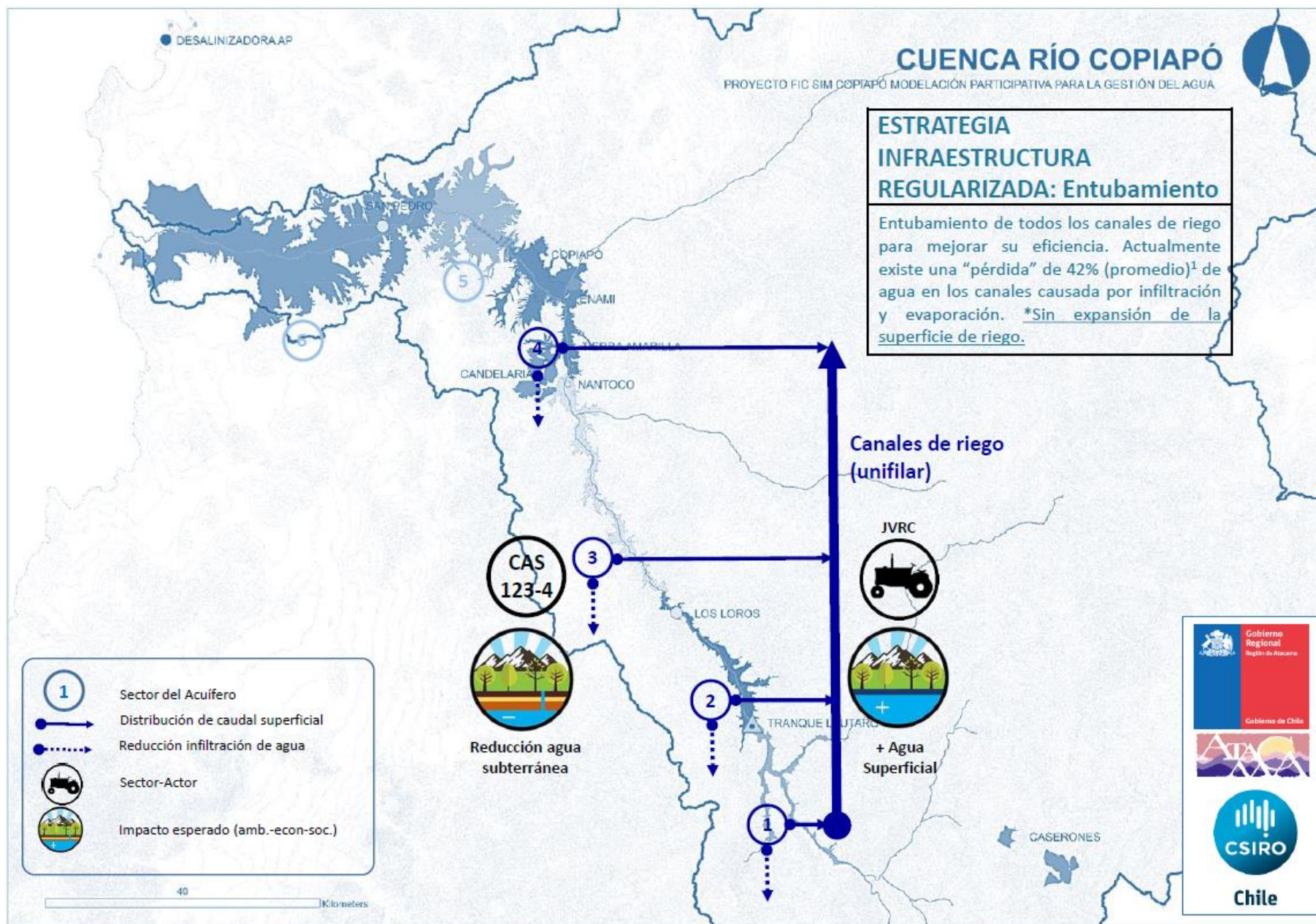


Figura 38 Estrategia Infraestructura – Entubamiento

2.3 Estrategia infraestructura – planta desaladora estatal

Descripción:

Esta estrategia contempla la entrada en operación de la primera planta desalinizadora estatal para asegurar el agua para el sector sanitario que proporcionará hasta 1.200 l/s¹⁰. La planta estará ubicada en la comuna de Caldera y proveerá de agua a las comunas de Tierra Amarilla, Copiapó, Caldera y Chañaral.

Supuestos:

- Se espera un impacto ambiental negativo en los ecosistemas marinos producto de la concentración de salmuera de la desaladora.
- Se espera una mayor seguridad hídrica para la provisión de agua potable.
- Se espera una mayor calidad de agua potable producto del proceso de osmosis.
- Se espera un alza en la tarifa a los usuarios productos de los mayores costos de bombeo que supone la elevación del agua desde la costa hasta los centros urbanos.
- Se espera un impacto positivo en los niveles de los acuíferos de los sectores 5 y 6, por la disminución progresiva de uso de los pozos en ese sector por parte de la sanitaria. Es también posible que el uso de la desaladora sea utilizado sólo como respaldo ante situaciones críticas.

¹⁰ Primera etapa: construcción de una planta con capacidad para 450 l/s, además de las obras marinas requeridas para todo el proyecto (1.200 l/s). Segunda etapa: ampliación de la capacidad en 450 l/s adicionales (alcanzando un total de 900 l/s). Tercera etapa: ampliación de la capacidad en 300 l/s (alcanzando los 1.200 l/s). Fuente: ECONSSA.

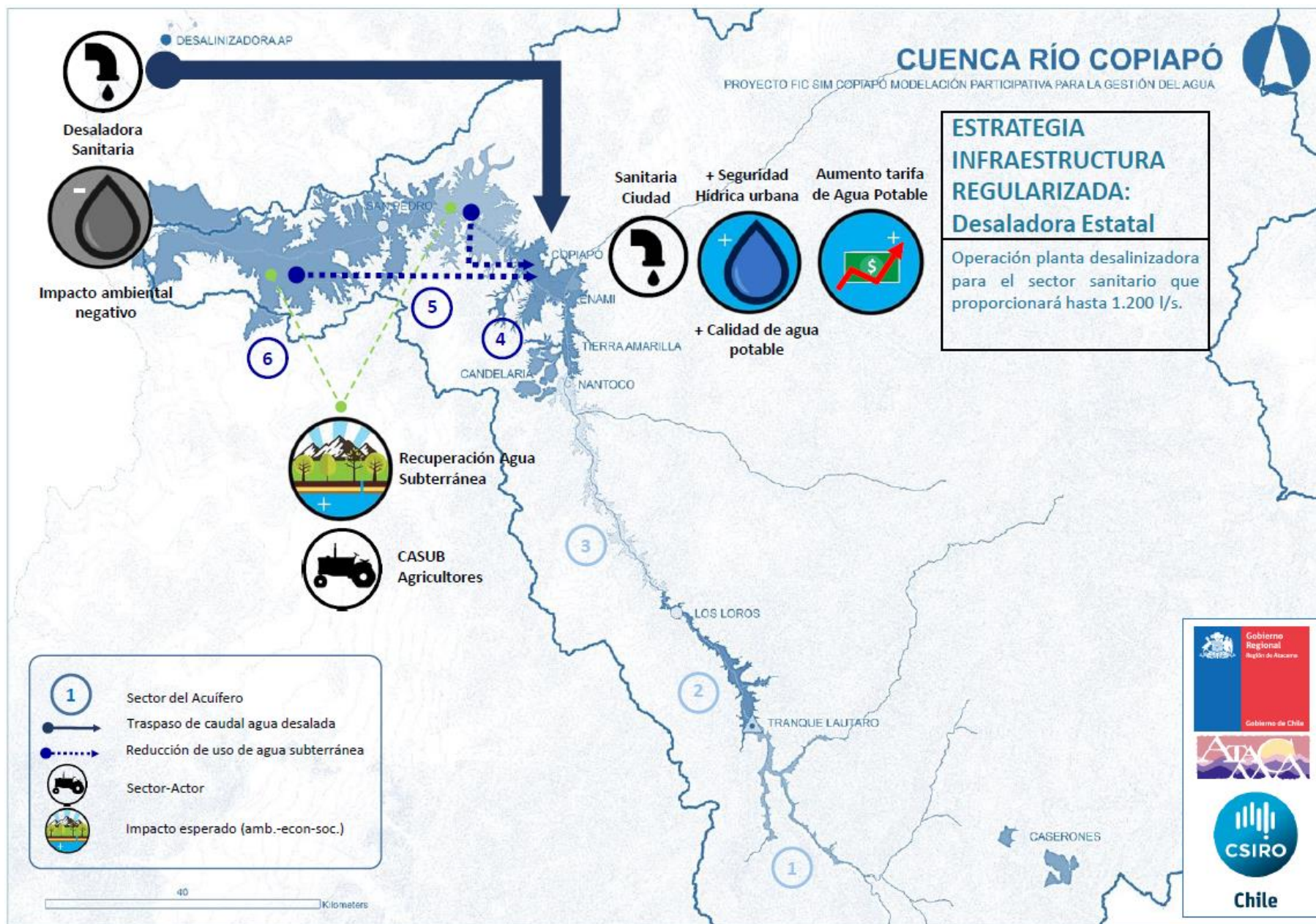


Figura 39 Estrategia Infraestructura - Desaladora Estatal

3.1 Estrategia recarga artificial acuífero

Descripción:

Se plantea la recarga de acuíferos a través de piscinas de infiltración. Posterior a eventos hidrometeorológicos extremos como los del 2015 y 2017, diversas obras fueron utilizadas para recarga, donde se ha destacado por los actores el rol del cauce del río en este proceso. Se plantea que los caudales puedan ser aprovechados con prácticas de recarga en los siguientes sectores:

1. Nantoco;
2. Antes de Parque Kaukari;
3. Después de Parque Kaukari;
4. Piedra Colgada.

Supuestos:

- Se espera un impacto positivo sobre la recuperación de los acuíferos de las zonas 3-4-5-6.
- Se espera una sociedad civil más protegida frente a eventos extremos.
- Se espera una mayor seguridad hídrica para los distintos actores que dependen del agua en los sectores de recarga.

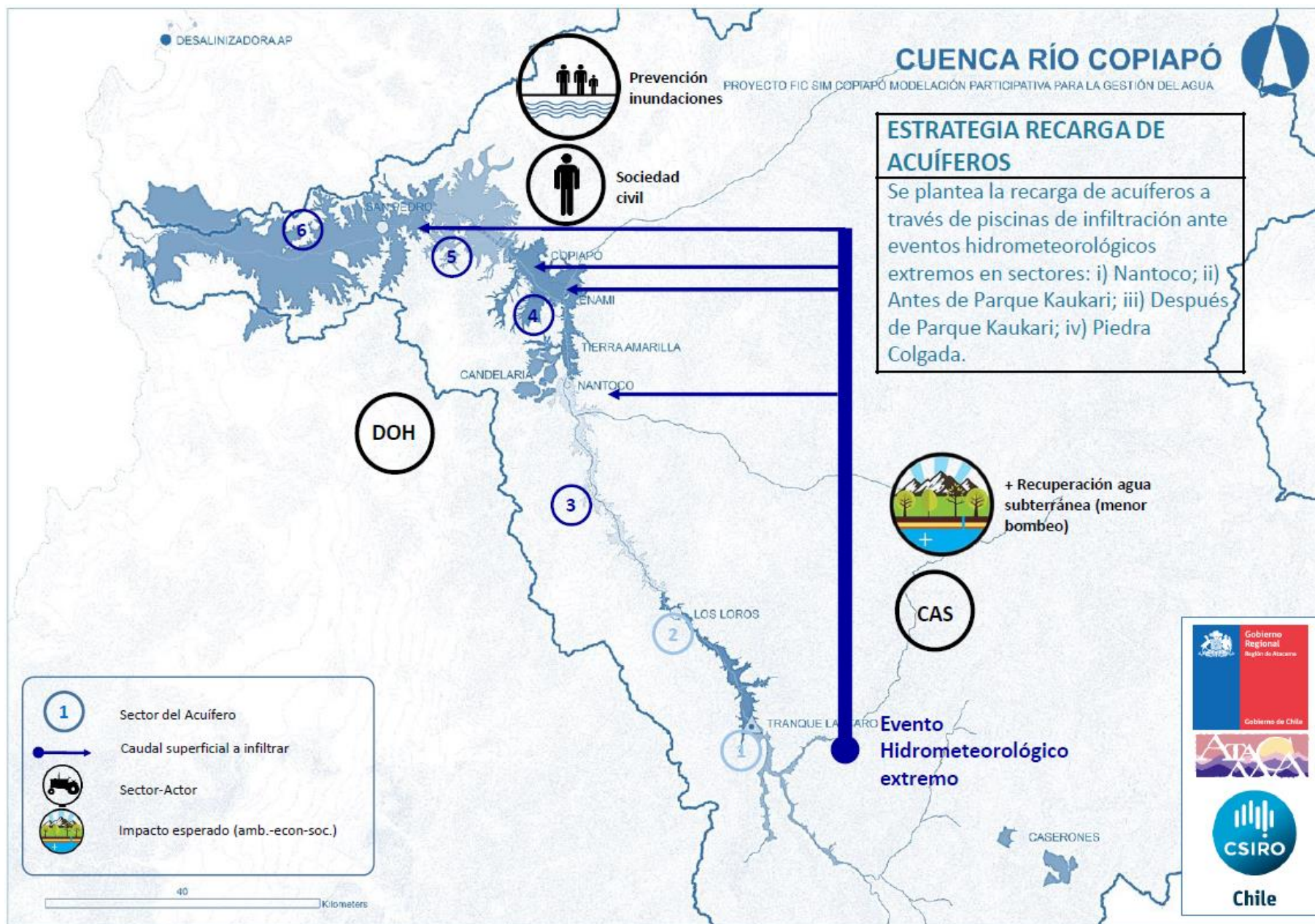


Figura 40 Estrategia Gestión de Recarga de Acuíferos

4.1 Estrategia prorata agua subterránea

Descripción:

Se realiza prorata sobre las aguas subterráneas lo que implica la restricción de los caudales de bombeo. Se puede ajustar distintos niveles de prorrateo independientemente para bombeos agrícolas y/o mineros y/o para cada sector acuífero. Esta estrategia incluye la información sobre Audacia y Castigo recopilada mediante encuestas para su implementación mediante el modelo ABM desarrollado en SimCopiapó.

Supuestos:

- Se espera un impacto positivo sobre la recuperación de los acuíferos de la cuenca. Esto implicaría una mayor seguridad hídrica.
- Se espera un impacto de corto plazo en aquellos actores dependientes del uso del agua subterránea en especial para el sector agrícola.
- Se esperan distintos grados de cumplimiento del prorrateo según el grado de monitoreo y/o la imposición de multas desde el sector público-regulador.

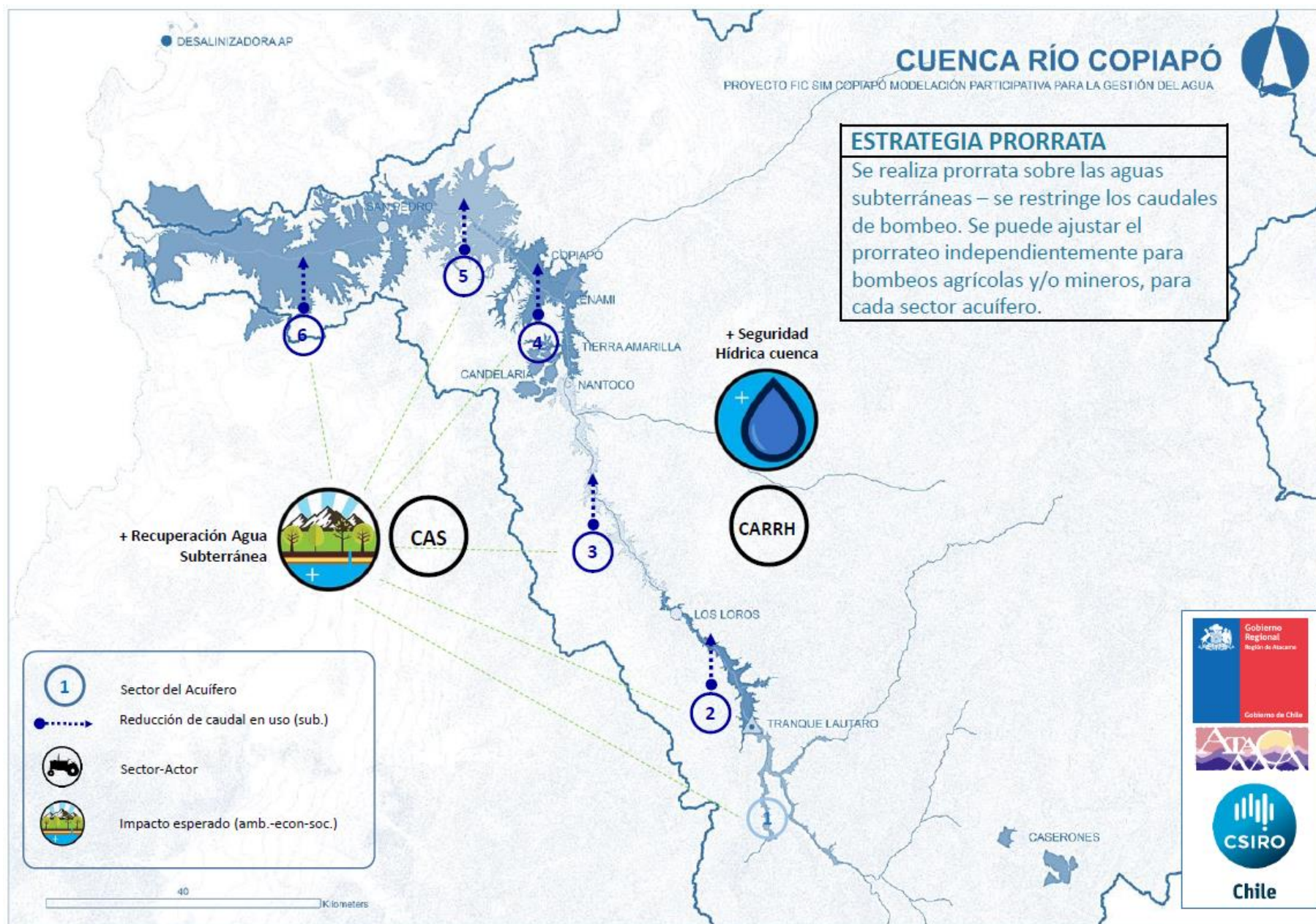


Figura 41 Estrategia Prorrata

5.1 Estrategia reutilización aguas grises

Descripción:

Los usuarios de agua potable de la ciudad reducen su consumo debido a nuevas tecnologías de reúso del agua y el nuevo marco normativo aprobado recientemente para promover esta práctica.

Supuestos:

- Se espera una reducción de la tarifa por un mejor uso del agua potable a nivel urbano.
- Se espera una menor demanda de agua potable por el uso más eficiente de las aguas grises y por tanto una reducción en los requerimientos de bombeo de la sanitaria en los sectores acuíferos 5 y 6.

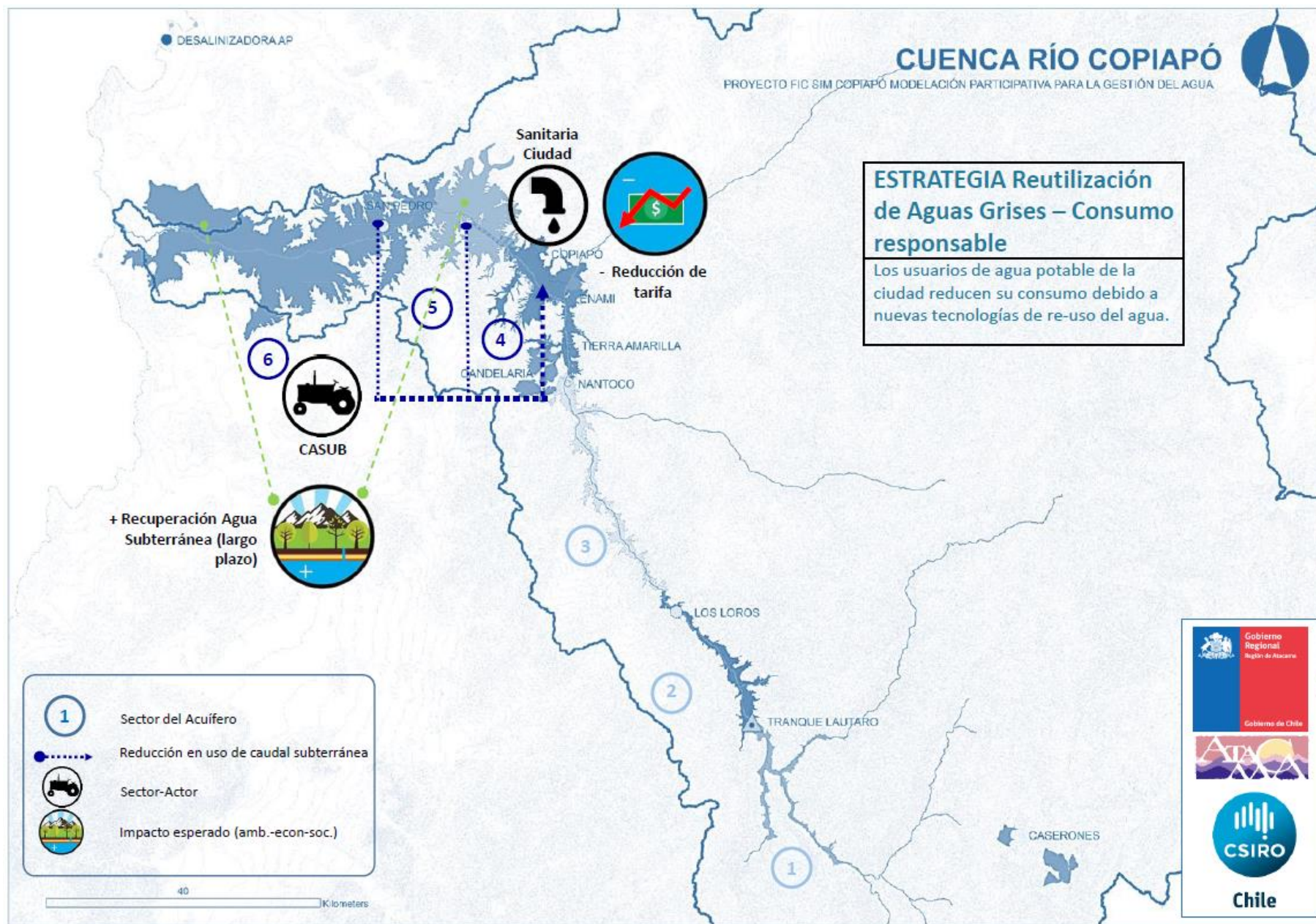


Figura 42 Estrategia Reutilización de Aguas Grises

3.5.2 Impacto de las estrategias en el modelo acoplado

La Tabla 17 resume como las estrategias levantadas a través de los talleres participativos y simuladas por la herramienta SimCopiapó impactan los distintos componentes del modelo acoplado.

Tabla 17 Estrategias implementadas en SimCopiapó y su impacto en los componentes del modelo acoplado

Estrategia	Descripción	Impacto en el modelo integrado
1.1	Swap Candelaria – Aguas Chañar	Disminuye el bombeo de los pozos de Aguas Chañar en el sector 5 en 175 L/s.
1.2	Swap Caserones – río Ramadilla	Reduce el bombeo de los pozos mineros ubicados en el sector 2 en 200 L/s, disminuye serie hidrológica en la estación fluviométrica de la DGA en Pastillos en 200 L/s.
1.3-a	Swap D89 a D17	El reparto (acciones) originalmente destinado a los distritos 8 y 9 se redistribuyen en los distritos 1 al 7, con los excedentes retornados al río Copiapó.
1.3-b	Swap D89 a Aguas Chañar	Disminuye el bombeo de los pozos de Aguas Chañar en proporción al agua de reparto destinada a los distritos 8 y 9.
1.3-c	Swap D89 a recarga natural río Copiapó	El reparto (acciones) originalmente destinado a los distritos 8 y 9 se desvía al río Copiapó aguas arriba del parque Kaukari.
1.3-d	Swap D89 a agricultura Sector 5 por tubería (excedente a recarga natural río Copiapó cabecera Sector 6)	El reparto (acciones) originalmente destinado a los distritos 8 y 9 se entrega a los regantes del sector acuífero 5 mediante una tubería. Los excedentes se devuelven al río Copiapó en el sector Piedra Colgada.
1.3-e	Swap D89 a agricultura Sector 5 por tubería (excedente a recarga artificial Sector 5)	El reparto (acciones) originalmente destinado a los distritos 8 y 9 se entrega a los regantes del sector acuífero 5 mediante una tubería. Los excedentes se ocupan para recargar el acuífero mediante obras de infiltración ubicadas en el sector acuífero 5.
2.1	Impermeabilización Embalse Lautaro	Simula la impermeabilización del embalse a partir del año 5 de la simulación. Permite ajustar la superficie impermeabilizada entre 0-100%.
2.2	Entubamiento canales de riego	Fija las infiltraciones de los canales de riego = 0 en los distritos de la JVRC.
2.3	Operación planta desaladora estatal	Permite simular un cronograma de apagado de pozos de Aguas Chañar, indicando el año en el cual cada pozo se saca de servicio.
3.1	Recarga artificial acuífero	Simula la infiltración de caudales del río Copiapó en cuatro puntos: (i) Nantoco, (ii) antes del parque Kaukari, (iii) después de Parque Kaukari, y (iv) Piedra Colgada. Se considera una tasa de recarga nominal de 1 m/d (el valor puede ajustarse a través de la interfaz web) y un área disponible para obras de infiltración de 3,5 hectáreas en cada uno de los cuatro sectores. El volumen a recargar corresponde al mínimo valor entre el caudal del río Copiapó y el caudal que es posible infiltrar (tasa nominal x área disponible).
4.1	Prorrata agua subterránea	Simula el prorrateo (disminución) de las demandas agrícolas y mineras (en conjunto o por separado), definiendo un factor de reducción entre 0-100%.
5.1	Reutilización aguas grises	Reduce la demanda de agua potable, definiendo un factor de reducción en el uso entre 0-100%.

La interfaz web de SimCopiapó permite simular y visualizar el impacto de las estrategias de manera individual o conjunta (ver Secciones 3.7 y 4.2).

3.6 Indicadores de Impacto

Los indicadores de impacto tienen por objetivo facilitar la comparación de resultados entre las estrategias y el escenario base, en cuanto a impactos ambientales, sociales y económicos. Durante el taller 2 se dio espacio para explorar, en conjunto con los actores, potenciales indicadores para incluir en SimCopiapó, relevantes a las estrategias. Con el fin de comparar diferentes indicadores al mismo tiempo para una estrategia o una combinación de estrategias, se decidió generar una gráfica de radar con una red de 9 diferentes indicadores predefinidos. A continuación, se presenta el listado de los indicadores de impacto seleccionados e implementados en SimCopiapó:

3.6.1 Caudal urbano entre 0 y 5000 L/s

Este indicador muestra la proporción del tiempo simulado que el caudal registrado en río Copiapó en Ciudad de Copiapó se encuentra en el rango [0 y 5000] L/s, y refleja un impacto positivo sobre la calidad de vida (indicador social) al contar con escurrimiento superficial en la ciudad de Copiapó a la altura del Parque Urbano Kaukari.

3.6.2 Caudal ecológico sobre 50 L/s

Este indicador muestra la proporción del tiempo simulado que el caudal en la estación desembocadura se encuentra por sobre los 50 L/s como indicador ambiental relacionado a la calidad del humedal de la desembocadura del río Copiapó.

3.6.3 Volumen Lautaro > 50%

Este indicador muestra la proporción del tiempo simulado que el volumen del Embalse Lautaro se encuentra sobre el 50% de su capacidad de almacenamiento.

3.6.4 Volumen acuífero S2

Este indicador muestra la tasa de cambio del volumen almacenado con respecto al volumen inicial del sector acuífero 2. Por ejemplo, un valor del 100% indica que el volumen del sector acuífero al final del período de simulación es igual o mayor que el volumen inicial para ese sector.

3.6.5 Volumen acuífero S3

Este indicador muestra la tasa de cambio del volumen almacenado con respecto al volumen inicial del sector acuífero 3. Por ejemplo, un valor del 100% indica que el volumen del sector acuífero al final del período de simulación es igual o mayor que el volumen inicial para ese sector.

3.6.6 Volumen acuífero S4

Este indicador muestra la tasa de cambio del volumen almacenado con respecto al volumen inicial del sector acuífero 4. Por ejemplo, un valor del 100% indica que el volumen del sector acuífero al final del período de simulación es igual o mayor que el volumen inicial para ese sector.

3.6.7 Volumen acuífero S5

Este indicador muestra la tasa de cambio del volumen almacenado con respecto al volumen inicial del sector acuífero 5. Por ejemplo, un valor del 100% indica que el volumen del sector acuífero al final del período de simulación es igual o mayor que el volumen inicial para ese sector.

3.6.8 Volumen acuífero S6

Este indicador muestra la tasa de cambio del volumen almacenado con respecto al volumen inicial del sector acuífero 6. Por ejemplo, un valor del 100% indica que el volumen del sector acuífero al final del período de simulación es igual o mayor que el volumen inicial para ese sector.

3.6.9 % cumplimiento prorrata

Este indicador muestra el nivel de cumplimiento (adhesión) a las restricciones hídricas impuestas expresado como un porcentaje de los agricultores siguiendo la prorrata, para un nivel dado de fiscalización y multas aplicadas por el organismo regulador.

Los indicadores listados son en gran parte transversal a todas las estrategias con la excepción del cumplimiento prorrata, lo cual es específico a la Estrategia 4.1: Prorrata. En la Figura 43, se muestra un ejemplo del gráfico de radar que compara los diferentes indicadores de impacto para un escenario base y un escenario simulado, es decir, con una estrategia implementada.

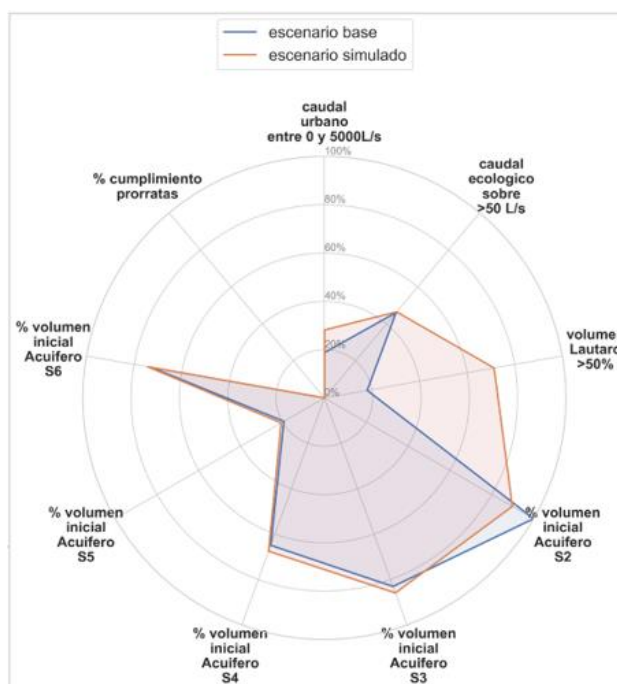


Figura 43 Ejemplo de gráfico de radar que resume los indicadores de impacto del escenario base y escenario simulado

3.7 Interfaz web

Esta sección describe la interfaz web de SimCopiapó en términos generales. El Manual de Usuario (<https://research.csiro.au/gestion-copiapó/?ddownload=652>) desarrollado para SimCopiapó explica en más detalle como instalar, usar y interpretar los resultados de la herramienta. Además, el manual incluye un Ejemplo de Caso para simular una combinación de estrategias predefinido.

3.7.1. Marco general

El diseño del software de la herramienta se basó en los requisitos para un sistema de modelado reutilizable sobre el cual se pueden construir modelos espaciotemporales personalizados. Por lo tanto, la herramienta SimCopiapó constó de dos partes principales: el producto del marco genérico de modelado espacial/temporal con una interfaz de usuario (Graphical User Interface, GUI) basada en un navegador web y el modelo hidrológico-hidrogeológico personalizado de agua superficial/subterránea para la cuenca de Copiapó.

3.7.2. Marco de modelamiento

El marco de modelamiento genérico consistió en una clase base abstracta de Python (sobre la cual se heredan las clases de submodelos personalizados), una API web y un front-end HTML/JavaScript. Desde el punto de vista del desarrollador del modelo, solo se necesitó implementar una única clase de Python que herede una clase base para construir un modelo.

El desarrollador del modelo (Model Developer) no necesita conocer ni interactuar de forma directa con ninguna de las tecnologías basadas en la web, solo necesita escribir un código base Python y puede utilizar una gama de tipos de entrada de modelos predefinidos, tipos de salida y tipos de capa espacial para obtener información del usuario y mostrar la salida del modelo en la interfaz del

usuario. Una vez que las entradas y salidas son inicializadas, en la clase de Python del desarrollador del modelo, el proceso de agregarlas dinámicamente y construir la página del sitio web es completamente automatizado. El sistema también admite la exportación de conjuntos de datos desde controles de salida individuales como texto al portapapeles, y la generación y exportación de un documento (Informe) a petición del usuario a través de la interfaz del usuario.

El sistema admite entradas básicas como números (enlazados o no enlazados), opciones seleccionadas de una colección, y valores booleanos. Algunos tipos de salida incluyen valores escalares, series de tiempo, histogramas, gráficos de radar, gráficos circulares y gráficos de caja. Para salidas de datos espaciales, el sistema admite la visualización de GeoTIFF y Shapefile preexistentes o generados, y Rasters, puntos, líneas y polígonos generados. El sistema también permite una modesta personalización de estas características espaciales en la interfaz de usuario (colores, tamaños, etc.). Además de las salidas globales, estos tipos de salida también se pueden vincular a entidades espaciales individuales como puntos, polígonos o celdas en la cuadrícula (por ejemplo, cada celda en un ráster puede tener una salida asociada, como una serie de tiempo).

Por lo tanto, el desarrollador de modelo solo tiene que definir los límites espaciales y temporales de su modelo y usar los tipos de entrada y salida predefinidos para facilitar la entrada de los usuarios y la visualización de resultados, e implementar sus algoritmos centrales en Python para poder usar el sistema. Estos algoritmos centrales comienzan como una implementación de función abstracta en Python, pero luego pueden llamar / usar cualquier otro programa disponible en el entorno operativo.

3.7.3. Tecnología

El marco de modelamiento genérico está escrito en el lenguaje de programación Python (V3) y está diseñado para ser independiente de la plataforma (Linux, Mac OS y Windows). Utiliza el paquete Python Flask y su servidor web incorporado para usar a través de un navegador web o un producto como Electron. La herramienta en esta etapa es inherentemente una aplicación de escritorio, una que simplemente utiliza tecnología web para su interfaz de usuario, pero con más trabajo podría permitir el alojamiento en línea puro. Es una aplicación web de una sola página que no se basa en ningún marco web en particular, es solo Python Flask y JavaScript. La opción de usar un front-end HTML/JavaScript en lugar de una interfaz de usuario de escritorio tradicional se tomó para aprovechar al máximo las muchas herramientas de JavaScript gratuitas para la creación de gráficos y la visualización de conjuntos de datos espaciales. Los principales productos que finalmente se eligieron para estas tareas fueron:

- Chart.js (para gráficos),
- Leaflet (para datos espaciales o visualización de mapas),
- jsPanel (para el diseño del panel),
- Handlebars (para plantillas HTML) y
- Bootstrap (para la apariencia).

La herramienta maneja la naturaleza dinámicamente construida de su interfaz de usuario exclusivamente a través de JavaScript, como lo hace para la interactividad de gráficos y la

representación de la capa espacial. La herramienta también posee soporte multilenguaje limitado. Tanto los archivos de front-end HTML como los de JavaScript contienen etiquetas de marcador de posición para cualquier modelo de texto independiente de que se mostrará al usuario (etiquetas de botones, información sobre herramientas, etc.) y documentos de traducción, lo que permite agregar traducciones en diferentes idiomas. Actualmente, el sistema soporta Inglés y Español.

3.7.4. El modelo SimCopiapó

Desde el punto de vista tecnológico, el modelo de Copiapó está escrito casi exclusivamente en Python. LA interfaz lee los conjuntos de datos espaciales y temporales de los archivos que utilizan los paquetes de Python e invoca el programa compilado de FORTRAN MODFLOW-NWT por su capacidad de modelado de aguas subterráneas. El modelo utiliza algunas técnicas de multiprocesamiento para el rendimiento, pero por lo demás consiste en una sola función que se ejecuta una vez por simulación. Sus entradas se agrupan en estrategias hídricas y sus salidas están diseñadas para mostrar indicadores clave relevantes para las partes interesadas. El modelo también muestra una gama de características espaciales estáticas en el mapa como referencia para los usuarios que están familiarizados con la región y las estrategias hídricas que la herramienta está intentando modelar.

3.7.5. Interfaz de usuario – general

La interfaz de usuario consta de ocho¹¹ secciones principales, las cuales se explican a continuación y pueden apreciarse en la Figura 44.

¹¹ Se puede iniciar cualquier cantidad de ventanas de diálogo adicionales para ver información específica sobre las características de la capa espacial (si está definido por el modelador).

1. Mapa de fondo:

El fondo de toda la página es una capa de mapa que muestra los conjuntos de datos espaciales en un mapa base del mundo. Este mapa puede ser ampliado y panorámico. El mapa contiene un botón de acercamiento y alejamiento en la esquina superior izquierda y una escala de mapa y un indicador de Norte en la parte superior derecha de la pantalla.

2. Ventana de entradas (input) del modelo: ¹²

Esta ventana contiene controles de entrada del modelo. El diseñador de modelos puede determinar su orden y clasificarlos en sus propios grupos o pestañas, si lo desea.

3. Ventana de salidas (output) del modelo:

Esta ventana contiene controles de salidas del modelo. El diseñador de modelos puede determinar su orden y clasificarlos en sus propios grupos o pestañas, si lo desea.

4. Ventana de información de la capa del modelo: ¹³

Esta ventana muestra información sobre las capas espaciales activas en las que se hizo clic con el mouse en el mapa de fondo. Muestra la latitud y la longitud del clic y enumera las capas visibles del mapa, mostrando el índice de celda y su valor en el punto de clic. Algunas capas de mapas contienen datos adicionales a los que se puede acceder en cada una de sus celdas. Si este es el caso, aparece un icono en el que se puede hacer clic para abrir una ventana de diálogo que contiene esos resultados.

5. Modelo de grupo de control de ejecución:

Este grupo de controles contiene:

- El botón Ejecutar que avanza la simulación del modelo un paso de tiempo (teniendo en cuenta que algunos modelos solo contienen un paso de tiempo, es decir, están diseñados para ejecutar la simulación completa de una sola vez).
- El control de selección del intervalo de tiempo (algunos modelos pueden permitir que se seleccione un intervalo de tiempo diferente en cada ejecución; por ejemplo, 1, 2 o 5 años de un modelo con un intervalo de tiempo subyacente de un año podría ejecutarse en una sola pulsación de el botón Ejecutar).
- El botón Restablecer que restablece la simulación del modelo y borra las salidas.

6. Clúster de control de capa de mapa:

Este grupo de controles contiene:

- Selector de mosaico del mapa (una selección de mosaicos del mapa base que constituirá la imagen del mapa subyacente, por ejemplo, topografía, imágenes de satélite).

¹² Todas las ventanas se pueden mover, minimizar y cambiar de tamaño.

¹³ Todas las ventanas se pueden mover, minimizar y cambiar de tamaño.

- Selector de capa de mapa (una selección de capas espaciales de modelo disponibles (ráster, puntos, polígonos, etc.) que pueden activarse o desactivarse (cada elemento de la lista se puede ampliar para obtener más información).

7. Modelo de visualización de estado temporal:

Este grupo de controles contiene:

- Una pantalla de fecha que indica la fecha / hora de inicio de la simulación.
- Una pantalla de fecha que indica la fecha / hora actual de las simulaciones.
- Una pantalla de fecha que indica la fecha / hora de finalización de la simulación.
- Una representación visual de la fecha / hora actual de la simulación con referencia a la fecha / hora de inicio y finalización.

8. Modelo de clúster de control auxiliar:

Este grupo de controles contiene:

- Botón Buscador de funciones (se usa para alternar el Buscador de funciones, una ventana de búsqueda para las características de la capa espacial visible).
- Botón de resultados de exportación (utilizado para generar y descargar un documento de informe de la simulación).
- Botón Acerca del modelo (usado para abrir una ventana de diálogo modal grande que contiene información sobre el modelo).

3.7.6. Interfaz de usuario – específico

El modelo está configurado para ejecutar un paso de tiempo de 25 años. Sus entradas se clasifican en pestañas, una para cada estrategia. Sus salidas también se agrupan lógicamente. El modelo contiene varias capas de mapa producidas por el modelo (grillas de modelo de agua subterránea) y algunas otras capas estáticas (regiones y ubicaciones de pozos de agua subterránea) para el interés del usuario. Se puede hacer clic en la mayoría de las celdas de la red de agua subterránea y se puede ver una serie de tiempo de los valores en el punto de clic a través de la ventana Información de la capa del mapa. La Figura 45 muestra un ejemplo de estas funcionalidades de la herramienta.

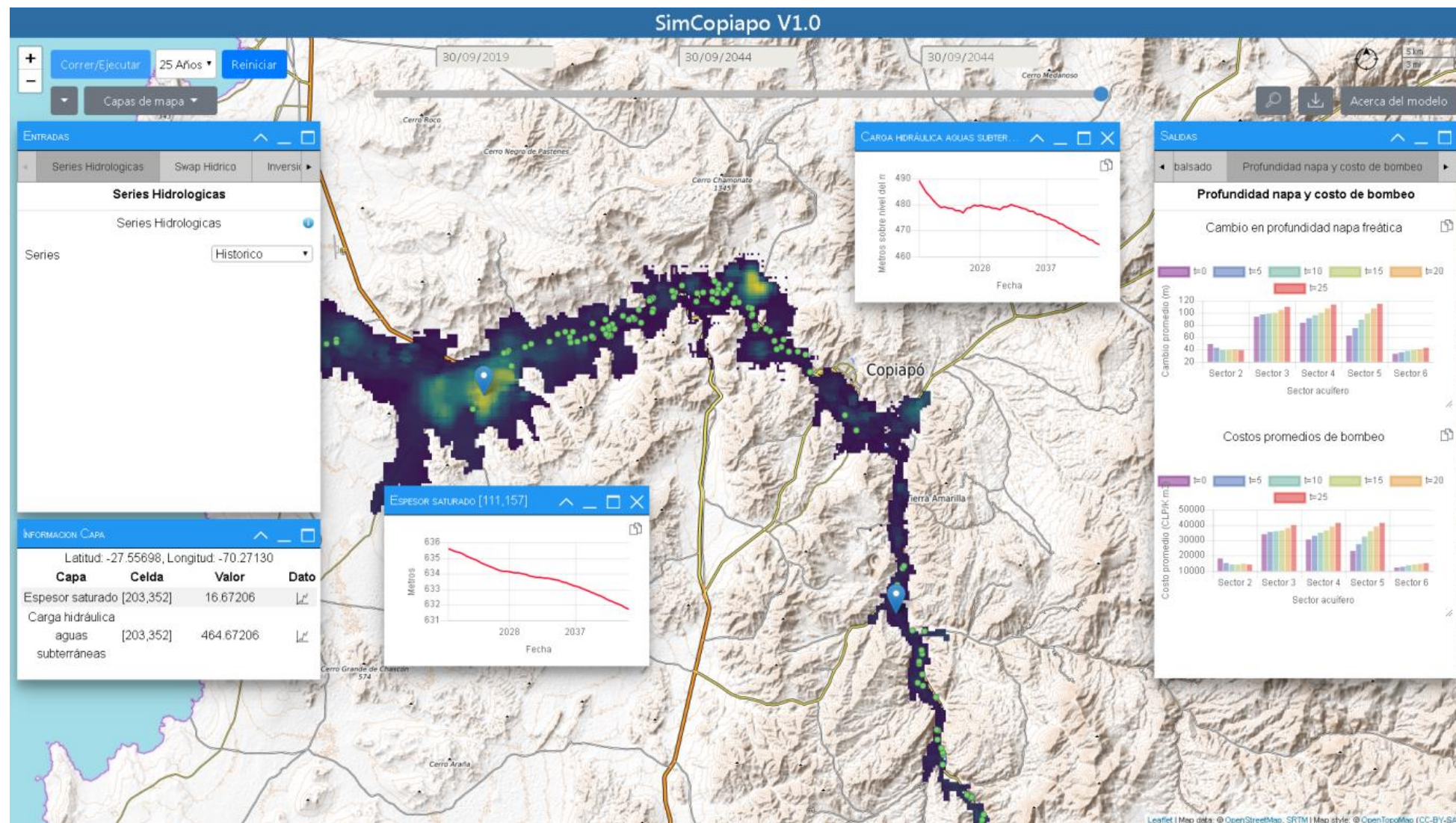


Figura 45 Resultados del modelo con capas espaciales visibles

3.7.7. Utilización

Una vez que se inicia la herramienta, el usuario puede ver y configurar las entradas de los modelos en la ventana de entrada de la izquierda. Dado que el modelo SimCopiapó está diseñado para ejecutar los 25 años completos a la vez, todo lo que se requiere es hacer clic en el botón Ejecutar para comenzar la simulación. El modelo comenzará a ejecutarse, este proceso tardará varios minutos en completarse y una barra de progreso informará al usuario de la progresión de la simulación a través de varias etapas clave de procesamiento. Una vez completado, los resultados del modelo estarán disponibles en dos lugares. Los resultados globales se podrán ver en la ventana de resultados a la derecha. Esto contiene varias pestañas que se pueden explorar. Los gráficos individuales pueden redimensionarse verticalmente haciendo clic y arrastrando el pequeño icono en la parte inferior derecha de cada gráfico. La ventana de resultados completa se puede expandir horizontalmente arrastrando el borde izquierdo hacia afuera (al igual que cambiar el tamaño de una ventana normal) o maximizando la ventana usando el botón de maximizar en la esquina superior derecha. Las salidas de series de tiempo también se pueden ampliar presionando el botón del mouse hacia abajo al comienzo de la sección para hacer zoom y luego, mientras mantiene presionado el botón del mouse, arrastrando hasta el final de la sección para acercar y soltar el botón del mouse. Para restaurar el zoom a su nivel predeterminado, simplemente haga clic en cualquier parte del gráfico.



Figura 46 Ventana de salida (outputs) y selector de capas de mapa

La Figura 46 muestra un ejemplo de la ventana de salida. Explicación detallada de la ventana de salida:

1. Pestañas de salida
2. Contraer el botón de la ventana
3. Minimizar hasta la parte inferior del botón de pantalla
4. Maximizar el botón de pantalla completa
5. Encabezado del grupo de salida
6. Título de salida individual.
7. Exportar resultados específicos como texto al portapapeles.
8. Ajusta la altura vertical del icono del gráfico.

Las capas espaciales individuales se pueden activar y desactivar haciendo clic en las casillas de verificación a la izquierda de cada nombre de capa. Cada entrada de capas se puede expandir

haciendo clic en la pequeña flecha hacia abajo a la derecha del nombre de la capa. Esto expandirá la entrada y mostrará cualquier información adicional (si está disponible) y para las capas GeoTIFF, muestra una banda de color que indica los colores mínimo y máximo.

Para obtener más información sobre una entidad en una capa espacial, pase el mouse sobre la entidad (asegurándose de que no haya otras capas visibles encima) o intente hacer clic en ella. Si la función tiene algún conjunto de datos adjunto, al hacer clic en él se abrirá una ventana de diálogo que muestra el conjunto de datos. Para las capas GeoTIFF (como las cuadrículas del modelo MODFLOW), hacer clic en una celda hará que aparezca información sobre esa celda en la ventana Información de capa (consulte la Figura 47).

INFORMACION CAPA			
Latitud: -27.55698, Longitud: -70.27130			
Capa	Celda	Valor	Dato
Espesor saturado	[203,352]	16.67206	
Carga hidráulica	(2)	(3)	(4)
aguas subterráneas	[203,352]	464.67206	

Figura 47 Ventana de información de capa

La ventana de información de capa contiene la siguiente información:

1. Título de la capa
2. Índice de celda [fila, col]
3. Valor de datos en la celda
4. Si la celda específica tiene un conjunto de datos adjunto, aparecerá un icono en esta columna. Al hacer clic en el icono se abrirá una ventana de diálogo que contiene el conjunto de datos.

Para localizar características visibles particulares, se utiliza la herramienta Buscador de características. Esta herramienta le permite a un usuario buscar nombres de características usando una búsqueda de texto (ver Figura 44). La herramienta busca en todos los nombres de las funciones de las capas visibles y tiene la opción de desplazarse y acercar el mapa a cualquier función deseada.

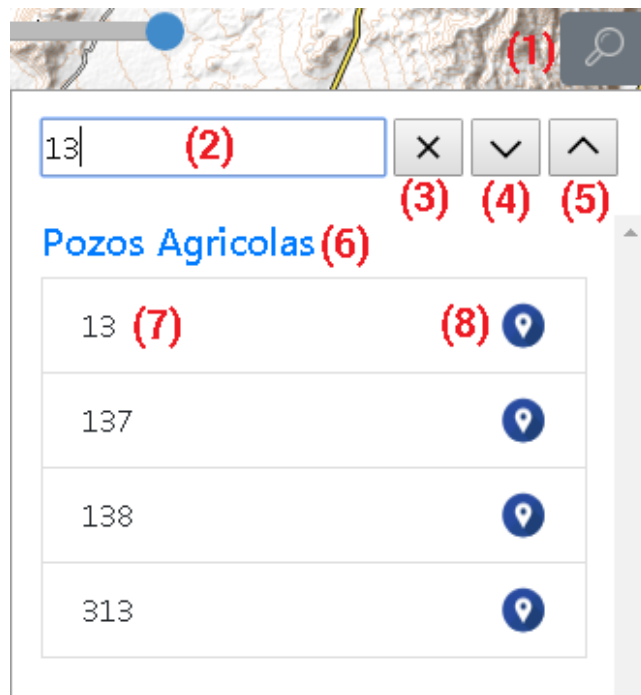


Figura 48 Buscador de características

El Buscador de funciones contiene los siguientes elementos:

1. Botón para abrir y cerrar el Buscador de funciones.
2. Buscar cuadro de texto.
3. Borrar el botón de búsqueda de texto.
4. Expandir el botón de lista de características.
5. Contraer botón de lista de características.
6. Título de la capa.
7. Nombre de la característica.
8. Navegue hasta el ícono de función (haga clic para desplazarse y haga zoom en el mapa para ver la función).

Para producir y exportar un informe de la simulación que se acaba de ejecutar, haga clic en el botón Exportar resultados y, después de un procesamiento de datos, se descargará un archivo a través del navegador.

3.7.8. Instalación y uso

Requisitos previos: sistema operativo Windows 7 de 64 bits o superior y el ejecutable del instalador SimCopiapó.

Nota: 32 bits, Linux y Mac OS también son posibles, pero no se describen aquí.

Simplemente ejecute el instalador (ver Anexo B.5) y luego siga las instrucciones en el documento README.txt en el directorio donde instaló el producto.

El proceso es un poco más complejo que la aplicación promedio porque la herramienta requiere un entorno Python personalizado y un servidor web para funcionar. Esto significa que el producto es más que un simple archivo ejecutable con un solo clic, pero la mayor parte del proceso se automatiza con secuencias de comandos con solo unos pocos pasos manuales necesarios para que todo funcione.

Las instrucciones en el Manual de Uso (<https://research.csiro.au/gestion-copiapo/?ddownload=652>) informan al usuario en más detalle cómo instalar y luego ejecutar la herramienta.

3.7.9. Detalles avanzados sobre instalación y ejecución de SimCopiapó

La herramienta utiliza Anaconda para crear y administrar el entorno Python en el que se ejecutará el servidor web. Para hacer esto, primero se instala Miniconda (su instalador se envía con el instalador de SimCopiapó). Luego, el usuario ejecuta un script de instalación que crea un nuevo entorno Conda y carga Python y todas las dependencias del paquete Python requeridas en él.

Para iniciar la herramienta, el usuario ejecuta un script de ejecución que activa el entorno Conda e inicia el servidor web. Una vez que ha comenzado, se lanza una instancia de Electron y se dirige a la dirección que aloja el servidor web. La herramienta ya está lanzada y lista para usar.

Para cerrar la herramienta, simplemente cierre la ventana de Electron y las otras dos ventanas de línea de comandos que están activas en el fondo.

4 Resultados

Esta sección resume los principales resultados obtenidos de la aplicación de la herramienta SimCopiapó. La primera parte de esta sección describe la verificación de los modelos hidrológicos (aguas superficial y subterránea) implementados en la herramienta. Esto permite la validación de una correcta implementación de estos modelos y al mismo tiempo permite verificar que la herramienta SimCopiapó sea capaz de replicar las condiciones hidrológicas históricas observadas dentro de un rango razonable. La segunda parte de esta sección presenta el análisis de los resultados de las estrategias hídricas definidas en la Sección 3.5. Esto se lleva a cabo para cada estrategia individualmente y para una combinatoria de estrategias.

Es importante destacar que los modelos hidrológicos implementados en SimCopiapó se utilizan sobre la base de calibraciones realizadas en estudios anteriores. Por lo tanto, se asume que estas calibraciones son satisfactorias en términos de medidas de performance numérica.

4.1 Verificación de modelos hidrológicos

Como objetivo de verificación, al igual que en el informe de DGA-DICTUC (2010) y DGA-HIDROMAS (2013), se ha definido la importancia de representar los caudales superficiales medidos en las estaciones fluviométricas. Además, se ha decidido verificar que los afloramientos simulados por el modelo de aguas superficiales sean consistentes con aquellos obtenidos por el modelo MODFLOW desarrollado en estudios anteriores. La Figura 49 muestra los caudales simulados y observados para las estaciones fluviométricas de la DGA en el río Copiapó. En este análisis se puede apreciar que a pesar de los cambios realizados al modelo AQUATOOL y su implementación en lenguaje de programación Python, la representación del sistema superficial se reproduce de buena forma. Se observa, además, una mejora en el ajuste logrado para el caudal en el Canal Mal Paso (Figura 49), lo que es relevante para lograr una mejor aproximación a la satisfacción de la demanda (futura) en los distritos de riego 5, 6, 7, 8 y 9 de la JVRC en los escenarios simulados.

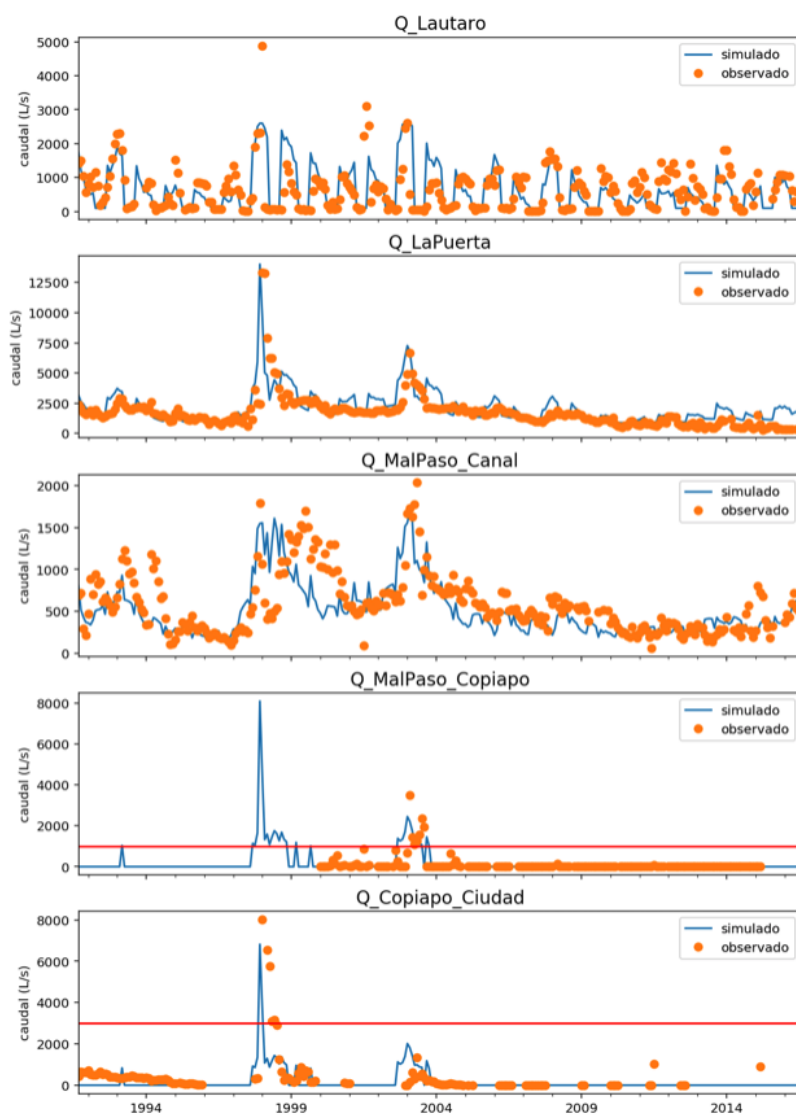


Figura 49 Ajuste de caudales superficiales en condiciones históricas (1991-2016), SimCopiapó (simulado) vs estaciones fluviométricas de la DGA (observado)

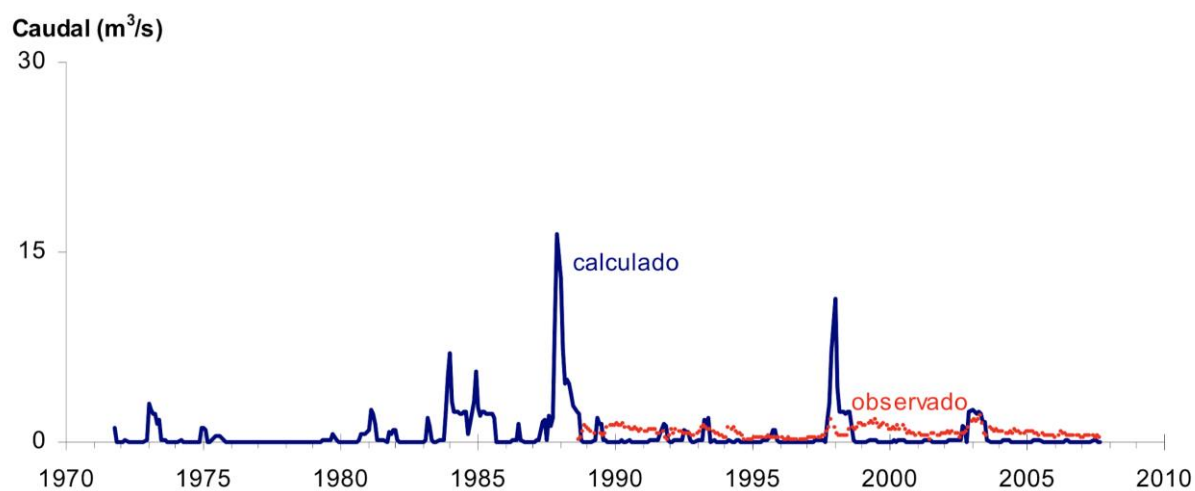


Figura 50 Ajuste de caudales superficiales en condiciones históricas (1971-2007) modelo original DGA-DICTUC (2010) (simulado) vs estaciones fluviométricas de la DGA (observado)

El principal punto de control para el acople de los modelos de flujo superficial y subterráneo de SimCopiapó se encuentra en el Sector Los Loros-La Puerta, donde se produce un angostamiento y alzamiento del basamento rocoso y el afloramiento de la mayoría del flujo subterráneo pasante. Por ello, se considera el caudal medido en la estación fluviométrica de la DGA en La Puerta como la oferta disponible para riego mediante canales en la cuenca del río Copiapó. Considerando que el sector 2 del acuífero históricamente no ha presentado variaciones importantes en sus niveles freáticos, y los balances hídricos efectuados en estudios anteriores (Golder, 2006; DGA-DICTUC, 2010, DGA-HIDROMAS, 2013), es posible inferir que las series de caudal observadas en la estación La Puerta dependen en gran medida (en su magnitud y variación espacial) de las infiltraciones del embalse Lautaro y los flujos subterráneos pasantes desde el sector acuífero aguas arriba de este embalse. Los caudales de infiltración mínimos (500 L/s) y máximos (3.500 L/s) fueron ajustados hasta cuadrar los afloramientos simulados por el modelo de aguas superficiales y el modelo MODFLOW. El ajuste logrado se presenta en la Figura 51.

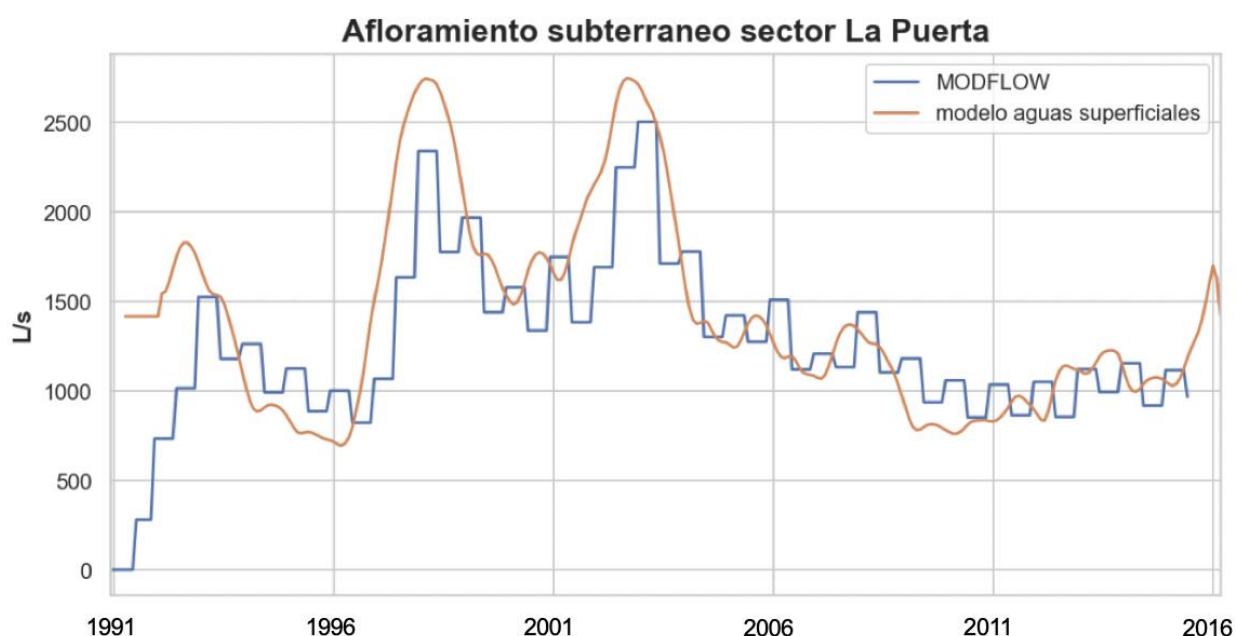


Figura 51 Verificación del acople (caudal afloramiento subterráneo en sector La Puerta) del modelo MODFLOW-NWT y el modelo de aguas superficiales

En general, la Figura 51 muestra un excelente ajuste al momento de replicar la temporalidad y la magnitud de la señal de las recuperaciones en el sector de La Puerta. Existe una pequeña discrepancia en los años iniciales que puede ser atribuida al período de estabilización del sistema una vez iniciada la simulación (período de ‘warm-up’ de los parámetros).

4.2 Estrategias hídricas

4.2.1 Impactos de cada estrategia hídrica (simulada)

Las estrategias analizadas en esta sección se discuten en la Sección 3.5. Esta sección discute los resultados de la simulación de la implementación de cada una de estas estrategias (escenarios simulados) sobre diferentes indicadores de impacto hidrológico, social y económico. Estos resultados son contrastados contra un escenario base el cual considera la operación del valle de Copiapó al año 2018 sin ninguna intervención/estrategia hídrica en operación. Para ambos casos (escenario base y escenario simulado) se utiliza la hidrología histórica registrada en las estaciones de la DGA como valores aportantes en las cuencas de cabecera (Copiapó en Pastillo) para el período extendido 2018-2043.

Intercambios de agua (Swap hídricos)

Estrategia 1.1: Swap hídrico entre Minera Candelaria y Aguas Chañar

La implementación de esta estrategia muestra impactos marginales sobre los niveles freáticos y volúmenes embalsados localizados en los sectores acuíferos 5 y 6. La magnitud de estos impactos, sin embargo, es limitada. La Figura 52 muestra las variaciones de los niveles freáticos y los volúmenes embalsados en los sectores acuíferos para el escenario base y simulado (Estrategia 1.1) a través del tiempo.

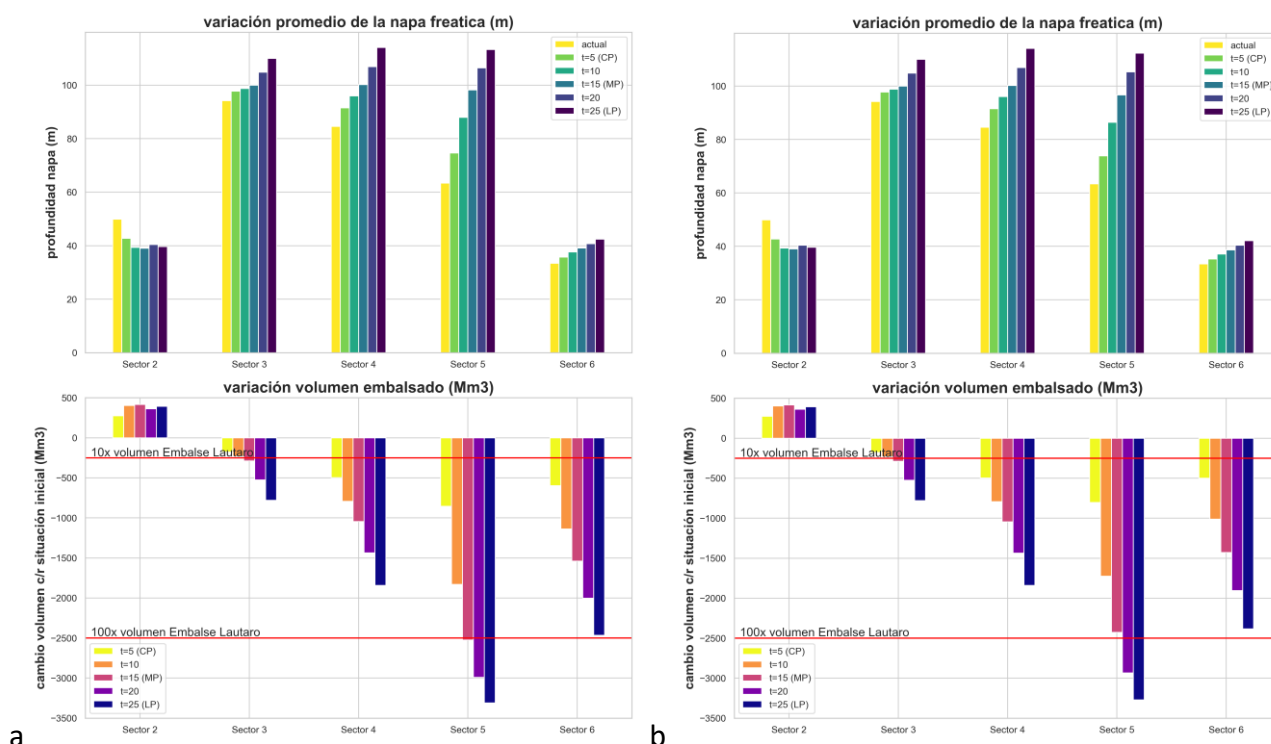


Figura 52 Variación promedio de los niveles freáticos y volumen embalsado para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.1

Los cambios observados para los sectores acuíferos 1, 2, 3 y 4 son despreciables, mientras que los cambios para los sectores acuíferos 5 y 6 son de limitada magnitud. Dichos cambios, sin embargo, muestran que la implementación de la Estrategia 1.1 permite la recuperación de los niveles freáticos y volúmenes embalsados en los sectores acuíferos 5 y 6, los cuales se manifiestan marginalmente en el largo plazo. Al mismo tiempo, la Figura 53 muestra el resumen de la implementación de la Estrategia 1.1 sobre los indicadores de impacto. En esta figura se puede apreciar el impacto sobre la recuperación de los volúmenes finales con respecto al volumen inicial en los sectores acuíferos 5 y 6, mientras que los otros indicadores de impacto permanecen igual que para el escenario base.

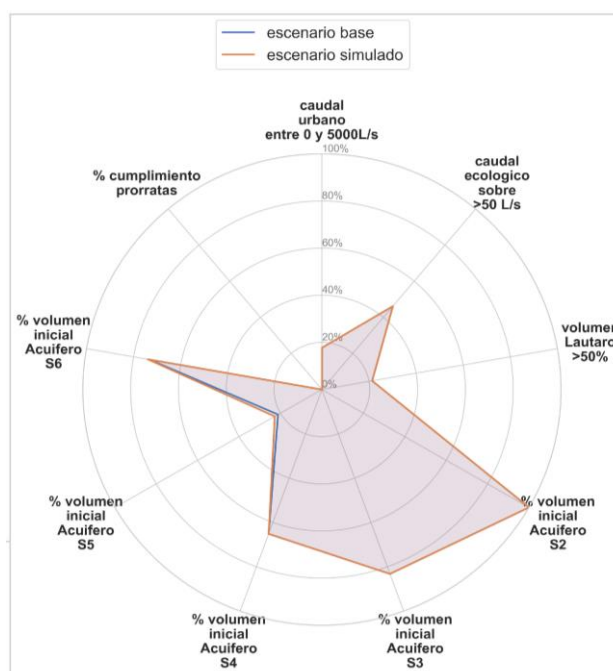


Figura 53 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.1

Estrategia 1.2: Swap hídrico entre Minera Caserones y río Ramadilla

La implementación de esta estrategia muestra impactos principalmente aguas arriba de la ciudad de Copiapó en términos de disminución de la disponibilidad de aguas superficiales y aguas subterráneas. Los impactos más destacables corresponden a la disminución de caudales superficiales de acopio en el Embalse Lautaro, disminución de caudales en la ciudad de Copiapó (caudales urbanos) y la reducción de los volúmenes embalsados en los sectores acuíferos 3 y 4, principalmente.

La Figura 54 muestra la evolución temporal del volumen embalsado en términos porcentuales de la capacidad total del Embalse Lautaro. Es posible apreciar que para el escenario implementando la Estrategia 1.2, los volúmenes almacenados disminuyen y el indicador de 50 % de la capacidad total embalsada se reduce a valores bajo el 20% a escala mensual. Al mismo tiempo, los eventos de rebalse por el vertedero se reducen de 14 a 12. Esto producto del supuesto que asume una reducción en disponibilidad superficial en río Copiapó en Pastillo de 200 L/s, es decir, una reducción de igual caudal a aquella experimentada en el río Ramadilla producto del swap hídrico.

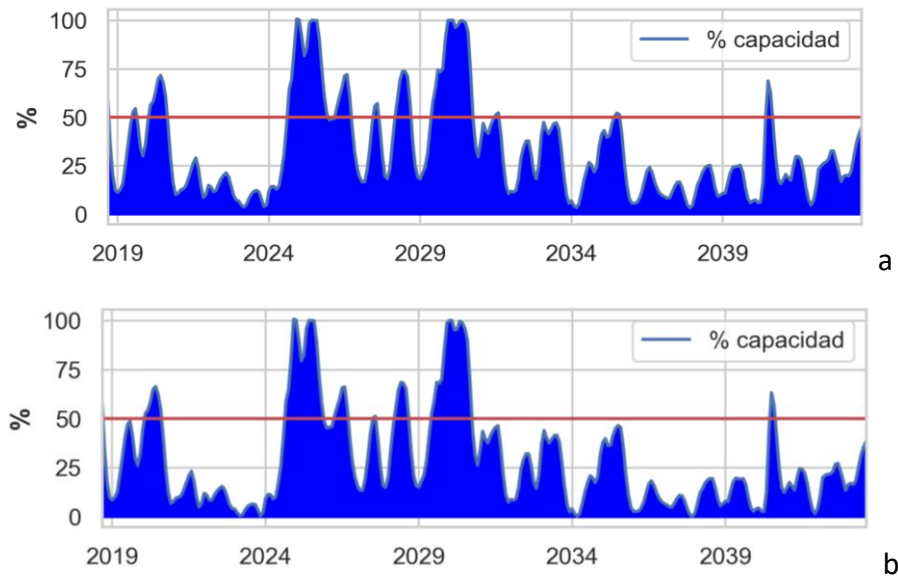


Figura 54 Porcentaje de capacidad embalsada en Embalse Lautaro para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.2

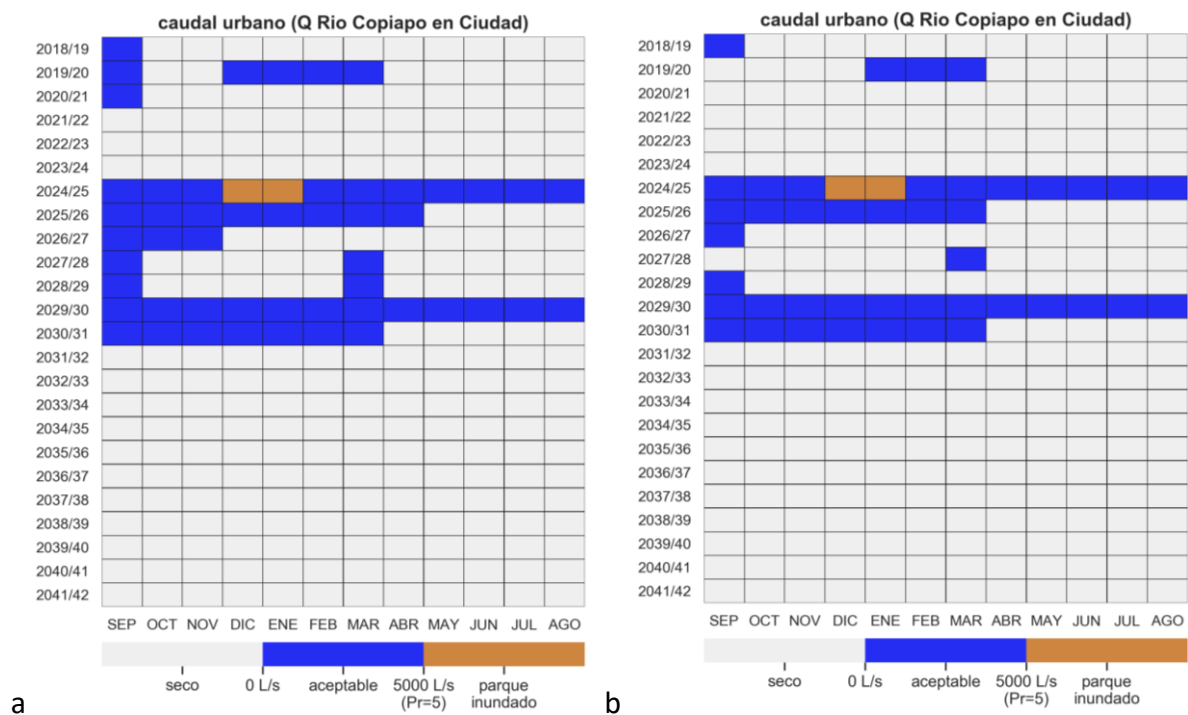


Figura 55 Indicador de caudal urbano aceptable (0-5000 L/s) en la ciudad de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.2

A su vez, la Figura 55 muestra el indicador de caudal urbano aceptable en río Copiapó en Ciudad de Copiapó. Este indicador se define como aceptable cuando el caudal simulado se encuentra en el rango [0 y 5000] L/s, y como no aceptable cuando el caudal simulado es mayor a 5.000 L/s (inundación). A escala mensual, la presencia de caudales urbanos se reduce de 17% a 14% (51 a 43 meses), mientras que los eventos de inundación se mantienen.

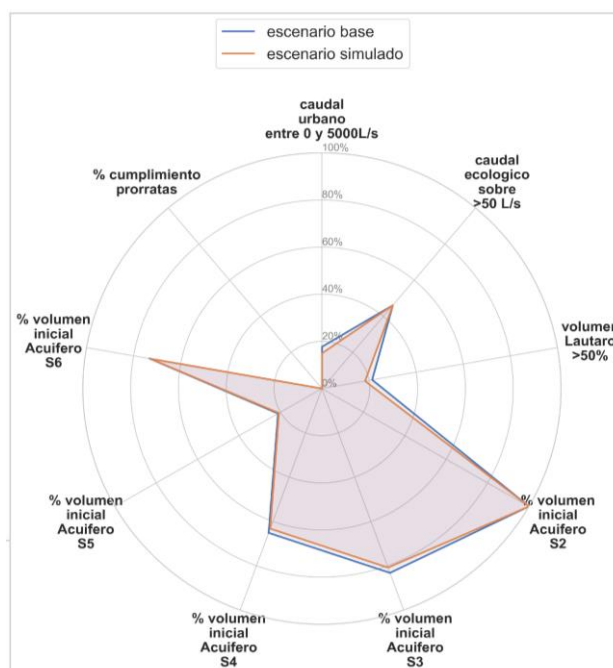


Figura 56 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.2

Finalmente, la Figura 56 resume los indicadores de impacto para la implementación de la estrategia 1.2, donde se observan reducciones en el volumen embalsado con respecto al volumen inicial en los sectores acuíferos 3 y 4, además de los impactos previamente señalados. Es importante destacar que la reducción del número de eventos de vertido en el Embalse Lautaro, puede considerarse un impacto potencialmente positivo relacionado a la protección que esta obra podría otorgar contra los eventos de inundaciones.

Estrategia 1.3a: Swap hídrico distritos de riego 8 y 9 hacia distritos 1 y 7

La implementación de la Estrategia 1.3a tiene impactos directos sobre los sectores acuíferos 3 y 4, y en menor grado en el sector acuífero 5, y sobre los caudales urbanos simulados en la ciudad de Copiapó. Los impactos más destacables corresponden al aumento de la presencia de escorrentía superficial en la ciudad de Copiapó, producto que los excedentes superficiales son retornados al río Copiapó el cual a su vez recarga los sectores acuíferos.

La Figura 57 muestra la evolución de los niveles freáticos registrados en los pozos de observación de la DGA para los sectores acuíferos 3 y 4. Esta figura muestra que las tasas de descenso de los niveles de agua subterráneas simuladas al implementar la Estrategia 1.3a tienden a disminuir, sin embargo, los descensos son persistentes en el largo plazo.

Al mismo tiempo, la Figura 58 muestra los valores de recarga natural a lo largo del río Copiapó para cada uno de los sectores acuíferos. Esta figura muestra que los valores de recarga promedio a través de infiltración en el lecho del río aumentan en los sectores acuíferos 4, 5 y 6, y disminuyen ligeramente para el sector acuífero 3. Lo anterior está ligado a la capacidad de conducción asociada al canal Mal Paso, el cual capta las aguas del río Copiapó.

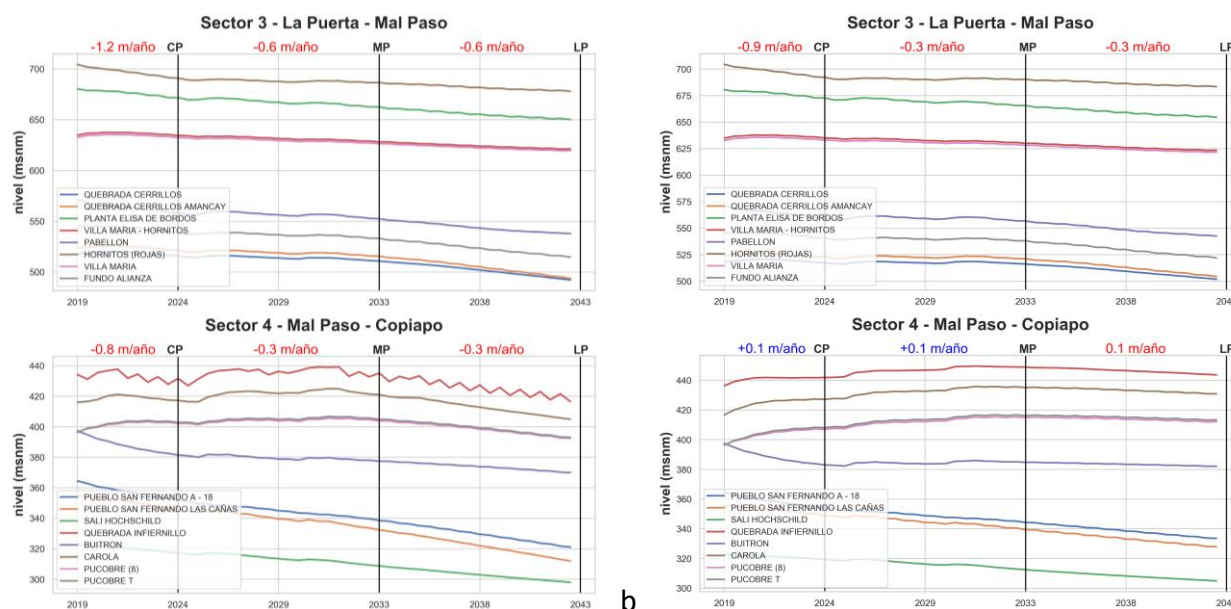


Figura 57 Evolución de los niveles freáticos en pozos de monitoreo de la DGA para los sectores acuíferos 3 y 4 para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3a

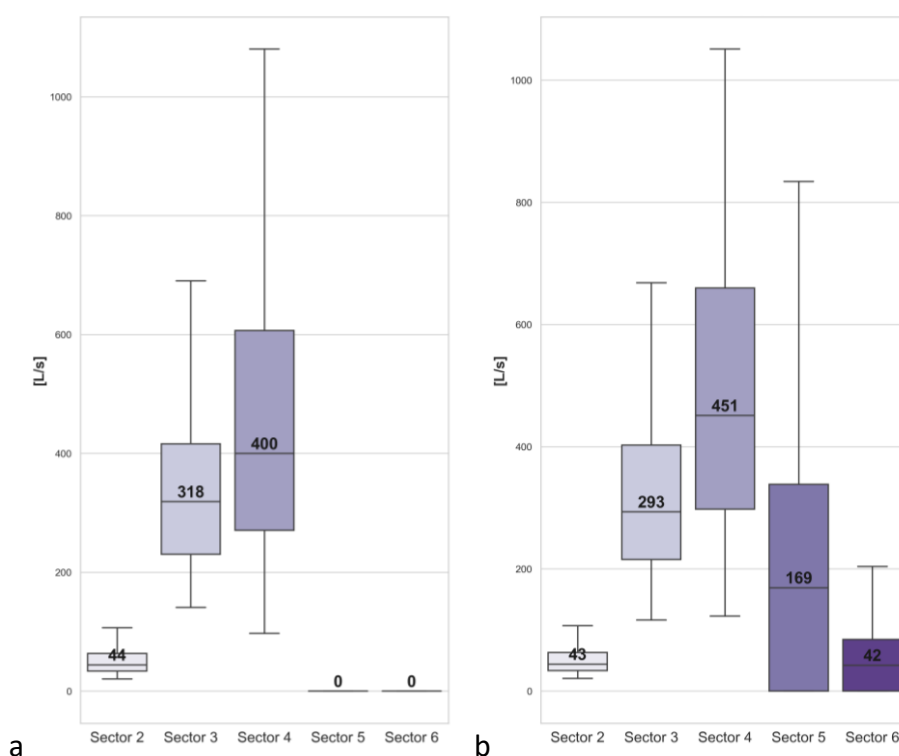


Figura 58 Recarga natural sectores acuíferos producto de infiltración en el río Copiapo para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3a

Finalmente, la Figura 59 muestra los indicadores de impacto al implementar la estrategia 1.3a. Claramente se muestra una recuperación en los volúmenes de los sectores acuíferos 3, 4 y 5 asociados al aumento de las tasas de recarga debido a la disponibilidad de agua superficial para la recarga de acuíferos, ya sea a través del lecho del río o mediante las pérdidas del sistema de riego (conducción y aplicación de agua para riego). Al mismo tiempo, se observa una mejora substancial

(desde valores bajo 20% a sobre el 65% del tiempo simulado) en los valores del caudal urbano cuando la estrategia 1.3a es implementada.

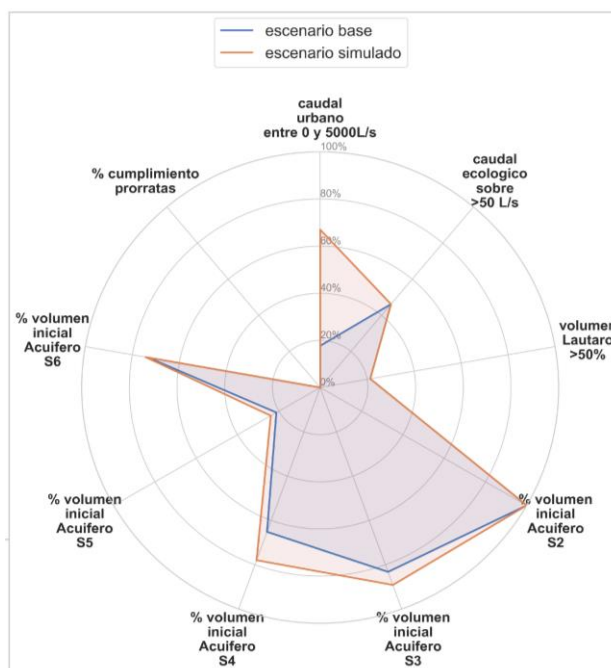


Figura 59 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3a

Estrategia 1.3b: Swap hídrico distritos de riego 8 y 9 y Aguas Chañar

La implementación de la Estrategia 1.3b muestra impactos directos sobre los niveles freáticos y volúmenes embalsados del sector acuífero 4, y en menor grado los sectores acuíferos 3 y 5. La Figura 60 muestra la variación en el tiempo de la profundidad promedio de los niveles freáticos en los sectores acuíferos. En general se observa que para el sector acuífero 4 los niveles se recuperan en el largo plazo hacia valores cercanos a los 103 mbns. Sin embargo, la tendencia hacia la profundización continúa a tasas promedio de 0.1 m/año en el mediano y largo plazo.

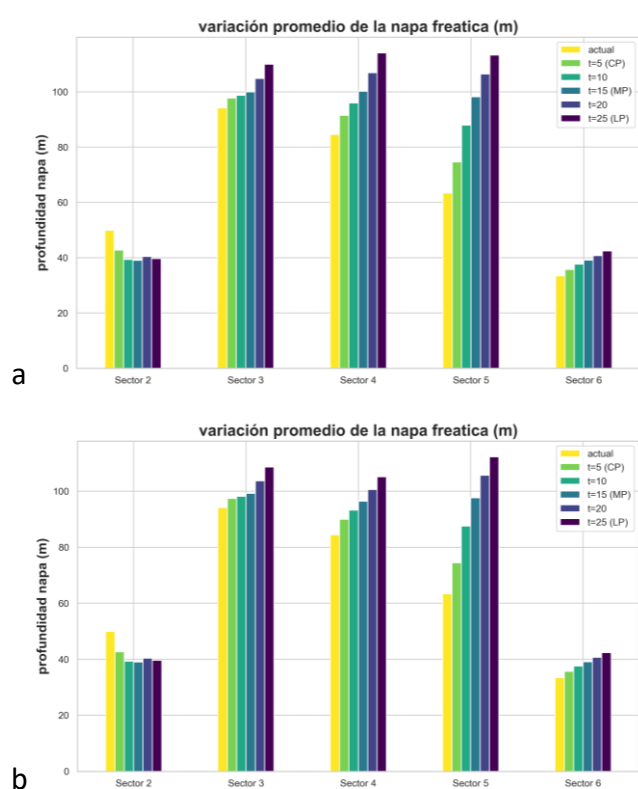
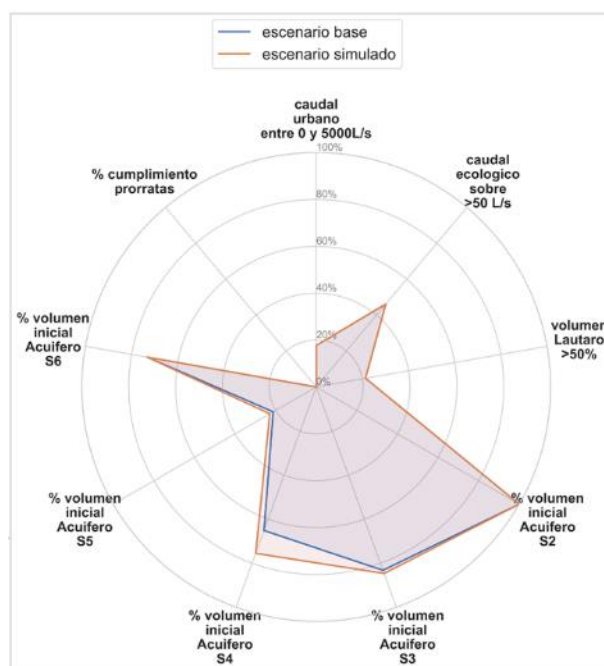


Figura 60 Variación de la profundidad promedio de los niveles freáticos en el tiempo para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3b



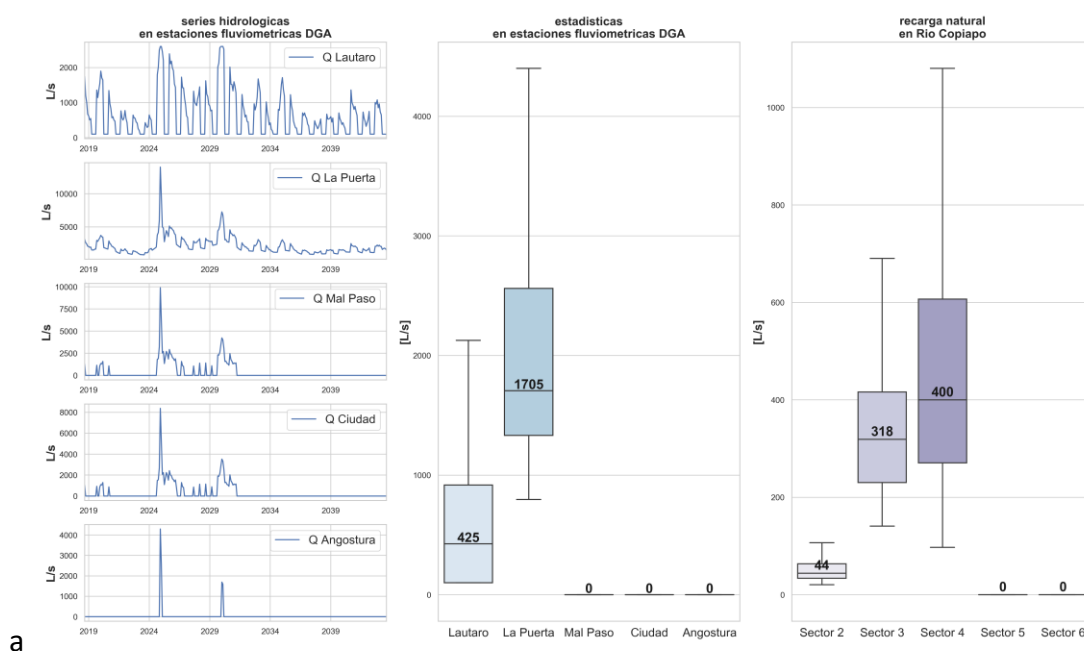
La Figura 61 muestra el resumen de los indicadores de impacto de la implementación de la Estrategia 1.3b. Esta figura muestra cambios relevantes en el volumen embalsado del sector acuífero 4 en el tiempo y cambios menores para los sectores acuíferos 3 y 5.

Estrategia 1.3c: Swap hídrico distritos de riego 8 y 9 hacia recarga natural río Copiapó

La implementación de la Estrategia 1.3c muestra impactos directos sobre los caudales superficiales registrados en la estación río Copiapó en Ciudad de Copiapó, y sobre los niveles freáticos y volúmenes de los sectores acuíferos 3 y 4, y en menor grado, el sector acuífero 5.

En general, la Figura 62 muestra que la implementación de esta estrategia tiene limitado impacto aguas arriba del sector acuífero 3 y principalmente su impacto se materializa en una mayor disponibilidad de aguas superficiales en la estación río Copiapó en Ciudad de Copiapó registrando un caudal medio de 263 l/s para el escenario simulado comparado con un valor de 0 para el escenario base. Al mismo tiempo se puede observar que la totalidad del volumen de aguas superficiales disponible recarga los sectores acuíferos 4 y 5, por lo tanto, aumentando la disponibilidad de aguas subterráneas en estos sectores.

La Figura 63 muestra los resultados para el caudal urbano simulado en la ciudad de Copiapó para el período de análisis 2019-2042. Sobre la base de los antecedentes de construcción del parque Kaukari, se ha definido un caudal máximo de 5.000 L/s como seguro para el aprovechamiento del parque y su entorno en la ciudad de Copiapó. Esto ha permitido analizar las secuencias aceptables de caudales mensuales promedio y aquellas definidas como de alto riesgo (> 5.000 L/s) en términos de inundación del parque. En general, se observa que bajo el escenario base el río se encuentra seco la mayor parte del tiempo en la ciudad de Copiapó, mientras que al implementar la estrategia 1.3c esta situación se revierte y el río muestra escurrimiento superficial la mayor parte del tiempo.



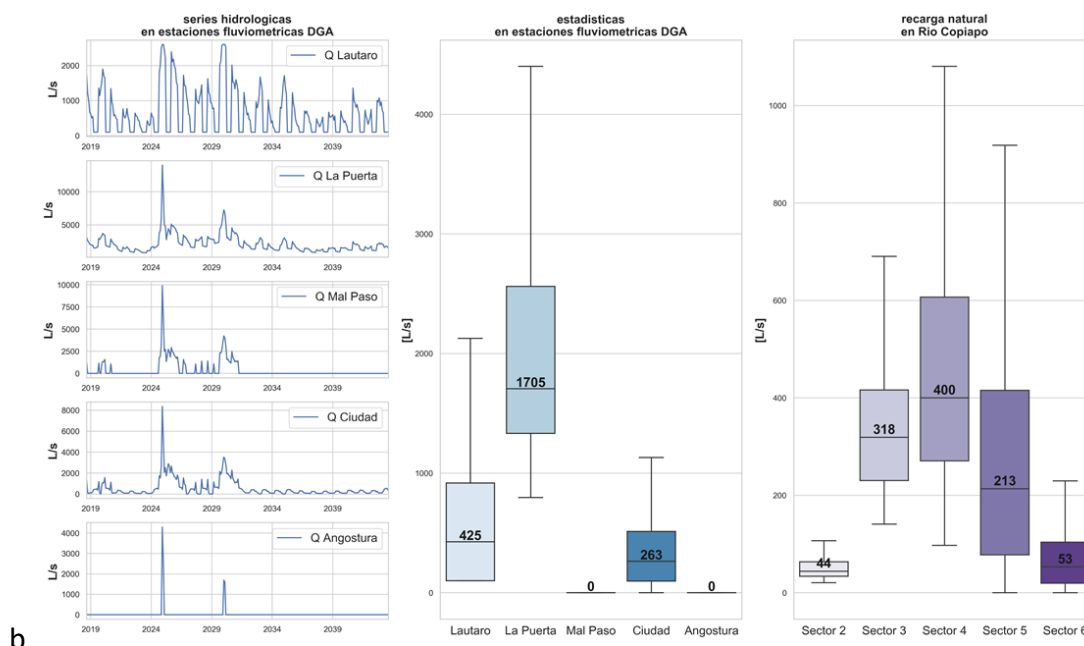


Figura 62 Series hidrológicas en estaciones de la DGA, y resúmenes de cinco números para los caudales y sectores acuíferos del valle de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3c

Finalmente, la Figura 64 resume el impacto de esta estrategia. Se aprecia que, para el caudal urbano, el tiempo que éste se encuentra en la zona aceptable aumenta desde un 19% bajo el escenario base hasta un 96% del tiempo para el escenario con la estrategia 1.3c. Esto quiere decir que al implementar la estrategia 96% de los meses simulados muestran caudales superficiales en la ciudad de Copiapó. Esto último contribuye a una mejora substancial del indicador de impacto social en la cuenca de Copiapó.

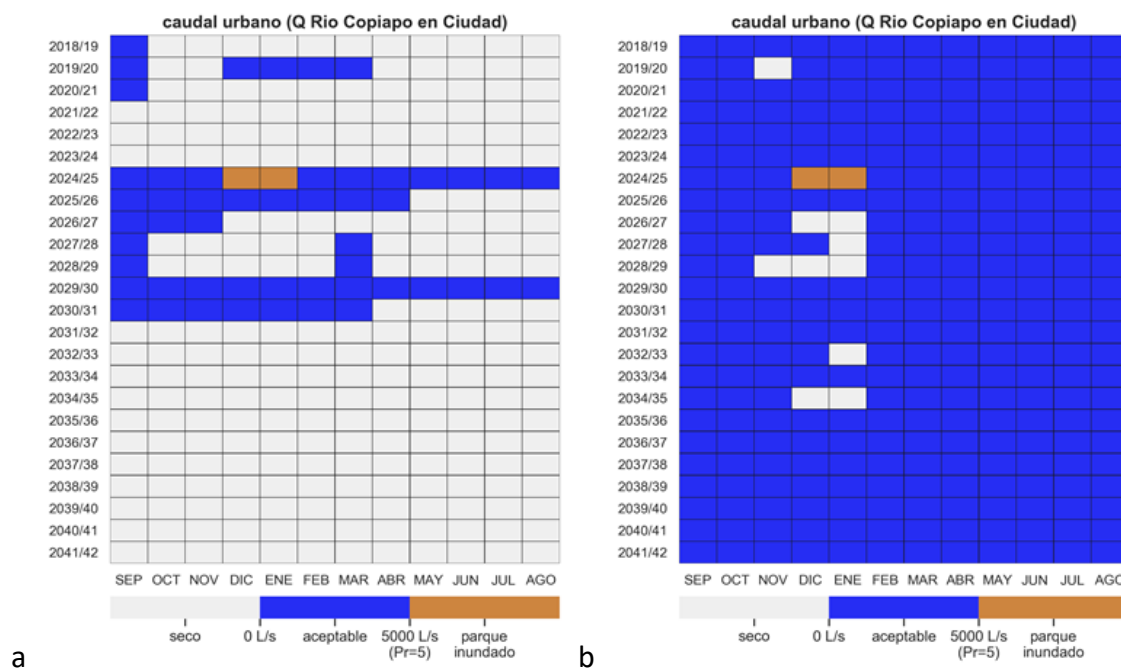


Figura 63 Caudal urbano registrado en la estación río Copiapó en Ciudad de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3c

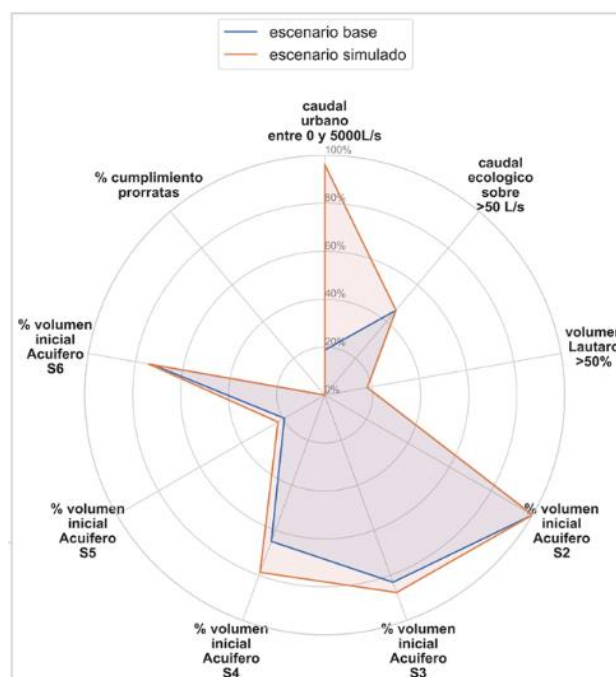


Figura 64 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3c

Estrategia 1.3d: Swap hídrico distritos de riego 8 y 9 hacia sector acuífero 5 (tubería, excedente río Copiapó)

La Estrategia 1.3d transfiere el agua disponible (en acciones) desde los distritos 8 y 9 hacia el sector acuífero 5 (Copiapó-Piedra Colgada) mediante una tubería diseñada para satisfacer la demanda agrícola actual, con los excedentes siendo entregados al río Copiapó en Piedra Colgada. Los impactos directos de la Estrategia 1.3d se manifiestan como recuperaciones en los niveles de aguas subterráneas en los sectores acuíferos 3, 4 y 5, y en menor grado en el sector acuífero 6. Además, se observa un ligero aumento de los caudales de recuperaciones en el sector del humedal del río Copiapó.

La Figura 65 muestra la variación promedio de los niveles freáticos (fila superior) y la variación promedio del volumen embalsado (fila inferior) para los distintos intervalos de tiempo del período de simulación (cada 5 años). Esta figura muestra importantes reducciones en las profundidades de los niveles freáticos en los sectores acuíferos 4 y 5, las cuales se hacen más relevantes en el largo plazo. En el sector acuífero 3, las tasas de descenso se estabilizan en -0,2 m/año, mientras que para el sector acuífero 4 los niveles se recuperan en el corto y mediano plazo a tasas de +0,2 y +0,3 m/año, respectivamente, para comenzar a decaer nuevamente en el largo plazo (-0,3 m/año). Para los sectores acuíferos 5 y 6, las tasas de descenso disminuyen marginalmente en comparación al escenario base (0,1 a 0,2 cm/año). En términos de la variación del volumen, el sector acuífero 3 muestra importantes variaciones en el corto plazo, mientras que para los sectores acuíferos 4, 5 y 6, los cambios en el volumen embalsado se manifiestan en el largo plazo.

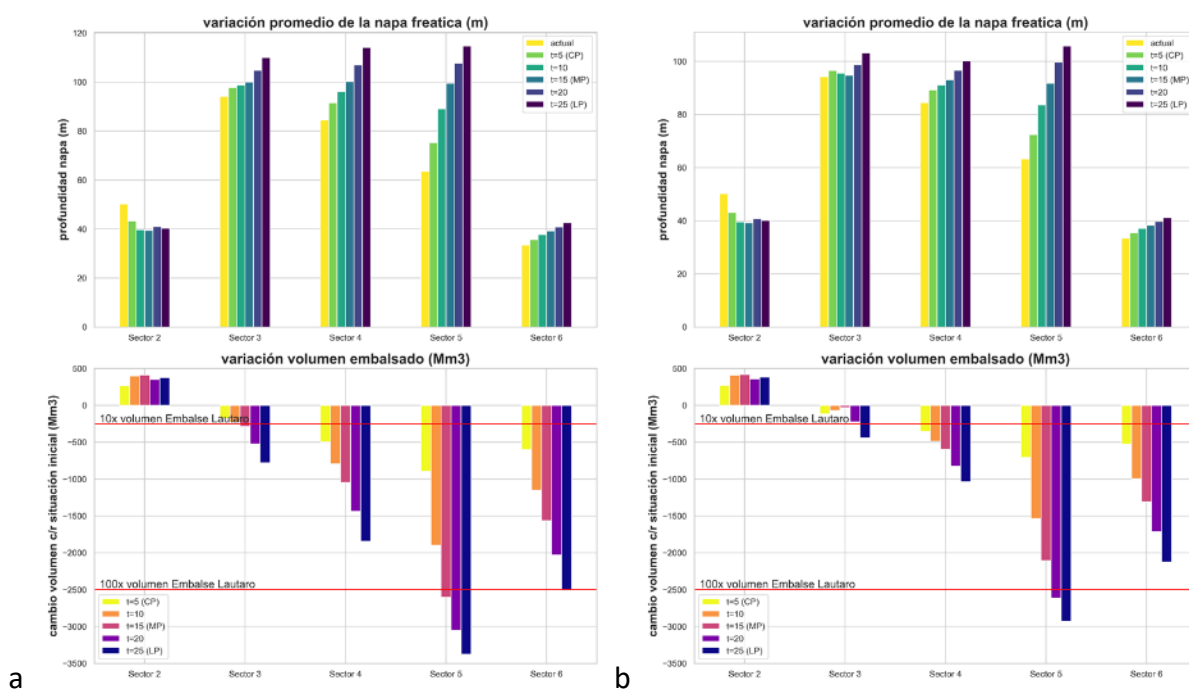


Figura 65 Variación promedio de los niveles freáticos (fila superior) y variación promedio volumen embalsado (fila inferior) para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3d

La recuperación de niveles de aguas subterráneas y la mayor disponibilidad de aguas superficiales en el sector de Piedra Colgada trae consigo un aumento en los caudales promedio máximos observados en la estación Angostura (Figura 66). En general se observa un aumento de los caudales máximos (desde aportes superficiales y subterráneos) en Angostura por sobre el mínimo histórico de 50 L/s, y un descenso menos sostenido en los caudales promedio en el largo plazo (ca. 225 L/s después del año 2032). El caudal mínimo estacional, sin embargo, se encuentra bajo el caudal histórico mínimo de 50 L/s definido como caudal ecológico aceptable pre-1985 DGA-DICTUC (2010). Cabe mencionar que el caudal promedio (y no el caudal mínimo) es el indicador directo del impacto sobre los caudales ecológicos que sustentan el funcionamiento del humedal de la desembocadura del río Copiapó.

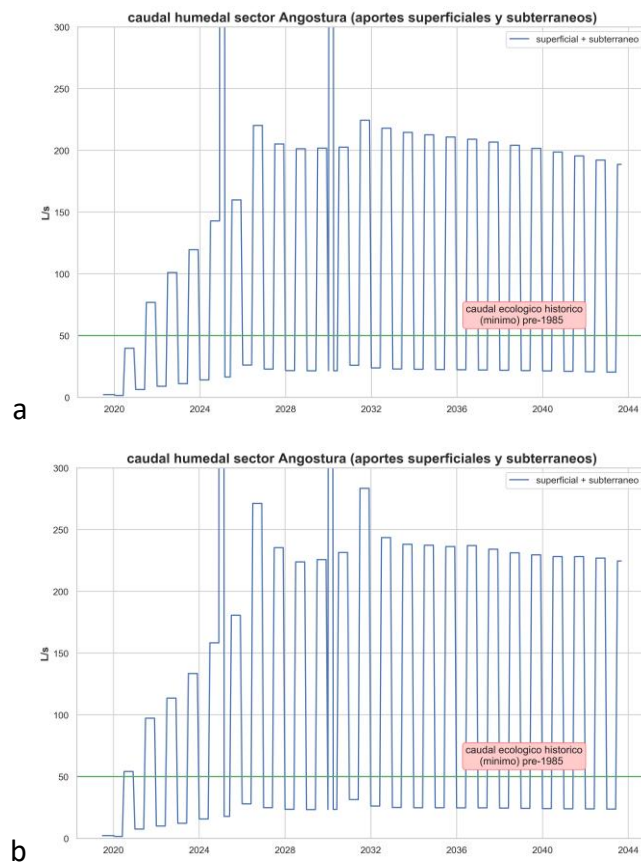


Figura 66 Caudal superficial en el sector Angostura para: a) escenario base, y b) Estrategia 1.3d

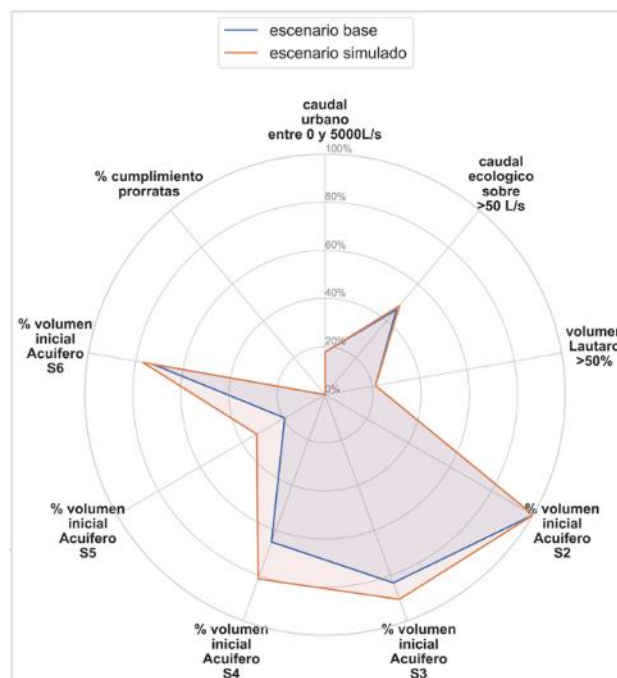


Figura 67 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3d

Finalmente, la Figura 67 resume los indicadores de impacto de la implementación de la Estrategia 1.3d. Claramente se observan aumentos en los volúmenes embalsados respecto al volumen inicial

en los sectores acuíferos 3, 4 y 5, y aumentos menores en el sector acuífero 6. También se observan ligeros aumentos en la proporción del tiempo en que los caudales ecológicos promedios se encuentran por sobre el mínimo histórico de 50 L/s.

Estrategia 1.3e: Swap hídrico distritos de riego 8 y 9 hacia sector acuífero 5 (tubería, excedente a recarga artificial en sector acuífero 5)

Esta estrategia es similar a la Estrategia 1.3d y solo difiere de ésta en la manera en que los excedentes disponibles desde los distritos 8 y 9 son manejados. En este caso, dichos excedentes son destinados a obras de gestión de recarga localizadas en el sector acuífero 5. Los impactos de la Estrategia 1.3e se manifiestan en la recuperación de los volúmenes embalsados en los sectores acuíferos 4 y 5 principalmente. Esta estrategia redistribuye los caudales disponibles de los distritos 8 y 9 en sitios de gestión de recarga de acuíferos localizados en el sector acuífero 5. Al comparar los resultados de la Estrategia 1.3d (Figura 67) y la Estrategia 1.3e (Figura 68) se observa claramente que los impactos son menores para la Estrategia 1.3e en términos de recuperación de volúmenes de los sectores acuíferos. Esto se explica principalmente por los altos coeficientes de infiltración que se observan en el río (20-30%, ver Tabla 14) y la concentración de la recarga artificial en una zona de alto estrés hídrico (Chamonte-Piedra Colgada). Al mismo tiempo, el impacto sobre el sector acuífero 6 es limitado en la Estrategia 1.3e, no alcanzando a impactar los caudales ecológicos en la estación Angostura.

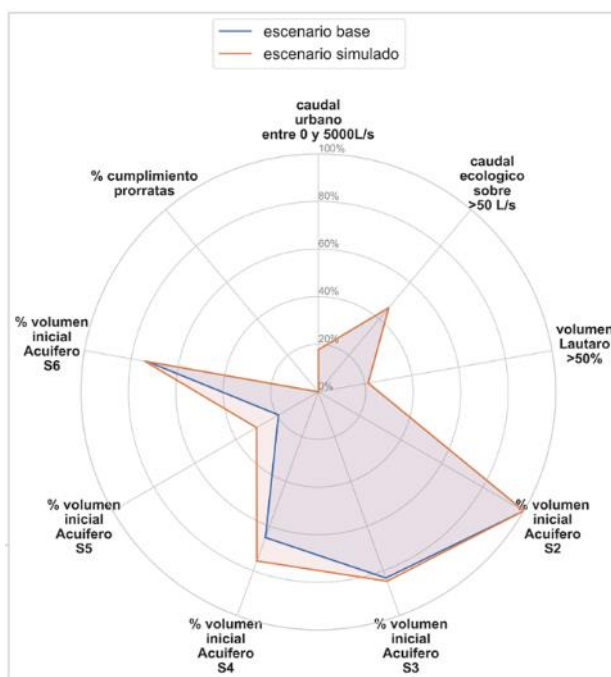


Figura 68 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 1.3e

Infraestructura regularizada

Estrategia 2.1: Impermeabilización superficie de fondo del Embalse Lautaro

La implementación de esta estrategia muestra un impacto directo en los volúmenes subterráneos del sector acuífero 2, los volúmenes embalsados superficiales disponibles en el embalse Lautaro

para regulación, los caudales urbanos registrados en la ciudad de Copiapó, e impactos marginales en los volúmenes embalsados en los sectores acuíferos 3 y 4.

Con la impermeabilización del 100% de la superficie de fondo del Embalse Lautaro se genera una disminución sostenida de los niveles freáticos para aquellos pozos localizados en la parte alta del sector acuífero 2 debido a la reducción de las infiltraciones desde el embalse. En el mediano (2024-2033) y largo plazo (2033-2043) se observan descensos promedios de 10 m, alcanzando valores máximos cercanos a los 50 m inmediatamente aguas abajo del embalse Lautaro. La Figura 69 muestra la evolución de los niveles freáticos del acuífero el sector 2 para el escenario base y la implementación de la Estrategia 2.1. En general se observa una disminución de los niveles del acuífero en el mediano y largo plazo para los pozos hasta el sector Goyo Díaz de entre 20 y 40 m. La zona de impacto, sin embargo, se extiende aguas abajo hasta el sector Pueblo San Antonio en el largo plazo, mostrando una ligera tendencia al descenso hacia el final del período de simulación.

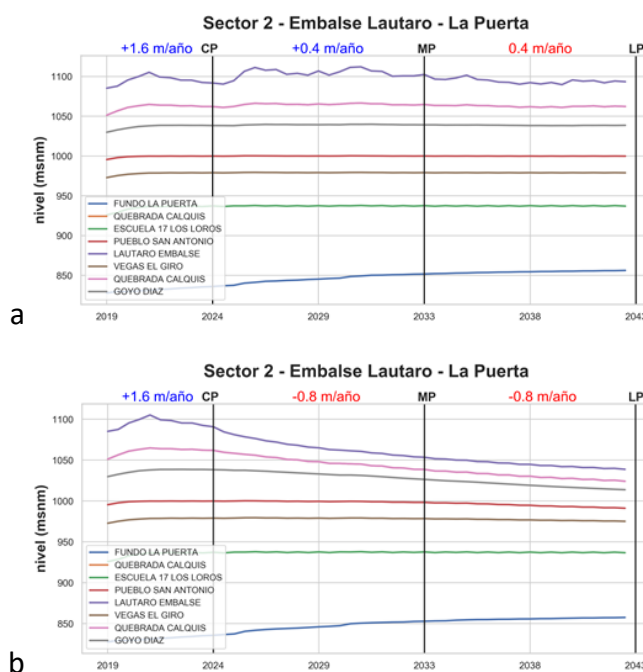


Figura 69 Evolución niveles freáticos en estaciones de monitoreo DGA para el sector acuífero 2 para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.1

En términos del impacto sobre la operación y el balance hídrico del Embalse Lautaro, la Figura 70 muestra las principales entradas y salidas desde el Embalse Lautaro bajo el escenario base y la Estrategia 2.1. El escenario simulado considera la impermeabilización del 100% del fondo del embalse a partir del quinto año (2024). En general se observa que los caudales de descarga se hacen regulares anualmente por sobre los 2.000 l/s. Al mismo tiempo, dado el mayor volumen de acopio, los caudales de vertido se hacen más regulares con 18 de 20 años haciendo uso del vertedero. A su vez, a contar del año 2024 las pérdidas por infiltraciones se reducen a 0, produciendo un aumento substancial en el volumen de acopio por sobre el 50% del volumen útil del embalse. Al mismo tiempo es posible observar un aumento substancial en aquellos períodos sobre los cuales el Embalse Lautaro se encuentra cercano a una capacidad del 100%, lo cual significa un aumento en el peligro de inundación. Resulta por lo tanto importante co-diseñar estrategias que permitan el

acopio de estos excedentes aguas abajo del Embalse Lautaro mediante obras de recarga de acuíferos.

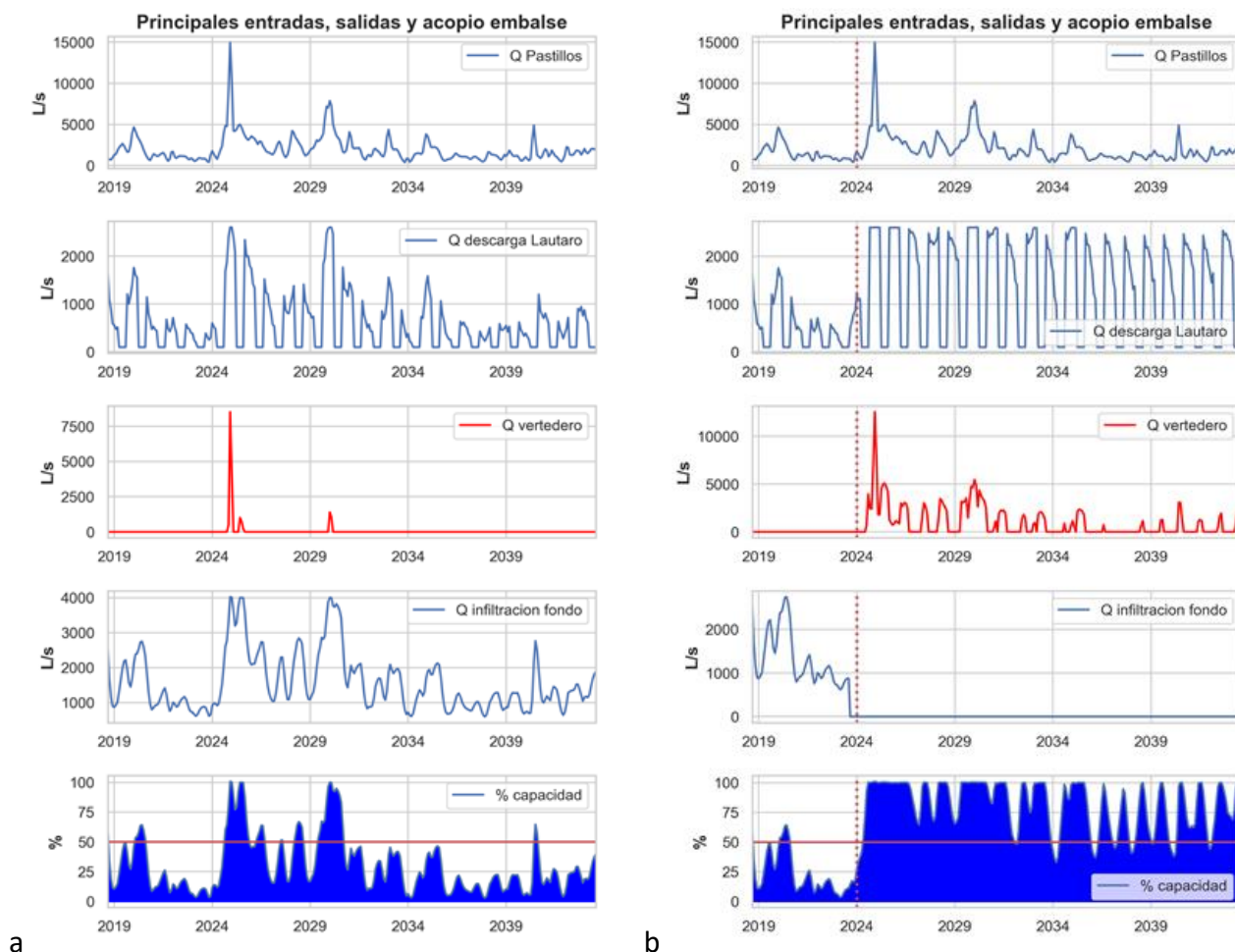


Figura 70 Análisis de la operación y el balance hídrico del Embalse Lautaro para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.1

La Figura 71 muestra el resultado de la implementación de esta estrategia sobre los indicadores de impacto definidos en la Sección 3.6. Esta figura compara la situación del escenario base versus los resultados de la implementación de la Estrategia 2.1. En general se observa que el número de años donde se registra caudal urbano (i.e. caudal definido en el rango [0 y 5000] l/s en la ciudad de Copiapó) aumenta desde valores cercanos al 18% del tiempo para el escenario base hasta un 30% para el escenario incluyendo la estrategia. Al mismo tiempo, el porcentaje de tiempo que el embalse Lautaro está por sobre el 50% de su capacidad máxima aumenta desde valores cercanos al 20% para el escenario base hasta valores cercanos al 70% para el escenario con estrategia. Otros impactos que pueden identificarse en la Figura 71 muestran una reducción substancial del volumen embalsado (con respecto al volumen inicial) para el sector acuífero 2, y aumentos marginales para los volúmenes embalsados en los sectores acuíferos 3 y 4 como producto de la mayor recarga derivada del mayor acopio y distribución de aguas superficiales aguas abajo del sector acuífero 2. A pesar de esto, sin embargo, los impactos de mayores tasas de recarga a través del río no se observan aguas debajo de la ciudad de Copiapó (sector acuífero 5).

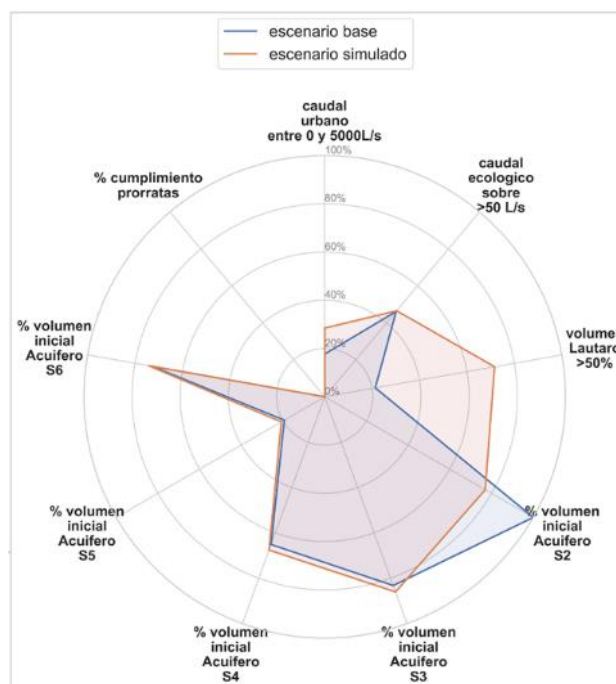


Figura 71 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 2.1

Estrategia 2.2: Entubamiento canales de riego

La Estrategia 2.2 reduce la tasa de infiltración desde los canales asociados a los distritos de riego 1 a 9 a valores teóricos de cero infiltración. Es decir, se asume que la demanda neta desde los sectores de riego que utilizan canales matrices y secundarios para su alimentación es igual a la demanda en bocatoma. La implementación de esta estrategia implica una mejor satisfacción de la demanda de riego, especialmente en aquellos sectores de riego que se abastecen mediante los canales administrados por JVRC (Distritos 1 a 9). Esta mayor satisfacción de la demanda producto de la reducción de las pérdidas por transporte de agua reduce la presión sobre el sector acuífero 3 (y marginalmente sobre el sector acuífero 4), el cual experimenta ligeras recuperaciones en sus volúmenes embalsados en el tiempo. Esto se confirma con disminuciones observadas en las tasas de descenso promedio para el sector acuífero 3 de 0,6 a 0,5 m/año en el mediano y largo plazo.

La Figura 72 muestra las matrices de satisfacción de la demanda de riego para aquellos predios alimentados exclusivamente por canales (matrices y secundarios) ubicados dentro de los distritos de riego 1 a 9. Esta figura también incluye los caudales adicionales bombeados requeridos para suplir la demanda de riego mediante aguas subterráneas. De esta figura se observa una satisfacción de la demanda cercana al 100% para los distritos de riego 2, 3, 4 y 5 en ambos escenarios (sin y con estrategia). Se observa que al implementar la Estrategia 2.2 la satisfacción de las demandas aumenta en los distritos 1, 6 y 7 sobre el 60%. Para el caso de los distritos 8 y 9, si bien los valores bajo el 100% son cada dos años, se aprecia que en comparación al escenario base (11 años) sólo en 6 años se registran valores cercanos a cero para la satisfacción de la demanda. En términos del bombeo adicional requerido, al implementar la Estrategia 2.2 los bombeos adicionales máximos requeridos no superan los 225 L/s para aquellos predios que consideran fuente mixta, i.e. agua superficial y subterránea.

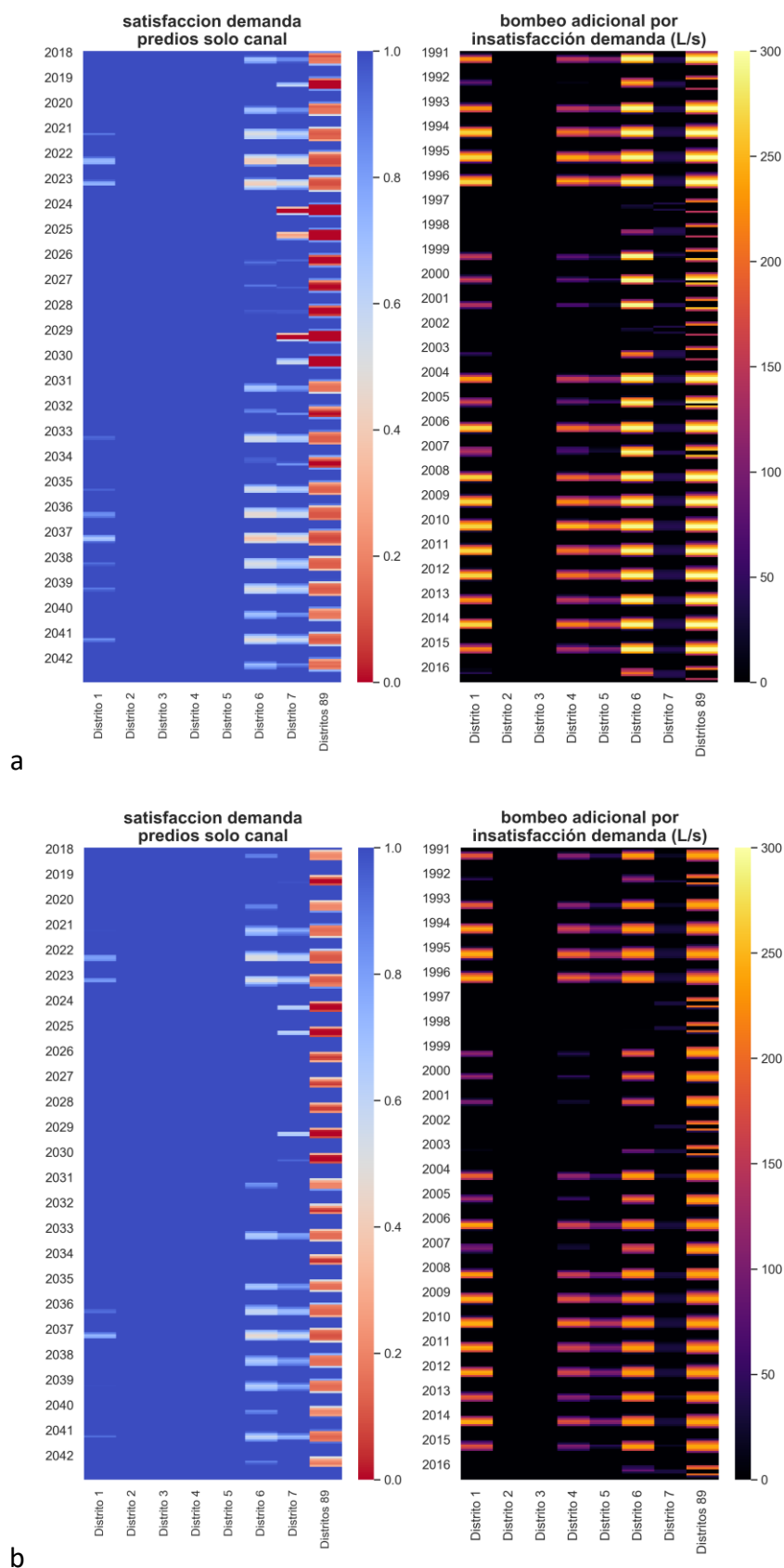


Figura 72 Satisfacción de la demanda en predios que utilizan solo canal y bombeo adicional requerido debido a insatisfacción de la demanda para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.2

La disminución del bombeo adicional requerido para suplir la demanda de riego, junto a la mayor disponibilidad de agua superficial en bocatoma permite a los sectores acuíferos 3 y 4 mostrar ligeras señales de recuperación en sus volúmenes embalsados en el largo plazo. Sin embargo, esto no es suficiente para revertir la tendencia a la profundización de los niveles freáticos. Esto se observa en la Figura 73 donde se muestran los indicadores de impacto obtenidos de la implementación de la Estrategia 2.2.

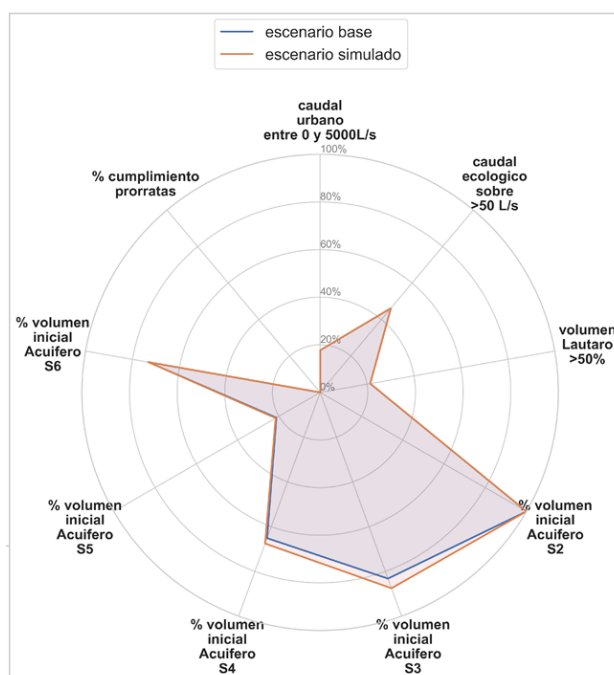


Figura 73 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 2.2

Estrategia 2.3: Operación planta desaladora estatal

El escenario base descrito en la Sección 3.3.2 considera la puesta en operación de la planta desaladora de manera progresiva hasta una explotación cercana a los 900 L/s en el año 2030. Posterior a este año la demanda de agua potable se suple enteramente con la planta desaladora hasta una explotación de 930 L/s al año 2043. **Esta situación ha sido implementada en todas las estrategias analizadas como parte del plan de puesta en operación de la nueva planta desaladora estatal.** La Estrategia 2.3 considera como alternativa a la puesta en operación progresiva de la planta desaladora, un proceso en dos etapas (2019-2023 y 2024-2028). Esto implica el reemplazo de los pozos de producción de Aguas Chañar localizados en los sectores acuíferos 5 y 6 por agua desalada. La Figura 74 muestra los caudales de agua desalada para cada escenario simulado a lo largo del tiempo.

La Figura 75 muestra los indicadores de impacto para la Estrategia 2.3 comparado con el escenario base. En general, se observa que no existen cambios substanciales en las recuperaciones de los acuíferos si la planta desaladora se implementa a plena capacidad de manera progresiva o en etapas.

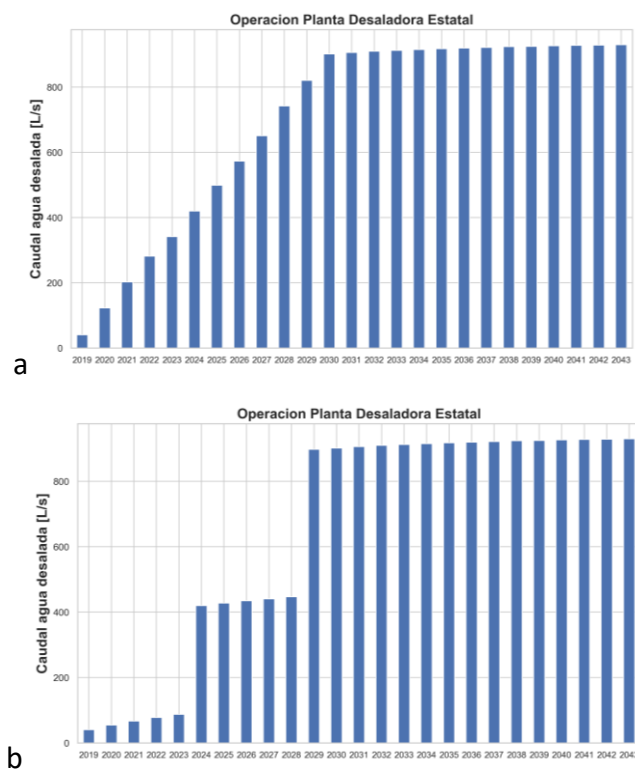


Figura 74 Caudales de agua desalada requeridos para: a) escenario base, y b) Estrategia 2.3

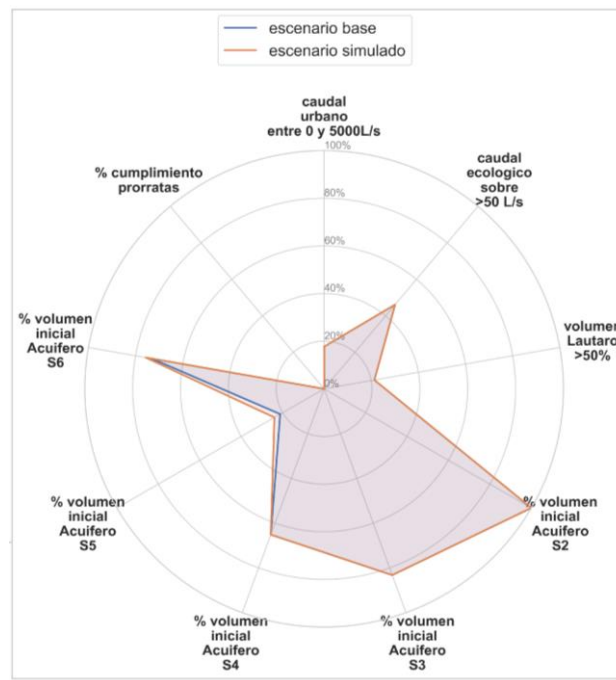


Figura 75 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 2.3

Gestión de recarga de acuíferos

Estrategia 3.1: Recarga artificial de acuíferos

La estrategia 3.1 considera la construcción de obras de gestión de recarga de acuíferos a lo largo del cauce del río Copiapó en cuatro sectores: Nantoco, Parque Kaukari (aguas arriba y aguas abajo) y sector Piedra Colgada. Cada obra ha considerado la limitada disponibilidad de superficie y el alto valor del suelo para actividades agrícolas en el valle de Copiapó, y por lo tanto se ha restringido su extensión a 3,5 ha, y se ha adoptado una tasa de infiltración de 1 m/d sobre la base de los materiales que conforman la caja y el lecho del río Copiapó.

La Figura 76 muestra los caudales de recarga a través del lecho del río Copiapó y su caja para el escenario base y la implementación de la Estrategia 3.1. Cabe destacar que ambos consideran la hidrología histórica observada en Río Copiapó en Pastillo como dato de entrada. Es posible observar para esta figura que bajo condiciones históricas es factible aumentar los caudales de recarga promedio en el lecho del río en un 28 % (112 L/s) para el sector acuífero 4. La obra de recarga artificial de acuíferos considerada en Piedra Colgada, sin embargo, no reporta aumentos en los caudales como se observa en el panel b de la Figura 76.

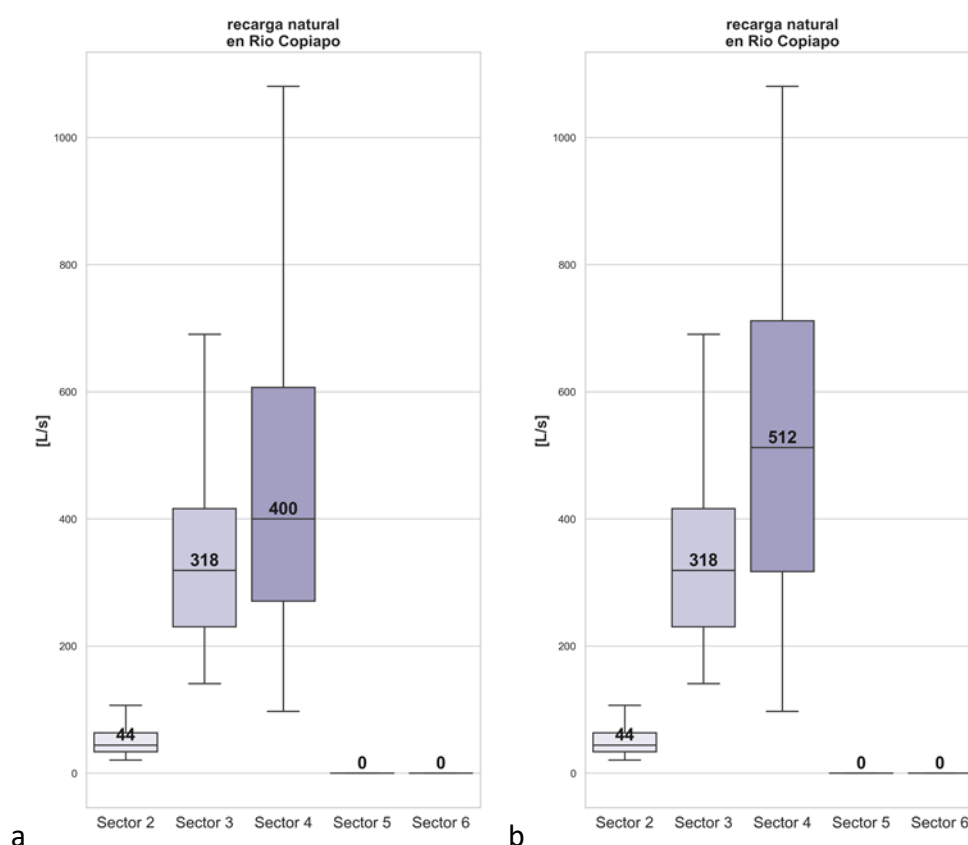


Figura 76 Valores de recarga artificial para: a) escenario base, y b) Estrategia 3.1

La Figura 77 muestra los impactos para diferentes indicadores de la implementación de la estrategia 3.1.

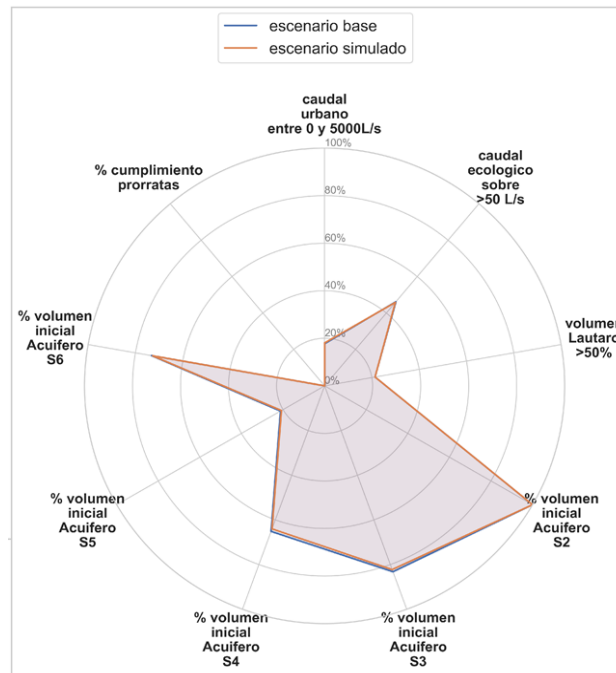


Figura 77 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la Estrategia 3.1

Acuerdos entre actores

Estrategia 4.1: Prorrata de aguas subterráneas en los sectores acuíferos 3, 4 y 5

La Estrategia 4.1 consiste en disminuir la demanda de aguas subterráneas en un 40% como sugerido en el estudio DGA-DICTUC (2010) en los sectores 3, 4 y 5. Esta estrategia se implementa sobre la base del desarrollo del modelo basado en agentes (ABM) para evaluar la predisposición de los usuarios de aguas subterráneas, principalmente agricultores, a seguir la sugerencia de prorrata y el potencial cumplimiento en términos de adherencia a esta regulación. Existen dos sub-escenarios considerados los cuales se relacionan a la capacidad de monitoreo y fiscalización de la DGA en términos de seguimiento de la prorrata sugerida: a) se asume una alta capacidad de monitoreo y fiscalización por parte de la DGA (90% del total de usuarios de aguas subterráneas), y b) se asume una baja capacidad de monitoreo y fiscalización por parte de la DGA (20% del total de usuarios de aguas subterráneas). A continuación, se describen los resultados del sub-escenario a (alta capacidad de monitoreo y fiscalización).

La implementación de esta estrategia muestra impactos directos sobre los volúmenes de los sectores acuíferos 3, 4, 5 y 6, y en el porcentaje de cumplimiento de la prorrata implementada. La Figura 78 muestra la variación de los volúmenes embalsados en los distintos sectores acuíferos del valle de Copiapó. Al implementar una prorrata del 40% en los sectores 3, 4 y 5 se observa que el sector acuífero 3 pasa de un estado de vaciado a uno de llenado en sus volúmenes mostrando tasas positivas (i.e. aumento de volumen) para todo el período de simulación. Al mismo tiempo, los sectores acuíferos 4, 5 y 6 muestran importantes reducciones en los cambios negativos de volúmenes embalsados, indicando recuperación en los volúmenes acuíferos. Sin embargo, a pesar de esto, estos sectores acuíferos aún se encuentran en una situación de vaciado. Resulta interesante destacar que a pesar de no implementar una prorrata explícita en el sector acuífero 6,

éste último sector también experimenta recuperaciones importantes en términos de volúmenes embalsados, las cuales se hacen más relevantes hacia el final del período simulado.

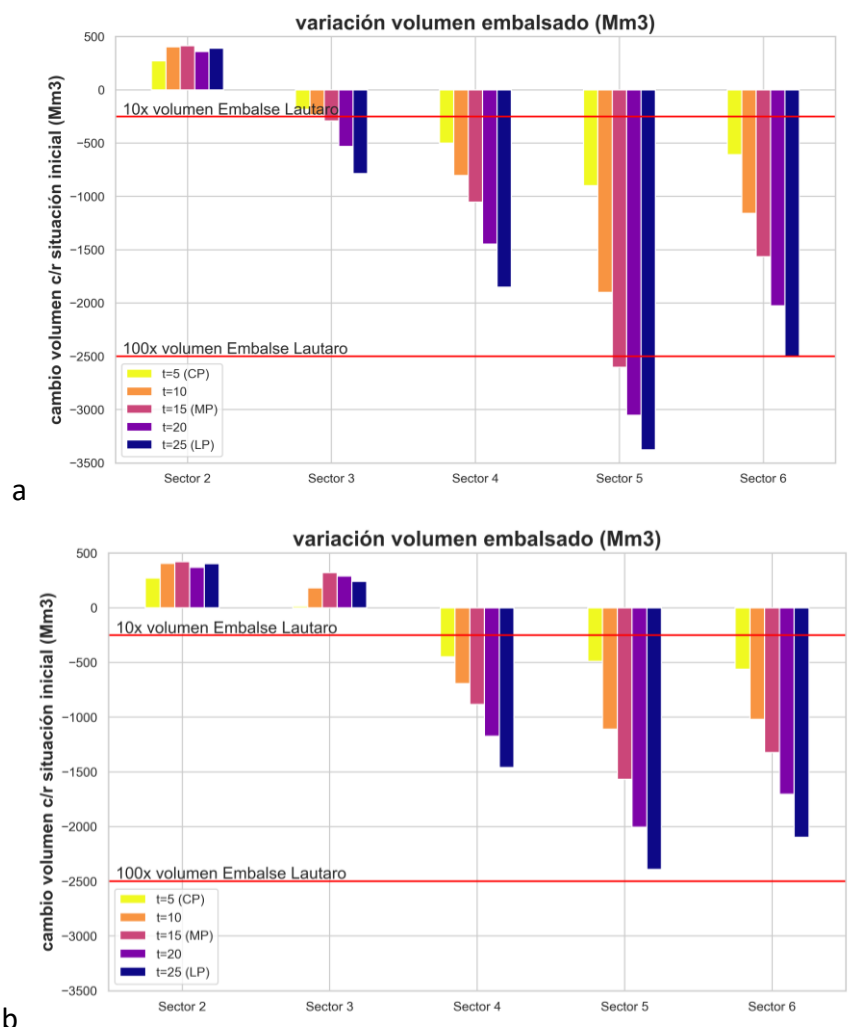


Figura 78 Variación volumen embalsado (con respecto al volumen inicial) en sectores acuíferos del valle de Copiapó para a) escenario base, y b) Estrategia 4.1

La Figura 79 muestra la evolución de los niveles freáticos en los distintos sectores acuíferos. Debido al impacto de la prorrata se muestra una substancial recuperación de los niveles simulados en comparación al escenario base en los sectores acuíferos 3 y 4, los cuales se estabilizan o muestran ligeras disminuciones promedio en el largo plazo. Para el sector acuífero 5 la tendencia promedio al descenso se amortigua substancialmente en el mediano y largo plazo, indicando que las pérdidas de volumen embalsado serían menos pronunciadas en comparación al escenario base. El sector acuífero 6 muestra tasas de descenso promedio similar a aquellas del escenario base (sin prorrata). Es importante destacar que estos resultados muestran fluctuaciones locales importantes, y si bien las tasas de descenso promedio pueden disminuir, existe la posibilidad de una tendencia a la disminución de los niveles freáticos en lugares específicos de los sectores acuíferos.

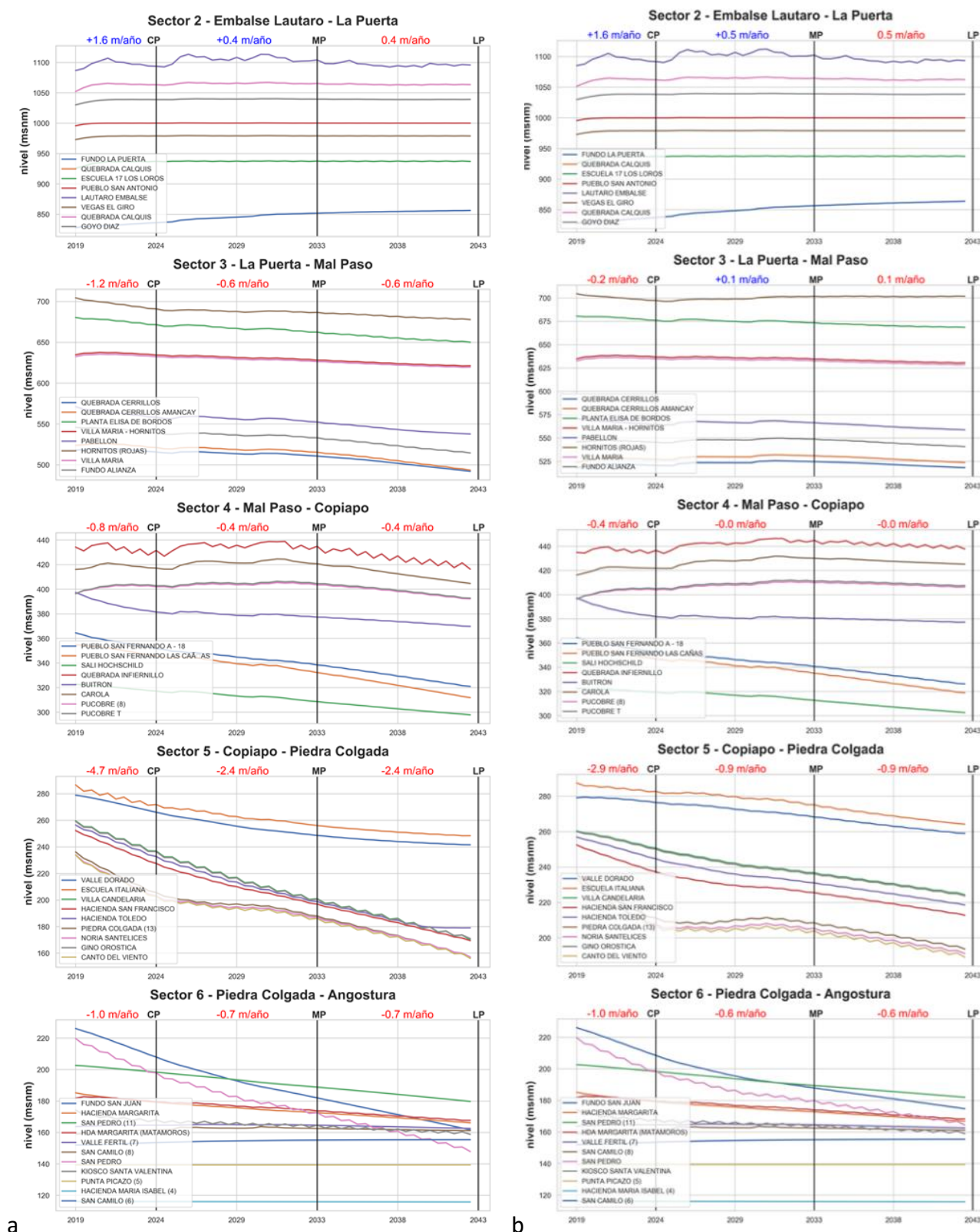


Figura 79 Evolución niveles freáticos en estaciones de monitoreo DGA en los sectores acuíferos para: a) escenario base, y b) Estrategia 4.1

La herramienta SimCopiapó permite aproximar los costos de bombeo mediante una ecuación de potencia para una bomba centrífuga utilizada para levantar cierto volumen de agua a una altura definida como la profundidad de los niveles freáticos promedio. La Figura 80 muestra que la mayor

reducción de costos de bombeo una vez implementada la estrategia 4.1 se observa en los sectores acuífero 3 y 5, especialmente en el mediano y largo plazo. La reducción de costos es menos sustancial para los sectores acuíferos 4 y 6, pero al igual que los sectores acuíferos 3 y 5, se manifiesta en el mediano y largo plazo.

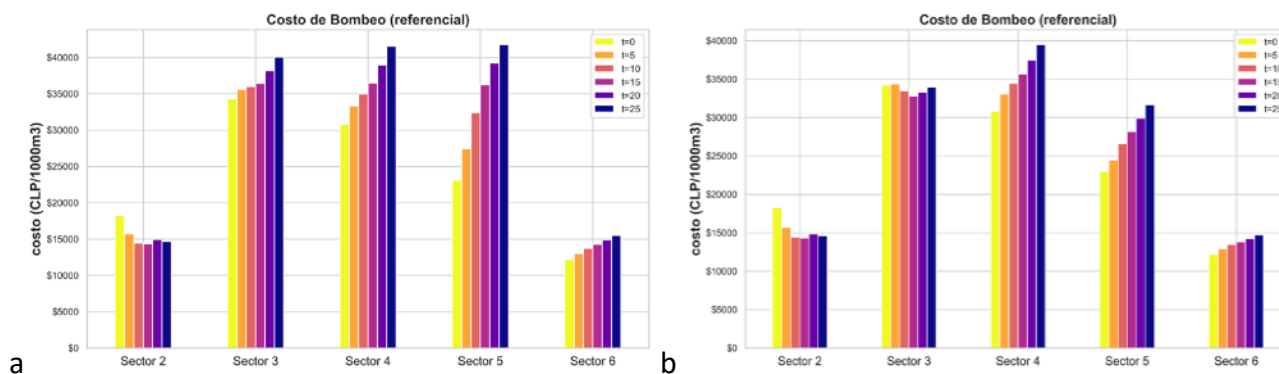


Figura 80 Costo del bombeo referencial en Pesos Chilenos por sector acuífero en el valle de Copiapó para: a) escenario base, y b) Estrategia 4.1

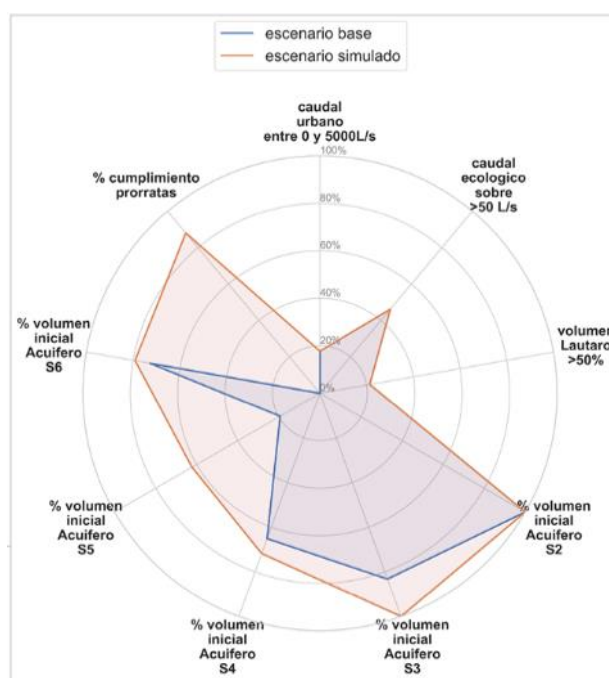


Figura 81 Resumen indicadores de impacto para la Estrategia 4.1 (sub-escenario a)

Finalmente, la Figura 81 resume el impacto de la Estrategia 4.1. En general, esta figura muestra que el estado de los acuíferos en términos volumétricos mejora hacia el final del período de simulación. Solo el sector acuífero 3, muestra estabilización por sobre los valores volumétricos iniciales (>100%). Sin embargo, los sectores acuíferos 4, 5 y 6 también indican un estado favorable en términos de volúmenes embalsados al final del período de simulación. La mejora más sustancial se observa para el sector acuífero 5, el cual mejora desde una tasa de cambio volumétrico del 20% hasta una tasa de cambio sobre el 60% con respecto al volumen inicial del acuífero.

Al mismo tiempo es posible observar en la Figura 81 un porcentaje de cumplimiento de la prorrata cercana al 90%, lo que indicaría que una alta proporción de los usuarios adhieren a la prorrata. Es importante destacar que este porcentaje es finalmente función de las capacidades para monitorear y fiscalizar el uso y explotación de las aguas subterráneas por parte del ente regulador. A modo de ejemplo, la Figura 82 muestra el resumen de los indicadores de impacto para el caso del sub-escenario b (baja capacidad de monitoreo y fiscalización). Esta figura muestra que, para una limitada capacidad de monitoreo y fiscalización, el cumplimiento o adherencia a la prorrata sugerida es bajo el 10% de los usuarios. Esto no genera grandes cambios en los volúmenes acuíferos, con excepción del sector acuífero 5 (y parcialmente el sector acuífero 6), el cual muestra importantes recuperaciones en términos de volúmenes al final del período de simulación. Esto está principalmente asociado a la magnitud de los volúmenes de explotación de aguas subterráneas registrados en estos sectores, y la puesta en operación de la planta desaladora y la progresiva desactivación de los pozos de aguas Chañar en los sectores acuíferos 5 y 6.

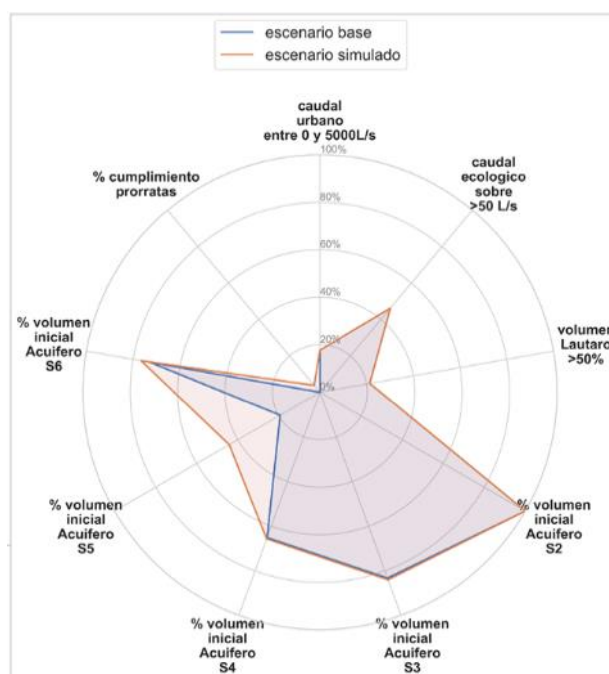


Figura 82 Resumen indicadores de impacto para la Estrategia 4.1 (sub-escenario b)

Gestión de la demanda agua potable

Estrategia 5.1: Reutilización aguas grises urbanas

La Estrategia 5.1 implica la reutilización de aguas grises domésticas lo que se traduce en una reducción del 20% de la demanda de agua potable obtenida desde aguas subterráneas. Considerando que la planta desaladora está en operación en ambos escenarios analizados (base y con Estrategia 5.1), el impacto real de esta estrategia es limitado y disminuye (en términos absolutos) con el tiempo. Cabe destacar que la configuración del ejercicio de simulación asume que la población se abastece con agua desalada al 100% de la demanda hacia el año 2030. La Figura 83 muestra los indicadores de impacto para la implementación de esta estrategia.

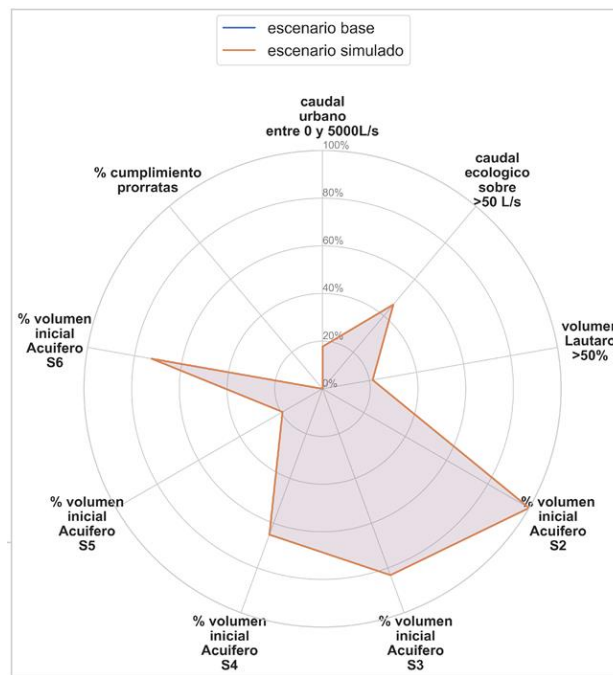


Figura 83 Resumen indicadores de impacto para la Estrategia 5.1

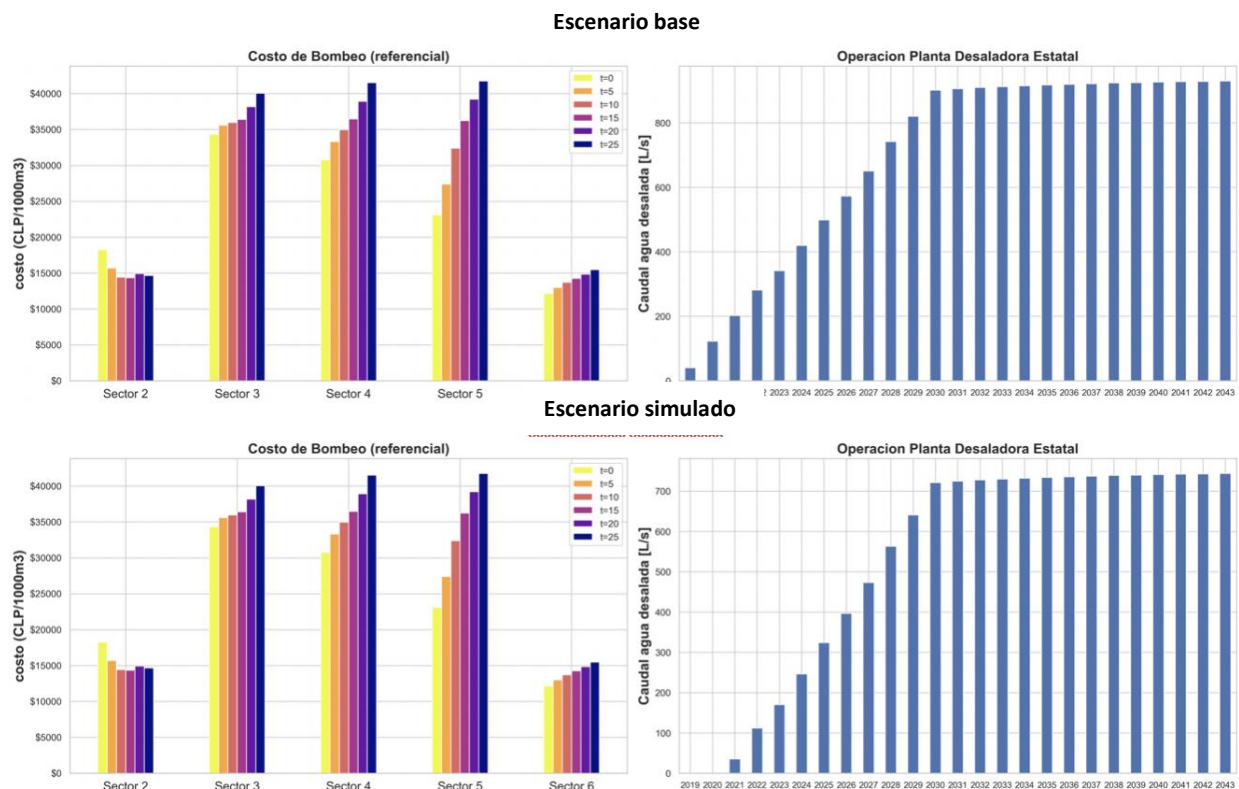


Figura 84. Costo del bombeo referencial en Pesos Chilenos por sector acuífero en el valle de Copiapó para escenario base, y Estrategia 5.1

4.2.2 Combinatoria de estrategias

Claramente cada estrategia muestra un impacto acotado y bien definido sobre algún indicador de impacto de interés. Resulta por lo tanto interesante evaluar una potencial combinación de estrategias que permita maximizar aspectos ambientales, sociales y económicos relacionados a la gestión de los recursos hídricos en el valle del río Copiapó. Bajo esta premisa resulta imposible analizar el sistema bajo una mirada sectorial, es decir, bajo la perspectiva de las aguas subterráneas independiente de la perspectiva de las aguas superficiales. En este caso, ambas componentes necesitan ser analizadas en su conjunto y los impactos en cada una de ellas cuantificados y posiblemente relacionados más allá de las componentes físicas tradicionalmente analizadas.

En esta sección se presentan los resultados de la combinatoria de las siguientes estrategias:

1. Distritos 8 y 9 traspasan volúmenes asignados hacia aguas abajo (Estrategia 1.3c);
2. Impermeabilización 100% superficie de fondo del Embalse Lautaro (Estrategia 2.1);
3. Planta Desaladora operativa en 10 años (Estrategia 2.3);
4. Obras de recarga artificial de acuíferos (Estrategia 3.1);
5. Prorrata 40% demanda aguas subterráneas en sectores acuíferos 3, 4 y 5 con alta capacidad de monitoreo y fiscalización (Estrategia 4.1).

Para cada una de estas estrategias individuales los resultados en términos de balances hídricos y componentes del flujo, así como los impactos sectoriales más sustanciales han sido analizados en las secciones anteriores y presentados en el Anexo C.2

La Figura 85 resume los indicadores de impacto para la combinatoria de estas estrategias. Al combinar estas estrategias los mayores impactos se traducen en mayor disponibilidad de aguas superficiales en el embalse Lautaro para distribución en los distintos distritos de riego, presencia de escurrimiento superficial en la ciudad de Copiapó gran parte del período simulado, estabilización y/o cuasi recuperación del sector acuífero 3 dentro del rango de volúmenes iniciales, y recuperación substancial del sector acuífero 5. El porcentaje de cumplimiento de la prorrata si bien se considera un indicador clave, está sujeto a la capacidad de monitoreo y fiscalización efectiva implementada por el ente regulador.

La mayor disponibilidad de aguas superficiales en el embalse Lautaro trae consigo mayores volúmenes de vertido dado que éste se mantiene por sobre el 50% de su volumen de acopio gran parte de las temporadas de riego. Esto trae consigo la necesidad de gestionar este volumen superficial disponible de manera de aprovechar este recurso para recargar los acuíferos aguas abajo. El mayor impacto negativo de impermeabilizar el fondo del embalse Lautaro se traduce en la drástica reducción de niveles y flujos pasantes en el sector acuífero 2, inmediatamente aguas abajo del embalse. Por lo tanto, parece razonable incluir en la combinatoria de estrategias la recarga de acuíferos con la finalidad de maximizar el volumen para la recuperación de éstos.

Otro indicador de alto impacto corresponde a los caudales urbanos definidos como tolerables desde el punto de vista hidráulico en la ciudad de Copiapó. Este indicador de impacto está fuertemente controlado por el swap hídrico desde los distritos 8 y 9. En este caso existe un trade-off entre los usuarios de agua superficial de los distritos 8 y 9, la Junta de Vigilancia, y la ciudadanía en su más amplio contexto. La valorización de la presencia de agua superficial escurriendo a través de la ciudad debe considerarse en el contexto de una evaluación del tipo de triple línea de fondo. Es muy

factible que el valor que la ciudadanía le da al agua en la ciudad supere el potencial uso del agua por parte de los distritos 8 y 9. Al mismo tiempo resulta interesante destacar que este volumen disponible ayuda a recargar los sectores acuíferos 4 y 5.

La prorrata sobre las aguas subterráneas permite la estabilización del sector acuífero 3, sin embargo, claramente se hace necesario implementar distintos niveles de prorrata para distintos sectores acuíferos de manera de poder estabilizar el sistema de aguas subterráneas en su conjunto. Con esto en mente, es probable que el sector acuífero 4 necesite un nivel más alto de prorrata con un cumplimiento mayor al 88% (obtenido actualmente). Es importante destacar que la adhesión a cualquier nivel de prorrata estará sujeta a factores como la capacidad de fiscalización de los organismos del Estado y la implementación de multas o infracciones a aquellos que no adhieran al nivel de prorrata.

Finalmente, la implementación de la combinatoria de estrategias ayuda a mejorar marginalmente los caudales ecológicos registrados en Angostura, definidos sobre la base de un caudal ecológico mínimo de 50 l/s.

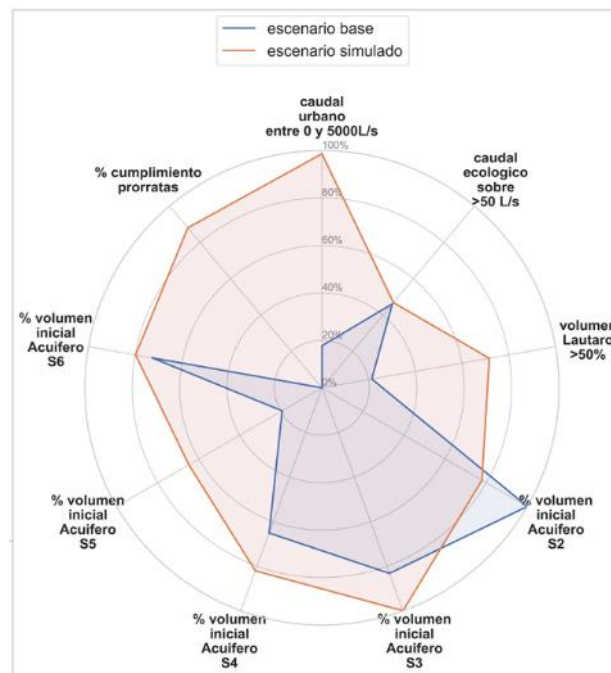


Figura 85 Resumen indicadores de impacto obtenidos para la combinatoria de estrategias

5 Conclusiones

Este informe describe el diseño, desarrollo, testeo, implementación y aplicación de la herramienta computacional SimCopiapó. Esta herramienta ha sido diseñada mediante un proceso participativo/consultivo que ha permitido recoger los intereses y necesidades de los actores clave en materia de recursos hídricos presentes en la cuenca del río Copiapó. Este proceso participativo ha permitido un traspaso de conocimiento hacia los actores clave de manera continua a lo largo del proyecto. Se espera que este proceso apunte a una transferencia tecnológica efectiva hacia los actores clave y usuarios interesados.

La cuenca del río Copiapó ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, y muchos organismos de investigación e investigadores han tratado de explicar los factores que han gobernado la permanente crisis hídrica establecida en la cuenca. Este trabajo aporta a este debate proporcionando al Gobierno Regional una herramienta sofisticada, flexible, y de código abierto, que permite evaluar estrategias de intervención hídrica (y/o la combinatoria de éstas) y visualizar los impactos de dichas estrategias sobre aspectos sociales, económicos y ambientales relacionados a los recursos hídricos. Al ser una herramienta de código abierto, los usuarios interesados podrán actualizar la herramienta con nuevas estrategias y/o indicadores de impacto, y versiones más actualizadas de los modelos hidrológicos disponibles, si así fuera necesario. Cabe destacar que SimCopiapó ha considerado un número importante de mejoras a las herramientas de modelación hidrológica disponibles para la cuenca del río Copiapó.

Los resultados indican que la definición de estrategias individuales tendrá impactos sectoriales claramente definidos y acotados. Por ejemplo, la impermeabilización de la superficie del fondo del embalse Lautaro aumentará el volumen embalsado la mayor parte del tiempo entregando mayor seguridad hídrica a los distritos de riego, pero tendrá un impacto negativo sobre los volúmenes almacenados y niveles del acuífero ubicado inmediatamente aguas abajo del embalse (sector acuífero 2). De manera similar, otras estrategias permitirán que los sectores acuíferos no continúen experimentando un deterioro sostenido, potenciarán la presencia de escurrimiento superficial en la ciudad de Copiapó, la disminución y/o aumento de los costos de bombeo, y la mantención de caudales ecológicos en sitios de interés como el humedal de la desembocadura del río Copiapó. Es importante mencionar que estos resultados están condicionados a los supuestos asumidos para la implementación de estas estrategias en SimCopiapó, así como también a la limitación en la recolección y levantamiento de datos para describir los procesos físicos que ocurren en el sistema hídrico de la cuenca del río Copiapó. De esta manera, estrategias como la gestión de la recarga de acuíferos muestra impactos limitados debido a su configuración (por ejemplo, limitado espacio físico en la caja del río para piscinas de infiltración) e implementación (tasas teóricas de infiltración solo en años de volúmenes excedentes).

Sobre la base del análisis de los resultados individuales, resulta evidente que la combinación de algunas de las estrategias presenta los mayores beneficios a la sociedad en su conjunto desde un punto de vista de la sustentabilidad de los recursos hídricos en el largo plazo. Sin embargo, estos beneficios deberán ser analizados en un esquema de contabilidad del tipo Triple Línea de Resultados, la cual permita visualizar potenciales compromisos (trade-offs) que la sociedad en su

conjunto esté dispuesta a asumir como cargo por la implementación de dichas estrategias. Al mismo tiempo, sería factible mediante la definición de alguna métrica de performance de interés para los actores clave (por ejemplo, satisfacción de la demanda, seguridad hídrica para el consumo humano, caudal ecológico mínimo, producción agrícola, producción minera, etc.), diseñar un ejercicio de priorización de las estrategias hídricas definidas en este estudio en términos de beneficios sociales, ambientales y/o económicos. Esta actividad, sin embargo, ha estado fuera del alcance de este proyecto y se plantea como una actividad de investigación futura.

En términos de sustentabilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó, claramente las aguas subterráneas poseen un rol fundamental al suplir gran parte de la demanda de recursos hídricos observada en la cuenca. Esto infiere al acuífero del valle del río Copiapó una presión sostenida por el uso de sus recursos. Una disminución de la demanda de aguas subterráneas del 40% – implementada mediante la estrategia de prorrata de aguas subterráneas en los sectores acuíferos 3-4-5 con un alto nivel de cumplimiento (88% de los usuarios) –, sin embargo, no permite que el sistema de aguas subterráneas se estabilice en el largo plazo (25-30 años). La excepción a este comportamiento se observa sólo para el sector acuífero 3, el cual muestra una estabilización y/o leve tendencia hacia la recuperación de los niveles y volúmenes almacenados de aguas subterráneas hacia el final del período de simulación (2043). Esto último indicaría que distintos niveles de prorrata, sujetos potencialmente a distintos niveles de monitoreo y/o fiscalización de parte del ente regulador (por ejemplo, la DGA), pueden ser necesarios de implementar para distintos sectores acuíferos.

El objetivo último de esta herramienta es ayudar a visualizar potenciales compromisos y contribuir al dialogo constructivo y participativo para aportar al diseño de políticas públicas que permitan implementar una gestión sustentable de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó con una mirada multisectorial de largo plazo.

Anexo A Programación de gastos

A.1 Programación de gastos hasta la fecha (31-05-2019)

A continuación, se adjunta la programación de gastos que se ha realizado en el proyecto hasta el final de mayo de 2019.

Partida	Costo Original Aprobado FIC	Costo Aprobado FIC ORD N° 127	Oct-17	Nov-17	Dec-17	Jan-18	Feb-18	Mar-18	Apr-18	May-18	Jun-18	Jul-18
			Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido
Gastos de Operación	\$ 34,745,000	\$ 22,078,080	2,810	1,168,072	4,304,555	2,012,719	423,451	43,406	513,719	2,809,911	1,587,372	659,014
Talleres	7,200,000	3,746,349				764,229			247,350	282,444	0	252,376
arriendo de vehiculo	640,000	97,387					97,387				0	
Pasajes internacionales entre Australia y Chile	7,000,000	7,000,000			3,889,326					1,874,453		
Viáticos de profesionales CSIRO Australia en Chile	5,565,000	3,400,348				471,392					932,560	
Pasajes nacionales entre Santiago y Copiapó	3,750,000	2,799,633		184,212		254,180			9,649	218,136	278,240	204,704
Viáticos de profesionales CSIRO Chile	3,570,000	3,352,854		345,570		113,630	292,064	5,000	222,720	320,237	337,826	167,934
Materiales e insumo de oficina	540,000	702,933		82,610		339,104				61,657		
Consumos básicos (Luz, Agua Telefonía)	1,800,000	714,000		68,000	166,000	34,000	34,000	34,000	34,000	34,000	34,000	34,000
Correspondencia	360,000	264,576	2,810	7,680	9,229	36,184		4,406		18,964	4,746	
Arriendo de oficina	4,320,000	0		480,000	240,000							
Gastos de Honorarios	\$ 112,854,196	\$ 125,169,902	1,253,728	3,728,430	17,896,297	4,588,432	2,294,216	1,713,334	2,875,098	2,294,216	2,294,216	2,294,216
Edmundo Claro	19,636,364	22,923,408	1,009,728	1,095,684		2,191,368	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684
Juan Carlos Castilla	32,432,432	32,769,655			8,156,409							
Rodrigo Rojas	38,712,150	43,795,863			9,739,888							
Camilo Prats	10,875,000	12,617,640		1,580,882		1,161,764	580,882		1,161,764	580,882	580,882	580,882
Gabriella Bennison	7,815,850	9,054,562		868,428		868,428	434,214	434,214	434,214	434,214	434,214	434,214
Administrativo	1,728,000	2,008,240	140,000	93,412		186,824	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412
Alejandra Cuevas	1,634,400	1,904,480	104,000	90,024		180,048	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024
Diferencia \$ x hrs		96,054										
Gastos de Difusión	\$ 1,400,000	\$ 1,827,268	0	0	0	452,200	6,297	0	14,349	0	75,000	0
Material impreso del proyecto	1,400,000	1,827,268				452,200	6,297		14,349		75,000	
TOTALES			1,256,538	4,896,502	22,200,852	7,053,351	2,723,964	1,756,740	3,403,166	5,104,127	3,956,588	2,953,230

Aug-18	Sep-18	Oct-18	Nov-18	Dec-18	Jan-19	Feb-19	Mar-19	Apr-19	May-19	Total Gastado	Saldo Disponible	Saldo Disponible Real sin reintegro de fondos	MONTO A REINTEGRAR
Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido	Rendido				
111,254	106,912	729,532	56,781	41,920	572,682	102,761	70,726	21,452	1,445,182	16,784,231	5,293,849	2,440,249	
					199,950					1,746,349	2,000,000	2,000,000	
										97,387	0	0	
										556,457	6,320,236	-1,198,980	1,878,744
		393,906	3,990							761,668	2,563,516	836,832	
		273,368								1,422,489	1,377,144	1,254,288	122,856
74,090	72,912		4,190		296,681	52,672	60,000		35,819	2,401,345	951,509	951,509	1,500
										483,371	219,562	219,562	
34,000	34,000	34,000	34,000	34,000	34,000	34,000				778,000	-64,000	-196,000	132,000
3,164		28,258	14,601	7,920	42,051	16,089	10,726	21,452	23,238	251,538	13,038	13,038	
										720,000	-720,000	-1,440,000	720,000
2,294,216	2,294,216	2,294,216	2,294,216	38,544,772	2,299,544	2,299,544	20,053,837	2,299,544	2,299,544	118,205,832	6,964,070	6,964,070	
1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	1,095,684	21,827,724	1,095,684	1,095,684	
				16,521,564			8,091,669			32,769,642	13	13	
				19,728,992			9,662,624			39,131,504	4,664,359	4,664,359	
580,882	580,882	580,882	580,882	580,882	580,882	580,882	580,882	580,882	580,882	12,036,758	580,882	580,882	
434,214	434,214	434,214	434,214	434,214	439,542	439,542	439,542	439,542	439,542	8,710,920	343,642	343,642	
93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	93,412	1,914,828	93,412	93,412	
90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	90,024	1,814,456	90,024	90,024	
										0	96,054	96,054	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	547,846	1,279,422	1,279,422	
										547,846	1,279,422	1,279,422	
2,405,470	2,401,128	3,023,748	2,350,997	38,586,692	2,872,226	2,402,305	20,124,563	2,320,996	3,744,726	135,537,909	13,537,341	10,683,741	-2,855,100

Anexo B Metodología

B.1. Información acerca de la biblioteca en desarrollo para la cuenca del río Copiapó

Se realizó la recopilación y revisión de antecedentes sobre estudios relevantes al proyecto en la cuenca de Copiapó. Diversas bases de datos de organismos estatales, de investigación y educación, así como también organismos privados han sido exploradas recopilando aproximadamente 160 estudios relevantes a los recursos hídricos de la cuenca de Copiapó. Esto ha permitido desarrollar una biblioteca en línea donde la persona interesada puede acceder los estudios recopilados a través de una herramienta de búsqueda. Ejemplo de la plataforma de la biblioteca para la cuenca del río Copiapó:

Base de datos

Buscar

Rango de años

--No años seleccionado-- ▾

Buscar

Mostrar todo

Título	Fecha	Autores / Instituciones	Vínculo al documento
A Dynamic, Multivariate Sustainability Measure for Robust Analysis of Water Management under Climate and Demand Uncertainty in an Arid Environment	2015	Water; Christian Hunter, Jorge Gironás, Diogo Bolster 3 and Christos A. Karavitis	No disponible
Análisis Preliminar de la Composición Isotópica Oxígeno 18 - Deuterio de las Aguas de la Cuenca del Río Copiapó, Región de Atacama: una Contribución al Conocimiento del Sistema Hidrogeológico		Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Rosa Troncoso, Ricardo Castro, María Eliana Lorca, Carolina Espinoza, Yasna Pérez	No disponible
Assessment of Natural Hazards and Vulnerability in the Rio Copiapó Catchment: A case study in the ungauged Quebrada Cinchado Catchment	2012	Investig. Geogr. Chile; Michael Märker; Friedrich Dangel, María Victoria Soto Bäuerle and Giuliano Rodolfi	No disponible
CARACTERIZACION DE LA SALINIDAD DE LOS SUELOS Y AGUAS DEL VALLE DEL RIO	2001	Carlos Sierra B.; Ricardo Céspedes r.; Alfonso Osorio U.	No disponible

Ficha de información acerca de un estudio encontrado en la biblioteca:

CARACTERIZACION DE LA SALINIDAD DE LOS SUELOS Y AGUAS DEL VALLE DEL RIO COPIAPÓ

Autor / Institución	Carlos Sierra B.; Ricardo Céspedes r.; Alfonso Osorio U.
Fecha	2001
Tipo	Artículo
Tabla de contenidos	INTRODUCCIÓN; ANTECEDENTES METODOLOGICOS; ANALISIS DE LOS RESULTADOS SEGÚN SERIES DE SUELOS; ANALISIS DE DISTRIBUCION DE FRECUENCIA DE ALGUNOS PARAMETROS QUE DETERMINAN LA SALINIDAD DEL SUELO; CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DE CUATRO RIOS DEL VALLE DE COPIAPO; CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LAS AGUAS DE 7 POZOS PROFUNDOS DEL VALLE DE COPIAPO; CONCLUSIONES; LITERATURA CONSULTADA; GLOSARIO
Resumen	Intensive precipitations in desert areas are a very scarce phenomenon. Nevertheless, from time to time these events take place, as in 1997 in Southern Atacama Desert in Chile. The study area within the Copiapó catchment is intensively exploited by mining activities. However, in recent years the landscape has been more and more used for agricultural purposes. Vineyards for grape production are irrigated with water from the Copiapó River and from groundwater aquifers. The agricultural activity is mainly focusing on the flat valley bottoms, as well as drainage lines that become active in cases of precipitation events. Thus, this study seeks to investigate the geo-hazards related to precipitation events in order to quantify the risk for population and agricultural areas. Therefore, this study applies a hydrological model calibrated in the ungauged basin of Quebrada Cinchado. The results demonstrate that events like the one on the 12.06.1997 generate intensive floods and related sediment discharges that endanger population and agricultural areas. The applied methodology allows quantification of flooding and mudflow risks, as well as to assess the spatial distribution of geo-hazards.

[Volver a los resultados](#)

B.2. Listado de actores participantes

Listado inicial

Grupo de interés	Subsector
Sector Privado	
APECO	Agricultura
Aguas Chañar	Sanitaria
Caserones	Minería
CASUB	Organizaciones de Usuarios
Junta de Vigilancia Río Copiapó	
CAS I, II, III	
CAS IV	
Sector Público	
Gobierno Regional	Autoridades Gubernamentales
SEREMI Obras Públicas	
SEREMI Minería	
SEREMI Medio Ambiente	
SEREMI Agricultura	
SEREMI de Economía / CORFO	
INDAP	
CNR	
SISS	
DOH	
Sector Sociedad Civil	
Universidad de Chile	Academia
Universidad de Atacama	
Unión Comunal J.V Copiapó	Organizaciones sociales y de Usuarios
Asociación de Usuarios y Consumidores de Copiapó	
Consejo del Pueblo Colla	Pueblos Originarios

Listado final

Sector	Institución	Cantidad de actores
Privado	Aguas Chañar	1
	APECO	3
	Cámara de Comercio de Copiapó	1
	CAS I, II y III	1
	CAS IV	1
	CASUB	1
	CORPROA	1
	Junta de Vigilancia del Río Copiapó	1
	Caserones	2
Público	ASCC	1
	CNR	2
	CORE	1
	CORFO	3
	DGA	4
	DIPLADE	3
	DOH	1
	GORE	5
	INDAP	2
	MINAGRI	3
	MINECON	1
	MINVU	4
	MMA	4
	MOP	1
	MINMINERIA	3
	SISS	2
Sociedad Civil	CONACOP	1
	Consejo del Pueblo Colla	1
	Universidad de Chile	2
	Consultores independientes	1
	Universidad de Atacama	4
	Unión Comunal de JV de Copiapó	1

B.3. Talleres de modelación participativa

Taller 1

Proyecto SimCopiapó: Modelación Participativa para la gestión del agua

Taller 1: Miércoles 10 de enero de 2018

	Institución	Nombre	Email	Teléfono
01	Mimepi Aecame	Claudio Benítez	claudio.benitez@mimepi.cl	22170020
02	Universidad de Atacama	Jonathan Castillo	jonathan.castillo@uda.cl	98053577
03	Alfonso Escobar	CORTO	alfonso.escobar@ort.cl	522351080
04	Rita Juncos - Alamos	RECOPRO	Cristian Gonzalez@rec.cl	211574
05	Pablo Romero Aguas Chelino	Pablo Romero	promero@pauli.cl	
06	Lorena Grossi	CASERONIS	lgrossi@caseronis.cl	P-99991626
07	José Leiva Silva	CONSEJO HIDRICO Y UNCO	jose.leiva.silva@conic.cl	99906777
08	Seremi Medio Ambiente	Paula Peña Corda	ppenacomma@go.cl	976239333
09	Agua Andina	DOCE TIC	hugoandina@operadora.cl	-
10	Tribunales Guata y	GORE Atacama	nguarita@greata.cl	52220163
11	Pablo GERDA E	CNR	pablo.gerda@cnr.cl	976194533

Proyecto SimCopiapó: Modelación Participativa para la gestión del agua

Taller 1: Miércoles 10 de enero de 2018

	Institución	Nombre	Email	Teléfono
12	Francisco San Martín	SISS	FSANMARTIN@SISS.CL	2241253
13	Alvaro Pariz V	MPA	ALVARO.PARIZ@MPA.GOB.CL	96204873
14	Fernando Prohens	CASI23	fprohens@cas123.cl	992202639
15	Alejandra Navarro G.	APSCO	A.NAVARRO@APSCO.CL	999795819
16	Carlos Aizaya Avalos	CASO 5	SECRETARIA@CASO5.CL	522240282
17	Jorge Espinosa M	UDA. ATRAMA	jorge.espinosa@uda.gov.cl	522522262
18	Rodrigo Salas Guzmán	DGA	RodrigoSALAS@DGA.GOV.CL	
19	Ayon Garcia Piña	UDA	AYON.GARCIA@UDA.CL	977300413
20	Nikolai Botay	CURE	nikolai.botay@cure.cl	
21	Paulino Inos A	CNR	Paulino@CNR.gob.cl	9-74192334

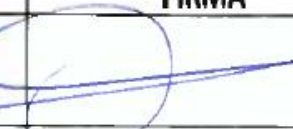
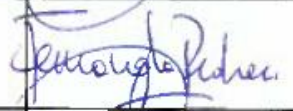
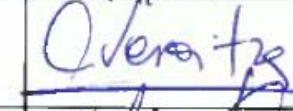


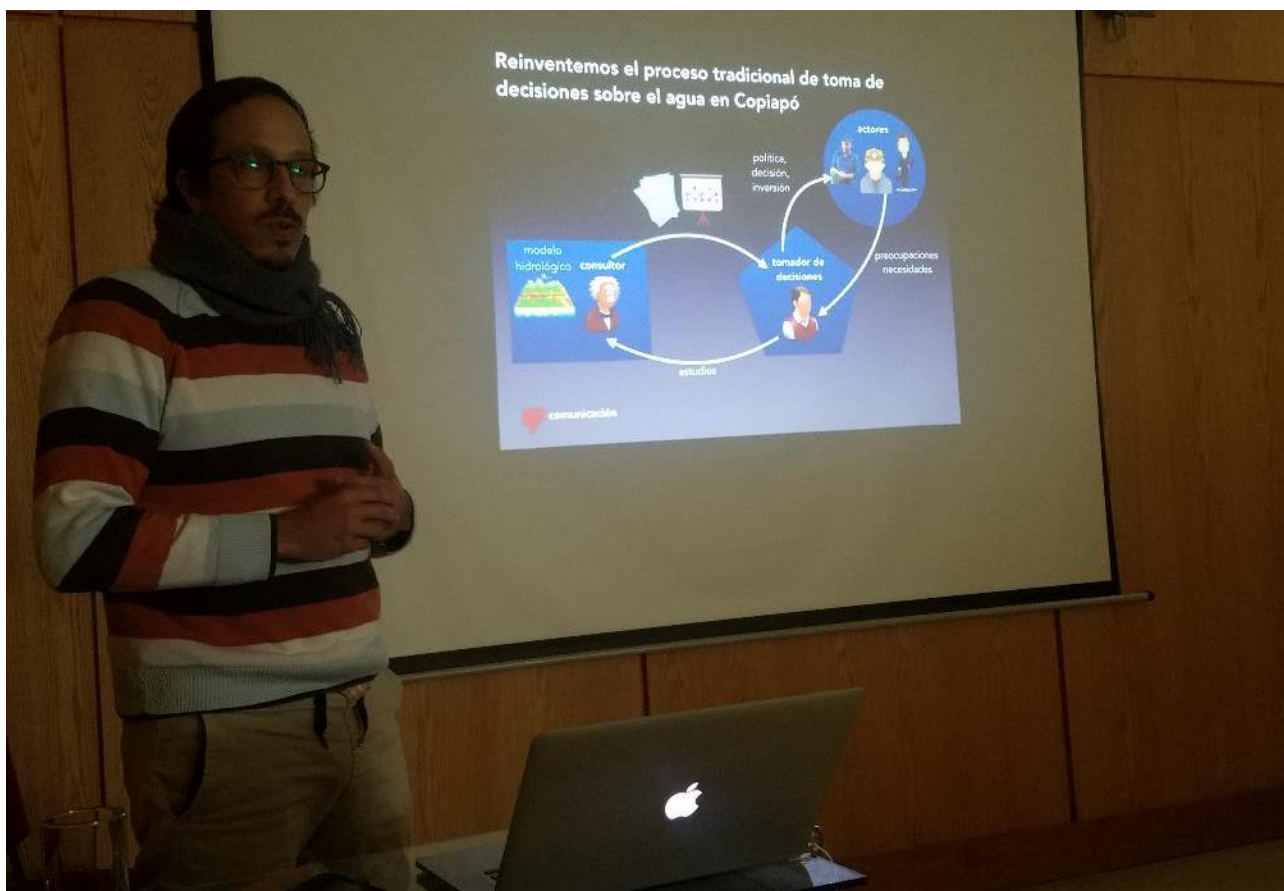
Taller 2

ASISTENCIA TALLER 2: MIÉRCOLES 06 DE JUNIO 2018

SIMCOPIAPÓ: MODELACIÓN PARTICIPATIVA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Iván Julio G.	Seremi de Minería	ijulio@minmineria.cl	982076165	
Jorge López O.	SEREMI de Minería	jcorphanopoulos@gmail.com	942524713	
Molana F. Fernández L.	D.S.A	molana.fernandez@kop.gov.cl	985418861	
Andrés Grossi	CASAPUNOS	agrossi@casapunos.cl	99491626	
José Leiva Silva	CONSEJO S.C. UNION COMUNITARIA Copiapó	jose.leiva.silva@unioncomunitaria.cl	989506777	
Andrés Pajón	Engr.	apajon@copiapro.cl	99811244	
Bernardo Rojas	Seremi de Agricultura	berrojas@agricultura.cl	2542215	
Ariston Jara	INIA	ariston.jara@inia.cl	74748911	
Nancy Matos L.	Dir. Planificación GORE ATACAMA	nmatos@goreatacama.cl	994436309	

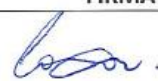
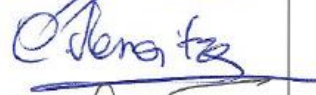
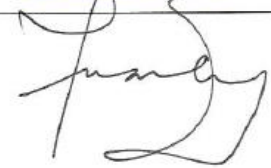
NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Manuel Narfui	Sereia Ecobuñ	manufanid@ecobuñ.cl	973863041	
Fernando Pichem	CAS123	fpichem@cas123.cl	992202639	
Francisco San Martín	SiSS	Fsanmartin@sis.cl	962285566	
Alvaro Pariz V.	MMA	APARIZA.3@mma.gob.cl	96204873	
Carolina Veronitz	OAS4	gerente@oasmapo.cl	52 2361912	
Carla Jara	CORFO	cjara@cofo.cl	52 2351051	
Rodrigo Salas G.	D.G.A	Rodrigo.Salas@dg.gov.cl	522522272	
Jorge Espinoza M.	DGA	jorge.espinosa@dg.gov.cl	52 2522262	
Javier Castillo	Core	Jcastilloj@core.cl	88083850	



Taller 3

ASISTENCIA TALLER 3: MIÉRCOLES 09 DE ENERO 2019

SIMCOPIAPÓ: MODELACIÓN PARTICIPATIVA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Concepción Holzopfel	Kochavi - Timor	Concepcion.holzopfel@gmail.cl	983403181	
GUILLERMO GONZALEZ	COPIAPO	Guillermo.gonzalez@copiapo.cl	52 2203400	
Hugo Rodriguez	TOBRE, FIC	hrodriguez@tobre.cl	954591545	
Jorge Espinoza	DCA - A-MENA	jorge.espinoza@copiapo.cl	052-2522262	
Natalia Penozo Aurora	MUA Atacama	npenozo@mua.gob.cl	52-2352882	
ALVARO PARRA VACINIA				
José Cejudo Silva	CO SOC	jose.cejudo.silva@gmail.com	989506777	
Quinto Gajardo	Particular	quinto.gajardo@gmail.com	9884444	
Carolina Romero	CAS 4	gerente@cas4malpaso-copiapo.cl	2361912	
Nibaldo Guanta	GORE Atacama	nguanta@goreatacama.cl	522207265	

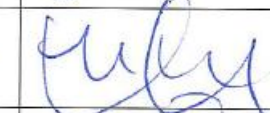
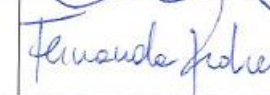
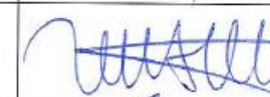
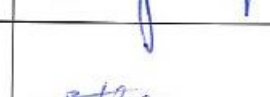
NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Fernando Pichetti	CAS/23	fpichetti@cas123.cl	992202639	Fernando Pichetti
Nike L. Rojas	COPEC	nike.lorajaz@copec.cl	52-2531057	Nike L. Rojas
ALEXANDRA NARANJO	APECO	ANARANJO@APECO.CC	999795819	Alexandra Naranjo

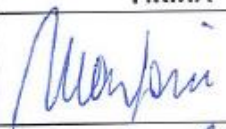
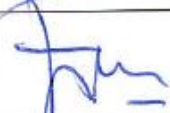


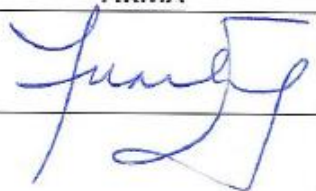
Taller 4

ASISTENCIA TALLER 4: MIÉRCOLES 29 DE MAYO 2019

SIMCOPIAPÓ: MODELACIÓN PARTICIPATIVA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Coneto Grossi	ASERONOT	lgrossi@aseronot.cl	9-79791626	
Cristian Gonzalez	JUECOPIPO	Cristian.Gonzalez@juecopipo.cl	24248311	
Nancy Matos L	Dir. Planificación y Desarrollo - GORE	nmatosl@gore.cl	52-2256412	
FERNANDA PROTHENS	CASI23	FPROTHENS@CASI23.cl	992202639	
Natalia Penroz Aurora	MMA Atacama	npenroz@mma.gob.cl	974327911	
AYON GARCIA PUA	UDA	AYON.GARCIA@UDA.CL	977300413	
CARICA HOLZAPFEL	NINUU	carica.holzapfel@ninuu.cl	973403181	
JORGE ESPINOZA MARINO	DGA	jorge.espinosa@mgp.gov.cl	52 2522262	
Karina Godoy D.	Gobierno Atacama	—	—	

NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Maripuri Riquero	Gore Atacama	mriquero@gmail.com	951589714	
ANGELICA OSORIO	PANTULAN	aosorio@tikay.cl	93599786	
Macarena Fernández	DSA	Macarena.Fernandez@kop.gov.cl	985498861	
Marcelo Benavente	U. de Chile	mbeavente@u.uchile.cl	989233074	
JAIKE ANDRADA	CASERONES	jandrade@caserones.cl	982308140	
Arnaldo Papapietro	EMPRESARIO AGRICOLA	Papapietro.Arnaldo@gmail.com	998152411	
Alexandra Navarro	APSCO	ANNAVNE@APSCO.CL	999795819	
Freddy Alarcón Becerra	Sereni MINVU	falcarrb@minvu.cl	9-57295030	
Felipe Aguilar Sáez	GORE	FAGUILERAS@GOREATACAMA.CL	206427	
Milena Cortés Salinas	COMUNIDAD INDIGENA COLITA PACHA CHULICAY	MILENA.CORTES3@gmail.com	+56 9 63023935	

NOMBRE	INSTITUCIÓN	EMAIL	TELÉFONO	FIRMA
Miguel Guata G	GORE Atacama	mguata@ goreatacama.cl	522207265	





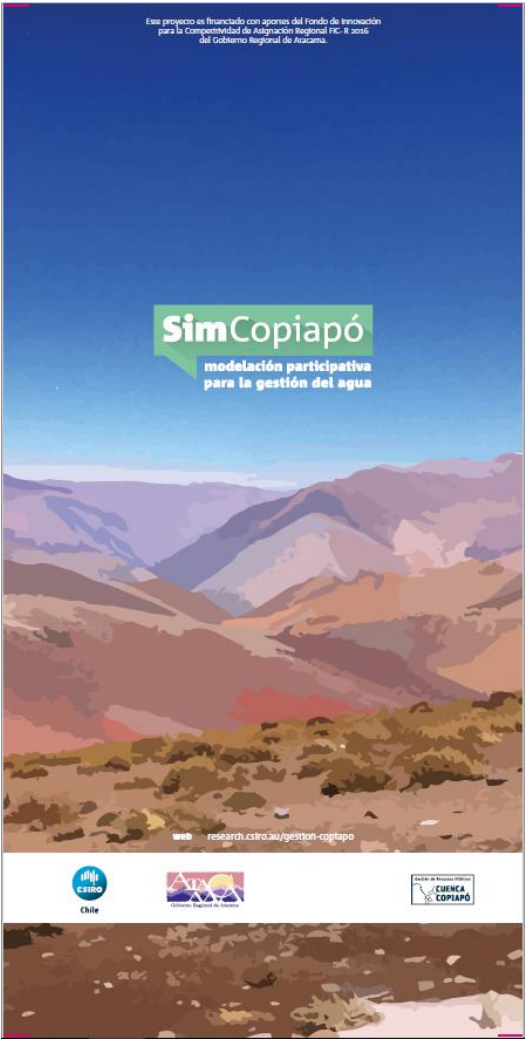
B.4. Lista de artículos de prensa y material de difusión del proyecto

Lista de difusión del proyecto en medios de prensa

Medio	Fecha	Link/detalle
Diario Atacama	15-01-2018	http://www.diarioatacama.cl/impresa/2018/01/15/full/cuerpo-principal/2/
Portal Minero	10-01-2018	http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=148672466
Radio Alternativa	11-01-2018	http://www.alternativafm.cl/2018/01/innovacion-de-clase-mundial-en-atacama.html
Revista Energía		https://www.revistaenergia.com/?p=12539
Tierramarillano Chile	10-01-2018	http://tierramarillano.cl/2018/01/10/investigadores-chilenos-de-csiro-publican-investigacion-en-revista-nature-acerca-de-gestion-eficiente-de-aguas-subterraneas/
Radio Celeste	10-01-2018	http://www.radiocelste.cl/2018/01/investigadores-chilenos-de-csiro.html
Revista AQUA	10-01-2018	http://www.aqua.cl/2018/01/10/revista-nature-publica-investigacion-cientificos-chilenos/
Revista Técnica del Medio Ambiente	11-01-2018	https://www.retema.es/noticia/simcopiapo-una-innovadora-herramienta-tecnologica-para-apoyar-la-gestion-hidrica-en-c-fcwSo
Radio de GTD Manquehue canal 105	11-01-2018	Entrevista con Edmundo Claro, Director del Proyecto
EIS News University of Wollongong	03-07-2018	https://news.eis.uow.edu.au/understanding-the-systems-we-inhabit-in-a-bid-to-change-the-world/
Boletín CSIRO Chile	26-02-2019	https://mailchi.mp/ffd44b3d7c4b/tecnologia-de-punta-para-un-agua-sustentable-766721

Material de difusión

Pendón



Folleto de resumen del proyecto

Este proyecto es financiado con recursos del Fondo de Innovación para la Competitividad de la Comisión Regional de Recursos Hídricos (CRRH) del Gobierno Regional de Arequipa.

SimCopiapó

modelación participativa para la gestión del agua

Resumen

Introducción

La cuenca del Río Copiapó se caracteriza por ser una zona de escasas precipitaciones y contar con limitadas reservas naturales de agua. Su fragilidad hídrica, el sostenido aumento de la demanda de agua y la existencia de ineficiencias en la utilización y gestión de los recursos hídricos, han derivado en un escenario de sostenido sobreuso de las reservas de aguas superficiales y, en los últimos años, subterráneas. Los recursos hídricos condicionan el crecimiento económico de la cuenca, el bienestar de sus habitantes y la calidad de los ecosistemas. Impactos como contracción en las inversiones, disminución de la productividad agrícola y minera, interrupciones del servicio de agua potable, aumento en las demandas energéticas para extraer agua subterránea y el deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, son fiel reflejo de la magnitud de la severa crisis hídrica que se ha instalado en la cuenca del Río Copiapó en los últimos años (Gómez, 2006; DGA, 2015; CORFO, 2015). Lo anterior también ha llevado al deterioro del capital social presente en la cuenca, lo que se ha visto reflejado por conflictos intersectoriales, falta de cooperación para buscar soluciones integradas, bajos niveles de confianza y otros indicadores de deterioro social y cultural.

Durante el último tiempo, diversas instancias organizativas han sido desarrolladas para enfrentar los dilemas arriba descritos. La Iniciativa ENGICH propició el establecimiento

de una "Mesa Público-Privada del Agua" en el año 2006 con la finalidad de operar como un Organismo de Cuenca vinculante que implementara y facilitara las estrategias identificadas en el Plan de Gestión para la Cuenca del Río Copiapó desarrollado por CORFO-INGA en 2009. Más recientemente, en el año 2014, el Gobierno Regional de Arequipa, mediante la Corporación para la Competitividad e Innovación de la Región de Arequipa (CCRIA), estableció el Consejo Asesor Regional de Recursos Hídricos (CARRH), el cual incluye una Mesa Territorial del Agua para la cuenca del Río Copiapó, y cuya misión es facilitar el análisis, discusión e implementación de consensos que se traducan en la formulación de propuestas y medidas en materias de gestión hídrica.

Algunos de los elementos clave expuestos a través de las sesiones del CARRH (Informe Primera Sesión CARRH, 2014) han sido la búsqueda de la validación funcional del CARRH y su "consolidación como una red de cooperación y generador de capital social que permita tomar decisiones y que se valga frente al resto de la comunidad que representa" y la necesidad de "trabajar la desconexión general existente entre los actores presentes en el territorio, para que puedan utilizar este nuevo organismo (CARRH) como espacio para plantear, colaborativamente, propuestas concretas a incorporar en el plan de gestión hídrica de la Región de Arequipa".

web: research.ccrio.au/gestion-copiapo

SimCopiapó

modelación participativa para la gestión del agua

Objetivos

En línea con la anterior y siguiendo las espinas de la Estrategia Regional de Desarrollo de Arequipa (2007-2017), y financiada con recursos del Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional de Arequipa, este proyecto busca promover y facilitar la gobernanza del agua en la Región de Arequipa, cuenca del Río Copiapó, mediante el uso de una herramienta innovadora de apoyo a la toma de decisiones denominada Flowlog, la cual se pensó a disposición del CARRH para facilitar la gestión integrada de recursos hídricos en la Región. Más específicamente, este proyecto persigue:

- Facilitar la relación e interacción de los integrantes del CARRH, y otros actores en caso de ser apropiado, en temas de gestión hídrica mediante un proceso de toma de decisiones transparente, efectivo e incluyente.
- Fomentar el capital social asociado a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Río Copiapó mediante un ejercicio de modelación participativa.

Actividades

1. Recopilación de antecedentes y línea base

Esta actividad recopila los antecedentes básicos de análisis de la situación de los recursos hídricos en la cuenca del Río Copiapó, estructura socioeconómica, situación actual de gobernanza y mapa de actores claves en materias de gestión de recursos hídricos. Esta sección se basará en los numerosos estudios de diagnóstico desarrollados para la cuenca, así como también en la interacción con los actores clave y socios del proyecto (por ejemplo, CARRH, Junta de Vigilancia del Río Copiapó, CORFO y Dirección General de Aguas, entre otros).

2. Diseño conceptual modelo de agente e implementación en Flowlog

Esta actividad centrará en definir el modelo hídrico social de la cuenca del Río Copiapó, identificando los actores relevantes en temas de uso de agua y gestión hídrica, interacciones entre actores y el marco regulatorio/operacional, y su posterior implementación y validación por parte de las partes interesadas en Flowlog. El diseño del sistema hídrico-social se implementará en Flowlog se llevará a cabo considerando talleres de modelación participativa (Actividad 4).

3. Definición e implementación de estrategias/escenarios de gobernanza del agua y desarrollo de SimCopiapó

Esta actividad representa el aspecto fundamental del proyecto como elemento facilitador de la gobernanza del agua y para ayudar a construir el capital social en la cuenca. Se definirán estrategias/escenarios de gobernanza validados y aprendidos a través de procesos de modelación participativa. El impacto de dichos escenarios será evaluado por las partes interesadas de manera interactiva y (en la medida de lo posible) en tiempo real durante los talleres participativos (Actividad 4). Esta actividad desarrollará e implementará el producto final denominado SimCopiapó, el cual será la personalización del modelo Flowlog a la realidad hídrico-social de la cuenca del Río Copiapó.

4. Talleres de modelación participativa

Una actividad esencial del proyecto corresponde a los talleres de modelación participativa. Estos talleres tendrán múltiples objetivos los cuales se alcanzarán de manera secuencial durante el desarrollo del proyecto: socializar el proyecto y entrar el capital social inicial antes del proyecto; diseñar el modelo hídrico social de la cuenca; fomentar la interacción entre los actores clave; acordar y validar estrategias/escenarios de gobernanza del agua; transferir conocimiento en términos de utilización de la herramienta SimCopiapó, entre otros.

5. Difusión y transferencia tecnológica

Esta actividad garantizará una adecuada difusión del alcance del proyecto, el proceso participativo y los resultados finales. Además, pondrá a disposición de las partes interesadas la información relevante y capacitación en términos de uso de la plataforma SimCopiapó a través de una página web de divulgación.

web: research.ccrio.au/gestion-copiapo

SimCopiapó

modelación participativa para la gestión del agua

Equipo

Edmundo Caza
Director del proyecto
Encargado del avance del proyecto, de las relaciones con el Gobierno Regional y los actores clave.

Rodrigo Rojas
Investigador senior
Encargado del diseño de los escenarios de gobernanza y de la supervisión del desarrollo de la herramienta SimCopiapó.

Juan Carlos Castilla
Investigador principal
Encargado del desarrollo de la herramienta SimCopiapó.

Gabriella Benetton
Coordinadora de proyecto
Encargada de la gestión del proyecto. Coordina las relaciones y trabajos de las preferenciales de Australia y Chile.

Camila Pretz
Asesor estratégico
Encargada del proceso participativo y de la articulación de las relaciones con los actores locales.

Victor Gálvez
Fisico, U. de Bío-Bío
Levantamiento de información y mapeo de actores clave de la cuenca.

Carta Gantt

	Año 1												Año 2											
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Recopilación de antecedentes y línea base	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■												
2. Diseño conceptual modelo de agente e implementación en Flowlog													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3. Definición e implementación de estrategias/escenarios de gobernanza del agua y desarrollo de SimCopiapó																								
4. Talleres de modelación participativa																								
5. Difusión y transferencia tecnológica																								

web: research.ccrio.au/gestion-copiapo

CSIRO Chile - Land & Water
www.csiro.cl

CSIRO
Chile

Modelación participativa: involucrar a la sociedad en la ciencia y las políticas

La modelación participativa es una metodología práctica orientada a la inclusión de todos los actores y partes interesadas en el proceso de toma de decisiones.

El problema

Las herramientas científicas de modelación actuales son extraordinariamente útiles al momento de enfrentar problemas de gestión de recursos hídricos, ya que éstas ayudan a sistematizar extensas bases de datos y ofrecen una manera ordenada de analizar los impactos que las actividades humanas ocasionan sobre las reservas y flujos de agua en el ambiente.

Sin embargo, cuando estas herramientas se desarrollan y utilizan de manera aislada, es decir, desacopladas de variables de decisión socioeconómicas y sin considerar el vasto conocimiento que diversos actores pueden aportar, estas herramientas fallan en capturar la complejidad de las interacciones e interdependencias entre las dimensiones humana e hídrica, siendo sus resultados de difícil acceso y comprensión para las audiencias no-técnicas (ej. comunidad, tomadores de decisión, organizaciones sociales, entre otros).

Se hace necesario, por lo tanto, contar con herramientas de modelación que permitan a los tomadores de decisión alejarse del simple ejercicio de definición del problema y evaluación de escenarios y abrazar el desarrollo de nuevas herramientas que nos permitan seleccionar políticas válidas y consensadas por las partes interesadas, apropiadas para combatir un problema de gestión de recursos hídricos.

Nuestra respuesta

Equilibrar las frecuentemente diversas y competitivas necesidades hídricas de los sectores industrial, comunidad y el medio ambiente requiere de nuevas herramientas de apoyo a la toma de decisiones.

La toma de decisiones para la gestión sustentable de los recursos hídricos requiere incorporar las múltiples perspectivas e intereses de las partes interesadas. Nuestro enfoque de **Modelación Participativa** (también conocido como modelación exploratoria, acompañada o colaborativa) alienta a científicos, expertos, no-expertos y a las distintas partes interesadas a trabajar colaborativamente para abordar el problema.

El enfoque Interdisciplinario para la toma de decisiones a través de la participación (Fig. 1) utiliza experimentos computacionales interactivos apoyados en la visualización gráfica. En una actividad de modelación participativa, científicos, expertos, no-expertos y las partes interesadas son capaces de estructurar un problema, describir el sistema al cual lo afecta, crear un modelo computacional del sistema, utilizar este modelo para evaluar políticas y/o escenarios de gestión y proponer soluciones que aseguren el alcance de los resultados esperados. La implementación de la modelación participativa entrega múltiples beneficios:

- La inmersión en tiempo-real de las partes interesadas en actividades de planificación interactivas;
- La creación de nuevas oportunidades para explorar conjuntamente estrategias de adaptación y gestión de recursos hídricos;
- La promoción de un alto grado de apropiación y motivación hacia el cambio por parte de los actores involucrados en el proceso de modelación participativa;
- La provisión de un espacio donde las múltiples perspectivas de las partes interesadas pueden ser compartidas de una manera fácil y segura y las diferencias de opinión manejadas de una manera constructiva para facilitar la cooperación;
- La facilitación de los participantes para interactuar con conceptos, material, conocimiento y otros actores con los cuales no lo harían normalmente;
- El establecimiento de oportunidades para discutir potenciales acuerdos cuando el agua se utiliza para distintos usos (por ejemplo, industrial, agrícola, minero, doméstico o ambiental); y
- La predicción y visualización de las trayectorias más aceptables del sistema, en términos de variables sociales, económicas, ambientales e hidrológicas.

CONTACTOS
CSIRO Chile

Av. Apoquindo 2027, p. 32
Las Condes, Santiago, Chile

T +56 2 2787 6300
• edmundoclaro@csiro.au
• csirochile@csiro.au

Director Area Land & Water - Edmundo Claro
• edmundoclaro@csiro.au

CSIRO Chile - Land & Water
www.csiro.cl

CSIRO
Chile

Implementación de la modelación participativa

La modelación participativa considera:

Etapas 1-4 (verde): Corresponden a la planificación y estudios de gabinete.

Etapas 5-9 (azul): Se proporcionan mediante talleres participativos.

Estas etapas pueden ser modificadas para alcanzar objetivos específicos de proyectos y de los recursos disponibles.

1. Identificar las metas del proyecto
2. Identificar e invitar a stakeholders
3. Escoger las herramientas de modelamiento
4. Recolectar y procesar data
5. Discutir el sistema, construir un modelo conceptual
6. Ejecutar el modelo, discutir resultados
7. Discutir y definir escenarios
8. Analizar modelo, discutir las mejoras
9. Presentar resultados a otros stakeholders y tomadores de decisión

Aplicaciones relevantes

- Asignación de aguas para la agricultura y otros usos, en condiciones de sequía
- Evaluación de Impactos Intersectoriales de esquemas de reciclado y relleno de aguas
- Asignación de nuevas fuentes de aguas obtenidas mediante reciclado y reuso de aguas
- Recuperación de lagos y humedales mediante recarga gestionada de acuíferos
- Participación ciudadana en la aprobación de las licencias sociales de operación

Más información

Castillo Rho, J. C., Marienhorz, G., Rojas, R., Andersen, M. S. & Kelly, B. F. I. An open-based platform for simulating complex human-aquifer interactions in managed groundwater systems. *Environmental Modelling & Software* 73, 305-323 (2015)

Castillo Rho, J. C., Rojas, R., Andersen, M. S., Holley, C. & Marienhorz, G. Social tipping points trigger groundwater management. *Nature Human Behaviour* (2017) doi:10.1038/s41562-017-0181-7

Esterne, M. (2013) *Companion Modelling*. Springer Science & Business Media.

1 2 3 4 5 6

Enfoque de Modelación Participativa. (1) Un simulador ABM (Agent-Based Model) de políticas se acopla con un modelo hidrológico. (2) El modelo acoplado se despliega mediante un taller de modelación participativa donde múltiples perspectivas y narrativas de las partes interesadas se discuten abiertamente. (3) Esta actividad puede recibir opiniones de una audiencia no-especialista (periodistas, políticos, medios de comunicación, etc.) (4) Durante los talleres participativos se toman decisiones basadas en juegos de rol considerando fuentes de incertidumbre. (5) Las trayectorias del sistema se representan gráficamente y son evaluadas por las partes interesadas para tomar decisiones adaptativas durante las simulaciones. (6) El simulador ABM representa las trayectorias multisectoriales lo que implica que todas las opciones se consideran en la toma de decisiones.

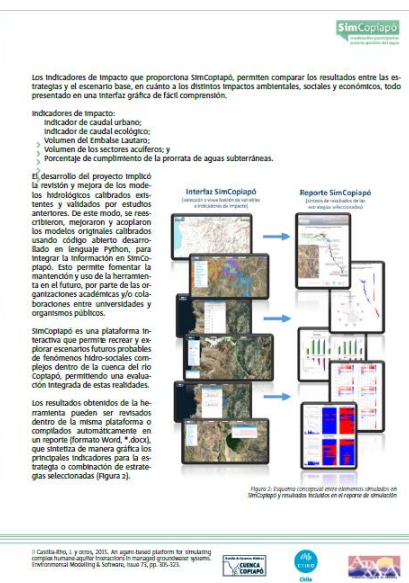
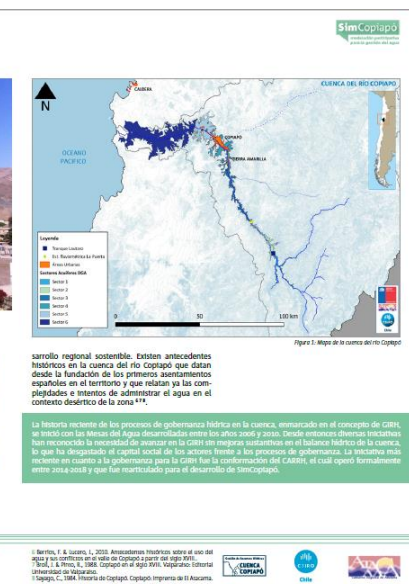
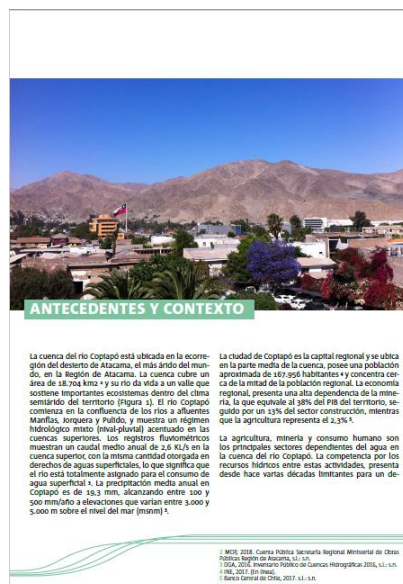
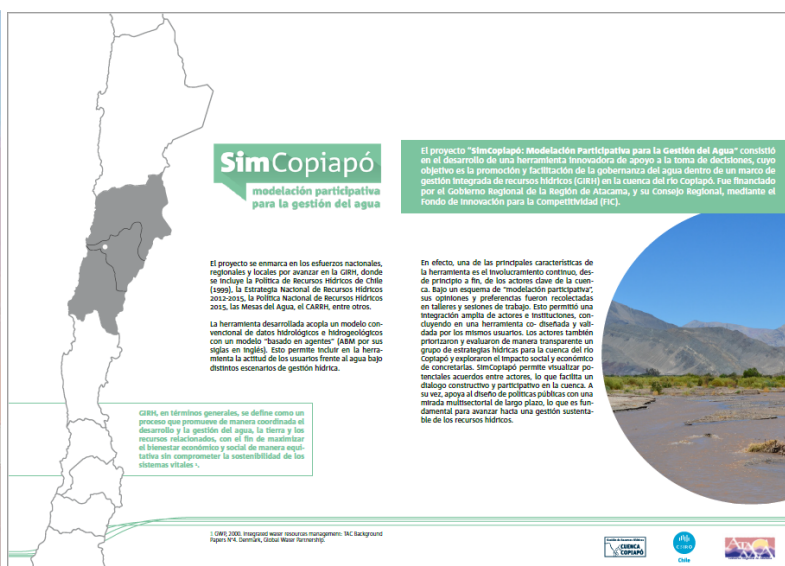
CONTACTOS
CSIRO Chile

Av. Apoquindo 2027, p. 32
Las Condes, Santiago, Chile

T +56 2 2787 6300
• edmundoclaro@csiro.au
• csirochile@csiro.au

Director Area Land & Water - Edmundo Claro
• edmundoclaro@csiro.au

Folleto de resumen final del Proyecto



B.5. Instalador de SimCopiapó

Para instalar la herramienta SimCopiapó en su computador, presiona el siguiente link y descargar la instaladora:

<https://cloudstor.aarnet.edu.au/plus/s/eKb9e5kCKEwgx4p>

El manual de uso detalla los pasos a seguir para instalar SimCopiapó correctamente en su computador:

<https://research.csiro.au/gestion-copiapo/?ddownload=652>

Anexo C Resultados

C.1. Impactos de cada estrategia simulada

- Estrategia 1a SWAP de agua: Candelaria 175L a Aguas Chañar
- Estrategia 1b SWAP de agua: Caserones 200L de río Ramadilla
- Estrategia 1c SWAP de agua: Agricultores Distritos 8-9 a Aguas Chañar
- Estrategia 1c SWAP de agua: Agricultores Distritos 8-9 a Distritos 1-7
- Estrategia 1c SWAP de agua: Agricultores Distritos 8-9 a recarga natural acuífero S5-6
- Estrategia 1c SWAP de agua: Agricultores Distritos 8-9 a Agricultores S5 (excedentes al río)
- Estrategia 1c SWAP de agua: Agricultores Distritos 8-9 a Agricultores S5 (excedentes a recarga gestionada acuífero)
- Estrategia 2a Infraestructura Regularizada: Impermeabilización Embalse Lautaro
- Estrategia 2b Infraestructura Regularizada: Entubamiento canales de riego
- Estrategia 2c Infraestructura Regularizada: Desaladora Estatal, 100% operativa a 10 años (2029)
- Estrategia 3 Recarga Gestionada de Acuíferos: Piscinas de infiltración en Nantoco y Piedra Colgada
- Estrategia 4 Prorrata: 60% de restricción de extracciones en S3-4-5 Fiscalización 20% Multas 20%
- Estrategia 4 Prorrata: 60% de restricción de extracciones en S3-4-5 Fiscalización 90% Multas 90%
- Estrategia 5 Reutilización aguas grises - Reducción consumo agua potable 20%

C.2. Combinatoria de estrategias

- [Resultados Combinatoria Estrategias Simuladas](#)

Bibliografía

- AGRIMED, 2017. *Atlas agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima*, s.l.: s.n.
- Aguirre, I. H. A. S. B., 1999. *Estudio hidrogeológico del valle del río Copiapó, segmento Embalse Lautaro - Piedra COLgada, Region de Atacama*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- Alamos y Peralta Ingenieros Consultores, 1987. *Análisis y evaluación de los recursos hidrogeológicos valle del río Copiapó - III Región*, s.l.: Dirección General de Aguas.
- Alamos y Peralta Ingenieros Consultores, 1995. *Análisis y evaluación de los recursos hídricos en el valle del río Copiapó, III Región*, s.l.: Direccion General de Aguas.
- Andreu J, C. J. S. E., 1996. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3-4), pp. 269-291.
- Ansell, C. & Gash, A., 2008. Collaborative governance in theory and practice.. *Journal of public administration research and theory*, Volumen 18, pp. 543-571.
- Aslin, H. J. & Brown, V. A., 2002. *Terms of Engagement: A Toolkit for Community Engagement for the Murray-Darling Basin*. s.l.:Bureau of Rural Sciences.
- Associates, G., 2006. *Diagnóstico de los recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó y proposicion de un modelo de explotacion sustentable*, s.l.: s.n.
- Axelrod, R., 1986. *An evolutionary approach to norms*. s.l.:Politic Science Review.
- Axelrod, R., 1997. Advancing the art of simulation in the social sciences.. En: *Simulating social phenomena*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 21-40.
- Banco Mundial, 2011. *CHILE: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*. s.l., s.n.
- Banco Mundial, 2011. *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*, Santiago: Banco Mundial.
- Banco Mundial, 2013. *Chile. Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua.*, s.l.: s.n.
- Banco Mundial, 2013. *Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua*, s.l.: Banco Mundial.
- Bauer, C., 1998. *Against the Current: Privatization, Water Markets, and the State in Chile*.. s.l.:Springer US.
- Bauer, C., 2004. *Canto de Sirenas: El Derecho de Aguas Chileno como Modelo para Reformas Internacionales*. Bilbao: Bakeaz.
- Bauer, C., 2015. *Canto de Sirenas: El Derecho de Aguas Chileno como Modelo para Reformas Internacionales.*, s.l.: s.n.
- BCC, 2017. *Cuentas Nacionales de Chile PIB regional*, s.l.: s.n.
- Berríos, F. & Lucero, J., 2010. Antecedentes históricos sobre el uso del agua y sus conflictos en el valle de Copiapó a partir del siglo XVIII..
- Bitran, E., Rivera, P. & Villena, M., 2014. Water management problems in the Copiapó basin , Chile: markets, severe scarcity and the regulator.. *Water Policy*, Issue 16, pp. 844-863.
- Borregaard, N. y otros, 2012. *¿Cuáles son los desafíos y oportunidades para una gestión más sostenible, justa y transparente del recurso hídrico?*. Santiago, CIMPA.
- Broll, J. & Pinto, R., 1988. *Copiapó en el siglo XVIII*. Valparaíso: Editorial Universidad de Valparaíso.
- Cardwell, H., Cole, R., Cartwright, L. & Martin, L., 2006. Integrated Water Resurces Management: Definitions and Conceptual Musings. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, pp. 8-18.

- Castilla-Rho, J. y otros, 2015. An agent-based platform for simulating complex humane-aquifer interactions in managed groundwater systems. *Environmental Modelling & Software*, Issue 73, pp. 305-323.
- Castilla-Rho, J. y otros, 2017. Social tipping points in global groundwater. *Nature Human Behaviour*, pp. 1-14.
- CCIRA, 2014. *Reporte primera sesión del Consejo Asesor Hídrico de la Región de Atacama*, s.l.: s.n.
- Cienfuegos, R., Escauriaza, C. & Gironás, J., 2015. An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*.
- CSIRO Chile, 2012. *Summary report on Copiapó water yields and demands*, s.l.: s.n.
- CSIRO Chile, 2015. *Plan de Gestión Integrada para la cuenca del Río Copiapó, Fase 1.*, Santiago: s.n.
- Curtis, A., Mitchell, M. & Mendham, E., 2016. Social Science contributions to groundwater governance. *Integrated Groundwater Management*, pp. 477-493.
- DGA, 1999. *Política Nacional de Recursos Hídricos*, Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- DGA, 2003. *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del valle del río Copiapó*, s.l.: Dirección General de Aguas.
- DGA, 2013. *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025*, Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- DGA, 2016. *Inventario Público de Cuencas Hidrográficas 2016*, s.l.: s.n.
- DGA, 2018. *Recuperado el 12 de Febrero de 2018, de Boletín: información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas: www.dga.cl*, s.l.: s.n.
- DGA-DICTUC, 2010. *Análisis integrado de gestión en cuenca del río Copiapó*, s.l.: Dirección General de Aguas.
- DGA-HIDROMAS, 2013. *Actualización de la modelación integrada y subterránea del acuífero de la cuenca del río Copiapó*, s.l.: Dirección General de Aguas.
- DGA, s/f. *Cuenca Copiapó. Información hídrica de las cuencas priorizadas, fichas temáticas.*, s.l.: s.n.
- DOH, 2018. *Acerca del Programa APR*. [En línea]
Available at: <http://www.doh.gob.cl/APR/AcercadeAPR/Paginas/acercaAPR.aspx>
[Último acceso: 23 02 2018].
- Donoso, G., 2014. Integrated Water Management in Chile. En: *Integrated water resources management in the 21st century: revisiting the paradigm*. Leiden: CRC Press, pp. 217-234.
- Dourojeanni, A. & Chevaleraud, Y., 2009. *Plan de Acción para la Mesa del Agua de la Cuenca del Río Copiapó*, Santiago de Chile: s.n.
- DPRH, 2015. *Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015*. Santiago, Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, Ministerio del Interior y Seguridad Pública.
- FCH, 2018. *Radiografía del agua: Brecha y riesgo hídrico en Chile.*, s.l.: s.n.
- Fundación Amulén, 2019. *Pobres de agua. Radiografía del agua rural de Chile: Visualización de un problema oculto*, s.l.: s.n.
- Fuster, R. y otros, 2009. *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile*.
- Galvez, V. y otros, 2019. Collaborate or perish: water resources management under contentious water use in a semiarid basin. *International Journal of River Basin Management*.
- Galvez, V. y otros, 2019. Collaborate or perish: water resources management under contentious water use in a semiarid basin. *International Journal of River Basin Management*, p.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1634083>.
- GORE ATACAMA, 2019. *Informe técnico sistema territorial cuencas hidrográficas Región de Atacama.*, s.l.: s.n.

- GWP, 2000. *Integrated water resources management: TAC Background Papers N°4*. Denmark, Global Water Partnership.
- Harbaugh, A. W. & McDonald, M. G., 1996. *Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model*, s.l.: USGS.
- Hearne, R., 2018. Water Markets. En: *Water Policy in Chile*. s.l.:Springer International Publishing.
- INDH, 2015. *Mapa de conflictos socioambientales Chile*, s.l.: s.n.
- INE, 2017. [En línea].
- INE, 2017. *Censo 2017: Resultados población, sexo y edad*. [En línea]
Available at: <http://www.censo2017.cl/descargue-aqui-resultados-de-comunas/>
[Último acceso: 19 02 2018].
- INE, 2017. *Síntesis de resultados Censo 2017..* [En línea]
Available at: <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>
- Inglehart, R. y otros, 2014. *World Values Survey: Round Six - Country-Pooled Datafile*, Madrid: JD Systems Institute.
- Izquierdo, T., Abad, M., Bernárdez, E. & Calderon, N., 2016. Mapas de peligrosidad por inundaciones y flujos de fangos en zona urbana. El caso del 25 de marzo de 2015 de Copiapó (Desierto de Atacama, Chile).
- Kadi, M. A., 2014. Integrated Water Resources Management (IWRM): The international experience. *Integrated Water Resources Management in the 21st century: revisiting the paradigm*. CRC Press, Leiden, pp. 3-15.
- Larrain, S., 2006. *El agua en Chile: entre los derechos humanos y las reglas del mercado.*, s.l.: s.n.
- López-Gunn, E. y otros, 2014. Rethinking integrated water resources management: towards water and food security through adaptive management. En: *Water for Food and Wellbeing in Latin America and the Caribbean. Social and Environmental Implications for a Globalized Economy*. New York: Routledge, pp. 385-417.
- MDS, 2018. *Informe de Desarrollo Social*, s.l.: s.n.
- Mitchell, B., 2006. IWRM in practice: lessons from Canadian experiences. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 135(1), pp. 51-55.
- MOP, 2018. *Cuenta Pública Secretaría Regional Ministerial de Obras Públicas Región de Atacama*, s.l.: s.n.
- Mukhtarov, F. & Gerlak, A. K., 2014. Epistemic forms of integrated water resources management: towards knowledge versatility. *Policy Sciences*, 42(2), pp. 101-120.
- Newtonberg, 2001. *Política Ambiental de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins*, s.l.: s.n.
- ODEPA, 2018. *Región de Atacama. Información regional 2018.*, s.l.: s.n.
- Partarrieu, U. y otros, 2009. *Plan de Gestión para la Cuenca del Río Copiapó. Estrategia Nacional de Gestión Integrada de cuencas hidrográficas.*, s.l.: s.n.
- Pegram, G. y otros, 2013. *River basin planning: principles, procedures and approaches for strategic basin planning*, Paris: UNESCO.
- Rinaudo, J. & Donoso, G., 2017. *State, market or community failure? Untangling the determinants of groundwater depletion in Copiapó (Chile)*, s.l.: s.n.
- Saravanan, V., McDonald, T. & Mollinga, P., 2009. Critical review of Integrated Water Resources Management: Moving beyond polarised discourse. *Natural Resources Forum*, 33(1), pp. 76-86.
- Sayago, C., 1984. *Historia de Copiapó*. Copiapó: Imprenta de El Atacama.

SERNAGEOMIN, 2012. *Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

SISS, s.f. *Superintendencia de Servicios Sanitarios. Tarifas históricas: Región de Atacama Aguas Chañar S.A.*. [En línea]

Available at: <https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6385.html>

[Último acceso: 2019].

Suárez, F. y otros, 2014. Integrated water resource management and energy requirements for water supply in the Copiapó river basin, Chile. *Water*, Volumen 6, pp. 2590-2613.

Tefry, M., D. McFarlane, K. M., Littleboy, A. & Norgate, T., 2012. *Copiapó Basin water management: Terms of reference for future governance and research activities. As part of the study: "Copiapó River Basin, Chile - analysis study of shortfalls in water rights, industrial usage and social requirements"*, s.l.: CSIRO.

Timmerman, J. & Langaas, S., 2005. Water information: what is it good for? The use of information in transboundary water management. *Regional Environmental Change*, Volumen 5, pp. 177-187.

UNEP, 2012. *The UN-Water Status Report on the Application of Integrated Approaches to Water Resources Management*, s.l.: UNEP.

Vergara, A., 2018. Regularización de Derechos Consuetudinarios de Aguas. Crítica a la jurisprudencia vacilante de la Corte Suprema.. *Centro de Estudios Públicos*.

Zamorano, S., 2014. *Representaciones sociales de los pequeños agricultores sobre la escasez del recurso hídrico en la provincia de Copiapó, Región de Atacama.*, s.l.: s.n.

CONTACT US

t 1300 363 400
+61 3 9545 2176
e enquiries@csiro.au
w www.csiro.au

AT CSIRO, WE DO THE EXTRAORDINARY EVERY DAY

We innovate for tomorrow and help
improve today – for our customers, all
Australians and the world.

Our innovations contribute billions of
dollars to the Australian economy
every year. As the largest patent holder
in the nation, our vast wealth of
intellectual property has led to more
than 150 spin-off companies.

With more than 5,000 experts and a
burning desire to get things done, we are
Australia's catalyst for innovation.

CSIRO. WE IMAGINE. WE COLLABORATE.
WE INNOVATE.

FOR FURTHER INFORMATION

Agua y Territorio, CSIRO Chile

Gabriella Bennison
t +56 2 22796320
e Gabriella.bennison@csiro.au
w www.csiro.au/Land&Water

Land & Water, CSIRO

Rodrigo Rojas
t +61 07 38335600
e Rodrigo.rojas@csiro.au
w www.csiro.au/Land&Water

Agua y Tierra, CSIRO Chile

Edmundo Claro
t +56 2 22796300
e Edmundo.claro@csiro.au
w www.csiro.au/Land&Water