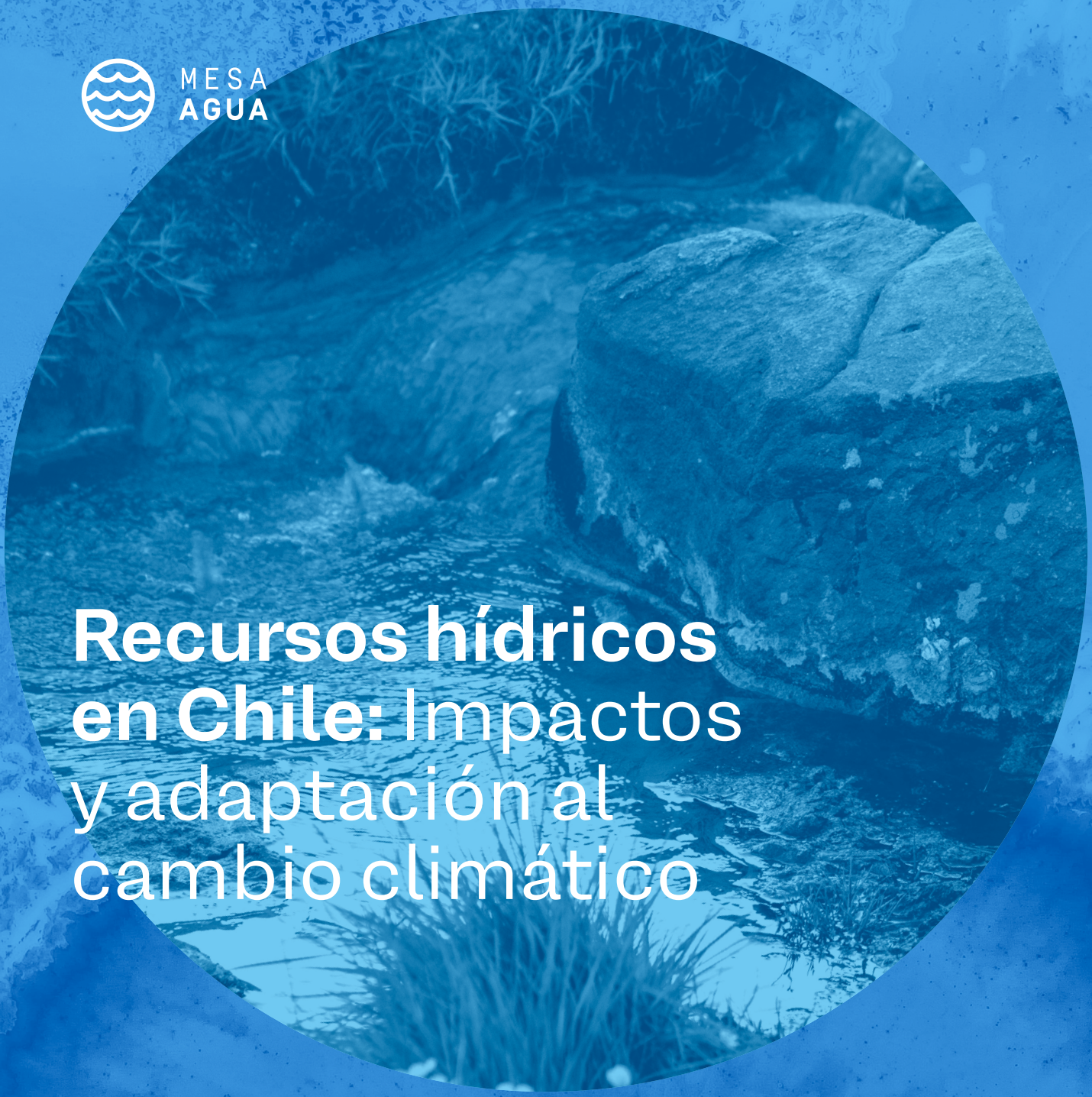
MESA AGUA



Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación
Gobierno de Chile

COP25 CHILE 2019

COMITÉ CIENTÍFICO COP25 CHILE

Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático

MESA AGUA

COMITÉ CIENTÍFICO COP25 CHILE

AUTORES

Coordinadora Mesa Agua
Alejandra Stehr[1,14]

Capítulo 1 Introducción
Coordinadores
Sebastián Vicuña[2,15], Ximena Vargas[3] y Tomás Gómez[3]
Contribuidores
Javier Cepeda, Pablo Mendoza y Nicolás Vásquez

Capítulo 2 Gobernanza
Coordinadores
Verónica Delgado[4,16,17] y Alejandra Stehr[1,14]
Coautores
José Luis Arumí[1,16] y Claudio Vásquez[18]

Capítulo 3 Infraestructura hídrica
Coordinadores
Alejandra Stehr[1,14] y Verónica Delgado[4,16,17]
Coautores
Camila Álvarez[4,17], Pablo Álvarez[5,32], José Luis Arumí[1,16], Carlos Alberto Berroeta[34], Yerko Castillo[4,19], Gustavo Chiang[27], Sebastián Andrés Crespo[6,17], Guillermo Donoso[2,20], Alejandro Dussaillant[7], Francisco Ferrando[3], Cristián Frêne[29,36], Rodrigo Fuster[3,31], Alex Godoy[8,22], Eduardo Holzapfel[1,16], Camilo Huneeus[35], Mauricio Jara[x,x], Cedric Little[9,21], Mónica Musalem[33], Marcelo Olivares[3], Diego Rivera[1,16], Ignacio Rodríguez[4,24], Armando Sepúlveda[10,23], Marcelo Somos[11], Felipe Ugalde[28], Martín Valenzuela[3,25], Cristian Vargas[1,14,26], Scarlett Vásquez[30], Ismael Leonardo Vera[12], Gladys Vidal[1,16] y Mariela Yevenes[1,14]

Capítulo 4 Calidad del agua
Coordinadores
Mariela Yevenes[1,14], Carolina Baeza[1,14], Oscar Parra[1,14] y Alejandra Stehr[1,14]
Coautores
Ricardo Barra[1,14,16], Davor Cotoras[3], Verónica Delgado[3,16,17], Ricardo Figueroa[1,14,16], Katherine Lizama[3], Mónica Musalem[33], Ignacio Rodríguez[4,24], Roberto Urrutia[1,14,16], Gladys Vidal[1,14,16]

Capítulo 5 Medidas de adaptación
Coordinadores
Roberto Daniel Ponce[13,16] y Alejandra Stehr[1,14]
Coautores
Verónica Delgado[1,16,17]

1 Universidad de Concepción
2 Pontificia Universidad Católica de Chile (UC)
3 Universidad de Chile
4 Universidad Austral de Chile
5 Universidad de La Serena
6 Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
7 Universidad de Aysén
8 Universidad del Desarrollo
9 Universidad Adolfo Ibáñez
10 Universidad de Magallanes
11 Universidad de La Frontera
12 Universidad Católica del Maule
13 Universidad del Desarrollo
14 Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile
15 Centro de Cambio Global (CCG-UC)
16 Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM)
17 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)
18 Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)
19 Centro de Estudios Ambientales (CEAM)
20 Centro de Derecho y Gestión de Aguas (CDGA-UC)
21 Centro de Innovación en Bioingeniería
22 Centro de Investigación en Sustentabilidad y Gestión Estratégica de Recursos (CISGER)
23 Centro de Investigación Gaia Antártica (CIGA)
24 Centro de Humedales Río Cruces (CEHUM)
25 Centro de Investigación en Tecnología Aplicada a la Minería (AMTC)
26 Centro para el Estudio de Forzantes Múltiples sobre Sistemas Socio-Ecológicos Marinos (MUSELS-Núcleo milenio)
27 Fundación MERI
28 Geoestudios SpA
29 Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)
30 Instituto Nacional de Hidráulica
31 Laboratorio de Análisis Territorial
32 Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícola y Ambientales (PROMMRA)
33 Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (MOP-DGA)
34 PHI Unesco
35 PNUD Perú
36 Red Chilena de sitios de Estudio Socio-Ecológico de Largo Plazo

Edición: Miguelángel Sánchez
Diseño: www.negro.cl
Foto portada: Unsplash

Citar como:

Stehr A., C. Álvarez, P. Álvarez, J. L. Arumí, C. Baeza, R. Barra, C. A. Berroeta, Y. Castillo, G. Chiang, D. Cotoras, S. A. Crespo, V. Delgado, G. Donoso, A. Dussaillant, F. Ferrando, R. Figueroa, C. Frêne, R. Fuster, A. Godoy, T. Gómez, E. Holzapfel, C. Huneeus, M. Jara, C. Little, K. Lizama, M. Musalem, M. Olivares, O. Parra, R. D. Ponce, D. Rivera, I. Rodríguez, A. Sepúlveda, M. Somos, F. Ugalde, R. Urrutia, M. Valenzuela, C. Vargas, X. Vargas, S. Vásquez, I. L. Vera, S. Vicuña, G. Vidal, M. Yevenes

PROCESO

En el presente documento se presenta el trabajo de la mesa Agua del Comité Científico COP25, en el que se inscribieron 156 científicos de todo el país. La mesa Agua trabajó en colaboración con la Red de Investigación en Recursos Hídricos (Red H_2O), la cual es coordinada por el Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID).

Junto con la Red H2O, la mesa Agua organizó los siguientes talleres:

- Amenazas a los recursos hídricos de la región del Biobío, viernes 6 de septiembre de 2019, en la Universidad de Concepción, Región del Biobío;
- Amenazas a los recursos hídricos en la región de Aysén y Magallanes, jueves 3 y viernes 4 de octubre de 2019, en la Oficina del Ministerio de Obras Públicas de Coyhaique.

Las mesas Adaptación y Agua organizaron además el taller Lineamientos para el desarrollo de planes de adaptación al cambio climático y aplicación a los recursos hídricos, el lunes 11 de noviembre de 2019, en la sede de Santiago de la Universidad de Concepción.

La primera versión de este informe fue escrita por uno o dos autores por capítulo. Luego fue presentada a todos los inscritos, algunos de los cuales entregaron indicaciones y aportes. Para la elaboración del capítulo sobre infraestructura hídrica, se desarrolló en una primera etapa una encuesta con cuatro preguntas sobre la importancia del flujo continuo de agua, sedimento y nutrientes, además de consultar sobre distintas alternativas y sus impactos. Por su parte, el tema nieve y glaciares se desarrolló en el informe de la mesa Criósfera y Antártica y no es parte de este informe.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de los ingenieros Nicolás Vásquez y Javier Cepeda, quienes junto al académico Pablo Mendoza colaboraron en este trabajo. Esta investigación fue en parte apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

Se agradece también el soporte financiero del Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile; la hospitalidad de la Universidad de Concepción y al Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, al Ministerio del Medio Ambiente, a la Comisión Económica para América Latina, a la Unión Europea, y al Banco Interamericano de Desarrollo por el apoyo en distintas etapas de trabajo de la mesa.

Los contenidos son de exclusiva responsabilidad de los autores y no representan necesariamente a sus universidades o centros de investigación de afiliación, ni a las instituciones aquí mencionadas.

CONTENIDOS

Resumen ejecutivo 8

Gobernanza. 9

Infraestructura hídrica 11

Calidad del agua 12

Medidas de adaptación 13

1. Introducción 14

1.1 Contexto global. 14

1.2 Impactos del cambio climático
en los recursos hídricos en Chile 15

1.3 Adaptación a los impactos a los recursos hídricos. 23

2. Gobernanza. 25

2.1 Gobernanza resiliente y ambientalizada. 25

2.2 Cambios al régimen legal de acceso al agua,
usos prioritarios y medio ambiente 27

2.3 Gestión integrada de cuencas y participación 27

2.4 Autoridad de jerarquía superior. 29

2.5 Disminución de las brechas en información
y fortalecimiento de la interfaz ciencia-política. 30

2.6 Divulgación, comunicación, educación, promoción
y difusión. 31

3. Infraestructura 32

3.1 La cuenca como unidad de planificación
para la solución a la escasez hídrica. 33

3.2 Relevancia de los ecosistemas naturales
en la cantidad y calidad del agua 33

3.3 Distintas alternativas de solución. 34

3.4 Brechas 38

3.5 Recomendaciones 43

4. Calidad del agua 45

4.1 Contexto nacional 45

4.2 Minería 47

4.3 Agricultura y expansión urbana 47

4.4 Industria forestal y acuicultura 48

4.5 Brechas 48

4.6 Recomendaciones 50

5. Medidas de adaptación 52

5.1 Introducción 52

5.2 Metodología 52

5.3 Resultados 54

Referencias 58

FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de cambio en caudal medio anual para un escenario de aumento de temperatura de 2°C sobre el promedio del período 1980-2010 15

Figura 2. Variación porcentual de precipitaciones medias entre 1985-2015 y 2030-2060 16

Figura 3. Proyección de temperatura y precipitación para Chile para 1985-2015 y 2030-2060 17

Figura 4. Cambios promedio en precipitación, evapotranspiración y escorrentía para 1985-2015 y 2030-2060 18

Figura 5. Valores promedios de precipitación anual (Pp), evapotranspiración potencial (ETP) e índice de aridez (IA) para Chile 19

Figura 6. Valores promedios de precipitación anual, evapotranspiración potencial e índice de aridez para la zona más afectada de Chile 20

Figura 7. Superficie que cambia su tipo de clima hacia mayor aridez, según modelos climáticos globales 21

Figura 8. Superficie que cambia su tipo de clima hacia menor aridez, según modelos climáticos globales. 22

Figura 9. Marco conceptual del rol que cumplen los servicios ecosistémicos, la seguridad hídrica y los niveles de productividad y eficiencia en el bienestar humano. 23

Figura 10. Cuencas con NSCA vigente y en proceso de establecimiento al año 2011 49

Figura 11. A) Acciones de adaptación por sector. B) Porcentaje de acciones de mitigación por sector. 54

Figura 12. Porcentaje de acciones, por sector: A) De largo plazo. B) De mediano plazo. C) De corto plazo. D) Habilitantes. 55

Figura 12 (continuación). Porcentaje de acciones, por sector: E) De estudio. F) De inversión. G) De alcance nacional. H) De alcance interregional. 56

TABLAS

Tabla 1. Tipo de clima según índice de aride. 19

Tabla 2. Registro de datos para estaciones de precipitación en la cuenca del río Itata. 39

Tabla 3. Registro de datos para estaciones de temperatura en la cuenca del río Itata. 40

Tabla 4. Catastro de políticas, planes y estrategias relacionadas con recursos hídricos 53

Resumen ejecutivo

La comparación entre el período 1985-2015 y el período 2030-2060 indica una disminución generalizada de las precipitaciones en comparación con la media histórica, pues se proyectan disminuciones promedio de entre 5% y 15% para la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Elqui (región de Coquimbo) y el Baker (región de Aysén). Estas proyecciones se acentuarían hacia la zona sur del país, sobre todo entre la cuenca del río Biobío y el límite sur de la región de Los Lagos (Rojas, 2012). De acuerdo con trabajos como Boisier *et al.* (2016), se han detectado tendencias climáticas recientes en precipitación que siguen la misma dirección proyectada hacia el futuro y que han sido además atribuidas a una manifestación temprana del cambio climático.

A partir del trabajo finalizado para la actualización del balance hídrico (DGA, 2017a, 2018) y lo informado por Vicuña *et al.* (s/f), se puede analizar la situación de los componentes básicos del ciclo hidrológico para todas las cuencas del país hasta la región de Aysén (45° S). En términos de evapotranspiración, es posible apreciar tres patrones regionales diferentes:

- El extremo norte árido no muestra un patrón claro, en parte debido a los flujos de agua en extremo bajos para esta región.
- El impacto sobre la evapotranspiración en las regiones limitadas por el agua se ve con más claridad en las áreas mediterráneas (30° S a 37° S) en Chile, donde se prevé una reducción debido a la disminución de la precipitación y de la humedad del suelo.
- Las regiones central y sur muestran un aumento en evapotranspiración que supera la reducción de la precipitación. Por lo tanto, el aumento de evapotranspiración potencial con la temperatura —tanto para tierras naturales como para riego— conduce a una mayor evapotranspiración debido al mayor almacenamiento de humedad en el suelo.

En general, los cambios modelados y los efectos concomitantes en la hidrología de la superficie son significativamente más débiles que los producidos por la precipitación. Por lo tanto, independiente de si la evapotranspiración aumenta o disminuye, existe una clara reducción de la escorrentía en todos los dominios, con un patrón espacial y una amplitud de cambio similares a los proyectados para la precipitación.

Se espera a futuro una ampliación de la zona hiperárida tanto latitudinal como longitudinalmente, la que aumentaría en promedio alrededor de 13.000 km^2. Este cambio se propaga hasta la zona húmeda en cerca de la misma magnitud. Según las estimaciones, en total 71.400 km^2 aumentarán en su categoría de aridez, lo que corresponde al 10% de la superficie continental.

Una de las principales brechas encontradas es la falta de datos hidrometeorológicos y de aguas subterráneas, lo que complica definir la solución óptima (DGA, 2017a). La densidad ideal para una red de monitoreo es la que reproduce el fenómeno estudiado de manera correcta (Gubler *et al.*, 2017). Por ejemplo, Hubbard (1994) indica que para un terreno relativamente plano, una estación de temperatura cada 60 km es adecuado para capturar el 90% de la variabilidad diaria; en el caso de las precipitaciones, esto se reduce a una cada 5 km. En Chile se tiene una estación de precipitación por cada 818 km^2 y una cada de temperatura por cada 1.364 km^2.

En el caso de las aguas subterráneas, la Dirección General de Aguas (DGA) posee 67 pozos de monitoreo distribuidos en 12 regiones, 20 acuíferos y 36 sectores acuíferos delimitados por ella (DGA, 2017a). Lo anterior deja en evidencia la necesidad de avanzar en una red robusta de información, como ha sido propuesto por esta mesa en el capítulo de gobernanza.

El proceso de adaptación debe reconocer el diseño de medidas para hacer frente a los impactos al cambio climático, su posterior implementación y la evaluación de los logros o fracasos asociados a dichos impactos en términos de reducción de vulnerabilidad.

Por otra parte, es importante considerar que la implementación de estas medidas de adaptación está condicionada por las oportunidades y limitaciones que existen a nivel organizacional e institucional (leyes, capacidades y organismos públicos y privados) que van a definir la capacidad de identificar las medidas y luego implementarlas. En el caso chileno cobran relevancia en este contexto los distintos arreglos institucionales asociados por ejemplo al sistema de asignación y distribución de aguas. Se puede reconocer en este contexto, por ejemplo, el Código de Aguas y otros componentes del aparato legal que rigen la gobernanza del agua; la Dirección General de Aguas, la Comisión Nacional de Riego y otros servicios públicos que apoyan a nivel sectorial la planificación y persecución de objetivos de bien público; y las organizaciones de usuarios, entre otros actores privados que al final ejecutan acciones de distribución y consumo de agua.

Para priorizar los temas a tratar en el marco de la mesa Agua, se seleccionaron cuatro en particular: gobernanza del agua, infraestructura para enfrentar la escasez hídrica, calidad del agua, y el análisis de medidas de adaptación existentes relacionadas con los recursos hídricos en políticas, planes y estrategias actualmente vigentes.

GOBERNANZA

Gobernanza resiliente y ambientalizada

Dados los cambios observados y proyectados en las precipitaciones, se requiere una gobernanza (derecho y gestión) resiliente y *ambientalizada* —es decir, proteger el agua—. Para ello, se sugiere:

1. Revisar la metodología vigente para otorgar derechos de uso de agua, lo que incluye el concepto de un clima e hidrología cambiantes
2. Dotar a la autoridad la posibilidad de revisar las condiciones originales en que se otorgaron los derechos en el pasado
3. Otorgar mayores atribuciones ante sequías permanentes y otros eventos extremos como inundaciones y deslizamientos. Se debe hacer estudios que revisen la efectividad de las actuales competencias legales.

El derecho y la gestión de las aguas debe, además, ambientalizarse. Se deben considerar nuevas normas que protejan glaciares, turberas y similares mediante prohibiciones de actividades y radios de protección. La autoridad del agua y las organizaciones de usuarios del agua (OUA) deben tener atribuciones ambientales, en especial en calidad de agua, caudal ecológico —que incluye exigirlos a los derechos ya otorgados— y una gestión que respete el ciclo hidrológico (no permitir gestión separada en secciones de ríos).

Cambios al régimen legal de acceso al agua, usos prioritarios y medio ambiente

El derecho de aguas de Chile es regulado por la Constitución Política de la República y el Código de Aguas de 1981, dictados hace ya casi 40 años, en una realidad hídrica y climática muy diferente a la actual. Para hacer frente a la nueva y cambiante realidad, son imprescindibles cambios dirigidos a lograr sostenibilidad y equidad social.

Para esta mesa, la futura constitución debe abordar tres aspectos fundamentales mínimos relacionados con la gobernanza del agua:

1. Que existan derechos de aprovechamiento o concesiones sobre el agua, pero que no estén amparadas por un derecho de propiedad privada —como ocurre respecto a otras concesiones—, perpetuo, y que en la actualidad impide que el Estado pueda caducar estos derechos o imponer condiciones como el respeto al caudal mínimo ecológico.
2. Que se consagre y garantice por el Estado, como derecho prioritario, el derecho humano al agua para consumo humano y saneamiento.
3. Que la constitución avance hacia una protección efectiva del derecho de toda persona a un ambiente sano y equilibrado —sin limitarse solo a vivir en un medio ambiente no contaminado— y a consagrar el principio de desarrollo sustentable.

Gestión integrada de cuencas y participación

Se recomienda avanzar hacia la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca, en la que el agua es un valor ambiental, social y productivo, que incluya la gestión integrada del agua (superficial y subterránea) y entre ella y los usos del territorio. Esta gestión integrada debe ser hecha por el Estado —pues en la actualidad

existe un sistema de autogestión privada— y todos los interesados, que incluye a los ecosistemas y las generaciones futuras. El Estado debe seguir incentivando la constitución de organizaciones de usuarios —sobre todo en aguas subterráneas—, pero debe asegurar la representatividad a todos los interesados en la cuenca y que estas decisiones sean democráticas —pues en la actualidad las toman quienes tienen más recursos—. Se requiere un estudio sobre cómo avanzar en operativizar organismos de cuenca.

En cuanto al uso del territorio, se sugiere hacer obligatorio —en la ley o al menos en las licitaciones para elaborar estos instrumentos— que la planificación del uso urbano (planes reguladores y seccionales) y el ordenamiento territorial (Planes Regionales de Ordenamiento territorial) integren la variable hídrica. Y para mejorar la gestión de cauces y el control de las crecidas y de las inundaciones urbanas, se sugiere poner énfasis en la infraestructura verde o *soluciones basadas en la naturaleza*, como la protección de humedales, turberas y otros.

Autoridad de jerarquía superior

Es necesario contar con una autoridad política de jerarquía superior y que sea capaz de coordinar las múltiples instituciones con competencia en agua en Chile. Para ello, se recomienda crear una comisión nacional, altamente representativa de las instituciones y sectores públicos y privados interesados en el agua, la ciencia y sociedad civil. Esta comisión debiera analizar el informe del Banco Mundial 2013 y proponga la mejor opción entre la creación de un ministerio, agencia o subsecretaría, a partir de los compromisos internacionales de Chile en materia de Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) y cambio climático; además de estudiar cómo se coordinaría con la también nueva institucionalidad de cambio climático. Si la opción recomendada es una subsecretaría, debe sugiere hacer en paralelo un estudio que asegure incluir en ella la variable sustentabilidad y cambio climático, ya sea si esté radicada ella en un nuevo Ministerio de Obras Públicas y Recursos Hídricos o bien el Ministerio del Medio Ambiente.

Disminuir brechas en información y fortalecer la interfaz ciencia-política

Para disminuir las brechas en información, se sugiere:

1. Elaborar un protocolo de colaboración y coordinación en información hidrológica y meteorológica, con énfasis en las variables meteorológicas de altura.
2. Que la plataforma para difundir la información sobre cantidad y calidad de agua y la de los derechos de agua (otorgados y en uso efectivo) use una tecnología avanzada y segura, similar a las plataformas, por ejemplo, del Servicio de Impuestos Internos o el Registro Civil.
3. Que en calidad del agua y niveles de aguas subterráneas, se integre la información contenida en los reportes que los titulares de proyectos reportan a la Superintendencia del Medio Ambiente.
4. Que se fije un plazo a la regularización de derechos de agua y se actualice el Catastro Público de Aguas para tener certeza de cuánta es otorgada.

En la interfaz de ciencia política, se sugiere que la autoridad cuente con la asesoría de un consejo o comité asesor científico para la planificación y gestión sustentable del agua en un contexto de cambio climático, representativo de distintas disciplinas, incluyendo variabilidad climática y de la visión de regiones.

Divulgación, comunicación educación, promoción y difusión

Se recomienda que el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación asuma legalmente la función de divulgación, educación, promoción y difusión de conocimientos de agua en un contexto de cambio climático, para todos.

Se sugiere que esta función sea ejercida con la debida coordinación entre, al menos, la autoridad del agua, el Ministerio de Educación, el Ministerio del Medio Ambiente y la institucionalidad que se forme en la temática de cambio climático. La educación en materia de recursos hídricos debiese estar dirigida no solo a unidades educacionales, sino también al sector privado y público, tomadores de decisiones y la sociedad civil. Por lo tanto, debiesen definirse estrategias, programas, productos y metodologías diferenciadas para cada público objetivo.

INFRAESTRUCTURA HÍDRICA

En primer lugar, la unidad natural de planificación territorial debe ser la cuenca hidrográfica, medida que exige reformas legales al actual sistema.[1] El estudio a nivel de la cuenca permitirá hacer balances restringidos a variables geográficas relacionadas con los servicios ecosistémicos de la cuenca, lo que favorece la gestión local y fortalece la sustentable distribución del recurso. Además, permite generar estudios estadísticos para reducir la incertidumbre mediante indicadores de medición, reporte y verificación.

Se debe relevar el rol de los ecosistemas naturales en la generación de cantidad y calidad del agua, junto con avanzar en soluciones basadas en la naturaleza, como protección de humedales, bosques y otros, más actividades de restauración de ecosistemas degradados. Para ello se sugiere crear incentivos económicos, como avanzar en sistemas de pago por servicios ecosistémicos.

Cuando se decida hacer intervenciones en la cuenca, se debe evaluar si afectará su funcionamiento y el de la zona costera adyacente. Dada la diversidad geográfica y climática de Chile, no hay una única solución para todo el país, lo que hace importante evaluar distintas alternativas o una combinación de soluciones, si consideramos que los efectos socioambientales son específicos de cada sitio.

Las políticas de incentivo a la eficiencia del riego deben considerar los potenciales efectos en el funcionamiento de la cuenca como un todo. Para ello, las medidas de infraestructura y planificación deben evitar caer en la paradoja de la eficiencia (Scott *et al*., 2014).

Los ríos son sistemas abiertos que forman parte integral del paisaje circundante, con el cual son altamente interactivos. Toda nueva obra en ellos debe considerar esta interacción. Solo aplicando una amplia perspectiva espacial y temporal podemos esperar comprender la dinámica de los ecosistemas lóticos prístinos y las consecuencias de la disrupción antropogénica en las vías interactivas. Para tomar buenas decisiones, se debe observar el sistema completo.

Se recomienda también revisar la política pública que promueve la creación de embalses. Antes de pensar en almacenamiento, es posible diseñar planes de manejo de agua en las cuencas como principal alternativa a la adaptación al cambio climático, pues la construcción de embalses modifica de manera permanente el área a inundar. Esta práctica como política de Estado debe hacerse sobre la base de una planificación que considere los servicios ecosistémicos de cada cuenca y la eficiencia de los usos del agua en general.

Por otra parte, una obra de embalse de aguas puede considerar un diseño tal que permita pulsos de lavado de riberas y también el tránsito intermitente de los sedimentos, para no modificar de manera sustancial el flujo del río. Es por ello que, para decidir las soluciones a implementar, se deben que considerar diversas variables y condicionantes, como que el volumen a almacenar sea tal que el caudal promedio estacional del río y el flujo de sedimentos se mantenga estable.

Desde la perspectiva de la rentabilidad, podría ser más interesante avanzar en la rehabilitación de embalses públicos de mediana envergadura, a fin de recuperar su capacidad y procurar el resguardo de un caudal ambiental y la flora ribereña asociada.

Se sugiere diseñar embalses paralelos al cauce del río, que acumulen agua durante la época de lluvias pero no intervengan el flujo del agua, sedimentos y nutrientes del río, y que provean agua en épocas de estiaje. Esto, sin dejar de considerar el riesgo aluvional vinculado al escurrimiento veloz de los máximos instantáneos.

Se sugiere localizar de manera estratégica los embalses en la red hidrográfica, de manera de contribuir a la recarga artificial de acuíferos, en un marco de operación conjunta superficial-subterránea.

Por otra parte, se recomienda avanzar en soluciones basadas en la naturaleza. Esto incluye hacer obras de infiltración de aguas al acuífero a través del subsuelo, sobre todo infiltración de aguas lluvias en ciudades, de modo de proteger y restaurar los humedales urbanos existentes, además de innovar en pavimentos que permitan la infiltración, techos verdes, jardines de infiltración focalizada, etcétera. El desarrollo de infraestructura verde en las ciudades requiere adecuaciones de la industria nacional y de los códigos de construcción.

Sin perjuicio de lo sugerido por la mesa Criósfera, esta mesa recomienda la protección legal de los glaciares, ya que actúan como diques reguladores de los caudales andinos, ganan masa en años fríos y húmedos y la pierden en años secos y cálidos, cuando la oferta de la nieve precipitada en el invierno no alcanza a satisfacer la demanda hídrica.

En cuanto a las brechas, se sugiere crear una sólida red de monitoreo y datos hidrometeorológicos. Avanzar en equidad hídrica, considerando en las decisiones (por ejemplo, elaboración de un plan) la participación

1 Sitio web de Escenarios Hídricos 2030, disponible en https://www.escenarioshidricos.cl/multimedia/.

de los interesados en la cuenca, incluidos los grupos vulnerables y no solo los titulares de derechos de agua. En recarga de acuíferos, se sugiere dictar reglas claras respecto de qué actividades serán consideradas recarga accidental, qué calidad deberá tener el agua aportada y qué autorizaciones se requieren.

Por último, las medidas propuestas (soluciones basadas en la naturaleza, embalses en el río, fuera del río, recarga, trasvase y otras) conllevan dos desafíos:

- La necesidad de determinar y evaluar el impacto ambiental medido como análisis de ciclo de vida social, ambiental y productivo. Como no todos estos proyectos requieren ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) —por ejemplo, la recarga artificial de acuíferos de grandes dimensiones o programas de riesgo tecnificado—, se sugiere que, al menos, los proyectos del Estado ingresen de manera voluntaria al SEIA.
- La necesidad de dar reglas claras para determinar, por ejemplo, cómo y quiénes administran el agua recargada o almacenada —si se crean derechos de agua—, o cuál es el volumen máximo de agua a extraer, o en caso de que se infiltre agua, dónde, cuándo, cuánto y cómo se puede extraer.

CALIDAD DEL AGUA

Un conjunto de acciones que el país puede tomar para mejorar la calidad del agua y así avanzar en los objetivos de la Agenda 2030 de los objetivos sustentables son, entre ellas:

1. Implementar la gestión integrada de cuencas en el país.
2. Acelerar la protección de las cuencas a través de la implementación más eficiente de un programa de dictación de normas de calidad primaria y secundaria en los ríos y cuerpos de agua de Chile, más la posterior dictación de planes de prevención y descontaminación.
3. Crear un comité de expertos asesor de la DGA, tanto en regiones como en la Región Metropolitana, para la definición de políticas públicas basadas en la ciencia para la gestión de la calidad del agua, en el que la ciencia juegue un rol protagónico en la toma de decisiones relacionadas con calidad de agua.
4. Consagrar legalmente un área de protección de las captaciones de aguas subterráneas para consumo como agua potable, siguiendo estándares internacionales.
5. Reformar la actual definición legal de «contaminación» que existe en la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, pues ella exige siempre superación de una norma, y por tanto, al no existir la norma, según ella no se produce contaminación.
6. Implementar y fortalecer programas regionales y municipales de monitoreo de la calidad del agua superficial y subterránea. Estos programas deben integrar esfuerzos de monitoreo públicos, participativos y de origen privado, con ayuda de los gobiernos locales en colaboración con la sociedad civil, ya sea junta de vecinos, juntas de vigilancia, ONG y otros.
7. Aumentar capacidades analíticas para incluir más parámetros fisicoquímicos (metales raros como tantalio, galio, germanio, indio, niobio, teluro y talio) y microbiológicos (cianobacterias y bacterias Gram negativas como *Helicobacter pylori*) a medir, que puedan verse potencialmente exacerbados por la variabilidad y el cambio climático. De esta manera, podrán ser insertados en un marco institucional y regulatorio con propósitos claros asociados con la gestión integrada de cuencas, de acuerdo con la visión, los objetivos y las metas asociados con la agenda de sostenibilidad.
8. Incorporar de forma explícita el cambio climático en el Código de Aguas, dentro de una gestión de riesgos relacionados con el clima a través del proceso de Plan Seguridad del Agua, según los solicitado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017).
9. Control periódico sobre la calidad y la salinidad de aguas subterráneas en zonas costeras. Se recomienda implementar tecnología que favorezca la mejora de la calidad del agua en zonas expuestas a la intrusión salina.
10. Si bien la medición de contaminantes emergentes en el agua puede ser aún costosa para incorporar a una norma, de manera alternativa, es posible utilizar bioensayos de ecotoxicidad aguda y crónica estandarizados y biomarcadores para diferentes especies, familias o géneros existentes en literatura. Esta alternativa debería ser considerada en el reglamento de dictación de normas (de calidad) y como medida de gestión del Ministerio del Medio Ambiente en el SEIA.
11. Incorporar bioensayos rápidos para la detección de agentes mutagénicos y desrreguladores (disruptores) endocrinos en aguas.

12. Controlar de forma más efectiva la contaminación difusa del agua, por medio de conservar la vegetación nativa en la zona ripariana de cuerpos de agua (ríos, lagos, esteros), y hacer mejoras en el sistema de riego tecnificado para los productores agrícolas. Se recomienda incluir este control de la contaminación difusa en el SEIA y en los planes de descontaminación futuros.
13. Entregar educación ambiental a todo nivel pedagógico, cultural y político, para armonizar conceptos ambientales y potenciar la calidad de agua a nivel nacional, por medio de la divulgación de información confiable y precisa a los hogares a través de los medios de comunicación para inspirar el compromiso ciudadano, como tarea del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
14. Aplicar tecnologías sustentables para la mejora y protección de la calidad del agua a través de la utilización de sistemas naturales o soluciones basadas en la naturaleza. Es decir, los sistemas naturales incluyen humedales construidos o artificiales, entre otros, que se caracterizan por imitar de forma controlada procesos que se dan en la naturaleza para tratar el agua y mejorar su calidad, y que han sido ampliamente utilizados en diferentes partes del mundo.

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

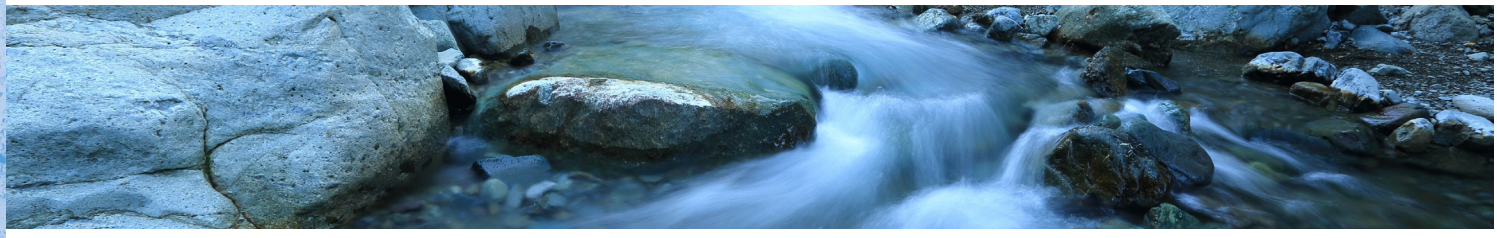
Desde la política pública se ha avanzado en aspectos de adaptación y mitigación del cambio climático por medio de una serie de políticas y planes sectoriales, aunque resta elaborar el Plan de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos. No obstante, dada la transversalidad de los recursos hídricos, estos ya han sido incluido en algunos de los planes y políticas sectoriales, como este informe analiza.

Se revisaron las políticas, planes, y estrategias para 11 sectores económicos, lo que arrojó un total de 95 medidas relacionadas con recursos hídricos, la mayoría de alcance nacional (80). Del total de acciones de política, se identifican 74 relacionadas con acciones de adaptación y 13 con acciones de mitigación; las restantes corresponden a acciones de adaptación y mitigación (todas asociadas a biodiversidad). Respecto del plazo de la medida, predominan las acciones de largo plazo (53 acciones), seguida por mediano (31) y corto plazo (11).

Con respecto al tipo de medida, la gran mayoría corresponde a medidas habilitantes (36), seguida por estudio (19), e inversión (14). Las restantes medidas corresponden a medidas de fomento y capacitación.

Sobre la base de la información sistematizada, y con miras a la elaboración del Plan de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos (PACC-RRHH) (Vicuña *et al.*, 2019), los desafíos para la política públicas son:

1. Elaborar las acciones del PACC-RRHH aprovechando potenciales sinergias con las acciones de políticas, planes, y estrategias existentes.
2. Evitar duplicación de esfuerzos, e incluso potenciales conflictos de objetivos entre políticas, planes, y estrategias actuales y las acciones que se propondrán como parte del PACC-RRHH.
3. Mantener los lineamientos existentes de políticas, planes, y estrategias: Mantener acciones de adaptación, con una perspectiva de largo plazo, enfocadas en generar ambientes habilitantes, y con un alcance nacional.
4. Sobre el alcance nacional, es imprescindible establecer mecanismos por medio de los cuales se incluirá la heterogeneidad territorial que caracteriza a Chile.
5. Dados los múltiples usos del agua, es necesario ponderar los efectos que las acciones del PACC-RRHH tendrán sobre los sectores sociales, económicos y los ecosistemas. Esto es relevante cuando las políticas estén en conflicto (biodiversidad frente a producción agrícola).



1. Introducción

Al ser el agua un tema transversal y que aborda varias temáticas, para este informe se optó por priorizar cuatro temas: gobernanza del agua en Chile, soluciones a la escasez hídrica, calidad del agua y adaptación en recursos hídricos. A su vez, no se abordó la temática de nieve y glaciares, ya que fue tratada por el informe de la mesa de Criósfera (González *et al.*, 2019).

1.1 CONTEXTO GLOBAL

El ciclo hidrológico o ciclo del agua es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos que forman la hidrósfera.[2] El principal motor del ciclo hidrológico es la energía que llega desde el sol. Esta energía es la gran promotora de los procesos de evaporación y transpiración, y debido a su distribución heterogénea en la superficie de la Tierra, produce un transporte de agua (energía) a través de la circulación general de la atmósfera. Es esperable, por ende, que el cambio climático que ocurre por una alteración en el balance de energía en el planeta producto de la acumulación de gases de efecto invernadero tenga consecuencias en los distintos componentes del ciclo hidrológico.

En particular, preocupan los cambios en los patrones de circulación de la atmósfera y de frecuencia e intensidad de precipitaciones, que son la fuente principal de recursos hídricos para gran parte del planeta. En términos globales, se espera que debido al aumento en la tasa de precipitación aumente también la tasa global de precipitación, pero esto no implica que en todas partes del planeta aumenten las tasas de precipitación, pues se encuentran efectos heterogéneos en el planeta. A modo de ejemplo, la **Figura 1** muestra las zonas del planeta donde podrían aumentar los niveles de escorrentía (por ejemplo, latitudes altas y zonas húmedas en latitudes medias en torno al ecuador) y otras donde podrían disminuir (por ejemplo, latitudes medias y zonas áridas subtropicales). Esto podría acentuar las diferencias existentes en la cantidad de recursos hídricos disponibles hoy en el planeta. Además, es importante considerar el efecto que el mismo aumento en energía y temperatura tiene sobre la disponibilidad de recursos hídricos. Por ejemplo, en zonas donde los procesos de acumulación y derretimiento de nieve o glaciares son relevantes dentro del ciclo hidrológico (zonas montañosas y de latitudes altas), aumentos en temperatura pueden alterar el efecto modulador (amortiguador) que la acumulación temporal de agua en estado sólido tiene sobre la escorrentía. Por su parte, un aumento en la temperatura puede generar un alza en las necesidades de evapotranspiración de plantas en ecosistemas naturales y las necesidades de agua en cultivos sobre todo en zonas semiáridas, donde los montos de agua asociados a este proceso pasan a ser un factor muy relevante del balance hídrico.

2 En las ciencias de la Tierra, la hidrósfera es el sistema material constituido por el agua que se encuentra sobre la superficie de la tierra sólida, y también parte de la que se encuentra bajo la superficie, en la corteza terrestre. La hidrósfera incluye los océanos, mares, ríos, lagos, agua subterránea, el hielo y la nieve.

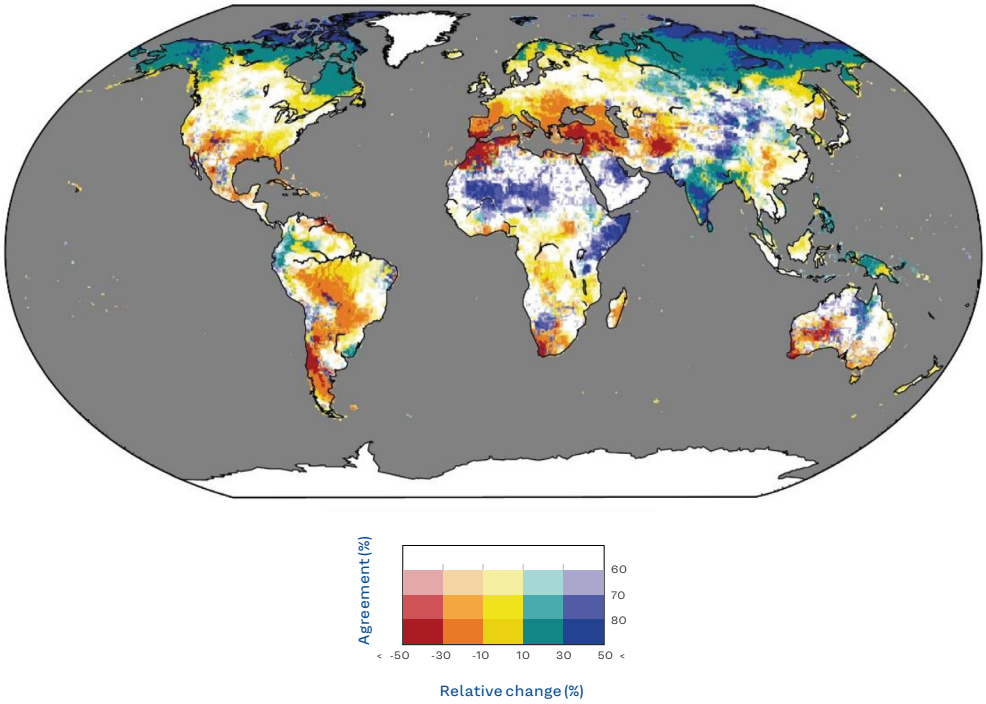


Figura 1. Porcentaje de cambio en caudal medio anual para un escenario de aumento de temperatura de 2°C sobre el promedio del período 1980-2010. Los colores muestran el cambio promedio considerando cinco modelos de circulación global y 11 modelos hidrológicos globales, mientras que la intensidad en el color indica el nivel de acuerdo del cambio proyectado considerando la combinación de 55 modelos (porcentaje de corridas según el signo de cambio). Fuente: Jiménez Cisneros *et al.* (2014).

1.2 IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE

Para analizar los efectos previsibles del cambio climático en los recursos hídricos en Chile, revisaremos primero las proyecciones climáticas y su comparación con los recursos hídricos renovables de la región. Si observamos en detalle los resultados que se presentan en la **Figura 2**, se evidencia una gran heterogeneidad en la respuesta de los diversos regímenes de precipitación al forzamiento antropogénico en Sudamérica. Hay áreas donde se espera un aumento en la precipitación media anual (por ejemplo, la cuenca del Plata o la costa del Pacífico alrededor del ecuador), y otras donde se proyecta una disminución de la precipitación (por ejemplo, el noreste de Brasil, el centro de Chile y el sur de Argentina).

A su vez, la **Figura 3** ofrece una serie de mapas con proyecciones detalladas para el caso de Chile. Aquí se puede observar que, en el caso de las precipitaciones, la comparación entre el período 1985-2015 y el período 2030-2060 indica una disminución generalizada de las precipitaciones en comparación con la media histórica, por lo que se proyectan disminuciones promedio de entre 5% y 15% para la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Elqui (región de Coquimbo) y el Baker (región de Aysén). Estas proyecciones se acentuarían hacia la zona sur del país, en especial entre la cuenca del río Biobío y el límite sur de la región de Los Lagos (Rojas, 2012). En relación con el extremo norte y austral del país, las proyecciones son inciertas: algunos modelos indican una tendencia al aumento y otros a la disminución de las precipitaciones. En consecuencia, el ensamble de modelos tiende a mostrar una condición de disminución en la zona centro-sur de Chile, pero más neutral e incierta tanto en la zona norte como en la austral.

Según trabajos como Boisier *et al.* (2016), se han detectado tendencias climáticas recientes en precipitación que siguen la misma dirección proyectada hacia el futuro, las que han sido además atribuidas a una manifestación temprana del cambio climático. Como complemento a estos estudios de índole climática, Vicuña *et al.* (2013) demostraron la ocurrencia de estos cambios en la cuenca del río Mataquito ubicada a 200 km al sur de la ciudad de Santiago. Además, detectaron un cambio en las condiciones hidrológicas en la cuenca que se manifiestan a través de una reducción en los caudales mínimos y un aumento en los caudales máximos diarios. Una explicación a este aparente efecto contraintuitivo tiene relación con el rol del aumento en las temperaturas en la generación de caudales extremos elevados cuando, en conjunto con eventos de altos niveles de precipitación, aumenta la escorrentía en eventos de tormentas y disminuye el aporte que tendría la

acumulación de nieve en los meses de estiaje. El ejemplo del río Mataquito muestra a modo general el tipo de impacto asociado al cambio climático en parte importante de las cuencas de la zona central de Chile: disminución de caudales medios y disponibilidad de agua sobre todo en los meses de primavera y verano producto del adelantamiento de los caudales, lo que se asocia al aumento en temperatura. Este tipo de impacto es relevante, ya que en la zona central del país es donde se concentra gran parte de la población y la actividad productiva (industria, agricultura) (DGA, 2017b).

A partir del trabajo recién finalizado para la actualización del Balance Hídrico (DGA, 2017a, 2018) y lo informado por Vicuña *et al.* (s/f), se puede analizar la situación de los componentes básicos del ciclo hidrológico para todas las cuencas del país hasta la región de Aysén (45° S). Los resultados se presentan en las **Figuras 3** y **4**.

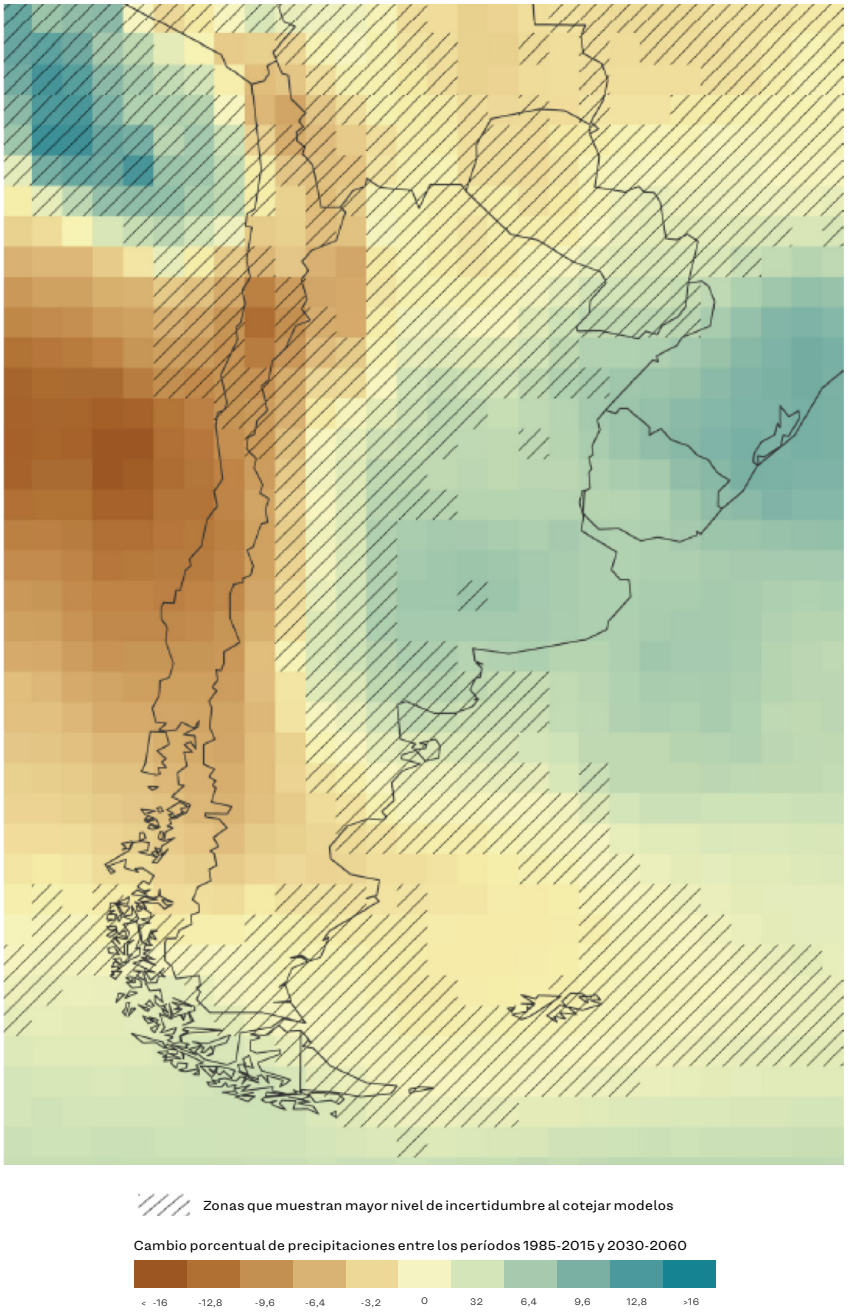


Figura 2. Variación porcentual de precipitaciones medias entre 1985-2015 y 2030-2060. Resultados obtenidos combinando 30 modelos de circulación global. La zona achurada indica discrepancia entre modelos: no existe certeza sobre si las tendencias serán negativas o positivas. Fuente: Bambach, Morales-Moraga y Meza (2019).

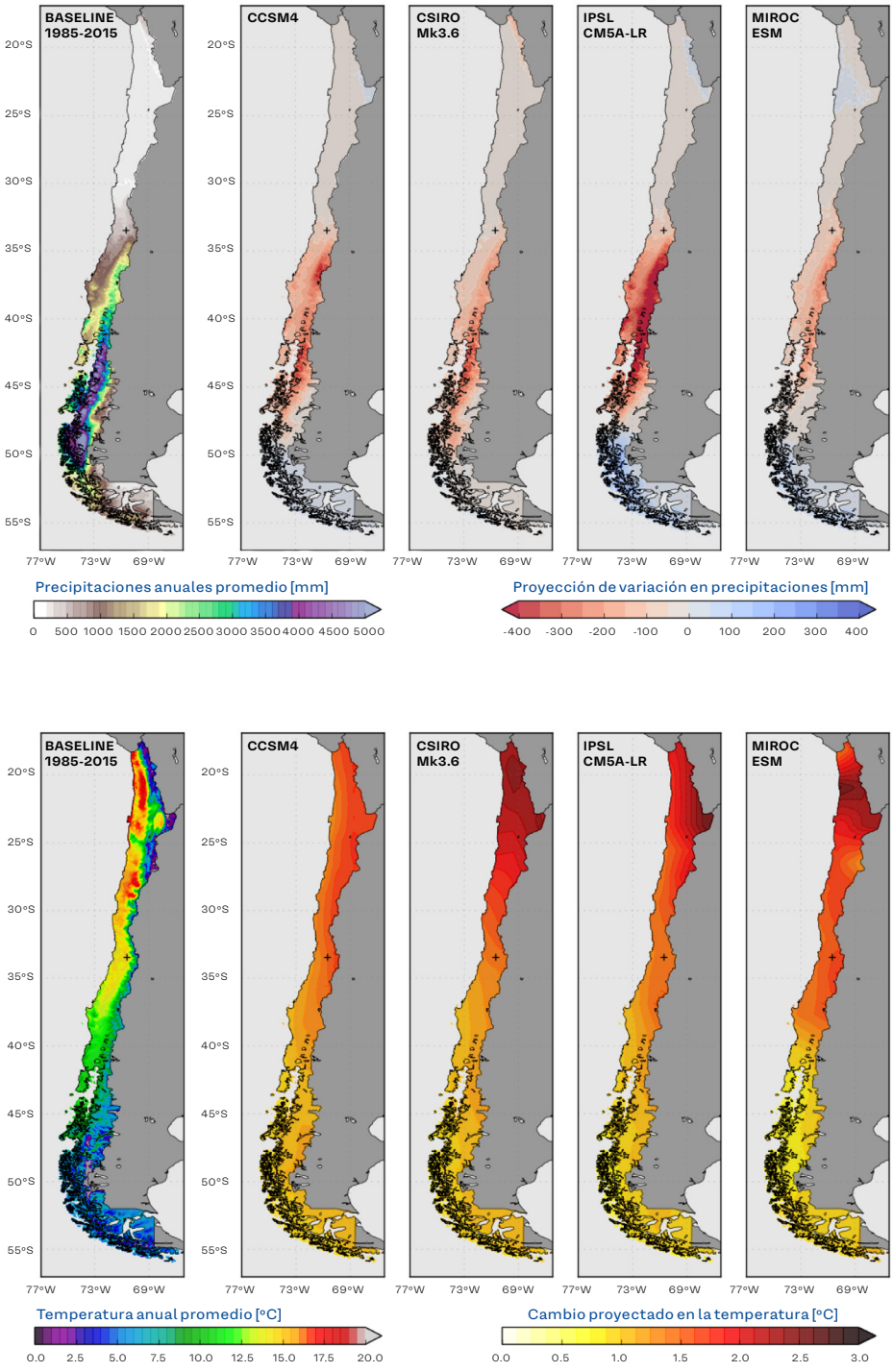


Figura 3. Proyección de temperatura y precipitación para Chile para 1985-2015 y 2030-2060. Arriba: estimaciones de variación promedio en la precipitación anual. Abajo: estimaciones de temperatura máxima diaria durante el verano asociada al percentil 90 para el RCP 8.5. Fuente: DGA (2018).

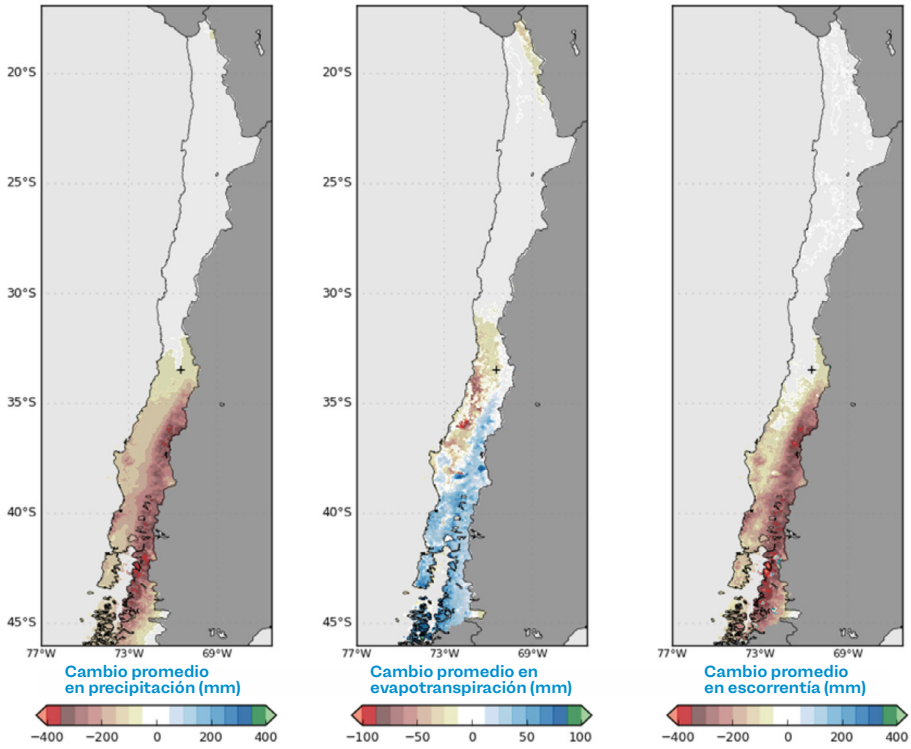


Figura 4. Cambios promedio en precipitación, evapotranspiración y escorrentía para 1985-2015 y 2030-2060. Corregido por la demanda de riego. Mapas proyectados por el modelo VIC. Fuente: Liang *et al.* (1994), Vicuña et al. (s/f).

Los resultados muestran un patrón distintivo de reducción en precipitación y escorrentía en esta parte del país. En términos de evapotranspiración, es posible apreciar tres patrones regionales diferentes:

- El extremo norte árido no muestra un patrón claro, en parte debido a los flujos de agua en extremo bajos en esta región.
- El impacto sobre la evapotranspiración en las regiones limitadas por el agua se ve con más claridad en las áreas mediterráneas (30° S a 37° S) en Chile, donde se prevé una reducción en la evapotranspiración debido a la disminución de la precipitación y de la humedad del suelo.
- Las regiones central y sur muestran un aumento en evapotranspiración que supera la reducción de la precipitación. Por lo tanto, el aumento de evapotranspiración potencial con la temperatura (tanto para tierras naturales como para riego) conduce a más evapotranspiración, debido al mayor almacenamiento de humedad en el suelo.

En general, los cambios modelados en evapotranspiración y los efectos concomitantes en la hidrología de la superficie son significativamente más débiles que los causados por la precipitación. Por lo tanto, independiente de si la evapotranspiración aumenta o disminuye, existe una clara reducción de la escorrentía en todos los dominios, con un patrón espacial y una amplitud de cambio similares a los proyectados para la precipitación.

Para reforzar lo anterior, y a partir de una actualización (CR2Metv2.0) de las forzantes meteorológicas usadas en DGA (2018) en la que se ocupan los resultados del reanálisis ERA5 con una resolución espacial del orden de 30 km, analizamos la variación futura del índice de aridez (Middleton y Thomas, 1997) definido como:

$$IA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P_i}{ETP_i}\right)$$

Donde P_i representa la precipitación acumulada en cada año i, mientras que ETP_i corresponde a la evapotranspiración potencial anual. A partir del valor índice se clasifica el tipo de clima, según lo indicado en la Tabla 1.

Tipo de clima	Índice de aridez
Hiperárido	≤0,05
Árido	[0,05-0,2)
Semiárido	[0,2-0,5)
Subhúmedo seco	[0,5-0,65)
Húmedo	≥0,65
Frío	ETP<400 mm

Tabla 1. Tipo de clima según índice de aridez (AI). Fuente: Middleton y Thomas (1997).

En general, los resultados obtenidos —como era de esperar debido a la disminución de la precipitación y aumento de temperatura— indican un aumento de la aridez en todo el territorio nacional. Así, la **Figura 5** presenta los valores medios anuales para los períodos 1985-2015 y 2030-2060 de la precipitación (Pp), la evapotranspiración potencial (ETP) estimada a partir de la evapotranspiración de referencia (ETo) con la fórmula de Hargreaves y Samani (citado por Hargreaves y Allen, 2003) y el índice de aridez (IA). En esta figura, el cambio futuro corresponde al promedio de los cuatro modelos climáticos globales seleccionados en el estudio DGA (2017a).

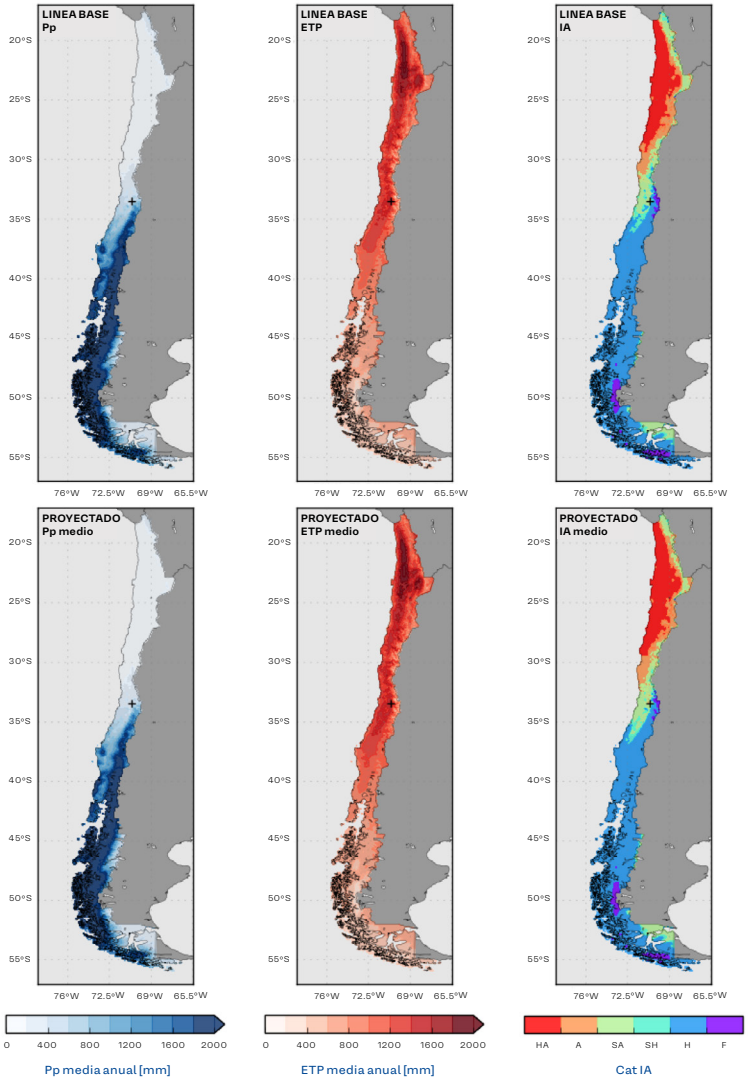


Figura 5. Valores promedios de precipitación anual (Pp), evapotranspiración potencial (ETP) e índice de aridez (IA) para Chile. Arriba: período 1985-2015. Abajo: período 2030-2060, promedio de modelos climáticos globales. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2018).

En la **Figura 6** se visualiza el mapa de la zona más afectada, que comprende las latitudes 28° S a 43° S. Incluye, para todo el territorio nacional, los cambios de área de superficies que modifican su clasificación de clima futuro debido a un índice de aridez más restrictivo, además del cambio porcentual en los niveles de precipitación y evapotranspiración potencial (condición promedio de escenarios futuros respecto de la situación base) y la superficie que aumenta en su categoría de aridez —es decir, que pasa de árido a hiperárido, de semiárido a árido, de subhúmedo seco a semiárido o de húmedo a subhúmedo seco—. Se aprecia a futuro una ampliación de la zona hiperárida tanto en forma latitudinal como longitudinal, con un aumento en promedio de cerca de 13.000 km², como se muestra en la **Figura 7**, en la que se visualiza el cambio futuro para cada uno de los cuatro modelos climáticos globales seleccionados en el estudio DGA (2017a), más el promedio. Este cambio promedio se propaga hasta la zona húmeda en aproximadamente la misma magnitud. Se observa que el modelo IPSL es el que proyecta mayores cambios en esta zona, mientras que el modelo CSIRO señala los menores. Por otra parte, queda en evidencia la cantidad del territorio que aumenta en algunos de los grados de aridez. Según las estimaciones, en total 71.400 km² aumentan en su categoría de aridez, lo que corresponde al 10% de la superficie continental del país.

Se aprecia en la **Figura 7** que, al considerar todo el territorio nacional, el mayor impacto sería la transformación de alrededor 21.000 km² de superficie de clima semiárido a árido. A modo de referencia, la Región Metropolitana tiene una superficie de 15.400 km².

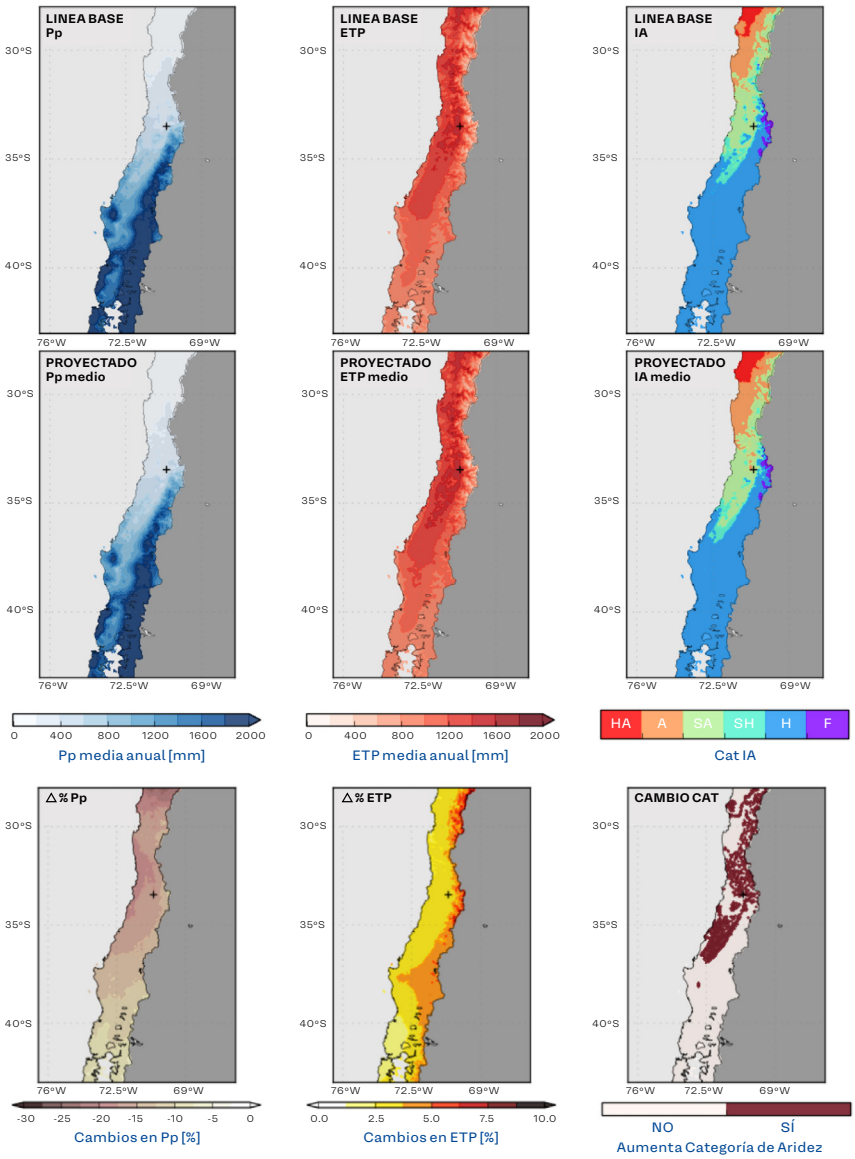


Figura 6. Valores promedios de precipitación anual, evapotranspiración potencial e índice de aridez para la zona más afectada de Chile. Arriba: período 1985-2015. Centro: período 2030-2060, que corresponde al promedio de los cuatro modelos de cambio global analizados. Abajo: cambio porcentual y aumento en categoría de aridez. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2018).

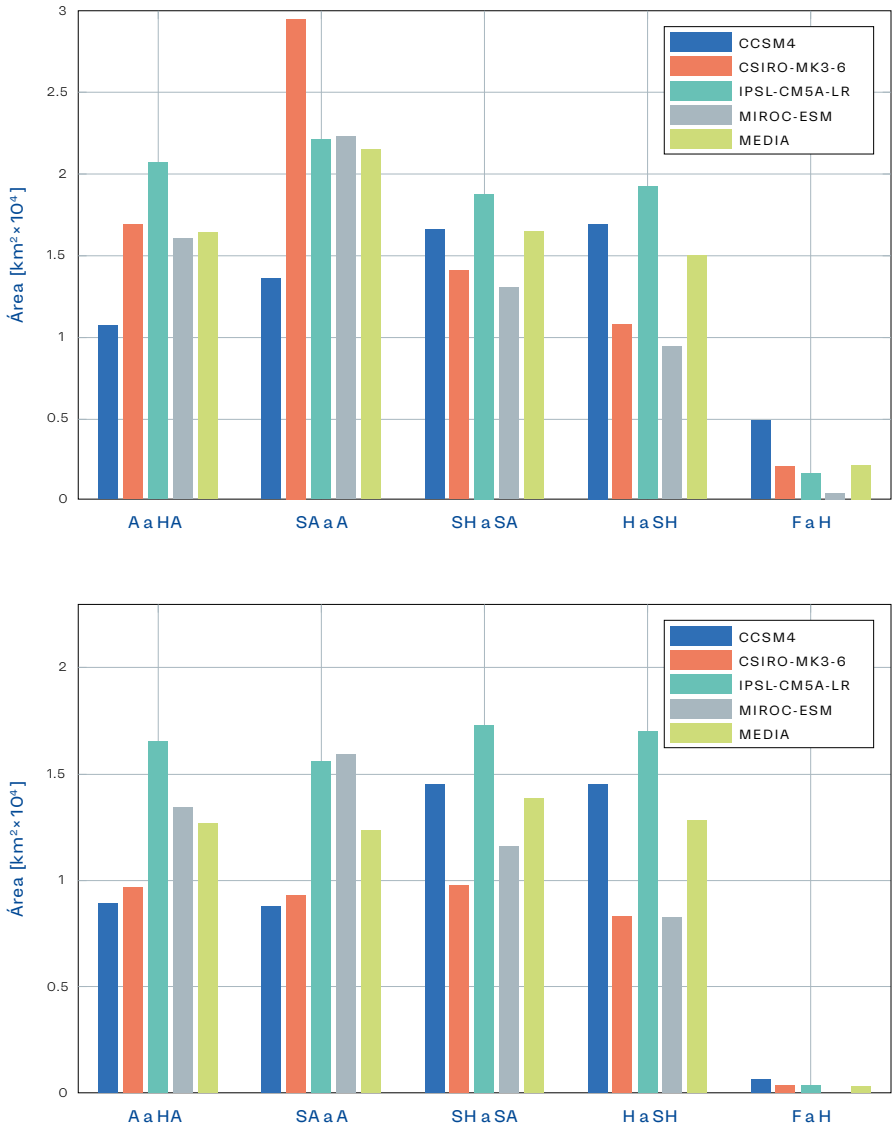


Figura 7. Superficie que cambia su tipo de clima hacia mayor aridez, según modelos climáticos globales. Arriba: todo el territorio nacional. Abajo: zona entre latitud 25° S y 38° S. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2018).

Por otra parte, la **Figura 8** presenta histogramas de los cambios en sentido contrario, es decir, entre clasificaciones de mayor a menor aridez, que también existen en algunas partes del país. Se puede apreciar que a diferencia de los cambios hacia aridez, estos cambios están presentes en algunos modelos y en magnitudes menores. Se destaca el cambio de hiperárido a árido que proyecta el modelo CSIRO en la zona del altiplano del país.

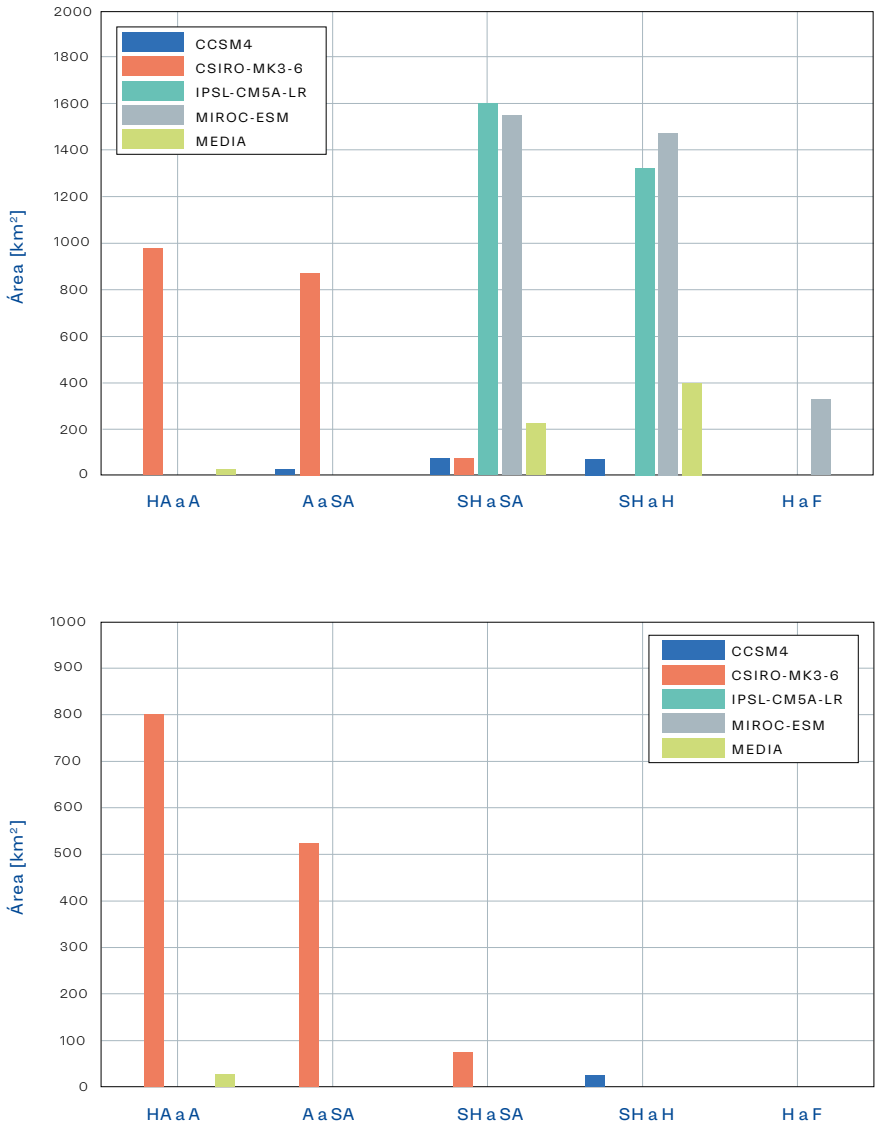


Figura 8. Superficie que cambia su tipo de clima hacia menor aridez, según modelos climáticos globales. Arriba: todo el territorio nacional. Abajo: zona entre latitud 17°S y 25°S. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2018).

Para complementar los resultados anteriores, es importante destacar que en Chile se han hecho estudios de impactos del cambio climático en varias cuencas del país, no solo en términos de cambios en caudales, sino también en la disponibilidad y uso de recursos hídricos (MMA, 2016). A modo de ejemplo del tipo de impactos esperados, se toma la experiencia del análisis de vulnerabilidades desarrollado en la cuenca del río Maipo, en Chile Central, a través del proyecto Maipo Plan de Adaptación (MAPA).[3]

Utilizando distintos modelos hidrológicos y de recursos hídricos, el proyecto MAPA analizó las vulnerabilidad en distintos sectores de la cuenca afectados por el cambio climático. En este proyecto se analizaron los impactos del cambio climático en el derretimiento de glaciares; las condiciones hidrológicas que tienen efectos en la generación hidroeléctrica y el sostén de caudales ambientales en la cordillera; los impactos en el almacenamiento de agua en el embalse El Yeso, principal fuente de regulación para la provisión de agua potable de la ciudad de Santiago; y los impactos en el suministro de agua para riego producto del aumento en la demanda de agua y la disminución en la oferta durante la temporada de riego. Resultados similares se encuentran en Meza *et al.* (2014).

3 Sitio web de Maipo: Plan de Adaptación, disponible en www.maipoadaptacion.cl.

1.3 ADAPTACIÓN A LOS IMPACTOS A LOS RECURSOS HÍDRICOS

El proceso de adaptación a los impactos del cambio climático debe reconocer el diseño de medidas para hacerles frente, su posterior implementación y la evaluación de los logros o fracasos asociados a dichos impactos en términos de reducción de vulnerabilidad. Para definir el diseño de las medidas de adaptación, resulta de utilidad el marco conceptual presentado en la **Figura 9** (tomado de Ocampo *et al.*, 2016). Este marco se basa en la relación que existe entre la seguridad hídrica y el bienestar humano que esta produce en parte.

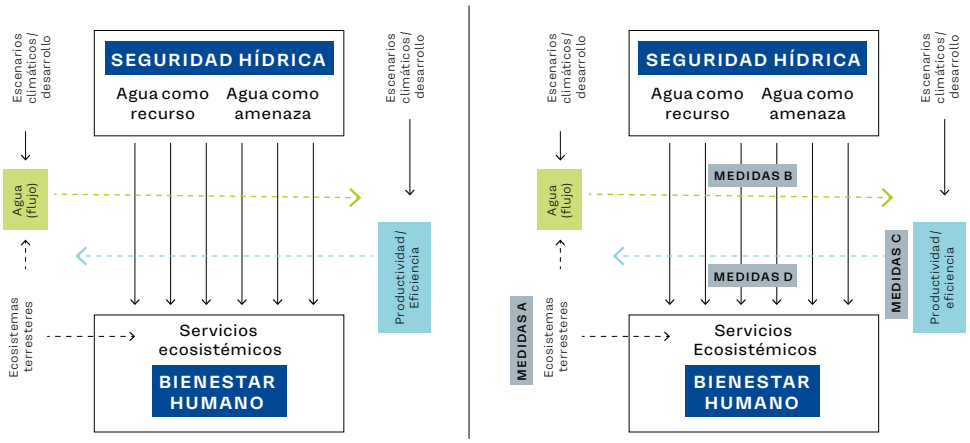


Figura 9. Marco conceptual del rol que cumplen los servicios ecosistémicos, la seguridad hídrica y los niveles de productividad y eficiencia en el bienestar humano. Los elementos en rojo representan tipos de medidas de adaptación para hacer frente a las amenazas que escenarios futuros podrían tener sobre el bienestar humano.
Fuente: Ocampo *et al.* (2016).

Como se presenta en la figura, el concepto de seguridad hídrica[4] nos permite reconocer la naturaleza dual del agua tanto como un recurso (para el sostén de modos de vida, actividades productivas y ecosistemas) y como una amenaza (contaminación y desastres hidrometeorológicos). El marco también reconoce el rol que tienen los ecosistemas terrestres en proveer distintos servicios que van a contribuir a este bienestar humano (Millennium Assessment, 2005), entre los cuales se encuentra la provisión y regulación de flujos de agua, dos servicios ecosistémicos claves. Todas las conexiones entre el flujo de agua que provee un ecosistema y la manera en que ese flujo de agua se modifica (regula) y distribuye entre distintos usos pueden sufrir alteraciones producto del cambio climático u otros cambios en la demanda, obras de infraestructura y niveles de productividad y eficiencia que podrían terminar afectando el bienestar humano.

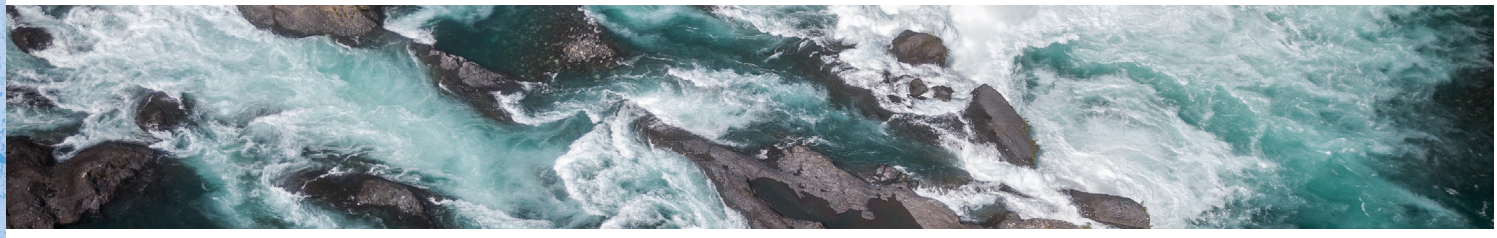
A partir de este marco conceptual, la identificación de medidas de adaptación a los posibles impactos del cambio climático —por extensión, el marco conceptual también sirve para diseñar medidas de ajuste a otros tipos de cambios— resulta relativamente claro y se identifican en la **Figura 9** en color rojo. Primero se pueden considerar medidas relacionadas con la protección y restauración de ecosistemas terrestres y, por ende, de los servicios que proveen entre ellos flujos de agua adecuados (medidas tipo A). Después, se pueden considerar medidas que tiendan a cambiar los flujos al interior del cauce —incluidos acuíferos— a través de infraestructura o cambios en las reglas de distribución (espacial y temporal) del agua disponible (medidas tipo B). Un tercer grupo de medidas tiene relación con mejoras en productividad y eficiencia que logran mantener ciertos objetivos de bienestar humando según el contexto físico dado por la cantidad y calidad de agua (medidas tipo C). Por último, se puede considerar un cuarto grupo de medidas que, sin mejorar el contexto físico ni los productos de este contexto, conservan o mejoran en forma directa el componente de bienestar humano que se ve amenazado (medidas tipo D).

Por otra parte, es importante considerar que la implementación de estas medidas de adaptación está condicionada por las oportunidades y limitaciones que existen a nivel organizacional e institucional (leyes, capacidades y organismos públicos y privados), las que van a definir la capacidad de identificar las medidas y luego implementarlas. En el caso chileno, cobran relevancia los distintos arreglos institucionales asociados

4 Seguridad hídrica es la capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sostenimiento de los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para la conservación de los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política. «UN-Water Report 2013», UN Water, 8 de mayo de 2014, https://www.unwater.org/publications/un-water-annual-report-2013/.

por ejemplo al sistema de asignación y distribución de aguas. Se puede reconocer en este contexto al Código de Aguas y otros componentes del aparato legal que rigen la gobernanza del agua, a la Dirección General de Aguas y múltiples servicios públicos, como la Comisión Nacional de Riego —que apoyan a nivel sectorial la planificación y persecución de objetivos de bien público—, y las organizaciones de usuarios, entre otros actores privados que ejecutan acciones de distribución y consumo de agua.

El marco conceptual presentado en la **Figura 9** fue el utilizado para priorizar los temas a tratar en el marco de la mesa Agua, en la que se seleccionaron cuatro temas: i) gobernanza del agua, ii) infraestructura para enfrentar la escasez hídrica, iii) calidad del agua y iv) análisis de medidas de adaptación existentes relacionadas a las recursos hídricos en políticas, planes y estrategias actualmente vigentes.



2. Gobernanza

Por gobernanza del agua entendemos el proceso mediante el cual se deben adoptar las decisiones sobre la protección y gestión de un bien que tiene valor ambiental, social y económico. Este proceso debe asegurar que las decisiones sean tomadas de manera informada, coordinada y participativa entre los actores relevantes, para asegurar que las generaciones actuales y futuras puedan disfrutar de todos los servicios ecosistémicos asociados al agua. En otras palabras, la gobernanza responde a las preguntas: ¿quiénes toman las decisiones?, ¿cómo?, ¿sobre qué? y ¿quién asegura el cumplimiento de los objetivos buscados?

El objetivo central de la gobernanza debe ser lograr la seguridad hídrica en el país. En cuanto al acceso al agua, las opiniones están bastante polarizadas en torno al régimen de propiedad y mercado de las aguas existentes (Delgado, 2019). Sin embargo, existe más consenso en la necesidad de integrar criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones ante el cambio climático. Por ejemplo, el Banco Mundial considera que «es necesario adaptar los mecanismos de gestión y de gobernabilidad del agua existentes a las nuevas condiciones climáticas para ayudar a reducir y/o mitigar la incertidumbre» (Banco Mundial, 2013).

En este contexto, este informe se concentrará en los aspectos más urgentes y directamente relacionados al cambio climático.

2.1 GOBERNANZA RESILIENTE Y AMBIENTALIZADA

El derecho de aguas de Chile básicamente está constituido por el Código de Aguas de 1981, dictado hace ya casi 40 años, en una realidad hídrica y climática totalmente diferente a la actual. Para hacer frente a la nueva y cambiante realidad, parece necesario al menos hacer una serie de cambios.

En relación específica con el cambio climático, se ha propuesto que el derecho de aguas debe ser «resiliente», en el sentido de permitir a la autoridad y a las organizaciones de usuarios del agua «irse adaptando a la cambiante realidad»" (Delgado, 2019) y, para ello, el procedimiento de toma de decisiones debe considerar: i) más participación de los interesados en la cuenca; ii) más atribuciones de la autoridad para responder en forma adecuada, por ejemplo, ante la escasez hídrica y la sequía, como otros eventos extremos (inundaciones y deslizamientos); y iii) especialmente, dotar a la autoridad de la posibilidad de «revisar» de manera permanente sus decisiones, según lo aconseje la realidad y la evidencia científica, incluyendo poder ajustar la cantidad otorgada y las condiciones de ejercicio impuestas a los derechos de aprovechamiento de aguas que hayan sido otorgados previamente, bajo otra realidad (Delgado, 2019); posibilidades que, por lo demás, el Estado chileno sí tiene respecto de otras concesiones (Hervé, 2015)[5] y que detentan las autoridades de aguas en otros países, en que también funciona el mercado de aguas, como analiza en detalle Duhart (2019).

En la actualidad, la DGA solo puede constituir derechos de aguas en condiciones diferentes a las solicitadas imponiendo limitaciones en consideración de la disponibilidad del recurso al momento de la solicitud, pero esto solo podrá hacerlo al constituir el derecho —y con el consentimiento del solicitante—, pero no cuando ya ha sido otorgado el derecho y la realidad pueda cambiar, por ejemplo, por una sequía (Código de Aguas, artículo 147 bis, inciso cuarto) En Inglaterra, en cambio, donde se ha dado inicio a una gran reforma del sistema que permita responder de forma adecuada al cambio climático, incluyendo una consulta nacional

5 Douglas Heaven, «Giving Nature Human Rights Could Be the Best Way to Protect the Planet», *New Scientist*, 28 de septiembre de 2019, https://www.newscientist.com/article/mg24332492-800-giving-nature-human-rights-could-be-the-best-way-to-protect-the-planet/.

ciudadana, las medidas que se discuten son: i) terminar con las extracciones exentas de licencia; ii) reemplazar las licencias temporales (nuevas o existentes) por permanentes, las que quedan sujetas a revisión periódica por parte de la autoridad; iii) cambiar el contenido de las licencias al otorgarlas o renovarlas, de manera que se autoricen volúmenes acordes al uso real, modificando aquellas que signifiquen un riesgo al medio ambiente, así como estandarizando caudales ecológicos mínimos, con el objetivo de controlar el flujo y disponibilidad real de las fuentes; iv) regular el mercado de las aguas, estableciendo una cantidad de transacciones preaprobadas por la autoridad en cuencas y en determinados periodos (Duhart, 2019).

Es urgente reformar la respuesta institucional que en la actualidad el Código de Aguas considera frente a la escasez hídrica o sequía y a las crecidas e inundaciones. No hay estudios hasta ahora sobre el punto. De hecho, la insuficiencia de estas normas es evidente, sobre todo si se considera que la principal norma, el artículo 314 del Código de Aguas, permite declarar «escasez hídrica» ante una sequía «extraordinaria», para que la autoridad tenga potestades especiales y la posibilidad de flexibilizar algunas reglas. Este instrumento obviamente no puede responder ante la prolongada sequía que nos afecta, y más aún si ella permite a la autoridad ser más flexible en cuestiones ambientales como otorgar derechos temporales, sin respetar el caudal mínimo ecológico (Boettinger, 2019).

En materia de protección al agua y los ecosistemas asociados, el Código de Aguas —y su normativa complementaria— está centrado básicamente en el aprovechamiento productivo del agua y no en su resguardo en términos de cantidad y calidad. Considerando que se trata de un elemento natural, se estima imprescindible que su regulación básica considere también su protección. La autoridad de aguas solo está dotada de facultades ambientales «generales» (Boettinger, 2014) y, como afirma Costa (2016: 347), el hecho de que solo pueda utilizar herramientas más bien «laterales» de protección, ha derivado en que esta obligación estatal se encuentre «a la deriva» hasta ahora. Todas estas facultades de la autoridad deberán revisarse. Y como se verá, las organizaciones de usuarios de aguas no cuentan con obligaciones ambientales al hacer la gestión en los territorios. Se ha propuesto por ello «ambientalizar» el derecho de aguas actual incluyendo en especial mayores atribuciones de la DGA respecto de la calidad de las aguas —ya que no basta con la reforma de enero de 2018— y la protección de los caudales ecológicos, además de que la gestión se haga respetando el ciclo hidrológico (Delgado, 2019).[6] Incluso se ha propuesto desde la década de los ochenta, ante la crisis hídrica, reconocer personalidad jurídica a ríos, lagos, bosques y montañas, como ocurre ya en las leyes de varios países.[7]

Lo anterior, sumado a la gran cantidad de conflictos socioambientales existentes y los eventos extremos que nos han afectado, hacen necesario adoptar con urgencia las siguientes medidas que acá se sugieren:

1. El derecho y la gestión de las aguas debe hacerse resiliente (adaptarse al cambio climático). Para ello, se sugiere: i) revisar la metodología vigente para otorgar derechos de uso de agua, que incluya el concepto de un clima e hidrología cambiantes; ii) dotar a la autoridad la posibilidad de revisar las condiciones originales en que se otorgaron los derechos en el pasado; iii) mayores atribuciones ante sequías permanentes y otros eventos extremos como inundaciones y deslizamientos. Se debe hacer un estudio que revise la efectividad de las actuales competencias.
2. Avanzar en la protección ambiental de las aguas, sobre todo de las aguas subterráneas —pues en ellas existe hoy una gran presión dada la sequía— y otros ecosistemas que son vulnerables al cambio climático y que, a su vez, contribuyen muchas veces a nuestra adaptación y captura de carbono, como glaciares, vertientes, humedales, turberas y otros. Se deben establecer prohibiciones de ciertas actividades y radios de protección, al menos. Para ello será imprescindible dotar a la autoridad del agua en Chile y a las organizaciones de usuarios de aguas de atribuciones ambientales, incluyendo mayores atribuciones de la DGA respecto de la calidad de las aguas, la protección de los caudales ecológicos —imponiéndolo a todos los derechos de agua otorgados, con los ajustes necesarios— y que la gestión se haga respetando el ciclo hidrológico.
3. Hacer estudios que sirvan de evidencia acerca de la efectividad real de las medidas que el derecho de aguas en Chile considera en la actualidad para hacer frente a los efectos del cambio climático en relación con el agua y eventos extremos (sequía e inundaciones y crecidas), y las reformas

6 Se ha explicado que si bien el Código, por ejemplo, reconoce el principio de la unidad de la corriente, en realidad existen ríos de una misma cuenca que se administran de manera seccionada. Y cuando se tramita un derecho o su traslado, tampoco se respeta este principio, pues en la práctica no se analiza la disponibilidad considerando la relación entre las aguas superficiales y subterráneas. Tampoco cuando se permiten trasvasijes de cuencas, ni menos aún se considera la relación con el agua de mar, donde las continentales generalmente desembocan. En otras latitudes la gestión integrada de los recursos hídricos incluye de manera expesa la zona marina costera (Delgado, 2019).

7 Douglas Heaven, «Giving Nature».

(legales o de gestión) que se hagan necesarias efectuar, considerando la experiencia comparada. Este estudio debe además considerar que la autoridad pueda revisar los derechos de aprovechamiento ya otorgados, para poder imponer limitaciones —especialmente cuantitativas— en su constitución y otorgamiento.

2.2 CAMBIOS AL RÉGIMEN LEGAL DE ACCESO AL AGUA, USOS PRIORITARIOS Y MEDIO AMBIENTE

En Chile, las opiniones están bastante polarizadas en torno al régimen existente de propiedad y mercado de las aguas.[8] Sin embargo, a nuestro juicio, la futura nueva constitución debe abordar tres aspectos fundamentales mínimos relacionados con la gobernanza del agua: i) que sobre el agua existan derechos de aprovechamiento o concesiones, pero que no estén amparadas por un derecho de propiedad privada —como ocurre con otras concesiones en Chile—, que no sean perpetuos —como ocurre con otras concesiones en Chile— y que el Estado pueda caducar estos derechos —como ocurre con otras concesiones en Chile, por mal uso o plazo del tiempo— o imponerle condiciones —como el respeto al caudal mínimo ecológico—, incluso si ya han sido otorgados, pues lo fue en otras condiciones; ii) que se consagre y «garantice» por el Estado, como derecho prioritario, el derecho humano al agua para consumo humano y saneamiento; y iii) que la constitución avance hacia una protección efectiva del derecho de toda persona a un ambiente sano y equilibrado —sin limitarse solo a vivir en un medio ambiente no contaminado— y a consagrar el principio de desarrollo sustentable.

2.3 GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS Y PARTICIPACIÓN

Tanto en el informe sobre gestión del agua en Chile (Banco Mundial, 2013) y sobre su desempeño ambiental (CEPAL y OCDE, 2016) se concluye que la gobernanza debe mejorar implementando en el país la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), entendida como «proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales».[9] Para ello, según CEPAL y OCDE (2016), es necesario implementar varias reformas normativas e institucionales[10] y otras mejoras en la gestión. También es preocupante que no exista en el derecho chileno actual instrumentos que permitan integrar esta planificación hídrica a la territorial, para evaluar los efectos que causan los usos de suelo que se dan en la cuenca en la cantidad y calidad del agua (Delgado, Arumi y Reicher, 2017). Es decir, en una cuenca la gestión del suelo está separada de la gestión del agua.

Para avanzar en una gestión más moderna, será necesario —como mínimo— reformar y modernizar la actual gobernabilidad local del agua (Banco Mundial, 2013; Retamal *et al.*, 2012), en que el Estado tiene poca injerencia, pues está radicada en un sistema de autogestión privada de las organizaciones de usuarios del agua, que no considera instancias participativas de los «grupos interesados» más allá de quienes detentan derechos de aprovechamiento de agua al interior de una cuenca o una sección de río. Además, las organizaciones de usuarios del agua no tienen deberes y competencias ambientales, ni tampoco deben incorporar a los habitantes de la cuenca en las decisiones que se toman respecto del uso del agua y los efectos sobre la cuenca. Muchas organizaciones no están constituidas formalmente —sobre todo las comunidades de aguas subterráneas—, no existen mecanismos que incentiven su constitución y tampoco existen otros medios de financiamiento que no sea el aporte de los privados que la integran.

En la mayoría de las cuencas y subcuencas no se han formado juntas de vigilancia. Donde existen, a veces administran los ríos por secciones y a menudo no representan al conjunto de los usuarios o hay poca participación en su toma de decisiones (Banco Mundial, 2013: 12). De hecho, esta falta de participación introduce importantes impedimentos a la hora de pensar en que las juntas de vigilancia pudiesen hacer aportes en tareas relacionadas con la planificación u otras tareas con enfoque de cuenca (por ejemplo, criterios

8 Para revisar discusión, véase Vergara Blanco (2014), y en contra, apoyando la reforma legal hacia recuperar el agua como «bien común», Atria y Salgado (2015) y Celume (2013).

9 «Gestión Integrada de Recursos Hídricos», Naciones Unidas, https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml.

10 CEPAL y OCDE (2016) recomiendan «reiniciar las reformas institucionales y normativas, con el propósito de adoptar un sistema de gestión integrada de las cuencas hidrográficas que permita unificar la planificación y reglamentación relativas a la cantidad y la calidad del agua».

ambientales de conservación y preservación del recurso, incluyendo la garantía de caudales ecológicos, de regularidad en el monitoreo de niveles de disponibilidad de aguas subterráneas o de prevención y control de la contaminación de las aguas) (Banco Mundial, 2013: párr. 226). El único acercamiento a este enfoque lo constituye el hecho de que algunas juntas tienen toda una cuenca bajo su jurisdicción. Generalmente estas organizaciones solo actúan en secciones de un cauce (Salazar, 2003). Además, las juntas por lo general no representan a todos los usuarios, en particular en cuencas donde hay no solo usos consuntivos, sino también no consuntivos (Banco Mundial, 2013: párr. 226). A partir del año 2006, varias juntas de vigilancia han cambiado sus estatutos para incorporar a las empresas sanitarias y a las hidroeléctricas, estas últimas con derechos no consuntivos. La junta de vigilancia que inició este proceso fue la Junta de Vigilancia de la Primera Sección del Río Cachapoal; luego otras juntas de vigilancia han modificado sus estatutos, y hoy se considera la incorporación de diferentes usuarios desde el inicio del proceso de constitución de una junta, como lo es el caso de las juntas de vigilancia de los ríos Itata y Biobío, que se están constituyendo en la actualidad. Otro caso importante es la incorporación a la junta de vigilancia de usuarios que pertenecen a los pueblos originarios y que poseen derechos de aprovechamiento de agua ancestrales, como es el caso de la junta de vigilancia del río Lluta y sus tributarios. Por ello, se sugiere que antes de confiar la gestión integrada de recursos hídricos a las organizaciones de usuario del agua, debe mejorar la representatividad de las juntas de vigilancia en especial, y constituir un mayor número de comunidades de aguas subterráneas.

En suma, se sugiere avanzar hacia la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca en que se respete el valor ambiental, social y productivo del agua, que debe hacer el Estado y todos los usuarios —no como hoy, que existe autogestión privada—, incentivando la constitución de organizaciones de usuarios —sobre todo en aguas subterráneas— y aumentando la representatividad a todos los interesados en la cuenca, no solo a los titulares de derechos de agua.

Para avanzar en la GIRH, el Banco Mundial (2013) propuso tres alternativas: i) mejorar las mesas del agua; ii) mejorar las juntas de vigilancia, o iii) crear consejos o comités de cuenca, como existe en otros países. Sin embargo, hizo presente que la modernización y reforma de la gobernabilidad local del agua requiere un análisis de mayor profundidad sobre las estructuras, roles y mecanismos de actuación de las organizaciones de usuarios de agua en Chile. En cualquiera de los tres casos, se debe considerar aumentar la representatividad de todos los interesados y los grupos vulnerables. Además, y este es un punto relevante, se deberá considerar el financiamiento para que estos organismos funcionen de manera adecuada. El Banco Mundial propone que el Estado contribuya en los primeros años, hasta que alcancen un nivel de recursos propios provenientes de los usuarios, suficiente para ejercer todas sus funciones —lo cual supone además fortalecer sus mecanismos de financiamiento—. Este aporte estatal debiese ser por fondos iguales a los que aporten los miembros de la institución y se podría analizar como un mecanismo de financiamiento el uso de la ley de fomento de riego 18.450, a través del sistema de concurso.

Por lo anterior, y para lograr implementar la GIRH, se recomienda organizar cuanto antes un estudio sobre las estructuras, roles y mecanismos de actuación de las organizaciones de usuarios de agua en Chile, pero que incluya en todas las alternativas y propuestas, un diseño que involucre que: i) estas organizaciones tengan obligaciones en torno al cuidado ambiental del agua en términos de cantidad y calidad en la cuenca;[11] y ii) que se asegure la representación de todos los interesados, en especial los grupos vulnerables.[12] Para ello será fundamental analizar la experiencia comparada.

Por otra parte, se ha advertido que frente al escenario de sequía y escasez hídrica que enfrentamos, es necesaria una mejor coordinación y regulación de actividades de uso del suelo y del agua, además de protección de la cantidad y la calidad del agua, con medidas activas para coordinar el desarrollo de las cuencas, junto con consensuar y desalentar acciones que pueden acelerar el deterioro del balance hídrico (Banco Mundial,

11 «Especialmente (no exclusivamente) se requiere imponerles deberes en cuanto al control y vigilancia de aspectos ambientales asociados a la contaminación de las aguas en los sistemas de conducción [...] diversos informes muestran que frecuentemente la contaminación de las aguas se produce al interior de los sistemas de distribución de las aguas, en particular en los canales de riego. En el ordenamiento legal vigente, dicha función la cumplen en forma exclusiva los organismos públicos, aunque resulta evidente que las organizaciones de usuarios de agua están en las mejores condiciones para controlar la contaminación al interior de los sistemas de conducción, ya que conocen en detalle las condiciones de terreno y deben vigilar permanentemente las obras. Por esta razón, resulta aconsejable revisar el papel de las organizaciones de usuarios de agua en esta materia» (Banco Mundial, 2013).

12 Revisada la normativa nacional, el Informe concluye que la DGA no cuenta con atribuciones para asegurar que no haya impactos negativos sobre el medio ambiente y grupos vulnerables en la asignación y reasignación de derechos de aguas. Por un lado, solo en el marco de proyectos sometidos al SEIA hay una instancia de participación ciudadana; por el otro, se evalúan los impactos ambientales de la utilización de estos derechos de agua (no de su asignación) (Banco Mundial, 2013).

2013). Para el caso de que no se logre reformar el derecho actual e incorporar la gestión integrada de recursos hídricos, que es el mecanismo que por excelencia permite considerar la variable uso de suelo en la gestión del agua, es importante —al menos— avanzar hacia hacer obligatorio que la planificación del uso urbano (planes reguladores intercomunales, comunales y seccionales) y el ordenamiento territorial (con los recién creados Planes Regionales de Ordenamiento territorial) integren la variable hídrica. Solo ello hará posible modelar distintos escenarios que permitan proyectar la disponibilidad y calidad del agua, con especial énfasis en las masas de agua y ecosistemas que son vulnerables al cambio climático —lo que nos ayudará a adaptarnos a sequías e inundaciones— y los que son valiosos en captura de carbono. Independiente de las mejoras legales que podrían efectuarse, sería importante que, desde el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, gobiernos regionales y a nivel municipal, se mandate que en la elaboración de estos instrumentos consideren la variable hídrica como pilar fundamental.

Por último, se debe mejorar la gestión de cauces y el control de las crecidas y de las inundaciones urbanas. Un manejo más eficiente de los cauces naturales requiere ir más allá de la construcción de infraestructura de defensa, desarrollando Planes Maestros de Cauces Naturales que atiendan la sostenibilidad de los ecosistemas fluviales complejos sometidos a crecientes presiones por la actividad humana. Para ello, los Planes Maestros de Aguas Lluvias deben incluir nuevas tecnologías de conservación de los cauces, lo que incluye acciones no estructurales que den respuesta a la dinámica urbana y avanzar en soluciones basadas en la naturaleza, como la protección de humedales, turberas y otros.

2.4 AUTORIDAD DE JERARQUÍA SUPERIOR

La Estrategia Nacional para los Recursos Hídricos de 2013 incluyó el fortalecimiento de la institucionalidad actual como medida prioritaria para el mejoramiento de la gestión de las aguas de Chile. Por ellos, se le encargó al Banco Mundial un nuevo estudio sobre las opciones para el mejoramiento del marco institucional para gestión del agua en Chile. El estudio identificó 102 funciones que se consideran necesarias para la gestión del agua en Chile. Ellas están distribuidas entre 43 actores institucionales, que incluye organismos de Gobierno, organizaciones de usuarios de agua y organismos autónomos. La complejidad de este marco institucional produce: duplicidades en la ejecución de funciones, vacíos por omisión y problemas de coordinación entre los diferentes organismos. En consecuencia, uno de los desafíos institucionales más urgentes es contar con una *autoridad política superior* que coordine las funciones e instituciones del Estado en relación con el agua (Banco Mundial, 2013; Vergara Blanco, 2014). Además, como se explicó, la gobernanza actual implica que las principales decisiones se dejan a un sistema de autogestión privada, en que el Estado casi no tiene injerencia una vez que entrega los derechos de agua. Se reconoce que la última reforma de enero de 2018 aumentó las facultades de la DGA en materia de fiscalización y sanciones, pero en la práctica esos avances no han sido todavía evaluados. Se trata no solo de la presencia del Estado a la hora de fiscalizar, sino justamente de planificar y tener injerencia en la gestión misma, para hacer que todos los usos o funciones del agua sean respetados. En Chile no existe un elenco de usos que será prioritario satisfacer en caso de que ella no esté en una disponibilidad que alcance para toda la demanda (Sandoval, 2015).

Se concluye que los principales problemas institucionales en Chile se vinculan a la baja jerarquía y capacidad de la autoridad del agua para: i) planificar,[13] ii) coordinar intervenciones de los distintos actores involucrados, iii) al bajo nivel de financiamiento para el ejercicio de las funciones estudiadas, iv) a la generación de información, v) a la definición de políticas y objetivos sectoriales y, vi) a la falta de coordinación institucional (Banco Mundial, 2013).

13 Dentro de las 102 funciones que se consideran necesarias para la gestión del agua en Chile, distribuidas entre 43 actores institucionales, existen i) duplicidades en la ejecución de funciones, ii) vacíos por omisión y iii) problemas de coordinación entre los diferentes organismos. Por vacío se entiende un caso extremo de concurrencia de instituciones en forma deficiente en que hay tareas que no se hacen por falencias, ya sean de políticas, financiamiento, coordinación o reglamentación (Banco Mundial, 2013: 36). De estos vacíos, el primero es que en Chile no existe «planificación del recurso hídrico a nivel de las cuencas, que permita generar una visión integrada, coherente y sustentable de mediano y largo plazo para su desarrollo. A partir de dicha visión correspondería armonizar la actuación regulatoria, de promoción e inversión del Estado» (Banco Mundial, 2013). El Gobierno acaba de anunciar que se elaborarán, durante los próximos diez años, 101 planes estratégicos de cuenca, pero ellos no corresponden a GIRH.

A nivel nacional el informe evaluó la creación de nuevas instituciones. Las posibilidades analizadas fueron tres: un ministerio, una Agencia Nacional del Agua o una Subsecretaria de Recursos Hídricos. El Banco Mundial propuso finalmente el crear de inmediato una Subsecretaría del Agua dentro de un nuevo Ministerio de Obras Públicas y Recursos Hídricos, y avanzar a 2019 hacia una Agencia del Agua.

Bajo la dependencia de la Subsecretaría de Recursos Hídricos quedarían los siguientes organismos:

- La Dirección General de Aguas, reforzada y con nuevas funciones, con pleno liderazgo en el control de la calidad del agua y el medio ambiente relacionado.
- La Dirección de Obras Hidráulicas, reforzada, aunque se necesita un nuevo estudio más en detalle.
- El Instituto Nacional de Hidráulica.
- Un nuevo Servicio Hidrológico y Meteorológico Nacional, que incorporaría la Dirección Meteorológica de Chile.
- Un nuevo Servicio del Dominio Público Hidráulico y Seguridad de Presas.
- La Superintendencia de Servicios Sanitarios, organismo existente que se relaciona con la Presidencia de la República a través del ministerio en el que se inserte el cuerpo principal de la institucionalidad hídrica.

Por lo anterior, se propone:

1. Crear una Comisión Nacional, altamente representativa de las instituciones y sectores públicos y privados interesados en el agua, la ciencia y sociedad civil, que analice este informe y proponga la mejor opción (entre ministerio, agencia y subsecretaría) considerando los compromisos internacionales de Chile en materia de Objetivos de Desarrollo Sustentable y cambio climático; y en especial cómo se coordinaría con la también nueva institucionalidad de cambio climático.
2. Que para la tercera alternativa (subsecretaría) se haga en paralelo un estudio que asegure incluir en ella la variable sustentabilidad y cambio climático, pero solo en dos de las cuatro alternativas propuestas por el Banco Mundial: que ella esté radicada en un nuevo Ministerio de Obras Públicas y Recursos Hídricos, o bien el Ministerio del Medio Ambiente. De hecho, el mismo Banco Mundial sugiere este último estudio, pues plantea que la juventud, altas tareas y visión proteccionista de este último ministerio debe analizarse en mayor detalle. Esta mesa Agua sugiere descartar las otras dos alternativas analizadas en el informe: que la subsecretaría pertenezca al Ministerio de Agricultura, por no ser los agricultores los únicos usuarios; o el de Economía, pues la visión predominante no puede ser considerar el agua solo como un bien económico, sino también social y ambiental, considerando los pilares de la GIRH.

2.5 DISMINUCIÓN DE LAS BRECHAS EN INFORMACIÓN Y FORTALECIMIENTO DE LA INTERFAZ CIENCIA-POLÍTICA

Uno de los problemas más graves de la planificación y gestión hídrica en Chile es la falta de información acerca de los consumos y extracciones de agua en las cuencas, y en general sobre la cantidad de agua que en la actualidad tenemos en Chile, lo que es especialmente grave en un contexto de cambio climático.

Ya se ha advertido que, en cuanto a la obtención y difusión de información hidrológica y meteorológica —para lo cual participan múltiples instituciones, como DOH, DGA, DMC, SISS, Ministerio de Energía y el Serviu—, el problema es que se generan distintas informaciones con poco nivel de intercambio o coordinación, lo que lleva a incertidumbre sobre la confiabilidad de la información y falta de datos claves para la gestión.

La frecuencia e intensidad de eventos hidroclimáticos extremos es un tema de creciente preocupación en Chile. Existe un déficit en la disposición de mecanismos efectivos para atenuar los impactos del cambio climático e ir adaptando en forma gradual los sistemas productivos a los efectos de un clima más extremo y con menos recursos hídricos disponibles en nieves, glaciares, embalses y acuíferos para afrontar eventos prolongados de escasez. Si bien el desarrollo de nuevas infraestructuras es necesario, la experiencia internacional indica que la mejora en la gestión del agua mediante un aumento de la capacidad de las instituciones para predecir el clima y monitorear la evolución del balance hídrico es esencial para reducir los efectos del cambio climático en el sector hídrico (Banco Mundial, 2013).

Por ello, y con énfasis en los eventos extremos, se ha propuesto avanzar de manera urgente en la operación del sistema de información, comunicación, ciencia y tecnología del agua, que incluya la elaboración y actualización permanente del balance hídrico nacional; el monitoreo, análisis y difusión de la información

de calidad del agua a nivel nacional; y, a nivel de los derechos de aprovechamiento de agua, la generación, recolección, análisis y diseminación de la información sobre disponibilidad del recurso hídrico y su asignación (Banco Mundial, 2013).

Esta mesa Agua, coincidiendo y como complemento a las propuestas del párrafo anterior, recomienda también:

1. Que se trabaje, de manera urgente, en un protocolo de colaboración y coordinación en información hidrológica y meteorológica, con énfasis en las variables meteorológicas de altura.
2. Que la plataforma para difundir la información sobre cantidad y calidad de agua, junto con la de los derechos de agua, usen tecnología avanzada y segura, similar a la plataforma, por ejemplo, del Servicio de Impuestos Internos.
3. Que en calidad del agua y niveles de aguas subterráneas se integre la información contenida en los reportes que los titulares de proyectos reportan a la Superintendencia del Medio Ambiente. Así, se logrará fortalecer el monitoreo de calidad, control de contaminación y estado de las fuentes, a través de la cooperación y coordinación entre la Subsecretaría y la DGA, definiendo sus roles e instancias de colaboración.[14]
4. Que, en cuanto a los derechos de agua, se ponga un plazo acotado a la regularización de derechos y se actualice el Catastro Público de Aguas para tener certeza de cuánta es el agua otorgada formalmente en Chile (Banco Mundial, 2013).
5. Que en cuanto a extracciones y consumos de agua se implemente una plataforma de control de extracciones efectivas.

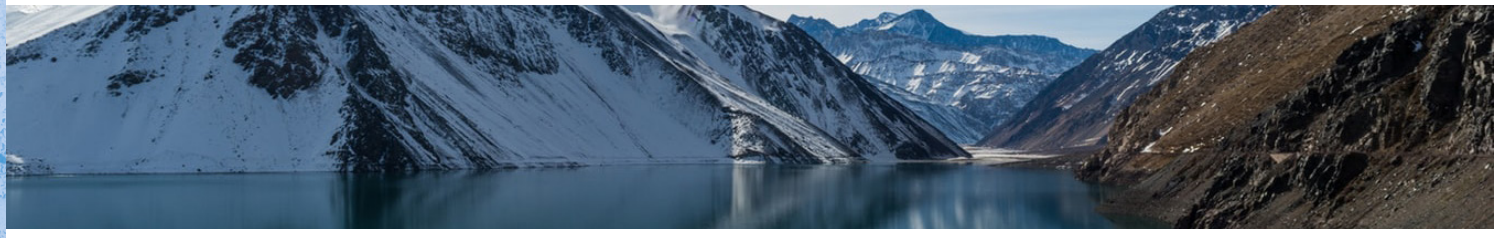
Por último, en relación con la interfaz ciencia-política, la mesa del Agua sugiere que la autoridad escuche a un consejo o comité asesor científico antes de tomar decisiones en todo lo relacionado con la planificación y gestión sustentable del agua en un contexto de cambio climático, como ocurre por ejemplo —con matices muy importantes— en la ley eléctrica, de pesca, etcétera. Es importante considerar un diseño que sea representativo de distintas disciplinas, incluyendo variabilidad climática y de la visión de regiones. Dicho consejo deberá entregar su recomendación a las decisiones que tengan impacto sobre la sustentabilidad de los recursos hídricos.

2.6 DIVULGACIÓN, COMUNICACIÓN, EDUCACIÓN, PROMOCIÓN Y DIFUSIÓN

Se ha advertido que la actual legislación de las más de 40 instituciones con competencias en materia de recursos hídricos —a excepción del Ministerio del Medio Ambiente— no contempla de manera adecuada la función de divulgación, educación, promoción y difusión de conocimientos sobre el agua en la ciudadanía y tampoco existen mecanismos establecidos para su financiamiento o un presupuesto específico para este tema (Banco Mundial, 2013).

Por ello, la mesa del Agua sugiere que esta función sea ejercida por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, con la debida coordinación entre, al menos, la autoridad del agua, el Ministerio de Educación, el Ministerio del Medio Ambiente y la institucionalidad que se cree en materia de cambio climático. La educación en materia de recursos hídricos debiese estar dirigida no solo a unidades educacionales, si no también al sector privado y público, tomadores de decisiones y la sociedad civil. Por lo tanto, se debiesen definir estrategias, programas, productos y metodologías diferenciadas para cada público objetivo.

14 Sitio web de Escenarios Hídricos 2030.



3. Infraestructura

Chile es un país con alta vulnerabilidad al cambio climático. Se estima que ha habido cerca de 30% de déficit en las precipitaciones en el centro-sur de Chile durante la última década, lo cual también ha afectado la cantidad de nieve caída y su tasa de derretimiento. Esto ha tenido como consecuencia una reducción de caudales, sobre todo durante el verano (Garreaud *et al.*, 2017; Rivera *et al.*, 2017; Stehr y Aguayo, 2017), lo que lleva a un problema de escasez hídrica.[15]

Este problema se agudizará, según diversos diagnósticos e informes nacionales e internacionales (Banco Mundial, 2011, 2013; CEPAL y OCDE, 2016; CR2, 2015; Fundación Amulén, 2019; Fundación Chile, 2018; Fundación Newenko, 2019)[16] por los problemas existentes en torno a, entre otros, la gobernanza y gestión del agua (Barría *et al.*, 2019); de contaminación; falta de información hidrométrica y de valoración de servicios ecosistémicos; desprotección jurídica de glaciares, humedales, y otros ecosistemas claves para el ciclo natural del agua y por ende para su administración.

En la actualidad, Chile enfrenta un déficit de precipitaciones en gran parte del país, con zonas que disponen de 80% menos de agua caída en comparación con los registros históricos para el período 1981-2010.[17] Lo anterior ha hecho que el déficit hídrico[18] se incremente en la mayor parte del país (Garreaud *et al.*, 2017, Boisier et al., 2018).

Como medida de adaptación al problema de escasez hídrica, el Gobierno ha anunciado una serie de iniciativas, que incluyen —en el ámbito jurídico— la reforma al Código de Aguas para asegurar el consumo humano y a la vez, incentivar el acceso a nuevas fuentes de agua, como la reutilización de las aguas lluvias, la recarga artificial de acuíferos y la desalinización, entre otras. Además, se anuncia financiamiento e inversión pública y privada en riego eficiente y construcción de embalses. Específicamente, el 20 de junio de 2019 se lanzó el Plan de Embalses para beneficiar a 150.000 agricultores y comunas rurales, iniciativa que contempla la construcción de 26 embalses en 9 regiones con una inversión de US$ 6.084 millones. Estos proyectos se encuentran en distintas etapas de avances y muchos de ellos ya estaban en el Plan Nacional de Regulación de Agua. Específicamente en riego, se pretende duplicar de 1,2 millones a 2,4 millones las hectáreas regadas en nuestro país, contribuyendo a que Chile avance en su plan para convertirse en una potencia agroalimentaria. Con esto también se busca aumentar la seguridad de abastecimiento hídrico para consumo humano; utilizar los acuíferos naturales para inyectar agua en períodos de abundancia y proteger a las personas y a la infraestructura mediante un Plan Nacional de Protección contra aluviones y crecidas.

Ante lo mencionado, surge la necesidad de fijar lineamientos para definir las soluciones a implementar para afrontar la escasez hídrica. Dado lo anterior, el objetivo de este documento es aportar a esta discusión desde una mirada científica.

15 Se entiende la escasez hídrica como la brecha entre el suministro disponible y la demanda expresada de agua dulce en un área determinada, bajo las disposiciones institucionales —incluyendo la «fijación del precio» del recurso y los costes acordados para el consumidor— y las condiciones de infraestructura existentes. La escasez se pone de manifiesto por una demanda insatisfecha, tensiones entre usuarios, competencia por el agua, sobreexplotación de agua subterránea y flujos insuficientes al entorno natural (FAO, 2013).

16 Sitio web de Escenarios Hídricos 2030.

17 «Informe de precipitaciones», Dirección Meteorológica de Chile, http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/climatologia/inicio_climatologia/informe_precipitaciones.xhtml.

18 El *déficit hídrico* se presenta cuando la demanda de agua supera la oferta, sin estar necesariamente asociado a un daño actual. Sitio web de Escenarios Hídricos 2030.

3.1 LA CUENCA COMO UNIDAD DE PLANIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN A LA ESCASEZ HÍDRICA

La unidad natural de planificación territorial debiese ser la cuenca hidrográfica (CEPAL, 2002), entendida como una unidad territorial definida por el relieve y constituida por aspectos superficiales como cobertura y uso del suelo, además de la cuenca subterránea subyacente, drenada por un sistema de cauces superficiales de manera que toda la escorrentía que se genera se descarga a través de una salida única e identificable. Vannote *et al.* (1980) acuñan el concepto de *river continuum*, el cual indica que las variables físicas dentro de un sistema fluvial presentan un gradiente continuo desde cabeceras hasta la desembocadura, lo que produce una serie de respuestas en las poblaciones que resultan en un continuo de ajustes bióticos y patrones consistentes de carga, transporte, utilización y almacenamiento de materia orgánica a lo largo de un río. Esto se traduce en un alto nivel de heterogeneidad espacial y temporal, la que se manifiesta como vías interactivas a lo largo de cuatro dimensiones (Ward, 1989), las que debieran ser consideradas en la evaluación de todo proyecto:

1. La *dimensión longitudinal* integra enlaces aguas arriba con aguas abajo.
2. Los intercambios de materia y energía entre el cauce y el sistema ribereño o inundable se producen a lo largo de la *dimensión lateral*.
3. La *dimensión vertical* incorpora interacciones entre el cauce y las aguas subterráneas contiguas (zona hiporreica).
4. El *tiempo* superpone una jerarquía temporal a las tres dimensiones espaciales.

La fuerza de la interacción a lo largo de una sola dimensión puede variar en función de la posición a lo largo de las otras. Las dimensiones longitudinal y lateral tienen estrecha relación con la dinámica de los sedimentos en el lecho de los ríos, la continuidad desde su generación hasta la desembocadura y el aporte de sedimento a las zonas costeras, lo que se suma a los efectos en el borde costero generados por el cambio climático. No es posible concluir el análisis del funcionamiento de una cuenca sin mencionar el importante rol que cumplen las descargas de agua dulce desde los ríos en los ciclos biogeoquímicos, ecología y funcionamiento de los ecosistemas costeros. En palabras sencillas, los ríos aportan nutrientes a la zona costera y, por tanto, contribuyen a las áreas de alta productividad.

El estudio a nivel de la cuenca permite hacer balances restringidos a variables geográficas relativas a los servicios ecosistémicos de la cuenca, y favorece la gestión local, con lo cual fortalece la distribución sustentable del recurso. Además, permite generar estudios estadísticos para reducir la incertidumbre mediante indicadores de medición, reporte y verificación.

En Chile se han catastrado 1.251 ríos y 12.784 cuerpos de agua, entre lagos y lagunas, sumándose a ellos 24.114 glaciares (DGA, 2015). A partir de esta red hidrográfica, y sobre la base de la selección de puntos de confluencia de cauces principales y sus desembocaduras al mar, la DGA ha definido 101 cuencas, 467 subcuencas y 1.496 subsubcuencas. Cabe destacar que la definición de una cuenca depende de la selección de su punto de salida —que se hace a partir de criterios que dependen de cada aplicación— y, en estricto rigor, cada sección de río puede ser definido como el punto de salida de una cuenca.

Existe amplio consenso en que, para hacer frente a la crisis global del agua, se necesitan mecanismos de gestión capaces de reducir la creciente brecha entre oferta y demanda, los que a la vez consideren los tres objetivos principales de desarrollo sostenible: equidad social, eficiencia económica y sustentabilidad ambiental. De esta manera, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos se ha alzado como el paradigma internacional y ocupa un rol central en los enfoques promovidos por Naciones Unidas (O'Connell, 2017). Diversas organizaciones y encuentros internacionales coinciden y promueven la gestión integrada de cuencas como el enfoque para la gestión de los recursos hídricos (Conferencia de Dublín de 1992) (International River Foundation, 2017). En dicho enfoque, la cuenca hidrográfica corresponde a la unidad básica de planificación.

Es en esta línea que resulta esencial contar en Chile con una política de GIRH que contemple a la cuenca como unidad básica de planificación y en línea con el ODS 6.5.1, de gestión integrada de los recursos hídricos. Chile presenta un grado de avance bajo en el compromiso de avanzar en esta meta del ODS 6 (UN-Water, 2018).

3.2 RELEVANCIA DE LOS ECOSISTEMAS NATURALES EN LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA

Los ecosistemas naturales tienen un rol clave en el ciclo del agua, aunque esto no es necesariamente evidente en nuestra gestión del agua. En particular, los ecosistemas de bosques cumplen un rol principal para la producción y limpieza del agua en cada sector de una cuenca hidrográfica (Lara *et al.*, 2009). Sin embargo, estos

sistemas han sido degradados y reemplazados en parte importante del país —sobre todo en el valle central de Chile Central, pero también en la macrozonas norte y sur— (Lara *et al.*, 2012), lo que agudiza el problema de la escasez hídrica y supone costos elevados de infraestructura para aminorar —siempre de manera limitada— los servicios ecosistémicos perdidos.

En el caso de los humedales, muy conocida es su capacidad para depurar aguas, regular el movimiento de los sedimentos, e infiltrar las napas subterráneas (Barrera Brassesco, 2011). Por ejemplo, en la zona central de Chile, el humedal de Batuco, cuya extensión original era de 14.000 ha, hoy cuenta con menos de 900 ha (Barrera Brassesco, 2011).

La desprotección jurídica de los ecosistemas en Chile ha sido advertida desde hace años (OCDE, 2005, 2016), pero los avances son menores. Todavía está pendiente en el Congreso Nacional el proyecto de ley que creará el Servicio Nacional de Biodiversidad y Áreas Protegidas, junto con el de glaciares. Por otra parte, se acaba de aprobar el proyecto de ley que protegerá humedales, pero solo aquellos «urbanos», es decir, los ubicados en los límites urbanos de las comunas. Por último, la ley chilena no considera un sistema de pago por servicios ambientales que pudiera, por ejemplo, reconocer el servicio que los ecosistemas prestan para aumentar la cantidad y mejorar la calidad del agua.

La importancia del continuo río-mar

Existe un gran cuerpo de literatura que reconoce la importancia que tienen los flujos de materia orgánica, nutrientes y material particulado que son exportados por los ríos sobre la productividad biológica y los ciclos biogeoquímicos que ocurren en la zona costera (Masotti *et al.*, 2018; Vargas *et al.*, 2013).

Por ejemplo, durante la última megasequía del centro sur de Chile, el flujo de agua dulce al océano disminuyó en cerca de 50% en comparación con los valores históricos (Garreaud *et al.*, 2017), lo que implicó una reducción significativa en la biomasa fitoplanctónica del océano costero adyacente (Masotti *et al.*, 2018). Los ríos Maule, Rapel y Biobío en Chile exportan hasta 200 toneladas diarias de nitrógeno inorgánico, más de 4.000 toneladas diarias de silicio y miles de toneladas diarias de carbono orgánico e inorgánico (Pérez *et al.*, 2015). A modo de ejemplo, una reducción de aproximadamente 10 a 30 m^3/s en el flujo de agua dulce de los ríos, podría representar una reducción posterior de 30 a 120 toneladas de carbono y silicio por día al océano. Recordemos además que la zona centro sur de Chile será la más afectada en términos de déficit hídrico en el futuro cercano (Bozkurt *et al.*, 2018), con una disminución de la precipitación anual de hasta 25% hacia mediados del siglo.

En resumen, la descarga de agua dulce al mar es factor importante del sistema marino costero, no solo porque es parte del ciclo global del agua, sino porque cumple con el rol de mantención de la producción biológica y por ende de recursos biológicos en la zona costera. También mantiene la estructura hidrológica de nuestros estuarios y fiordos, lo que establece una circulación propia de estos sistemas, con agua salobre en superficie y agua marina en profundidad, lo cual crea una estratificación necesaria para el funcionamiento normal de estos ecosistemas (Masotti *et al.*, 2018).

Podemos concluir que toda intervención que se ejecute en la cuenca afectará el funcionamiento de la cuenca y su zona costera adyacente. Dada la diversidad geográfica y climática de Chile, no hay una única solución para todo el país, lo que hace importante evaluar distintas alternativas o una combinación de soluciones, considerando que los efectos socioambientales son específicos de cada sitio.

3.3 DISTINTAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

No puede lograrse la sustentabilidad ambiental respecto de la instalación de soluciones para hacer frente a la escasez hídrica sin tener un entendimiento adecuado de la estructura y funcionamiento de los corredores fluviales (aluviales), ecosistemas con una altísima complejidad biofísica. El contexto es fundamental. Los caudales líquidos y sólidos en un tramo quedan impuestos por su cuenca de drenaje. En un tramo de río aluvial, estos interactúan con los materiales del lecho y las riberas, y con la vegetación ribereña presente, creando así las formas fluviales y de la planicie. De este modo, un río aluvial alcanza un régimen o equilibrio dinámico: al ocurrir erosión y sedimentación, las formas fluviales cambian continuamente, pero todo se sigue viendo igual. Debido a lo anterior, la «forma de cambiar» de un río cambiará si se alteran los regímenes de caudal y sedimento, que es exactamente lo que causan las represas y otras obras fluviales. Es por ello que para decidir las soluciones a implementar hay que considerar diversas variables y condicionantes, como que el volumen a almacenar sea tal que el caudal promedio estacional del río y el flujo de sedimentos se mantenga estable.

En términos del manejo de la brecha entre suministro y demanda de agua, un enfoque sostenible debiera enfocarse en la reducción de la demanda, principalmente, mediante un aumento en la eficiencia y en la distribución del recurso (Gleick, 2000). Un enfoque basado en el incremento de los recursos disponibles para uso (*supply side approach*), inevitablemente conlleva a los sistemas hídricos a un incremento en el estrés y la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática, el cambio climático antropogénico y cambios socioeconómicos (O'Connell, 2017).

El análisis del grupo de Recursos Hídricos 2030 del Banco Mundial (Water Resources Group, 2009) ha reportado que soluciones integradas que incluyen inversiones en suministro, pero sobre todo en tecnologías para mejorar la eficiencia en el uso del recurso, pueden cerrar la brecha mundial al 2030 con un cuarto de la inversión necesaria para conseguir el mismo efecto solo con medidas enfocadas en aumentar el suministro.

Optimizar el uso del recurso hídrico

No solo debe hacerse el análisis considerando la eficiencia en el riego, sino que se debe incluir eficiencia y uso óptimo en todas las actividades de la cuenca relacionadas con agua.

En general, la superficie regada en Chile se ha mantenido bastante estable desde que existen registros (1957), a pesar de que se han construido grandes proyectos de riego que se suponían aumentaban la superficie en miles de hectáreas. Se supone que ha existido una sustitución de terreno agrícola por urbano, mientras que la superficie regada por sistemas presurizados pasó desde 9% en 1997 a 35% el 2007 (Novoa *et al.*, 2016).

Esto tiene dos lecturas: un aumento de la eficiencia manteniendo una superficie más o menos constante trae una disminución de la demanda, que es dedicada a otros usos, o en realidad compensa la disminución de la oferta, lo que explica por qué la agricultura no ha sufrido tanto con la megasequía (Novoa *et al.*, 2019). Valga además señalar que los indicadores de productividad de biomasa en los últimos 30 años han aumentado. Es decir, se produce más biomasa por unidad de área, pero no existe claridad en una disminución en el uso de los recursos (la llamada intensificación sustentable) (Novoa *et al.*, 2019).

Por otra parte, un aumento de la eficiencia trae una disminución de las pérdidas y, por ende, una disminución de la recarga de aguas subterráneas (Arumi *et al.*, 2013). Como consecuencia, los acuíferos se ven complicados porque tienen menos recarga natural producto de la disminución de las lluvias, menos recarga por pérdidas de riego y más extracciones por el aumento de la construcción de pozos. Lo anterior es conocido como la «paradoja de la eficiencia de riego», en cuanto los aumentos de eficiencia predial no llevan a aumentos de eficiencia a nivel de cuenca. Lo anterior considera dos aspectos que se deben mejorar en el diseño de políticas públicas: lo primero es la necesidad de un análisis integrado de todos los usos dentro de la cuenca; lo segundo es desacoplar los conceptos de presurización y tecnificación.

El problema destacado por la paradoja de la eficiencia del riego (Grafton *et al.*, 2018) guarda relación con la manera en que se utiliza el agua excedente por concepto de eficiencia y cómo el mal uso de esa eficiencia puede incluso aumentar la demanda de agua. Los autores plantean que en general dicho excedente es usado por los irrigadores en cultivos con mayor consumo de agua, o que el excedente se traduce en un aumento de la superficie irrigada. Este fenómeno ha sido estudiado en Chile en la cuenca del río Limarí (Scott *et al.*, 2014; Vicuña *et al.*, 2014). El problema no es la eficiencia en el riego en sí, sino la manera en que el excedente se puede efectivamente traspasar a otro uso (recarga gestionada de acuíferos, por ejemplo). Este problema de comportamiento podría tratarse con políticas públicas que apunten a la transparencia sobre el uso del recurso; se debería avanzar en la disponibilidad de información sobre quién usa el recurso y cómo (cuánta agua recibe y cuánta devuelve cada irrigador). Avanzar en ese tipo de políticas públicas facilitaría la implementación de Sistemas de Control en Tiempo Real y de Sistemas de Soporte de Decisiones, que ayudarían a alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y, en específico, a la eficiencia en el uso del recurso.

Hay que mencionar algunas ideas, como que el agua «eficientemente utilizada» en riego no drena hacia el suelo, por lo que este tipo de sistemas pueden ser una solución *aparente* si es que se utiliza el suelo solo como sustrato que se mantiene seco para soportar algún vegetal bien regado. Puede verse muy verde en la superficie, pero estar seco a pocos centímetros.

También hay que tener en cuenta la disponibilidad hídrica del territorio, o podrían replicarse casos como los de Petorca con el cultivo de paltas, sistemas muy eficientes en el riego, pero con grandes costos socioambientales.

La eficiencia en el uso del agua para el riego de los cultivos debe estar asociada a prácticas de manejo que permitan reducir la demanda atmosférica y, con ello, la presión sobre la oferta de agua de recursos superficiales o subterráneos, lo cual es válido en especial en cuencas desbalanceadas entre la oferta y demanda.

Soluciones basadas en la naturaleza y otras innovaciones

El éxito de la planificación de la infraestructura para enfrentar la escasez hídrica debe considerar que los ecosistemas naturales son claves en la provisión de agua tanto en cantidad como en calidad. Por ejemplo, estudios de hidrología y biogeoquímica desarrollados en el sur de Chile muestran cómo los bosques nativos (Lara *et al.*, 2009) regulan tanto la cantidad como la calidad del agua, destacando su rol clave en el contexto de cambio climático (Oyarzún, Godoy y Verhoest, 2008).

La conservación y restauración de bosque nativo asociado a la cuenca es crucial también para este fin, dado que no solo ayuda en la modulación del régimen de agua, sino del clima a nivel regional.

La restauración de bosque nativo ribereño y la protección y recuperación de humedales puede también ir asociada a prácticas de siembra y cosecha de agua como amunas y mamanteo, esto es, infiltración de acuíferos en la cuenca alta durante temporada de lluvias para su aprovechamiento en la cuenca baja durante estiaje. Estas prácticas podrían aumentar considerablemente el caudal de los ríos en temporada seca (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2019).

También la vegetación nativa regula crecidas, mejora la infiltración, retiene sedimentos, protege del efecto de la gota de agua, regula caudales, mejora la humedad a nivel de suelo, retiene nitrógeno y mejora la rizosfera (actividad microbiana del suelo), por mencionar algunos de los servicios ecosistémicos de los bosques sudamericanos (Izko y Burneo, 2003).

Con respecto a los servicios relacionados con los humedales como provisión de agua en cantidad y calidad, es ampliamente reconocido que los humedales aportan el 40% de todos los servicios ecosistémicos identificados, lo que incluye mejoramiento de la calidad del agua, regulación de inundaciones, absorción de carbono y mantención de la biodiversidad (Zedler y Kercher, 2005). Investigaciones en humedales chilenos han determinado que estos proveen servicios ecosistémicos como provisión de turismo (Nahuelhual *et al.*, 2015) y protección contra catástrofes (Barbosa y Villagra, 2015), entre otros. Es evidente que los humedales provisionan servicios claves para la productividad de Chile, por ejemplo, los humedales altoandinos han provisionado históricamente el agua para el desarrollo de la minería del cobre en la zona norte, lo que genera competencia por los recursos hídricos con comunidades locales (Romero, Méndez y Smith, 2012).

Procesos de retención de agua naturales asociados a humedales en altura o a lo largo de la cuenca pueden retener y modular el régimen de caudal y sedimentos de mejor manera que un embalse (Arriagada *et al.*, 2019), por lo que es necesario conservar y restaurar los que en la actualidad se encuentran degradados.

Cabe destacar que soluciones basadas en la naturaleza, como los humedales construidos, pueden ser opciones innovadoras para manejar la contaminación proveniente de efluentes domésticos en áreas urbanas y periurbanas (Mancilla Villalobos *et al.*, 2013).

Embalses fuera del río o piscinas de acumulación

Se propone diseñar embalses paralelos al cauce del río que acumulen agua durante la época de lluvias, pero que no intervengan el flujo del agua, sedimentos y nutrientes del río en cauces principales, y que provean agua en épocas de estiaje.

Estos embalses pueden ser diseñados en las quebradas en las partes altas de las cuencas, zonas en las cuales debido al aumento de las temperaturas ha disminuido la acumulación de nieve, lo que también ha producido una disminución en la recarga a los acuíferos. Esta solución podría reemplazar en parte la función de la nieve, al permitir además de la acumulación de agua para la época de estiaje, ya que la infiltración recargaría los acuíferos. Diseñados en forma adecuada, podrían servir como estructura de mitigación para aminorar la energía que generan las crecidas vinculadas a un cambio de precipitación de tipo sólida (nieve) a líquida (lluvia) debido a la elevación de la isoterma de cero grados Celsius. Adicional a la instalación de sistemas fuera de río, se requiere de infraestructura que permita distribuir estos volúmenes a los usuarios. En el caso de acumulación en zonas altas, se provee además un almacenamiento de energía potencial que puede inyectarse a los sistemas de riego.

Estos embalses se deben diseñar teniendo en cuenta el riesgo aluvional vinculado al escurrimiento veloz de los máximos instantáneos que producirán las precipitaciones más intensas y sin tanta acumulación de nieve, y al derretimiento y transporte de detritos vinculado al derretimiento del *permafrost* andino, ya que se espera que aumente la frecuencia de eventos tipo flujos de detritos por pérdida de cementación y aceleración del derretimiento del permafrost (Dal Pont *et al.*, 2019). Esta situación, sumada al hecho de que el aumento de las temperaturas en alta montaña está desestabilizando las cubiertas detríticas y sedimentos de las laderas por recibir lluvia en vez de nieve, hace que la ingeniería de los embalses reguladores deba considerar una

serie de estructuras previas de decantación y retención de la carga de sedimentos transportada por los ríos para que los embalses acumulen agua y no se colmaten prematuramente de detritos, reduciendo su vida útil y haciendo perder la inversión de fondos públicos.

Embalses en el río

Las presas pueden causar una serie de impactos ambientales, varios de los cuales es posible evitar o minimizar. El más obvio, inevitable y a la vez irreversible es la inundación de un valle fluvial y su conversión en un embalse, lo cual altera tanto el régimen hidrológico como el de sedimentos y la conectividad fluvial. Hoy es posible, mediante el diseño del embalse y las tecnologías disponibles, minimizar estos impactos para obtener un funcionamiento más sustentable del embalse, que permita mantener de cierta manera el régimen hidrológico y sedimentos lo más cercano al natural posible; y, con ello, los servicios ecosistémicos prestados.

Hay que considerar que en Chile la construcción de embalses se ha traducido en un aumento de la superficie regada (ver Vicuña et al., 2014). Ante sequías prolongadas, como las que se proyectan en escenarios de cambio climático, seguir construyendo embalses sin una planificación adecuada pueden reducir las oportunidades de adaptación a futuro. En este sentido, es necesario cuantificar en forma adecuada el estado actual de la brecha suministro-demanda para analizar el efecto de aumentar la superficie irrigada, entendiendo que dicha medida puede producir más estrés a las cuencas, haciéndolas más vulnerables a la variabilidad y al cambio climático.

De hecho, la EU Water Framework Directive en Europa promueve la remoción de embalses para volver a una condición natural de hábitat en los ríos, optando por soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de humedales.[19]

En el informe técnico del proyecto «Evaluación de embalses de precordillera» de 2017 se analizaron más de diez embalses en la región de Coquimbo. Si bien los efectos son diferentes según la cuenca, es claro que, en las que ya existe regulación, la construcción de nuevas obras en las partes altas de las cuencas solo produce un efecto de sustitución de los territorios con mayor seguridad de riego. Las razones que podrían usarse para estas obras tienen que ver más con la equidad territorial en el abastecimiento y la seguridad de riego. El efecto de las reglas de operación de las grandes obras de almacenamiento en escenarios de cambio global tiene un efecto relevante en la seguridad hídrica de las cuencas.

Otra evaluación desarrollada es el efecto de la eficiencia (revestimientos en canales y sistemas de riego); los resultados de los escenarios muestran que un escenario de «máxima eficiencia total» genera efectos negativos en los flujos superficiales y en el almacenamiento y recarga de los acuíferos. En consecuencia, el uso consuntivo total del agua se incrementa, la recarga de los acuíferos se reduce y los flujos superficiales disminuyen (Rivera *et al.*, 2007).

Recarga de acuíferos

Una alternativa es la infiltración artificial de acuíferos empleándolos como embalses. Infiltrar en montaña, laderas, y finalmente en los alrededores del cauce de ríos, con un proyecto bien diseñado, puede disminuir los flujos superficiales y así la erosión, lo que evita también pérdidas por evaporación. La decisión de optar por esta solución se debe basar en un análisis integral que considere toda la cuenca.

Para enfrentar la crisis hídrica, ya muchos países han comenzado a recargar de manera artificial los acuíferos, con lo que buscan almacenar agua en épocas de abundancia para poder extraerla en épocas en que escasea, o simplemente mantenerla ahí para la protección de los ecosistemas asociados; esto solo se puede llevar a cabo conociendo antes el gradiente hidráulico, tipo de suelo, capacidad de infiltración y más (González, 2013). En Chile, esta herramienta no se ha masificado debido a dificultades tecnológicas y jurídicas.[20]

Trasvase de agua entre distintas cuencas

Los trasvases son obras hidráulicas cuyo objetivo es incrementar la disponibilidad de agua en una población o sector del país para, por ejemplo, aumentar las zonas regables, adicionando agua desde otra cuenca. El mayor

19 «Nature Based Solutions», Comisión Europea, disponible en https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs.

20 Delgado y Arumi, «La recarga artificial».

propósito del trasvase de agua es aliviar la escasez en la zona receptora (Gurung, 2015). Los trasvases de agua de una cuenca a otra, si bien traen un beneficio económico a la zona receptora, generan también problemas principalmente por tensiones territoriales y medioambientales.

La decisión de implementar este tipo de solución debe ir acompañada de estudios socioambientales tanto de la cuenca donante como la receptora, ya que dentro de los efectos adversos se tiene un aumento de la dependencia hídrica de la cuenca receptora, que no se garantice la estabilidad a largo plazo de ninguna de las dos cuencas, que retrasa la adaptación de la infraestructura hídrica de ambas cuencas y que es un gran gasto de energía y materiales que no resuelve el problema de la seguridad hídrica.

Otras alternativas

Existe consenso en que se debe avanzar además en otras soluciones, las que, por ahora, no cuentan con incentivos en la legislación chilena:

Tratamiento de aguas residuales a nivel local y regional, para su reciclaje y reutilización, lo cual ayudaría a un menor consumo y una acumulación mayor neta de agua para consumo humano (CNR, 2010; Villamar *et al.*, 2018). Aunque Chile cuenta con una reciente norma de reuso de aguas grises (Ley 21.075), aún falta el reglamento que permita la operatividad del sistema. En la actualidad se trabaja en el proyecto de norma NCh 3456, sobre directrices para el uso de aguas residuales tratadas para proyectos de riego. Si bien es un paso importante, está basado en la norma israelí y no en información generada en el país, considerando la diversidad climática entre ambos países.

Captación de aguas lluvia, a través de sistemas colectores y zanjas de infiltración, para su reutilización en riego y recarga de acuíferos, siempre que cumplan las normas de calidad correspondientes.

Infraestructura verde en entornos urbanos. Este nuevo modelo de infraestructura hace referencia al uso de la naturaleza para crear infraestructura de tipo natural o seminatural que es equivalente o complementaria a la infraestructura gris tradicionalmente empleada en el desarrollo de las ciudades. Este nuevo tipo de infraestructura ha sido empleada en entornos urbanos para solucionar tres componentes del manejo del agua en las ciudades: captación de agua local para almacenamiento y posterior uso, mejora de la calidad del agua, y regulación de eventos de precipitación extrema.

Ciudades esponja. Dentro de la infraestructura verde, se ha acuñado el término «ciudades esponja» para referirse a ciudades que planifican el aumento de su superficie permeable al agua, a través de: i) mantención y restauración de humedales naturales; ii) mantención y restauración de bosques, iii) implementación de humedales construidos para la depuración de agua lluvias, grises y negras; iv) implementación de pavimentos permeables, ya sean tradicionales o de nuevas tecnologías; v) implementación de techos verdes, y vi) construcción de jardines de agua.

Otras tecnologías que podrían incorporarse como tecnología verde son los sistemas urbanos de drenaje sustentable (SUDS), que incluyen tecnologías como plantar boxes o *bioswales*; humedales construidos de flujo horizontal (superficial y subsuperficial), y de flujo vertical; pavimentos permeables; y muros verdes para tratamiento de aguas residuales.

Implementación de soluciones individuales, como baños secos (ecosanitarios) en entornos rurales y sistemas domiciliarios de reutilización y recirculación de aguas grises (ducha, lavatorio) en usos como WC o riego.

3.4 BRECHAS

Red de monitoreo y datos hidro-meteorológicos

En Chile faltan datos hidrometeorológicos, lo que complica definir la solución óptima (DGA, 2017a). La densidad ideal para una red de monitoreo es aquella que reproduce el fenómeno estudiado de manera correcta (Gubler *et al.,* 2017). Por ejemplo, Hubbard (1994) indica que, para un terreno relativamente plano, una estación de temperatura cada 60 km es adecuado para capturar el 90% de la variabilidad diaria; en el caso de las precipitaciones, esto se reduce a una cada 5 km. Suiza tiene una densidad de una estación de temperatura por cada 475 km² y una de precipitación por cada 100 km². En Chile se tiene una estación por cada 818 km² y 1.364 por km², respectivamente (y hay una estación meteorológica por cada 1.100 km²). Las Tablas 2 y 3 ejemplifican lo anterior para la cuenca del río Itata, tanto con la disponibilidad de datos de estaciones de precipitación por cada 332 km² y temperatura por cada 2.258 km². Esto deja en evidencia la necesidad de avanzar en una red robusta de información, como se ha propuesta por esta mesa del agua en el capítulo de gobernanza.

Tabla 2. Registro de datos para estaciones de precipitación en la cuenca del río Itata. Blanco: registro completo; celeste: mes con datos faltantes; azul: no hay datos en el mes. Fuente: Toro (2017) e Hidalgo (2018).

Estación	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Años
Bernardo O'Higgins Chillán																					20
Camán																					13
Canal de la Luz en Chillán																					3
Cancha Los Litres																					4
Caracol																					10
Chillán Sendos																					0
Chillán Viejo																					20
Chillancito																					15
Cholguán																					11
Coelemu																					13
Embalse Coihueco																					18
Diguillín																					18
Fundo Atacalco																					16
Fundo Bella Rosa																					0
General Cruz																					0
La Punilla																					0
Las Cruces																					13
Las Trancas																					11
Mangarral																					14
Mayulemo																					16
Milauquén																					11
Nueva Aldea																					17
Pemuco																					15
Portezuelo																					2
Rafael																					11
Río Chillán en Esperanza 2																					6
Río Diguillín en San Lorenzo																					6
Río Itata en Coelemu																					5
Río Ñuble en San Fabián 2																					10
San Agustín de Puñual																					16
San Fabián																					10
San Lorenzo																					7
Trupán																					15
Tucapel																					16

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Años completos
Bernardo O'Higgins																					15
Caracol																					9
Coihueco																					13
Diguillín																					12
La Punilla																					0

Tabla 3. Registro de datos para estaciones de temperatura en la cuenca del río Itata. Blanco: registro completo; celeste: mes con datos faltantes; azul: no hay datos en el mes. Fuente: Toro (2017) e Hidalgo (2018).

Impacto en la productividad biológica

Establecer el impacto en la productividad biológica es otro de los temas pendientes y a la vez clave para poner en contexto los posibles efectos de una reducción de las descargas de agua dulce, en caso de materializarse los megaproyectos de trasvase de agua desde el sur al norte de nuestro país y de construcción de embalses.

Equidad hídrica

Para el Banco Mundial (2013), Chile debe incorporar en la gestión del agua la participación de todos los interesados —no solo los que tienen derechos de agua— y tener reglas para los grupos vulnerables. Con ello, se pretende asegurar la disminución de los conflictos actuales y asegurar la mantención de los servicios ecosistémicos para las futuras generaciones.

Recarga de acuíferos

Desde lo técnico, es necesario desarrollar tecnologías de recarga artificial de agua subterráneas ajustadas a la realidad local del lugar donde se pretenden implementar estos sistemas de gestión. En Chile, pese a la escasa información de las aguas subterráneas, ya existen experiencias interesantes como la del salar de Llamara, en Copiapó, en el Aconcagua, el Maipo y el río Diguillín.

Desde el punto de vista jurídico el escenario es complejo, pues se ha anunciado el incentivo a esta actividad y su regulación actual tiene vacíos importantes. De hecho, el Gobierno presentó en el Congreso Nacional reformas en esta materia al Código de Aguas durante 2019. Los vacíos más importantes sobre los cuales la mesa Agua recomienda profundizar son:[21]

Definición de recarga «artificial». No existe una definición legal ni criterios para determinar si requerirán o no autorizaciones, por ejemplo, las obras de infiltración de aguas lluvias (por ahora exentas del trámite), las recargas producidas por pérdidas desde las redes de conducción de agua (redes de agua potable, redes de aguas servidas, canales de riego u otras), estimadas hasta ahora recargas «accidentales». En la propuesta de reforma al Código se entiende que la recarga de la napa subterránea mediante los canales de riego, si bien es recarga «artificial», no requerirá de autorización de la DGA, pues se trataría de adicionar aguas superficiales de la *misma* cuenca, caso en el cual solo bastaría con la autorización de las organizaciones de usuario de agua, en las que —se sabe— priman los titulares de derechos de agua de la agricultura. Esta situación debe analizarse a la luz de informes que señalan que en dichos canales muchas veces existe contaminación (Banco Mundial, 2013). No existe claridad tampoco sobre si la disposición de efluentes industriales en las napas subterráneas corresponde o no a actividades de recarga artificial y si ellas necesitan autorización. La Circular DGA 4/2016 señala que si estas obras se regulan por el DS 46 del Ministerio del Medio Ambiente (norma de infiltración a aguas subterráneas), podrán optar a constituirse como obras de recarga artificial de acuíferos, a solicitud expresa del titular, y siempre que acrediten cumplir con los estándares considerados para tales obras de recarga artificial.

21 Delgado y Arumi, «La recarga artificial».

La calidad del agua que se recargará de manera artificial. La experiencia comparada demuestra que un punto central de la evaluación ambiental de estos proyectos será evaluar los efectos que podría causar que al acuífero subterráneo ingrese agua de una calidad diferente a la existente. En Chile este punto es delicado, pues estos proyectos no ingresan al SEIA, por lo que no existe información de las aguas subterráneas y sus ecosistemas asociados (Banco Mundial, 2011) y, por falta de reglas legales claras, puede hoy recargarse con aguas de la misma cuenca, de una distinta, o con agua de calidad muy diferente, pues el criterio administrativo hasta ahora en la Circular 4-2016 de la DGA es que puedan usarse aguas superficiales corrientes o detenidas, aguas subterráneas previamente extraídas del acuífero, aguas pluviales que caen o se recogen en un predio particular (antes de caer a un cauce natural de uso público) y aguas tratadas (ya sea agua potable, aguas procedentes de una planta desalinizadora o aguas de plantas de tratamientos de aguas servidas o aguas procedentes de efluentes industriales, reguladas o no por el DS 46/2002 de Minsegpres).

Quién evaluará estos proyectos desde el punto de vista ambiental. La recarga artificial de los acuíferos en Chile no necesita ser sometida a evaluación ambiental de manera previa a su ejecución, a diferencia de lo que ocurre en la mayoría de los países OCDE. Por ejemplo, en la Unión Europea un proyecto de recarga artificial debe ingresar al SEIA si el volumen anual de agua aportada a la napa subterránea es igual o superior a 10 millones de metros cúbicos. Se aplicará el principio preventivo (frente a los riesgos conocidos) y el principio precautorio (antes los riesgos inciertos científicamente). En Chile los proyectos de recarga artificial no serán evaluados en este sistema, sino solo y de manera excepcional cuando formen parte de un proyecto mayor que sí deba ingresar (por ejemplo, una minera), cuando la obra de recarga se ejecute en un área bajo protección oficial, o cuando la obra de recarga esté asociada a acueductos o embalses que requieren la autorización del artículo 294 del Código de Aguas. En la propuesta de reforma, el Gobierno planteó que si la recarga se hace con aguas de una misma cuenca para mejorar la disponibilidad del recurso para los derechos preexistentes, requerirá solo la aprobación previa de la junta de vigilancia o la organización de usuarios de agua que corresponda, en las que participan solo titulares de derechos. Si, en cambio, el proyecto de recarga artificial utiliza aguas provenientes desde una fuente ajena a la cuenca; tiene por objeto aumentar la disponibilidad para constituir «nuevos derechos» —sin precisar si se trata de derechos provisionales o no—; o bien, en caso de que no exista una organización de usuarios de agua legalmente constituida, deberá contar con la aprobación de la DGA.

Control de la seguridad de obras de infraestructura

En el análisis que el Banco Mundial (2013) hizo a la institucionalidad de agua en Chile se identificaron 102 funciones que se consideran necesarias para la gestión del agua. Ellas están distribuidas entre 43 actores institucionales, lo que incluye organismos de Gobierno, organizaciones de usuarios de agua y organismos autónomos. Se concluyó que la complejidad de este marco institucional produce: i) duplicidades en la ejecución de funciones, ii) vacíos por omisión y iii) problemas de coordinación entre los diferentes organismos. Por vacío se entiende un caso «extremo» de concurrencia de instituciones en forma deficiente en que hay tareas que «no se hacen» por falencias, ya sean de políticas, financiamiento, coordinación o reglamentación.

Dentro de estos vacíos está el control de la seguridad de presas que no hayan sido construidas con fondos fiscales. En efecto, este control no ha sido contemplado en la legislación de la DOH y en la DGA. Se explica que en la ley solo existe un enunciado general que se ha implementado de manera débil. Este es un vacío importante y que encierra riesgos y conflictos potenciales de magnitud atendida la cantidad de presas y el riesgo sísmico e hidrológico de las cuencas chilenas. A diferencia de la mayoría de los países de similares condiciones, en Chile no se contemplan catastros públicos de la infraestructura de las presas, ni sistemas de monitoreo continuo e independiente de la operación y de las condiciones de seguridad. Los concesionarios, dueños o usuarios de estas obras no están técnicamente auditados ni sometidos a protocolos de observación, procesamiento y divulgación de la información correspondiente. Por ello, se propone reformar la ley en estos sentidos y, además, crear un Servicio del Dominio Público Hidráulico y Seguridad de Presas (SDPHSP) que quedaría bajo el control de la Subsecretaría del Agua que se propone instalar en el país.

Calidad del agua

La falta de precisión y esfuerzos de monitoreo respecto de la determinación de la cantidad de agua es aún más evidente en el caso de la calidad del agua, pues la información básica sobre la presencia de contaminantes en el agua —y más aún en la determinación de los impactos derivados de la calidad del agua en Chile— son insuficientes. En general, nuestra discusión sobre la gestión del agua tiende a obviar que menor calidad

de agua significa menor cantidad, debido a que tiene menos disponibilidad, ya que el agua limpia (calidad referencial) puede utilizarse para una mayor cantidad de diferentes usos en comparación con el agua de mala calidad, de usos muy limitados.

En Chile, el tipo de contaminación del agua varía según la macrozona y a su vez deriva, por lógica, del uso preponderante del agua. En general, en la zona norte, la minería ha generado históricamente contaminación por metales derivados de vertidos, almacenamiento, transporte de concentrados minerales y relaves con cantidades desconocidas de químicos con potencial tóxico como cobre, arsénico y cadmio, con lo que contamina ecosistemas costeros, aguas superficiales (Castilla, 1983; Castilla y Nealler, 1978; Schalscha y Ahumada, 1998), e incluso altos porcentajes de sulfato y metales pesados se han determinado en la niebla (nitrato, arsénico y selenio) (Sträter *et al.*, 2010). Recientemente se ha discutido el potencial contaminante de la extracción de litio (Gutiérrez *et al.*, 2018) y el riesgo por metales raros utilizados en nuevos dispositivos tecnológicos. Los metales como el tantalio, el galio, el germanio, el indio, el niobio, el teluro y el talio se consideran elementos críticos para la tecnología, pero no se conoce información sobre sus efectos ambientales de extracción (Espejo *et al.*, 2018a, 2018b). Además, en zonas agrícolas del norte, se encuentra salinización del suelo y del agua subterránea debido a la escasez de precipitaciones, la alta evaporación y la evapotranspiración (Donoso *et al.*, 1999).

En la zona centro, la agricultura y la expansión urbana han generado contaminación, sobre todo la generada por nutrientes (fertilizantes) y contaminación difusa agroquímica de nitrógeno, en especial para la contaminación del agua subterránea con nitratos (Donoso *et al.*, 1999). En este contexto, es importante destacar la dificultad de determinar y monitorear la contaminación de fuentes no puntuales derivada del uso agrícola (Ribbe *et al.*, 2008). Se pueden encontrar problemas de calidad del agua en el centro de Chile —donde se encuentra la mayor parte del desarrollo urbano—, sobre todo aguas abajo de las áreas urbanas, debido a la descarga de aguas residuales tratadas durante el verano (Debels *et al.*, 2005).

En la macrozona sur ha aumentado la contaminación por nitratos y fósforo de los lagos que contribuyen a los procesos de eutrofización (Steffen, 1993). Esta contaminación está subsidiada por procesos de dilución debido a la gran cantidad de precipitaciones en la macrozona, pero que podrían cambiar si se reducen estas. Por otra parte, el impacto de la producción de celulosa ha sido estudiado en los peces, incluyendo la presencia de intersexos e incrementos significativos del efecto disruptor endocrino (nivel reproductivo). Los peces machos mostraron características intersexuales (Chiang *et al.*, 2015). Los procesos libres de cloro han reducido drásticamente el impacto en la biota con efectos menores en *Daphnia* (Chamorro *et al.*, 2016). Por último, el impacto socioambiental del evento en el río Cruces de 2004 ha significado un profundo cambio en la institucionalidad ambiental de Chile, con medidas de mitigación importantes en funcionamiento.

La discusión sobre los impactos de la contaminación química en la biodiversidad de las áreas protegidas ha estado prácticamente ausente de la literatura científica (Rodríguez-Jorquera *et al.*, 2015, 2016). La contaminación fue el factor de cambio más comúnmente reportado que afecta las características ecológicas de estos humedales (Frazier, 1999).

Una brecha importante en Chile es la falta de normas de calidad (primarias o secundarias), lo que puede ser un impedimento para la mantención de la calidad de agua en cuencas donde la calidad aún es buena, o mejorar la calidad donde existen zonas saturadas. A pesar de que existen 22 normas que regulan la calidad del agua,[22] son escasas las normas específicas a nivel de cuencas bajo la figura de Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA), algunas de las cuales están definidas a nivel de lagos (secciones de subcuencas). Por ejemplo, a la fecha, las normas vigentes en Chile son: río Serrano (2010), lago Llanquihue (2010), lago Villarrica (2013), río Maipo (2015) y río Biobío (2015). Así, solo dos de las 101 cuencas principales de Chile cuentan con NSCA.

Por último, cabe destacar que tanto la investigación como el monitoreo de contaminantes emergentes o contaminantes derivados de productos de uso personal y farmacéutico (como antibióticos y fármacos de uso humano y veterinario) son prácticamente inexistente a nivel país. Es importante desarrollar también programas que puedan determinar el impacto de este tipo de contaminación por lo general muy difícil de pesquisar, ya que efectos como la disrupción endocrina o resistencia antibiótica —por nombrar algunos— suelen ocurrir con bajos niveles de contaminantes.

22 «¿Qué es una Norma de Calidad Secundaria?», Ministerio del Medio Ambiente, https://mma.gob.cl/faq/que-es-una-norma-de-calidad-secundaria/.

Protección de reservas hídricas

Dentro de las reservas hídricas con que cuenta el país, se encuentran las formas de agua en estado sólido en la cordillera. De ellas, algunas son glaciares heredados de la última glaciación y constituyen una reserva estratégica ante la reducción de las precipitaciones que se está registrando como consecuencia del cambio climático. Se suman otros recursos de carácter multianual (neviza, penitentes, *permafrost* andino) como estacional (nieve). Todos estos cuerpos de agua congelada requieren de normas y acciones que apunten a minimizar los efectos sobre su balance de masa que derivan de acciones e impactos humanos. Cabe preguntarse cómo sería un Chile sin glaciares y sin otros componentes de la criósfera, con montañas viniéndose abajo por la acción erosiva de la lluvia en áreas que recibían precipitación sólida y, como consecuencia, con la pérdida de estos reguladores naturales y automáticos del escurrimiento y del aporte a las napas. Significa ello también la pérdida de una serie de funciones ambientales y de interacción con otros subsistemas naturales (atmosistema, hidrosistema, ecosistema, sistema productivo, etcétera), lo cual deja ver un impacto mucho mayor que solo la pérdida de glaciares por consunción acelerada.

A la luz de lo señalado, la regulación de las intervenciones humanas en alta montaña resulta en una necesidad prioritaria ante los efectos de una crisis climática que no tiene retorno.

3.5 RECOMENDACIONES

La unidad natural de planificación territorial debe ser la cuenca hidrográfica, medida que exige reformas legales al actual sistema.[23] El estudio a nivel de la cuenca permitirá hacer balances restringidos a variables geográficas relativas a los servicios ecosistémicos de la cuenca, lo que favorece la gestión local y fortalece la distribución sustentable del recurso. Además, permite estudios estadísticos para reducir la incertidumbre mediante indicadores de medición, reporte y verificación.

Se debe relevar el rol de los ecosistemas naturales en la generación de cantidad y calidad del agua; y avanzar en soluciones basadas en la naturaleza, como protección de humedales y bosques, junto con actividades de restauración de ecosistemas degradados. Para ello, se sugiere crear incentivos económicos, como avanzar en sistemas de pago por servicios ecosistémicos.

Cuando se decida hacer intervenciones en la cuenca, se debe evaluar que afectarán el funcionamiento de la cuenca y su zona costera adyacente. Dada la diversidad geográfica y climática de Chile, no hay una única solución para todo el país, lo que hace importante evaluar distintas alternativas o una combinación de soluciones, considerando que los efectos socioambientales son específicos de cada sitio.

Las políticas de incentivo a la eficiencia del riego deben considerar los potenciales efectos en el funcionamiento de la cuenca como un todo. Para ello, las medidas de infraestructura y planificación deben evitar caer en la paradoja de la eficiencia (Scott *et. al.*, 2014).

Los ríos son sistemas abiertos que forman parte integral del paisaje circundante, con el cual son altamente interactivos. Toda nueva obra en ellos debe en consecuencia considerar esta interacción, a lo largo de las cuatro dimensiones descritas (longitudinal, lateral, vertical y temporal). Para tomar buenas decisiones, se debe observar el sistema completo.

Revisar la política pública proclive a los embalses. Antes de pensar en almacenamiento, se deben diseñar los planes de manejo de agua en las cuencas como alternativa principal a la adaptación al cambio climático, pues la construcción de embalses modifica de manera permanente el área a inundar. La construcción de embalses como política de Estado debe hacerse a partir de una planificación que considere los servicios ecosistémicos de cada cuenca y la eficiencia del usos del agua en general.

Para cualquier obra a desarrollar dentro de la cuenca, se debe hacer un análisis de costo y beneficio, en el que se incluya el factor del impacto en los ecosistemas comprometidos, sobre todo si son endémicos.

Por otra parte, una obra de embalse de aguas perfectamente puede considerar un diseño tal que permita pulsos de lavado de riberas y también el tránsito intermitente de los sedimentos para no modificar en forma sustancial el flujo del río. Es por ello que para decidir las soluciones a implementar, se tienen que considerar diversas variables y condicionantes, por ejemplo, que el volumen a almacenar sea tal que el caudal promedio estacional del río y el flujo de sedimentos se mantenga estable.

23

Desde la perspectiva de la rentabilidad, podría ser más interesante avanzar en la rehabilitación de embalses públicos de mediana envergadura, a fin de recuperar su capacidad y procurar el resguardo de un caudal ambiental y la flora ribereña asociada.

Se sugiere diseñar embalses paralelos al cauce del río que acumulen agua durante la época de lluvias, pero que no intervengan el flujo del agua, sedimentos y nutrientes del río, y que provean agua en épocas de estiaje. Todo esto, sin dejar de considerar el riesgo aluvional vinculado al escurrimiento veloz de los máximos instantáneos.

Se sugiere localizar de manera estratégica los embalses en la red hidrográfica, de modo de contribuir a la recarga artificial de acuíferos, en un marco de operación conjunta superficial-subterránea.

Se sugiere avanzar en soluciones basadas en la naturaleza, como hacer obras de infiltración de aguas al acuífero a través del subsuelo, en especial de infiltración de aguas lluvias en ciudades, protegiendo y restaurando los humedales urbanos existentes, además de innovar en pavimentos que permitan la infiltración, techos verdes, jardines de infiltración focalizada, etcétera. El desarrollo de infraestructura verde en las ciudades requiere adecuaciones de la industria nacional y de los códigos de construcción. Por ejemplo, hoy en el mercado no existen tuberías para sistemas separativos que sean identificadas con claridad y que transportan agua reutilizada, como sí existe en otros países. Por último, es necesario promover sistemas eficientes en el uso de agua, como llaves de 6 L/min.

Sin perjuicio de lo sugerido por la mesa Criósfera, esta mesa recomienda la protección legal de los glaciares, ya que ellos actúan como diques reguladores de los caudales andinos, ganan masa en años fríos y húmedos y la pierden en años secos y cálidos, cuando la oferta de la nieve precipitada en el invierno no alcanza a satisfacer la demanda hídrica.

En cuanto a las brechas, se sugiere: crear una sólida red de monitoreo y datos hidrometeorológicos; y exigir en toda evaluación de proyectos (sectorial en el MOP o ambiental en el SEIA) evaluar la productividad biológica, para avanzar en equidad hídrica, considerando en las decisiones (por ejemplo, elaboración de un plan) participación de los «interesados en la cuenca», incluidos los grupos vulnerables y no sólo los titulares de derechos de agua.

En recarga de acuíferos, dictar reglas claras respecto de qué actividades serán consideradas recarga accidental, qué calidad deberá tener el agua aportada y qué autorizaciones se requieren.

También, generar catastros públicos de la infraestructura de las presas y un sistema de monitoreo continuo e independiente de la operación y de las condiciones de seguridad de ellas. En este sentido, existe consenso en crear un Servicio del Dominio Público Hidráulico y Seguridad de Presas (SDPHSP).

En materia de calidad de agua, se recomienda dictar más normas de calidad secundaria y avanzar mediante instrumentos de ordenamiento territorial (los recientemente creados Planes Regionales de Ordenamiento Territorial), para definir y regular las zonas aptas para cultivos agrícolas y plantaciones forestales

Por último, todas las medidas propuestas (SBN, embalses en el río, fuera del río, recarga, trasvase etcétera) conllevan dos desafíos:

- La necesidad de determinar y evaluar el impacto ambiental medido como análisis de ciclo de vida social, ambiental y productivo. Como no todos estos proyectos requieren ingresar al SEIA, se sugiere que al menos los proyectos del Estado lo hagan de manera voluntaria.
- La necesidad de dar reglas claras para determinar, por ejemplo, cómo y quiénes administran el agua recargada o almacenada (¿se crean derechos de agua?), y cuál es la capacidad o volumen de agua máximo a extraer. Si se infiltra agua, ¿dónde, cuándo, cuánto y cómo se puede extraer?

4. Calidad del agua

4.1 CONTEXTO NACIONAL

El agua es un elemento vital de la biósfera, fundamental para el funcionamiento físico, químico y biológico de los ecosistemas terrestres y acuáticos. El agua cumple una función ecológica desde la parte alta de los ríos hasta el mar costero, al transportar y distribuir elementos químicos esenciales para la vida como nitrógeno, fósforo o anhídrido carbónico, entre otros, bases para sustentar diversos ecosistemas y para los distintos usos de consumo humano y productivos: agricultura, forestal, acuicultura, energía y minería.

Una cantidad adecuada de agua de buena calidad es necesaria para lograr seis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): para la salud (ODS 3), seguridad alimentaria (ODS 2), seguridad del agua (ODS 6), ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11) y ecosistemas marinos y terrestres (ODS 14 y 15) (UN Water, 2016). Entre 1990 y 2015, Chile mostró una evolución positiva en los indicadores de acceso al agua potable y al saneamiento asociados con los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) de las Naciones Unidas (2001) (UN Water, 2017a, 2017b). Esta evolución sobre todo en el tratamiento del agua potable proporcionó beneficios tanto para la salud y el ambiente como para el desarrollo socioeconómico (World Bank, 2019). Desde la Declaración de Dublín de 1992, la cual sigue vigente en las metas de la Agenda del Desarrollo Sostenible al 2030 de las Naciones Unidas, se estableció la relación del agua con el desarrollo sostenible y el enfoque integrador que cumple la cuenca fluvial, para conciliar el desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas naturales. En este sentido, la cuenca como unidad geográfica territorial es la más apropiada para la planificación y gestión de la calidad de agua, porque considera las interrelaciones que ocurren en la totalidad del sistema y el efecto que tiene el drenaje del agua de la cuenca hacia el mar costero (Della Croce *et al.*, 1992; Parra *et al.*, 2006; Masotti *et al.*, 2018). Estos límites por lo general no coinciden con los límites geográficos de las jurisdicciones político-administrativas (provincias, comunas o regiones) establecidos.

Según el último y reciente informe de la Naciones Unidas de 2017, los cambios proyectados en precipitación y temperatura global están induciendo cambios de escorrentía y de disponibilidad de agua irreversibles. En la actualidad, el problema de la escasez hídrica en Chile se ha agudizado y pone en evidencia efectos de diversa frecuencia y magnitud que degradan la calidad de agua (Núñez *et al.*, 2017; Pino *et al.*, 2015). Por eso existe la necesidad imperiosa de prepararse estratégicamente para un Chile aún más complejo (Odepa, 2017; CR2, 2015). Dentro de las implicaciones ambientales, se observa que la expansión de la desertificación hacia el sur de Chile está bordeando la región del Biobío (Santibáñez, 2016), una disminución de las nieves en las partes altas de las montañas que conduce a reducciones críticas en los caudales de los ríos en verano (subida de la isoterma en 0 ºC) (Bozkurt *et al.*, 2017; Pérez, Mattar y Fuster, 2018) y una intensificación natural hacia el sur del país de las actividades productivas, como la agricultura, la actividad agropecuaria, la actividad forestal y la minería. La disminución de los caudales y el aumento de la temperatura implica una reducción significativa en la capacidad de carga o dilución de contaminantes típicos y emergentes, además del incremento de los riesgos para el abastecimiento de agua potable proveniente de aguas superficiales (Climent *et al.*, 2019; Yevenes *et al.*, 2016; 2018). Ciertamente, se desconoce el alcance de contaminantes emergentes, por lo que es clave su monitoreo continuo. De acuerdo con Pastén *et al.* (2019), hay evidencia de la ocurrencia de tres tipos de estos contaminantes en Chile: compuestos industriales, pesticidas, y compuestos farmacéuticos y productos de cuidado personal. También se observan procesos de eutroficación en pequeños y medianos cuerpos lacustres como lagunas y embalses, debido a un incremento de la concentración de nutrientes que

desencadenan cambios importantes en la calidad de agua, así como también en la trama trófica, lo que hace proliferar bacterias patógenas (por ejemplo, *Enterobacter* y *Helicobacter pylori*, entre otros), microalgas tóxicas (por ejemplo, *Microcystis sp.* y *Dolichospermun sp.*, entre otras) y otras algas como la diatomea *Didymosphenia geminata*, que pueden afectar la salud humana y los hábitats acuáticos (Almanza *et al.*, 2016, 2019; Figueroa *et al.*, 2018; Nichols, Lake y Heaviside, 2018) y actúan —como en el caso de *Helicobacter pylori*— como potenciales agentes carcinógenos (Minsal, 2013).

Los embalses que cambian el régimen natural de una cuenca participan de procesos biogeoquímicos desde el inicio de su operación. Estos procesos están asociados a la acumulación de sedimentos, variabilidad térmica y de mezclado (temporal y espacial), ingreso de nutrientes, carga orgánica y otros compuestos o iones, y la diversidad biológica presente. El ingreso de constituyentes al agua proviene de la escorrentía o deposición atmosférica, y sus características dependen de actividades antrópicas ocurridas en el espejo de agua o en las cercanías según los usos de suelos existentes. En condiciones de bajo mezclado, alta luminosidad, incremento de temperatura y disponibilidad de nutrientes, se desarrolla el crecimiento de algas y vegetación acuática. Cuando estas algas son especies nocivas como las cianobacterias, el agua puede presentar valores de toxinas que ponen en riesgo la salud de las personas por consumo directo, recreacional o por riego agrícola. Estas condiciones se presentarán con mayor frecuencia según los escenarios predichos para el cambio climático.

La composición natural de las aguas subterráneas depende de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas en la cuenca (Herrera-Apablaza *et al.* 2018; Sandoval *et al.*, 2018). Para muchas de las regiones del país, sobre todo las del norte, el agua subterránea constituye el recurso permanente (Pastén *et al.*, 2019; Viguier *et al.*, 2019). Sin embargo, falta información de la distribución, cantidad y de estado de las aguas subterráneas a lo largo de Chile, lo que en la actualidad cobra mayor relevancia debido al riesgo de déficit hídrico en muchas regiones.[24]

Diferentes estudios asociados a proyectos científicos específicos indican altas concentraciones de nitrato, hierro, manganeso, arsénico, pesticidas y orgánicos (Bondu *et al.*, 2016; Daniele, Cannatelli y Buscher 2019; Fuentes *et al.*, 2014; Magaritz *et al.*, 1990; Salazar *et al.*, 2019; Zang, Dame y Nüsser, 2018). El 2018, la Dirección General de Aguas, publicó un observatorio que incluye un mapa hidrogeoquímico actualizado y con datos sistematizados, el cual actúa como diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas entre las regiones de Coquimbo al Maule. La mayor extracción o sobreextracción de los acuíferos, combinado con el menor flujo disponible, no solo influye en los procesos de dilución, sino que da lugar a condiciones más favorables para la movilización de arsénico presente en forma natural (Bondu *et al.*, 2016; OMS, 2017). Además, en las zonas costeras, la disminución de la recarga, la sobreextracción de agua dulce y el aumento del nivel del mar producen intrusión salina en estuarios y en aguas subterráneas.

En Chile, las características del agua varían según la zona geográfica, y su contaminación depende de las actividades antrópicas actuales y pasadas. La DGA propuso una zonificación hídrica dividida en cuatro macrozonas:[25] la macrozona norte, que incluye desde la cuenca del río Lluta hasta la cuenca del río Choapa; la macrozona centro, que incluye desde la cuenca del río Petorca hasta la cuenca del río Maule; la macrozona sur, que incluye desde la cuenca del río Itata hasta la parte norte de la cuenca del río Palena; y la macrozona austral, que se desarrolla hasta el límite sur del país.

Pastén *et al.* (2019) hicieron un análisis detallado de la calidad del agua de las cuencas de Chile por macrozona a partir de los datos de la red de la DGA. Según sus hallazgos, los valores del pH varían en general entre 6,5 y 8,5, con dos cuencas en la macrozona norte con valores excepcionalmente bajos que se han asociado a drenaje ácido presente en las cuencas del río Lluta (Guerra *et al.*, 2016a, 2016b; Leiva *et al.*, 2014) y del río Elqui (Espejo *et al.*, 2012; Flores *et al.*, 2017; Oyarzun *et al.*, 2012, 2013; Ribeiro *et al.*, 2014). La conductividad eléctrica presenta una tendencia desde altos valores en la macrozona norte hasta valores muy bajos en las macrozonas sur y austral. En la macrozona norte se registran valores sobre 15 mS cm-1; por ejemplo, en el río Salado, en la cuenca del río Loa, que recibe las aguas provenientes del campo geotermal El Tatio, una fuente significativa de arsénico y boro (Dadea *et al.*, 2001; Romero *et al.*, 2003). La cuenca del río Lluta también registra elevados niveles de conductividad eléctrica, arsénico y boro.

A pesar que los enriquecimientos minerales andinos se prolongan hacia la macrozona centro, las sales disueltas y metales pudieran ser diluidas por condiciones hidrológicas un poco más favorables, como ha ocu-

24 La situación de sobreotorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas (áreas de restricción y zonas de prohibición) puede ser consultada en línea a través del sitio web de la DGA, disponible en http://snia.dga.cl/observatorio/.

25 «Atlas del agua 2016», Dirección General de Aguas, http://www.dga.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf.

rrido en el pasado en las cuencas de los ríos Aconcagua (Gaete *et al.*, 2007), Maipo-Mapocho —alimentado por el estero Yerba Loca— (Montecinos *et al.*, 2016; Pasten *et al.*, 2015; Segura *et al.*, 2006), Rapel (Pizarro *et al.*, 2003) y Mataquito (Tapia *et al.*, 2009). Los elevados niveles de sales disueltas en cuencas del norte principalmente dependen de una mezcla relacionada con una alta evaporación de fuentes hidrotermales, drenaje ácido y el afloramiento de aguas subterráneas salobres.

Hacia el sur de Chile los afluentes salobres disminuyen y la escorrentía pluvial y nival se incrementa, con resultado de caudales con menores concentraciones de sales disueltas. Las concentraciones medias del nutriente disuelto nitrato son altas en el agua para tres cuencas de ríos de la macrozona centro (Aconcagua, Maipo y Rapel), y tres cuencas de la macrozona norte (Copiapó, Huasco y Elqui). En menor concentración, tres cuencas de la macrozona sur (Itata, Biobío e Imperial) presentan enriquecimiento leve respecto de otras cuencas más al sur (Toltén y Valdivia). El enriquecimiento de nitrato en aguas se asocia a contaminación difusa de aguas residuales principalmente en zonas urbanas y a prácticas agroindustriales y ganadería en zonas rurales (por ejemplo, Fernández *et al.*, 2017; Fuentes *et al.*, 2014; Ribbe *et al.*, 2008).

4.2 MINERÍA

Los vertidos y relaves de la mina de cobre han afectado los ecosistemas costeros marinos de bahía Chañaral con cantidades desconocidas de químicos (cobre, arsénico y cadmio) (Castilla, 1983; Castilla y Nealler, 1978). No obstante, existe muy poca información reciente en estos temas, pero es conocida su toxicidad para fuentes de agua dulce (Chamorro *et al.*, 2018; Peréz *et al.*, 2016). Hay un alto contenido de cobre en la mayoría de los ríos de Chile Central, cuya fuente son las aguas residuales de la minería del cobre (Schalscha y Ahumada, 1998). Sin embargo, se desconocen los umbrales de fitotoxicidad del cobre en la capa superior de los suelos agrícolas y sus aguas subterráneas, históricamente contaminadas por actividades mineras en Chile (Verdejo *et al.*, 2015). Relativo a esto, se han encontrado altos porcentajes de sulfato y metales pesados que se encuentran en la niebla (fuente de nitrato, arsénico y selenio), proveniente de actividades antropogénicas como plantas de energía, minería e industria del acero (Sträter *et al.*, 2010). Además, el almacenamiento y el transporte de concentrados minerales por lo general actúan de manera abierta sobre el material expuesto (Eisler, 2003; Huertas *et al.*, 2012). Como ejemplo de ello, existen impactos potenciales de la extracción en el llamado «triángulo de litio», incluido el impacto en los salares ubicados en la región de Atacama (Gutiérrez *et al.*, 2018).

En la actualidad, a nivel internacional es conocido el riesgo por metales raros utilizados en nuevos dispositivos tecnológicos. Los metales lantánidos como el tantalio, el galio, el germanio, el indio, el niobio, el teluro y el talio se consideran elementos críticos para la tecnología debido a sus propiedades magnéticas, fosforescentes y catalíticas, pero la información es escasa sobre sus efectos ambientales de extracción, ni del riesgo por metales vertidos y reciclaje de desechos electrónicos (Espejo *et al.*, 2018a, 2018b). En condiciones naturales, los metales raros están disponibles en pequeñas cantidades a través del agua subterránea y la atmósfera, sin embargo, su mayor uso ha creado varias rutas nuevas para la bioacumulación (en plantas, animales y seres humanos).

4.3 AGRICULTURA Y EXPANSIÓN URBANA

Respecto de los efectos derivados del uso agrícola, la contaminación de fuentes no puntuales es un aspecto clave (Ribbe *et al.*, 2008).

En la macrozona norte, se identifica la salinización del suelo y del agua subterránea debido a la escasez de precipitaciones, la alta evaporación y la evapotranspiración (Donoso *et al.*, 1999).

En la macrozona centro de Chile, la contaminación está dada sobre todo por nutrientes (fertilizantes) y la utilización difusa agroquímica de nitrógeno, en especial para la contaminación del agua subterránea con nitratos (Donoso *et al.*, 1999). También es importante destacar la descarga bajo normativa de riego de los efluentes tratados provenientes del sector pecuario, debido a sus características de nutrientes, conductividad eléctrica y patógenos, entre otros (Vidal, Pozo y Arumi, 2012).

Luego, en la macrozona sur, el aumento de la contaminación por nitratos y fósforo de los lagos contribuye a los procesos de eutrofización (Steffen, 1993), contaminación que es subsidiada por procesos de dilución.

Por otro lado, se identifican problemas de calidad del agua en el centro de Chile (donde se encuentra la mayor parte del desarrollo urbano), principalmente debajo de las áreas urbanas, debido a la descarga de aguas residuales tratadas durante el verano (Debels *et al.*, 2005).

4.4 INDUSTRIA FORESTAL Y ACUICULTURA

Existen extensos estudios de los efluentes de la industria de celulosa, debido a los compuestos de alto peso molecular que son descartados. Estos aportan color a las fuentes donde se descargan debido a los nutrientes contenidos en los efluentes: principalmente fósforo, intrínseco al proceso, mientras el nitrógeno es suplementado en los sistemas de tratamiento (Chamorro *et al.*, 2013).

Por otro lado, algunos estudios demuestran los potenciales efectos negativos de efluentes de papel y pulpa de celulosa sobre la inhibición de la actividad de estrógenos en peces hembra trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) alteran potencialmente su nivel reproductivo (Orrego *et al.*, 2010). Además, se ha registrado efectos estrogénicos fuertes en peces juveniles de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*), que pueden generar características intersexuales, inducidos por los residuos de efluentes de celulosa (Chiang *et al.*, 2015).

Se ha demostrado también que procesos libres de cloro pueden reducir en forma drástica el impacto negativo en la biota (Chamorro *et al.*, 2016).

4.5 BRECHAS

El recién publicado informe del Banco Mundial (2019) afirma que el empeoramiento de la calidad del agua limita el crecimiento económico y amenaza el bienestar humano y ambiental. En este sentido, las principales brechas para la calidad de agua en Chile se relacionan:

1. Falta una política para la gestión integrada de recursos hídricos a nivel de cuenca.
2. Faltan instancias de participación de expertos que asesoren en la toma de decisiones relacionadas con el recurso hídrico.
3. Falta información actualizada sobre la distribución, cantidad y calidad de las aguas subterráneas en Chile, frente a la creciente dependencia de estas fuentes para el abastecimiento humano.
4. Falta información en lo que respecta a cantidad y calidad de los recursos hídricos a nivel de cuencas.
5. Falta coordinación entre las inversiones en infraestructura física, que han sido muy positivas en los últimos años, con instituciones que integren marcos de gobernanza más amplios y sistemas de información mejorados (OECD, 2017). Por ejemplo, los sistemas de agua potable rural carecen de tecnología de purificación de agua y capacidades locales para la operación y mantención sostenible en el tiempo.
6. Existe un retraso en la dictación de normas secundarias para calidad de agua. En este sentido, si no existe norma, técnicamente no hay contaminación. Si no hay contaminación, no puede dictarse un plan de descontaminación. A pesar de que existen en la actualidad 22 normas que regulan la calidad del agua y la contaminación derivada de las actividades industriales y agrícolas, son escasas las normas específicas a nivel de cuencas bajo la figura de normas secundarias de calidad ambiental, algunas de las cuales están definidas a nivel de lagos (secciones de subcuencas). Por ejemplo, hoy las normas vigentes en Chile son: río Serrano (2010), lago Llanquihue (2010), lago Villarrica (2013), río Maipo (2015) y río Biobío (2015). Así, solo dos de las 101 cuencas principales de Chile cuentan con normas, por lo que no se cumple con lo que estaba planificado (**Figura 10**). Esta brecha debe ser abordada, dado que es un impedimento para la mantención de la calidad de agua en cuencas donde la calidad aún es buena y la mejora de la calidad donde existen zonas saturadas.
7. Otra brecha existente está relacionada con la gestión segura de las aguas residuales tanto en zonas rurales como a lagos y embalses de uso turístico.
8. Si bien la cobertura de saneamiento urbana es alta, del orden del 97%, incluye la disposición mediante emisarios submarinos, la cual corresponde al 30% de las aguas servidas municipales (Pastén *et al.*, 2019), y que incluye solo tratamiento primario. Por lo tanto, existe un volumen importante de agua sin tratamiento secundario que es dispuesto en las costas chilenas.
9. Falta de control de la contaminación difusa, relacionada principalmente con un mayor control de las técnicas de regadío de la agricultura, modificación de hábitat, la minería y silvicultura. La

eficiencia y el nivel tecnológico en el uso de agua para riego manifiesta diferencias significativas dentro del territorio nacional, lo que implica desafíos importantes para la adopción de innovaciones en este sector (Odepa, 2012).

10. Falta de un área de protección de las captaciones de aguas subterráneas para consumo como agua potable, donde se prohíba desarrollar actividades contaminantes (Banco Mundial, 2013).
11. Falta de conocimiento de metales raros utilizados en nuevos dispositivos tecnológicos por la nueva minería. Los metales como el tantalio, el galio, el germanio, el indio, el niobio, el teluro y el talio se consideran elementos críticos para la tecnología, pero no se tiene información sobre sus efectos ambientales de extracción (Espejo *et al.*, 2018a, 2018b).
12. Tanto la investigación como el monitoreo de contaminantes emergentes y contaminantes derivados de productos de uso personal y farmacéutico (como antibióticos y fármacos de uso humano y veterinario) es prácticamente inexistente en el país. Es importante desarrollar programas que puedan determinar el impacto de este tipo de contaminación por lo general muy difícil de pesquisar, ya que efectos como la mutagenicidad, la disrupción endocrina o la resistencia antibiótica —por nombrar algunas— suelen ocurrir con bajos niveles de contaminantes.

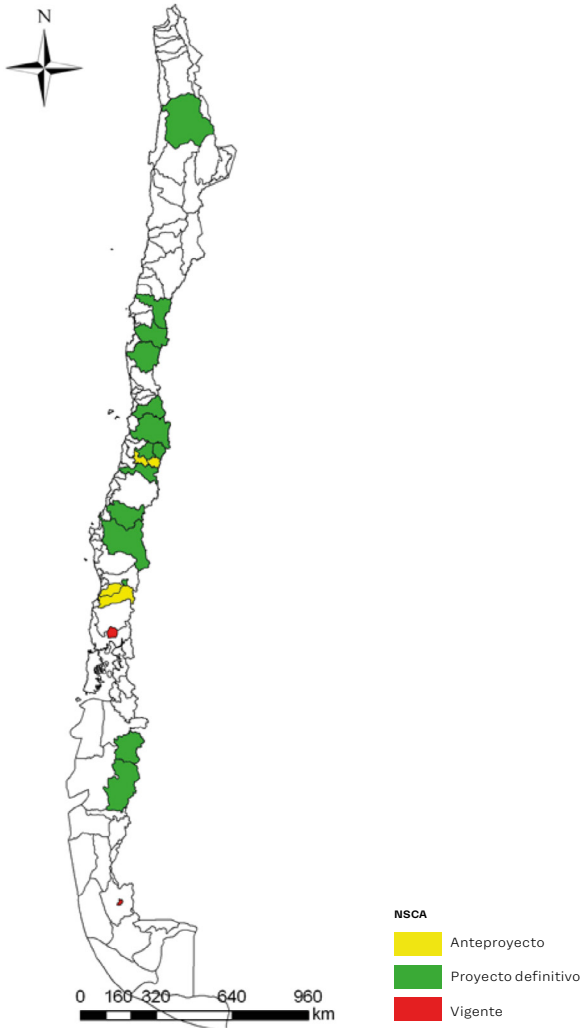


Figura 10. Cuencas con NSCA vigente y en proceso de establecimiento al año 2011. Fuente: MMA-EULA (2011).

4.6 RECOMENDACIONES

Un conjunto de acciones que el país puede tomar para mejorar la calidad del agua y avanzar en los objetivos de la Agenda 2030 son:

1. Implementar la gestión integrada de cuencas en el país.
2. Acelerar la protección de las cuencas a través de la implementación más eficiente de un programa de dictación de normas de calidad primaria y secundaria en los ríos y cuerpos de agua de Chile, más la posterior dictación de planes de prevención y descontaminación.
3. Crear un comité de expertos que asesore a la DGA —tanto en regiones como en Santiago— sobre la definición de políticas públicas para la gestión de la calidad del agua, en las que la ciencia tenga un rol principal en la toma de decisiones relacionadas con la calidad de agua.
4. Consagrar en forma legal un área de protección de las captaciones de aguas subterráneas para consumo como agua potable, según estándares internacionales.
5. Reformar la actual definición legal de *contaminación* que existe en la Ley 19.300, pues ella exige siempre superación de una norma. Para ello, se sugiere la definición de la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo Europeo del 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.[26]
6. Implementar y fortalecer programas regionales y municipales de monitoreo de la calidad del agua superficial y subterránea. Estos programas deben integrar esfuerzos de monitoreo públicos, participativos y privados, con ayuda de los gobiernos locales que tengan colaboración con la sociedad civil, ya sea junta de vecinos, juntas de vigilancia, ONG u otros.[27]
7. Aumentar las capacidades analíticas para incluir más parámetros fisicoquímicos (metales raros como tantalio, el galio, el germanio, el indio, el niobio, el teluro y el talio) y microbiológicos (cianobacterias y bacterias Gram negativas como *Helicobacter pylori*) a medir, los que pueden verse potencialmente exacerbados por la variabilidad y el cambio climático. De esta manera, estos parámetros pueden ser incluidos en un marco institucional y regulatorio con propósitos claros asociados con la gestión integrada de cuencas, de acuerdo con la visión, los objetivos y las metas asociados con la agenda de sostenibilidad.
8. Incorporar de manera explícita el cambio climático en el Código de Aguas, en una gestión de riesgos relacionados con el clima a través del proceso de plan seguridad del agua, según solicita la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017).
9. Controlar en forma periódica la calidad y la salinidad de aguas subterráneas en zonas costeras.
10. Implementar tecnología que favorezca la mejora de la calidad del agua en zonas expuestas a la intrusión salina.
11. La medición de contaminantes emergentes en el agua puede ser aún costosa para ser incorporada a una norma, pero como alternativa, se pueden utilizar bioensayos de ecotoxicidad aguda y crónica estandarizados y biomarcadores para diferentes especies, familias o géneros existentes en literatura. Esto debería ser considerado en el reglamento de dictación de normas (de calidad) y como medida de gestión de Ministerio del Medio Ambiente en el SEIA. De la misma manera, se recomienda la incorporación de bioensayos rápidos para la detección de agentes mutagénicos y desreguladores (disruptores) endocrinos en aguas.
12. Controlar de manera más efectiva la contaminación difusa del agua, por medio de conservar vegetación nativa en la zona riparia de cuerpos de agua (ríos, lagos, esteros), dado que actúan como filtros de contaminantes. Además, se recomienda hacer mejoras en el sistema de riego tecnificado para los productores agrícolas e incluir este control de la contaminación difusa en el SEIA y en los planes de descontaminación futuros.

26 En su artículo 2 número 33, la Directiva 2000/60/CE define *contaminación* como «la introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o calor en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, o de los ecosistemas terrestres que dependen directamente de ecosistemas acuáticos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente».

27 Por ejemplo, en calidad de agua rural, se puede crear una red para monitorear los sistemas de agua potable rural en colaboración con la comunidad y las entidades locales, además de una central de información que se encargue de manejar a nivel regional o local la información colectada. Esto podrá ayudar a condicionar un uso productivo de aguas subterráneas con déficit hídrico, para evitar situaciones críticas, lo que generará la participación de múltiples actores que proporcionarán viabilidad y legitimidad para una comprensión común de la calidad del agua.

13. Entregar educación ambiental en todos los niveles educacionales, culturales y políticos para armonizar conceptos ambientales y potenciar la calidad de agua a nivel nacional, por medio de la divulgación de información confiable y precisa a los hogares en los medios de comunicación, con el fin de inspirar el compromiso ciudadano. Esto sería tarea del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
14. Potenciar tecnologías sustentables para la mejora y protección de la calidad del agua a través de la utilización de sistemas naturales o soluciones basadas en la naturaleza. Los sistemas naturales incluyen humedales construidos o artificiales, entre otros, que se caracterizan por imitar de forma controlada procesos que se dan en la naturaleza para tratar el agua y mejorar su calidad, los que han sido utilizados en diferentes partes del mundo. Se utilizan principalmente en el tratamiento secundario y terciario de las aguas residuales domésticas (UN Water, 2017c), y son capaces de eliminar una variedad de contaminantes, incluidos sólidos en suspensión, material que demanda oxígeno, nutrientes, patógenos, metales y metaloides.
15. Estudiar el desarrollo de técnicas para la utilización de agua de mar y desalinización para cultivos agrícolas, minería y comunidades.

5. Medidas de adaptación

5.1 INTRODUCCIÓN

Existe suficiente evidencia científica para catalogar a los recursos hídricos entre los recursos naturales más afectados por el cambio climático. En Chile se han sucedido una serie de informes que destacan la condición de megasequía que vive el país desde hace una década. Según el informe a la nación del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), desde el año 2010 se ha registrado una disminución de 30% en las precipitaciones entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía, lo que ha afectado seriamente la disponibilidad hídrica (CR2, 2015).

Desde la política pública se ha avanzado en aspectos de adaptación y mitigación del cambio climático por medio de una serie de políticas y planes sectoriales, mientras que resta por elaborar el Plan de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos. No obstante, dada la transversalidad de los recursos hídricos, ellos ya han sido incluidos en algunos de los planes y políticas sectoriales.

5.2 METODOLOGÍA

Se revisaron políticas, planes, y estrategias de 11 sectores económicos: generación eléctrica, eficiencia energética, transporte bajo en emisiones, industria y minería, vivienda, agricultura, biodiversidad, forestal, desastres naturales e infraestructura. Luego de una revisión preliminar, el análisis se enfocó en ocho sectores, dada su relación con los recursos hídricos: agricultura, biodiversidad, forestal, ciudad, industria y minería, salud, vivienda e infraestructura.

La revisión de políticas, planes, y estrategias (**Tabla 4**) arrojó 95 medidas relacionadas con recursos hídricos. Cada una fue caracterizada según los siguientes indicadores:

- Adaptación / mitigación: Indica a qué acción responde la medida.
- Plazo de la medida: Indica si la medida es de corto, mediano, o largo plazo (la definición de plazos puede ser distinta entre sectores).
- Tipo de medida, según la siguiente clasificación:
- *Habilitantes.* Medida que genera las condiciones que permiten alcanzar los objetivos propuestos en la NDC (definición de un nuevo estándar de eficiencia energética para el sector vivienda, mejoras en riego, mapeo de zonas vulnerables, calidad de los combustibles, promoción de las ERNC, etcétera).
- *Inversión.* Medidas dirigidas a la instalación, construcción o renovación de obras públicas (redes de monitoreo, embalses, canales, viviendas sociales, etcétera).
- *Capacitación.* Medidas asociadas a la información y talleres a los ciudadanos para mejorar su capacidad de respuesta ante eventos climáticos (difusión, fondos concursables, educación ambiental, etcétera).
- *Fomento*. Medidas asociadas a la implementación de instrumentos financieros o promoción de uso de sistemas implementados (por ejemplo, seguros climáticos).
- *Estudio.* Medidas asociadas a estudios, diagnósticos, líneas de base.
- *Otras.* Medidas que no pueden ser claramente clasificadas en ninguna de las anteriores clases.
- Alcance: La medida puede ser internacional, nacional o regional.

Tabla 4. Catastro de políticas, planes y estrategias relacionadas con recursos hídricos. Fuente: Elaboración propia.

Sector	PPE	Objetivo
Agricultura	Política Nacional de Recursos Hídricos 2015 (PNRH)	Tiene como objetivo general «garantizar a las generaciones actuales y futuras, la disponibilidad y acceso al agua en estándares de calidad y cantidad adecuados mediante el uso racional y sustentable de los recursos hídricos, privilegiando en primer lugar el consumo humano». Este objetivo general se complementa con dos objetivos específicos. El primero está relacionado con el diseño de programas que permitan disminuir los efectos de la sequía a nivel nacional, y nos permitan estar mejor preparados para eventos futuros. Por otro lado, el segundo objetivo tiene relación con aspectos institucionales y jurídicos que faciliten la gestión de los recursos hídricos.
	Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2013 (ENRH)	Elaborada por el Ministerio de Obras Públicas, se define como la hoja de ruta que guiará la gestión de los recursos hídricos hasta el año 2025. El actuar del Ministerio en lo relativo a recursos hídricos está definido sobre 5 ejes: gestión eficiente y sustentable, mejor institucionalidad, enfrentar la escasez, equidad social y ciudadanía informada.
	Planes Regionales de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 (PRIGRH)*	El Ministerio de Obras Públicas, por medio de la Dirección de Planeamiento, desarrolla este plan de carácter indicativo, para cada una de las 16 regiones del país (actualmente existen 15, pues Biobío incluye Ñuble). Dada la heterogeneidad territorial de Chile, cada uno de los 15 planes tiene objetivos distintos, pero no todos comparten el fin último de disponer de servicios de infraestructura hídrica de calidad, promoviendo el uso eficiente del recurso hídrico para mejorar la competitividad de los sectores productivos y su integración en los mercados internacionales. Lo anterior es complementado con consideraciones de sustentabilidad y respeto a la identidad cultural de la región.
	PNACC sector silvoagropecurio 2013	El plan contempla medidas para incorporar o reforzar atributos de adaptación al cambio climático en la agricultura nacional. El plan identifica los siguientes atributos como deseables para una correcta adaptación al cambio climático: eficiencia en el uso de recursos, flexibilidad, sustentabilidad, y tolerancia a condiciones climáticas extremas, con un enfoque en la pequeña y mediana agricultura, que aporte a las acciones de mitigación.
	PNACC sector pesca y acuicultura 2015	Desarrollado por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura en conjunto con el Ministerio del Medio Ambiente. Define el marco general para el desarrollo de políticas públicas sectoriales, en las que se establecen las prioridades en materia de adaptación al cambio climático, se promueve la participación y coordinación de los grupos de interés, se entregan directrices que permiten focalizar y movilizar el financiamiento y los medios requeridos para contribuir al incremento de la capacidad de adaptación en los sectores más vulnerables, entre otros aspectos. Este PNACC se encuentra hoy en proceso de consulta ciudadana, por lo que las acciones específicas definidas pueden variar en consecuencia.
Biodiversidad	PNACC biodiversidad 2014	Este plan es el marco sobre el cual se desarrolla la política pública. Contribuye a ordenar prioridades, movilizar a los actores, obtener el financiamiento y desplegar los medios requeridos para salvaguardar la biodiversidad nacional. El objetivo principal del plan es «fortalecer la capacidad del país en todos sus niveles para responder a los desafíos climáticos y a la creciente presión humana sobre los bienes y servicios de los ecosistemas chilenos, identificando e implementando medidas de relevancia nacional sinérgicas entre conservación de la biodiversidad y su adaptación al cambio climático, que permitan, por una parte, aminorar las consecuencias negativas del cambio climático sobre los ecosistemas y la población y, por otra, asegurar la provisión continua de bienes y servicios ecosistémicos».
Forestal	Política Forestal 2015-2035	Tiene por objetivo identificar instrumentos y mecanismos, elaborar planes y programas para lograr alcanzar un desarrollo forestal sustentable, «como la contribución del sector forestal chileno al desarrollo económico-productivo, ecológico y social-cultural del país, mediante la conservación, el manejo integral y el aprovechamiento y uso racional de los recursos, de las cuencas y los ecosistemas forestales».
Industria y minería	Programa Nacional de Consumo y Producción Sustentables 2016	Contribuye a la transición hacia patrones de consumo y producción más sustentables, al generar un desacople del crecimiento y desarrollo del país de la degradación del medio ambiente.
Salud	Plan de Adaptación al Cambio Climático para Salud 2016	Fortalece la capacidad del país en el sector salud para responder al desafío del cambio climático, identificando e implementando medidas a corto, mediano y largo plazo que permitan aminorar las consecuencias negativas que este fenómeno producirá sobre la salud de la población, y asegura el funcionamiento adecuado de los servicios y redes de salud, considerando las nuevas condiciones climáticas y los impactos proyectados.
Vivienda	Estrategia Nacional de Construcción Sustentable 2013	Busca ser una herramienta orientadora que establezca los principales lineamientos para impulsar la integración de criterios de sustentabilidad en el área de la construcción en Chile.
	Programa Construye 2025	Busca transformar la manera de construir edificaciones en Chile, para mejorar la productividad de la industria en toda su cadena de valor y generar un cambio cultural en torno al valor de la sustentabilidad, considerando el impacto del ciclo de vida del inmueble y el bienestar de las personas
Infraestructura	Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022	Incorpora la problemática del cambio climático en los servicios de infraestructura que provee el Ministerio de Obras Públicas, con el fin de adaptarse a los cambios hidrometereológicos futuros en un marco de resiliencia y sustentabilidad, además de contribuir a mitigar la generación de gases de efecto invernadero en las distintas fases del ciclo de vida de los proyectos.
Ciudades	Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades.	Propone lineamientos de adaptación para las ciudades frente al cambio climático, que fortalecen, con una mirada prospectiva, la capacidad de respuesta y la de sus habitantes frente a sus diferentes impactos, propendiendo mejorar el nivel de equidad territorial.

* Se excluye de este informe el análisis de las 1.500 acciones contenidas en los PRIGRH, ya que por el volumen distorsionaría la información de los otros planes. Las medidas contenidas son regionales, con enfoque en la adaptación al cambio climático, específicamente inversiones (82% de las medidas), y con un marcado enfoque de acciones de corto plazo (menos de diez años).

La información sistematizada, fue un insumo a la mesa de adaptación, específicamente al informe Lineamientos para el desarrollo de planes de adaptación al cambio climático: Aplicación a los recursos hídricos, donde se presenta en forma resumida.

5.3 RESULTADOS

Del total de acciones de política, se identificaron 74 políticas, planes, y estrategias relacionados con acciones de adaptación y 13 con acciones de mitigación. Los restantes corresponden a acciones de adaptación y mitigación (todos asociados a biodiversidad). Las **Figuras 11** y **12** muestran la participación porcentual de cada sector.

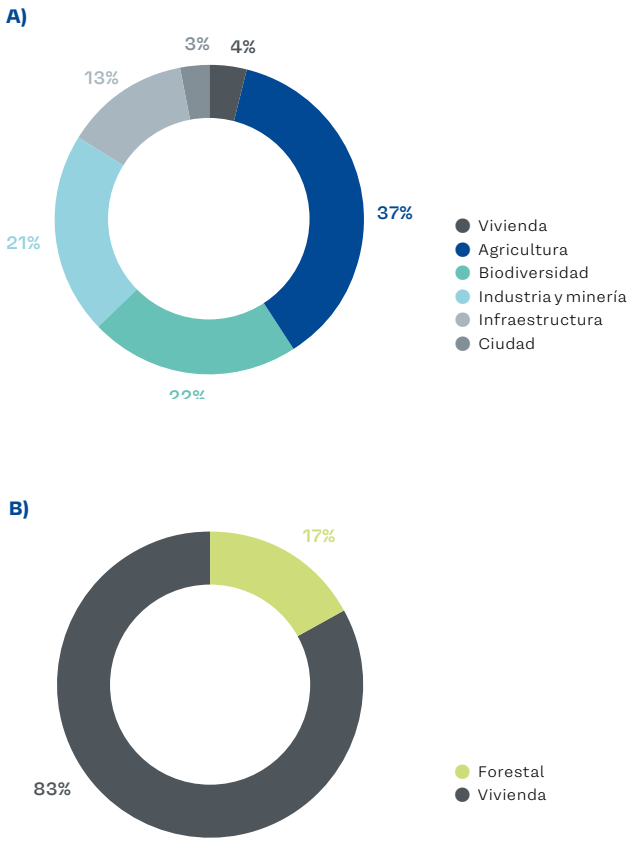


Figura 11. A) Acciones de adaptación por sector. B) Porcentaje de acciones de mitigación por sector.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al plazo de la medida, predominan las acciones de largo plazo con 53 acciones, seguida por mediano con 31 y corto plazo con 11 (**Figuras 13**, **14** y **15**). Con respecto al tipo de medida, la gran mayoría corresponde a medidas habilitantes con 36, seguida por estudio con 19, e inversión con 14. Las restantes medidas corresponden a fomento y capacitación (**Figuras 16**, **17** y **18**). Por último, respecto del alcance, la mayoría de las acciones son de alcance nacional, con 80 acciones reportadas, mientras que 9 son acciones regionales, y son 7 interregionales (**Figuras 19 y 20**).

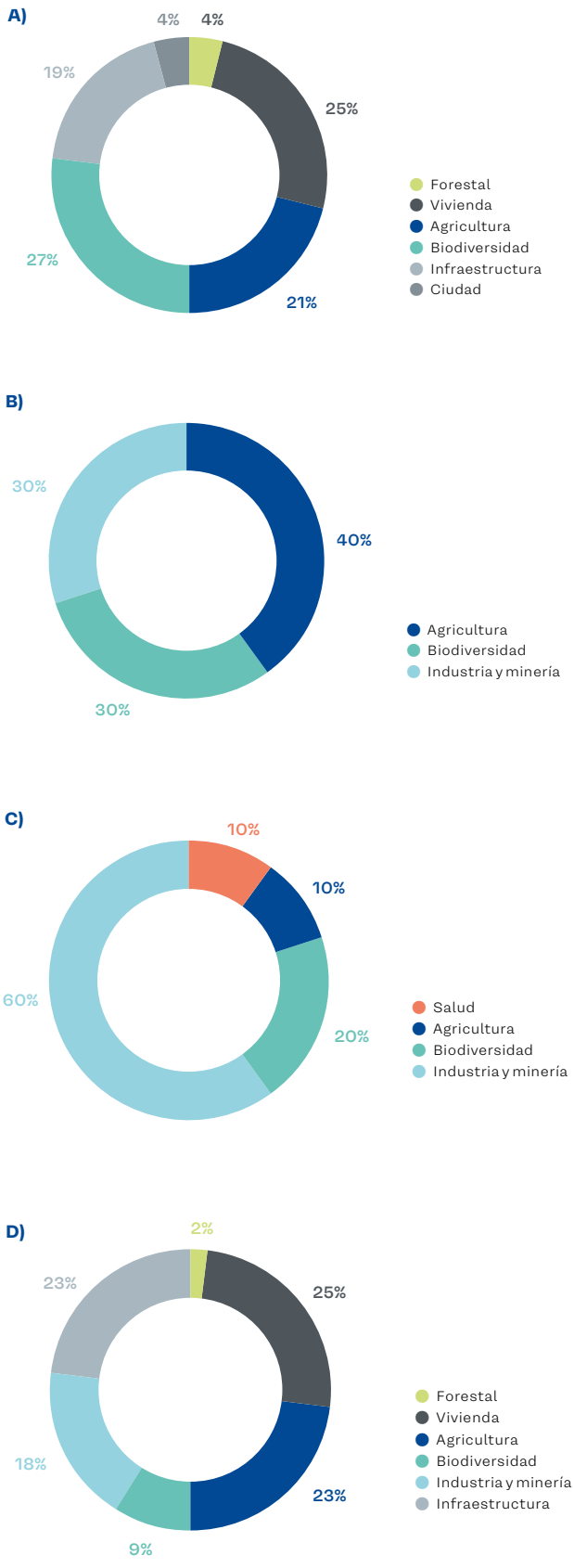


Figura 12. Porcentaje de acciones, por sector: A) De largo plazo. B) De mediano plazo. C) De corto plazo. D) Habilitantes.

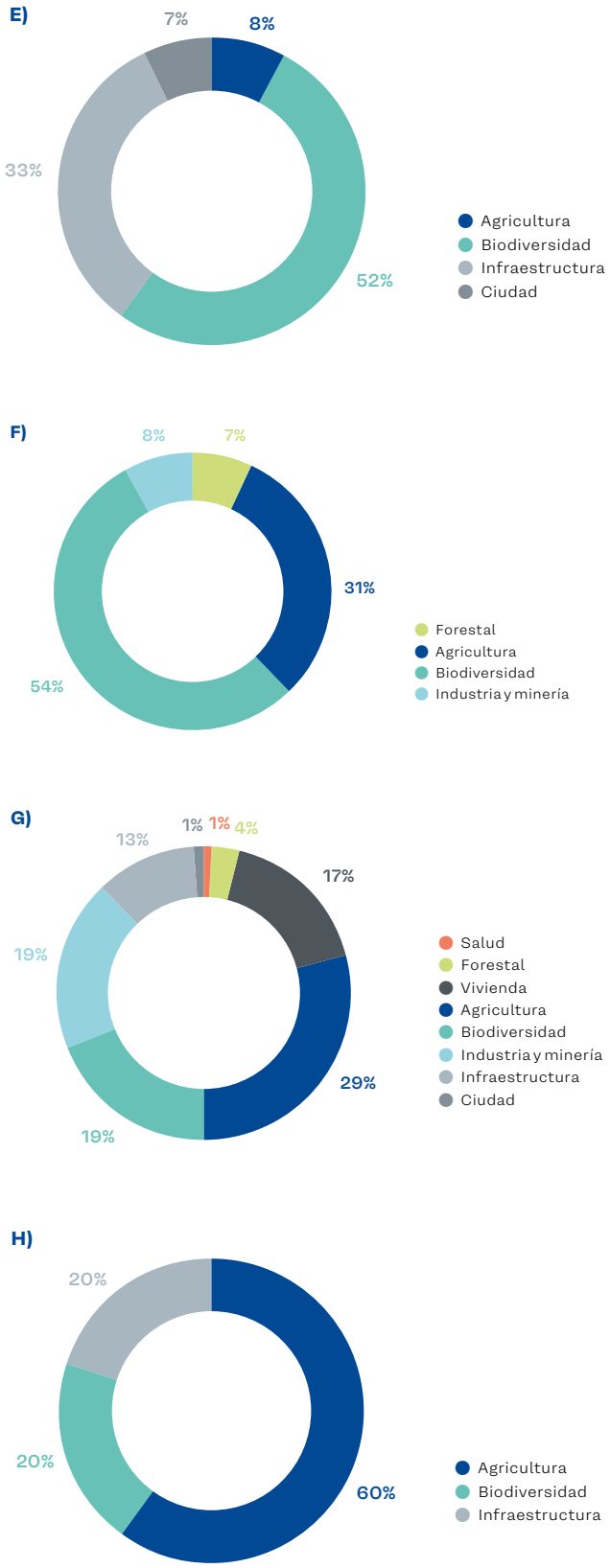


Figura 12 (continuación). Porcentaje de acciones, por sector: E) De estudio. F) De inversión. G) De alcance nacional. H) De alcance interregional.

Esta clasificación de planes, políticas y estrategias relacionadas a recursos hídricos indica que su incorporación en las diversas políticas analizadas parece ser la adecuada, en cuanto la mayoría son acciones de adaptación, con una perspectiva de largo plazo, enfocadas en generar ambientes habilitantes, y con un alcance nacional.

Sobre la base de la información sistematizada, y con miras a la elaboración del Plan de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos (PACC-RRHH), los desafíos para la política públicas son:

- Elaborar las acciones del PACC-RRHH aprovechando potenciales sinergias con las acciones de planes, políticas y estrategias existentes.
- Evitar duplicación de esfuerzos, e incluso potenciales conflictos de objetivos, entre planes, políticas y estrategias actuales y las acciones que se propondrán como parte del PACC-RRHH.
- Mantener los lineamientos existentes de planes, políticas y estrategias: acciones de adaptación, con una perspectiva de largo plazo, enfocadas en generar ambientes habilitantes, y con un alcance nacional.
- Sobre el alcance nacional, se recomienda establecer los mecanismos por medio de los cuales se incluirá la heterogeneidad territorial que caracteriza a Chile.
- Dados los múltiples usos del agua, se recomienda ponderar los efectos que las acciones del PACC-RRHH tendrán sobre los sectores sociales, económicos y los ecosistemas. Esto es relevante cuando las políticas estén en conflicto (biodiversidad frente a producción agrícola).

REFERENCIAS

Almanza V., O. Parra, C. De M. Bicudo, M. González, M. López y R. Urrutia (2016). «Floraciones de fitoplancton y variación de la estructura comunitaria fitoplanctónica en tres lagos someros eutróficos de Chile Central». *Gayana Botánica* 73(2): 191-205. doi: 10.4067/S0717-66432016000200191.

Almanza, V., P. Pedreros, D. H. Laughinghouse, J. Félez, O. Parra, M. Azócar y R. Urrutia (2019). «Association between trophic state, watershed use and blooms of cyanobacteria in south-central Chile». *Limnologica* 75: 30-41. doi: 10.1016/j.limno.2018.11.004.

Arriagada, L, O. Rojas, J. L. Arumí, J. Munizaga, C. Rojas, L. Farias y C. Vega Alay (2019). «A new method to evaluate the vulnerability of watersheds facing several stressors: A case study in Mediterranean Chile». *Science of The Total Environment* 651(1): 1.517-1.533. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.237.

Arumí, J. L., D. Rivera, E. Holzapfel y E. Muñoz (2013). «Effect of drought on groundwater in a Chilean irrigated valley». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 166(5): 231-241.

Atria, F. y C. Salgado (2015). *La propiedad, el dominio público y el régimen de aprovechamiento de aguas en Chile*. Santiago: Thomson Reuters.

Bambach, N., D. Morales-Moraga y F. Meza (2019). «Tendencias y proyecciones de cambio climático». En J. C. Castilla, F. Meza, S. Vicuña, P. A. Marquet, J. P. Montero (editores), *Cambio climático en Chile: Ciencia, mitigación y adaptación*. Santiago: Ediciones UC.

Banco Mundial (2011). *Chile: Diagnóstico de la gestión de recursos hídricos*. Santiago: Banco Mundial.

—. (2013). *Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*. Washington D. C.: Banco Mundial.

—. (2019). *Quality Unknown: The invisible water crisis*.

Barbosa, O. y P. Villagra (2015). «Socio-Ecological Studies in Urban and Rural Ecosystems in Chile». En R. Rozzi, F. S. Chapin, J. B. Callicott, S. Pickett, M. Power, J. J. Armesto y R. H. May Jr. (editores), *Earth Stewardship: Linking ecology and ethics in theory and praxis*. Verla: Springer.

Barrera Brassesco, S. L. (2011). «Análisis del nivel hídrico y las condiciones del humedal de la laguna de Batuco». Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Universidad de Chile.

Barría, P., M. Rojas, P. Moraga, A. Muñoz, D. Bozkurt y C. Álvarez-Garretón (2019). «Anthropocene and streamflow: Long-term perspective of streamflow variability and water rights». Elementa: Science of the Anthropocene 7(1): 2-15. doi: 10.1525/elementa.340.

Boettinger, C. (2014). «Variables ambientales en el Código de Aguas». En J. Aranda, X. Insunza, S. Montenegro, P. Moraga, A. L. Uriarte (editores), *Actas de las VII Jornadas de Derecho Ambiental*. Santiago: Thompson Reuters.

—. (2019). «Análisis crítico de la Declaración de Escasez» (pp. 345-376). En *La Regulación de las aguas: nuevos desafíos del siglo XXI*. Santiago: DER.

Boisier, J. P., C. Álvarez-Garretón, R. R. Cordero, A. Damiani, L. Gallardo, R. D. Garreaud, F. Lambert, C. Ramallo, M. Rojas y R. Rondanelli (2018). «Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations». *Elementa: Science of the Anthropocene* 6(1): 74. doi: 10.1525/elementa.328.

Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud y F. Muñoz (2016). «Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile». *Geophysical Research Letters* 43(1): 413-421.

Bondu, R., V. Cloutier, E. Rosa y M. Benzaazoua (2016). «A review and evaluation of the impacts of climate change on geogenic arsenic in groundwater from fractured bedrock aquifers». *Water, Air, & Soil Pollution* 227(9): 296. doi: 10.1007/s11270-016-2936-6.

Bozkurt, D., M. Rojas, J. P. Boisier y J. Valdivieso (2017). «Climate change impacts on hydroclimatic regimes and extremes over Andean basins in central Chile». *Hydrology and Earth System Sciences*. doi: 10.5194/hess-2016-690.

Castañeda, B. E. (1999). «An index of sustainable economic welfare (ISEW) for Chile». *Ecological Economics* 28(2): 231-244. doi: 10.1016/S0921-8009(98)00037-8.

Castilla, J. C. (1983a). «Artificial Sandy Beaches and Environmental Impacts due to Dumping of Copper Mine Tailings at Chañaral Area, Chile». En *Sandy Beaches as Ecosystems* (pp. 749-750). Dordrecht: Springer.

—. (1983b). «Environmental Impacts in Sandy Beaches of Copper Mine Tailing at Chañaral, Chile». *Marine Pollution Bulletin* 14: 459-464.

Castilla, J. C. y E. Nealler (1978). «Marine environmental impact due to mining activities of El Salvador Copper Mine, Chile». *Marine Pollution Bulletin* 9(3): 67-70.

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica*. Santiago.

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, y OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2016). *Evaluación de Desempeño Ambiental Chile*. Santiago.

Celume, T. (2013). *Régimen público de las aguas*. Santiago: Thomson Reuters.

Chamorro, S., C. Barata, B. Piña, M. Casado, A. Schwarz, K. Sáez y G. Vidal (2018). «Toxicological analysis of acid mine drainage by water quality and land use bioassays». *Mine Water and the Environment* 37: 88-97. doi: 10.1007/s10230-017-0472-2.

Chamorro, S., V. Hernández, V. Matamoros, C. Dominguez, J. Becerra, G. Vidal, B. Piña y J. M. Bayona (2013). «Chemical characterization of organic microcontaminant sources and biological effects in riverine sediments impacted by urban sewage and pulp mill discharges». *Chemosphere* 90(2): 611-619. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.08.053.

REFERENCIAS

Chamorro, S., D. López, P. Brito, M. Jarpa, B. Piña y G. Vidal (2016). «Sublethal effects of chlorine-free kraft mill effluents on Daphnia magna Bull». *Environ. Contam. Toxicol.* 97: 843-847.

Chiang, G., R. Barra, M. Díaz-Jaramillo, M. Rivas, P. Bahamonde y K. R. Munkittricka (2015) «Estrogenicity and intersex in juvenile rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) exposed to Pine/Eucalyptus pulp and paper production effluent in Chile». *Aquatic Toxicology* 164: 126-134. doi: 10.1016/j.aquatox.2015.04.025.

Climent, J., E. Herrero-Hernández, J. Sánchez-Martin, M. Rodríguez-Cruz, P. Pedreros y R. Urrutia (2019). «Residues of pesticides and some metabolites in dissolved and particulate phase in surface stream water of Cachapoal River basin, central Chile». *Environmental Pollution* 251: 90-101. doi: 10.1016/j.envpol.2019.04.117.

CNR, Comisión Nacional de Riego (2010). *Diagnóstico de fuentes de agua no convencionales en el regadío interregional*. Santiago: CNR.

Costa, E. (2016). «Diagnóstico para un cambio: Los dilemas de la regulación en Chile». *Revista Chilena de Derecho* 43(1): 335-354. doi: 10.4067/S0718-34372016000100014.

CR2, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a la nación*. Santiago: CR2.

Dadea, C., L. Fanfani, T. J. Keegan, M. Farago e I. Thornton (2001). «Sequential extraction in stream sediments from the Loa basin (Northern Chile)». *Water-Rock Interaction*, 1-2: 1.055-1.058.

Dal Pont, I., S. Moreiras, F. Santibáñez, D. Araneo y F. Ferrando (2019). «Debris flows triggered from melt seasonal snow and ice within the active layer in the semi-arid Andes». *Permafrost and Periglacial Processes*. doi: 10.1002/ppp.2020.

Daniele, L., C. Cannatelli y J. T. Buscher (2019). «Chemical composition of Chilean bottled waters: Anomalous values and possible effects on human health». Science of the Total Environment, 689, 526-533. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.165.

Debels, P., R. Figueroa, R. Urrutia, R. Barra y X. Niell (2005). «Evaluation of Water Quality in Chillán River (Central Chile) Using Physicochemical Parameters and a Modified Water Quality Index». *Environmental Monitoring and Assessment* 110(1-3): 301-322. doi: 10.1007/s10661-005-8064-1.

Delgado, V. (2019). «Hacia un nuevo derecho de aguas: Ambientalizado y resiliente». *Justicia Ambiental* 11(11): 77-83.

Delgado V., J. L. Arumí y O. Reicher (2017a). «Lessons from Spanish and us law for adequate regulation of groundwater protection areas in Chile, especially drinking water deposits». *Water Resource Management* 31(14): 4.699-4.713. doi: 10.1007/s11269-017-1761-z.

—. (2017b). «Problemas que plantea la regulación de las áreas de protección de los derechos de aprovechamiento de las aguas subterráneas en Chile, cuando sirven a captaciones de agua potable». *Revista de Derecho, Universidad Católica del Norte* 24(2): 143-181. doi: 10.4067/S0718-97532017000200143.

Delgado, V. y Ó. Reicher (2017). «La urgente incorporación del principio de participación ciudadana en el derecho de aguas chileno: Un enfoque desde los instrumentos de gestión ambiental». *Revista de Derecho Ambiental* 8: 154-183. doi: 10.5354/0719-4633.2017.47915.

Della Croce N., O. Parra, J. Stuardo, A. Arrizaga, R. Ahumada, J. Chong y C. Oyarzún (1992). «El río Biobío y el mar adyacente como unidad ambiental». En F. Faranda y O. Parra (editores), *Gestión de los recursos hídricos del río Biobío y del área costera marina adyacente* (pp. 11-61). Serie Monografía Científica, volumen 1. Santiago: Dirección General de Aguas.

DGA, Dirección General de Aguas (2015). *Atlas del agua*. Santiago: DGA.

—. (2017a). *Actualización del balance hídrico nacional: Informe final*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.

—. (2017b). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile: Informe final*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.

—. (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.

Donoso, G., J. Cancino y A. Magri A. (1999). «Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile». *Water Science and Technology* 39(3): 49-60.

Duhart, D. (2019). «Debilidad institucional en la gestión de las aguas en Chile: reflexiones a partir del estudio de los sistemas de Inglaterra y Australia (New South Wales) y otras experiencias comparadas». En *La Regulación de las aguas: nuevos desafíos del siglo XXI* (pp. 3-46). Santiago: DER.

Eisler, R. (2003). «Health risks of gold miners: a synoptic review». *Environ Geochem Health* 25(3): 325-345.

Espejo, W., C. Galban-Malagon y G. Chiang (2018). «Risks from technology-critical metals after extraction». *Nature* 557(7.706): 492. doi: 10.1038/d41586-018-05234-6.

Espejo, W., D. Kitamura, K. Kidd, J. Celis, S. Kashiwada, C. Galban-Malagon, R. Barra y G. Chiang (2018b). «Biomagnification of tantalum through diverse aquatic food webs». *Environ. Sci. Technol. Lett.* 5(4): 196-201.

Espejo, L., N. Kretschmer, J. Oyarzún, F. Meza, J. Núñez, H. Maturana, G. Soto, P. Oyarzo, M. Garrido, F. Suckel, J. Amezaga y R. Oyarzún (2012). «Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North-Central Chile». *Environmental Monitoring and Assessment* 184(9): 5.571-5.588.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013). *Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma: FAO.

Fernández, E., A. Grilli, D. Álvarez y R. Aravena (2017). «Evaluation of nitrate levels in groundwater under

REFERENCIAS

agricultural fields in two pilot areas in central Chile: A hydrogeological and geochemical approach». *Hydrological Processes* 31(6): 1.206-1.224.

Figueroa F., P. Pedreros, F. Cruces, R. Abdala-Díaz, V. Hernández, J. Becerra y R. Urrutia (2018). «Effect of Didymosphenia geminata coverage on the phytobenthic community in an Andean basin of Chile». *Revista Chilena de Historia Natural* 91(1): 10. doi: 10.1186/s40693-018-0080-y.

Flores, M. *et al.* (2017). «Surface water quality in a sulfide mineral-rich arid zone in North-Central Chile: Learning from a complex past, addressing an uncertain future». *Hydrological Processes* 31(3): 498-513.

Frazier, S. (1999). *Visión General de los Sitios Ramsar*. Wageningen: Wetlands International.

Fuentes, I., M. Casanova, Ó. Seguel, F. Nájera y O. Salazar (2014). «Morphophysical pedotransfer functions for groundwater pollution by nitrate leaching in Central Chile». *Chilean Journal of Agricultural Research* 74(3): 340-348. doi: 10.4067/S0718-58392014000300013.

Fundación Amulén (2019). *Pobres de agua*. Santiago: Centro UC Derecho y Gestión de Agua, Centro UC Cambio Global.

Fundación Chile (2018). *Resumen estratégico. Radiografía del agua. Brecha y riesgo hídrico en Chile*.

Fundación Newenko (2019). *Escasez hídrica en Chile*. Santiago: Fundación Newenko.

Gaete, H., F. Aranguiz, G. Cienfuegos y M. Tejos (2007). «Heavy metals and toxicity of waters of the Aconcagua river in Chile». *Quimica Nova* 30(4): 885-891.

Garreaud R., C. Álvarez-Garretón, J. Barichivich, J. P. Boisier, D. Christie, M. Galleguillos, C. LeQuesne, J. McPhee, M. Zambrano-Bigiarini (2017). «The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation». *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2017: 1-37 DOI: 10.5194/hess-2017-191.

Gleick, P. H. (2000). «A Look at Twenty-first Century Water Resources Development». *Water International* 25(1): 127-138. doi: 10.1080/02508060008686804.

González, D. (2013). *Gestión de la recarga de acuíferos como estrategia para la seguridad hídrica.*

González, H. E., D. Bozkurt, F. Cereceda-Balic, R. Cordero, F. Fernandoy, J. L. Iriarte, S. MacDonell, J. McPhee, E. Poulin, A. Rivera y M. Schaefer (2019). «Criósfera chilena y antártica: Recomendaciones desde la evidencia científica». Informe de la mesa Criósfera y Antártica. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Grafton, R. Q., J. Williams, C. J. Perry, F. Molle, C. Ringler, P. Steduto, B. Udall, S. A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick y R. G. Allen (2018). «The paradox of irrigation efficiency». *Science* 361(6.404): 748-750. doi: 10.1126/science.aat9314.

Gubler, S., S. Hunziker, M. Begert, M. Croci-Maspoli, T. Konzelmann, S. Bronnimann, C. Schwierz, C. Oria y G. Rosas (2017). «The influence of station density on climate data homogenization». *International Journal of Climatology* 37(13): 4.670-4.683. doi: 10.1002/joc.5114.

Guerra, P., C. González, C. Escauriaza, G. Pizarro y P. Pastén (2016). «Incomplete Mixing in the Fate and Transport of Arsenic at a River Affected by Acid Drainage». *Water Air Soil Pollut.* 227: 73. doi: 10.1007/s11270-016-2767-5.

Guerra, P., K. Simonson, C. González, J. Gironás, C. Escauriaza, G. Pizarro, C. Bonilla y P. Pastén (2016). «Daily FreezeThaw Cycles Affect the Transport of Metals in Streams Affected by Acid Drainage». *Water* 8(3): 74.

Gurung, P. (2015). «Inter-basin Water Transfer: Is this a Solution for Water Scarcity?». doi: 10.13140/RG.2.1.3592.5607.

Gutiérrez J. S., J. G. Navedo y A. Soriano-Redondo (2018). «Chilean Atacama site imperilled by lithium mining». *Nature* 557(7.706):492. doi: 10.1038/d41586-018-05233-7.

Hargreaves G. H. y R. G. Allen (2003). «History and Evaluation of Hargreaves Evapotraspiration Equation». *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1). doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)

Herrera Apablaza V., N. Gutiérrez Roa, S. Córdova Molina, J. Luque Marín, M. Idelfonso Carpanchay, A. Flores Riveras y A. L. Romero (2018). «Calidad del agua subterránea para el riego en el oasis de Pica, norte de Chile». *Idesia (Arica)* 36(2): 181-191. doi: 10.4067/s0718-34292018005000101.

Hervé, D. (2015). *Justicia ambiental y recursos naturales*. Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.

Hidalgo, N. (2018). «Evaluación del impacto del cambio climático en los eventos de sequía de las regiones de Ñuble y Biobío». Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción.

Hubbard, K. G. (1994). «Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA». *Agric. Forest Met.* 68: 29-41.

International River Foundation (2017). *Annual Report 2016-2017*.

Izko, X. y D. Burneo (2003). *Herramientas para la valoración y manejo forestal sostenible de los bosques sudamericanos*. Gland: UICN.

Jiménez Cisneros, B. E., T. Oki, N. W. Arnell, G. Benito, J. G. Cogley, P. Döll, T. Jiang y S. S. Mwakalila, (2014). «Freshwater resources». En C.B. Field et al. (editores), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (pp. 229-269). Cambridge: Cambridge University Press.

Lara, A., C. Little, R. Urrutia, J. McPhee, C. Álvarez-Garretón, C. Oyarzún, D. Soto, P. Donoso, L. Nahuelhual, M. Pino e I. Arismendi (2009). «Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile». *Forest Ecology and Management* 258(4): 415-424.

Lara, A., M. E. Solari, M. D. R. Prieto y M. P. Peña (2012) «Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión delos bosques valdivianos lluviosos de Chile (35º-43º30′ S)». *Bosque* 33(1): 13-23.

REFERENCIAS

Leiva, E., C. Rámila, I. T. Vargas, C. Escauriaza, C. A. Bonilla, G. E. Pizarro, J. M. Regan y P. A. Pastén (2014). «Natural attenuation process via microbial oxidation of arsenic in a high Andean watershed». *Science of the Total Environment* 466-467: 490-502.

Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood y S. J. Burges (1994). «A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models». *Journal of Geophysical Research* 99(7): 14.415-14.428. doi: 10.1029/94JD00483.

Magaritz, M., R. Aravena, H. Pena, O. Suzuki y A. Grilli (1990). «Source of Ground-Water in the Deserts of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Ground-Water from the Andes». *Groundwater* 28(4): 513-517. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb01706.x.

Mancilla Villalobos, R., J. Zúñiga, E. Salgado, M. C. Schiappacasse y R. Chamy Maggi (2013). «Constructed wetlands for domestic wastewater treatment in a Mediterranean climate region in Chile». *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(4). doi: 10.2225/vol16-issue4-fulltext-5.

Masotti, I. M., P. Aparicio-Rizzo, M. A. Yevenes, R. Garreaud, L. Belmar, L. Farías (2018). «The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the Central Chile Coast (33º-37ºS): Seasonal cycle and interannual variability». Front. Mar. Sci. 5:423. doi: 10.3389/fmars.2018.00423

Meza, F. J., S. Vicuña, M. Jelinek, E. Bustos y S. Bonelli (2014). «Assessing water demands and coverage sensitivity to climate change in the urban and rural sectors in central Chile». *Journal of Water and Climate Change* 5(2): 192-203. doi: 10.2166/wcc.2014.019.

Middleton N. J. y D. S. G. Thomas (editores) (1997). *World Atlas of Desertification*. Londres: Arnold.

Millennium Assessment (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington D.C.: Millenium Ecosystem Assessment.

Minsal, Ministerio de Salud (2013). «Tratamiento de erradicación de helicobacter pylori en paciente con úlcera péptica». Guía clínica AUGE. Disponible en https://diprece.minsal.cl/wrdprss_minsal/wp-content/uploads/2014/09/Helicobacter-Pylori-en-paciente-con-úlcera-péptica.pdf

MMA, Ministerio del Medio Ambiente (2016). *Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de Las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Santiago: Gobierno de Chile.

—. (2019). «Determinación del Impacto Climático en el Borde Costero».

MMA-EULA (2011). «Estudio para análisis de la factibilidad técnica y económica de normar por carga, en las normas de emisión considerando capacidad del cuerpo receptor». ID 1588-87-LP10.

Montecinos, M. *et al.* (2016). «Persistence of Metal-rich Particles Downstream Zones of Acid Drainage Mixing in Andean Rivers». Fall Meeting American Geophysical Union. San Francisco.

Nahuelhual, L., A. Carmona, P. Lozada, A. Jaramillo y M. Aguayo (2013). «Mapping recreation and ecotourism as a cultural ecosystem service: An application at the local level in Southern Chile». *Applied Geography* 40: 71-82. doi: 10.1016/j.apgeog.2012.12.004.

Nichols G., I. Lake y C. Heaviside (2018). «Climate change and water related infectious diseases». *Atmosphere* 9(10): 385. doi: 10.3390/atmos9100385.

Novoa, V., R. Ahumada-Rudolph, O. Rojas, K. Sáez, F. De la Barrera y J. L. Arumí (2019). «Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile». *Science of the Total Environment* 670: 188-199. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.127.

Novoa, V., O. Rojas, J. L. Arumí, C. Ulloa, R. Urrutia y A. Rudolph (2016). «Variability in the water footprint of cereal Crops, Cachapoal River, Chile». *Tecnologia y Ciencias del Agua* 7(2).

Núñez, J., A. Vergara, C. Leyton, C. Metzkes, G. Mancilla y D. Bettancourt (2017). «Reconciling Drought Vulnerability Assessment Using a Convergent Approach: Application to Water Security in the Elqui River Basin, North-Central Chile». *Water* 9(8): 589. doi: 10.3390/w9080589.

Ocampo-Melgar, A., S. Vicuña, J. Gironás, R. G. Varady y C. A. Scott (2016). «Scientists, Policymakers, and Stakeholders Plan for Climate Change: A Promising Approach in Chile's Maipo Basin». *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 58(5): 24-37. doi: 10.1080/00139157.2016.1209004.

OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (2005). *Evaluaciones de desempeño ambiental: Chile*. Santiago.

—. (2016). *Evaluaciones de desempeño ambiental: Chile*. Santiago.

—. (2017). *Gaps and Governance Standards of Public Infrastructure in Chile: Infrastructure Governance Review*. París: OECD Publishing.

Ochoa-Tocachi, B. F., J. D.Bardales, J. Antiporta, K. Pérez, L. Acosta, F. Mao, Z. Zulkafli, J. Gil-Ríos, O. Angulo, S. Grainger, G. Gammie, B. De Bièvre y W. Buytaert (2019). «Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security». *Nature Sustainability* 2: 584-593. doi: 10.1038/s41893-019-0307-1.

O'Connell, E. (2017). «Towards Adaptation of Water Resource Systems to Climatic and Socio-Economic Change». Water Resources Management 31 . doi: 10.1007/s11269-017-1734-2.

Odepa, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2012). *Estimación y caracterización de la demanda de la mano de obra asociada a la fruticultura de exportación*. Santiago: Odepa.

Odepa, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2017). *Agricultura chilena: Reflexiones y desafíos al 2030*. Santiago: Odepa.

OMS, Organización Mundial de la Salud (2017). *Climate resilience water safety plans: Managing health risks associated with climate variability and change*. Ginebra: OMS.

Orrego, R., J. Guchardi, R. Krausse y D. Holdway (2010). «Estrogenic and anti-estrogenic effects of wood extractives present in pulp and paper mill effluents on rainbow trout». *Aquat. Toxicol.* 99 (2): 160-167.

REFERENCIAS

Oyarzún, C., R. Godoy y N. E. C. Verhoest (2008). «Interactions between hydrology and biogeochemical cycles of native vegetated mountain watersheds under different management, southern Chile». En *Proceedings of the international interdisciplinary conference on predictions for hydrology, ecology, and water resources management: Using data and models to benefit society-HydroPredict* (pp. 49-52). Praga: Czech Association of Hydrogeologists.

Oyarzun, J. *et al.* (2012). «Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile». *Journal of Geochemical Exploration* 115: 47-58.

Parra, O., J. C. Castillo, H. Romero y R. Quiñones (editores) (2006). *La cuenca hidrográfica del río Itata. Aportes científicos para su gestión sustentable*. Concepción: Editorial Universidad de Concepción.

Pastén, P., A. Vega, P. Guerra, J. Pizarro y K. Lizama (2019). «Calidad del agua en Chile: Avances, desafíos y perspectivas». En IANAS Interamerican Network of Academies of Science (editores). *Calidad del agua en las Americas: Riesgos y oportunidades*. IANAS.

Pastén, P. *et al.* (2015). «Geochemical and Hydrologic Controls of Copper-Rich Surface Waters in the Yerba Loca-Mapocho System». American Geophysical Union. San Francisco.

Pérez, C. A., M. D. DeGrandpre, N. A. Lagos, G. S. Saldías, E. K. Cascales y C.A. Vargas (2015). «Influence of climate and land use in carbon biogeochemistry in lower reaches of rivers in central southern Chile: Implications for the carbonate system in river-influenced rocky shore environments». *JGR: Biogeosciences*, 120(4): 673-692. doi:10.1002/2014JG002699.

Pérez, T., C. Mattar y R. Fuster (2018). «Decrease in snow cover over the Aysén river catchment in Patagonia, Chile». *Water* 10(5): 619. doi: 10.3390/w10050619.

Pérez, N., G. Morales, A. Schwarz, M. Macías, M. T. Alarcón-Herrera y G. Vidal (2016). «Humedales construidos para efluentes mineros». En M. T. Alarcón-Herrera, F. Zurita, J. Lara-Borrero y G. Vidal (editores), *Humedales de tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Pino, P., V. Iglesias, R. D. Garreaud, S. Cortés, M. Canals, W. Folch, S. Burgos, K. Levy, K. Naeher y K. Steenland (2015). «Chile confronts its environmental health future after 25 years of accelerated growth». *Annals of Global Health* 81(3): 354-367.

Pizarro, J., M. A. Rubio y X. Castillo (2003). «Study of chemical speciation in sediments: An approach to vertical metals distribution in Rapel reservoir (Chile)». *Journal of the Chilean Chemical Society* 48(3): 45-50.

Retamal R., A. Andreoli, J. L. Arumí, J. Rojas y Ó. Parra (2012). «¿Son la gestión de cuencas y el Código de Aguas herramientas sinérgicas para una gobernanza sustentable del agua en Chile? primeras aproximaciones desde la escala local». En J. Rojas (editor), *Cambio climático global: Vulnerabilidad, adaptación y sustentabilidad. Experiencias comparadas e internacionales*. Concepción: Universidad de Concepción.

Ribbe, L., P. Delgado, E. Salgado y W. A. Flugel (2008). «Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pocochay watershed, Chile». *Desalination* 226(1-3): 13-20.

Ribeiro, L. *et al.* (2014). «Water Quality Assessment of the Mining-Impacted Elqui River Basin, Chile». *Mine Water and the Environment* 33(2): 165-176.

Rivera, D., J. L. Arumí y E. Holzapfel (2007). «Efecto de la red de canales y sistemas de riego en la hidrología del valle de Peumo, Chile». *Tecnología y Ciencias del Agua* 22(4): 115-119.

Rivera, J. A., Penalba, O. C., Villalba, R., and Araneo, D. C. (2017). «Spatio-Temporal Patterns of the 2010–2015 Extreme Hydrologi- cal Drought across the Central Andes, Argentina». *Water* 9(9): 652. doi: 10.3390/w9090652.

Rodríguez-Jorquera, I., C. Silva-Sanchez, M. Strynar, N. D. Denslow, G. S. Toor (2016). «Footprints of Urban Micro-Pollution in Protected Areas: Investigating the Longitudinal Distribution of Perfluoroalkyl Acids in Wildlife Preserves». *PLoS ONE* 11(2): e0148654. doi: 10.1371/journal.pone.0148654.

Rodríguez-Jorquera, I., G. S. Toor y A. J. Reisinger (2014). «Contaminants in the Urban Environment: Perfluoroalkyl Substances». Gainesville: Universidad de Florida.

Romero, H., M. Méndez y P. Smith (2012). «Mining development and environmental injustice in the Atacama Desert of Northern Chile». *Environmental Justice* 5(2): 70-76. doi: 10.1089/env.2011.0017.

Romero, L. *et al.* (2003). «Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile)». *Applied Geochemistry* 18(9): 1.399-1.416.

Rojas, M. (2012). *Estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global. Informe para Opciones de Mitigación para enfrentar el Cambio Climático*. Santiago: MAPS Chile.

Salazar, C. (2003). «Situación de los recursos hídricos en Chile. Reporte del Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua. Ciudad de México.

Salazar, O., L. Balboa, K. Peralta, M. Rossi, M. Casanova, Y. Tapia, R. Singh y M. Quemada (2019). «Effect of cover crops on leaching of dissolved organic nitrogen and carbon in a maize-cover crop rotation in Mediterranean Central Chile». *Agricultural Water Management* 212: 399-406.

Sandoval, M. I. (2015). «Ausencia de la regulación de usos prioritarios de las aguas en Chile: Propuesta de modificación legal al Código de Aguas desde una perspectiva comparada». *Justicia Ambiental* 7: 133-162.

Sandoval, E., G. Baldo, J. Núñez, J. Oyarzun, J. P. Fairley, H. Ajami, J. L. Arumí, E. Aguirre, H. Maturana y R. Oyarzun (2018). «Groundwater recharge assessment in a rural, arid, mid-mountain basin in North-Central Chile». *Hydrological Sciences Journal* 63(13-14): 1.873-1.889.

Santibáñez Q. F. (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile*. Santiago: Ministerio de Agricultura.

REFERENCIAS

Schalscha, E. B. y T. I. Ahumada (1998). «Heavy Metal in rivers and soils of Central Chile». *Water Science and Technology* 37(8): 251-255.

Scott, C. A., S. Vicuña, I. Blanco-Gutiérrez, F. Meza y C. Varela-Ortega (2014). «Irrigation efficiency and water-policy implications for river basin resilience. Hydrol». *Hydrology and Earth SystemSciences* 18(4): 1.339-1.348. doi: 10.5194/hess-18-1339-2014, 2014.

Segura, R., V. Arancibia, M. Zuniga y P. Pasten (2006). «Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile». *Journal of Geochemical Exploration* 91(1-3): 71-80.

Steffen, W. (1993). «Aspectos de la hidrodinámica del lago Villarica». En *III Congreso Internacional de gestión en recursos naturales. Sociedad de vida silvestre*. Pucón.

Stehr, A. y M. Aguayo (2017). «Snow cover dynamics in Andean basins of Chile (32.0-39.5°S) during the years 2000-2013». *Hydrology and Earth System Sciences* 21(10): 1-16. doi: 10.5194/hess-21-5111-2017, 2017.

Sträter, E., A. Westbeld y O. Klemm (2010). «Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile». *Environ Sci Pollut Res* 17: 1.563-1-573. doi: 10.1007/s11356-010-0343-x.

Tapia, J., J. Murray, M. Ormachea, N. Tirado, D. K. Nordstrom (2019). «Origin, distribution, and geochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna Plateau of Argentina, Bolivia, Chile, and Peru». *Science of the Total Environment* 678: 309-325.

Tapia, J. *et al.* (2009). «Study of the copper, chromium and lead content in Mugil cephalus and Eleginops maclovinus obtained in the mouths of the Maule and Mataquito rivers (Maule Region, Chile)». *Journal of the Chilean Chemical Society* 54(1): 36-39.

UN Water (2016). *Informe Mundial de la Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. El agua y el empleo*.

—. (2017a). *Integrated Monitoring Guide for Sustainable Development Goal 6 on Water and Sanitation: Targets and global indicators*. Washington D. C.

—. (2017b). *Step-by-step Methodology for Indicator 6.3.2 on Ambient Water Quality*. Washington D. C.

—. (2017c). *Informe Mundial de la Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Aguas residuales: el recurso desaprovechado*. París: Unesco.

Valenzuela, M., B. Lagos, M. Claret, M. A. Mondaca, C. Pérez y O. Parra (2009). «Fecal Contamination of Groundwater in a Small Rural Dryland Watershed in Central Chile». *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(2): 235-243. doi: 10.4067/S0718-58392009000200013.

Vannote, R. L., G. W. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell y C. E. Cushing (1980). «The river continuum concept». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 130-137.

Vargas, C.A., L. Arriagada, M. Sobarzo, P. Y. Contreras y G. Saldías (2013). «Bacterial production along a river-to-ocean continuum in central Chile: implications for organic matter cycling». *Aquatic Microbial Ecology* 68: 195-213. doi: 10.3354/ame01608.

Vega, A. S., K. Lizama y P. A. Pastén (2018). «Water Quality: Trends and Challenges». En G. Donoso (editor), *Water Policy in Chile* (pp. 25-51). Cham: Springer International Publishing.

Verdejo, J., R. Ginocchio, S. Sauvé, E. Salgado y A. Neaman (2015). «Thresholds of copper phytotoxicity in field-collected agricultural soils exposed to copper mining activities in Chile». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122: 171-177.

Vergara Blanco A. (2014). *Crisis institucional del agua*. Santiago: Thomson Reuters.

Vicuña, S. (2019). «Impactos y adaptación en recursos hídricos». En J. C. Castilla, F. Meza, S. Vicuña, P. A. Marquet, J. P. Montero (editores), *Cambio climático en Chile: Ciencia, mitigación y adaptación*. Santiago: Ediciones UC.

Vicuña, S., P. Aldunce, A. Stehr *et al.* (2019). «Lineamientos para el desarrollo de planes de adaptación: Aplicación de recursos hídricos». Informe de las mesas Adaptación y Agua. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Vicuña, S., P. Álvarez, O. Melo, L. Dale y F. Meza (2014). «Irrigation infrastructure development in the Limarí Basin in Central Chile: Implications for adaptation to climate variability and climate change». *Water international* 39(5): 620-634.

Vicuña, S., J. Gironás, F. J. Meza, M. L. Cruzat, M. Jelinek, E. Bustos, D. Poblete y N. Bambach (2013). «Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile». *Hydrological Sciences Journal* 58(8): 1.598-1.619.

Vicuña, S. y F. Meza (2012). «Los nuevos desafíos para los recursos hídricos en Chile en el marco del cambio global». *Centro de Políticas Públicas UC. Temas de la Agenda Pública* 7(55).

Vicuña S., X. Vargas, J. P. Boisier, P. A. Mendoza, T. Gómez, N. Vásquez y J. Cepeda (s/f). «Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile». En B. Fernandez y J. Gironas (editores), *Water resources in Chile*. Amsterdam: Springer.

Vidal, G., G. Pozo y J. L. Arumí (2012). *Aportes a la gestión y optimización de la tecnología ambiental del sector porcino*. Concepción: Ediciones Universidad de Concepción.

Viguier, B., L. Daniele, H. Jourde, V. Leonardi y G. Yáñez (2019). «Changes in the conceptual model of the Pampa del Tamarugal Aquifer: Implications for Central Depression water resources». *Journal of South American Earth Sciences* 94: 10.2217.

Villamar, C. A., I. Vera-Puerto, D. Rivera y F. De la Hoz (2018). «Recycling of Livestock and Municipal Wastewater in Chilean Agriculture: A Preliminary Assessment». *Water* 10(6): 817. doi: 10.3390/w10060817.

Ward, J. V. (1989). «The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems». *Journal of the North American Benthological Society* 8(1): 2-8. doi: 10.2307/1467397.

Water Resources Group (2009). *Charting Our Water Future*.

Yevenes, M., J. L. Arumí y L. Farías (2016). «Unravel biophysical factors on river water quality response

REFERENCIAS

in Chilean Central-Southern watersheds». *Environmental Monitoring and Assessment* 88(5): 264. doi: 10.1007/s10661-016-5235-1.

Yevenes, M., R. Figueroa y O. Parra (2018). «Seasonal drought effects on the water quality of the Biobío River, Central Chile». *Environmental Science and Pollution Research* 25: 13.844-13.856.

Zang, C., J. Dame y M. Nüsser (2018). «Hydrochemical and environmental isotope analysis of groundwater and surface water in a dry mountain region in Northern Chile». *Environmental Monitoring and Assessment* 190(6): 334. doi: 10.1007/s10661-018-6664-9.

Zedler, J. B. y S. Kercher (2005) «Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability». *Annual Review of Environmental Resources* 30: 39-74. doi: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144248.

MESA AGUA

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación

Gobierno de Chile

COP25 CHILE 2019

COMITÉ CIENTÍFICO COP25 CHILE