

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ALTERACION HIDROLOGICA POR EFECTO DE CAMBIO CLIMATICO EN CUENCAS DE CHILE CENTRAL: CASO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO TINGUIRIRICA

MARIA JULIA WIENER¹

MARCELO OLIVARES²

PILAR BARRIA³

MATIAS PEREDO⁴

DIEGO RIVERA⁵

CLAUDIA ARMIJO⁶

FELIPE CORDERA⁶

EDUARDO PEREIRA⁷

RESUMEN

Los cambios en temperatura y precipitaciones producto del cambio climático ya impactan la hidrología de Chile, y de acuerdo con las proyecciones basadas en modelos podría exacerbarse en las próximas décadas mediante alteraciones en la magnitud de los caudales y en el régimen hidrológico. Poder estimar la magnitud de esta alteración y su significado en términos de disponibilidad de recursos hídricos es de gran importancia, en particular para las sub-cuencas altas de la zona central, que son fuente de agua para múltiples usos, incluyendo el consumo humano, hidroelectricidad, riego, e industrial. Para lo cual, proponemos utilizar los indicadores de alteración hidrológica (IHA, por sus siglas en inglés) como medida para estimar el impacto del cambio climático en el régimen hidrológico natural de las sub-cuencas altas del Río Tinguiririca, a partir de las estimaciones de caudales publicadas en la actualización del Balance Hídrico Nacional. Los resultados del análisis de los IHA frente a cuatro modelos de cambio climático confirman las tendencias de disminución de los caudales para el periodo futuro (en hasta un 50% en los caudales mínimos), cambios de régimen hacia condiciones predominantemente pluviales, y un marcado cambio en el momento de ocurrencia de las condiciones extremas, particularmente en las sub-cuencas de régimen nival.

¹ Investigadora Postdoctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email:

julia.wiener@uchile.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: maroliva@uchile.cl

³ Profesora Asistente, Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Los Lagos, email:

pilar.barría@ulagos.cl, Profesora Asistente, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile

⁴ Ingeniero Civil Hidráulico, Área de EcoHidráulica, Plataforma de Investigación EcoHyd, email:

matias.peredo@ecohyd.com

⁵ Profesor Titular, Centro de Sustentabilidad y Gestión Estratégica de Recursos (CiSGER), Universidad del Desarrollo, email: diegorivera@udd.cl

⁶ Ayudantes de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

⁷ Director I+D, SPEC Energy Consulting, email: epereira@spec.cl

1. INTRODUCCIÓN

El impacto del cambio climático en las cuencas de Chile Central es de particular interés. Esta zona concentra las mayores demandas de agua dulce para uso consuntivo en agricultura, industria, agua potable y la mayor demanda de uso no consuntivo en la producción hidroeléctrica (DGA 2016). Estos usos del recurso hídrico tienen marcados patrones estacionales. Las regiones de clima mediterráneo como el centro de Chile se caracterizan por una fuerte estacionalidad donde el otoño y el invierno concentran la temporada de lluvias, con menos eventos en primavera, verano y principios de otoño (Meza et al., 2012). Las temperaturas templadas la convierten en una importante zona agrícola, con una amplia variedad de cultivos hortícolas y viñedos anuales y perennes que requieren riego en la época seca, que coincide en parte con el período de deshielo. Además, las cuencas de Chile central albergan varias centrales hidroeléctricas de pasada que inyectan energía al sistema eléctrico, cuya demanda máxima ocurre durante el invierno (Gonzalez et al., 2020). Vicuña et al. (2021a) sostienen en base a estudios previos, que el cambio climático reducirá el potencial de generación hidroeléctrico, incluyendo cambios al régimen hidrológico.

En esta zona, los procesos de acumulación y deshielo de nieve tienen un papel primordial en la producción de escorrentía de las cuencas hidrográficas andinas (Vicuña et al., 2021b). Los escenarios futuros de disponibilidad de agua no son optimistas, ya que se verán afectados directamente por el aumento de las temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación. Las proyecciones climáticas basadas en modelos muestran un calentamiento de 3-4 ° C a fines del siglo XXI (Vicuña et al., 2011) y un notable patrón de sequía en el centro-sur de Chile para el futuro período 2030-2060 (Vicuña et al., 2021b). Se proyecta que las precipitaciones anuales disminuyan, para el mismo período, entre -7% y -20% dependiendo de los escenarios de emisiones (Demaria et al., 2013). Además, el cambio climático también está afectando a los glaciares, una importante reserva y fuente de agua en el centro de Chile que contribuye con la escorrentía y la recarga de aguas subterráneas durante los meses de verano y períodos de sequía (Valdés-Pineda et al., 2014). La mayoría de los glaciares en Chile muestran tasas de recesión asociadas con el cambio climático (Bown et al., 2008; Rivera et al., 2002) lo que anticipa una reducción de su aporte a la escorrentía en el mediano plazo. Todo lo anterior sugiere una reducción de los caudales anuales y un cambio en el hidrograma.

La reciente actualización del Balance Hídrico Nacional (BHN) (DGA 2017) incluyó proyecciones de las forzantes meteorológicas que incorporan el efecto del cambio climático, bajo el escenario de emisiones RCP8.5, a partir de cuatro modelos de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés). El estudio del BHN calibró el modelo hidrológico a macro-escala VIC (*Variable Infiltration Capacity*) para estimar la evapotranspiración, recarga de acuíferos, y escorrentía, a escala diaria, para los cuatro escenarios de cambio climático considerados. Estos datos brindan estimaciones de caudales naturalizados, lo que permite entender los cambios de regímenes hidrológicos a lo largo del tiempo como la respuesta debida únicamente al cambio climático (Cortés et al., 2011). A partir de estos datos, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la alteración hidrológica en las sub-cuencas de Chile Central bajo escenarios de cambio climático, considerando una resolución temporal diaria. Para ello, proponemos utilizar el enfoque de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA, por sus siglas en inglés) desarrollados por (Richter et al., 1996). Estos son un conjunto

de 32 estadísticos que caracterizan en forma bastante completa los componentes del régimen de caudales (Olden and Poff, 2003) y se han utilizado previamente para evaluar los impactos del cambio climático en los regímenes hidrológicos (Dyer et al., 2014; Kim et al., 2011; Laizé et al., 2014; Schneider et al., 2013). El análisis de IHA fue originalmente concebido para evaluar el impacto que los eventos antropogénicos y naturales tienen en los ecosistemas fluviales a través de alteraciones en el ciclo hidrológico (Laize et al., 2010). Sin embargo, también se pueden utilizar para abordar la alteración hidrológica y el consiguiente impacto en las actividades humanas que se benefician de tales regímenes.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar en detalle los potenciales impactos atribuibles al cambio climático en los parámetros IHA relacionados con la disponibilidad y estacionalidad de caudales en sub-cuencas del Río Tinguiririca. La cuenca de estudio representa un ejemplo de interferencia operacional entre hidroelectricidad de pasada y riego. A partir de los cambios en el régimen hidrológico, es posible anticipar potenciales impactos sobre estos usos del agua y los conflictos entre éstos.

2. METODOLOGÍA

1.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del Río Tinguiririca, ubicada en Chile central (**Figura 1**). Esta cuenca experimenta condiciones climáticas templadas de tipo mediterráneo caracterizada por un régimen nivo-pluvial, con fuerte dependencia de los procesos de acumulación y deshielo de nieve. La liberación de agua almacenada como nieve y humedad del suelo generalmente comienza a fines de septiembre y ocurre en los meses de primavera y verano (Vásquez et al., 2021).

El presente trabajo se enfoca en 3 estaciones fluviométricas con datos disponibles de la parte alta de la cuenca, correspondientes a sub-cuencas definidas en CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018). Los caudales en estas estaciones son de particular relevancia para la hidroelectricidad, además de representar el régimen natural y la contribución directa de los glaciares en el área de captación, basados en que el caudal glaciar reduce su contribución al flujo de la corriente en tasa logarítmica con la distancia río abajo (Casassa et al., 2015). Las estaciones seleccionadas se enumeran en la **Tabla 1** y se muestran en la **Figura 1**.

2.2 Datos

Para este estudio se consideraron los resultados recientemente publicados de actualización del Balance Hídrico Nacional (BHN), que proporciona datos de balance hídrico para las cuencas del norte y centro de Chile en condiciones naturalizadas, así como cuatro escenarios futuros de cambio climático (DGA 2018). El BHN utiliza el conjunto de datos meteorológicos CR2MET, que incluye series de tiempo de precipitación y temperatura máxima, media y mínima diaria para el período 1979-2016, así como otros datos de forzantes descritos en (Vásquez et al., 2021). La modelación hidrológica realizada con el modelo de capacidad de infiltración variable (VIC), entrega estimaciones medias diarias de Evapotranspiración (ET) y escorrentía (Q), en un formato de cuadrícula ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$). Además, para completar el balance hidrológico, se estimaron series sintéticas de escorrentía

glaciar. La serie sintética resultante para las condiciones hidrológicas históricas fue validada con registros históricos. El BHN incluye proyecciones climáticas bajo el escenario de emisiones RCP8.5, que pretende establecer un escenario límite superior de impactos del cambio climático (DGA, 2018), y cuatro GCMs para el período 2030-2060. La selección de los GCMs considera representar las condiciones que gobiernan el clima medio y la variabilidad en Chile, y un amplio rango de sensibilidad climática para un escenario de emisiones dado (DGA, 2017). Los modelos seleccionados fueron CSIRO-MK3-6-0 (sensibilidad baja extrema), CCSM4 (sensibilidad baja moderada), MIROC-ESM (sensibilidad alta moderada) y IPSL-CM5A-LR (sensibilidad alta extrema).

Tabla 1. Estaciones fluviométricas seleccionadas para el estudio

Código	Nombre	Lat.	Long.	Área km ²	Elevación estación msnm	Régimen Hidrológico	Glaciares aportantes	Área de glaciares* km ²
06025001	Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre	-34.82	-70.56	970.35	1015	Nival	CL106020001/48 CL106021001/02 CL106022001/31 CL106023001/34 CL106024001/38	126.55
06028001	Rio Tinguiririca bajo Los Briones	-34.72	-70.83	1438.28	569	Nivo-pluvial	CL106020001/48 CL106021001/02 CL106022001/31 CL106023001/34 CL106024001/38 CL106025001/02 CL106026001/19	130.91
06027001	Rio Claro en El Valle	-34.69	-70.87	349.38	542	Pluvio-nival	CL106027001	0.01

*Fuente: Inventario de Glaciares BHN etapa II

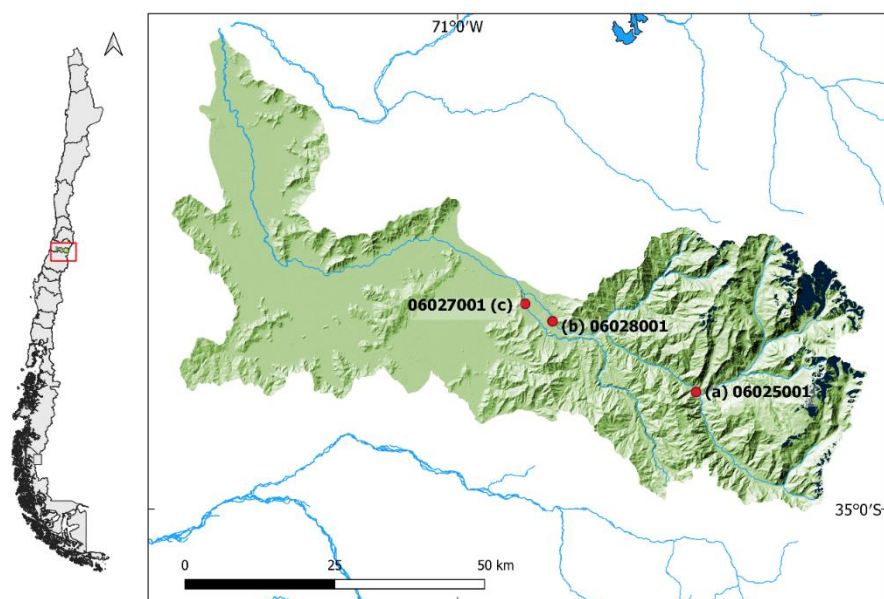


Figura 1. Mapa de la cuenca del Río Tinguiririca, y las sub-cuencas definidas por las estaciones fluviométricas seleccionadas para el estudio: a) 06025001 - Río Tinguiririca aguas abajo junta Río Azufre, b) 06028001- Río Tinguiririca bajo Los Briones, c) 06027001- Río Claro en El Valle

Las salidas de VIC en formato de grilla que entrega el BHN fueron post procesadas mediante la agregación de la escorrentía en toda la superficie de las cuencas definidas por las estaciones fluviométricas seleccionadas. Así, se obtuvo la serie temporal de caudal (Q_{vic}) para el período histórico 1980-2010 y el Q_{vic} estimado para los cuatro escenarios de cambio climático considerados en el BHN, para el período 2030-2060. Q_{vic} incluye flujo base y escorrentía, a resolución media diaria. Debido a que el BHN proporciona caudales de aporte glaciar agregadas a escala mensual, se construyó la serie diaria de flujo de aporte glaciar (Q_g) agregando la serie de flujo diario de cada glaciar ubicado dentro de las sub-cuencas CAMELS-CL. Los glaciares asociados con cada sub-cuenca, y la estación fluviométrica asociada, se enumeran en la **Tabla 1**. Finalmente, para las sub-cuencas que tuvieron contribución de Q_g , obtuvimos el caudal de escala diaria como $Q_{vic} + Q_g$.

2.3 Análisis IHA

Para evaluar el efecto del CC en el régimen hidrológico, se compararon las condiciones históricas naturalizadas con las proyectadas en base a los cuatro modelos climáticos considerados en el BHN. Se realizó un análisis de alteración hidrológica en las 3 sub-cuencas seleccionadas en base al software de Indicadores de Alteración Hidrológica de Conservation Gateway (The Nature Conservancy, 2009), complementado con un análisis de pulsos altos y bajos. Dado que el conjunto completo de 32 parámetros IHA duplica algunas de las características del régimen hidrológico (Laize et al., 2010; Monk et al., 2007; Olden and Poff, 2003), se seleccionó un subconjunto de parámetros para el análisis (**Tabla 2**), considerando los siguientes criterios: indicadores que mostraron un mayor impacto del CC en las condiciones futuras e indicadores que ilustran cambios en la estacionalidad y los regímenes de caudales. La entrada al software de IHA es la serie de caudales a escala diaria (Q_{vic} o $Q_{vic} + Q_g$, según sea el caso) para cada estación. El inicio del año hidrológico se estableció como el 1 de abril. Las estadísticas calculadas se establecieron como no paramétricas, es decir entregando como resultado medianas y percentiles. Los umbrales de pulso de flujo alto y bajo son la mediana más/menos 25%. El resultado del software de IHA es una serie de 32 parámetros, uno para cada año del período de estudio, por sitio.

Tabla 2. Parámetros IHA considerados en este estudio. Adaptada de The Nature Conservancy (2009).

Grupo de parámetros IHA	Parámetros hidrológicos
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la mediana para cada mes calendario (m^3/s)
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Mínimos anuales, media de 3, 7, 30 días (m^3/s) Máximos anuales, media de 3, 7, 30 días (m^3/s)
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos y altos en cada año hidrológico Mediana de la duración de los pulsos bajos y altos (días)

3. RESULTADOS

Se presentan los resultados para cada grupo de parámetros IHA evaluados.

3.1 Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales

Las medianas de caudales mensuales, representados en la **Figura 2**, muestran evidentes cambios de magnitud entre la condición histórica y los escenarios de CC. Las diferencias son más marcadas en las estaciones a) 06025001- Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre y b) 06028001- Rio Tinguiririca bajo Los Briones, de régimen nival y nivo-pluvial, donde el aporte glaciar (Qg) es mayor. En los dos casos, la serie histórica muestra un régimen de caudal definido de caudales bajos en los meses de otoño e invierno, los caudales más bajos en Julio-Agosto-Septiembre, que es el periodo entre las temporadas de precipitaciones y el deshielo; y caudales altos en los meses de primavera y verano (Octubre a Enero) con un máximo nival en Diciembre-Enero. Los cuatro modelos de CC muestran que en el período futuro los caudales de los meses Noviembre a Mayo se reducirían, entre -6% y -82% dependiendo del mes y el modelo, con un promedio de -60% entre los cuatro modelos; y aumentarían en los meses de Junio a Septiembre, entre +20% y +287%, con un promedio entre los modelos de +129% en la estación alta y +65% en la estación intermedia, lo que significa un cambio en la estacionalidad del régimen hidrológico. En el futuro, los caudales de la temporada de deshielo disminuyen, los caudales más bajos se observan entre Enero y Marzo, entre el deshielo y la temporada de precipitaciones, y los caudales pluviales aumentan en magnitud y presentan más dispersión. El máximo nival se proyecta que ocurrirá en Noviembre, y la temporada de caudales altos tendrá lugar entre Septiembre y Octubre, o incluso entre Junio y Agosto, dependiendo del modelo GCM considerado. En ese sentido, el modelo CSIRO presenta las variaciones en magnitud más extremas, tanto de disminución de caudal de deshielo como de aumento de caudal pluvial, y el mayor cambio en la estacionalidad; el modelo CCSM4 es el que muestra resultados moderados.

En el caso de la estación c) 06027001- Rio Claro en El Valle, de régimen pluvio-nival, se observa una reducción en la magnitud de las medianas de los caudales mensuales en la mayoría de los meses, particularmente en los meses de caudales de deshielo Octubre, Noviembre y Diciembre (en promedio -44%, -83% y -47% respectivamente). En este caso el modelo CCSM4 es el que proyecta el comportamiento más extremo, con reducciones de caudal para todos los meses del año.

3.2 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Se analizaron y compararon los caudales mínimos y máximos anuales considerando, en los dos casos, los parámetros media de 3, 7, y 30 días. En las estaciones 06025001- Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre y 06028001 - Rio Tinguiririca bajo Los Briones, de régimen nival y nivo-pluvial respectivamente, se observa una disminución (hasta un -50%) de los caudales mínimos proyectados respecto a la serie histórica, para todos los modelos. En todos los casos, los rangos de dispersión son similares a la serie histórica salvo en la estación nivo-pluvial Rio Tinguiririca bajo Los Briones, donde no se aprecian cambios en la magnitud de los caudales mínimos, pero si presentan mayor dispersión. En el caso de los caudales máximos, las proyecciones estiman magnitudes similares, pero con mayor dispersión, siendo CSIRO el modelo que proyecta un comportamiento más extremo, y MIROC el que muestra condiciones similares a las de referencia. En el caso de la estación en el Rio Claro, no se observan diferencias significativas en las magnitudes y variabilidad de los caudales máximos futuros respecto a los históricos.

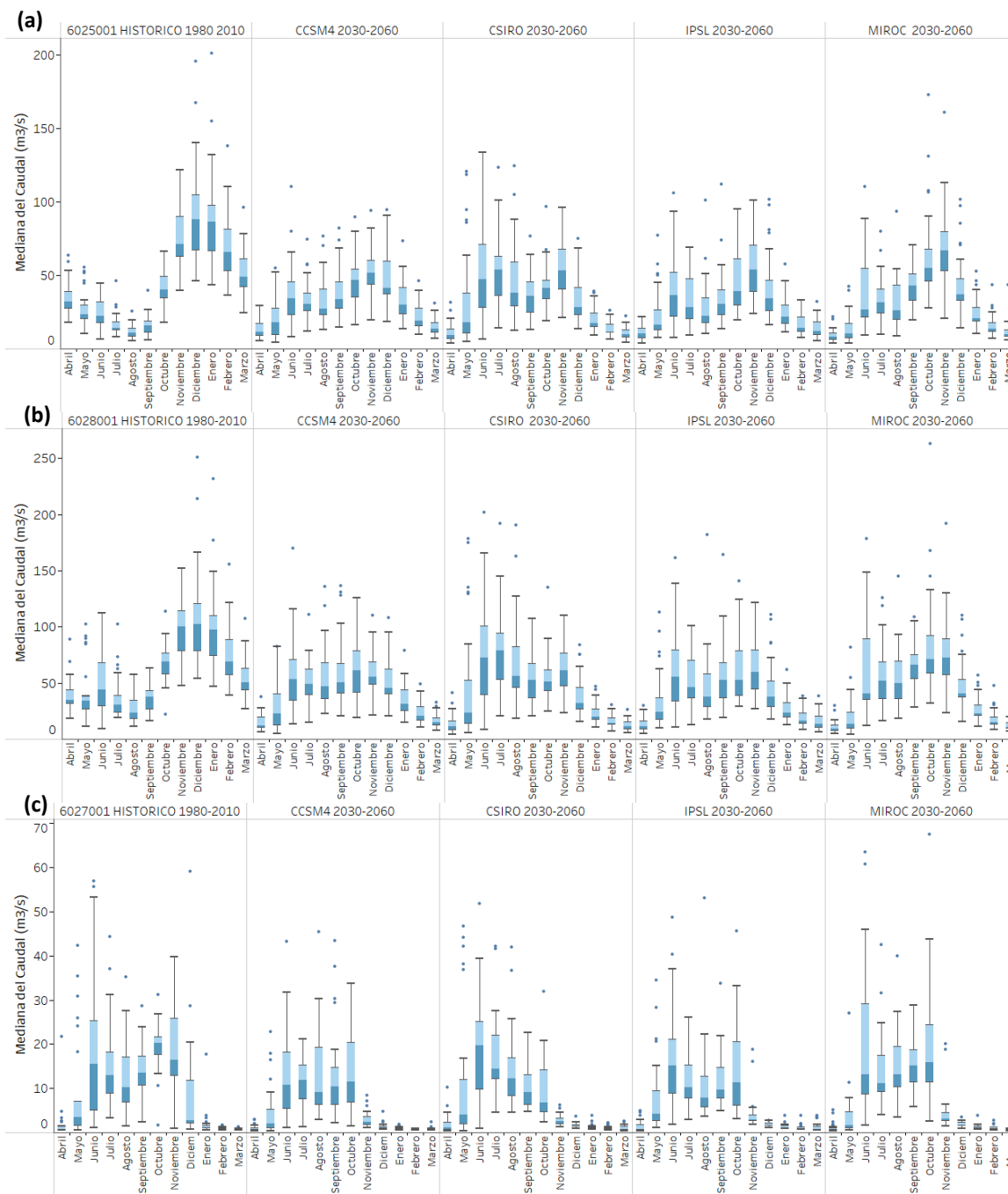


Figura 2. Diagrama de caja de las medianas de caudal mensuales (m^3/s), para el periodo Histórico (1980-2010) y las proyecciones futuras de cuatro GCMs (2030-2060) de cambio climático: CCSM4, CSIRO, IPSL, y MIROC, para las estaciones: a) 06025001 - Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre, b) 06028001- Rio Tinguiririca bajo Los Briones, c) 06027001- Rio Claro en El Valle

3.3 Estacionalidad de las condiciones hidrológicas extremas anuales

La **Figura 3** indica la fecha de ocurrencia de los mínimos anuales, en las estaciones 06025001- Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre y 06028001- Rio Tinguiririca bajo Los Briones, sub-cuencas de régimen nival y nivo-pluvial (triángulos); y en la estación 060207001- Rio Claro en El Valle, sub-cuenca pluvio-nival (puntos) para el periodo histórico

y los escenarios futuros considerados. Las estaciones altas (triángulos y asteriscos), tienen una fecha histórica de mínimo en Agosto-Septiembre, correspondiente al período previo al inicio del deshielo. Para la mayoría de los años futuros, en todos los escenarios considerados, se proyecta que los caudales mínimos de cada año se observarán entre Marzo a Abril, esto es, antes del inicio de la temporada de precipitaciones. La estación más baja (círculos), tiene un comportamiento distinto, pues los caudales mínimos anuales históricamente ocurrían entre Marzo y Abril, lo que se mantiene al considerar las proyecciones futuras.

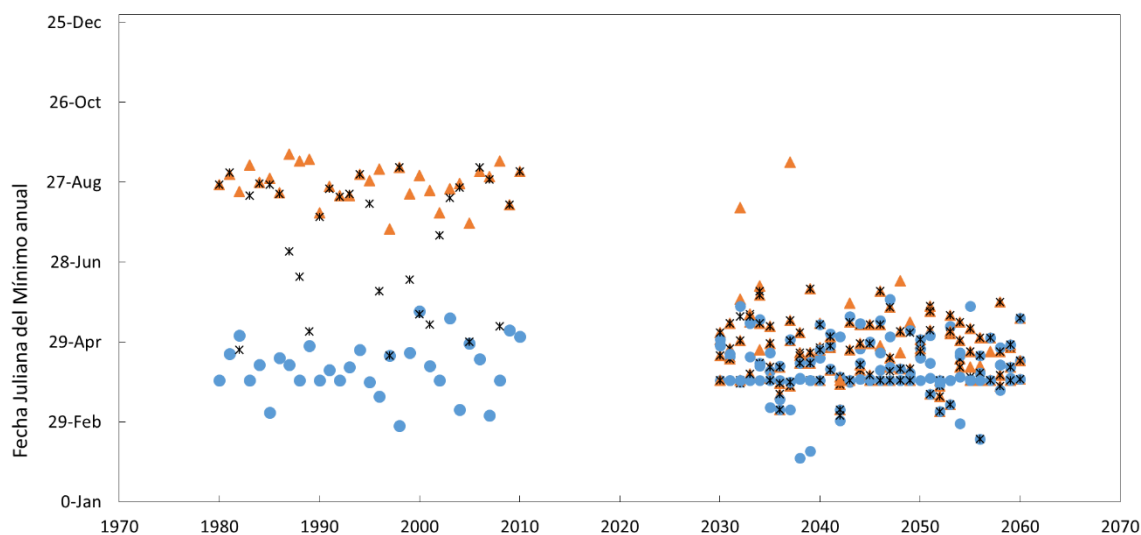


Figura 3. Momento de ocurrencia, en fecha juliana, de los caudales mínimos anuales para las estaciones 06025001 (triángulos ▲, 1015 msnm), 06028001 (asteriscos *, 569 msnm) y 06027001 (puntos ●, 542 msnm), en los periodos histórico (1980-2010) y futuro (2030-2060) bajo diferentes escenarios de cambio climático.

En el caso de la fecha juliana de los caudales máximos, de acuerdo a las simulaciones históricas, la estación más alta 06025001- Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre presentaba máximos entre fines de Octubre y mediados de Enero, coincidiendo con la época de deshielo, y algunos máximos ocasionales entre Mayo y Julio, asociados a tormentas. Las estimaciones futuras proyectan un adelantamiento de los caudales máximos al período entre Mayo y Noviembre, para todos los modelos considerados, consistente con un adelantamiento y posible reducción del caudal glaciar o de deshielo. En el caso de la estación 06028001, cuyos máximos históricos ocurrían entre Abril hasta fines de Diciembre, se proyecta una concentración de los máximos al período entre Mayo y Noviembre. En cambio, para la estación de régimen pluvial 06027001 no se observan cambios en la fecha de ocurrencia de los máximos que, tanto en el periodo histórico como en las proyecciones futuras, sucede entre principios de Mayo y fin de Octubre. Estos resultados se resumen en la **Tabla 3**.

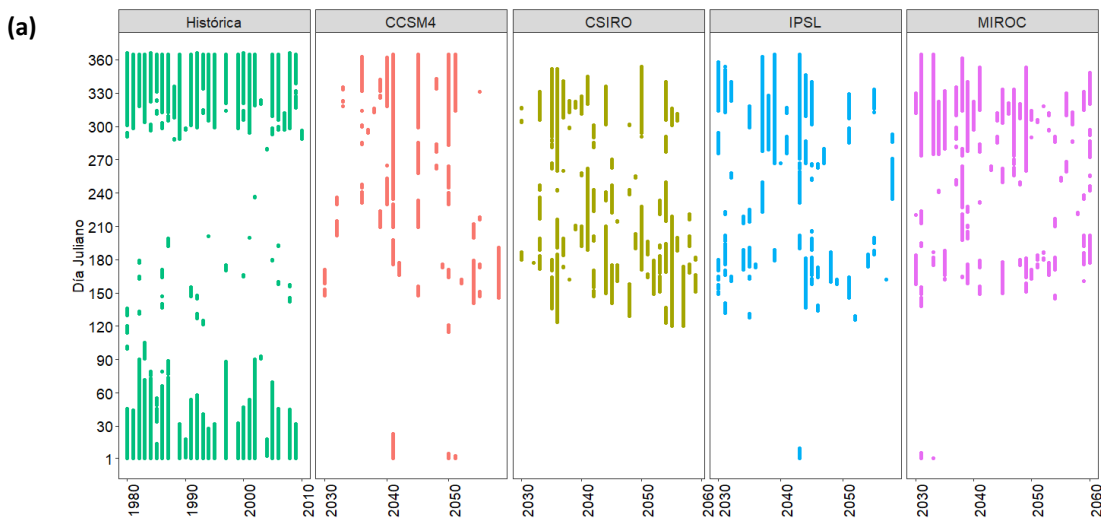
Tabla 3. Resumen estacionalidad condiciones extremas. Mediana de la fecha de ocurrencia (en Fecha Juliana) de los mínimos y máximos anuales, para los períodos histórico y escenarios de cambio climático.

Estación	Mediana de ocurrencia del mínimo anual (Fecha Juliana)					Mediana de ocurrencia del máximo anual (Fecha Juliana)				
	Histórico	CSIRO	CSM4	IPSL	MIROC	Histórico	CSIRO	CSM4	IPSL	MIROC
06025001	240	101	114	112	122	311	191	196	239	253
06027001	102	92	93	92	99	194	188	203	175	186
06028001	228	100	113	110	121	200	188	196	177	186

3.4 Frecuencia, duración, y momento de los pulsos altos y bajos

En el caso de la cantidad y duración de pulsos altos, la condición histórica de la estación de cabecera 06025001- Rio Tinguiririca aguas abajo junta Rio Azufre, era de pocos y extensos pulsos altos, mientras que los escenarios futuros estiman un mayor número de pulsos altos aunque de menor duración. Si analizamos los días julianos de ocurrencia de estos pulsos altos, en el periodo histórico éstos suceden entre Noviembre y Marzo, correspondiendo con el periodo de deshielo, con algunos pulsos cortos en los meses de precipitaciones (**Figura 4a**). Los escenarios futuros anticipan una concentración del período de pulsos altos, y un cambio en el momento de ocurrencia que se proyecta desde Mayo a Diciembre. Específicamente, se observan más pulsos (y más extensos) asociados a crecidas pluviales y una menor duración de pulsos correspondientes a deshielo. La estación intermedia (06028001 no incluida en la figura) muestra un comportamiento similar, pero con una tendencia de transición a lo que observamos en la estación de más aguas abajo (06027001- Rio Claro en El Valle) de régimen pluvio-nival, donde el comportamiento futuro es de menor número de pulsos altos, pero más largos en el tiempo. En cuanto al momento de ocurrencia de pulsos altos, históricamente concentrados entre la temporada de precipitaciones y el inicio de la temporada de deshielo, los escenarios futuros indican que se acorta un mes el periodo, de Mayo-Diciembre a Mayo-Noviembre, pero se mantiene la estacionalidad (**Figura 4 b**).

Respecto a los pulsos bajos, las proyecciones de cambio climático indican reducciones en cantidad en las estaciones más altas, pero de mayor duración en comparación con la serie histórica. En cambio, en la estación de régimen pluvio-nival se proyecta un aumento en el número de pulsos bajos, pero de menor duración. En cuanto al momento de ocurrencia, para todas las estaciones, se aprecia una reducción del periodo y cambio en el momento de ocurrencia. En la serie histórica los pulsos bajos ocurren entre Marzo y Septiembre, y en las futuras inician en Enero, y duran hasta Junio.



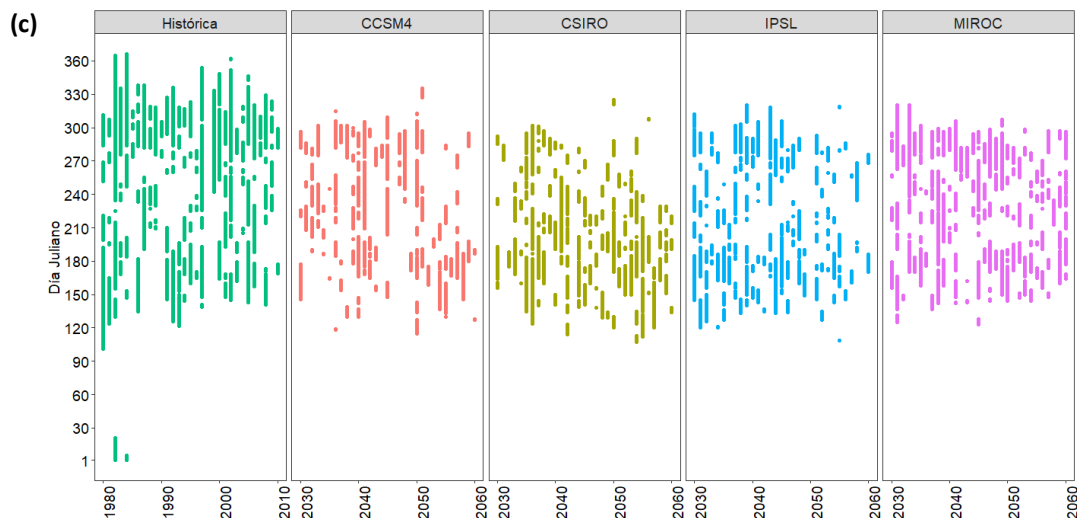


Figura 4. Momento de ocurrencia (días julianos) de pulsos altos (caudal mayor o igual al percentil 75), en las estaciones a) 06025001-Río Tinguiririca aguas abajo junta Río Azufre, y c) 06027001-Río Claro en El Valle, en el periodo histórico 1980-2010 (panel izquierdo) y futuro 2030-2060, considerando escenarios de cambio climático CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC.

4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Este estudio evaluó el impacto del cambio climático en los regímenes de flujo de las sub-cuencas altas de la cuenca del Río Tinguiririca. Considerando los datos del BHN, se obtuvieron y compararon una selección de Indicadores de Alteración Hidrológica para la serie de caudales a escala diaria en tres estaciones fluviométricas, para el período histórico naturalizado 1980-2010 y el período futuro 2030-2060, bajo cuatro modelos de GCM diferentes. Los resultados muestran un comportamiento futuro que depende del régimen hidrológico histórico de cada sub-cuenca. Las estaciones de cabecera, de régimen nival o nivo-pluvial y con mayor influencia glaciar, son las que presentan la mayor reducción en magnitud de los caudales mensuales, y cambio más marcado en la estacionalidad de los parámetros hidrológicos. Las proyecciones de CC estiman un cambio de momento de ocurrencia, tanto de los pulsos altos y caudales máximos, como de los pulsos bajos y caudales mínimos. Los primeros se encontraban históricamente asociados a la temporada de deshielo, mientras los segundos ocurrían históricamente en el período de transición entre la temporada de precipitaciones y la época de deshielo. En el futuro, se espera que los caudales máximos y pulsos altos ocurran tanto durante el invierno como en primavera, mientras los caudales mínimos y pulsos bajos sucederán mayormente en el período de transición entre el fin del deshielo y el inicio del período de precipitaciones. Por lo tanto, se estima que en el futuro todas las sub-cuencas sufrirán un cambio de régimen, desde nival o nivo-pluvial a un régimen pluvio-nival.

Los resultados de este trabajo son consistentes con las estimaciones en la literatura que prevén reducciones de hasta en un 40% en la escorrentía media anual en el centro-sur de Chile. Debido a las condiciones más cálidas, la reducción de las precipitaciones y el aumento de las pérdidas por evapotranspiración, las cuencas superiores experimentarán una disminución del caudal durante la primavera/verano y un aumento del caudal en el invierno. Habrá una migración de la línea de nieve a elevaciones más altas, de 2000 m a 2700 m, lo

que implica una reducción del 50% del área que se encuentra por encima de la línea de nieve (Demaria et al., 2013). La resultante reducción en la acumulación de nieve y la anticipación del inicio del deshielo significa que el caudal máximo estacional tiende a ocurrir antes, y habrá una disminución de los volúmenes de escorrentía durante la primavera y el verano (Vicuña et al., 2013). Las precipitaciones invernales cambiarán de un régimen dominado por la nieve a un régimen dominado por la lluvia, lo que se manifestará a medida que aumente el caudal. Para cuencas relativamente bajas, más entrada de agua líquida y, por lo tanto, humedad del suelo, durante el invierno cuando la ET es mínima, implica un aumento en la escorrentía superficial (Vicuña et al., 2011)

Estos resultados de cambio de régimen en las cuencas altas tienen implicancias tanto en términos ecológicos como para los diversos usos de agua superficial. Las centrales hidroeléctricas de pasada que existen en la cuenca sólo cuentan con capacidad de almacenamiento intradiaria y a escalas temporales más extensas operan en base a la disponibilidad natural de los caudales. La producción de energía hidroeléctrica esta modulada por las fluctuaciones climáticas de largo plazo, y es posible que en el futuro exista capacidad instalada sin aprovechar (Arriagada et al., 2019). Además, la agricultura de regadío depende de los caudales disponibles en la temporada de verano, que se alimentan principalmente de los procesos de deshielo, y que se verán reducidos según los resultados obtenidos. Con todo, se estima que la disminución de caudales en verano tendrá impactos sobre ambos usos en la cuenca y, potencialmente, sobre la interferencia operacional entre éstos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado a través del proyecto NSFC190025 del Programa de Cooperación Internacional de la Agencia Nacional de Investigación (ANID). Los resultados de la actualización del Balance Hídrico Nacional fueron proporcionados por Dirección General de Aguas (DGA).

REFERENCIAS

- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P.A., Boisier, J.P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., 2018. The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies—Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5817–5846.
- Arriagada, P., Dieppois, B., Sidibe, M., Link, O., 2019. Impacts of climate change and climate variability on hydropower potential in data-scarce regions subjected to multi-decadal variability. *Energies* 12, 2747.
- Bown, F., Rivera, A., Acuña, C., 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Ann. Glaciol.* 48, 43–48.
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., Soza, D., 2015. Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo, in: *Proceedings of the XIV Congreso Geológico Chileno*, La Serena, Chile. pp. 4–8.
- Cortés, G., Vargas, X., McPhee, J., 2011. Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *J. Hydrol.* 405, 93–109.
- Demaria, E.M.C., Maurer, E.P., Thrasher, B., Vicuña, S., Meza, F.J., 2013. Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *J. Hydrol.* 502, 128–138.
- DGA (Dirección General de Aguas), 2018. Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico

- nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro, SIT N° 435. Santiago, Chile.
- DGA (Dirección General de Aguas), 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional.
- DGA (Dirección General de Aguas), 2016. Atlas del agua : Chile 2016. Chile.
- Dyer, F., ElSawah, S., Croke, B., Griffiths, R., Harrison, E., Lucena-Moya, P., Jakeman, A., 2014. The effects of climate change on ecologically-relevant flow regime and water quality attributes. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 28, 67–82.
- Gonzalez, J.M., Olivares, M.A., Medellín-Azuara, J., Moreno, R., 2020. Multipurpose Reservoir Operation: a Multi-Scale Tradeoff Analysis between Hydropower Generation and Irrigated Agriculture. *Water Resour. Manag.* 34, 2837–2849. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02586-5>
- Kim, Byung-Sik, Kim, Bo-Kyung, Kwon, H., 2011. Assessment of the impact of climate change on the flow regime of the Han River basin using indicators of hydrologic alteration. *Hydrol. Process.* 25, 691–704.
- Laize, C.L.R., Acreman, M., Dunbar, M., Houghton-Carr, H., Flörke, M., Schneider, C., 2010. Monthly hydrological indicators to assess impact of change on river ecosystems at the pan-European scale: preliminary results.
- Laizé, C.L.R., Acreman, M.C., Schneider, C., Dunbar, M.J., Houghton-Carr, H.A., Flörke, M., Hannah, D.M., 2014. Projected flow alteration and ecological risk for pan-European rivers. *River Res. Appl.* 30, 299–314.
- Meza, F.J., Wilks, D.S., Gurovich, L., Bambach, N., 2012. Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo Basin, Chile: reliability of water rights and changes in the demand for irrigation. *J. water Resour. Plan. Manag.* 138, 421–430.
- Monk, W.A., Wood, P.J., Hannah, D.M., Wilson, D.A., 2007. Selection of river flow indices for the assessment of hydroecological change. *River Res. Appl.* 23, 113–122.
- Olden, J.D., Poff, N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.* 19, 101–121.
- Richter, B.D., Baumgartner, J. V, Powell, J., Braun, D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv. Biol.* 10, 1163–1174.
- Rivera, A., Acuña, C., Casassa, G., Bown, F., 2002. Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Ann. Glaciol.* 34, 367–372.
- Schneider, C., Laizé, C.L.R., Acreman, M.C., Flörke, M., 2013. How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 325–339.
- The Nature Conservancy, 2009. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *J. Hydrol.* 519, 2538–2567.
- Vásquez, N., Cepeda, J., Gómez, T., Mendoza, P.A., Lagos, M., Boisier, J.P., Álvarez-Garretón, C., Vargas, X., 2021. Catchment-Scale Natural Water Balance in Chile, in: *Water Resources of Chile*. Springer, pp. 189–208.
- Vicuña, S., Garreaud, R.D., McPhee, J., 2011. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Clim. Change* 105, 469–488.
- Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F.J., Cruzat, M.L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., Bambach, N., 2013. Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrol. Sci. J.* 58, 1598–1619.
- Vicuña, S., Olivares, M., Hermansen, C., Falvey, M., Purcell, F., 2021a. Hydroelectric Uses, in: Fernández, B., Gironás, J. (Eds.), *Water Resources of Chile*. Springer International Publishing, Cham, pp. 285–299. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_15
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J.P., Mendoza, P.A., Gómez, T., Vásquez, N., Cepeda, J., 2021b. Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile, in: *Water Resources of Chile*. Springer, pp. 347–363.