

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EL VASO MEDIO VACÍO: IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS
INGRESOS DE AGUA DULCE AL SISTEMA COSTERO DE PATAGONIA NORTE**

RODRIGO AGUAYO¹
JORGE LEON MUÑOZ²
JOSE VARGAS³
RENE GARREAUD⁴
ALDO MONTECINOS⁵
JOSE LUIS IRIARTE⁶

RESUMEN

Las condiciones oceanográficas en la zona marino-costera de Patagonia norte (41-46°S) están fuertemente influenciadas por los ingresos de agua dulce, los cuales han mostrado una clara disminución durante las últimas décadas. Frente a este escenario hidro-climático, evaluamos los impactos del cambio climático antropogénico en la cuenca trasandina del río Puelo a través de un modelo hidrológico forzado por registros in situ y sensores remotos. El futuro cercano (2030-2060) se proyectó mediante factores de cambio obtenidos de un ensamble de 25 Modelos de Circulación General (GCMs). El modelo alcanzo un Índice de Concordancia Mejorado promedio de 0.78 en las etapas de calibración y validación. Bajo el escenario RCP 8.5, las proyecciones climáticas indican que los aportes de agua dulce al fiordo de Reloncaví disminuirán principalmente en verano (~20%) y en otoño (~15%). También se prevé que la probabilidad de ocurrencia de sequías extremas se duplique con respecto a los registros históricos.

¹Estudiante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – rodaguayo@udec.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Química Ambiental, Universidad Católica de la Santísima Concepción

³Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

⁴Profesor Titular, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

⁵Profesor Asociado, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

⁶Investigador Principal, Centro IDEAL

1. INTRODUCCIÓN

La zona marino-costera de Patagonia norte (41-46°S) se constituye como una extensa zona interconectada por fiordos, bahías y canales (~11,000 km lineales de costa), cuyas características oceanográficas están fuertemente influenciadas por los altos aportes de agua dulce (Dávila et al., 2002). En estos sistemas, el agua dulce influye sobre los procesos biogeoquímicos y generalmente genera una estratificación vertical de dos capas en la columna de agua, productos de gradientes de densidad, modulados principalmente por una estructura de salinidad vertical (Saldías et al., 2018).

La influencia del océano Pacífico y del cinturón de viento del Oeste del hemisferio Sur determinan altos niveles de precipitación en la zona costera de la Patagonia producto del efecto orográfico de los Andes (Garreaud et al., 2013). Durante las últimas décadas las entradas de agua dulce (precipitación y caudal) han descrito un marcado patrón de debilitamiento (Garreaud, 2018), el cual ha sido atribuido al cambio climático antropogénico a través de un debilitamiento de la intensidad de los vientos del oeste (Garreaud et al., 2013). Producto de lo anterior, desde la década de los 70' el Modo Anular Austral (SAM) registra una transición hacia su fase positiva, lo cual ha causado que los ríos que desembocan en la Patagonia norte han registrado posiblemente los menores caudales de los últimos cuatro siglos, según estudios dendrocronológicos (Lara et al., 2008).

Asociados a estos menores ingresos de agua dulce, oceanógrafos han reportado inestabilidad en la estratificación de la columna de agua, aumentos en los procesos de mezcla vertical y advección de aguas oceánicas y cambios en los patrones de productividad primaria. El evento más extremo ocurrió durante el verano del 2016, cuando una intensa y extensa sequía producida por la tendencia positiva de SAM y un fuerte El Niño favoreció mayores niveles de radiación y produjo la menor contribución de agua dulce en las últimas siete décadas de registros. Como consecuencia, la columna de agua perdió su estratificación, lo que permitió la advección vertical de aguas salinas y ricas en nutrientes que resultaron en una proliferación de algas nocivas (FANs) sin precedentes (León-Muñoz et al., 2018). De hecho, la FAN de *Pseudochattonella cf. Verruculosa* produjo en pocos días una mortalidad de salmones de cultivo similar a la que toda la salmonicultura chilena registra en dos años de producción, generando pérdidas de más de 800 millones de dólares, sin mencionar el conflicto socioambiental generado en el sur de Chile.

Las proyecciones climáticas para las próximas décadas indican que en gran parte del territorio chileno (30-50°S) se debiese avanzar hacia un clima más seco (Boisier et al., 2018, 2016). En Chile, los impactos hidrológicos se han evaluado mayormente en la zona mediterránea (por ej., Bozkurt et al., 2018; Demaria et al., 2013; Vicuña et al., 2012), donde existe un mayor uso consuntivo. En Patagonia, hasta ahora existe un alto nivel de desconocimiento de las interacciones entre los forzantes y los procesos de las cuencas australes, debido principalmente a la falta de monitoreo hidro-climático. En efecto, se pronostican importantes alteraciones en cuencas emplazadas en latitudes medias-altas que presenten altas coberturas de nieve, cuyas capacidades de almacenamiento se reducirían drásticamente, forzando periodos de estiaje más secos y prolongados (Barnett et al., 2005). Finalmente, considerando los impactos de las sequías sobre la ecología costera y las respectivas consecuencias socioeconómicas, en este estudio evaluamos los posibles impactos del cambio climático antropogénico sobre la hidrología de los Andes australes a través de modelación hidrológica forzada por observaciones y sensores remotos.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se limita a la cuenca del río Puelo (Figura 1) por la importancia de su caudal como modelador sobre la oceanografía física y biológica del sistema marino-costero y por ende como soporte de actividades económicas de alta relevancia tales como la acuicultura (Soto et al., 2019). Además, el río Puelo actúa como centinela del comportamiento de otros ríos importantes del área norte de la Patagonia chilena, con los cuales su patrón de descarga está significativamente relacionado (Petrohué, Cochamó, Yelcho, Palena, Cisnes y Aysén; Lara et al., 2008).

El río Puelo drena una cuenca trasandina que presenta un área de 9,112 km², de los cuales un 66% se encuentra en Argentina y un 33% en Chile. Antes de desembocar en el fiordo de Reloncaví (~41.5°S, Figura 1), el río Puelo promedia un caudal anual de 640 m³s⁻¹ y describe un régimen hidrológico pluvio-nival. Otro factor que influye significativamente en el régimen del río Puelo es el emplazamiento de más de una veintena de lagos a lo largo de la red hídrica, cuyas superficies cubren más 200 km².

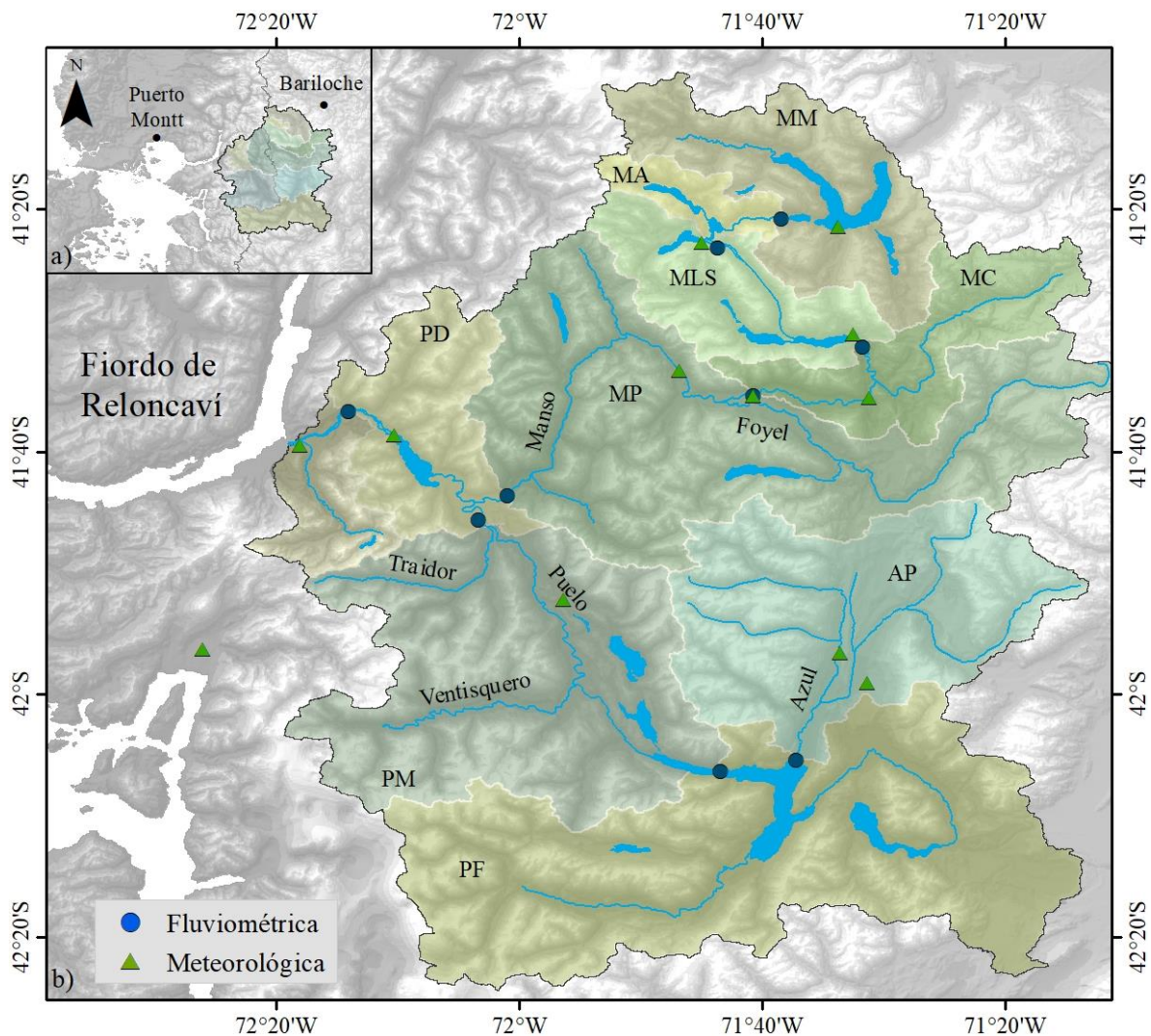


Figura 1. Cuenca del río Puelo. Los nombres señalan los ríos más importantes, mientras que las siglas destacan las subcuencas usadas en la modelación hidrológica.

3. METODOLOGÍA

Al igual que otras cuencas Patagónicas, el río Puelo tiene una baja densidad de estaciones (Figura 1). De hecho, más del 75% de su área está por encima de la estación de monitoreo más alta (774 msnm). Para abordar esta falta de información, los datos se obtuvieron cruzando los datos de sensores remotos con estaciones *in situ* de la Dirección General de Aguas de Chile y de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina (Figura 1). Así, las fuentes de información y las metodologías asociadas a correcciones de sesgo se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de fuentes de información y correcciones de sesgo

Variable	Fuente	Resolución espacial	Resolución temporal	Validación y/o corrección de sesgo
Precipitación (P)	CHIRPSv2	0.05°	Mensual	Escalamiento con observaciones propuesto por Bhatti et al. (2016)
Temperatura (T)	MOD11C3	0.05°	Mensual	Modelo estadístico que considera $T_{\text{día}}$, T_{noche} y la elevación Z
Cobertura de nieve (SCA)	MOD10A2 MYD10A2	500 m	8 días	Adaptación del filtro de nubes que propone Dariane et al. (2017)
Cobertura de suelo (CTS)	MCD12Q1	500 m	Anual*	Validación año 2013 con catastros vegetacionales de cada país
Niveles de lago (LR)	<i>in situ</i>	-	-	-

La modelación hidrológica consistió en la adaptación del modelo conceptual utilizado por Vargas et al., (2012) en la cuenca del río Simpson (~45°S; Figura 2). El modelo fue forzado mensualmente con la precipitación, temperatura y cobertura nival corregida de la Tabla 1. El modelo se compone del método grado-día para el cálculo del derretimiento, del método curva número para la determinación de la escorrentía superficial y de la fórmula de Thornthwaite para la estimación de la evapotranspiración potencial. Adicionalmente, se construyeron "curvas de descarga" entre los niveles de lagos y el caudal a la salida de estos (subcuencas MM, MLS y PF en Figura 1), con el objetivo de reproducir adecuadamente el flujo base durante los períodos de estiaje.

La cuenca del río Puelo fue desagradada en nueve subcuencas, que se delimitaron considerando las estaciones fluviométricas disponibles. La calibración del modelo implicó el ajuste de ocho parámetros desde aguas arriba hacia aguas abajo (Figura 2) a través de la maximización de una función objetivo (Índice de Concordancia Mejorado; RIA; Willmott et al., 2012). El índice RIA fue escogido en función que la simulación de un clima futuro más seco requiere una diferenciación más equilibrada de los caudales medios-bajos como un análogo de las condiciones futuras (Fowler et al., 2018). El período de calibración abarcó 2003-2010, mientras que la validación se realizó para el período 2010-2017 con las mismas métricas.

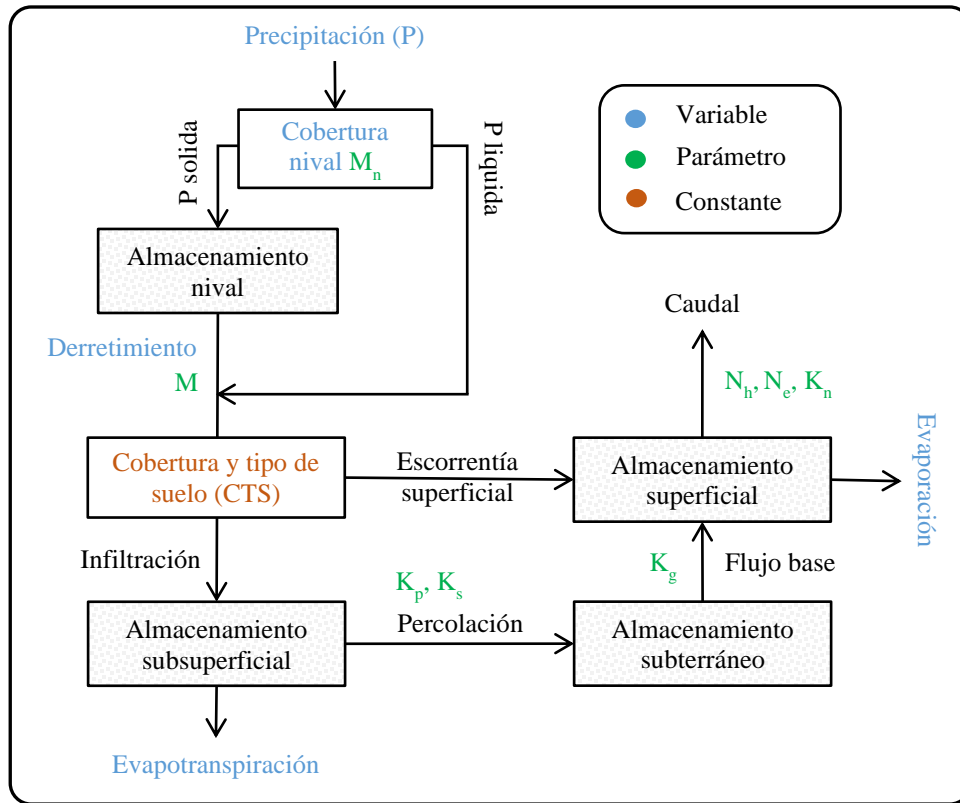


Figura 2. Modelo hidrológico para cada subcuenca del río Puelo

Finalmente, las proyecciones hidrológicas para el futuro cercano 2030-2060 se obtuvieron mediante el método factor de cambio (Diaz-Nieto y Wilby, 2005), considerando como periodo base 1980-2010. La variabilidad interanual en la Patagonia norte es producida principalmente por ENSO. Los GCMs aún no tienen consenso sobre el futuro de la variabilidad ENSO (Collins et al., 2010) y el promedio multi-modelo filtra la mayor parte de la variabilidad natural. Sin embargo, el método del factor de cambio preserva la variabilidad observada (relacionada con ENSO/SAM), lo que resulta en una modificación razonable de las condiciones climáticas que incluye la variabilidad natural y el forzamiento antropogénico.

Los factores de cambio *-deltas-* se obtuvieron a partir de 42 corridas de 25 Modelos Circulación General (GCM) para cada escenario (RCP 2.6, 4.5 y 8.5). Los deltas de precipitación y temperatura (ΔP y ΔT) se calcularon mensualmente (es decir, 12 pares ΔP - ΔT por cada proyección). Adicionalmente, se modificó el área nival (SCA) utilizada en las etapas de calibración y validación (Ecuación 1). Para esto, asumimos que el gradiente de temperatura altitudinal (ΔT_h) permanecerá constante en el futuro y, por lo tanto, los deltas ΔT modificarán el SCA según el relieve de cada subcuenca (H_{max} y H_{min} en Ecuación 1).

$$\Delta SCA_i (\%) = \frac{\Delta T}{\Delta T_h \cdot (H_{max}^i - H_{min}^i)} \quad (1)$$

4. RESULTADOS

Patrones Climáticos

La incorporación de sensores remotos permitió comprender los patrones espaciales en las principales variables hidrológicas de la cuenca del río Puelo. Los resultados para precipitación mostraron una clara diferenciación entre ambos lados de los Andes producto del efecto orográfico (Figura 3a). Por lo tanto, aunque el área de la cuenca se encuentra principalmente al este de los Andes (~66%), ambos lados de los Andes mostraron contribuciones volumétricas de precipitación iguales (50% a cada lado). Para la temperatura, el gradiente de temperatura altitudinal obtenido fue $5.3^{\circ}\text{C km}^{-1}$ (Figura 3b). Para la cobertura nival (Figura 3c), se observaron tendencias decrecientes significativas durante los veranos (test de Mann-Kendall; $p < 0.01$).

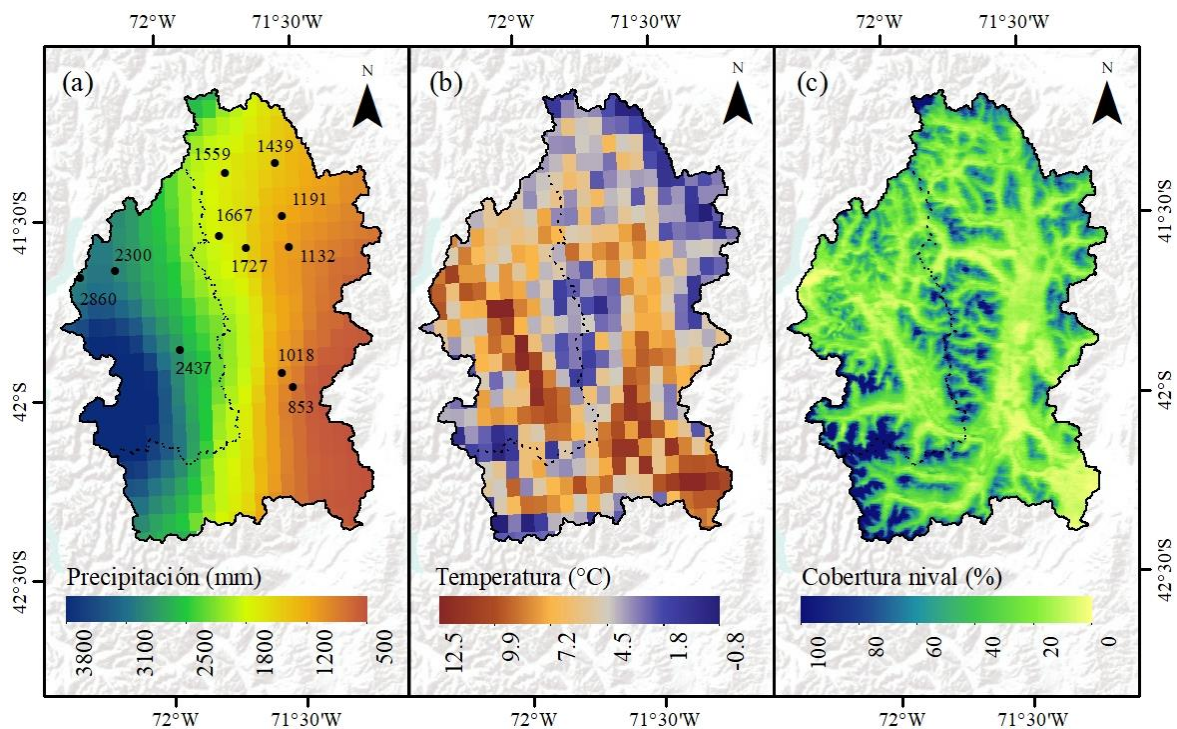


Figura 3. Patrones espaciales de precipitación media anual (a), temperatura media anual (b) y cobertura nival promedio anual (c). Los puntos en a) indican los registros *in situ*.

Modelación Hidrológica

El modelo hidrológico alcanzó un índice RIA de 0,79 y 0,78 para la sección final del río Puelo (subcuenca PD) en la etapa de calibración y validación, respectivamente (Figura 4). Además, la aproximación logró simular adecuadamente la dinámica de los caudales en las distintas subcuencas de estudio, mostrando coherencia con respecto a la variabilidad interanual de los caudales de los Andes australes. Sin embargo, en la temporada de deshielo (noviembre a enero), el modelo no logró un buen desempeño y subestimó los caudales peak, ya que el rol del derretimiento no fue bien capturado (~ 5-15% en 6 de 9 subcuencas; Figura 4b). En el año 2016, el modelo simuló un período prolongado de sequía con valores de caudales extremadamente bajos (marzo - julio $176 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; Figura 4^a) en comparación con los registros históricos (marzo - julio $641 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

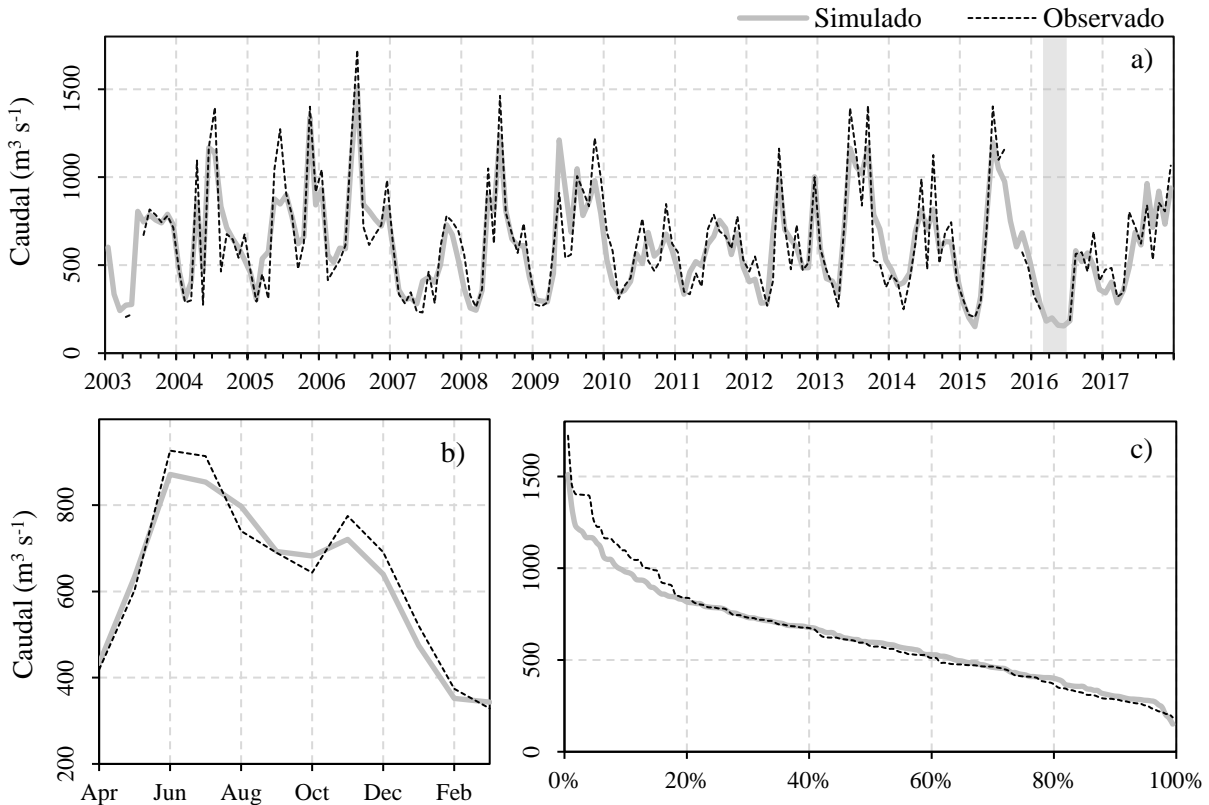


Figura 4. Desempeño del modelo hidrológico para la subcuenca PD (Figura 1) en las etapas de calibración y validación (a). La columna gris indica el periodo que la estación quedó sobre el nivel de aguas. b) Comparación a nivel medio mensual. c) Curva de duración.

Proyecciones Hidro-climáticas

A nivel climático, los resultados obtenidos del ensamble de GCMs para el futuro cercano (2030-2060) mostraron una alta variabilidad en los rangos de temperatura (ΔT) y precipitación (ΔPP) en relación con el período base 1980-2010 (Figura 5). El período DJF-MAM presentó los deltas más altos (Figura 5a-b), mientras que para el período JJA-SON los deltas fueron principalmente atenuados y concentrados (Figura 5c-d). Considerando todas las salidas, el promedio multi-modelo predice una disminución anual marcada en la precipitación ($\sim 10\%$) y un aumento de la temperatura ($\sim 1^\circ\text{C}$). A nivel estacional, solo el 10% de los resultados predicen un aumento en la precipitación en verano (DJF), pero dicho porcentaje aumenta al 30% en invierno (JJA)

La disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura causaron una extensión de la época de estiaje y una transición a regímenes hidrológicos cada vez más pluviales, debido a una disminución del almacenamiento de nieve y un aumento de la contribución del área pluvial debido al efecto de temperaturas más altas (Figura 6a). Al comparar los datos modelados para el futuro cercano (promedio multi-modelo, RCP 8.5) con los caudales actuales, se pronostica una fuerte disminución en las contribuciones de agua dulce al fiordo de Reloncaví (-10%). Estos impactos tendrían lugar principalmente en los meses de verano ($\sim 20\%$) y otoño ($\sim 15\%$). Por el contrario, los menores impactos se proyectan para los meses de invierno (Figura 6a).

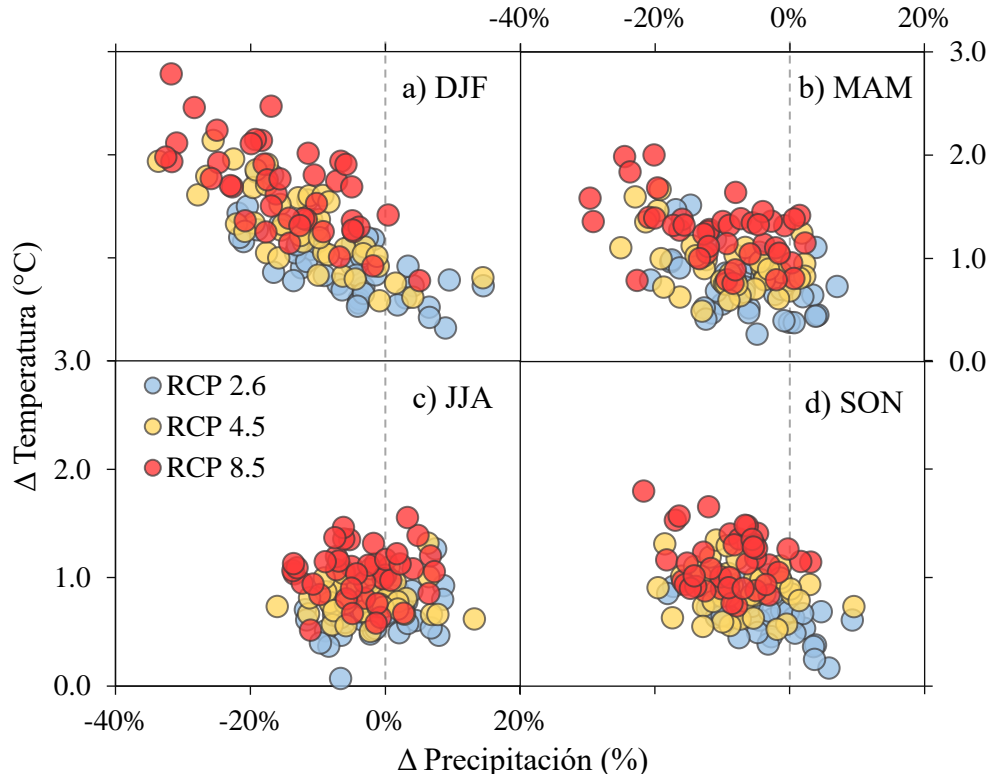


Figura 5. Proyecciones climáticas estacionales de precipitación y temperatura del aire para el futuro cercano (período 2030-2060 vs. 1980-2010). La línea vertical indica Δ P = 0%.

Finalmente, se utilizó como escenario de referencia el verano-otoño del 2016 para evaluar la existencia futuros caudales aún más extremos asumiendo que la variabilidad natural se mantendrá en el futuro cercano. Bajo el escenario RCP 8.5, los resultados indicaron que habría combinaciones que podrían aumentar la magnitud y frecuencia de las sequías extremas. De hecho, la probabilidad de ocurrencia de sequías, como la reciente 2016, se duplique considerando los registros históricos (Figura 6b-c). Esta relación podría incluso triplicarse para caudales medios-bajos (línea gris en Figura 6b).

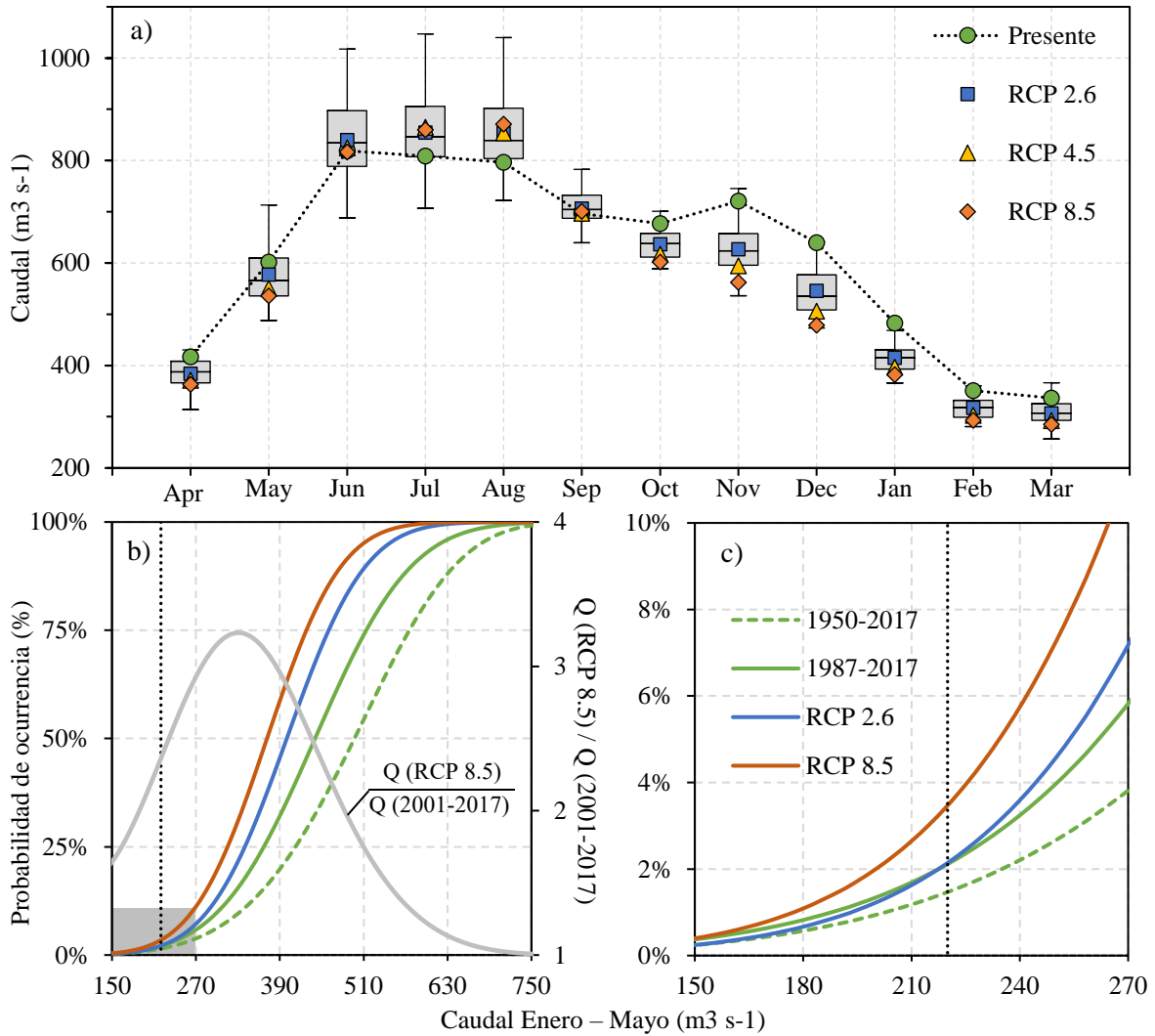


Figura 6. a) Proyecciones hidrológicas medias mensuales para el río Puelo en el futuro cercano (2030-2060). Los símbolos señalan los promedios multi-modelo. b) Distribución acumulada de caudales para enero-mayo. La línea vertical punteada señala el caudal modelado para el 2016 y la línea gris señala la razón entre la probabilidad de ocurrencia de los caudales del periodo modelado y escenario RCP 8.5. c) Versión aumentada del área gris en b)

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del presente estudio se resumen a continuación:

- La inclusión de sensores remotos en la modelación hidrológica viene a suplir las falencias de las estaciones meteorológicas en la representación de las variables involucradas en el ciclo hidrológico de la cuenca. La distribución espacial arroja importantes gradientes longitudinales y altitudinales, dados por la transición geográfica hacia Argentina.

- El modelo hidrológico logró simular la dinámica de los caudales del río Puelo para el periodo base 2003-2017, alcanzando un índice RIA de 0.78 para la estación ubicada cerca de la desembocadura. Sin embargo, la reproducción de los caudales de primavera no fue la esperada, ya que escala de interés representa un reto mayor en la representación distribuida de los flujos de masa y energía.

- Las proyecciones climáticas para el futuro cercano (2030-2060) obtenidas de un ensamble de 25 GCMs indicaron una intensificación de las anomalías climáticas hacia un clima más seco. Específicamente, se esperan cambios a escala estacional, donde el periodo estival sería el más afectado independiente del escenario RCP analizado ($\Delta PP = -15\% \pm 9\%$ y $\Delta T = 1.7 \pm 0.4^\circ\text{C}$).

- Las proyecciones hidrológicas para el futuro cercano estiman una extensión en el periodo de estiaje dado por una transición hacia regímenes hidrológicos con una menor componente nival, donde las mayores tasas de decrecimiento son para los periodos estivales ($\Delta Q = \sim 20\%$). Además, se esperan cambios en la recurrencia de eventos extremos de estiaje, siendo más probable la recurrencia de eventos tan extensos como el ocurrido el 2016.

Finalmente, las brechas y limitaciones encontradas en este estudio invitan a seguir avanzando en el fortalecimiento de los actuales sistemas de monitoreo con el objetivo de mejorar la comprensión de los procesos que gobiernan estas latitudes australes. De esta manera, durante los próximos años se podría avanzar en una mejor caracterización de los flujos relevantes en el ciclo hidrológico para una escala distribuida de cuenca. Además, es necesario trabajar en la caracterización biogeográfica de las cuencas Patagónicas, ya que afortunadamente estas aún presentan un elevado nivel de conservación y prácticamente nula regulación y/o derivación de sus aguas (por ej., embalses). Estos atributos ecosistémicos, de mantenerse en el tiempo, debiesen disminuir el impacto de un futuro clima más seco sobre los ingresos de agua dulce al sistema marino-costero Patagónico.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada por el proyecto FONDECYT N°11170768 “Potential effects of land use change on fjords of western Patagonia under climate change scenarios”.

REFERENCIAS

Barnett, T. P., Adam, J. C. y Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309.

Bhatti, H. A., Rientjes, T., Haile, A. T., Habib, E. y Verhoef, W. (2016). Evaluation of bias correction method for satellite-based rainfall data. *Sensors (Switzerland)*, 16(6), 1–16.

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

- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D. y Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P. y Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3–4), 131–147.
- Collins, M., An, S.-I., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Jochum, M., Lengaigne, M., Power, S., Timmermann, A., Vecchi, G. y Wittenberg, A. (2010). The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, 3(6), 391–397.
- Darlane, A. B., Khoramian, A. y Santi, E. (2017). Investigating spatiotemporal snow cover variability via cloud-free MODIS snow cover product in Central Alborz Region. *Remote Sensing of Environment*, 202, 152–165.
- Dávila, P. M., Figueroa, D. y Müller, E. (2002). Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35–55°s). *Continental Shelf Research*, 22(3), 521–534.
- Demaria, E. M. C., Maurer, E. P., Thrasher, B., Vicuña, S. y Meza, F. J. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *Journal of Hydrology*, 502, 128–138.
- Diaz-Nieto, J. y Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, 69(2–3), 245–268.
- Fowler, K., Peel, M., Western, A. y Zhang, L. (2018). Improved Rainfall-Runoff Calibration for Drying Climate: Choice of Objective Function. *Water Resources Research*, 54(5), 3392–3408.
- Garreaud, R. (2018). Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental disruption in western Patagonia in 2016. *Climate Research*, 74(3), 217–229.
- Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M. y Rojas, M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, 26(1), 215–230.
- Lara, A., Villalba, R. y Urrutia, R. (2008). A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer-fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change*, 86(3–4), 331–356.
- León-Munõz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R. y Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1–10.
- Saldías, G. S., Sobarzo, M. y Quiñones, R. (2018). Freshwater structure and its seasonal variability off western Patagonia. *Progress in Oceanography*, 174, 143–153.

Soto, D., León-Muñoz, J., Dresdner, J., Luengo, C., Tapia, F. J. y Garreaud, R. (2019). Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: understanding the biophysical, socioeconomic and governance links. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 354–374.

Vargas, J., De La Fuente, L. y Arumí, J. L. (2012). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. *Obras y proyectos*, (12), 32–41.

Vicuña, S., McPhee, J. y Garreaud, R. D. (2012). Agriculture Vulnerability to Climate Change in a Snowmelt-Driven Basin in Semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431–441.

Willmott, C. J., Robeson, S. M. y Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094.