

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**CUENCAS DE MONTAÑA DE CHILE CENTRAL ANTE SEQUÍAS: DIFERENCIA EN  
LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A AÑOS DE LA NIÑA Y LA MEGASEQUÍA**

**DIEGO HERNÁNDEZ N.<sup>1</sup>**  
**MARÍA COURARD C.<sup>2</sup>**  
**ALONSO MEJÍAS A.<sup>3</sup>**  
**JAMES MCPHEE T.<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

Los años de condición La Niña históricamente se asocian a déficits de precipitación en Chile central. Sin embargo, desde el inicio de la megasequía en 2010, la teleconexión entre las fases de El Niño - Oscilación del Sur y el hidroclicma de Chile central se ha debilitado o bien ha desaparecido. Este estudio investiga la respuesta hidrológica de cuencas de alta montaña ante La Niña (LN) y la megasequía (MS) en Chile central a través de la simulación realista de procesos físicos. Se demuestra que en LN los inviernos y veranos son más fríos pero las primaveras más cálidas, mientras que en la MS los veranos son más cálidos. Además, la respuesta hidrológica a LN y MS es distinta y amplificada durante la MS en términos de déficit de caudal. Los resultados de la simulación para cinco cuencas de los Andes centrales sugieren durante la MS menor eficiencia en la fracción de precipitación sólida (-2,1% y 1,2% respecto al promedio de largo plazo, para MS y LN, respectivamente), acompañado por mayor evaporación (8,9% y 6,2%) y menor caudal (-9,5% y -3,1%) en términos relativos a la precipitación anual. También la acumulación de nieve a fin del invierno se propaga para la MS (-35,4% y -14,6%) respecto al déficit de precipitación sólida (-29,3% y -17,6%) y de precipitación total (-26% y -19,3%), y durante la MS la duración de la nieve es menor comparada a LN (-14,3 y -9,5 días). Así, se verifica el rol clave que cumplen los procesos nivales y su variabilidad en la respuesta hidrológica ante sequías en Chile central. Esta investigación contribuye a mejorar el entendimiento de la respuesta típica de cuencas andinas ante anomalías de precipitación y temperaturas estacionales, analizando dos fenómenos de gran escala bien definidos, e identificando cómo la variabilidad climática se propaga en la hidrología de nieve durante sequías.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, Advanced Mining Technology Center, U. de Chile – email: diego.hernandez@amtc.uchile.cl

<sup>2</sup>Ingeniera Civil, Advanced Mining Technology Center, U. de Chile – email: mariacourard@gmail.com

<sup>3</sup>Ingeniero Civil, Advanced Mining Technology Center, U. de Chile – email: amejias.acu@gmail.com

<sup>4</sup>Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email:jmcphee@uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad hidroclimática de Chile central se explica por la acción conjunta de distintos modos de variabilidad climática, en especial por El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) en la escala interanual (Aceituno, 1988; Rutllant & Fuenzalida, 1991; Dettinger et al., 2001; Montecinos & Aceituno, 2003; Rubio-Álvarez & McPhee, 2010; Cai et al., 2020; Aceituno et al., 2021; Hernandez et al., 2022). Sin embargo, desde el inicio de la megasequía en Chile central, la teleconexión entre ENSO y el hidroclima de Chile central se ha debilitado o desaparecido (Garreaud et al., 2017, 2020). La megasequía actual no tiene análogos en el registro histórico en términos de extensión espacial y temporal, y ha sido atribuida al efecto conjunto de forzante antrópica y variabilidad natural (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2021).

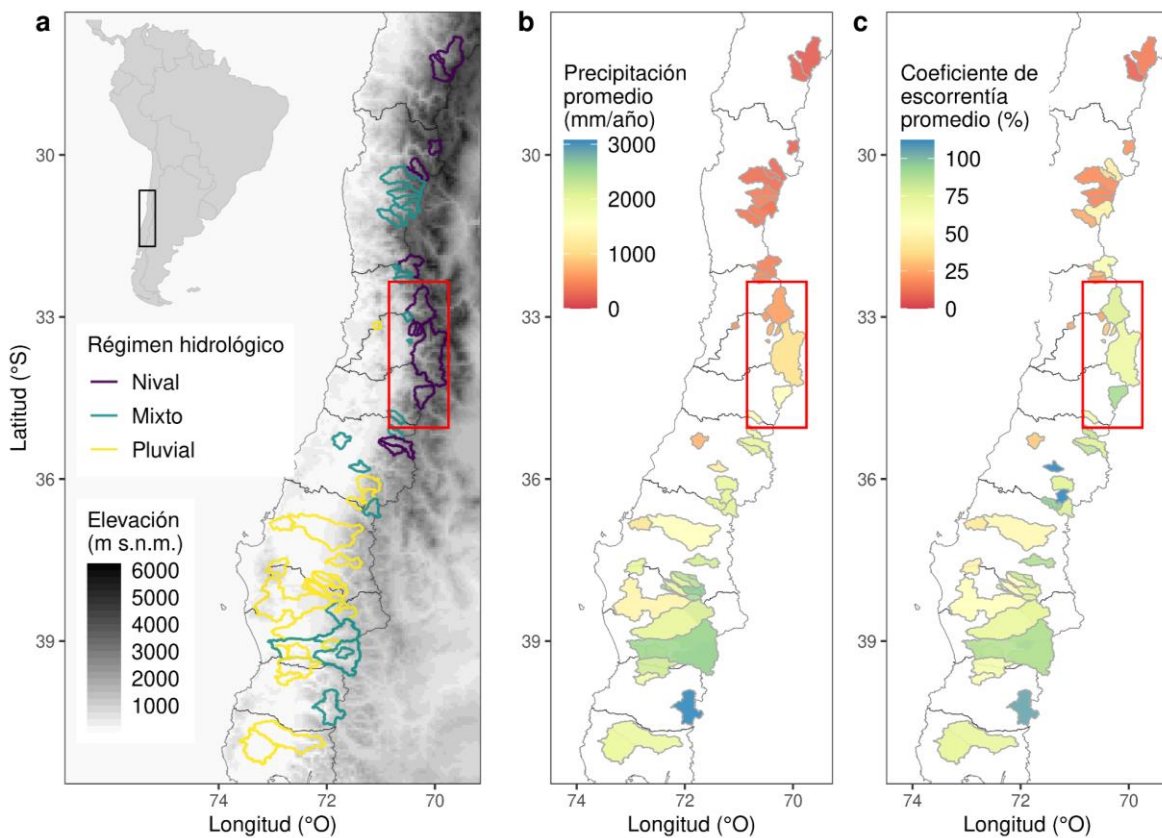
En el mundo, las megasequías son una parte intrínseca de la variabilidad hidroclimática natural de acuerdo con reconstrucciones paleoclimáticas (Cook et al., 2022). Si bien la definición de megasequías no es única, se reconoce que el fenómeno está presente actualmente tanto en Chile central como en California. Así, resulta interesante notar que en el pasado (primera mitad del milenio anterior) ocurrieron megasequías acopladas en las costas suroeste de Norteamérica y Sudamérica, asociadas a condiciones frías (fase La Niña) del ciclo ENSO (Steiger et al., 2021). En este contexto, tanto las condiciones históricas La Niña como la megasequía actual entregan una oportunidad valiosa de entender mejor los procesos asociados a sequías o años secos, y cómo estos se propagan a través del ciclo hidrológico.

En especial para cuencas de alta montaña, llama la atención la diferencia que se pueda establecer entre sequías frías y cálidas (e.g., Bales et al., 2018; Colombo et al., 2023; Cowherd et al., 2023), debido al efecto que juega la temperatura del aire en procesos nivales. Incluso, para cuencas nivales de Chile central, las anomalías del coeficiente de escorrentía (tasa de precipitación convertida a caudal) son negativas durante la megasequía (Alvarez-Garreton et al., 2021) y positivas durante los años de La Niña (Hernandez et al., 2022), sugiriendo que los déficits de precipitación van acompañados de un cambio bivalente en la eficiencia de cómo la precipitación se particiona en distintos flujos hidrológicos. Para entender mejor los procesos afectados durante distintos tipos de sequías, en este estudio se intentan responder las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo las anomalías meteorológicas de gran escala asociadas a La Niña y la megasequía se propagan a través del ciclo hidrológico?
2. ¿Cuál es la respuesta hidrológica típica a La Niña y la megasequía en Chile central?
3. ¿Por qué son diferentes los mecanismos de respuesta a los años de La Niña y la megasequía en cuencas de alta montaña de Chile central?

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El primer análisis se centra en cuencas hidrográficas de la zona central de Chile, entre las latitudes 27° y 42°S (Figura 1). Estas cuencas presentan condiciones hidrológicas naturales o no intervenidas (Vásquez et al., 2021; Hernandez et al., 2022), en un rango de regímenes hidrológicos que contempla condiciones nivales, mixtas y pluviales. Las cuencas incluidas exhiben gran diversidad en sus regímenes de precipitaciones anuales, condiciones de aridez, elevaciones medias, etc. La región analizada concentra la mayor parte de la población de Chile y la gran mayoría de los usos consuntivos de agua. La segunda parte del análisis se enfoca en las cuencas de cabecera, principalmente nivales, de las hoyas hidrográficas de la región semiárida central (caja roja en Figura 1), de vasta importancia social ya que proveen de agua potable a la capital y a la mayoría de la población del país.



**Figura 1. Mapa del área de estudio: cuencas de Chile central en régimen cercano a natural y con datos disponibles de largo plazo. (a) Elevación y clasificación de régimen hidrológico de 59 cuencas según método K-means (Hartigan & Wong, 1979), siguiendo a Hernandez et al., 2022. (b) Precipitación climatológica. (c) Coeficiente de escorrentía de largo plazo. La caja roja indica la subregión simulada por el modelo MESH.**

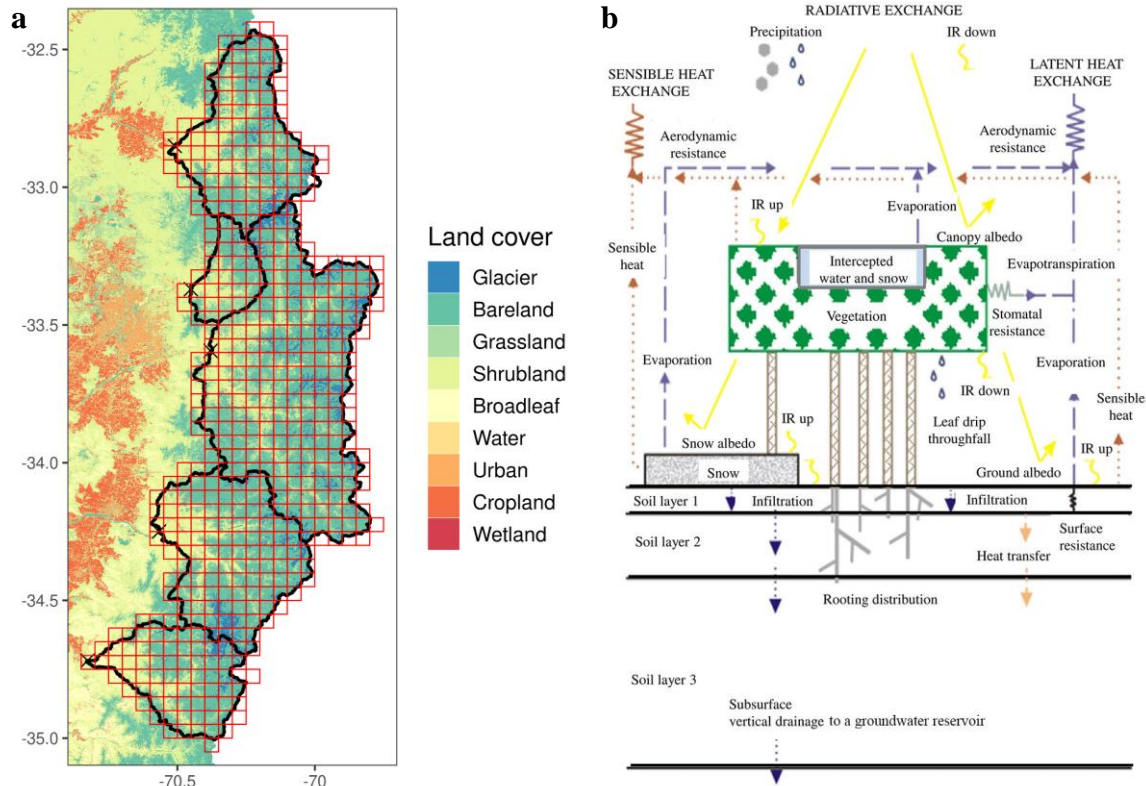
## 3. METODOLOGÍA Y DATOS

Esquemáticamente, el trabajo se subdivide en dos partes. Una primera sección corresponde al análisis hidroclimático en 59 cuencas de Chile central estratificadas por régimen hidrológico (pluviales, mixtas y nivales). En esta sección, con base en observaciones (caudales disponibles en

CAMELS-CL, Alvarez-Garreton et al., 2018, a partir de los registros de la Dirección General de Aguas) y pseudo-observaciones (producto grillado de precipitación y temperatura CR2MET v2.5, Boisier, 2023) se caracterizan las anomalías hidrometeorológicas típicas de La Niña (LN) y la megasequía (MS) para el periodo abril/1981 a marzo/2019 (38 años hidrológicos). En lo sucesivo, para cada variable  $x$  en el año  $t$  ( $x_t$ ) se sustrae el promedio de largo plazo  $\bar{x}$ , obteniendo la serie interanual de anomalías  $x'_t = x_t - \bar{x}$ . Finalmente, el promedio de anomalías de la variable se calcula como el promedio de todos los años pertenecientes a La Niña o a la megasequía, etc.

En una segunda etapa, se simulan los procesos hidrológicos de cinco cuencas nivales de Los Andes centrales con el modelo “Modélisation Environnementale Communautaire – Surface and Hydrology” (MESH; Pietroniro et al., 2007). El modelo MESH resulta apropiado para análisis regionales debido al carácter semidistribuido de sus parámetros al mismo tiempo que representa la variabilidad sub-celda. Ha sido implementado en extensas regiones frías con pendientes abruptas y donde los procesos criosféricos son importantes (Elshamy et al., 2022), y constantemente mejorado en la representación de procesos de nieve y glaciares desde su desarrollo (Wheater et al., 2022). Con los resultados de la simulación se analizan en mayor detalle los mecanismos hidrológicos de respuesta a los años de condición LN y la MS, con énfasis en variables de flujo y estados asociados al manto nival estacional.

La Figura 2a muestra el dominio de simulación del modelo MESH, así como su discretización en una grilla de celdas de 5 km x 5 km (celdas de modelación coincidentes con las celdas del producto meteorológico de entrada). Asimismo, se ilustra la clasificación de suelos utilizada (Zhao et al., 2016), la que en combinación con la clasificación de orientación norte o sur (a partir del modelo de elevación digital MERIT-DEM; Yamazaki et al., 2019) define las Unidades de Respuesta Agrupadas (GRUs, por sus siglas en inglés). De esta manera, se tienen 18 clases de GRUs (obtenidas como la intersección de 9 clases de suelo y 2 clases de orientación) las cuales representan la variabilidad o heterogeneidad sub-celda. Para cada cuenca, se comparten iguales sets de parámetros para cada GRU (i.e., carácter semidistribuido). En la Figura 2a se puede ver que las clases de suelo principales son suelo desnudo, matorral, pastizal y glaciares. En MESH se utiliza el módulo de física de la superficie CLASS (Verseghy, 2012) para resolver las ecuaciones de balance de masa y energía en la columna de suelo (para cada GRU, dentro de cada celda de modelación). Los procesos que CLASS simula se muestran en la Figura 2b e incluyen balances de agua y energía en la vegetación, e interceptación, infiltración, y derretimiento en la nieve y el suelo, además de representar como columna de hielo en caso de glaciares o hielo continental. También, en esta versión del modelo se activa el módulo de transporte de nieve por viento.

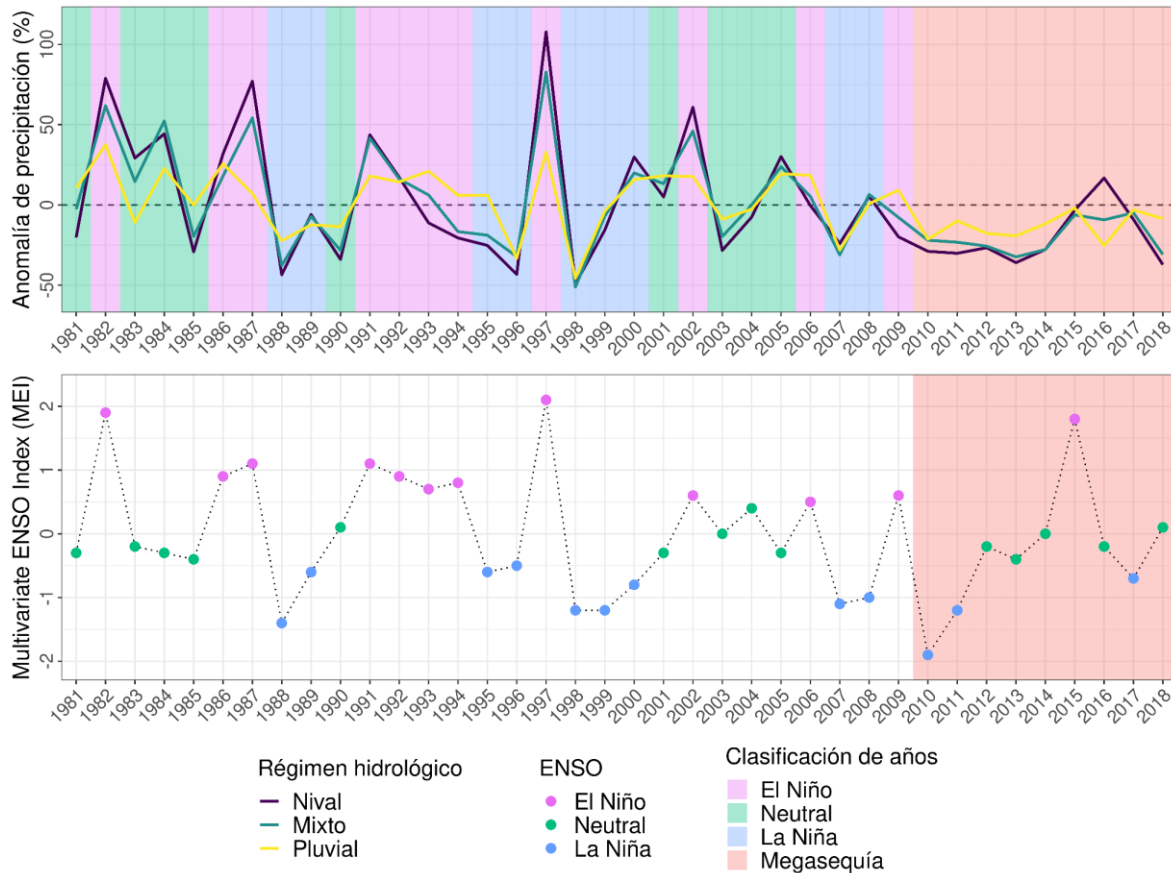


**Figura 2. (a) Subregión de Chile central simulada por el modelo MESH (Andes centrales). Cuencas de norte a sur: Aconcagua en Chacabuquito, Mapocho en Los Almendros, Maipo en El Manzano, Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes, y Tinguiririca bajo Los Briones. La grilla roja indica las celdas de simulación del modelo, de resolución aproximada 5 km x 5 km. (b) Esquema de procesos representados por MESH (CLASS) adaptado de Versegghy, 2012.**

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

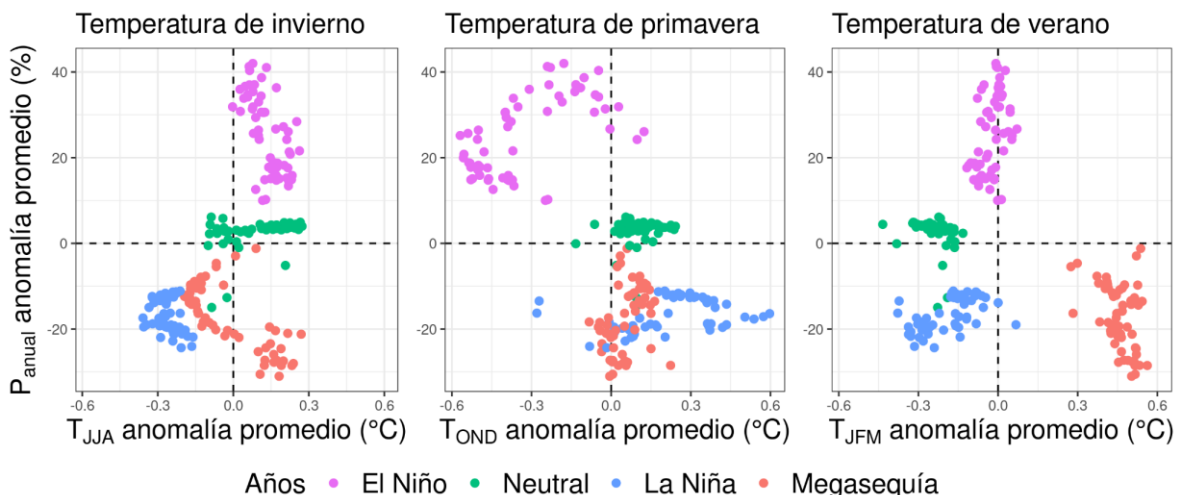
### 4.1 Análisis hidroclimático de la respuesta a La Niña y la megasequía en distintos regímenes hidrológicos de Chile central

La serie de anomalías de precipitación ilustrada en la Figura 3 muestra que, en general, la variabilidad interanual se acentúa en las cuencas nivales (zona centro-norte) respecto de las cuencas pluviales (zona sur) del dominio. Asimismo, se aprecia que si bien toda la región muestra los efectos de la MS en cuanto al déficit de precipitaciones, este déficit es más pronunciado en términos relativos en las cuencas de régimen nival y mixto. Para el caso de las cuencas nivales, previo a 2010 existe una correspondencia entre la anomalía de precipitaciones y la fase ENSO; de hecho, en el período histórico el índice MEI explica el 38% de la variabilidad de la precipitación anual. Sin embargo, luego de 2010 esta correlación se debilita o extingue ( $R^2$  igual a 12%). Este resultado motiva a clasificar a la fase La Niña y a la megasequía como tipos distintos de años secos, lo cual es confirmado en los distintos patrones meteorológicos de La Niña y la megasequía en la Figura 4.

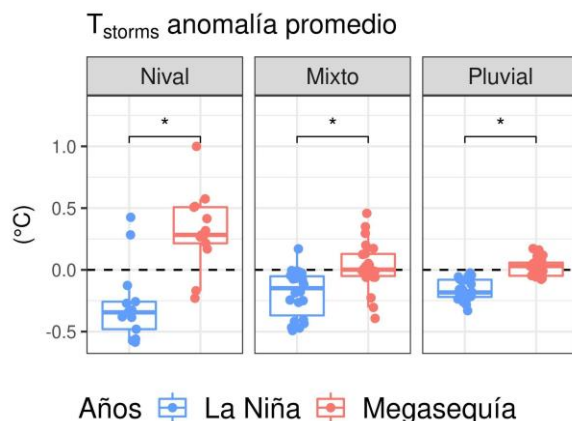


**Figura 3. Series de tiempo de anomalías de precipitación y clasificación de años según fases de ENSO. (Panel superior) Anomalías de precipitación promedio de 59 cuencas de Chile central agrupadas por régimen hidrológico. (Panel inferior) Clasificación de años hidrológicos según media anual del índice MEI (Wolter & Timlin, 2011):  $> 0.5$  indica fase El Niño,  $< -0.5$  indica fase La Niña, o fase Neutral en otro caso. El periodo sombreado en rojo indica los años de la megasequía.**

Es interesante develar el impacto diferenciado de La Niña y de la megasequía sobre las forzantes principales (precip. y temp.) estacionales (Figura 4). En invierno, si bien en la mayoría de las cuencas las anomalías de temperatura son negativas tanto en LN como en MS, en aquellas cuencas con los mayores déficit de precipitaciones las anomalías de temperatura de invierno son positivas, en magnitud del orden de  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Este fenómeno (de mayores temp. en MS) se ve acentuado con creces en verano, cuando todas las cuencas del dominio muestran anomalías de temperatura positivas y en torno a  $0,5^{\circ}\text{C}$  como promedio trimestral. Cuando se analizan solamente los días con precipitaciones, la diferencia de temperaturas entre los años LN y la MS es también significativa en cuencas de régimen nival (Figura 5). Mientras que en LN predominan las anomalías frías durante eventos de precipitación, las tormentas en el período MS están caracterizadas por anomalías cálidas de alrededor  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Los resultados de la Figura 4 demuestran que las fases ENSO y los años de la megasequía logran capturar patrones meteorológicos de gran escala bien definidos.

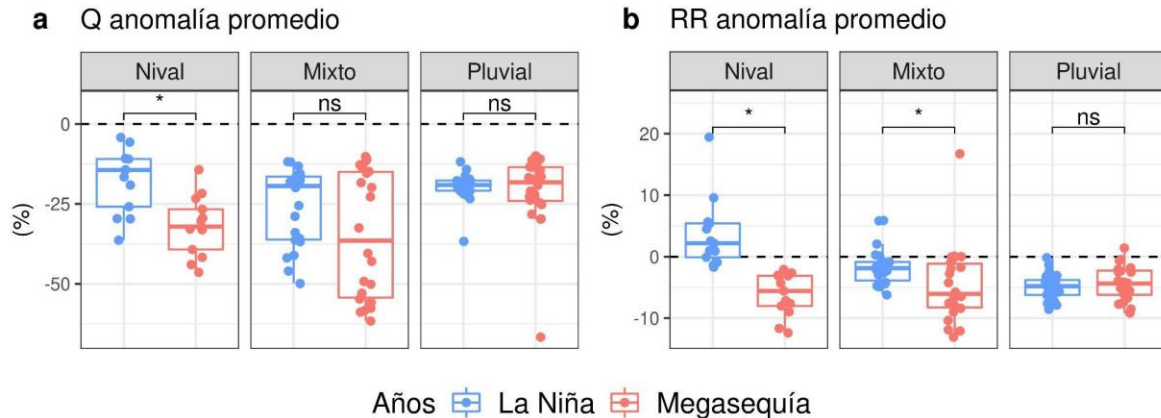


**Figura 4. Anomalías hidroclimáticas promedio para 59 cuencas de Chile central, según promedio de años en fases ENSO (antes de 2010) o megasequía, respecto al promedio de largo plazo (abril/1981-marzo/2019). En todos los casos el eje vertical indica anomalías de precipitación anual, mientras que el eje horizontal muestra anomalías de temperaturas estacionales: (Izquierda) junio-julio-agosto, (Centro) octubre-noviembre-diciembre, (Derecha) enero-febrero-marzo.**



**Figura 5. Anomalías de temperatura de tormentas promedio para 59 cuencas de Chile central, según promedio de años en fase La Niña (antes de 2010) o megasequía, respecto al promedio de largo plazo (abril/1981-marzo/2019), y agrupadas según régimen hidrológico. Una tormenta es definida como un día con precipitación promedio de cuenca mayor a 2 mm.**

En términos de caudales (Figura 6), son las cuencas de régimen nival las que evidencian las diferencias más significativas entre anomalías durante años LN y la MS. Es más, durante LN el coeficiente de escorrentía presenta leves anomalías positivas, mientras que en los años de la MS el signo de este indicador es negativo.

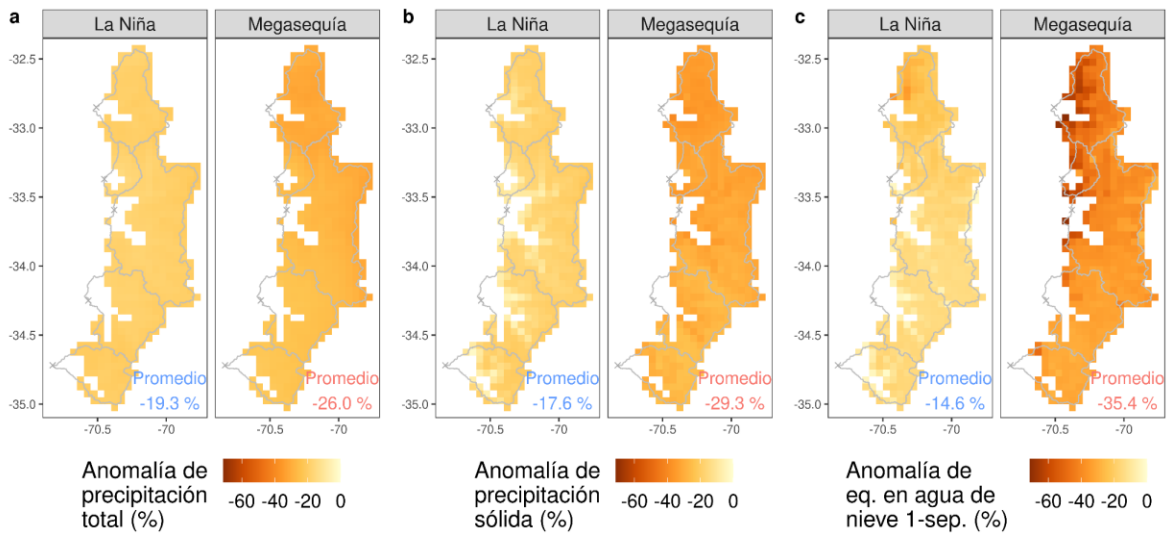


**Figura 6. Anomalías hidrológicas promedio para 59 cuencas de Chile central, según promedio de años en fase La Niña (antes de 2010) o megasequía, respecto al promedio de largo plazo (abril/1981-marzo/2019), y agrupadas según régimen hidrológico. (a) Anomalías promedio de caudal. (b) Anomalías promedio de coeficiente de escorrentía (caudal anual escalado por precipitación anual).**

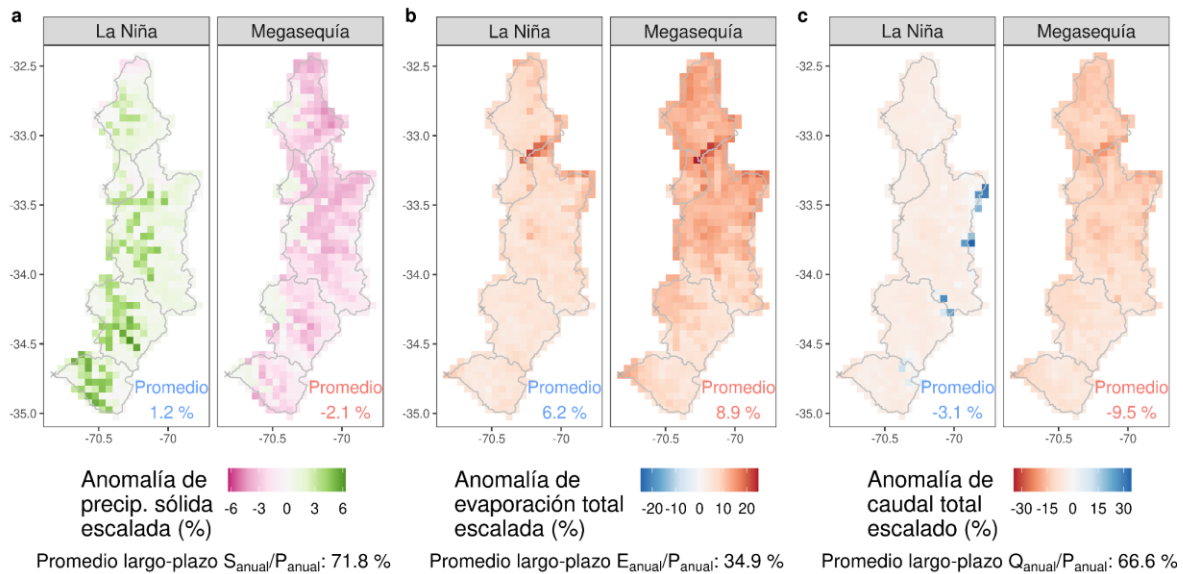
#### 4.2 Simulación hidrológica de la respuesta a La Niña y la megasequía en cuencas nivales de Chile central

De la Figura 7 se aprecia una diferencia sustancial entre LN y la MS en términos del manto de nieve estacional. Por una parte, en años LN las anomalías de precipitación total, precipitación sólida y equivalente en agua al 1 de septiembre son similares (-19,3%, -17,6% y -14,6%, respectivamente), con impacto amortiguado sobre la componente nival. Por el contrario, durante la MS el déficit de precipitación se ve amplificado por la condición cálida en invierno y durante tormentas, lo que resulta en un déficit mayor de precipitación sólida y un déficit aún más importante en acumulación de nieve a fin del invierno (-26,0%, -29,3% y -35,4%, respectivamente). Al analizar los días con equivalente en agua mayor a 5 mm, la duración de la cobertura de nieve es menor durante la MS (-14,3 días, respecto al promedio de largo plazo) comparada con LN (-9,5 días). Si bien en todo el dominio los déficits de precipitación son similares, el déficit de equivalente en agua de nieve es más pronunciado en la zona baja de las cuencas del río Aconcagua en Chacabuco y Mapocho en Los Almendros, como se desglosa por bandas de latitud y elevación en la Tabla 1.

En la Figura 8 se muestra que las anomalías de fracción sólida de la precipitación son ligeramente positivas en los años LN y negativas para la MS. No obstante, las anomalías de fracción evaporativa y coeficiente de escorrentía tienen en ambos casos el mismo signo: incremento en la evaporación y decremento de la escorrentía respecto de la precipitación anual. En el dominio, la MS acarrea un incremento de fracción evaporativa mayor que el incremento de los años LN (9% y 6%, respectivamente), mientras que la eficiencia de generación de escorrentía baja un 9% respecto al período completo, comparado con una anomalía negativa de sólo un 3% en los años LN. Especialmente, el efecto adicional de la MS profundizando los déficits de acumulación de nieve y generación de escorrentía se hace más pronunciado en la parte norte del dominio, y en las bandas de menor elevación para el caso de la acumulación de nieve (Tabla 1) con déficits mayores al 40%.



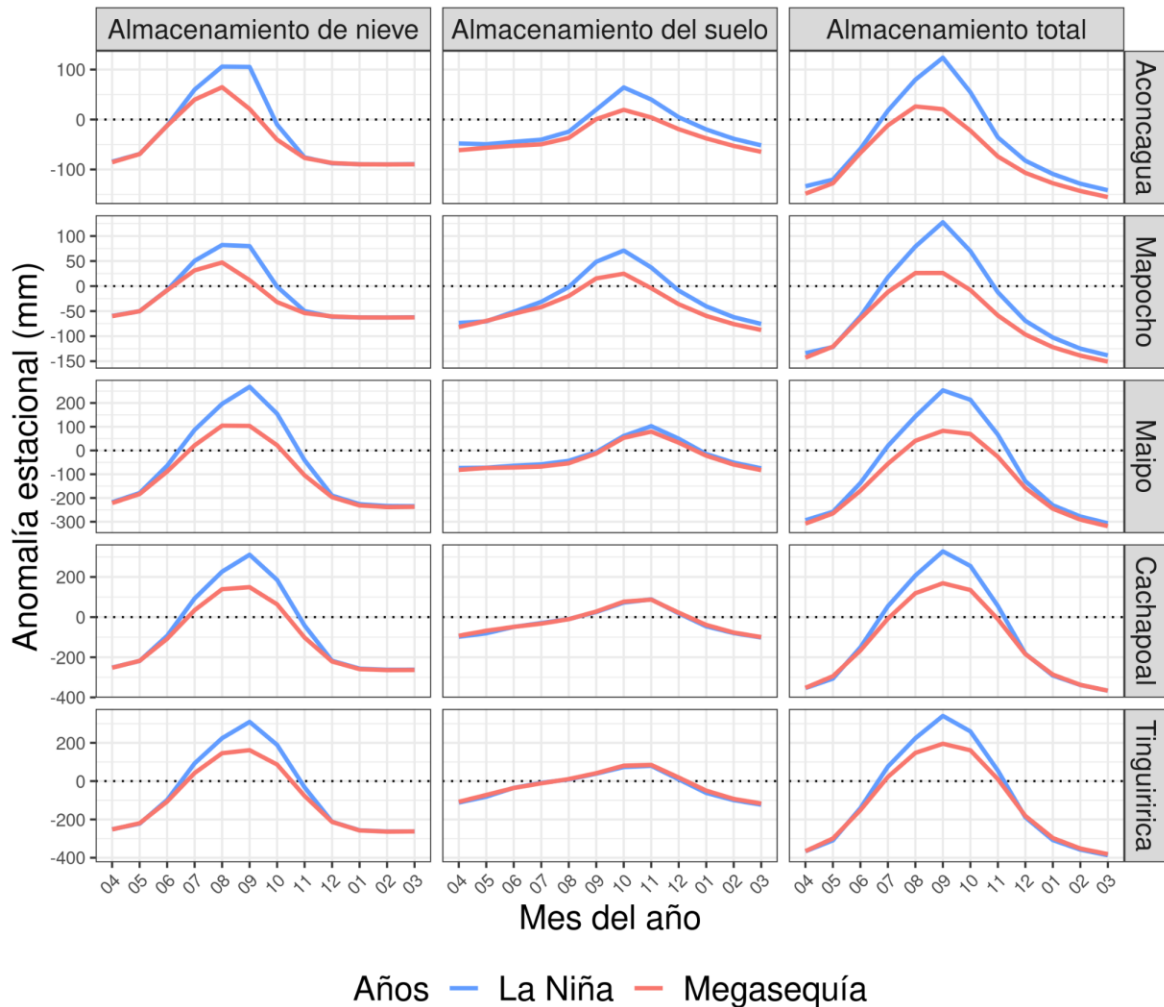
**Figura 7.** Para cada celda de la modelación hidrológica, anomalías hidroclimáticas promedio de años en fase La Niña (antes de 2010) o megasequía en porcentaje respecto al promedio de largo plazo (abril/1981-marzo/2019). (a) Precipitación anual (b) Precipitación sólida anual. (c) Equivalente en agua de nieve al 1 de septiembre.



**Figura 8.** Para cada celda de la modelación hidrológica, anomalías hidroclimáticas promedio de años en fase La Niña (antes de 2010) o megasequía respecto al promedio de largo plazo (abril/1981-marzo/2019). (a) Precipitación sólida anual en porcentaje respecto a la precipitación anual. (b) Evaporación anual en porcentaje respecto a la precipitación anual. (c) Caudal anual en porcentaje respecto a la precipitación anual.

La Figura 9 muestra las anomalías estacionales de los almacenamientos del modelo (nieve, suelo, y la suma de ambos) con respecto al promedio anual, notando que en todas las cuencas se tiene un déficit en la nieve de mayor magnitud en la MS que en LN, y que este mayor déficit se hereda al comportamiento del almacenamiento total. Además, para las cuencas de Aconcagua en Chacabuquito y Mapocho en Los Almendros (parte norte o más árida), el déficit en el

almacenamiento del suelo también es mayor en MS que en LN, lo cual amplifica el déficit en el almacenamiento total.



**Figura 9.** Anomalías estacionales de los almacenamientos hidrológicos del modelo (diferencias respecto al promedio anual de largo plazo, abril/1981-marzo/2019). Anomalías promedio de años en fase La Niña (antes de 2010) o megasequía. El almacenamiento total corresponde a la suma de la nieve y el suelo.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Esta investigación muestra las anomalías hidrometeorológicas de La Niña y la megasequía como patrones de escala regional bien definidos en términos de déficit de precipitación y anomalías estacionales de temperatura, en cuencas de Chile central. Estas anomalías se traducen en el ciclo hidrológico como déficit de caudal. Sin embargo, es de especial interés el comportamiento de las cuencas nivales, donde el déficit de caudal es acompañado por variaciones positivas y negativas del coeficiente de escorrentía para La Niña y la megasequía, compensando y amplificando la respuesta del caudal respecto al cambio en precipitación, respectivamente.

La modelación hidrológica de base física permite inspeccionar los procesos de respuesta a las condiciones meteorológicas de estas dos familias de años secos en términos de variables de estado (almacenamientos) y flujos hidrológicos. Así, para cinco cuencas de Los Andes centrales con vasta importancia social, se muestra una respuesta en la nieve al 1-Septiembre amplificada (amortiguada) con respecto al déficit de precipitación durante los años de la megasequía (La Niña), así como la duración de la cobertura de nieve es menor durante la megasequía comparada con La Niña. Los resultados por bandas de elevación y latitud indican que el déficit porcentual de nieve acumulada durante la megasequía dobla al déficit durante años de La Niña. Ulteriormente se tiene menor eficiencia en la conversión de precipitación en nieve durante la megasequía (comparada con La Niña), así como mayor evaporación y menor caudal en términos de variables escaladas por precipitación anual. De esta manera, se concluye que la dinámica espacio-temporal del manto de nieve juega un rol clave en explicar la diferencia de la megasequía actual con respecto a las sequías del periodo histórico.

Como trabajo futuro se contempla el perfeccionamiento del modelo mediante calibración (el ajuste del modelo sin calibrar es  $R^2$  de 25% a 70% para caudal mensual, y  $R^2$  de 77% a 93% para equivalente en agua de nieve mensual), así como la incorporación de rutinas de rastreo hidrológico que permitan mejorar las estimaciones de flujos y almacenamiento subterráneos.

**Tabla 1. Anomalías promedio de equivalente en agua de nieve al 1 de septiembre, por bandas de latitud y de elevación, en porcentaje respecto al promedio de largo plazo (abril/1981-marzo/2019), según años en fase La Niña (antes de 2010) o megasequía.**

Años	Anomalía promedio La Niña (%)			Anomalía promedio megasequía (%)		
	2000-3000 m.s.n.m.	3000-4000 m.s.n.m.	> 4000 m.s.n.m.	2000-3000 m.s.n.m.	3000-4000 m.s.n.m.	> 4000 m.s.n.m.
32-33 °S	-24,7	-22,8	-20,0	-55,6	-45,2	-39,4
33-34 °S	-14,4	-17,2	-10,9	-41,4	-39,5	-34,2
34-35 °S	-13,5	-15,3	-6,9	-33,2	-32,2	-34,5

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado con el apoyo de la Universidad de Saskatchewan, a través del programa “Global Water Futures”. Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (CCSS210001).

## REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116(3), 505–524.
- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and weather in Chile. In *Water resources of Chile* (pp. 7–29).
- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies—Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846.

Alvarez-Garretón, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 429–446.

Bales, R. C., Goulden, M. L., Hunsaker, C. T., Conklin, M. H., Hartsough, P. C., O'Geen, A. T., ... & Safeeq, M. (2018). Mechanisms controlling the impact of multi-year drought on mountain hydrology. *Scientific Reports*, 8(1), 690.

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & 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.

Boisier, J. P. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960–2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>

Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., et al. (2020). Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on south America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215–231.

Colombo, N., Guyennon, N., Valt, M., Salerno, F., Godone, D., Cianfarra, P., ... & Romano, E. (2023). Unprecedented snow-drought conditions in the Italian Alps during the early 2020s. *Environmental Research Letters*.

Cook, B. I., Smerdon, J. E., Cook, E. R., Williams, A. P., Anchukaitis, K. J., Mankin, J. S., ... & Wise, E. K. (2022). Megadroughts in the Common Era and the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(11), 741–757.

Cowherd, M., Leung, L. R., & Giroto, M. (2023). Evolution of global snow drought characteristics from 1850 to 2100. *Environmental Research Letters*, 18(6), 064043.

Dettinger, M. D., Battisti, D. S., Garreaud, R. D., McCabe, G. J., Jr., & Bitz, C. M. (2001). Interhemispheric effects of interannual and decadal ENSO-like climate variations on the Americas. In *Interhemispheric climate linkages* (pp. 1–16). Academic Press.

Elshamy, M., Loukili, Y., Pomeroy, J. W., Pietroniro, A., Richard, D., & Princz, D. (2022). Physically based cold regions river flood prediction in data-sparse regions: The Yukon River Basin flow forecasting system. *Journal of Flood Risk Management*, e12835.

Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., et al. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439.

Garreaud, R. D., Clem, K., & Vicencio, J. M. (2021). The South Pacific pressure trend dipole and the southern Blob. *Journal of Climate*, 34(18), 7661–7676.

Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*, 28(1), 100.

Hernandez, D., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., & Ricchetti, F. (2022). Hydrologic sensitivities and ENSO variability across hydrological regimes in central Chile (28°–41°S). *Water Resources Research*, 58, e2021WR031860.

Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281–296.

Pietroniro, A., Fortin, V., Kouwen, N., Neal, C., Turcotte, R., Davison, B., ... & Pellerin, P. (2007). Development of the MESH modelling system for hydrological ensemble forecasting of the Laurentian Great Lakes at the regional scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1279–1294.

Rubio-Álvarez, E., & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resources Research*, 46(5).

Rutllant, J., & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 11(1), 63–76.

Steiger, N. J., Smerdon, J. E., Seager, R., Williams, A. P., & Varuolo-Clarke, A. M. (2021). ENSO-driven coupled megadroughts in North and South America over the last millennium. *Nature Geoscience*, 14(10), 739–744.

Vásquez, N., Cepeda, J., Gómez, T., Mendoza, P. A., Lagos, M., Boisier, J. P., et al. (2021). Catchment-scale natural water balance in Chile. In *Water resources of Chile* (pp. 189–208). Springer.

Verseghy, D. (2012). CLASS—The Canadian land surface scheme (version 3.6). *Environment Canada Science and Technology Branch Tech. Rep.*, 176.

Wheater, H. S., Pomeroy, J. W., Pietroniro, A., Davison, B., Elshamy, M., Yassin, F., ... & Bahrami, A. (2022). Advances in modelling large river basins in cold regions with Modélisation Environnementale Communautaire—Surface and Hydrology (MESH), the Canadian hydrological land surface scheme. *Hydrological Processes*, 36(4), e14557.

Wolter, K., & Timlin, M. S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology*, 31(7), 1074–1087.

Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., & Pavelsky, T. M. (2019). MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. *Water Resources Research*, 55(6), 5053–5073.

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., ... & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185.