

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**OPTIMIZACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CHILE: MODELO HBV
EN CUENCAS DEL CENTRO Y SUR**

YELENA MEDINA G.¹
ENRIQUE MUÑOZ O.^{1,2}
ANDRÉS SOTO R.¹
LORETO ANTINOVIC R.¹
RUTH TORRES F.¹

RESUMEN

En Chile, existe una alta demanda de estudios hidrológicos para entender el comportamiento de aguas superficiales y subterráneas. Tanto entidades públicas como privadas requieren análisis hidrológicos para proyectos de extracción de agua, evaluaciones ambientales y otros, siendo importante una mayor eficacia en su realización. Debido a la escasez de información, se recurre a la modelación hidrológica. En este estudio se emplea el modelo HBV en su versión simplificada, utilizando valores iniciales de los parámetros que se basan en datos recopilados de varios países. El objetivo es realizar un análisis comparativo del desempeño de los valores de los parámetros del modelo HBV en cuencas de la zona centro y sur de Chile, con el fin de obtener una perspectiva inicial acerca de una posible adecuación en el rango de valores comúnmente utilizado. Los resultados preliminares sugieren la posibilidad de simplificar el proceso de modelación sin perder representatividad de los procesos hidrológicos considerados en el modelo HBV.

¹ Ingeniera/o de Proyectos, INGENIERIA EMO-LLS LIMITADA - email: ymedina@emoingenieros.cl

² Gerente General, INGENIERIA EMO-LLS LIMITADA - email: emunozo@emoingenieros.cl

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Chile se requieren una gran variedad y cantidad de estudios de hidrología para determinar y predecir el comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas. Tanto entidades públicas como la Dirección General de Aguas (DGA), como organizaciones privadas requieren del desarrollo de estudios hidrológicos de diferentes características. Por ejemplo, en proyectos que requieran extracción de agua desde un río se debe determinar el Caudal Ecológico Mínimo y Caudal Ambiental (DGA, 2008; MMA, 2012, 2014). Mientras que, durante los procesos de evaluación ambiental, generalmente es necesario determinar una línea base de hidrología que describa detalladamente el área de influencia (MMA, 2013). Asimismo, dependiendo del tipo de proyecto, se necesita conocer la serie de caudales medios diarios, medios semanales, medios mensuales, mínimos anuales o máximos instantáneos anuales (caudales de diseño).

Durante el año 2022, a nivel nacional se registraron más de 4.700 solicitudes de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) y se ingresaron 626 propuestas al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) siendo aprobados un total de 364 proyectos (SEA, 2023), dejando en evidencia la alta demanda de estudios hidrológicos y la necesidad de tiempos de respuesta eficientes y productos válidos para efectos de gestión y aprobación de proyectos.

Para desarrollar estos estudios se debe analizar las características geológicas, morfológicas y climáticas, por lo tanto, se necesita información de caudales, precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración, usos de suelo, clasificación hidrológica, red fluvial, etc. Sin embargo, en Chile los registros fluviométricos son relativamente cortos (30 años en promedio), y las estaciones se distribuyen de manera desigual a lo largo del país (Álvarez-Garretón et al., 2018; Muñoz et al., 2016), siendo necesaria la reconstrucción de series temporales de caudales mediante modelación hidrológica.

Existen diferentes modelos hidrológicos conceptuales que representan de manera simplificada los procesos de una cuenca (Hrachowitz y Clark, 2017). Por ejemplo, los modelos agregados entregan resultados aceptables en términos de precisión, representando los procesos hidrológicos a través de información promediada en el espacio. Algunos modelos conceptuales agregados son Sacramento (Burnash et al. 1973), HYMOD (Boyle, 2001) y SIMHYD (Chiew et al. 2002), entre otros.

Estudios anteriores (Medina y Muñoz, 2020, 2022) han demostrado que el modelo HBV es capaz de representar de manera adecuada una variedad de sistemas hidrológicos, ya que los parámetros más sensibles están directamente relacionados al régimen hidrológico predominante de cada cuenca. Aunque estas investigaciones validan la aplicabilidad del modelo HBV en diversas cuencas a lo largo de Chile, es importante señalar que los valores iniciales de los parámetros utilizados en el proceso de calibración se basan en datos recopilados de varios países.

En este contexto, el propósito de este estudio es realizar un análisis comparativo preliminar del rango de valores posibles para cada parámetro del modelo HBV en distintas cuencas de la zona centro-sur de Chile. El objetivo final es simplificar el proceso de modelación sin comprometer la representatividad de los sistemas hidrológicos. Para lograr esto, se utilizaron 75 cuencas distribuidas entre las regiones del Maule y Aysén, agrupándolas según la predominancia en su régimen fluvial, es decir, pluvial o nival.

En este estudio se utiliza el modelo hidrológico HBV en su versión simplificada de 10 parámetros propuesta por Aghakouchak y Habib (2010). El modelo HBV simula caudales

medios diarios y fue originalmente desarrollado para su aplicación en la región Escandinava, y desde su introducción ha sido aplicado en más de 80 países (Li et al. 2015).

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

Chile central presenta un clima mediterráneo con precipitaciones medias anuales que oscilan entre 100 y 3000 mm, caracterizándose por un aumento en invierno y disminución en verano. En la región austral, las precipitaciones alcanzan valores de más de 4000 mm por año, acompañadas de fuertes vientos durante todo el año (Garreaud et al., 2009; Carrasco et al., 2002).

Debido a la geomorfología de Chile (Cordillera de los Andes, llano longitudinal, Cordillera de la Costa y planicies costeras), los regímenes hidrológicos están regulados por el clima, con variabilidad intra-anual. Las cuencas pluviales dependen de las precipitaciones, mientras que las cuencas nivales son reguladas por los procesos de precipitación-acumulación y derretimiento de nieve según los ciclos de temperatura en los Andes.

Se analizaron un total de 75 cuencas, de las cuales 38 presentan régimen con predominancia pluvial y 37 régimen con predominancia nival (Figura 1). Las cuencas de régimen mixto fueron asignadas a cada grupo considerando la predominancia, pluvio-nival y nivo-pluvial, respectivamente.

Para la implementación del modelo hidrológico se requieren series de precipitación media diaria, temperatura media diaria, y evapotranspiración mensual representativa de cada cuenca. En este estudio se utilizaron datos de un periodo de 11 años (2009-2019), obtenidos de la base de datos de *Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies—Chile Dataset* (CAMELS-CL) presentada por Alvarez-Garreton et al. (2018).

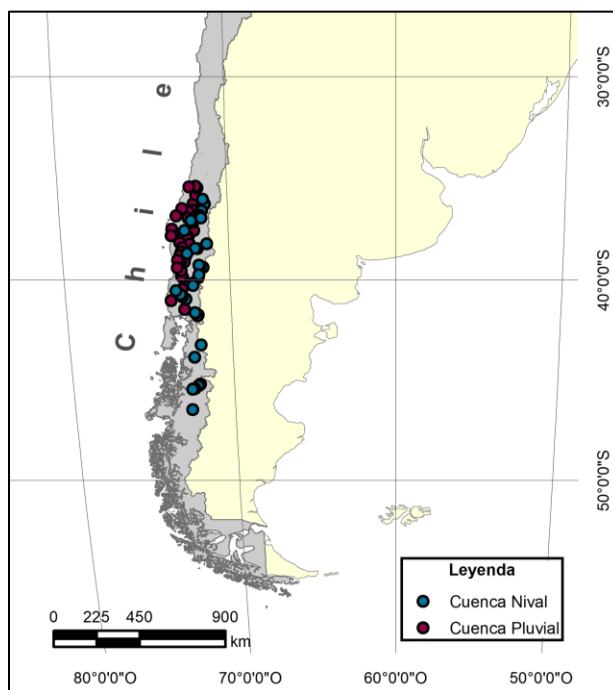


Figura 1. Ubicación de las cuencas analizadas. Los puntos celestes muestran las cuencas que presentan régimen hidrológico con predominancia nival y los puntos rojos con predominancia pluvial.

3. METODOLOGÍA

Modelo Hidrológico HBV

El modelo HBV es un modelo conceptual desarrollado por Bergström (1972). En este estudio se utiliza la versión simplificada, presentada por Aghakouchak and Habib (2010), la cual simula caudales medios diarios usando series de precipitación y temperatura diarias, y promedios mensuales a largo plazo de temperatura y evapotranspiración potencial.

El modelo comprende tres módulos: un módulo de nieve, un módulo de precipitación efectiva y humedad del suelo, y un módulo de respuesta. El primer módulo controla la acumulación y derretimiento de nieve. La precipitación se acumula como nieve cuando la temperatura se encuentra por debajo de un valor umbral (TT), de lo contrario comienza la subrutina de deshielo. La contribución del deshielo a la escorrentía se estima a través del método grado-día simple (Cmelt; Bergström, 1992), dependiendo de la diferencia entre la temperatura real y la temperatura umbral.

El segundo módulo determina la contribución de la precipitación a la humedad del suelo. Primero, calcula la evapotranspiración potencial diaria (ETPa) reduciendo el valor mensual en base a un factor de corrección (C), a la temperatura media diaria y a los promedios mensuales a largo plazo de temperatura y evapotranspiración potencial (Bergström, 1992). El punto de marchitez permanente (PWP) es una fracción (LP) de la máxima humedad del suelo (FC), cuando la humedad supera el valor de PWP, la evapotranspiración real (ET) es igual a la evapotranspiración potencial diaria. Por otra parte, cuando SM está por debajo de PMP se aplica una reducción lineal a la evapotranspiración. Posteriormente, el modelo calcula la escorrentía (ΔQ), que depende de la precipitación (ΔP), de la humedad del suelo (SM), de la capacidad de campo (FC) y un coeficiente empírico (β).

Finalmente, el módulo de respuesta estima el caudal basándose en dos reservorios. Un reservorio superior que representa el flujo cercano a la superficie, junto con un reservorio inferior que simula el flujo base (contribución de agua subterránea). Ambos están conectados a través de un coeficiente de percolación (K_p). Hay tres salidas, dos en el reservorio superior (Q_0 y Q_1) y una en el inferior (Q_2). Cuando el nivel del agua en el depósito superior supera un valor umbral (L), la escorrentía se produce rápidamente en la parte superior de este (Q_0). Las respuestas de las otras dos salidas son relativamente más lentas (Q_1 y Q_2) y dependen de los coeficientes de recesión K_0 , K_1 y K_2 para asegurar que Q_0 sea la respuesta más rápida, y Q_2 sea más lenta que Q_1 . Para mayor comprensión, la Figura 2 muestra un diagrama conceptual del modelo.

La Tabla 1 presenta una descripción de los parámetros del modelo. Adicionalmente se muestran los rangos iniciales utilizados, los cuales se obtuvieron de Aghakouchak y Habib (2010) y Kollat et al. (2012).

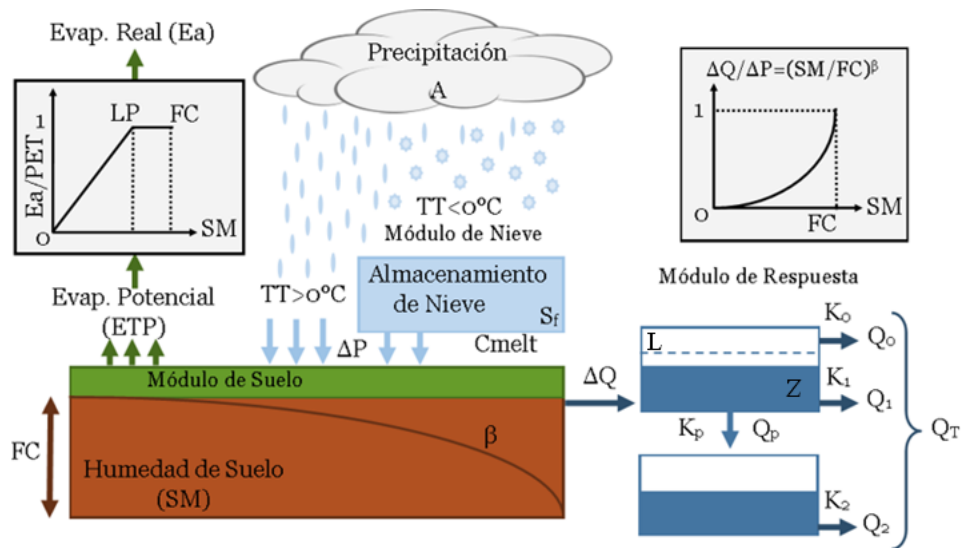


Figura 2. Diagrama conceptual del modelo HBV.

Tabla 1. Parámetros del modelo y rangos utilizados para el análisis.

Parámetro	Descripción	Rangos
Módulo de Nieve		
TT (°C)	Temperatura umbral que indica el inicio del derretimiento (0 °C).	0
Cmelt (mm°C ⁻¹ d ⁻¹)	Fracción de nieve que se derrite sobre la temperatura umbral (TT) de inicio del derretimiento.	0.5-7
Módulo de Suelo		
FC (mm)	Máximo almacenamiento en la capa de suelo (<i>Field Capacity</i>)	0-2000
β	Coefficiente empírico que representa la variación de la zona de humedad del suelo	0-7
LP	Fracción de la máxima humedad del suelo para calcular el punto de marchitez permanente (PMP=LP*FC)	0.3-1
C (°C ⁻¹)	Factor de corrección para la evapotranspiración potencial	0.01-0.3
Módulo de Respuesta		
L (mm)	Umbral para respuesta rápida de escorrentía	0-100
K0 (d ⁻¹)	Coefficiente respuesta rápida (reservorio superior)	0.3-0.6
K1 (d ⁻¹)	Coefficiente respuesta lenta (reservorio superior)	0.1-0.2
K2 (d ⁻¹)	Coefficiente respuesta reservorio inferior	0.01-0.1
Kp (d ⁻¹)	Coefficiente del flujo máximo para la percolación	0.01-0.1

Para la ejecución del modelo hidrológico, se realizaron 15,000 simulaciones utilizando el método de Monte Carlo. Luego, los sets de parámetros, obtenidos de una distribución uniforme, se agruparon en modelos “bien comportados” (BC) y “no-bien comportados” (N-BC) en función de una medida de desempeño. En este estudio se utilizó la Eficiencia de Kling Gupta (KGE; Gupta et al., 2009). Esta es una de las medidas de desempeño más utilizadas en hidrología, y se enfoca en evaluar equitativamente la correlación, desviación y

variabilidad del hidrograma simulado (Guse et al., 2017). Los valores de KGE varían entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo. Se consideró un modelo BC cuando el valor de la función objetivo (KGE) es igual o superior a 0.6, mientras que valores de KGE inferiores a 0.6 se consideraron N-BC. En el análisis, se descartó el primer año de los periodos de calibración y validación (2009 y 2014, respectivamente) para eliminar la influencia de los valores de partida sobre los resultados (Seibert y Vis, 2012).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los resultados, en ambas instancias, todos los valores superan el umbral de $KGE=0.6$, por lo tanto, para los análisis posteriores se utilizaron sets de parámetros que representan de manera adecuada los procesos hidrológicos de cada cuenca.

La Figura 4 muestra boxplots de los valores de cada parámetro obtenidos para cada grupo de cuencas. Se observa que los parámetros β y C oscilan en rangos de valores bajos y similares para ambos grupos de cuencas, y los parámetros FC y L en valores altos en comparación a los valores iniciales considerados para calibración. β representa la variación de la humedad del suelo, C es el factor de corrección para la evapotranspiración potencial, FC es la máxima humedad del suelo y L es el límite para la escorrentía directa.

De acuerdo con la mediana de los valores, se observa que los parámetros C_{melt} , y K2 alcanzan menores valores en cuencas con predominancia nival, mientras que los valores en cuencas con predominancia pluvial resultaron mayores. C_{melt} representa el derretimiento nival y K2 la escorrentía subterránea. Por otra parte, se observa que en cuencas con predominancia nival se obtienen mayores valores de los parámetros FC, L y K_p que en cuencas con predominancia pluvial. K_p es el coeficiente de percolación. Adicionalmente, en los parámetros K1 y LP se observa una leve diferencia entre cuencas pluviales y nivales, con valores mayores en estas últimas.

En el caso de las cuencas con principal aporte nival, las bajas temperaturas permiten la acumulación de nieve, alcanzando menores valores de derretimiento nival. Esto no impide que, en los periodos de estiaje con mayores temperaturas, ocurra derretimiento nival, superando al aporte de aguas subterráneas, no así en cuencas pluviales, las cuales dependen de la escorrentía subterránea durante los periodos de estiaje.

Además, debido a que las cuencas nivales se ubican en su mayoría en la cordillera de los Andes, las rocas fracturadas y mayores pendientes permiten escorrentía directa y menor escorrentía subterránea hacia los caudales superficiales. En consecuencia, existe una mayor recarga al acuífero, es decir, mayor percolación y una mayor capacidad de campo. Esto se refleja en los valores de los parámetros FC y K_p .

C permite convertir los valores mensuales de ETP en valores diarios, lo que da como resultado valores más bajos en cuencas con predominio de precipitaciones. Esto se debe a la ubicación de estas cuencas en áreas como la depresión intermedia y la costa, donde la presencia de mayor vegetación, altas temperaturas y evapotranspiración conlleva a una disminución en el punto de marchitez permanente, representado por el parámetro LP en el modelo hidrológico.

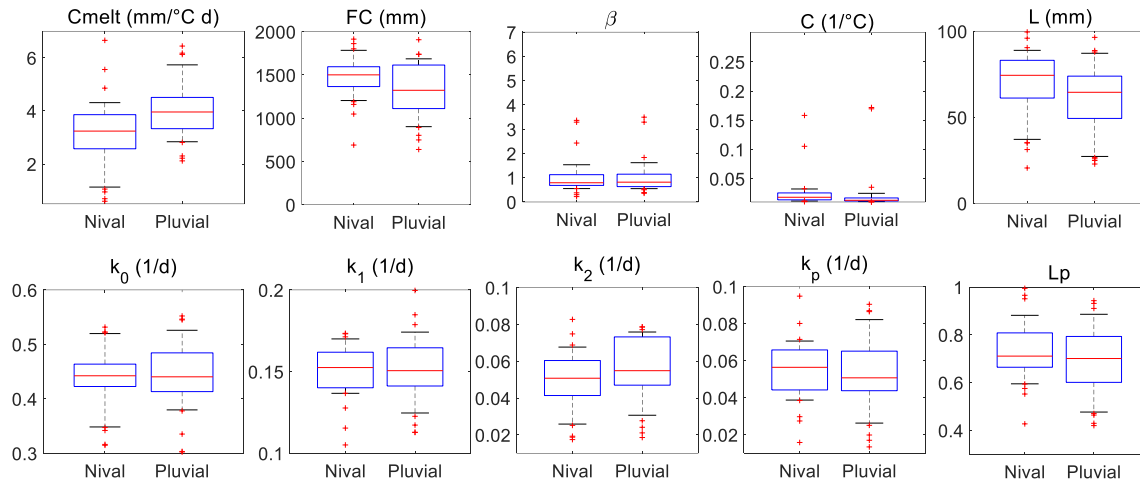


Figura 4. Valores de los parámetros del modelo HBV calibrado en cuencas con régimen predominante pluvial y nival. Las cajas están limitadas por los percentiles 25 y 75. Los bigotes representan los percentiles 10 y 90, y las cruces rojas son los valores atípicos.

5. CONCLUSIONES

Según los resultados presentados, se observa que, en comparación a los valores inicialmente ingresados al modelo, los rangos de valores de los parámetros FC, β y C para ambos grupos de cuencas (pluviales y nivales) son menores. Y según el régimen hidrológico de la cuenca, los rangos de valores de Cmelt y L son más acotados. Todos estos parámetros están directamente relacionados con las características de las cuencas estudiadas.

Además, los resultados observados coinciden con las conclusiones presentadas por Medina y Muñoz (2020; 2022), donde indican que los parámetros Cmelt, β y L son los más sensibles en cuencas de régimen nival/glacial y los parámetros FC, β y L son más sensibles en cuencas pluviales.

Por lo tanto, el estudio permite concluir preliminarmente que es posible reducir el espacio factible de algunos parámetros sin alterar la representación de los procesos hidrológicos del modelo HBV en la zona centro y sur de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este artículo forman parte del proyecto financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, ANID + SIA/CONCURSO “INSERCIÓN EN LA INDUSTRIA 2022”, CONVOCATORIA 2022 + IDP220029”.

REFERENCIAS

Aghakouchak, A. and Habib, E. 2010. Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. *International Journal of Engineering Education* 26, 963-973.

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A. 2018: The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*

Bergström, S. 1972. Utvechling och tillämpning av en digital avrinningsmodell (Development and application of a digital runoff model, in Swedish), SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). Notiser och preliminära rapporter. Serie Hydrologi 22.

Bergström, S. 1992. The HBV model—Its structure and applications; Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI): Norrköping, Sweden, Volume 4, ISSN 0283-1104.

Boyle, D. 2001. Multicriteria calibration of hydrological models, Ph.D. dissertation. Department of Hydrological and Water Resources. University of Ariz., Tucson.

Burnash, R. 1995. The NWS river forecast system – catchment model. Computer models of watershed hydrology. Highlands Ranch, Water Resources Publications.

Carrasco, J.F.; Casassa, G.; Rivera, A. 2002. Meteorological and climatological aspect of the Southern Patagonia Icefield. In *The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies*; Casassa, G., Sepúlveda, F.V., Sinclair, R.M., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, ISBN 978-1-4613-5174-0.

Chiew, F., Peel, M. and Western, A. 2002. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publication. 335-367.

Decreto Supremo N° 14, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente, Reglamento para la Determinación del Caudal Ecológico Mínimo.

Decreto Supremo N° 71, de 2014, del Ministerio del Medio Ambiente, Modifica DS N° 14, de 2012.

Dirección General de Aguas (DGA). 2008. Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos.

Garreaud, R.; Vuille, M.; Compagnucci, R.; Marengo, J. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 281, 180–195.

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.*, 377, 80–91.

Guse, B., Pfannerstill, M., Gafurov, A., Kiesel, J., Lehr, C. y Fohrer, N. 2017. Identifying the connective strength between model parameters and performance criteria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 5663-5679.

Hrachowitz, M. y Clark, M. P. 2017. HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3953–3973.

Kollat, J.B, Reed, P.M. y Wagener, T. 2012. When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful? *Water Resources Research*, 48.

Li, H., Xu, C., Beldring, S. 2015. How much can we gain with increasing model complexity with the same model concepts? *Journal of Hydrology*. 527, 858–871.

Medina, Y., Muñoz, E. 2020. A Simple Time-Varying Sensitivity Analysis (TVSA) for Assessment of Temporal Variability of Hydrological Processes. *Water*, 12, 2463.

Medina, Y. Muñoz, E. Clasing, R. Arumí, J.L. 2022. Analysis of the Relative Importance of the Main Hydrological Processes at Different Temporal Scales in Watersheds of South-Central Chile. *Water*, 14, 807.

Ministerio del Medio Ambiente. 2013. Decreto Supremo N° 40. 2013. Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Muñoz, A. A.; González-Reyes, A.; Lara, A.; et al. 2016. Streamflow variability in the Chilean Temperate-Mediterranean climate transition (35°S–42°S) during the last 400 years inferred from tree-ring records. *Climate Dynamics*, 47(12), 4051–4066.

Seibert J y Vis M. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325.

Servicio de Evaluación Ambiental. 2023. Cuenta Pública Participativa 2022-2023.