

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

**ESTUDIO DE TENDENCIAS DE CAUDALES EXTREMOS EN CUENCAS EN  
RÉGIMEN NATURAL**

**DANIEL OSORIO Á.<sup>1</sup>**  
**MIGUEL LAGOS-ZÚÑIGA<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

En el contexto de evidencia observacional en Chile y el mundo, sobre el cambio en series hidrológicas de precipitación y caudal, se desarrolla esta investigación sobre la detección de tendencias en los caudales de cuencas con poca intervención humana en el período de 1978 a 2018. Se recopiló y analizó una extensa base de datos con caudales medios diarios de 158 estaciones con regímenes naturales. Se examinaron las tendencias de los caudales máximos diarios en invierno y verano. En invierno, 25 estaciones mostraron tendencias significativas, con 15 disminuyendo (en la zona central) y 10 aumentando (en la zona sur y austral). En verano, 12 estaciones tuvieron cambios significativos, con 10 disminuyendo (zona centro y sur) y solo 2 aumentando sus caudales (zona austral). Adicionalmente se realizó un análisis de frecuencia comparando cinco modelos estacionarios y tres modelos no estacionarios basados en la distribución GEV, considerando el tiempo como covariable. Se obtienen diferencias tanto negativas (de hasta un -90 %) como positivas de hasta un 50 % en la estimación de caudales extremos entre ambos enfoques, resaltando la importancia de considerar la no estacionalidad en el análisis hidrológico.

En conclusión, este estudio proporciona evidencia sólida de cambios significativos en los caudales extremos ante presencia de variaciones en precipitaciones extremas y al aumento de temperaturas causado por el cambio climático. Se destaca la importancia de analizar la estacionalidad de las cuencas para comprender cómo el cambio climático altera los regímenes de lluvia y nieve. La inclusión de enfoques no estacionarios en el análisis hidrológico es una herramienta valiosa para obtener resultados más precisos, fundamentales para guiar políticas de manejo del agua sostenibles y efectivas, así como un diseño de obras resiliente a potenciales cambios futuros.

---

<sup>1</sup> Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center, - email: daniel.osorio@ug.uchile.cl

<sup>2</sup> Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center, - email: miguel.lagos@amtc.uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe evidencia científica que respalda los cambios observados en la frecuencia de eventos extremos hidrológicos y se espera que dichas variaciones se sostengan en un futuro cercano debido al calentamiento global, principalmente causado por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2021). Las consecuencias de dichos cambios traen como consecuencia incrementos en la temperatura global, que ha ocurrido desde el periodo preindustrial (1850-1900) hasta el presente (2010-2019) en un rango de  $+0.8^{\circ}\text{C}$  a  $+1.3^{\circ}\text{C}$ . Dichas condiciones más cálidas han tenido un impacto significativo en el aumento de precipitaciones extremas (Fowler et al., 2021). Esta situación ha llevado a la no-estacionariedad en las series de datos hidrológicos, lo que significa que las condiciones hidrológicas actuales son diferentes de las pasadas y se prevé que sigan cambiando.

En el contexto nacional, el estudio realizado por Lagos et al. (2021) confirmaron esta acelerada intensificación de precipitaciones extremas en las zonas costeras del norte y sur del país, así como en gran parte de la zona Austral. Estos cambios en las precipitaciones también fueron reportados por Marcia Paredes et al., (2021) y en otras regiones por Carreño y Ossandón (2021) y tienen consecuencias importantes en los caudales de los ríos y, por lo tanto, en la planificación y diseño de obras hidráulicas.

A pesar de la concepción previa de que el aumento de precipitaciones resultaría en un aumento proporcional de los caudales de los ríos, estudios recientes como los realizados por Archfield et al. (2016) y Do et al. (2017) han demostrado que esto no siempre es el caso. De hecho, se han registrado disminuciones en los caudales máximos anuales en algunas regiones Do et al. (2017). Esta falta de una relación proporcional entre las precipitaciones y los caudales destaca la necesidad de estudiar las tendencias de los caudales extremos de manera específica y rigurosa.

El análisis de tendencias en los caudales extremos es crucial en la planificación y diseño de obras hidráulicas debido a varios motivos. En primer lugar, la determinación de caudales máximos es fundamental para el dimensionamiento adecuado de infraestructuras hidráulicas como represas, puentes y sistemas de drenaje. Si las tendencias de los caudales están cambiando, los valores históricos ya no serían suficientes para garantizar la seguridad y eficiencia de estas obras en el futuro.

En segundo lugar, la consideración de tendencias en los caudales extremos también es esencial para evaluar el riesgo de inundaciones y diseñar estrategias de mitigación adecuadas. Si se ignoran los cambios en la frecuencia y magnitud de los caudales extremos, las infraestructuras y comunidades ubicadas en áreas vulnerables podrían estar expuestas a peligrosos eventos hidrológicos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Generación de serie de datos ponderados

Para trabajar con datos consistentes, se considera el trabajo realizado por Quevedo (2021) ( $Q_{\text{medio mensual corregido}}$ , en ecuación 1), el cual contiene datos rellenos de caudales medios mensuales para 158 cuencas cercanas al régimen natural para el periodo 1979-2018. Esta base de datos fue construida a partir del relleno de datos fluviométricos faltantes, a partir de árboles de decisión y regresiones lineales con estaciones vecinas (distancia menor a 200 km) considerando siete criterios para establecer similitud y escoger una cuenca donante. La metodología se utilizó para relleno de datos a escala anual, estacional y mensual. Este producto es utilizado para crear un caudal ponderado a partir de los datos diarios obtenidos a partir de los datos de la Dirección General de Aguas (DGA,  $Q_{\text{medio diario observado}}$ ) tal que:

$$Q_{\text{Pond}} = Q_{\text{medio diario observado}} \cdot \frac{Q_{\text{medio mensual corregido}}}{Q_{\text{medio mensual observado}}} \quad (1)$$

### 2.2 ZONA DE ESTUDIO

Del Dataset de cuencas chilenas con registro fluviométrico de la DGA, recopilado en CAMELS (Álvarez-Garretón et al., 2018), se seleccionaron cuencas que cuenten con un bajo grado de intervención. Esto es posible a través del atributo “human intervention degree” (porcentaje del caudal anual de derechos de aguas superficiales consuntivo permanente continuo). Asimismo, mediante el índice “dam” es posible determinar la presencia de grandes embalses. Luego, se genera una rutina que permita extraer la serie de caudales máximos medios diarios anuales por estación del año. Esto se debe hacer considerando cuencas que cuenten con un mínimo de 30 años de registro. Con los datos de caudales máximos estacionales, se procede a realizar un análisis estadístico y test a la serie de tiempo, para determinar si existe cambio de estacionariedad y de régimen en el periodo histórico. Para esto se utilizará el test de Sen y el test de Mann-Kendall el cual ha sido utilizado en diversos estudios (Du et al., 2015; Douglas et al., 2000; Richetti, 2018; Paredes et al., 2021) para estudiar cambios de tendencias en las series de tiempo.

### 2.3 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Una forma de identificar cambios en las tendencias de los caudales es detectar la existencia de estacionariedad en la serie de tiempo. Se puede considerar una serie como estacionaria, si sus propiedades estadísticas (distribución de probabilidad y parámetros como el promedio y la desviación estándar) no varían en el tiempo. Considerando el test de Mann-Kendall (Mann, H.B. 1945; Kendall, M. G. 1975), se tendrá tendencia si el valor absoluto del estadístico calculado por el test es mayor que el asociado al nivel de significancia determinado (5%). Asimismo, la prueba de la pendiente de Sen (Sen, 1968), permite estimar la magnitud de la tendencia en la serie de tiempo.

## 2.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

Debido al carácter estocástico que presentan las variables que influyen en la ocurrencia de crecidas tal como la precipitación, típicamente se plantea la realización de un análisis de frecuencia de las variables hidrometereológicas basado en estadígrafos estacionarios (Chow et al., 1988). Así, las variables asociadas a un periodo de retorno o probabilidad de excedencia, viene definido por la ecuación:

$$X(P_{exc}) = \mu + \sigma \cdot K_T(P_{exc})$$

Donde  $X$  corresponde a la variable hidrometereológica,  $\mu$  a la media de la serie analizada,  $\sigma$  a la desviación estándar de la serie y  $K_T$ , al factor de frecuencia asociada a una determinada probabilidad de excedencia.

Autores como Richetti (2018), Paredes et al., (2021) y Carreño y Ossandón (2021), han abordado un enfoque de análisis de frecuencia no estacionario aplicado al territorio nacional, el cual se fundamenta en las tendencias evidenciadas por los datos observados. Un aspecto central de este análisis radica en la utilización de una parametrización que depende del tiempo de los estadísticos, lo que queda expresado mediante la ecuación:

$$X(P_{exc}, t) = \mu(t) + \sigma(t) \cdot K_T(P_{exc})$$

En este caso, es importante destacar que tanto la media como la desviación estándar están explícitamente condicionadas por el factor tiempo. Esto podría tener implicaciones significativas en los periodos de retorno estimados. Por ejemplo, si los estadísticos presentan una tendencia creciente, los periodos de retorno asociados a un valor constante de caudal se verán reducidos, mientras que los valores de caudales aumentarán para una probabilidad de excedencia constante. Por otro lado, cuando ambos estadísticos disminuyen, se observará un aumento en los periodos de retorno o una disminución en los valores extremos.

Además, es posible considerar como covariables la temperatura y la precipitación (Du et al, 2015), ya que ambos desempeñan un papel fundamental en el fenómeno de crecidas. Integrar estos factores en el análisis permitirá una comprensión más completa de las variaciones hidrológicas y contribuirá a una evaluación más precisa de los riesgos asociados.

Para llevar a cabo el análisis de frecuencia, estudios previos como los realizados por Khaliq et al. (2006) y Panagoulia et al. (2013) han empleado la distribución general de valores extremos (GEV, por sus siglas en inglés). Esta distribución GEV se caracteriza por tres parámetros de probabilidad: la localización ( $\mu$ ), la escala ( $\sigma$ ) y la forma ( $\xi$ ). Debido a la sensibilidad y dificultad para estimar el parámetro de forma en la distribución GEV, a menudo se considera constante (Du et al., 2015).

En los enfoques utilizados para modelar los estadísticos de la distribución GEV, se han considerado tres opciones:

- Variación lineal de la media con respecto al tiempo:  $\mu(t) = \mu_0 + \mu \cdot t$ .
- Variación lineal de la desviación estándar con respecto al tiempo:  $\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma \cdot t$ .
- Variación lineal de la media y desviación estándar respecto al tiempo:  $(\mu(t), \sigma(t))$ .

En este contexto, los valores iniciales  $\mu_0$  y  $\sigma_0$  se obtienen a partir de los datos observados.

Así, para aquellas cuencas que presenten marcadas tendencias en el periodo de invierno y verano a partir de los resultados del test de Mann-Kendall, se procede a realizar el análisis de frecuencia considerando cinco distribuciones de probabilidades para el enfoque estacionario: (1) Normal, Lognormal, (3) Weibull, (4) Gamma y (5) Gumbel. En cambio, para el caso del análisis no estacionario, se consideró la distribución general de valores extremos. Finalmente se seleccionan aquellos modelos que minimicen su Criterio Bayesiano de Información (BIC, por sus siglas en inglés). El BIC penaliza modelos más complejos (mayor número de parámetro) a partir de la siguiente fórmula:  $BIC = k \cdot \ln(n) - 2 \ln(\hat{L})$ , donde  $k$  corresponde al número de parámetros estimados por el modelo,  $n$  el número de observaciones y  $\hat{L}$  corresponde al valor maximizado de la función de verosimilitud.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análisis de Tendencias

El análisis del test de Mann-Kendall aplicado a las series de caudales medios diarios máximos en cada cuenca reveló resultados interesantes. Durante el periodo de otoño/invierno, se encontró que 25 de las estaciones (representando el 71% del total para este periodo) presentaron tendencias significativas con un p-valor menor al 5%. En contraste, para el periodo de primavera/verano, se identificaron tendencias significativas en 12 cuencas.

La Figura 1, específicamente el panel a), muestra claramente que gran parte de las cuencas ubicadas en la zona central (30-40°S) exhiben tendencias negativas en el estadístico calculado. Por otro lado, en las cuencas de la zona sur (38-54°S), se observa una tendencia al aumento de los caudales medios diarios máximos anuales durante el periodo de otoño/invierno.

En cuanto a la Figura 1, panel b), se destaca que, para el periodo de verano en la zona central, los caudales máximos presentan tendencias negativas en 10 estaciones, mientras que solo dos estaciones en la zona sur muestran un aumento en sus eventos extremos.

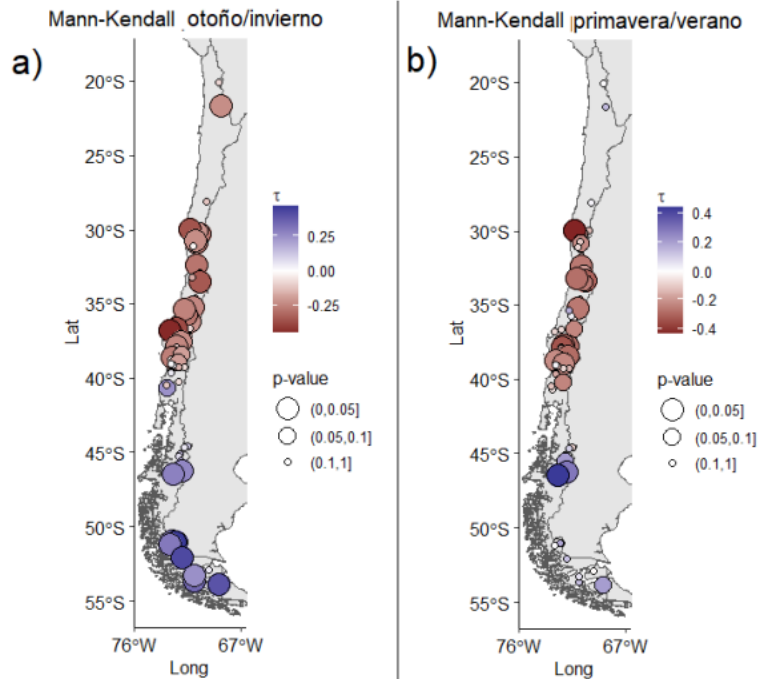


Figura 1 : Resultados test de Mann-Kendall. Panel a) periodo otoño/invierno. Panel b) primavera/verano

Los resultados de la pendiente de Sen estandarizado como  $Z = \frac{X_{\mu}}{\sigma}$  se utilizaron para estimar la magnitud de las tendencias. En la Figura 2, panel a), se observa que en el caso de las tendencias en otoño/invierno, las magnitudes son negativas entre las Latitudes 30°S y 39°S. La gran mayoría de estas cuencas se encuentran en zona cordillerana y pre-cordillerana, a excepción de las cuencas de las estaciones "Estero Culebrón en el sifón" (IV región) y "Río Andalién camino a Penco" (XIII región), las cuales son cuencas costeras.

Por otro lado, las cuencas de las estaciones "Estero Los Puercos en puente Los Puercos" (VII región), "Río Itata en balsa Nueva Aldea" (XVI región) y "Río Mininco en Longitudinal" (VIII región) son cuencas pluviales ubicadas en el valle central que presentan disminución en sus eventos extremos.

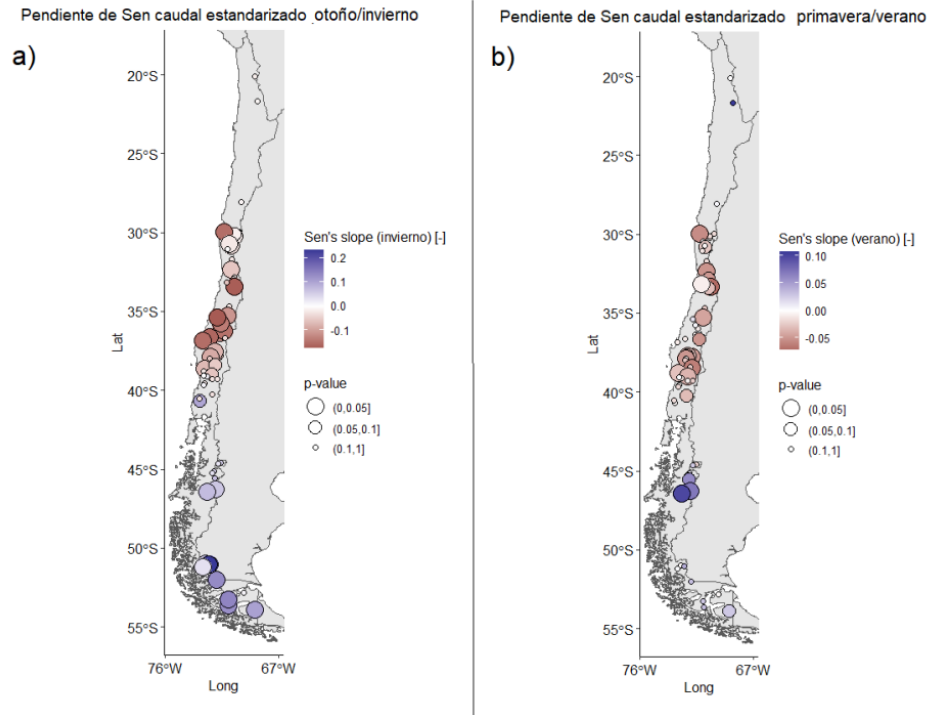


Figura 2 Pendiente de sen estandarizado  $Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$  para: a) periodo de otoño/invierno; b) periodo de primavera/verano.

Además, al analizar los cambios en la estacionalidad de las cuencas, se observan adelantamientos (retrasos) en el hidrograma de caudales medios diarios, como se muestra en la Figura 3. Aquellas cuencas que presentan un retraso en su estacionalidad (entre 13 y 20 días) se encuentran en la zona central (30-35°S), en áreas cordilleranas y precordilleranas, así como en la zona sur y austral del país, en áreas cordilleranas donde la escorrentía es típicamente afectada por el aporte nival.

Por otro lado, en las zonas centro y sur, principalmente en áreas costeras y de valle, se detectan adelantamientos en la estacionalidad de los caudales, con períodos entre 10 y 15 días. Estas cuencas se caracterizan por tener un régimen pluvial predominante y, en algunos casos, también se destaca el aporte nival, como en las cuencas de los ríos Emperador Guillermo y Simpson.

De la Figura 3, se observa que las cuencas con aporte nival en sus caudales, como las cuencas del río Rapel en junta, río Gogotí y Río Claro, muestran un adelanto en las ocurrencias del centro de gravedad en las últimas décadas, coincidiendo con los resultados obtenidos por Vicuña, S. et al. (2011) para la cuenca del río Limarí. Estos cambios en el centro de gravedad son característicos del aumento de las temperaturas en cuencas dominadas por el deshielo, donde el incremento de la temperatura conduce a una reducción de la capa de nieve acumulada durante la temporada de lluvias, provocando un proceso de deshielo más temprano y más rápido durante la primavera y el verano. Además, el cambio en la ocurrencia del centro de gravedad también puede deberse a la reducción de la acumulación de nieve durante el invierno. Con el aumento de las temperaturas, es posible que se produzca una

mayor sublimación de la capa de nieve estacional, lo que a su vez puede llevar a la disminución del caudal medio anual y a una menor disponibilidad de manto nival.

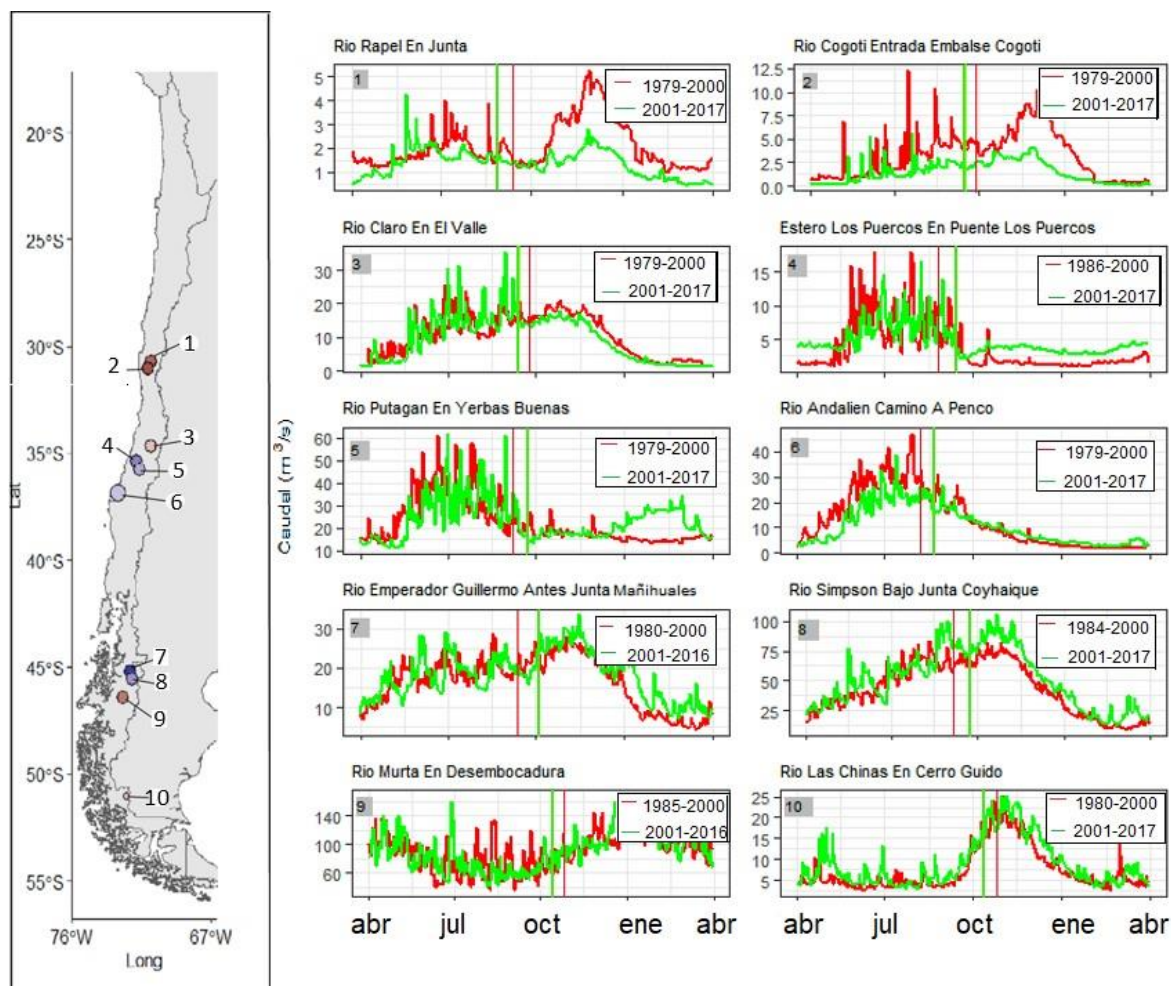


Figura 3. 10 cuencas que presentan cambios en el centro de gravedad del hidrograma medio ( $\geq 10$  días). Punto azul: retraso del centro de gravedad, punto rojo: adelanto del centro de gravedad. En hidrogramas: línea roja corresponde a periodo 1, línea verde corresponde a periodo 2.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos obtenidos por Musselman et al. (2017), donde para escenarios climáticos más cálidos, las altas tasas de derretimiento pueden disminuir debido a una contracción de la temporada de deshielo. En conjunto, estos hallazgos respaldan la idea de que el cambio climático está impactando significativamente los patrones hidrológicos de las cuencas dominadas por el aporte nival, lo que tiene importantes implicaciones para la disponibilidad de agua y el caudal de los ríos en esas regiones.

### 3.2 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

En el análisis de los mejores modelos no estacionarios para el periodo otoño/invierno (Figura 4, paneles a y b), se observó que incorporar la temporalidad en el promedio resultó en un rendimiento mejorado, seguido de la incorporación conjunta del tiempo en el promedio y la desviación estándar. En cuanto al análisis de frecuencia de modelos estacionarios, se

encontró que la distribución Lognormal mostró el mejor desempeño con 10 estaciones, seguida de la distribución Weibull con 7 estaciones y Gamma con 6 estaciones.

En el periodo de primavera/verano (Figura 4, paneles c y d), también se notó una mejora en el rendimiento al incorporar la temporalidad en el promedio, seguido de la incorporación conjunta del tiempo en el promedio y la desviación estándar para los mejores modelos no estacionarios. En el caso de los modelos estacionarios, los que minimizaron el BIC fueron los de distribución Lognormal con 11 estaciones y una cuenca con distribución GEV.

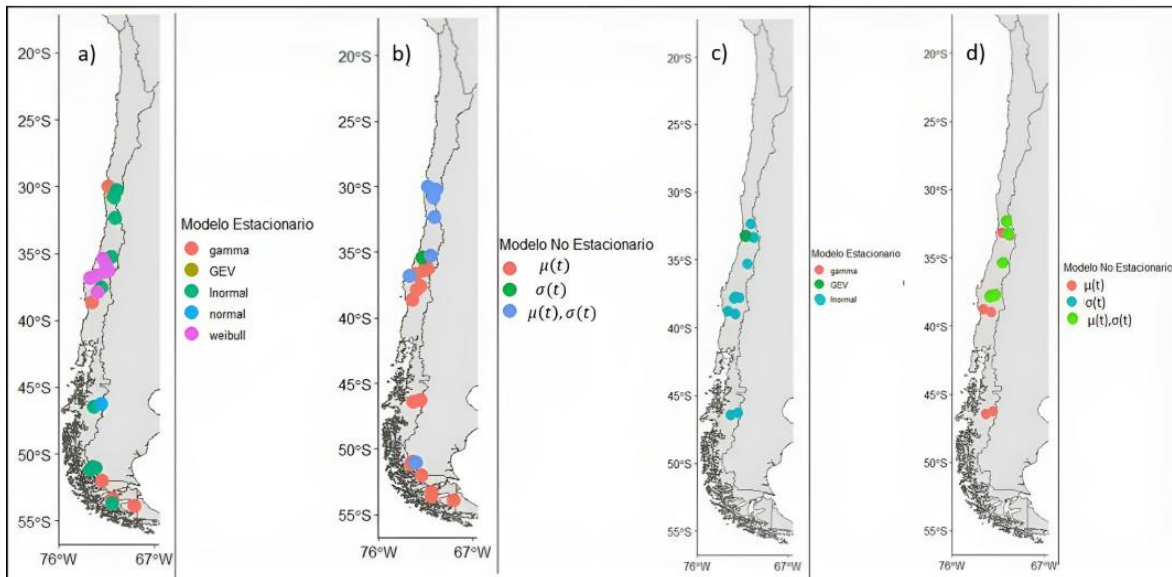


Figura 4 Distribución de los mejores modelos estacionarios/no estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a y b: Modelos estacionarios y no estacionarios, respectivamente. Periodo otoño/invierno. Panel c y d: Modelos estacionarios y no estacionarios, respectivamente. Periodo primavera/verano.

La Figura 5 panel a) muestra la diferencia porcentual entre los modelos seleccionados mediante el criterio BIC, distinguimos entre enfoque estacionario y no estacionario. En la zona central del país, se destaca una tendencia mayoritariamente negativa, con diferencias que oscilan entre un -80 % y -98 % para cuencas como el río Mostazal en Carén y el estero Culebrón en el Sifón, respectivamente. Sin embargo, en la zona sur y austral, las diferencias son principalmente positivas, especialmente para periodos de retorno superiores a 100 años.

Por otro lado, en el panel b), correspondiente al análisis de primavera/verano, la selección de modelos basada en el criterio bayesiano genera diferencias tanto positivas como negativas en la zona central y sur del país, con valores que aumentan significativamente a medida que aumenta el periodo de retorno. En particular, en la zona sur se observa una diferencia positiva, alcanzando hasta un 50 % de variación para periodos de retorno de 500 años.

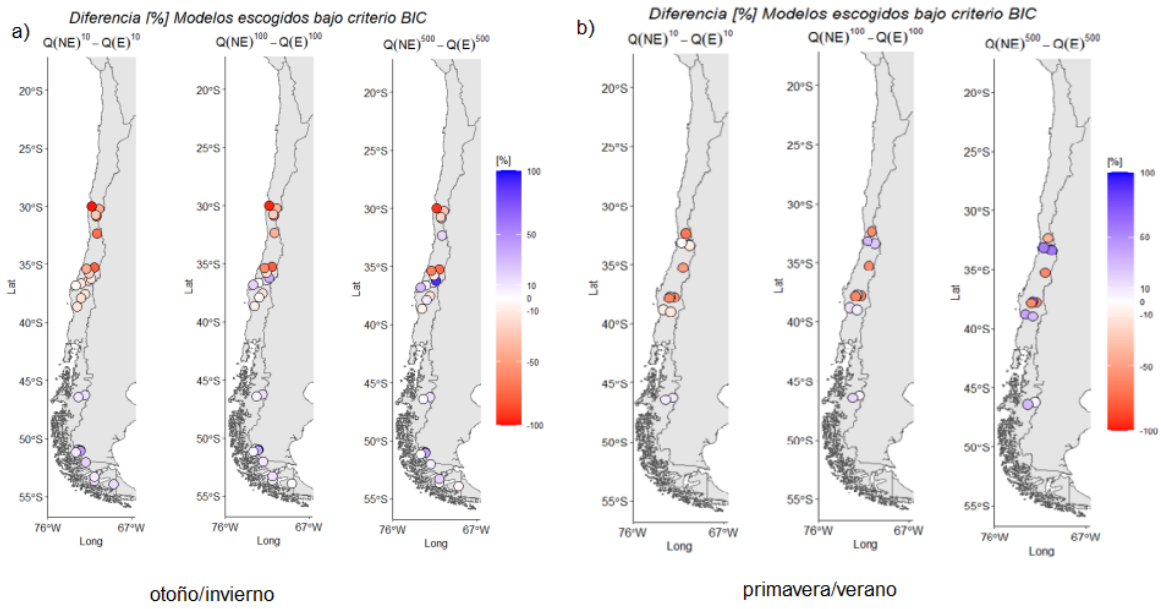


Figura 5 Diferencias porcentuales entre mejores modelos estacionarios y no estacionarios bajo el criterio BIC. Panel a: Periodo otoño/invierno. Panel b: Periodo primavera/verano.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudió la existencia de tendencias de caudales medios diarios extremos en cuencas en régimen natural (71 cuencas), aplicando test de Mann-Kendall, pendiente de Sen e índices de cambios en la estacionalidad de diversas cuencas para el periodo 1978-2018. Además, se realizó un análisis de frecuencia estacionario y no estacionario a aquellas cuencas que presentaron tendencias con un nivel de significancia  $p_{valor} \leq 0.05$ , seleccionando los mejores modelos a partir del criterio BIC. En este contexto, se extraen las siguientes conclusiones:

- En invierno (Abril-Septiembre) fue posible detectar tendencias a la baja en caudales medios diario extremos en 15 cuencas de la zona central, con magnitudes estandarizadas que van de los -0.02 hasta los -0.17 [-]. En cambio, la zona sur y austral son 10 estaciones que presentan un alza en sus caudales extremos, donde las magnitudes de las pendientes de Sen estandarizadas van de los 0.03 hasta los 0.23[-]. El comportamiento es similar para el verano (Octubre-Marzo), donde 10 estaciones presentaron tendencias a la baja en sus pendientes de Sen, desde -0.01 a -0.05. Asimismo, en la zona sur, sólo dos cuencas presentaron alzas en sus caudales durante el verano.
- Se estudió la existencia de cambios de régimen hidrológico en 10 cuencas, distribuidas en la zona centro y austral, a partir de estudio de cambio del tiempo del centro de gravedad del ciclo anual del hidrograma promedio, donde se presenciaron adelantos de hasta 15 días en la zona centro del país y retrasos de 20 días en cuencas ubicadas en la zona austral.

- Al realizar análisis de frecuencia bajo un enfoque estacionario y no estacionario, examinando las diferencias porcentuales entre el mejor modelo estacionario y no estacionario, se obtienen diferencias tanto negativas (de hasta un -90 %) como positivas de hasta un 50 % al considerar los criterios BIC como indicador del mejor modelo a escoger.

De acuerdo con lo anterior, existe cambio en las tendencias de caudales medios diarios extremos en cuencas ubicadas en la zona centro y sur del país, como también cambio en la estacionalidad de diversas cuencas. Si bien es complejo atribuir la responsabilidad tan solo al cambio climático, puesto que el fenómeno de crecidas y estacionalidad también responden a cambios en uso de suelo, variabilidad climática, procesos naturales, entre otros. Sin embargo, resulta interesante el cómo el cambio de tendencias de precipitaciones puede estar afectando la hidrología de estas cuencas, junto con el aumento de las temperaturas, ya que el 70 % de las cuencas que presentan tendencias en invierno y el 60 % de cuencas con tendencias en verano, corresponden a cuencas con régimen pluvial.

Los resultados obtenidos sugieren que, previo a cualquier análisis de frecuencia con motivos de diseño hidrológico, se debe realizar un análisis de tendencias en la zona de estudio para poder decidir si realizar un análisis de frecuencia con enfoque estacionario o no estacionario, puesto que en manuales de estimación de crecidas o el Manual de Carreteras, aún contemplan análisis de frecuencia estacionarios para el diseño de obras. Para un trabajo futuro, se propone considerar covariables meteorológicas como la precipitación y temperatura, para poder incluir variables físicas en la estimación de caudales de diseño, a través de análisis de frecuencia con enfoque no estacionario.

### **Agradecimientos:**

Los autores agradecen a Pablo A. Mendoza y Ximena Vargas por sus comentarios y contribuciones realizados durante este estudio.

### **REFERENCIAS**

Álvarez-Garreton C, Mendoza PA, Boisier JP, Addor N, Galleguillos M, ZambranoBigiarini M, Lara A, Puelma C, Cortes G, Garreaud R, et al. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (11): 5817–5846 <https://doi.org/10.5194/hess22-5817-2018>

Archfield, S. A., Hirsch, R. M., Viglione, A., and Blöschl, G. (2016), Fragmented patterns of flood change across the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,232– 10,239, doi:10.1002/2016GL070590.

Bauer, André. (2021). Automated Hybrid Time Series Forecasting: Design, Benchmarking, and Use Cases. 10.25972/OPUS-22025.

Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., v Canjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Sraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., and Zivković, N.: Changing climate shifts timing of European floods, *Science*, 357, 588–590, 2017.

Carreño y Ossandon (2021) SOCHID VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS CONSIDERANDO ANÁLISIS DE FRECUENCIA NO ESTACIONARIO

Chow, V. T., D. R. Maidment L.W. Mays. (1988). "Applied Hydrology". McGraw Hill.

Cortés, Gonzalo Vargas, Ximena Mcphee, James. (2011). Climate sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology*. 405. 93-109. 10.1016/j.jhydrol.2011.05.013.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN CHILE PARA EL SIGLO XXI INFORME FINAL Texto Realizado por: Departamento de Geofísica Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas Universidad de Chile. Diciembre 2006.

Delisle, F.; Assani, A.A. Comparison of Seasonal Flow Rate Change Indices Downstream of Three Types of Dams in Southern Quebec (Canada). *Water* 2021, 13, 2555. <https://doi.org/10.3390/w1318255>

Douglas, Ellen Kroll, Charles. (2000). Trends in Floods and Low Flows in the United States: Impact of Spatial Correlation. *Journal of Hydrology*. 240. 90-105. 10.1016/S0022-1694(00)00336-X.

Du, T., Xiong, L., Xu, C.-Y., Gippel, C. J., Guo, S., Liu, P. (2015). Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology*, 527, 234–250. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.041

Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F. et al. Anthropogenic intensification of shortduration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ* 2, 107–122 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>

Gudmundsson, L., Do, H. X., Leonard, M., and Westra, S.: The Global Streamflow Indices and Metadata Archive (GSIM) – Part 2: Quality control, time-series indices and homogeneity assessment, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 787–804, <https://doi.org/10.5194/essd10-787-2018>, 2018.

Hidalgo, H. G., Das, T., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., Pierce, D. W., Barnett, T. P., Nozawa, T. (2009). Detection and Attribution of Streamflow Timing Changes to Climate Change in the Western United States. *Journal of Climate*, 22(13), 3838–3855. doi:10.1175/2009jcli2470.1

Hong X. Do, Seth Westra, Michael Leonard, A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow, *Journal of Hydrology*, Volume 552, 2017, Pages 28-43, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.015>.

IPCC (2021). "Cambio climático 2021, informe de síntesis". Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

Kendall, M. G., Gibbons, J. D. (1975). Rank correlation methods.

Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J.-C., Gachon, P., Bobée, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydrometeorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 534–552. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.004

Lagos, M., Pinto, D., Torrez, L., Rondanelli, R. (2021). ¿Son las precipitaciones extremas estacionarias en Chile?. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., Fensholt, R. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240–252. doi:10.1016/j.rse.2018.02.072

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259.

Musselman, K., Clark, M., Liu, C. et al. Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Clim Change* 7, 214–219 (2017). <https://doi.org/10.1038/nclimate3225>

Paredes, M., Gateño, F., Lagos, M., Mendoza, P. (2021). Comparación entre enfoques estacionario y no estacionario para la estimación de precipitaciones de diseño en cuencas de Chile continental. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Panagoulia, D., Economou, P., Caroni, C. (2014). Stationary and nonstationary generalized extreme value modelling of extreme precipitation over a mountainous area under climate change. *Environmetrics*, 25(1), 29–43. <https://doi.org/10.1002/env.2252>

Pardé, m. (1933): Fleuves et rivières. Paris

Quevedo Leiva, M. (2021). Metodología para el relleno de registros fluviométricos diarios en cuencas chilenas cercanas al régimen natural. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180423>

Ricchetti Campos, F. (2018). Incorporación del efecto de la no estacionareidad en el análisis de series hidrometeorológicas de precipitación diaria y temperatura media diaria. Caso de estudio: valores extremos y mensuales en Chile Central. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168487>

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. doi:10.1080/01621459.1968.10480934

Vicuña, S., Garreaud, R.D. McPhee, J. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change* 105, 469–488 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9888-4>