

# SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### APLICACIÓN DE LA MAXIMIZACIÓN DE VARIABLES ATMOSFÉRICAS PARA ESTIMAR LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE CON DATOS DE REANÁLISIS.

JOCELYN LUGO S.<sup>1</sup>  
ÁLVARO OSSANDÓN Á.<sup>2</sup>  
JOAQUÍN MEZA A.<sup>3</sup>  
MIGUEL LAGOS-ZÚÑIGA<sup>4</sup>

#### RESUMEN

Este estudio evalúa la Precipitación Máxima Probable (PMP) en las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel en Chile central, utilizando métodos hidrometeorológicos con datos de reanálisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) ERA5 validados respecto a registros históricos. Se considera el uso del método local o de maximización de humedad, calculando valores de PMP medios a nivel de cuenca y su distribución espacial a través de curvas de profundidad-área-duración. Estos resultados se contrastan con los registros históricos máximos en las cuencas y los resultados del método estadístico tradicional. Además, se proyecta la PMP a futuro considerando el efecto del cambio climático bajo el escenario de emisiones SSP5-8.5 utilizando modelos climáticos de circulación global del proyecto CMIP fase 6 en el periodo 2015-2100. Las estimaciones de PMP de 24 horas obtenidas por maximización de humedad corresponden a 187.5 [mm] (Aconcagua), 193.0 [mm] (Maipo) y 235.8 [mm] (Rapel), con valores inferiores a las estimaciones estadísticas pero superiores a los máximos históricos en estaciones de valle. En zonas con efecto orográfico, la maximización adicional de viento entrega mejores resultados, acercándose de mejor manera a los máximos en estaciones de montaña. Por otro lado, las proyecciones climáticas indican un aumento en la intensidad de la PMP, especialmente en tormentas de menor duración. Los resultados muestran una alta variabilidad con aumentos medianos entre 20 % y 100 % para la PMP en la zona de estudio. La investigación concluye que el método hidrometeorológico, basado en datos de reanálisis, constituye una alternativa robusta para estimar la PMP, entregando resultados adecuados a escala de cuenca. En general, este enfoque permite obtener estimaciones físicamente fundamentadas y conservadoras, aprovechando la disponibilidad actual de datos de reanálisis.

Palabras claves: PMP, cambio climático, reanálisis, GCM, maximización de humedad, maximización de viento, método estadístico.

<sup>1</sup>Estudiante de Magíster, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: jlugo@usm.cl

<sup>2</sup>Académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: alvaro.ossandon@usm.cl

<sup>3</sup>Académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: joaquin.meza@usm.cl

<sup>4</sup>Académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: miguel.lagos@usm.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Los eventos climáticos extremos, caracterizados por valores excepcionalmente altos de variables meteorológicas como la precipitación, representan un peligro evidente para la población. A nivel global, se estima que el 44 % de los desastres ocurridos desde 1970 están directamente relacionados con inundaciones (IPCC, 2022). El concepto de Precipitación Máxima Probable (PMP), definido como la mayor profundidad de agua que puede precipitar sobre una cuenca durante una tormenta dada, es el parámetro de diseño utilizada para aquellas obras cuya falla se considera catastrófica producto de pérdidas de vidas humanas o daños de gravedad a la infraestructura y los ecosistemas, como las represas y tranques de relaves.

Este valor corresponde a un máximo teórico que puede alcanzar la precipitación en una cierta zona, sin embargo, las proyecciones del clima futuro disponibles apuntan a un aumento en la intensidad de las precipitaciones extremas debido al aumento de la capacidad de transporte de humedad en la atmósfera producto del cambio climático (IPCC, 2021). Kao et al. (2019) utilizaron observaciones y datos de reanálisis para analizar la precipitación espacial del huracán Harvey en 2017, observando que ciertos puntos de su relación profundidad-duración-área igualaban e incluso superaban las estimaciones de los reportes hidrometeorológicos oficiales utilizados en Estados Unidos para la estimación de la PMP. Considerando estos hechos, es fundamental mantener estimaciones actualizadas de este parámetro, además de proyectar su posible variación a futuro, sobre todo para obras con vida útil considerable.

Existen principalmente dos enfoques para la estimación de la PMP: los métodos hidrometeorológicos, basados en leyes físicas, pero que requieren una gran cantidad de datos atmosféricos, y los métodos estadísticos, que son más sencillos de aplicar, pero pueden no reflejar adecuadamente las tendencias del cambio climático. Para superar estas limitaciones de datos, estudios recientes (Beauchamp et al., 2013; Rouhani & Leconte, 2016) han demostrado que los modelos climáticos globales (GCM) y los productos de reanálisis son alternativas viables para la estimación de la PMP, permitiendo incluso realizar proyecciones por medio de simulaciones climáticas a futuro. Un ejemplo de esto es el trabajo de Visser et al. (2022), en Australia, donde se utilizaron simulaciones climáticas para proyectar aumentos de hasta un 55 % en la PMP. En el contexto nacional, la práctica habitual se ha centrado en el uso del método estadístico, particularmente de la modificación propuesta por Stowhas (1983). Si bien se han realizado exploraciones con métodos hidrometeorológicos (Lagos-Zúñiga & Vargas, 2014; Navarro, 2023) y enfoques basados en simulaciones (Hiraga & Meza, 2025), su aplicación aún no es generalizada. En el caso de los métodos hidrometeorológicos, persisten desafíos relacionados con la representatividad de modelos climáticos en la zona y el manejo de la información geoespacial disponible, mientras que los enfoques basados en simulación enfrentan además una alta demanda computacional.

El objetivo de este trabajo es presentar los impactos del cambio climático en la precipitación máxima probable (PMP) en la zona central de Chile, utilizando datos del reanálisis global ERA5 y proyecciones de modelos climáticos de circulación global.

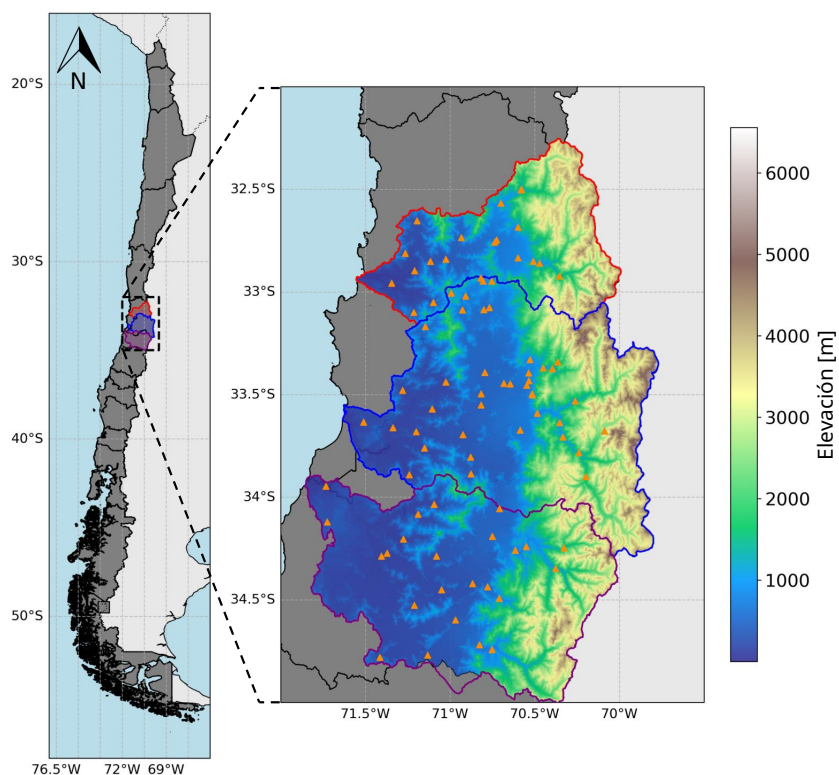
## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la zona central de Chile entre las latitudes 32°S y 35°S, que concentra a gran parte de la población del territorio nacional, y que además cuenta con una amplia red de estaciones y un extenso registro histórico de mediciones en comparación a otras regiones del país (Dirección General de Aguas, 2017). Esta disponibilidad de información permite evaluar con mayor confianza la validez de los datos de reanálisis sobre la zona de estudio.

La definición de PMP según World Meteorological Organization (WMO) (2009) hace referencia a la precipitación sobre un área particular, usualmente una cuenca de interés. Para este estudio, las cuencas escogidas para representar los patrones de precipitación de la zona corresponden a las de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel. La ubicación general de las cuencas, así la ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas para el estudio y la región de descarga de los datos de reanálisis se presenta en la Figura 1, incluyendo información de elevación para las cuencas de interés (Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2016). Una característica compartida entre las cuencas del estudio corresponde a que sus cauces principales son ríos que drenan aguas en un área que incluye zonas de alta mon-

taña en la Cordillera de Los Andes, grandes valles y finalmente desembocan directamente al océano. Las tres cuencas consideradas comparten un clima similar, predominando el clima templado de tipo mediterráneo con estación seca prolongada, con presencia de clima frío de montaña en las zonas elevadas de la cordillera. Mientras que la temperatura de las zonas es similar, la precipitación presenta un gradiente de norte a sur, con precipitaciones acumuladas anuales considerablemente superiores en la cuenca del río Rapel respecto a Maipo y sobre todo Aconcagua (Dirección General de Aguas, 2004). Se debe destacar que si bien las cuencas Maipo y Rapel tienen áreas similares (15,000 [km<sup>2</sup>] y 13,000 [km<sup>2</sup>], respectivamente), la cuenca del río Aconcagua tiene un área considerablemente menor (7,300 [km<sup>2</sup>]). Finalmente, como es posible apreciar en la Figura 1, la cuenca del río Maipo drena una mayor superficie en la zona de la cordillera, además de contar con mayores elevaciones.



**Figura 1:** Ubicación de la zona de estudio. La región segmentada indica la extensión de los datos grillados utilizados. Se destacan además las cuencas de los ríos Aconcagua (rojo), Maipo (azul) y Rapel (púrpura), así como las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de ellas (marcadores naranjos) y la elevación del terreno.

## 2.2. DATOS

### 2.2.1. REGISTROS HISTÓRICOS

Los registros históricos de las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) se utilizan como referencia para la evaluación de los datos de reanálisis. Se consideran los registros de precipitación acumulada diaria disponibles en la base de datos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), específicamente, de 86 estaciones dentro de la zona de estudio con 10 o más años de registro. La ubicación de estas estaciones se presenta en la Figura 1, mientras que los detalles de cada una se presentan en el Anexo A.

### **2.2.2. REANÁLISIS ERA5**

ERA5 es la quinta generación de reanálisis climático desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones a Plazo Medio (ECMWF). Este contiene información a nivel horario desde 1950 hasta la actualidad para una gran cantidad de variables atmosféricas, superficiales y oceánicas. Los productos de ERA5 han sido ampliamente utilizados en diversas investigaciones climatológicas, y representan adecuadamente el clima en ciertas regiones del mundo, especialmente en cuanto a los datos de precipitación (Jiao et al., 2021; Lavers et al., 2022).

La información de ERA5 es utilizada en lugar de las mediciones en terreno para la implementación de los métodos hidrometeorológicos, ante la falta de registros históricos en altura necesarios para el cálculo en el territorio nacional. Específicamente, se hace uso de los productos ERA5 en niveles de presión y ERA5-Land (Hersbach et al., 2023; Muñoz Sabater, 2019), considerando la zona comprendida entre las latitudes 35°S y 32°S, y longitudes 72°W y 69°W, englobando completamente la zona de estudio.

ERA5 en niveles de presión contiene información de variables atmosféricas de forma horaria a una resolución de 0.25° (aproximadamente 30 [km]). Se utilizan valores de humedad específica y relativa, y velocidad latitudinal y longitudinal del viento entre los niveles de presión 1000 [hPa] a 250 [hPa], según la recomendación de la WMO para el límite superior de las tormentas. Por otro lado, ERA5-Land es un producto con una resolución de 0.1° (aproximadamente 11 [km]), que contiene información horaria de variables en superficie. Desde este conjunto de datos se obtienen simulaciones de precipitación horaria desde 1950 hasta la actualidad. Para ambas bases de datos, se considera el uso de información desde 1989 hasta 2023. El límite inferior de este rango se define considerando que para años anteriores, los productos de ERA5 no logran capturar adecuadamente el clima en diversas regiones del mundo debido a una menor cantidad de información satelital histórica (Bell et al., 2021; Tarek et al., 2020).

### **2.2.3. MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES**

Para analizar el efecto del cambio climático se hace uso del escalamiento estadístico de modelos globales desarrollado por Vasquez & Mendoza (2024) que considera un total de 29 modelos climáticos globales del proyecto CMIP6 del World Climate Research Project (WRCP). Estos conjuntos contienen información de temperatura y precipitación en el rango 1950-2099, escalados estadísticamente mediante el método MBCn (Cannon, 2018), utilizando el producto grillado CR2MET (Boisier, 2023) como referencia para la corrección de sesgo.

Esta base de datos incluye valores de temperatura y precipitación considerando el periodo 1950-2014 como periodo histórico, mientras que el periodo 2015-2099 representa simulaciones para el escenario SSP5-8.5. Para la investigación se utilizan 18 de estos modelos en base a la disponibilidad de las variables crudas necesarias para la implementación. El detalle de los modelos utilizados y las instituciones responsables de su desarrollo se presenta en Anexo B.

## **2.3. VALIDACIÓN DE DATOS**

Aunque existen investigaciones sobre el uso de ERA5 para estudios climáticos a nivel global, considerando que se planea estimar un parámetro crítico de diseño como lo es la PMP, resulta necesario verificar a nivel local la validez de los datos meteorológicos obtenidos. Para no extender innecesariamente el trabajo, estos resultados se presentan a nivel de todas las estaciones o para la estación Quinta Normal en Santiago, una de las estaciones con mayor cantidad de registros en el país, que puede considerarse como representativa del clima del valle de la región Metropolitana.

En primer lugar, se analiza el sesgo de la precipitación de ERA5-Land respecto a las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio, considerando para esta comparación la celda de grilla más cercana a cada estación. Posteriormente, se analiza la distribución estacional de precipitaciones en función de la precipitación acumulada mensual en invierno y verano, verificando que los datos de reanálisis reflejen correctamente la variación en los volúmenes de precipitación a lo largo del año. Adicionalmente, se verifica la correlación entre las series de datos de precipitaciones diarias y máximas anuales de cada estación. Esto se realiza obteniendo la correlación de Pearson, además de realizando una regresión lineal robusta (Theil-Sen).

## 2.4. ESTIMACIÓN DE LA PMP

### 2.4.1. MÉTODO HIDROMETEOROLÓGICO

La estimación de la PMP actual se llevará a cabo mediante el método hidrometeorológico, fundamentado en principios físicos y ecuaciones meteorológicas que permiten maximizar las condiciones atmosféricas asociadas a tormentas. En particular, se considera la aplicación del método local o de maximización de humedad.

El primer paso para la obtención de la PMP hidrometeorológica consiste en identificar las mayores tormentas ocurridas en la zona de estudio, ya que se considera que estas corresponden a tormentas con eficiencia cercana a la máxima. Se consideran para el estudio solo las tormentas que en algún punto de la zona de estudio superen el valor asociado al percentil 99.9 % de la precipitación no nula en cada celda.

Para el proceso de maximización se utiliza el concepto de agua precipitable (PW), que corresponde a una medida de la cantidad de humedad en forma de vapor de agua contenida en una columna de aire. Esencialmente, este método indica que, para tormentas de alta eficiencia, la precipitación total es directamente proporcional al agua precipitable disponible. Se utiliza la ecuación determinada por Solot (1939) para estimar el agua precipitable:

$$PW = \frac{1}{g\rho_w} \int_{p_{superficie}}^{p_{superior}} q(p) dp \quad (1)$$

$$PW_{sat} = \frac{1}{g\rho_w} \int_{p_{superficie}}^{p_{superior}} \frac{q(p)}{RH(p)} dp \quad (2)$$

Donde,  $PW$  corresponde al agua precipitable,  $PW_{sat}$  el agua precipitable en condición de atmósfera saturada,  $\rho_w$  a la densidad del agua en [ $kg/m^3$ ],  $p$  a la presión atmosférica en [hPa],  $q$  la humedad específica y  $RH$  la humedad relativa, utilizada para estimar el agua precipitable en condición de saturación local durante los eventos. Estos valores se obtienen con los datos de humedad de ERA5 en niveles de presión.

La maximización de humedad consiste en aumentar la precipitación observada durante una tormenta de alta eficiencia ( $Pr_{obs}$ ), asumiendo condiciones de máxima agua precipitable ( $PW_{max}$ ), definida como el menor valor entre la saturación local ( $PW_{sat}$ ) y el valor extremo estacional ( $PW_{horz}$ ) correspondiente a un valor con periodo de retorno de 100 años. La PMP se estima multiplicando la precipitación del evento por un factor de maximización, dado por la razón entre  $PW_{max}$  y el agua precipitable durante la tormenta ( $PW_{obs}$ ):

$$PMP_{HM} = Pr_{obs} \cdot r = Pr_{obs} \cdot \frac{PW_{max}}{PW_{obs}} \quad (3)$$

Considerando la importancia de la elevación orográfica en la precipitación sobre gran parte del territorio nacional, es necesario considerar el término de maximización de viento dado por la ecuación (Fernando & Wickramasuriya, 2011):

$$wmf = \frac{W_{max}}{W_{tormenta}} \quad (4)$$

Donde  $wmf$  corresponde al factor de maximización de viento, obtenido en base a la velocidad máxima del viento para la zona ( $W_{max}$ ) y la velocidad del viento media durante la tormenta ( $W_{tormenta}$ ). Esta ecuación considera la magnitud de la velocidad del viento respecto a una dirección crítica, definida como la dirección principal de entrada de humedad a la zona. Para esta velocidad, la World Meteorological Organization (WMO) (2009) recomienda utilizar la velocidad máxima del viento durante la tormenta considerando el promedio en los primeros 1,000 o 1,500 metros de altura, o aproximadamente la zona entre los niveles de presión 1,000 [hPa] y 850 [hPa]. De esta forma, se puede estimar la PMP por maximización de viento considerando un factor adicional en la ecuación de PMP por maximización de humedad:

$$PMP_W = Pr_{obs} \cdot r \cdot wmf \quad (5)$$

Los valores de PMP obtenidos con estas ecuaciones corresponden a valores a escala puntual. Debido a la naturaleza de los datos utilizados, estos se deben interpretar como la PMP para un área igual a una celda de grilla de los datos. Considerando las latitudes en la zona de estudio, esto se traduce en el valor de PMP para un área de aproximadamente  $100 [km^2]$ .

En este punto es posible considerar dos enfoques: obtener un valor representativo a nivel de cuenca, o determinar la distribución espacial de esta precipitación por medio de curvas de profundidad-duración-área. El primer caso corresponde al método utilizado por Beauchamp et al. (2013), quienes utilizaron un factor de abatimiento para transformar el valor puntual de PMP a un valor a nivel de cuenca utilizando la precipitación máxima ( $P_{max}$ ) y la precipitación media ( $P_{media}$ ) en la cuenca durante la tormenta maximizada:

$$R = \frac{P_{media}}{P_{max}} \quad (6)$$

De esta forma, la PMP a nivel de cuenca se puede estimar incluyendo este factor de abatimiento en las ecuaciones anteriores:

$$PMP_{cuenca} = PMP \cdot R \quad (7)$$

Donde PMP puede ser tanto el resultado de la maximización de humedad ( $PMP_{HM}$ ) como de la maximización de viento ( $PMP_W$ ). Esta expresión es útil para comparar los resultados de PMP hidrometeorológica a los de otros métodos que generan resultados a escala de cuenca.

Por otro lado, es posible aprovechar la distribución espacial de la precipitación entregada por los datos grillados para calcular curvas de profundidad-duración-área (PDA) maximizadas. En este caso, en lugar de considerar un factor de abatimiento para obtener el valor representativo de PMP para la cuenca, se obtiene la curva profundidad-área de cada tormenta para una duración específica. Luego, las curvas obtenidas para cada tormenta seleccionadas se amplifican considerando el valor más alto de los coeficientes de maximización dentro de la cuenca para la tormenta. Esto se puede expresar por medio de las ecuaciones:

$$PMP_{HM} = PA \cdot r \quad (8)$$

Donde PA corresponde a la curva profundidad-área de la tormenta maximizada. Al maximizar de esta forma distintas tormentas, es posible trazar una envolvente suavizada para la relación profundidad-área de la PMP en cada cuenca. Finalmente, al repetir el procedimiento completo para distintas duraciones (en este caso 24, 48 y 72 horas), es posible obtener la relación profundidad-área-duración (PDA) de la PMP para una cuenca en particular. Este enfoque no se considera para la maximización de viento, ya que no es posible esperar un incremento de la precipitación debido al efecto orográfico sobre el área completa de cuencas de este tamaño.

#### 2.4.2. MÉTODO ESTADÍSTICO

Para validar los resultados obtenidos se comparan los valores de PMP a nivel de cuenca con las estimaciones estadísticas de PMP en base a registros históricos (Hershfield, 1965). Este método es una variación del análisis de frecuencia tradicional en el que se aprovechan las series de precipitación máximas para obtener la PMP en base al promedio y desviación estándar de la serie:

$$PMP = \bar{X}_n + K \cdot S_n \quad (9)$$

Stöwhas propuso un ajuste basado en los registros históricos de un conjunto de estaciones en Chile para obtener relaciones calibradas para la zona. El método consiste en utilizar como PMP el máximo valor entre el uso de la ecuación general de Hershfield con un valor K fijo igual a 11 y el valor dado por una de las siguientes ecuaciones, dependiendo de si la estación se ubica en la cordillera (2) o no (3):

$$PMP_2 = \bar{X}_c \left( 4 + 3,8 \cdot e^{-0,0069 \cdot \bar{X}_c^{1,141}} \right) \quad (10)$$

$$PMP_3 = \bar{X}_c \left( 3,5 + 3,65 \cdot e^{-0,0076 \cdot \bar{X}_c^{1,102}} \right) \quad (11)$$

Para comparar los valores puntuales de PMP estadística con los valores a nivel de cuenca obtenidos por los métodos hidrometeorológicos, los resultados de PMP estadística son convertidos a un valor medio de cuenca calculando un promedio ponderado por medio de polígonos de Thiessen. Para las duraciones de 48 y 72 horas, se multiplican los resultados por un coeficiente de duración ( $C_d$ ) adecuado, obtenido para cada cuenca del Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica (Dirección General de Aguas, 1995).

## 2.5. CAMBIO CLIMÁTICO

Para estimar el efecto del cambio climático en los patrones de precipitación de la zona de estudio, se proyectan estimaciones de PMP para el escenario de emisiones SSP 5-8.5 utilizando la base de datos de temperatura y precipitación generada por Vasquez & Mendoza (2024). Para implementar el método local en este caso, se requiere estimar el agua precipitable con expresiones teóricas. Para este efecto se considera el valor de humedad específica en cada GCM en su versión cruda, dado por el parámetro  $huss$  (humedad específica cercana a la superficie) obtenido directamente de los modelos CMIP6, que permite estimar el punto de rocío,  $t_d$  a través de la expresión empírica de Lawrence (2005), que utiliza la temperatura media ( $T$ ) en Kelvin:

$$t_d = \frac{243,04 \left[ \ln \left( \frac{RH}{100} \right) + \frac{17,625T}{243,04+T} \right]}{17,625 - \ln \left( \frac{RH}{100} \right) - \frac{17,625T}{243,04+T}} \quad (12)$$

Finalmente, el agua precipitable se puede estimar con el ajuste realizado por Visser et al. (2022) en base a las tablas de agua precipitable propuestas por la World Meteorological Organization (WMO) (2009):

$$PW = 0,003296 \times t_d^3 + 0,010276 \times t_d^2 + 1,098213 \times t_d + 7,8003 \quad (13)$$

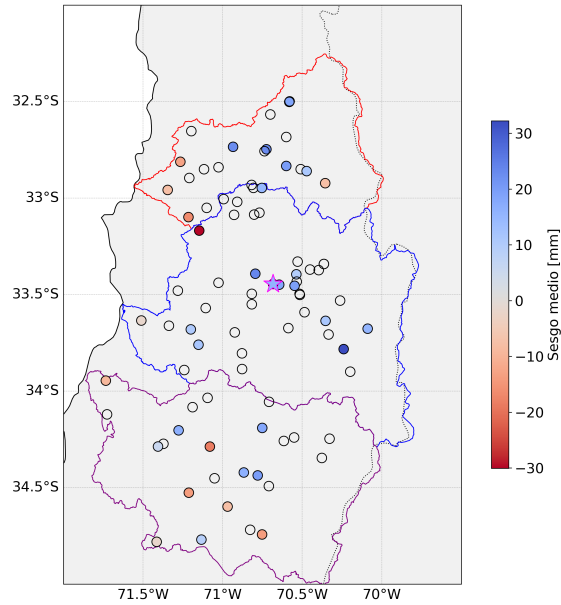
Los valores de PMP futuras se obtienen considerando el mismo procedimiento descrito para los datos grillados de ERA5, obteniendo estimaciones a nivel de cuenca y curvas PA maximizadas.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. VALIDACIÓN DE DATOS

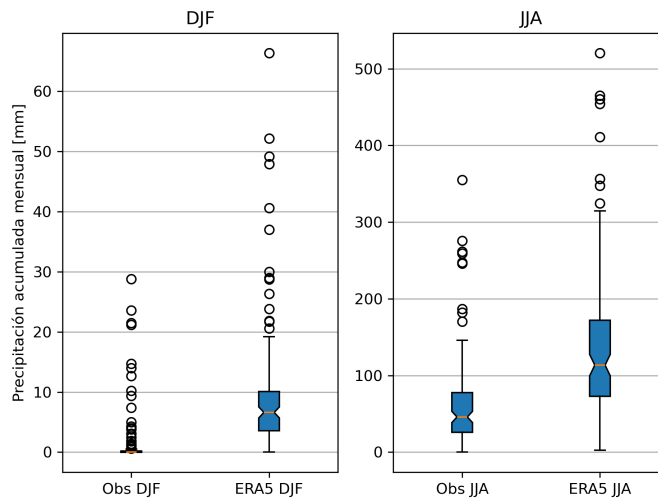
El comportamiento de ERA5 respecto a las precipitaciones máximas anuales en la zona de estudio varía de forma importante. Para analizar esto se presenta un mapa indicando el sesgo medio de las series de máximos anuales para cada una de las estaciones consideradas en el análisis (Figura 2). Al analizar, por ejemplo, la estación Quinta Normal en Santiago, los resultados indican que ERA5-Land sobreestima la precipitación en gran parte del registro, con un marcado sesgo húmedo.

El mapa de sesgo medio permite observar cómo este comportamiento varía dentro de las cuencas. Si bien no se observa un patrón particular a nivel espacial, es importante notar que el sesgo es cercano a cero en gran parte de la zona este de la cuenca del río Rapel y al suroeste de la cuenca del río Maipo, donde se concentran parte importante de las precipitaciones extremas en los datos de reanálisis.



**Figura 2:** Sesgo medio de los valores máximos anuales en ERA5-Land respecto a los registros históricos en las estaciones de las cuencas de los ríos Aconcagua (rojo), Maipo (azul) y Rapel (púrpura). Se destaca la estación Quita Normal, al centro de la cuenca del río Maipo, con un marcador en forma de estrella.

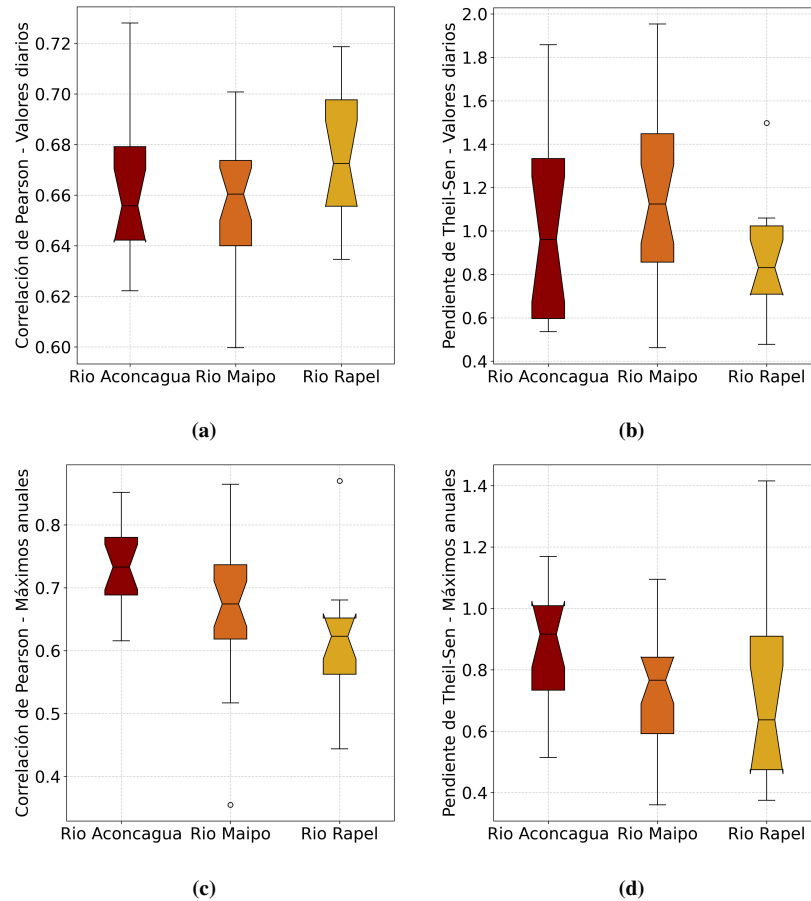
Por otro lado, se comparan los valores de forma estacional, graficando la distribución de los valores medios mensuales de precipitación para invierno y verano en ambas series (Figura 3). Se puede observar que ERA5-Land indica veranos más húmedos que los registros. Por otro lado, en invierno, los valores de ERA5-Land presentan valores extremos superiores a cualquier valor en los registros. De la misma forma, este comportamiento varía por estación.



**Figura 3:** Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Quinta Normal y ERA5-Land.

Luego, se analiza la correlación entre las series de datos para los valores diarios y para los máximos anuales (Figura 4). Para esto se obtiene la correlación de Pearson y la pendiente de Theil-Sen para las 86 estaciones dentro de la zona de estudio, tanto a nivel diario como para los máximos anuales. La pendiente de Theil-Sen, también llamada regresión robusta, es un método para estimar una relación lineal entre dos conjuntos de datos con la capacidad de ignorar valores atípicos, útil en este caso debido a la existencia de errores en la predicción de ocurrencia de precipitación a nivel diario en ERA5-Land.

Se observa que a nivel diario las correlaciones en todas las estaciones superan el valor 0.6, mientras que las pendientes se centran alrededor de 1, indicando que las series coinciden en su mayor parte. Por otro lado, para los máximos anuales, si bien los valores de correlación y pendiente son ligeramente menores, la gran mayoría de los valores sigue en rangos aceptables de correlación. Por otro lado, estos resultados coinciden con los resultados del sesgo para las estaciones, mostrando una variación de la pendiente entre las series de datos que ronda la identidad.



**Figura 4:** Correlación entre datos de ERA5-Land y registros históricos. (a) y (b) presentan la relación para valores diarios, mientras que (c) y (d) presentan las relaciones para los máximos anuales.

### 3.2. MAXIMIZACIÓN DE HUMEDAD

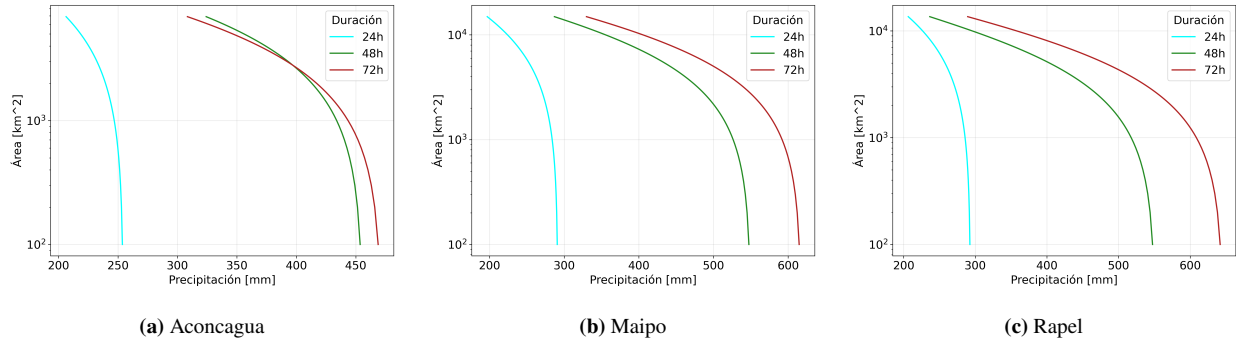
Con los valores de agua precipitable calculados, y considerando las tormentas sobre un umbral definido como el percentil 99.9 % de la precipitación no nula, se obtienen los valores de PMP para cada cuenca y duración presentados en la Tabla 1.

**Tabla 1:** PMP por maximización de humedad (valores en [mm]).

Cuenca	24 [hrs]	48 [hrs]	72 [hrs]
Aconcagua	187.5	286.3	333.5
Maipo	193.0	304.5	346.7
Rapel	235.8	287.8	348.4

Del mismo modo, se obtienen las curvas PDA para representar la distribución espacial de la PMP según los valores de precipitación de ERA5-Land. La Figura 5 presenta los resultados obtenidos para cada cuenca, suavizados con un

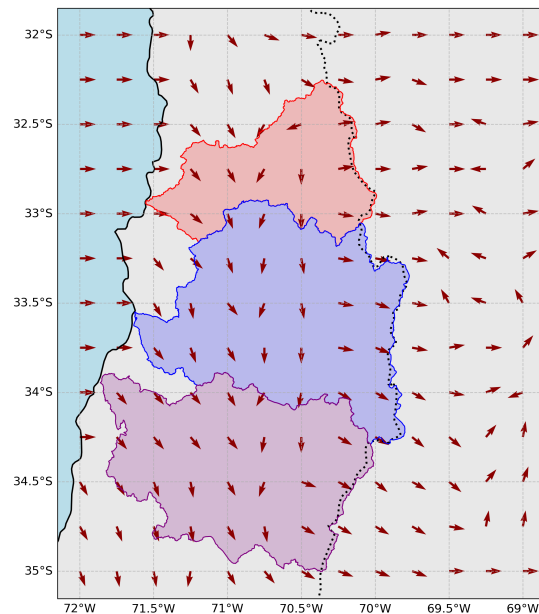
ajuste exponencial. Se observa que los resultados a nivel de cuenca mostrados anteriormente corresponden, de forma aproximada, a los valores para áreas mayores en las curvas PDA. Por otro lado, es posible notar que las curvas aumentan de intensidad de norte a sur (Aconcagua, Maipo, Rapel), como se puede esperar del gradiente de precipitación a nivel nacional. Si bien puede parecer extraño que las curvas de 48 y 72 horas en Aconcagua sean similares, esto se debe a que las mayores tormentas para 48 y 72 horas en los datos de ERA5-Land son similares.



**Figura 5:** Curvas PDA para la PMP por maximización de humedad para 24, 48 y 72 horas en las cuencas.

### 3.3. MAXIMIZACIÓN DE VIENTO

La Figura 6 presenta la dirección principal de ingreso de humedad para la zona de estudio durante los días de precipitación intensa, definida en este caso como precipitación superior al percentil 90%. El resultado es el esperado para las latitudes de estudio, con un ingreso de humedad de oeste a este en el sector costero, para luego presentar una inclinación de norte a sur en los valles de las cuencas y finalmente entrar de forma casi perpendicular a las zonas de alta montaña en la cordillera. Esto se debe tanto a la geografía de la zona de estudio como al movimiento típico en sentido horario de los sistemas sinópticos en el hemisferio sur.



**Figura 6:** Dirección crítica de viento para la zona de estudio. Se destacan en color las cuencas analizadas: Aconcagua en rojo, Maipo en azul y Rapel en púrpura.

Si bien las direcciones mostradas no son necesariamente representativas para las condiciones reales de viento durante todas las tormentas, sobre todo en las zonas interiores donde el viento puede variar considerablemente su dirección durante una misma tormenta, si debiesen reflejar la dirección principal de ingreso de humedad tanto en los sectores costeros, como en algunos sectores de la cordillera debido a la canalización en quebradas.

Considerando estos resultados, la Tabla 2 presenta los resultados de PMP por medio de maximización de viento y humedad en conjunto. Se observa que los valores para la cuenca del Aconcagua coinciden con los resultados mostrados con anterioridad al maximizar únicamente por humedad, lo que puede deberse a un problema de resolución al ser la más pequeña de las cuencas. Por otro lado, para las cuencas de los ríos Maipo y Rapel, los resultados indican un aumento considerable de los valores respecto a los resultados de la Tabla 1 para todas las duraciones.

**Tabla 2:** PMP por maximización de humedad y viento (valores en [mm]).

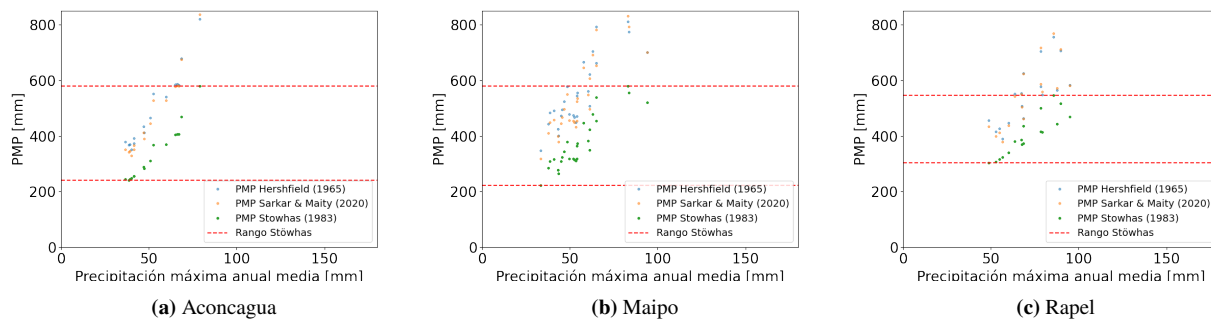
Cuenca	24 [hrs]	48 [hrs]	72 [hrs]
Aconcagua	187.5	286.3	333.5
Maipo	332.5	514.6	585.9
Rapel	568.0	716.5	862.9

### 3.4. MÉTODO ESTADÍSTICO

La Figura 7 presenta los valores de PMP resultantes por cada método en las estaciones de cada cuenca. Las líneas segmentadas representan el rango de valores de PMP determinados por el método de Stöwahas en cada cuenca. Se incluyen como referencia los valores de PMP obtenidos con métodos estadísticos calibrados para las mayores precipitaciones globales (Hershfield, 1965; Sarkar & Maity, 2020), que entregan valores de PMP demasiado altos para ser considerados. La tabla 3 indica las PMP obtenidas a nivel de cuenca con la expresión de Stöwahas para 24, 48 y 72 horas en la zona de estudio.

**Tabla 3:** PMP estadística a nivel de cuenca obtenida con el método de Stöwahas (valores en [mm]).

Cuenca	24 [hrs]	48 [hrs]	72 [hrs]
Aconcagua	325.7	464.1	555.0
Maipo	397.4	544.4	619.0
Rapel	413.1	612.7	763.0

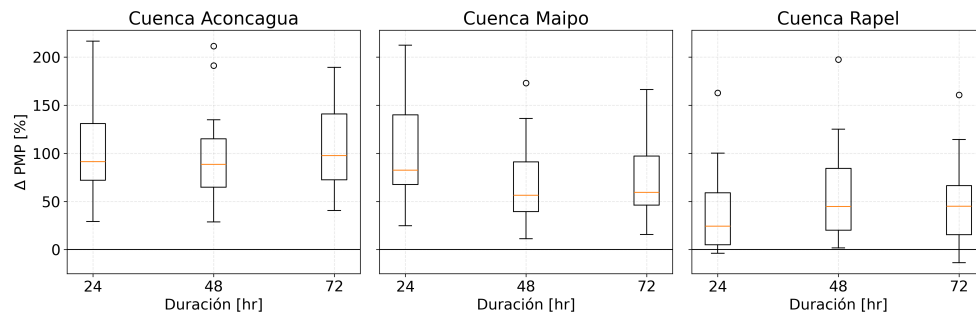


**Figura 7:** Valores obtenidos para la PMP estadística puntual en cada estación en las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c). Las líneas rojas indican los rangos mínimos y máximos para la PMP predicha por Stöwahas en la zona.

### 3.5. MODELOS CLIMÁTICOS

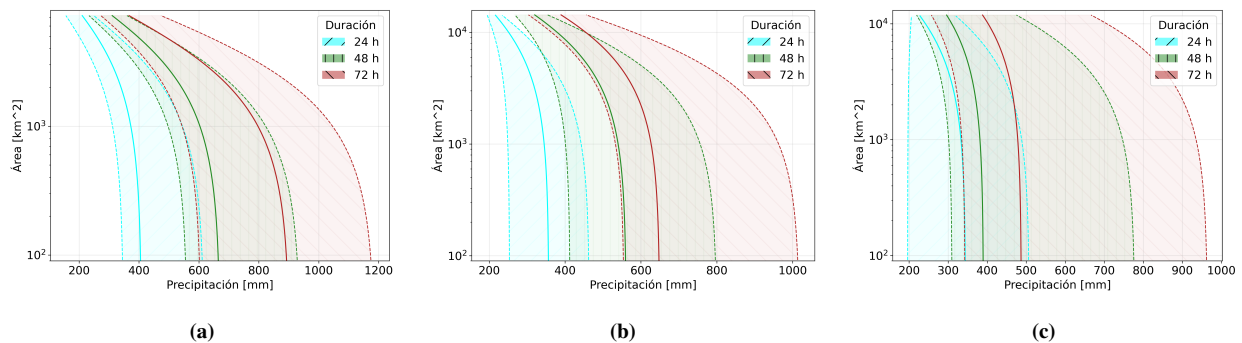
La Figura 8 presenta los rangos de variación en las PMP proyectadas por los modelos CMIP6 por medio del método de maximización de humedad respecto a los resultados obtenidos con datos de reanálisis. Los distintos modelos utilizados entregan resultados muy variados, con extremos alejados del rango central. Tomando el valor mediano como resultado

del conjunto de modelos, es posible notar que las variaciones proyectadas son mayores al norte de la zona de estudio, disminuyendo progresivamente hacia el sur. También, se puede observar que, a excepción de algunos modelos en la cuenca del río Rapel, todos los resultados apuntan a un incremento en los valores de PMP para la zona de estudio.



**Figura 8:** Boxplot para los rangos de variación en la PMP proyectadas por los modelos CMIP6.

De la misma forma, se generan los rangos de valores para la distribución espacial de la PMP en las cuencas. La Figura 9 presenta las curvas PDA suavizadas para estos rangos, así como el valor mediano entre los modelos. Los resultados presentan gran variabilidad, indicando en el rango mínimo una disminución de hasta 60 % de los valores de PMP por área. Por otro lado, los valores medianos indican un aumento de hasta 30 % para los valores en área en la cuenca del río Aconcagua, mientras que indican disminuciones de 20 % para la cuenca del Maipo y hasta 40 % en la cuenca del río Rapel. Finalmente, las curvas de variación máxima predicen incrementos entre 95 % y 180 % para las cuencas.



**Figura 9:** Rangos para la distribución espacial de la PMP en los modelos climáticos para las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c). La línea sólida indica el valor mediano, mientras que las segmentadas indican los rangos de variación mínima y máxima.

#### 4. DISCUSIÓN

La validación de datos muestra que la variable de precipitación de ERA5-Land se ajusta considerablemente al clima regional indicado por los registros históricos. Si bien el sesgo en algunos puntos puede ser importante, ERA5 es capaz de modelar adecuadamente la variabilidad climática de la región y el comportamiento de los valores extremos. La Figura 2 muestra que, con algunas excepciones, en la mayor parte de la zona de estudio los valores de precipitación en ERA5-Land son similares a los valores históricos, por lo que no se observan evidencias para descartar el uso de los datos.

Para los resultados de PMP, en vista de que la mayoría de los estudios previos se enfocan en la cuenca del río Maipo, esta discusión se centra en dicha cuenca. En primer lugar, considerando los registros históricos, las precipitaciones más altas registradas en la cuenca para 24, 48 y 72 horas corresponden a: 336.9 [mm], 418.0 [mm] y 528.0 [mm], respectivamente. Se debe notar que estos máximos incluyen estaciones de alta montaña en las que las precipitaciones pueden ser considerablemente superiores. De hecho, los valores de 24 y 48 horas corresponden a las estaciones Valle

Olivares y Embalse El Yeso, respectivamente, ubicadas en zonas altas de la cordillera, mientras que el valor de 72 horas corresponde a la estación Caleu, ubicada en una zona de quebradas pronunciadas cercana a la línea divisora de aguas de la cuenca. Esto implica que estos valores de precipitación son técnicamente posibles, sin embargo, están ligados a tormentas extremas sobre zonas en las que la elevación orográfica puede incrementar la precipitación de manera excepcional.

Como referencia, los valores más altos de precipitación en la estación Quinta Normal en Santiago corresponden a 111.1 [mm], 167.3 [mm] y 211.8 [mm] para las mismas duraciones. Los resultados obtenidos por medio del método local a nivel de cuenca superan a las precipitaciones en estaciones como esta o similares, ubicadas en los valles de la cuenca. Por otro lado, las curvas PDA determinadas utilizando la distribución espacial de las tormentas maximizadas encierran completamente los valores de precipitación máxima histórica de 48 y 72 horas para la cuenca, mientras que para el valor de 24 horas es aproximadamente un 10 % menor al máximo histórico registrado para la duración (el valor final de la curva PDA para Maipo antes del suavizado es ligeramente mayor a 300 [mm]).

Al aplicar la maximización de viento, los resultados obtenidos a nivel de cuenca logran obtener valores aproximadamente iguales o superiores a las precipitaciones máximas registradas en toda la cuenca, incluyendo las estaciones en altura, obteniendo valores comparables a los máximos de las curvas PDA obtenidas con el método local pero más bajos para 48 y 72 horas. Específicamente, se obtiene un valor ligeramente inferior para 24 horas (332.5 [mm] contra 336.9 [mm] registrados en Valle Olivares), mientras que se superan las precipitaciones máximas registradas para 48 y 72 horas en un 23 % y 11 %, respectivamente.

Respecto a otras investigaciones, Navarro (2023) obtuvo a través del método local un valor de PMP de 72 horas a nivel de grilla para la celda de estación Quinta Normal de 153.03 [mm], valor que no alcanza el máximo registrado. Este resultado es demasiado bajo en comparación a los registros, sin embargo, puede deberse a la calidad de los datos o problemas en la implementación. Por otro lado, (Hiraga & Meza, 2025) obtuvieron un valor de PMP de 72 horas a nivel de cuenca de 348.3 [mm] por medio del método de maximización de humedad, prácticamente equivalente al resultado de este trabajo. Además, utilizando el enfoque basado en modelamiento de tormentas, su resultado para la PMP media de 72 horas en la cuenca fue de 332.7 [mm], mientras que el valor que obtuvieron por el método estadístico para la misma duración corresponde a 515.8 [mm]. El valor del enfoque basado en modelamiento es notablemente similar al resultado obtenido tanto por los autores del trabajo como en esta investigación a través del método de maximización de humedad. A pesar de que este hecho puede ser esperable debido al uso de bases de datos similares para ambos trabajos, esto respalda fuertemente la implementación del método y los resultados obtenidos.

En cuanto a la variación proyectada de la PMP por medio de las predicciones de modelos climáticos CMIP6, como ya se mencionó, es interesante notar que los mayores aumentos esperados (o rangos de aumentos) ocurren para las duraciones menores, reforzando la idea de que a futuro se debe profundizar el estudio de las precipitaciones extremas asociadas a duraciones menores a 24 horas (IPCC, 2022). Por otro lado, también es relevante el hecho de que los mayores aumentos, sobre todo para la PMP de 24 horas, ocurren para la cuenca del río Aconcagua, mientras que los menores aumentos ocurren para Rapel en sentido opuesto a los valores crecientes de PMP encontrados de norte a sur. Esto puede estar relacionado a la disminución esperada de la precipitación, lo que podría indicar una reducción del gradiente de precipitación norte-sur típico de la zona central y sur del país. Esto, sumado a la intensificación esperada en las precipitaciones extremas a nivel global, podría hacer un poco más uniformes los valores de PMP entre las cuencas estudiadas respecto a los resultados obtenidos para la actualidad.

## 5. CONCLUSIÓN

Las estimaciones de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para una duración de 24 horas mediante el método hidrometeorológico mostraron valores de 187.5 [mm] para la cuenca del Aconcagua, 193.0 [mm] para el Maipo y 235.8 [mm] para el Rapel. Estos resultados son cercanos al rango inferior de las estimaciones estadísticas y superan los máximos históricos registrados en estaciones de valle. La comparación evidencia que, si bien el método hidrometeorológico ofrece una base física robusta, tiende a subestimar la precipitación en zonas con fuerte influencia orográfica, donde el método estadístico produce valores más conservadores.

La aplicación adicional de maximización de viento a nivel de cuenca permite mejorar los resultados y obtener estimaciones más conservadoras. Este método solo obtiene un resultado menor a los registros históricos en uno de los casos,

con una diferencia menor al 5 % en la estimación, e incluso, en la cuenca del río Rapel, este método obtiene valores similares a los del método estadístico.

En cuanto a las proyecciones de cambio climático bajo el escenario SSP5-8.5, los modelos exhiben una alta variabilidad e incertidumbre. Para la PMP de 24 horas en la cuenca del Maipo, por ejemplo, el cambio proyectado oscila entre un aumento mínimo del 24.8 % y un máximo del 212.3 %, con una mediana del 82.6 %. En la cuenca del Rapel, algunos modelos incluso proyectan una leve disminución. Una tendencia clave es el incremento más pronunciado de la PMP para tormentas de corta duración, especialmente en la cuenca norte (Aconcagua), lo que sugiere una futura intensificación de eventos extremos y una posible homogeneización del gradiente de precipitación norte-sur.

La validación de los datos de reanálisis ERA5-Land demostró que, a pesar de la existencia de sesgos puntuales, representan adecuadamente la variabilidad climática regional, justificando su uso en este estudio. El método hidrometeorológico se presenta como una alternativa eficiente y de gran valor práctico, que puede complementar los enfoques estadísticos para optimizar el diseño de grandes obras hidráulicas. Para futuras investigaciones, se recomienda aplicar correcciones de sesgo a los datos de entrada e incorporar la maximización por viento para capturar mejor los efectos orográficos, así como profundizar en el estudio de precipitaciones extremas de corta duración.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto ANID FONDECYT de Iniciación N.º 11250238 y por el proyecto interno de investigación PI\_LIR\_24\_01 de la Universidad Técnica Federico Santa María.

## REFERENCIAS

Beauchamp, J., Leconte, R., Trudel, M., & Brissette, F. (2013). Estimation of the summer-fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate. *Water Resources Research*, 49(6), 3852-3862. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20336>

Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J.-R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186-4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>

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

Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1-2), 31-49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2016). *DEM Alos Palsar* (Dataset). Dataset. Centro de Información de Recursos Naturales. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/download/b538717f-cc50-3c8e-bd28-2aff59d4f4e5>

Dirección General de Aguas. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluvio-métrica* [Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/repositorioidga/handle/20.500.13000/1819>].

Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y Clasificación de cursos y cuerpos de agua según Objetivos de Calidad correspondiente a las cuencas de los ríos Loa, Elqui, Aconcagua, Rapel, Bio-Bio, Aysén y Maipo-Mapocho* (Informe Técnico) (Realizado por: CADE-IDEPE Ingeniería). Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Dirección General de Aguas. (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional. Resumen Ejecutivo* (inf. téc. N.º S.I.T. N° 417) (Realizado por: Universidad de Chile Pontificia Universidad Católica de Chile). Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

- Fernando, W., & Wickramasuriya, S. (2011). The hydro-meteorological estimation of probable maximum precipitation under varying scenarios in Sri Lanka. *International Journal of Climatology*, 31(5), 668-676. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.2096>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present [Accessed on 30-Oct-2024]. <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
- Hershfield, D. M. (1965). Method for Estimating Probable Maximum Rainfall. *Journal - American Water Works Association*, 57, 965-972. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1965.tb01486.x>
- Hiraga, Y., & Meza, J. (2025). Extreme precipitation modeling and Probable Maximum Precipitation (PMP) estimation in Chile. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102274>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC Sixth Assessment Report Working Group II*. [https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf)
- Jiao, D., Xu, N., Yang, F., & Xu, K. (2021). Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Scientific Reports*, 11(1), 17957. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97433-8>
- Kao, S.-C., DeNeale, S. T., & Watson, D. B. (2019). Hurricane Harvey Highlights: Need to Assess the Adequacy of Probable Maximum Precipitation Estimation Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(4), 05019005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001768](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001768)
- Lagos-Zúñiga, M. A., & Vargas, X. (2014). PMP and PMF estimations in sparsely-gauged Andean basins and climate change projections [doi: 10.1080/02626667.2013.877588]. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 2027-2042. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.877588>
- Lavers, D. A., Simmons, A., Vamborg, F., & Rodwell, M. J. (2022). An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748), 3152-3165. <https://doi.org/10.1002/qj.4351>
- Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 225-234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1950 to present [Accessed on 30-Oct-2024]. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Navarro, S. (2023). *Aplicación del método hidrometeorológico para el cálculo de la precipitación máxima probable (PMP) en la cuenca del río Maipo* [Tesis de pregrado no publicada].
- Rouhani, H., & Leconte, R. (2016). A novel method to estimate the maximization ratio of the Probable Maximum Precipitation (PMP) using regional climate model output. *Water Resources Research*, 52, 7347-7365. <https://doi.org/10.1002/2016WR018603>
- Sarkar, S., & Maity, R. (2020). Increase in probable maximum precipitation in a changing climate over India. *Journal of Hydrology*, 585. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124806>
- Solot, S. B. (1939). Computation of Depth of Precipitable Water in a Column of Air. *Monthly Weather Review*, 100-103.
- Stowhas, L. (1983). Precipitaciones máximas diarias en Chile. *VI Congreso Nacional – Trabajo 27*. <https://www.sochid.cl/publicaciones-sochid/congresos-chilenos/congreso-vi/congreso-vi-trabajo-27/>

Tarek, M., Brissette, F. P., & Arsenault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2527-2020>

Vasquez, N., & Mendoza, P. A. (2024). Statistically downscaled and bias corrected CMIP6 models for Continental Chile under scenario SSP5-8.5. <https://doi.org/10.7910/DVN/O3YBOT>

Visser, J. B., Kim, S., Wasko, C., Nathan, R., & Sharma, A. (2022). The Impact of Climate Change on Operational Probable Maximum Precipitation Estimates. *Water Resources Research*, 58(11), e2022WR032247. <https://doi.org/10.1029/2022WR032247>

World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)* [Third edition]. World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/35708>

## ANEXO A

Las Tablas 4 y 5 presenta el detalle de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

**Tabla 4:** Datos de las estaciones en la zona de estudio.

Estación	Código	Altura [m]	Latitud [°]	Longitud [°]	Cuenca
Resguardo Los Patos	05414004	1220	-32.4989	-70.5789	Rio Aconcagua
Rio Putaendo En Resguardo Los Patos	05414001	1218	-32.5017	-70.5811	Rio Aconcagua
El Tartaro	05414005	950	-32.5669	-70.7	Rio Aconcagua
El Cobre	05424005	280	-32.6531	-71.1964	Rio Aconcagua
Jahuel	05415004	1020	-32.6836	-70.6	Rio Aconcagua
Catemu	05421005	440	-32.7344	-70.9342	Rio Aconcagua
San Felipe	05410008	640	-32.7472	-70.7247	Rio Aconcagua
Rio Aconcagua En San Felipe	05410005	650	-32.7572	-70.7367	Rio Aconcagua
Lo Rojas	05425003	190	-32.8119	-71.2653	Rio Aconcagua
Los Andes	05410007	820	-32.8336	-70.6	Rio Aconcagua
Rio Aconcagua En Romeral	05423003	365	-32.8403	-71.0256	Rio Aconcagua
Rio Aconcagua En Chacabuquito	05410002	950	-32.8503	-70.5094	Rio Aconcagua
Estero Rabuco	05423013	300	-32.8506	-71.1167	Rio Aconcagua
Vilcuya	05410006	1100	-32.8603	-70.4719	Rio Aconcagua
Quillota	05426004	130	-32.8958	-71.2092	Rio Aconcagua
Riecillos	05403006	1290	-32.9228	-70.3553	Rio Aconcagua
Las Chilcas	05422002	850	-32.9319	-70.8178	Rio Aconcagua
Los Aromos	05427007	100	-32.9578	-71.345	Rio Aconcagua
Quebrada Alvarado	05427008	290	-33.0506	-71.1	Rio Aconcagua
Lliu-Lliu Embalse	05427006	260	-33.0986	-71.2144	Rio Aconcagua
Fundo Las Bateas	05733010	810	-32.9472	-70.8064	Rio Maipo
Rincon De Los Valles	05733006	955	-32.9475	-70.7536	Rio Maipo
Caleu	05733007	1120	-33.0053	-70.9933	Rio Maipo
Rungue Embalse	05733008	700	-33.0194	-70.9081	Rio Maipo
Huechun Andina	05732002	590	-33.0758	-70.7686	Rio Maipo
Huechun Embalse	05732001	556	-33.0856	-70.8017	Rio Maipo
Til-Til	05733009	580	-33.0869	-70.9278	Rio Maipo
Colliguay	05741002	490	-33.1686	-71.1467	Rio Maipo
La Dehesa	05723001	920	-33.3292	-70.5286	Rio Maipo
Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	05721001	1350	-33.3414	-70.3636	Rio Maipo
La Ermita Central En Bocatoma	05720003	1350	-33.3414	-70.3636	Rio Maipo
Rio Mapocho En Los Almendros	05722002	966	-33.3703	-70.4508	Rio Maipo
Rio Molina Antes Junta San Francisco	05720001	1158	-33.3733	-70.3961	Rio Maipo
Cerro Calan	05730012	848	-33.395	-70.5367	Rio Maipo
Quebrada Ramon	05730014	730	-33.4328	-70.5344	Rio Maipo
Los Panguiles	05744002	190	-33.4386	-71.0256	Rio Maipo
Terraza Oficinas Centrales Dga	05730016	560	-33.4486	-70.6444	Rio Maipo
Ibacache Alto	05744003	169	-33.4797	-71.2811	Rio Maipo
Rio Mapocho Rinconada De Maipu	05737002	440	-33.4961	-70.8167	Rio Maipo
Antupiren	05730013	904	-33.4964	-70.5164	Rio Maipo
Quebrada De Macul	05730039	950	-33.5017	-70.5144	Rio Maipo
Maitenes Bocatoma	05707003	1143	-33.5311	-70.2617	Rio Maipo
Fundo Marruecos	05737008	430	-33.5503	-70.8167	Rio Maipo
Mallarauco	05745001	176	-33.5697	-71.1061	Rio Maipo
La Obra Recinto Emos	05710007	796	-33.5914	-70.4853	Rio Maipo
Cerrillos De Leyda	05748003	182	-33.6344	-71.5106	Rio Maipo
San Jose De Maipo Reten	05704006	943	-33.6361	-70.3531	Rio Maipo
Estero Puangue En Ruta 78	05746001	93	-33.6614	-71.3372	Rio Maipo
Pirque	05711003	659	-33.6736	-70.5869	Rio Maipo

**Tabla 5:** Datos de las estaciones en la zona de estudio (continuación).

Estación	Código	Altura [m]	Latitud [°]	Longitud [°]	Cuenca
El Yeso Embalse	05703008	2475	-33.6767	-70.0886	Rio Maipo
Melipilla	05740005	168	-33.6803	-71.1997	Rio Maipo
El Vergel	05717008	340	-33.6958	-70.9236	Rio Maipo
San Alfonso	05704005	1040	-33.7067	-70.3342	Rio Maipo
Carmen De Las Rosas	05740004	165	-33.7597	-71.1514	Rio Maipo
San Gabriel	05704004	1266	-33.7825	-70.2394	Rio Maipo
Angostura En Valdivia De Paine	05716004	350	-33.8044	-70.8783	Rio Maipo
Laguna Aculeo	05716005	360	-33.8858	-70.8775	Rio Maipo
Los Guindos	05747001	125	-33.8908	-71.2408	Rio Maipo
Las Melosas	05701005	1527	-33.8994	-70.1981	Rio Maipo
Quinta Normal Santiago	330020	527	-33.445	-70.6828	Rio Maipo
Pudahuel Santiago	330021	482	-33.3919	-70.7944	Rio Maipo
Eulogio Sanchez Tobaraba Ad.	330019	650	-33.4544	-70.5478	Rio Maipo
Rapel	06056003	16	-33.9458	-71.7336	Rio Rapel
Villa Alhue	06040001	197	-34.035	-71.0944	Rio Rapel
Graneros	06011003	500	-34.0556	-70.7083	Rio Rapel
Barrera Loncha	06042004	144	-34.0833	-71.1886	Rio Rapel
Litueche	06055003	250	-34.1206	-71.7258	Rio Rapel
Rancagua (Cachapoal - Dcp)	06010015	515	-34.1908	-70.7508	Rio Rapel
Cocalan	06044001	120	-34.2033	-71.2764	Rio Rapel
Canal Sauzal En Puente Termas	06008009	750	-34.2403	-70.5506	Rio Rapel
Rio Pangal En Pangal	06006001	1500	-34.2467	-70.3281	Rio Rapel
Sauzal	06010016	700	-34.2583	-70.6153	Rio Rapel
Rio Cachapoal En Puente Arqueado (Ca)	06019003	115	-34.2731	-71.3717	Rio Rapel
Pichidegua	06019005	110	-34.2872	-71.4058	Rio Rapel
Coltauco	06012003	253	-34.2875	-71.08	Rio Rapel
Rio Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo Junta Cortaderal	06003001	1127	-34.3464	-70.3764	Rio Rapel
Rengo	06015003	310	-34.4217	-70.8667	Rio Rapel
Popeta	06013005	480	-34.4369	-70.7794	Rio Rapel
Via Vieja	06018009	220	-34.4517	-71.0506	Rio Rapel
Central Las Nieves	06013006	700	-34.4922	-70.7094	Rio Rapel
Millahue	06018010	200	-34.5264	-71.2122	Rio Rapel
San Fernando	06016004	350	-34.5983	-70.9686	Rio Rapel
Rio Tinguiririca Bajo Los Briones	06028001	560	-34.7186	-70.8267	Rio Rapel
La Rufina	06027003	743	-34.7428	-70.7519	Rio Rapel
Convento Viejo	06034003	239	-34.7694	-71.1331	Rio Rapel
La Candelaria	06036001	213	-34.7808	-71.4142	Rio Rapel

## ANEXO B

La Tabla 6 indica el detalle de los 18 modelos climáticos utilizados para la proyección de la PMP en el escenario SSP5-8.5.

**Tabla 6:** Modelos CMIP6 seleccionados e institución correspondiente.

<b>GCM</b>	<b>Institución</b>
ACCESS-CM2 ACCESS-ESM1-5	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate Science, Australia.
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada.
CMCC-ESM2	Euro-Mediterranean Centre on Climate Change Coupled Climate Model, Italy.
E3SM-1-0	Lawrence Livermore National Laboratory, USA.
EC-Earth3 EC-Earth3-CC EC-Earth3-Veg EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth Consortium, Europe.
GFDL-CM4 GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA.
INM-CM4-8 INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russia.
KIOST-ESM	Korea Institute of Ocean Science and Technology Earth System Model and Its Simulation Characteristics, South Korea.
MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan.
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany.
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan.
TaiESM1	Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica, Nankang, Taipei, Taiwan.