



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Aplicación del método hidrometeorológico para mejorar las estimaciones de la precipitación máxima probable en la zona central de Chile utilizando datos de reanálisis

Memoria de Título presentada por

Jocelyn Viviana Lugo Soza

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Álvaro Ossandón
Joaquín Meza
Miguel Lagos-Zuñiga

NOVIEMBRE, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: *Aplicación del método hidrometeorológico para mejorar las estimaciones de la precipitación máxima probable en la zona central de Chile utilizando datos de reanálisis*

Nombre del candidato(a): *Jocelyn Lugo Soza*

Carrera / Grado: *Ingeniería Civil*

Campus: *Casa Central* **Departamento:** *Obras Civiles*

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, *Álvaro Ossandón Álvarez*, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24-12-025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _____

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

Aplicación del método hidrometeorológico para mejorar las estimaciones de la precipitación máxima probable en la zona central de Chile utilizando datos de reanálisis

AUTOR:

Jocelyn Viviana Lugo Soza

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Profesor Guía

Miembro 1 Comisión

Miembro 2 Comisión

Valparaíso, Chile, 17 de Octubre 2025

Aplicación del método hidrometeorológico para mejorar las estimaciones de la precipitación máxima probable en la zona central de Chile utilizando datos de reanálisis

Jocelyn Lugo, Álvaro Ossandón, Joaquín Meza, Miguel Lagos-Zuñiga

Universidad Técnica Federico Santa María

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.

ÍNDICE

	Page
1 INTRODUCCIÓN	6
2 OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
4 MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA	9
4.1 Área de estudio	9
4.2 Bases de datos	10
4.2.1 Registros históricos	10
4.2.2 CR2MET	11
4.2.3 Reanálisis ERA5	11
4.2.4 Modelos climáticos	12
4.3 Validación de datos	13
4.4 PMP	14
4.5 Cambio climático	18
5 RESULTADOS	19
5.1 Validación de datos	19
5.2 Maximización de humedad	24
5.3 Maximización de viento	26
5.4 Método estadístico	29
5.5 Modelos climáticos	32
6 DISCUSIÓN	33
7 CONCLUSIÓN	37

ÍNDICE DE FIGURAS

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.	10
2	<i>Comparación entre la precipitación máxima anual en Quinta Normal y la celda correspondiente en ERA5-Land (a) y su sesgo (b).</i>	20
3	<i>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 (cian).</i>	21
4	<i>Precipitaciones máximas en ERA5-Land. De izquierda a derecha: 24, 48 y 72 horas.</i>	21
5	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Quinta Normal.</i>	22
6	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Quinta Normal y ERA5-Land.</i>	22
7	<i>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.</i>	23
8	<i>Correlación grillada a nivel diario entre los productos ERA5-Land y CR2MET.</i> . . .	24
9	<i>Variación en los resultados de PMP y factor de maximización de humedad dependiendo del filtro utilizado para las tormentas.</i>	25
10	<i>Curvas PDA para la PMP por maximización de humedad para 24, 48 y 72 horas en las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c).</i>	26
11	<i>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 cian.</i>	27
12	<i>Valores máximos del coeficiente de maximización de viento para la zona de estudio. Se destacan en color las cuencas analizadas: Aconcagua en rojo, Maipo en azul y Rapel en cian.</i>	28
13	<i>Curvas PDA para la PMP por maximización de humedad y viento para 24, 48 y 72 horas en las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c).</i>	29
14	<i>Estadístico K_m obtenido para cada estación a nivel nacional (azul) y dentro de la zona de estudio (naranja). Las curvas representan las envolventes para el valor K para el cálculo de la PMP por métodos estadísticos.</i>	30
15	<i>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 Stöwhas en la zona.</i>	31
16	<i>Borplot para los rangos de variación en la PMP proyectadas por los modelos CMIP6.</i>	32
17	<i>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.</i> . .	33
18	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Quinta Normal y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	42
19	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Quinta Normal.</i>	43
20	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Quinta Normal y ERA5-Land.</i>	43

21	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Quinta Normal.</i>	44
22	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Rapel y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	45
23	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Rapel.</i>	45
24	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Rapel y ERA5-Land.</i>	46
25	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Rapel.</i>	46
26	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Riecillos y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	47
27	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Riecillos.</i>	47
28	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Riecillos y ERA5-Land.</i>	48
29	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Riecillos.</i>	48
30	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en La Rufina y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	49
31	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación La Rufina.</i>	49
32	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación La Rufina y ERA5-Land.</i>	50
33	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación La Rufina.</i>	50
34	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Cerrillos de Leyda y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	51
35	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Cerrillos de Leyda.</i>	51
36	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Cerrillos de Leyda y ERA5-Land.</i>	52
37	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Cerrillos de Leyda.</i>	52
38	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Carmen de las Rosas y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	53
39	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Carmen de las Rosas.</i>	53
40	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Carmen de las Rosas y ERA5-Land.</i>	54
41	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Carmen de las Rosas.</i>	54
42	<i>Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Resguardo Los Patos y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).</i>	55
43	<i>Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Resguardo Los Patos.</i>	55

44	<i>Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Resguardo Los Patos y ERA5-Land.</i>	56
45	<i>Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Resguardo Los Patos.</i>	56

ÍNDICE DE TABLAS

1	Detalle de las estaciones a utilizar.	11
2	Modelos CMIP6 seleccionados e institución correspondiente.	13
3	PMP por maximización de humedad (valores en [mm]).	25
4	PMP por maximización de humedad y viento (valores en [mm]).	28
5	PMP estadísticas de 24 horas para las cuencas en estudio (Valores en [mm]).	31
6	PMP estadística a nivel de cuenca obtenida con el método de Stöwhas (valores en [mm]).	31
7	Comparación de métodos para la cuenca Aconcagua (valores en [mm]).	34
8	Comparación de métodos para la cuenca Maipo (valores en [mm]).	34
9	Comparación de métodos para la cuenca Rapel (valores en [mm]).	34

1. INTRODUCCIÓN

Los eventos climáticos extremos se caracterizan por valores excepcionalmente altos de ciertas variables meteorológicas, como lo pueden ser la temperatura, velocidad del viento, precipitación, entre otros. Específicamente, la precipitación extrema representa uno de los peligros más evidentes sobre la población debido a los graves daños que pueden provocar las crecidas, inundaciones, flujos de detritos u otros fenómenos relacionados. De hecho, se estima que a nivel global el 44 % de los desastres ocurridos desde 1970 están directamente relacionado con inundaciones (IPCC, 2022). Por esta razón, el diseño de obras hidráulicas, sobre todo el de aquellas obras de infraestructura críticas como presas, defensas fluviales u obras de canalización en zonas densamente pobladas, debe realizarse considerando la ocurrencia de este tipo de eventos, con caudales de diseño obtenidos para la precipitación más alta esperada.

El concepto de precipitación máxima probable (PMP), definida como la mayor profundidad de agua que puede precipitar sobre un área (cuenca) durante una tormenta dada, en cierta época del año (WMO, 2009); es la variable utilizada para determinar la crecida de diseño y el subsecuente diseño hidráulico de este tipo de estructuras. Si bien este valor indica el máximo teórico que puede alcanzar la precipitación, debido tanto a la complejidad de los fenómenos atmosféricos como a las limitaciones en la cantidad y calidad de los registros necesarios para su cálculo, cualquier estimación obtenida de este parámetro debe asumirse como una aproximación de la PMP, e interpretarse como una precipitación con una muy baja probabilidad de excedencia (WMO, 2009; Salas et al., 2020).

La PMP ha sido usada ampliamente como un parámetro conservador para el diseño de infraestructura crítica, sin embargo, en tiempos recientes se ha hecho evidente la necesidad de actualizar las estimaciones de este parámetro a causa del cambio en las condiciones climáticas globales. El aumento en la temperatura media de la atmósfera debido al cambio climático provoca un aumento en la capacidad de transporte de humedad del aire (IPCC, 2021), intensificando los eventos de precipitación extremos y la variabilidad climática debido a efectos cíclicos. De hecho, se ha registrado un aumento en las precipitaciones observadas respecto a mediciones históricas (Guerreiro et al., 2018; Martínez-Villalobos y Neelin, 2018), e incluso Kao et al. (2019), observaron que tormentas que igualan e incluso superan las estimaciones de PMP utilizadas en diseño pueden ser posibles, resaltando la necesidad de mejorar continuamente las estimaciones de este parámetro.

Estos hechos hacen evidente la necesidad de actualizar las estimaciones de este parámetro para mantener un margen de seguridad en el diseño de infraestructura crítica. Así mismo, resulta relevante estimar la posible variación de la PMP en el futuro, considerando condiciones climáticas proyectadas. Este último punto es especialmente importante para obras diseñadas para una vida útil larga (50 o más años), debido a la posibilidad de cambios considerables en el clima a nivel global (IPCC, 2021; IPCC, 2022).

La siguiente sección describe los métodos disponibles para la determinación de la precipitación máxima probable, así como avances y trabajos recientes para la determinación de este parámetro en diferentes territorios, con un énfasis en las herramientas y métodos utilizados. Se analiza también el trabajo realizado a nivel nacional para la estimación de PMP. Luego, se define la zona de estudio y se entregan detalles de los datos utilizados para el trabajo y sus fuentes. De la misma forma, se explica en profundidad la metodología utilizada para las estimaciones y análisis realizados, incluyendo los criterios considerados para estos.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, comparando los valores obtenidos de PMP por

distintos métodos y en respecto a otros trabajos similares. Se incluye una breve discusión sobre la validez de los resultados y la eficacia del método propuesto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo general de la investigación corresponde a estudiar el efecto del cambio climático sobre los patrones de precipitación de la zona central de Chile, actualizando las estimaciones de la precipitación máxima probable a través de métodos hidrometeorológicos y determinando su variación mediante simulaciones climáticas con datos de reanálisis.

2.2. Objetivos específicos

Para desarrollar el trabajo, es necesario el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Validar el uso de productos de reanálisis para cuencas de la zona central de Chile, comparando estas bases de datos con los registros históricos en la zona.
- Implementar métodos hidrometeorológicos para estimar la PMP en cuencas de la zona central de Chile utilizando productos de reanálisis y contrastando sus resultados a los del método estadístico tradicional.
- Obtener estimaciones futuras de PMP utilizando simulaciones climáticas de distintos modelos y analizar la variación de este parámetro respecto a los valores actuales.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las estimaciones de PMP se dividen principalmente en 2 grupos de métodos: hidrometeorológicos y estadísticos (WMO, 2009). Los métodos hidrometeorológicos se basan en el uso de leyes físicas y meteorológicas para obtener la mayor cantidad de precipitación posible sobre una cuenca maximizando parámetros como la humedad, velocidad del viento y la ubicación de las tormentas. Una de las desventajas de estos métodos es la gran cantidad de información que requieren, específicamente mediciones de temperatura, velocidad de viento y humedad relativa en altura, que pocas veces se encuentran disponibles; si bien es posible obtener estimaciones de estos valores con mediciones en superficie, esto introduce más incertidumbre en los resultados.

Por otro lado, el método estadístico (Hershfield, 1965) requiere únicamente de un cierto número de años de registros de precipitación en terreno. Su aplicación es similar al análisis de frecuencia tradicional, pero se diferencia en que se utilizan los registros de varias estaciones a la vez, generando envolventes que permiten obtener valores de PMP solo con el promedio de precipitación máxima anual de cada estación. Si bien este método resulta conveniente gracias a su facilidad de aplicación, las estimaciones realizadas de esta forma pueden verse afectadas debido al sesgo provocado por fenómenos de variabilidad climática, además de que puede no reflejar adecuadamente el efecto de tendencias de cambio climático en los registros de precipitación.

Los modelos climáticos globales o regionales (GCM/RCM), así como los productos de reanálisis, pueden ser una alternativa viable para obtener las variables requeridas para la estimación de PMP, especialmente en el caso de los métodos hidrometeorológicos, que requieren una gran cantidad de

mediciones en altura para obtener mejores resultados. El uso de modelos climáticos, especialmente modelos regionales calibrados, ha encontrado resultados satisfactorios para la estimación de PMP en cuencas con registros escasos (Beauchamp et al., 2013; Rouhani y Leconte, 2016), además de hacer sencilla la incorporación de cambio climático utilizando proyecciones climáticas.

Los estudios recientes apuntan a mejorar las estimaciones realizadas con estos métodos (Na y Yoo, 2019; Zhou et al., 2020; Sarkar y Maity, 2020), o a incluir el efecto del cambio climático para actualizar los valores de PMP en el presente, determinando el cambio de este parámetro ante posibles condiciones climáticas futuras. A este último enfoque se le conoce como métodos híbridos (Chen y Hossain, 2019), y consisten en utilizar métodos de estimación tradicionales utilizando información de modelos climáticos con simulaciones climáticas en el futuro para la estimación de PMP.

Visser et al. (2022) realizaron estimaciones de la evolución de la PMP en cuencas de Australia ante el aumento del contenido de humedad de la atmósfera por métodos hidrometeorológicos utilizando registros históricos, información de reanálisis y simulaciones climáticas regionales ante cuatro escenarios basados en las sendas socioeconómicas compartidas (SSP) definidas por el Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP). Entre sus resultados, estiman un cambio de hasta 5°C en la temperatura de rocío, traducido en un aumento promedio del 33 % en la PMP, con aumentos máximos de hasta 55 % en algunas zonas del país.

En la práctica nacional, las estimaciones de PMP para obras hidráulicas de gran envergadura se suelen obtener a través del método estadístico. La aplicación de este método en Chile fue estudiada por Stowhas (1983), quien desarrolló envolventes para el territorio nacional utilizando información histórica de 650 estaciones. En su trabajo, concluye que el método estadístico obtiene resultados comparables a los del método hidrometeorológico, con la ventaja de ser mucho más fácil de aplicar. Además, entrega recomendaciones y modificaciones para ajustar las suposiciones de Hershfield a la realidad nacional. Como fue mencionado anteriormente, los resultados obtenidos puramente en base a información histórica de eventos extremos pueden verse sesgados por ciclos de variabilidad climática generada por eventos cíclicos (e. g. ENOS), además de presentar dificultades para reflejar las tendencias de cambio climático.

El método hidrometeorológico no es utilizado de forma habitual para diseño en Chile, sin embargo, se ha estudiado su uso en algunas oportunidades. Lagos-Zúñiga y Vargas (2014) analizaron los cambios proyectados en la PMP y su subsecuente crecida máxima probable (CMP) en la cuenca del embalse Puclaro, aplicando métodos estadísticos e hidrometeorológicos basados en información proveniente de un modelo climático regional. Sus resultados indican aumentos significativos en ambos parámetros bajo el escenario climático más desfavorable, llegando a comprometer la seguridad del diseño hidrológico del embalse. De esta forma, recomendaron considerar el efecto del cambio climático y otras fuentes de incertidumbre en los diseño de obras hidráulicas mayores. Por otro lado, una investigación reciente (Navarro, 2023) aplicó el método local de maximización de humedad sobre la cuenca del río Maipo utilizando información grillada del producto CR2MET según la metodología propuesta por Beauchamp et al. (2013). Si bien los resultados obtenidos no fueron completamente satisfactorios, ciertos puntos de la investigación indican que los métodos hidrometeorológicos podrían utilizarse para determinar PMP de magnitud similar a las obtenidas por el método estadístico. Si bien el uso de CR2MET permite acceder a los datos necesarios para implementar el método hidrometeorológico, los productos grillados de precipitación interpolada pueden ver afectada su representatividad en zonas con baja densidad de estaciones de registro. Finalmente, es necesario mencionar el trabajo realizado por Hiraga y Meza (2025), quienes utilizaron un enfoque basado

en simulaciones numéricas de eventos extremos sobre una cuenca, estimando la PMP al aumentar la humedad relativa de las tormentas simuladas y cambiar su ubicación espacial para obtener la mayor precipitación posible. Este trabajo expande la metodología propuesta anteriormente por los autores (Hiraga et al., 2025). Si bien este método es ideal para territorios con geografías complejas y baja cantidad de observaciones, su aplicación requiere de gran capacidad computacional para la implementación de un modelo numérico complejo y su escalamiento estadístico. No obstante, entrega estimaciones robustas y puede ser óptimo en regiones en las que no se cuentan con observaciones suficientes para justificar el uso de otra estimación.

Debido a los grandes riesgos que supone un diseño insuficiente en una obra de infraestructura hidráulica crítica, y considerando las condiciones climáticas actuales, además de las proyecciones a futuro, que indican un aumento en la capacidad de transporte de humedad del aire, así como también un aumento en la frecuencia de eventos de precipitación extrema a nivel global (IPCC, 2021), resulta necesario obtener estimaciones actualizadas de PMP a nivel nacional, además de proyectar el posible cambio en este parámetro a futuro.

4. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

4.1. 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 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, los principales cauces de las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins, respectivamente. 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.

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 montaña 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 [km²] y 13,000 [km²], respectivamente), la cuenca del río Aconcagua tiene un área considerablemente menor (7,300 [km²]). 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.

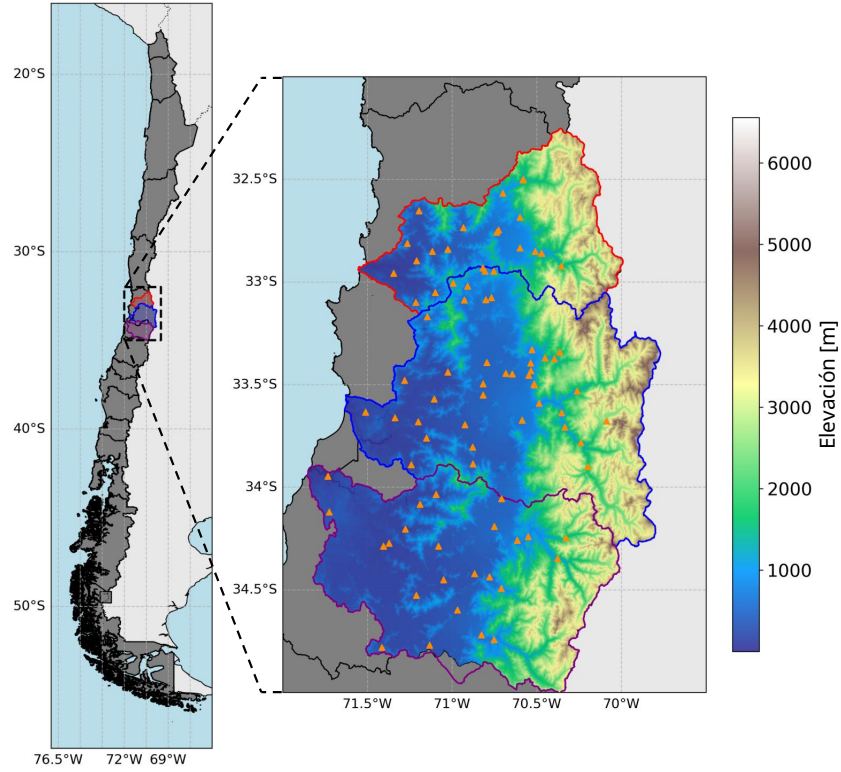


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio. La región segmentada indica la extensión de los datos grillados utilizados. Se destacan además las cuencas de los ríos Aconcagua (rojo), Maipo (azul) y Rapel (púrpura), así como las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de ellas (marcadores naranjos) y la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

4.2. Bases de datos

4.2.1. Registros históricos

Se utilizan las mediciones realizadas en terreno en las distintas estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica Nacional (DMC). La información se recupera desde la página web del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), obteniendo registros diarios de precipitación entre 1900 y 2020 para más de 1000 estaciones meteorológicas.

Existen 92 estaciones con 10 o más años de registros en las cuencas correspondientes a la zona de estudio, las que son utilizadas como referencia de observación para la validación de los datos de reanálisis. La Tabla 1 muestra las siete estaciones con mayor número de años de registros.

Tabla 1: Detalle de las estaciones a utilizar.

Estación	Código	Altura [m]	Latitud [°]	Longitud [°]	Observaciones	Años de Registro
La Rufina	6027003	743	-34.7428	-70.7519	32742	1929 - 2019
Riecillos	5403006	1290	-32.9228	-70.3553	32343	1919 - 2019
Cerrillos De Leyda	5748003	182	-33.6344	-71.5106	31185	1932 - 2019
Carmen De Las Rosas	5740004	165	-33.7597	-71.1514	30809	1930 - 2019
Rapel	6056003	16	-33.9458	-71.7336	28444	1940 - 2019
Resguardo Los Patos	5414004	1220	-32.4989	-70.5789	28317	1940 - 2019
Quinta Normal Santiago	330020	527	-33.445	-70.6828	25653	1950 - 2020

4.2.2. CR2MET

Adicionalmente, se considera el uso del producto de precipitación grillado CR2MET (Boisier, 2023), que es considerado como la mejor aproximación del clima histórico de Chile en zonas sin registros. CR2MET es un producto de precipitación interpolado que utiliza relaciones estadísticas de productos históricos, observaciones satelitales y datos de reanálisis para generar datos grillado diarios a una escala de 0.05°S para temperatura y precipitación.

4.2.3. Reanálisis ERA5

ERA5 es la quinta generación de reanálisis climático desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones a Plazo Medio (ECMWF). Las distintas bases de datos que lo conforman contienen información a nivel horario desde 1940 o 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 en estudio.

ERA5 en niveles de presión contiene información de variables atmosféricas a una resolución de 0.25° , o aproximadamente 30 [km], en 37 niveles de presión, desde 1000 [hPa] hasta 1 [hPa] (aproximadamente 80 [km] de elevación). Desde este conjunto de datos se obtienen los valores de:

- Temperatura
- Humedad específica
- Humedad relativa
- Velocidad del viento en dirección $\mathbf{u}$
- Velocidad del viento en dirección $\mathbf{v}$

Siguiendo las recomendaciones de la WMO (2009), se define el nivel 250 [hPa] como límite superior de la tormenta. Esto implica considerar que la humedad sobre este nivel es despreciable.

Por otro lado, ERA5-Land es un producto con una resolución de 0.1° (aproximadamente 11 [km]), que contiene información de variables en superficie. Desde este conjunto de datos se obtienen mediciones de precipitación horaria para la misma región de estudio. Para ambas bases de datos, se considera el uso de información desde 1979 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).

4.2.4. Modelos climáticos

Para analizar el efecto del cambio climático se hace uso de los conjuntos de datos desarrollados por Vasquez y Mendoza (2024) en base a los modelos climáticos del proyecto CMIP6 del World Climate Research Project (Eyring et al., 2016). Estos conjuntos contienen información de temperatura y precipitación en el rango 1950-2099, con los valores posteriores a 2015 simulados considerando el escenario de emisiones SSP5-8.5.

Esta base de datos incluye 29 modelos climáticos globales y un modelo climático regional, escalados a una grilla de 0.05° (aproximadamente 5 [km]) y corregidos por sesgo utilizando el método *multi-variate quantile-mapping bias correction*, MBCn (Cannon, 2018), que ha demostrado correlacionar temperatura y precipitación adecuadamente, incluso en zonas áridas o con altas cantidades de precipitación sólida (Guo et al., 2020; Meyer et al., 2019). Para la investigación se utilizan 18 de estos modelos en base a la disponibilidad de las variables crudas necesarias para la implementación. La Tabla 2 indica los modelos utilizados y la institución responsable de su producción.

Tabla 2: Modelos CMIP6 seleccionados e institución correspondiente.

GCM	Institución
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.

4.3. 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 esto, se evaluará el desempeño del producto de precipitación ERA5-Land en comparación a los registros de precipitación observada en terreno en la zona de estudio y respecto al producto de precipitación grillada CR2MET.

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. Luego, en vista de que el cálculo de PMP por métodos hidrometeorológicos se relaciona estrechamente con las tormentas de mayor intensidad, se comparan las distribuciones de probabilidad de las series de máximos anuales en cada estación, comparando para cada serie el mejor ajuste entre las distribuciones de probabilidad típicamente utilizadas para esto (Gumbel, Pearson, generalizada de valor extremos, log normal, normal). La comparación se hace gráficamente

y en función del cambio en los valores con periodo de retorno de 1,000 y 10,000 años.

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). Por último, se obtiene la correlación grillada entre las series de precipitación acumulada diaria de ERA5-Land y CR2MET, para observar el ajuste en las zonas sin estaciones disponibles.

Si bien estas comparaciones se realizan para todas las estaciones, solo se incluyen los resultados de la estación Quinta Normal o para el total de estaciones en el cuerpo de este informe. Se escoge esta estación debido a que es la que tiene mayor número de años de registro, dejando los resultados del resto de las estaciones indicadas en la Tabla ?? en el anexo.

4.4. PMP

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 intensas. En particular, se considera la aplicación de los métodos de maximización local de humedad y de maximización de viento.

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, esto es, que convierten la mayor cantidad posible de humedad atmosférica en precipitación líquida. Se consideran para el estudio solo aquellas tormentas que en algún punto de la zona de estudio superen el valor asociado al percentil 99.9 % de la precipitación nula en cada celda. La aplicación de este filtro es crítica para la implementación automatizada del método propuesto, y su definición se basa en dos criterios: en primer lugar, se escoge para considerar tormentas similares en intensidad a los máximos registrados en las estaciones de cada cuenca, y en segundo lugar, para limitar los factores de maximización de humedad, ya que las tormentas de menor intensidad usualmente ocurren junto a niveles relativamente bajos de humedad atmosférica, conduciendo a factores de maximización inverosímiles.

La maximización de humedad se basa en el principio de que la precipitación está limitada por la cantidad de humedad disponible en la atmósfera. Para esto 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 : Agua precipitable, $[kg/m^2]$.
- pw_{sat} : Agua precipitable en condición de atmósfera saturada, $[kg/m^2]$.
- ρ_w : Densidad del agua, $1000 [kg/m^3]$.
- p : Presión atmosférica, $[HPa]$.
- q : Humedad específica, $[-]$.
- RH : Humedad relativa, $[-]$.

Los datos grillados de ERA5 en niveles de presión pueden utilizarse para realizar una estimación de esta variable por medio de una integración numérica aproximada. El límite superior de presión (altura máxima) considerado para la descarga, esto es, 250 [hPa], se escoge según la recomendación de la WMO respecto a esta ecuación.

La maximización de humedad se basa en amplificar la precipitación durante una tormenta, suponiendo la ocurrencia de la mayor cantidad de agua precipitable posible (pw_{max}). El valor máximo de agua precipitable se toma como el mínimo entre el valor de agua precipitable durante la tormenta de interés en condición de saturación (pw_{sat} , obtenida en la ecuación 2 al suponer la columna de agua saturada) y el valor de agua precipitable máxima estacional, pw_{horz} , definida como el valor de agua precipitable con periodo de retorno de 100 años para una ventana de 30 días centrada en el día de ocurrencia de la tormenta.

Así, la PMP dada por el método local se calcula seleccionando una tormenta de alta eficiencia de una cierta duración y aplicando un factor de maximización r a la precipitación acumulada. Este cálculo se puede expresar por la ecuación:

$$PMP_{humedad} = pr_{tormenta} \cdot r = pr_{tormenta} \cdot \frac{pw_{max}}{pw_{tormenta}} \quad (3)$$

Donde:

- $pr_{tormenta}$: Precipitación acumulada durante el evento, $[mm]$.
- pw_{max} : Agua precipitable máxima, obtenida como el valor mínimo entre pw_{sat} y pw_{horz} , $[kg/m^2]$.
- $pw_{tormenta}$: Agua precipitable durante el evento, $[kg/m^2]$.

Si bien la maximización de humedad suele ser suficiente en regiones donde predominan tormentas convectivas, en casos en los que el resultado obtenido no sea representativo o en zonas donde el efecto orográfico es importante, es recomendable aplicar maximización de viento (Fernando & Wickramasuriya, 2011; WMO, 2009). Este enfoque se basa en el concepto de eficiencia de precipitación, entendida como la capacidad de una tormenta para convertir el contenido de humedad atmosférica en precipitación líquida. Esta eficiencia se relaciona principalmente con el transporte de humedad hacia la tormenta debido al viento, especialmente desde zonas húmedas o en dirección de la elevación orográfica.

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 4 (Fernando & Wickramasuriya, 2011). 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 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, que es la zona de mayor entrada de humedad. Esto corresponde aproximadamente a la zona entre los niveles de presión 1,000 [HPa] y 850 [HPa].

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

Donde:

- wmf : Factor de maximización de viento, [-].
- W_{max} : Valor máximo de la velocidad media del viento, [m/s].
- $W_{tormenta}$: Velocidad media del viento durante la tormenta, [m/s].

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:

$$PMP_{viento} = pr_{tormenta} \cdot r \cdot wmf \quad (5)$$

Los valores de PMP obtenidos con esta ecuación 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 [km²].

En este punto es posible considerar dos enfoques: obtener un valor representativo a nivel de cuenca, esto es, un valor de PMP medio para la 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, R , 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 la ecuación anterior para la PMP (Ecuación 7). Esta expresión es útil para comparar los resultados de PMP hidrometeorológica a los de otros métodos que generan resultados a escala de cuenca.

$$PMP_{cuenca} = pr_{tormenta} \cdot r \cdot R \quad (7)$$

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 ordenando los valores de precipitación de menor a mayor y acumulando el área de las celdas dentro de la cuenca. De esta forma, el valor máximo de precipitación se asigna al área correspondiente a una celda, mientras que

el valor menor registrado se asigna al área total de la cuenca. Luego, las curvas profundidad-área de cada tormenta seleccionadas se maximizan considerando el valor más alto de los coeficientes de maximización obtenidos entre las celdas que superen el umbral dentro de la cuenca para la tormenta. Esto se puede expresar por medio de las ecuaciones:

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

$$PMP_{viento} = PA \cdot r \cdot wmf \quad (9)$$

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, es posible obtener la relación profundidad-área-duración de la PMP para una cuenca en particular. Este procedimiento genera información a nivel espacial de PMP que puede ser aprovechada, por ejemplo, para una primera aproximación en el diseño de proyectos importantes en subcuencas dentro de la zona de estudio.

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 los registros de varias estaciones sobre un área para obtener una envolvente para un estadístico K (Ecuación 10), el que luego es aplicado a la estación de interés para obtener la PMP a escala puntual.

$$K_m = \frac{X_t - \bar{X}_n}{S_n} \quad (10)$$

Donde:

- K_m : Valor del estadístico K en una estación determinada, [-].
- X_t : Máximo valor de precipitación en la serie, [mm].
- $\bar{X}_n$: Media de la serie de precipitación, [mm].
- S_n : Desviación estándar de la serie de precipitación, [mm].

La ventaja del método estadístico radica en que su aplicación solo requiere contar con series de precipitación para calcular los valores medios y la desviación estándar de la precipitación máxima anual. Luego, la PMP puntual para una estación particular se puede estimar con la ecuación:

$$PMP = \bar{X}_n + K \cdot S_n \quad (11)$$

La WMO, 2009 indica correcciones para evitar sesgos en el cálculo del estadístico K debido al largo de las series, valores extremos observados e intervalo de observación. Se utilizan las expresiones propuestas por Stowhas (2017) para aproximar estas correcciones en la implementación.

Adicionalmente, se considera el uso de los métodos estadísticos propuestos por Sarkar y Maity (2020) y por Stowhas (1983). El primero corresponde a un ajuste al método original de Hershfield para considerar un límite superior adicional dado por la ecuación:

$$K = \begin{cases} K_m & , \text{ si } 0 < \overline{X_N} \leq \overline{X_N^t} \\ K_m \cdot e^{\overline{X_N} - \overline{X_N^t}} & , \text{ si } \overline{X_N} > \overline{X_N^t} \end{cases} \quad (12)$$

Mientras que Stöwahas 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 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):

$$PMP_2 = \bar{X}_c \left(4 + 3.8 \cdot e^{-0.0069 \cdot \bar{X}_c^{1.141}} \right) \quad (13)$$

$$PMP_3 = \bar{X}_c \left(3.5 + 3.65 \cdot e^{-0.0076 \cdot \bar{X}_c^{1.102}} \right) \quad (14)$$

Para comparar estos valores puntuales de PMP estadística con los valores a nivel de cuenca obtenidos por los métodos hidrometeorológicos, los valores puntuales son convertidos a un valor medio de cuenca calculando un promedio ponderado por medio de polígonos de Thiessen. Luego, para obtener estimaciones para 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).

4.5. 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 y Mendoza (2024).

Debido a la disponibilidad de datos, se considera solamente el método de maximización de humedad para este caso. Su uso requiere estimar el agua precipitable con expresiones teóricas, para lo que se requiere, a lo menos, una estimación de la humedad atmosférica. 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.

Así, se aproxima el valor de la humedad relativa (RH) a escala diaria utilizando expresiones teóricas (Stöwahas, 2017) para la presión de vapor (e) y presión de vapor saturado (e_s), considerando la temperatura media dada por cada modelo:

$$e = \frac{qp}{0.622 + 0.37q} \quad (15)$$

$$e_s = 6.11 * \exp^{\frac{17.4 * T}{T + 239}} \quad (16)$$

$$RH = \frac{e}{e_s} * 100 \% \quad (17)$$

Al considerar como simplificación un valor constante para p igual a la presión atmosférica a nivel del mar, estos valores permiten utilizar una expresión empírica para estimar el punto de rocío (t_d) en función de la humedad relativa (Lawrence, 2005), que aproxima este valor con un error menor al 0.4 % en el rango de temperaturas usual para la región:

$$t_d = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{A_1 T}{B_1 + T} \right]}{A_1 - \ln \left(\frac{RH}{100} \right) - \frac{A_1 T}{B_1 + T}} \quad (18)$$

Los parámetros A_1 y B_1 corresponden a constantes con un valor igual a 17.625 y 243.04, respectivamente, mientras que T corresponde a la temperatura media, medida en Kelvin.

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 WMO (2009):

$$pw = 0.003296 \times t_d^3 + 0.010276 \times t_d^2 + 1.098213 \times t_d + 7.8003 \quad (19)$$

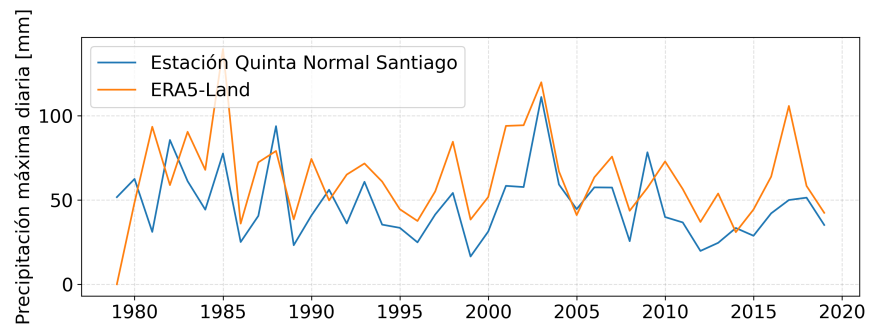
Los valores de PMP futuras se obtienen considerando el mismo procedimiento descrito para los datos grillados de ERA5, obteniendo estimaciones a nivel de cuenca y curvas PDA maximizadas.

5. RESULTADOS

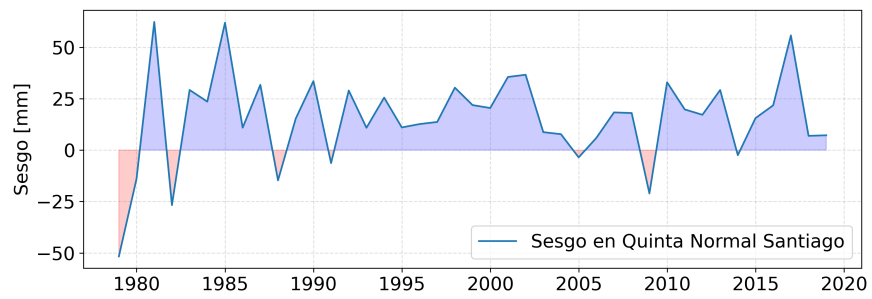
5.1. Validación de datos

En esta sección se presentan los resultados de los distintos análisis realizados para la evaluación del producto de reanálisis ERA5-Land respecto a los registros históricos de precipitación en la zona de estudio. Estos se muestran únicamente para una estación representativa de la cuenca del río Maipo (Quinta Normal) o para el total de estaciones analizadas, incluyendo algunos detalles para las estaciones con mayor cantidad de registros en la zona en el Anexo A.

El comportamiento de ERA5 respecto a las precipitaciones máximas anuales en la zona de estudio varía de forma importante. Al analizar, por ejemplo, la estación Quinta Normal en Santiago (Figura 2), los resultados indican que, a pesar de que se identifican los periodos áridos y húmedos correctamente, además de presentar máximos y mínimos similares, ERA5-Land sobreestima la precipitación en gran parte del registro, con un marcado sesgo húmedo. No obstante, al evaluar otras estaciones, este comportamiento varía de estación a estación. Para analizar este comportamiento, 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 3).



(a)



(b)

Figura 2: Comparación entre la precipitación máxima anual en Quinta Normal y la celda correspondiente en ERA5-Land (a) y su sesgo (b).

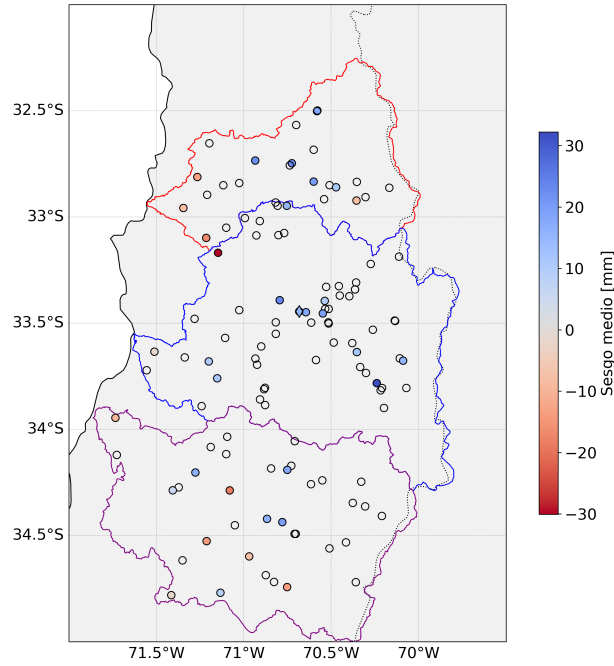


Figura 3: *Sesgo medio de los valores máximos anuales en ERA5-Land respecto a los registros históricos en las estaciones de las cuencas de los ríos Aconcagua (rojo), Maipo (azul) y Rapel (cian).*

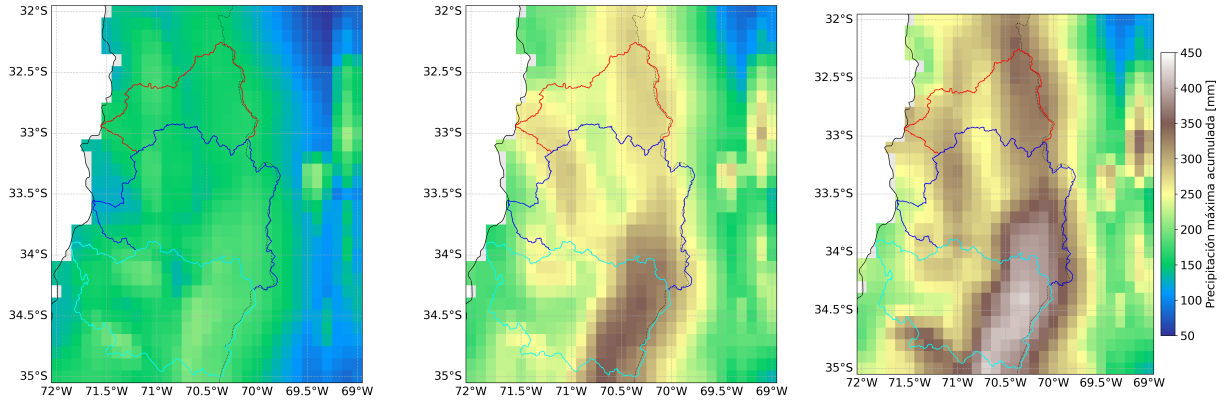


Figura 4: *Precipitaciones máximas en ERA5-Land. De izquierda a derecha: 24, 48 y 72 horas.*

El mapa de sesgo medio permite observar cómo este comportamiento varía dentro de las cuencas. Si bien no se observa un patrón específico para esto, es importante notar que el sesgo es cercano a cero en la zona este de la cuenca del río Rapel y al suroeste de la cuenca del río Maipo. Esto es importante ya que esa zona concentra los valores máximos de precipitación en los datos de ERA5-Land (Figura 4), que son relevantes en los cálculos de PMP.

La Figura 5 muestra las funciones de probabilidad acumulada resultantes del ajuste para la estación Quinta Normal e indica los valores asociados a algunos períodos de retorno como referencia para la comparación. Se puede apreciar que las distribuciones resultan similares, sobre todo para valores

con baja probabilidad de excedencia, sin embargo, nuevamente los valores de ERA5-Land superan a los registros, con aumentos de los períodos de retorno de alrededor del 30 %.

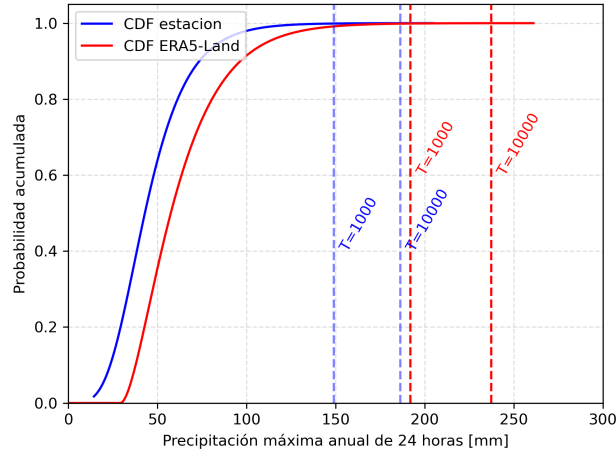


Figura 5: *Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Quinta Normal.*

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 6). Se puede observar que ERA5-Land indica veranos considerablemente 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.

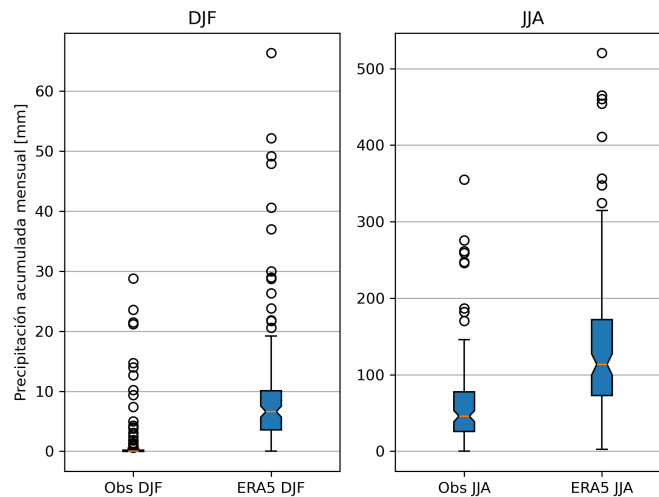


Figura 6: *Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Quinta Normal y ERA5-Land.*

Luego, se analiza la correlación entre las series de datos para los valores diarios y para los máximos

anuales (Figura 7). Para esto se obtiene la correlación de Pearson y la pendiente de Theil-Sen para las 92 estaciones dentro de la zona de estudio, tanto a nivel diario como para los máximos anuales. 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. 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.

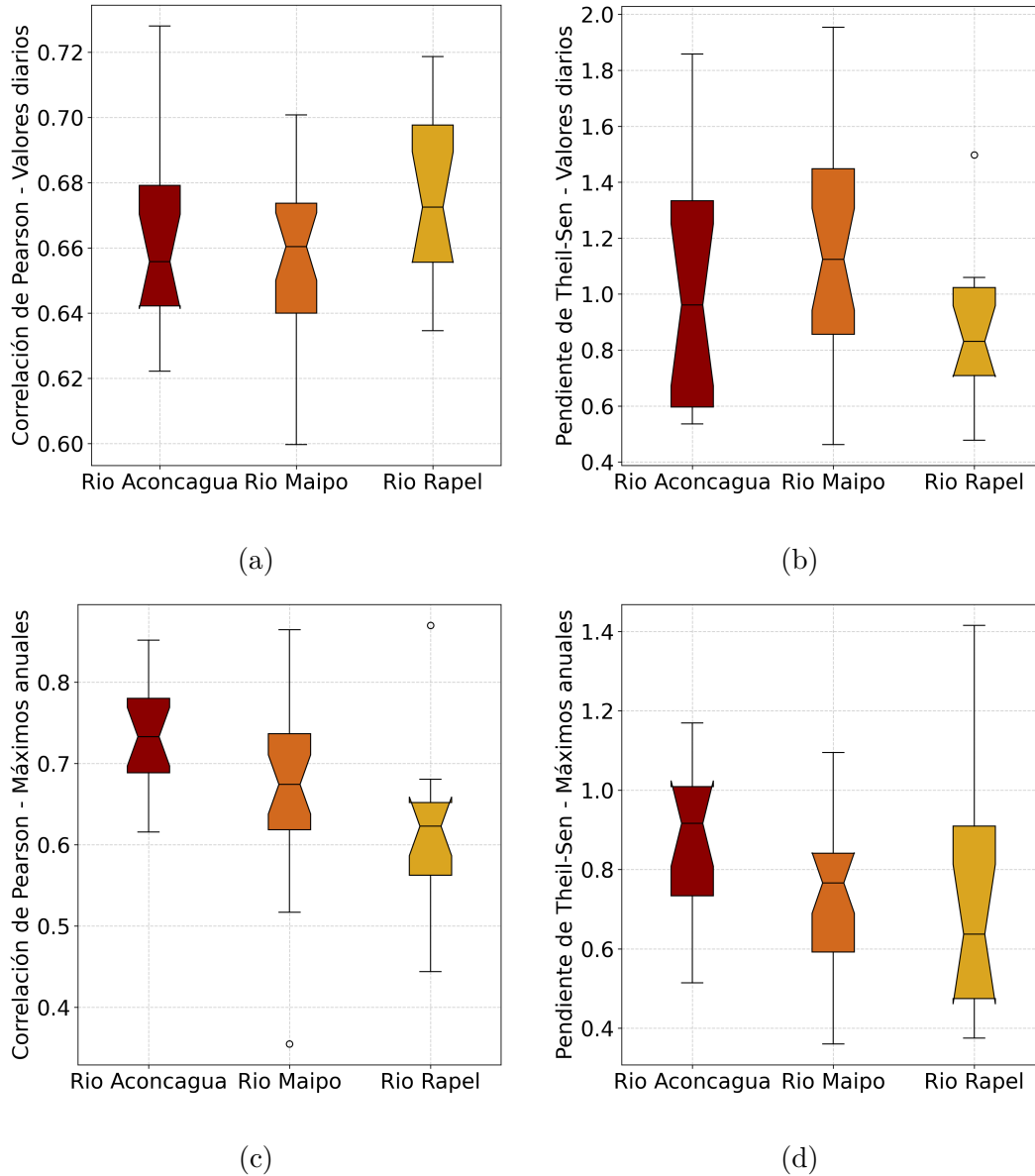


Figura 7: *Correlación entre datos de ERA5-Land y registros históricos. (a) y (b) presentan la relación para valores diarios, mientras que (c) y (d) presentan las relaciones para los máximos anuales.*

Finalmente, se presenta la correlación grillada entre los valores de precipitación diarios de ERA5-Land y CR2MET (Figura 8). Se observa que los valores de correlación en la zona de estudio son considerablemente altos (sobre 0.7), especialmente en la zona de la cordillera de Los Andes (incluyendo la zona de valores máximos mostrada anteriormente), con valores ligeramente menores cerca de la costa, pero fuera de las cuencas de interés.

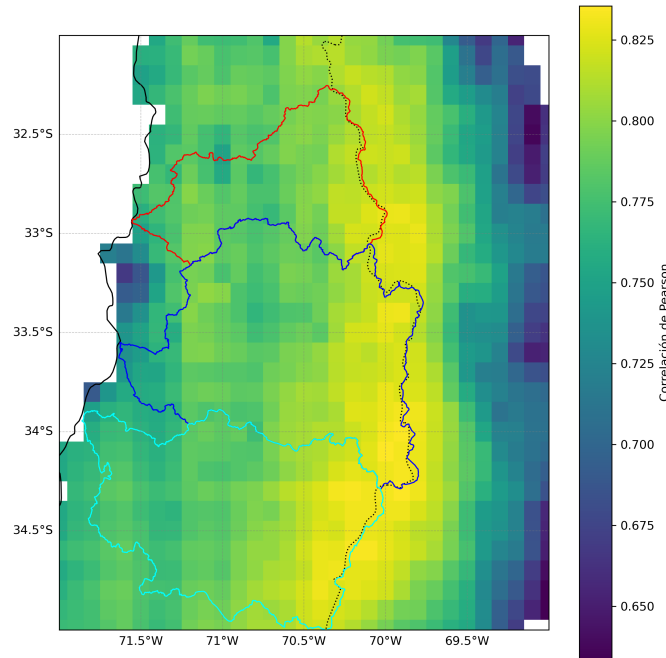


Figura 8: *Correlación grillada a nivel diario entre los productos ERA5-Land y CR2MET.*

5.2. Maximización de humedad

En primer lugar, se muestra la variación de los resultados de PMP por maximización de humedad y del factor de maximización de humedad al cambiar el umbral definido para seleccionar las mayores tormentas para su maximización (Figura 9). Se puede observar que los resultados pueden variar de forma importante dependiendo de esto, llegando a aumentar hasta cuatro veces al utilizar umbrales más bajos. El filtro escogido, que corresponde al percentil 99.9 % de la precipitación no nula se define considerando por un lado filtrar tormentas con precipitaciones máximas similares a los máximos registrados en las estaciones de las cuencas, y por otro lado para obtener factores de maximización razonables, esto es, en general, valores menores a 2. El filtro utilizado permite cumplir esto para todos los resultados a excepción de la tormenta de 72 horas en la cuenca del río Rapel, donde es necesario filtrar manualmente los valores de r (y las tormentas asociadas). De esta forma, el mayor valor para el factor de maximización utilizado corresponde a 1.7. Finalmente, el filtro aplicado logra seleccionar las 165, 104 y 87 mayores tormentas en ERA5-Land para las duraciones de 24, 48 y 72 horas, respectivamente.

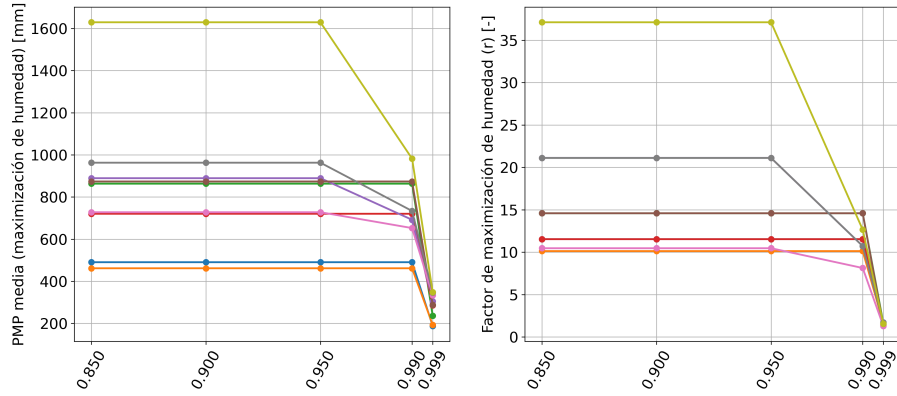


Figura 9: Variación en los resultados de PMP y factor de maximización de humedad dependiendo del filtro utilizado para las tormentas.

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 3.

Tabla 3: 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 generan las curvas PDA para representar la distribución espacial de las PMP obtenidas según los valores de precipitación de ERA5-Land. La Figura 10 presenta los resultados obtenidos para cada cuenca, suavizados con un ajuste exponencial. Nótese que este ajuste es el causante de la intersección de las curvas para la cuenca del río Aconcagua, las que en realidad son casi idénticas para áreas mayores a 1,000 [km²]. Se observa que los resultados a nivel de cuenca mostrados anteriormente corresponden, de forma aproximada, a los valores para el área total 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.

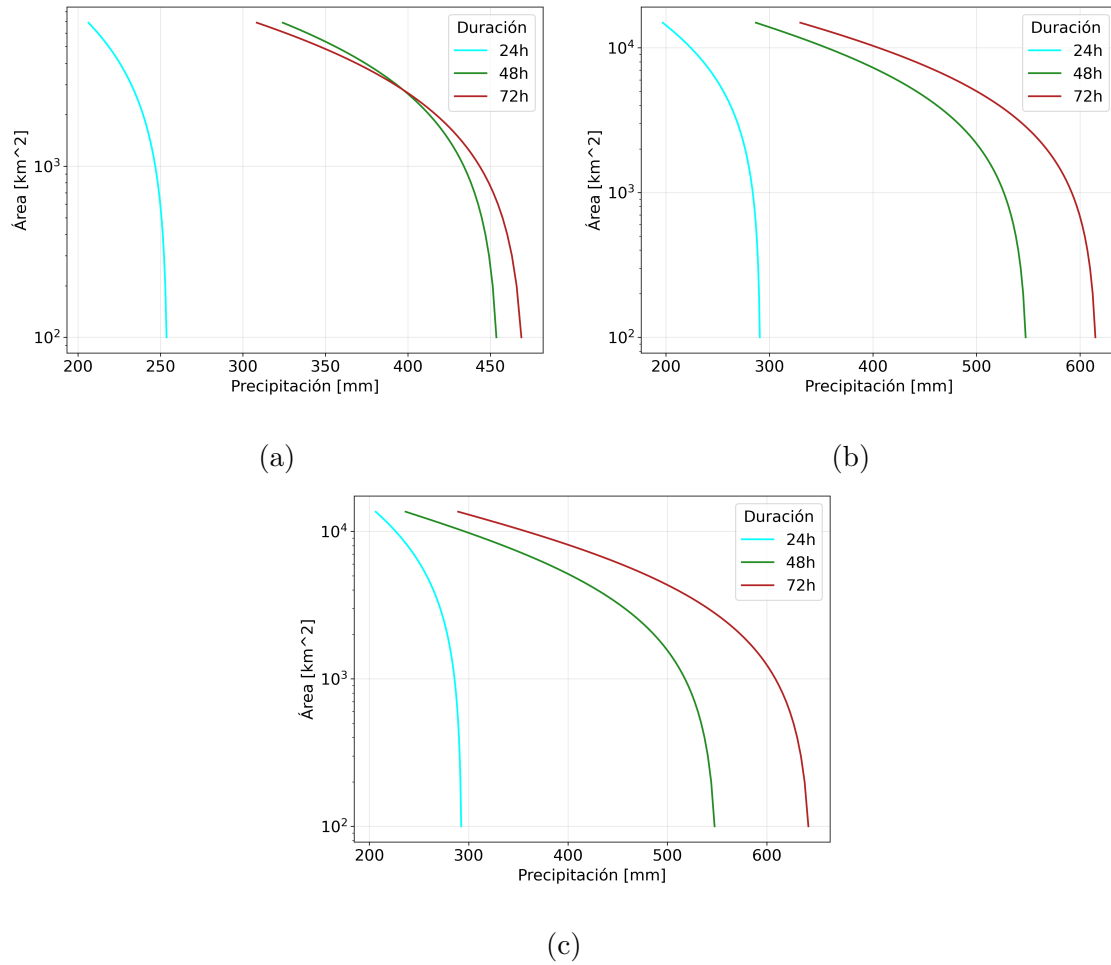


Figura 10: *Curvas PDA para la PMP por maximización de humedad para 24, 48 y 72 horas en las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c).*

5.3. Maximización de viento

La Figura 11 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.

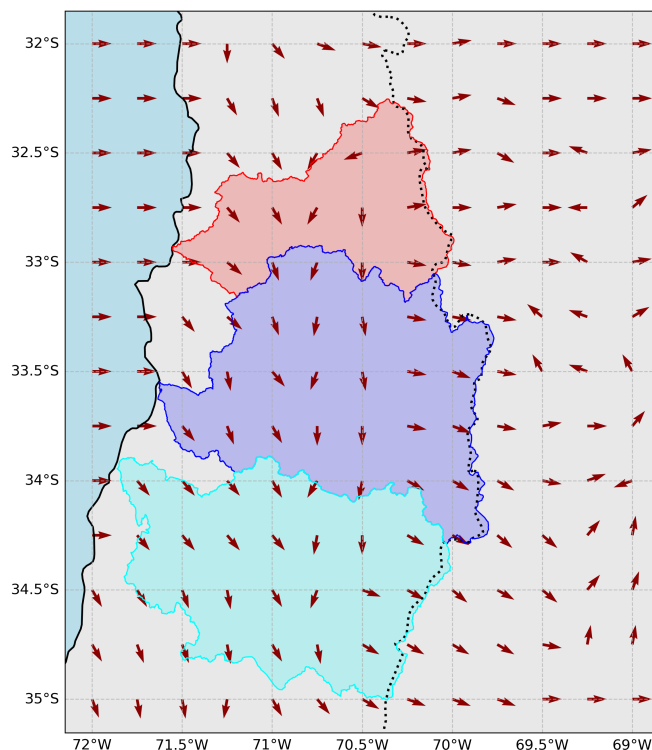


Figura 11: *Dirección crítica de viento para la zona de estudio. Se destacan en color las cuencas analizadas: Aconcagua en rojo, Maipo en azul y Rapel en cian.*

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. Esto es confirmado al analizar los valores más altos de los factores de maximización resultantes para las tormentas estudiadas mostradas en la Figura 12, donde se observa que la maximización de viento solo se aplica sobre el océano, en sectores costeros y algunos puntos de la cordillera. Aplicar los factores obtenidos es consistente con la recomendación de la WMO de analizar el viento en la zona de interés y su región “aguas arriba del ingreso de humedad.

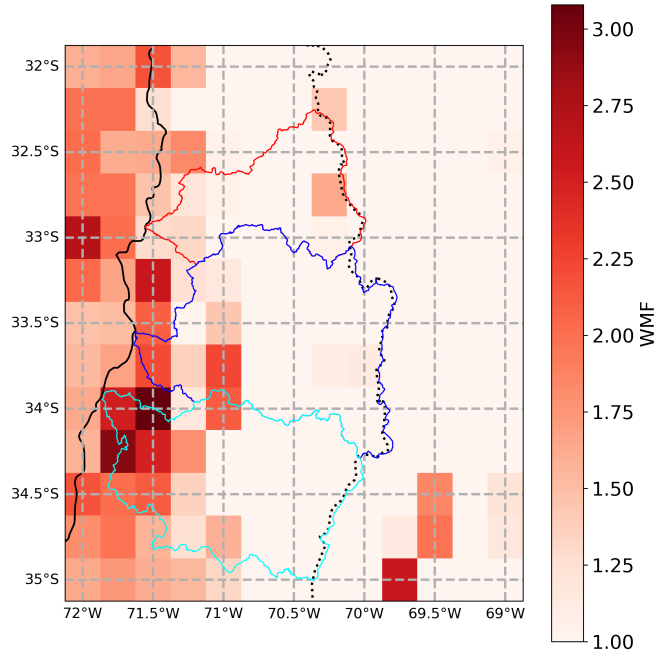


Figura 12: Valores máximos del coeficiente de maximización de viento para la zona de estudio. Se destacan en color las cuencas analizadas: Aconcagua en rojo, Maipo en azul y Rapel en cian.

Considerando estos resultados, la Tabla 4 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 mas 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 3 para todas las duraciones. De igual forma, se presentan las curvas PDA suavizadas para la PMP por medio de maximización de humedad y viento en la Figura 13. Respecto a los resultados del método local, se obtienen los mismos valores para la cuenca del río Aconcagua, mientras que se genera un aumento de alrededor del 60 % para las curvas de la cuenca del río Maipo y sobre el 100 % para Rapel.

Tabla 4: 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

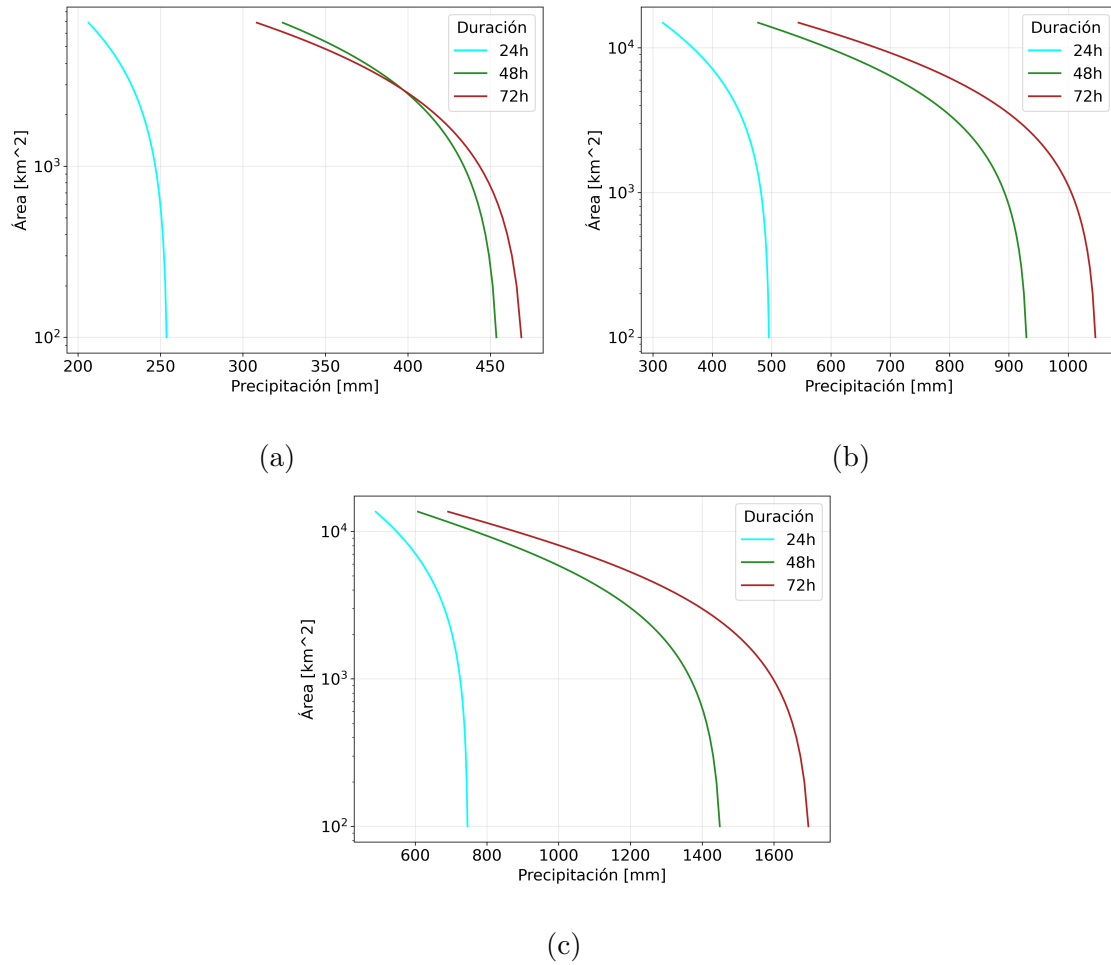


Figura 13: *Curvas PDA para la PMP por maximización de humedad y viento para 24, 48 y 72 horas en las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c).*

5.4. Método estadístico

Al aplicar las expresiones de Hershfield, Sarkar y Maity y Stöwhas a los registros históricos de las estaciones, se obtiene, en primer lugar, la distribución de los estadísticos K (Figura 14). Es posible observar a simple vista, que las envolventes tanto de Hershfield como de Sarkar y Maity sobreestiman el valor de K_m en gran parte del territorio nacional, y sobre todo para la zona de estudio. Esto hace que los resultados de PMP obtenidos por estos métodos sobreestimen de forma considerable la PMP.

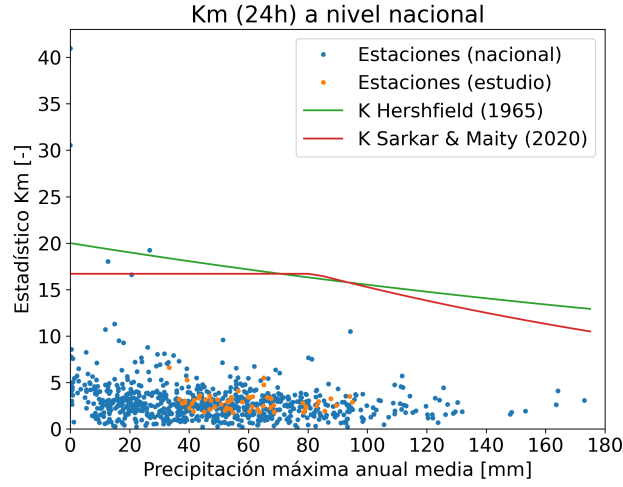


Figura 14: Estadístico K_m obtenido para cada estación a nivel nacional (azul) y dentro de la zona de estudio (naranja). Las curvas representan las envolventes para el valor K para el cálculo de la PMP por métodos estadísticos.

La Figura 15 muestra los valores de PMP estadística puntuales obtenidos para las estaciones en la zona de estudio para una duración de 24 horas. Es posible observar que los métodos estadísticos calibrados para las máximas precipitaciones globales entregan resultados al menos un 30 % mayores a los obtenidos por el método de Stöwhas, que genera valores más representativos para la región. Luego, la PMP a nivel de cuenca obtenida por medio de polígonos de Thiessen se presenta en la Tabla 5. Adicionalmente, la tabla 6 indica las PMP obtenidas con la expresión de Stöwhas para 24, 48 y 72 horas en cada cuenca.

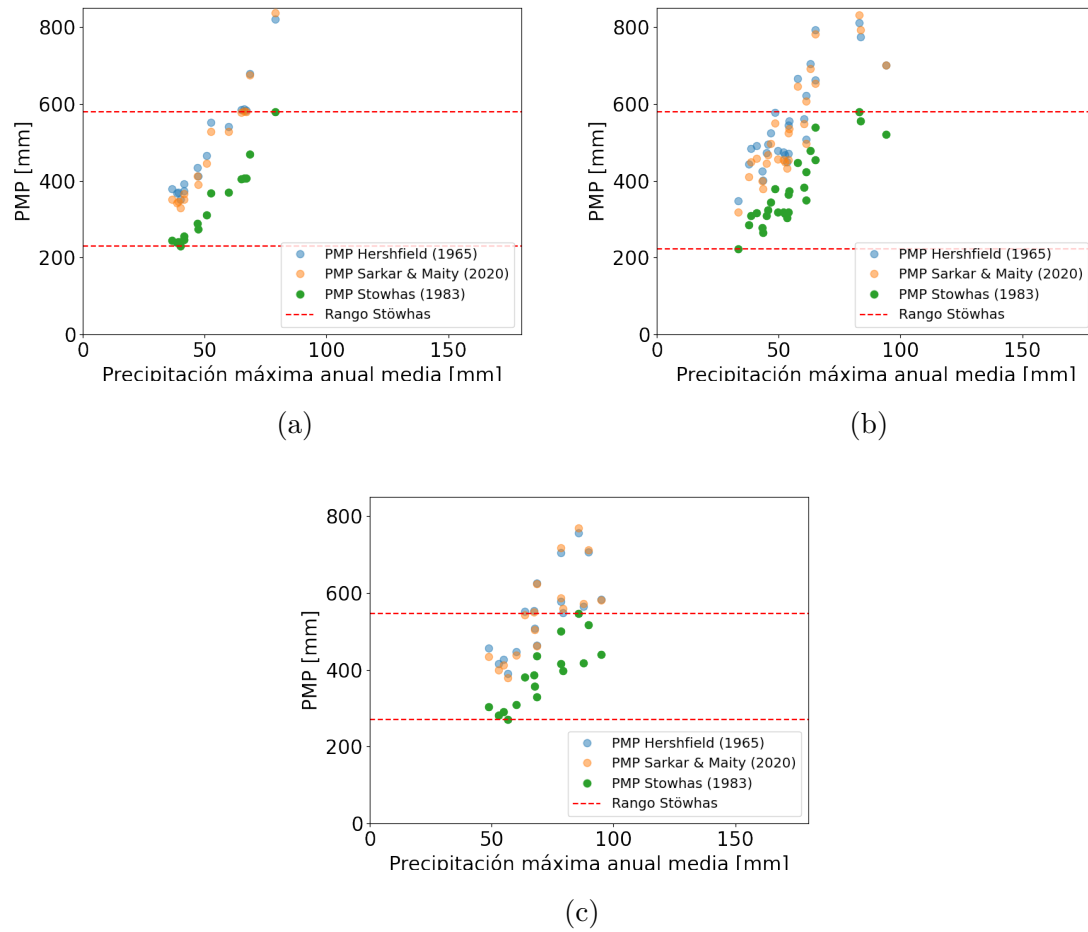


Figura 15: Valores obtenidos para la PMP estadística puntual en cada estación en las cuencas Aconcagua (a), Maipo (b) y Rapel (c). Las líneas rojas indican los rangos mínimos y máximos para la PMP predicha por Stowhas en la zona.

Tabla 5: PMP estadísticas de 24 horas para las cuencas en estudio (Valores en [mm]).

Método	Aconcagua	Maipo	Rapel
Hershfield	480.17	580.44	555.36
Sarkar y Maity	462.82	566.93	553.73
Stowhas	325.73	397.42	413.08

Tabla 6: PMP estadística a nivel de cuenca obtenida con el método de Stowhas (valores en [mm]).

Cuenca	24 [hrs]	48 [hrs]	72 [hrs]
Aconcagua	325.7	464.1	555.0
Maipo	397.4	544.4	614.0
Rapel	413.1	624.6	763.0

5.5. Modelos climáticos

Si bien se han realizado estudios para evaluar los GCM CMIP6 que mejor representan el clima regional (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024), el uso de las variables crudas de humedad y las aproximaciones utilizadas para estimar el agua precipitable de los modelos climáticos introducen un alto grado de incertidumbre, por lo que se consideró preferible mostrar el rango de resultados generado por los modelos disponibles en lugar de los resultados individuales.

La Figura 16 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. Se destaca que los rangos de variación son similares entre las cuencas, con diferencias importantes entre modelos. Esta similitud se puede deber a la baja resolución de la variable de humedad cruda, que cuenta con pocos puntos para la zona de estudio.

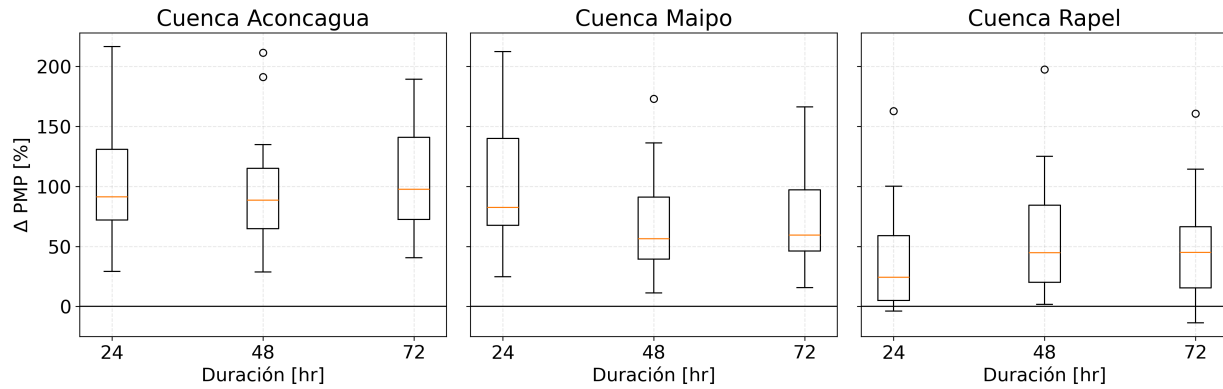
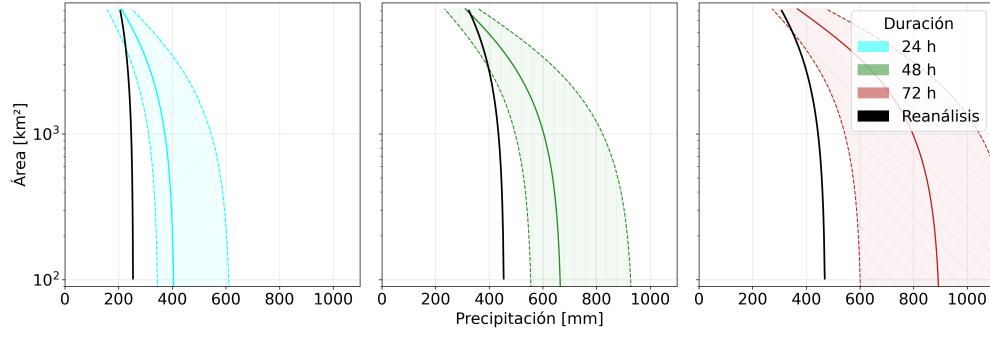
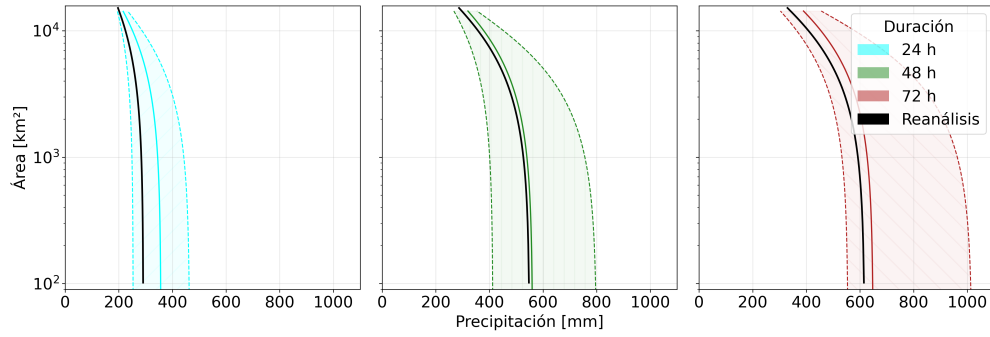


Figura 16: *Boxplot para los rangos de variación en la PMP proyectadas por los modelos CMIP6.*

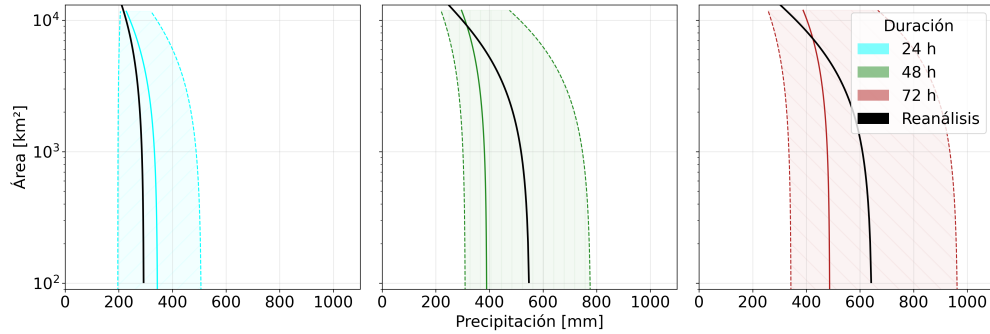
De la misma forma, se generan los rangos de valores para la distribución espacial de la PMP en las cuencas. La Figura 17 presenta las curvas PDA suavizadas para estos rangos, así como el valor mediano entre los modelos. Los resultados presentan gran variabilidad, indicando en el rango mínimo una disminución 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, los que no se consideran realistas y se atribuyen principalmente a la incertidumbre del cálculo y sesgo de la humedad predicha por los modelos.



(a)



(b)



(c)

Figura 17: 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.

6. 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. A pesar de que 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 3 muestra que, con algunas excepciones, en la mayor parte de la zona de estudio los valores de ERA5-Land son similares a los valores históricos. Esto implica que a pesar de que este hecho introduzca un cierto grado de incertidumbre en los resultados, no se evidencian razones de peso para descartar el uso de este set de datos en los cálculos realizados. De igual forma, se considera necesario contrastar los resultados obtenidos con las observaciones disponibles además de estudios previos realizados por otros autores.

Considerando que la mayoría de los estudios previos se enfocan en la cuenca del río Maipo, esta comparación se centra en dicha cuenca. Para facilitar este análisis, las Tablas 7, 8 y 9 presentan un resumen de los resultados obtenidos con cada método para las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel, respectivamente.

Tabla 7: Comparación de métodos para la cuenca Aconcagua (valores en [mm]).

Duración [hrs]	Máximos históricos	Método local	Máximo valor PDA humedad	Maximización de viento	Método estadístico
24	192.8	187.5	282.7	187.5	325.7
48	318.5	286.3	454.8	286.3	464.1
72	372.5	333.5	485.1	333.5	555.0

Tabla 8: Comparación de métodos para la cuenca Maipo (valores en [mm]).

Duración [hrs]	Máximos históricos	Método local	Máximo valor PDA humedad	Maximización de viento	Método estadístico
24	336.9	193.0	306.2	332.5	397.4
48	418.0	304.5	564.2	515.6	544.4
72	528.0	346.7	660.6	585.9	614.0

Tabla 9: Comparación de métodos para la cuenca Rapel (valores en [mm]).

Duración [hrs]	Máximos históricos	Método local	Máximo valor PDA humedad	Maximización de viento	Método estadístico
24	193.8	235.8	298.2	568.0	413.1
48	354.3	287.8	546.3	716.5	624.6
72	389.5	348.4	645.1	862.9	763.0

En primer lugar, para la cuenca del río Maipo, las precipitaciones más altas registradas históricamente para 24, 48 y 72 horas corresponden a 336.9 [mm], 418.0 [mm] y 528.0 [mm], respectivamente. Se debe destacar que estos valores incluyen precipitaciones registradas en estaciones de alta montaña, que pueden ser considerablemente superiores a las registradas en puntos más bajos de la cuenca. 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 cercana a la línea divisora de aguas al norte de la cuenca, situada sobre los 1000 metros de altura. Esto implica que estos valores de precipitación son teóricamente posibles, sin embargo, están ligados a tormentas extremadamente grandes 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, con un valor de PMP de 24 horas

ligeramente superior al periodo de retorno de 10,000 años para la estación Quinta Normal. 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. Si bien los resultados de las curvas PDA generadas al incluir la maximización de viento son demasiado altos para considerarse plausibles en la zona de estudio, los resultados a nivel de cuenca obtenidos por este método si parecen aceptables como parámetro de diseño conservador.

Luego, en comparación con los resultados de los métodos estadísticos, tanto el valor medio a nivel de cuenca como el valor máximo de la envolvente PDA obtenidos por maximización de humedad para la cuenca del río Maipo se encuentran cercanos al valor inferior del rango de PMP puntuales obtenidas por el método de Stöwahas para las estaciones en la cuenca, llegando a menos del 50 % del valor del rango superior para la PMP. El valor de PMP promedio a nivel de cuenca para 24 horas por el método de Stöwahas corresponde a 397 [mm], superando el máximo histórico de la cuenca, aproximadamente un 33 % más grande que el valor máximo de la curva PDA obtenida por el método local y 20 % mayor al resultado del método de maximización de viento. A pesar de que es sabido que los resultados de métodos estadísticos corresponden a una estimación más bien conservadora de los valores de PMP, se debe destacar el hecho de que supere incluso los registros de los valores extremos en zonas montañosas.

De forma similar, al analizar el resultado en las otras cuencas del estudio, se observan diferencias que resulta importante mencionar. En primer lugar, para la cuenca del río Aconcagua (Tabla 7), los resultados del método local a nivel de cuenca son considerablemente inferiores a los máximos históricos, a excepción del valor para 24 horas. A pesar de esto, los valores máximos de la curva PDA por maximización de humedad logran superar la magnitud de los registros y obteniendo valores inferiores a las estimaciones del método estadístico. Es interesante notar que la maximización de viento no logra amplificar las tormentas utilizadas en el estudio en esta cuenca, probablemente debido a un problema de resolución respecto al tamaño de la cuenca (Aconcagua es la menor de las utilizadas), ya que, como es posible ver en la Figura 12, hay pocas celdas con valores mayores a 1 completamente contenidas en los límites de la cuenca. A pesar de esto, los resultados obtenidos pueden utilizarse como estimación de la PMP para la zona.

Por otro lado, para la cuenca del río Rapel ocurre otra situación particular. De forma similar a los casos anteriores, los resultados del método local a nivel de cuenca solo son razonables para la PMP de 24 horas, con resultados inferiores a los registros máximos para 48 y 72 horas. A pesar de esto, el valor máximo de la PDA de humedad para la cuenca logra obtener una buena aproximación superior que sigue siendo más baja que la estimación estadística de la PMP para la zona. Por otro lado, el resultado de la maximización de viento es interesante, ya que obtiene precipitaciones mucho más altas que los registros máximos, e incluso mayores a los del método estadístico. Esto puede parecer

un error a simple vista, sin embargo, es posible que simplemente no existan registros suficientes para la zona. Por un lado, las estaciones en la cuenca del río Rapel tienen una menor cantidad de años de registro comparadas a muchas estaciones del Maipo, además de contar con una menor cantidad de estaciones de montaña (superiores a 1000 metros de altura). Esto puede llevar a que se tengan pocos registros de tormentas importantes asociadas a fuertes elevaciones orográficas, lo que podría llevar a subestimar la PMP al considerar el método local o el método estadístico. Por otro lado, al considerar los registros máximos de la cuenca del Maipo, junto con el hecho de que Rapel queda al sur de esta, es posible esperar que las precipitaciones en Rapel tengan la capacidad de ser mayores. Se debe considerar también que tanto CR2MET como ERA5-Land indican que las mayores precipitaciones para el periodo de estudio ocurren en la zona de la cordillera de la cuenca del río Rapel, por lo que esto justifica los valores tan altos de PMP para la zona.

Por último, es importante comparar los resultados a otros trabajos realizados sobre la cuenca. 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 promedio a nivel de cuenca de 348.3 [mm] por medio del método de maximización de humedad, prácticamente equivalente al resultado de este trabajo por el mismo método. 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 local 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. 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.

Finalmente, debido a los puntos ya discutidos sobre la incertidumbre asociada a los resultados de cambio climático, se debe recalcar que estos resultados son solo referenciales y que su principal objetivo corresponde a proporcionar una visión preliminar sobre las posibles tendencias futuras esperadas para el parámetro de PMP.

7. CONCLUSIÓN

La investigación realizada aprovecha la disponibilidad de las variables climáticas grilladas de los productos del reanálisis ERA5 del ECMWF para realizar estimaciones de la precipitación máxima probable para tres cuencas mayores de la zona central de Chile por medio de métodos hidrometeorológicos. La distribución espacial de los datos de precipitación se aprovecha para presentar los resultados en forma de curvas PDA para las cuencas en estudio. Adicionalmente, se proyectan rangos posibles para los valores futuros de la PMP en la zona bajo el escenario de emisiones SSP 5-8.5, utilizando una base de datos corregida derivada de modelos climáticos globales del proyecto CMIP6.

La comparación entre los datos de precipitación de ERA5-Land y las referencias observacionales de la zona de estudio (registros históricos y precipitación de CR2MET) indica que si bien ERA5-Land presenta un sesgo no despreciable respecto a los valores reales, el reanálisis es capaz de representar adecuadamente tanto la variabilidad climática cíclica de la región como los patrones de precipitación en los distintos sectores de la zona de estudio. De la misma forma, ERA5-Land indica valores máximos de precipitación similares a la zona de estudio a excepción de los registros históricos más extremos, que corresponden a zonas montañosas. A pesar de esto, ERA5-Land obtiene una correlación fuerte específicamente en la zona de la cordillera respecto al producto CR2MET. Estos hallazgos justifican el uso de los datos del reanálisis ERA5 para la estimación de la PMP y sugieren que las variables de estos productos podrían utilizarse incluso en otros tipos de estudios, como, por ejemplo, obtención de distribuciones de precipitación en área, evaluaciones de la respuesta hidrológica de cuencas, entre otras.

En cuanto a los resultados para la precipitación máxima probable, las estimaciones realizadas con el método de maximización de humedad entregan valores aceptables de PMP, especialmente en estaciones fuera de la cordillera o zonas de alta elevación. Aún en estos lugares, el uso de la distribución espacial obtenida a través de las curvas PDA suele ser una estimación segura para la mayoría de los casos. En las zonas con registros históricos que evidencien efectos orográficos importantes o en las que se sospeche que el efecto orográfico puede ser relevante, si bien el método de maximización de humedad por si solo no logra obtener estimaciones seguras para la PMP en toda la zona de estudio, la aplicación adicional de maximización de viento a nivel de cuenca permite mejorar los resultados y obtener estimaciones más conservadoras, mientras que el método estadístico puede utilizarse para obtener valores de PMP de forma sencilla y con un amplio margen de seguridad. Se debe destacar que los resultados obtenidos de forma espacial para la PMP por maximización de viento entregan valores demasiado grandes para considerarse posibles en la zona de estudio, por lo que solo se puede recomendar el uso del punto más bajo de la curva, que corresponde aproximadamente al valor medio a nivel de cuenca. Se debe destacar que, a pesar de obtener resultados favorables en las cuencas estudiadas utilizando los métodos hidrometeorológicos propuestos, el único método que no subestima la precipitación en ninguno de los casos corresponde al método estadístico. De esta forma, al requerir estimaciones de PMP en zonas en las que no se tenga seguridad en la calidad o representatividad de los datos disponibles, se debe recomendar el uso del método estadístico de Stöwhas. Cabe mencionar que el método de maximización de humedad y viento a nivel de cuenca solo obtiene un resultado menor a los registros históricos en uno de los casos, con una diferencia menor al 5 % en la estimación.

Finalmente, los resultados de PMP asociados al cambio climático proyectado por los modelos CMIP6 indican incrementos en este parámetro, sobre todo para duraciones menores, siendo posible que su efecto sea aún mayor para tormentas asociadas a intensidades extremas de precipitación por un

relativamente periodo corto de tiempo. Se observa también que el aumento proyectado es mayor al norte de la zona de estudio en comparación al sur, contrastando con el gradiente de precipitación existente en Chile. Esto puede significar que en el futuro este gradiente puede hacerse menos pronunciado debido a la disminución de la precipitación o posibles sequías.

En general, se observa que el método propuesto en esta investigación puede generar estimaciones de gran calidad para la PMP. Se destaca sobre todo la capacidad de entregar resultados que suponen un nivel de seguridad aceptable (asociados a periodos de retorno de más de 10,000 años), con valores más bajos a las estimaciones de los métodos estadísticos, y similares a los resultados obtenidos por medio de técnicas más sofisticadas como enfoques basados en modelación, pero a un costo computacional mucho menor. Esto puede hacer que su uso resulte recomendable en caso de buscar una segunda aproximación al valor de la precipitación de diseño de grandes obras hidráulicas o para buscar un mejor rendimiento económico en comparación a la estimación estadística. No obstante, quedó en evidencia que esta estimación puede subestimar las precipitaciones extremas en ciertas zonas con influencia orográfica importante, por lo que para casos en los que se sospeche que esto puede ocurrir, el uso de maximización de viento puede ser una alternativa viable.

El rendimiento de la metodología propuesta podría mejorar en caso de aplicar escalamiento estadístico y corrección de sesgo sobre el campo de precipitaciones de ERA5-Land, por ejemplo, a través del uso de métodos de mapeo de cuantiles; posiblemente aumentando el rendimiento del método incluso en zonas con fuerte influencia debido a la elevación orográfica. Se destaca que para la implementación del método de maximización de viento se requieren amplios registros de velocidad de viento, además de una comprensión profunda de los mecanismos de ingreso de humedad hacia las zonas de estudio, por lo que debe aplicarse con cuidado.

Por otro lado, los resultados de las proyecciones de PMP sugieren que en el futuro puede resultar relevante el estudio de precipitaciones extremas de baja duración, incluyendo escalas menores y hasta menores a una hora para quebradas pequeñas o zonas con alta impermeabilidad. Además, los resultados sugieren la posibilidad de un impacto importante sobre los patrones climáticos de la zona, el que deberá ser estudiado en profundidad con las proyecciones climáticas actuales u otras herramientas que se desarrollen en el futuro.

Finalmente, es posible sugerir la verificación de estos resultados aplicando esta metodología en otras zonas con amplia disponibilidad de registros históricos con el fin de validar los resultados y, eventualmente, aplicar un procedimiento similar en zonas con baja cantidad de registros o para cuencas no monitoreadas.

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>
- Chen, X., & Hossain, F. (2019). Understanding future safety of DAMs in a changing climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(8), 1395-1404. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0150.1>
- Dirección General de Aguas. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica* [Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/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.º 417) (Realizado por: Universidad de Chile Pontificia Universidad Católica de Chile). Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fernando, W. C. D. K., & Wickramasuriya, S. 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>
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, 177(6), 87. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1>
- Guerreiro, S. B., Fowler, H. J., Barbero, R., Westra, S., Lenderink, G., Blenkinsop, S., Lewis, E., & Li, X.-F. (2018). Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes. *Nature Climate Change*, 8(9), 803-807. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0245-3>
- Guo, Q., Chen, J., Zhang, X. J., Xu, C.-Y., & Chen, H. (2020). Impacts of Using State-of-the-Art Multivariate Bias Correction Methods on Hydrological Modeling Over North America. *Water Resources Research*, 56, e2019WR026659. <https://doi.org/10.1029/2019WR026659>
- 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>
- Hiraga, Y., Tahara, R., & Meza, J. (2025). A methodology to estimate Probable Maximum Precipitation (PMP) under climate change using a numerical weather model. *Journal of Hydrology*, 652, 132659. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132659>
- 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
- 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
- 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>
- 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>
- Martinez-Villalobos, C., & Neelin, J. D. (2018). Shifts in precipitation accumulation extremes during the warm season over the United States. *Geophysical Research Letters*, 45, 8586-8595. <https://doi.org/10.1029/2018GL078465>
- Meyer, J., Kohn, I., Stahl, K., Hakala, K., Seibert, J., & Cannon, A. J. (2019). Effects of univariate and multivariate bias correction on hydrological impact projections in alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1339-1354. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1339-2019>
- Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1950 to present [Accessed on 30-Oct-2024]. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Na, W., & Yoo, C. (2019). Bayesian Update of Hydrometeorological Probable Maximum Precipitation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(11), 04019048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001851](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001851)
- 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>

- Salas, J. D., Anderson, M. L., Papalexiou, S. M., & Frances, F. (2020). PMP and Climate Variability and Change: A Review. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(12), 03120002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002003)
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, 62(3), 2475-2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- 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/>
- Stöwhas, L. (2017). *Fundamentos de Hidrología Aplicada*. Editorial USM.
- 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>
- WMO. (2009). *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. <https://library.wmo.int/idurl/4/35708>
- Zhou, Y., Liang, Z., Hu, Y., Li, D., Liu, T., & Lei, X. (2020). An improved moisture and wind maximization method for probable maximum precipitation estimation and its application to a small catchment in China. *International Journal of Climatology*, 40(5), 2624-2638. <https://doi.org/10.1002/joc.6355>

ANEXOS

ANEXO A: DETALLE VALIDACIÓN DE DATOS

En esta sección se presenta el detalle de la validación realizada de la precipitación del producto de reanálisis ERA5-Land respecto a las siete estaciones con mayor cantidad de registros dentro de las cuencas consideradas para el estudio.

QUINTA NORMAL

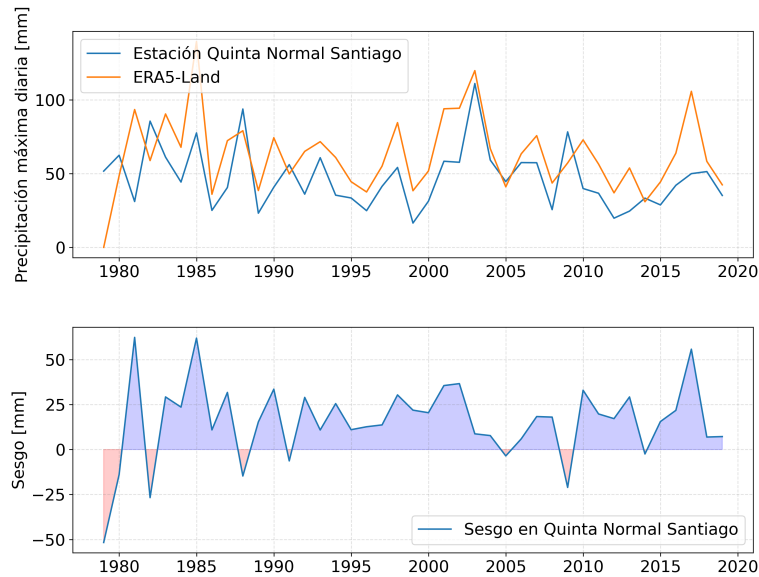


Figura 18: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Quinta Normal y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

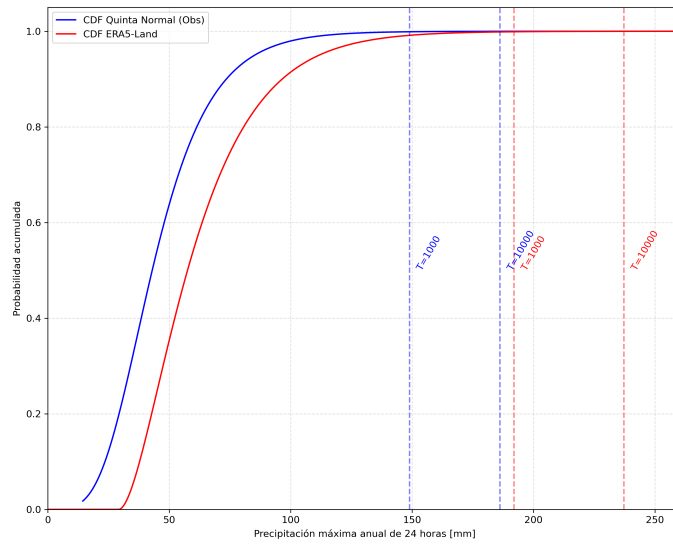


Figura 19: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Quinta Normal.

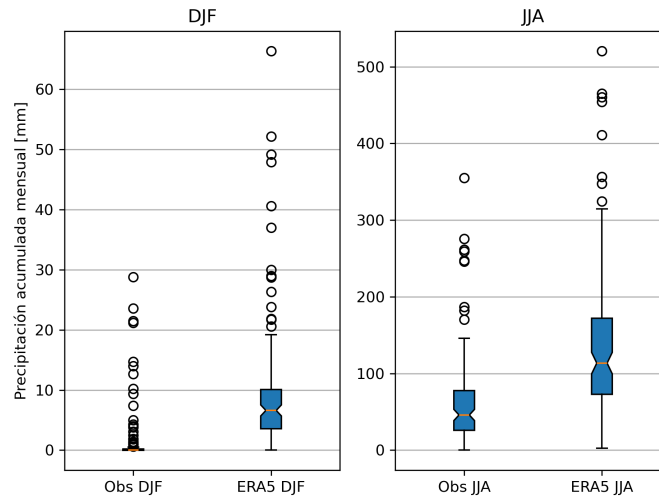


Figura 20: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Quinta Normal y ERA5-Land.

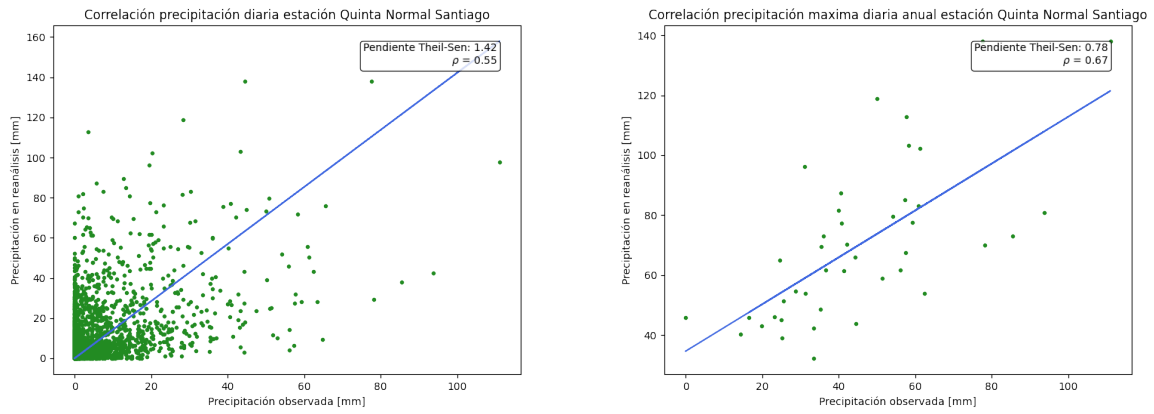


Figura 21: *Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Quinta Normal.*

RAPEL

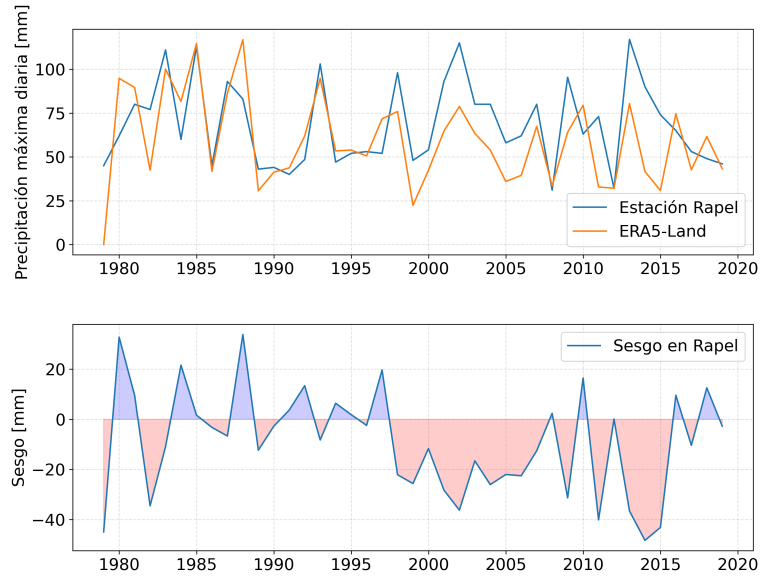


Figura 22: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Rapel y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

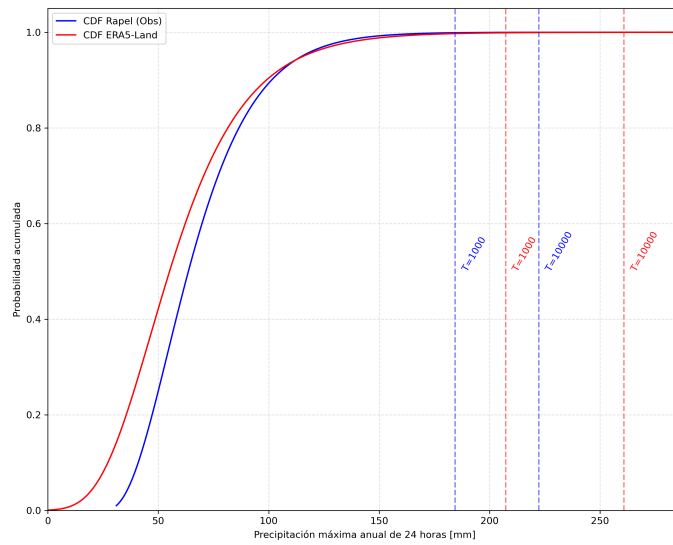


Figura 23: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Rapel.

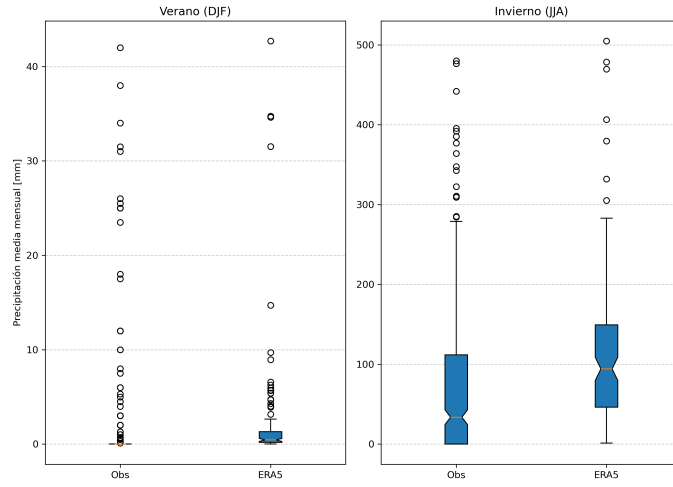


Figura 24: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Rapel y ERA5-Land.

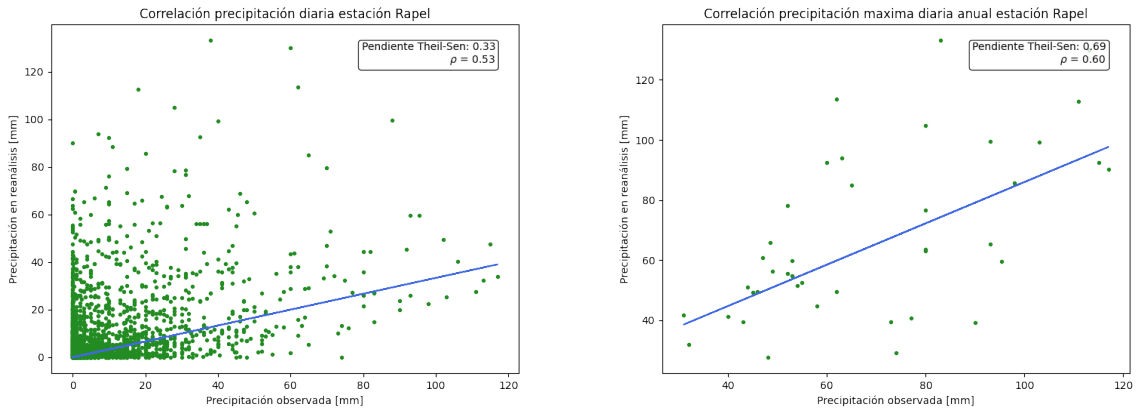


Figura 25: Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Rapel.

RIECILLOS

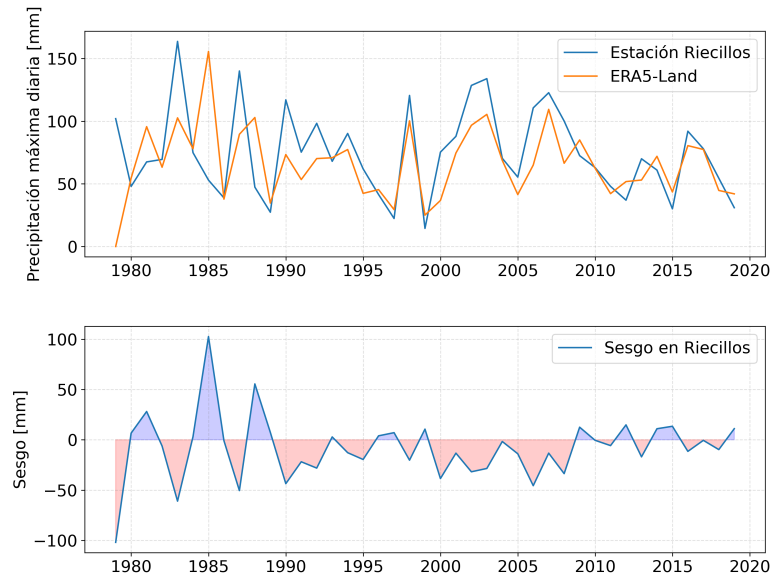


Figura 26: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Riecillos y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

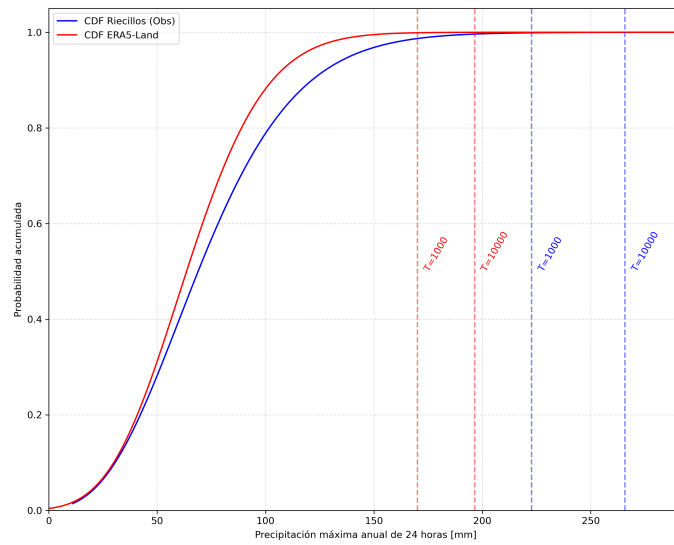


Figura 27: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Riecillos.

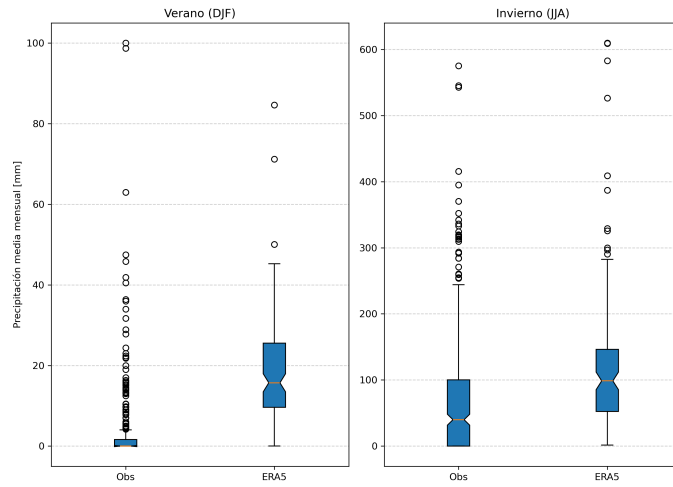


Figura 28: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Riecillos y ERA5-Land.

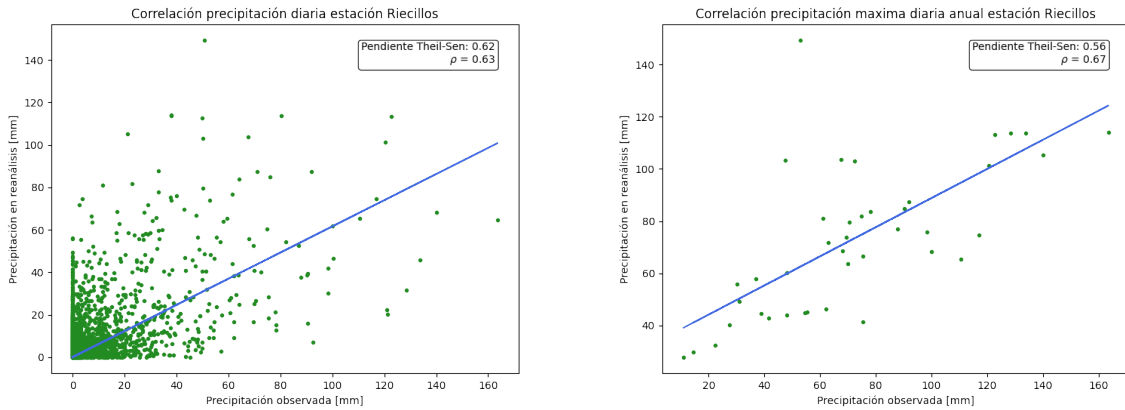


Figura 29: Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Riecillos.

LA RUFINA

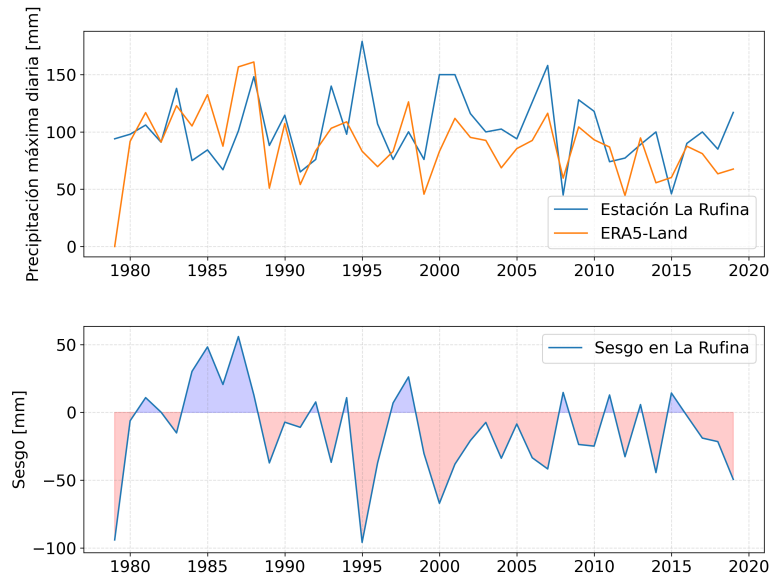


Figura 30: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en La Rufina y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

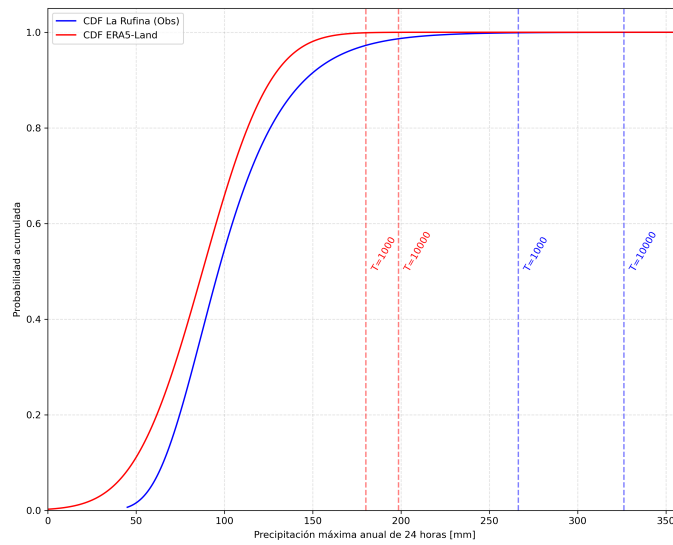


Figura 31: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación La Rufina.

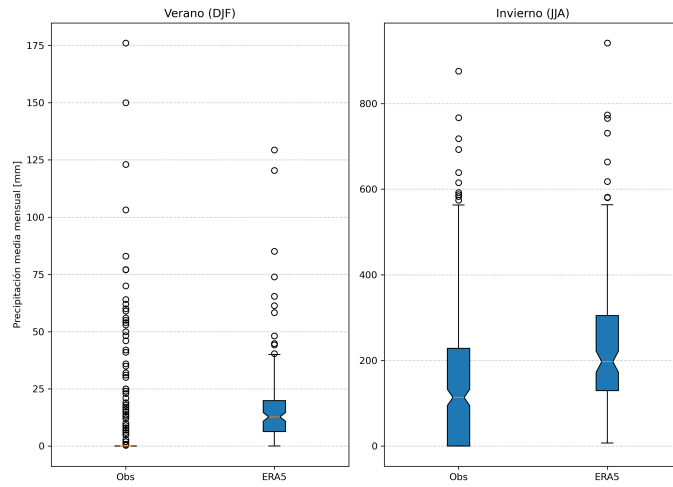


Figura 32: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación La Rufina y ERA5-Land.

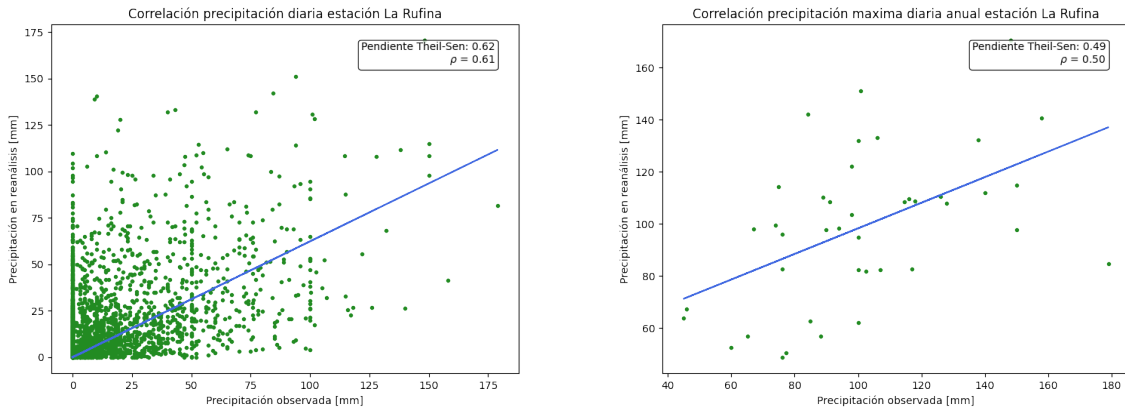


Figura 33: Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación La Rufina.

CERRILLOS DE LEYDA

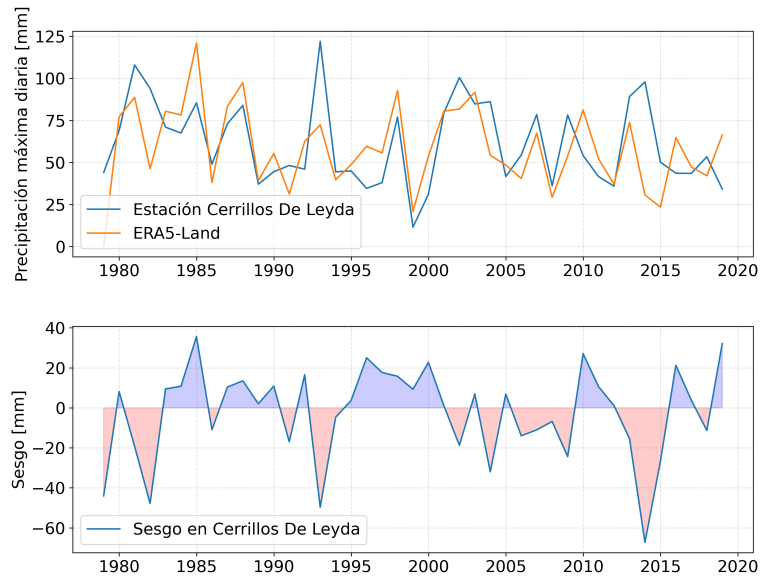


Figura 34: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Cerrillos de Leyda y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

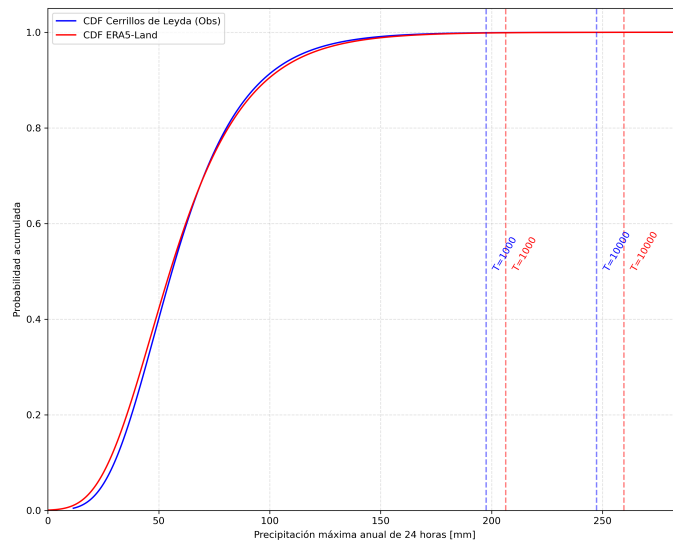


Figura 35: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Cerrillos de Leyda.

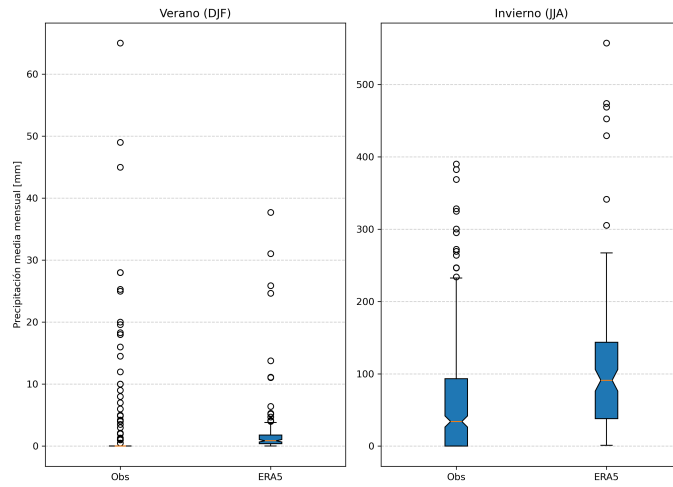


Figura 36: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Cerrillos de Leyda y ERA5-Land.

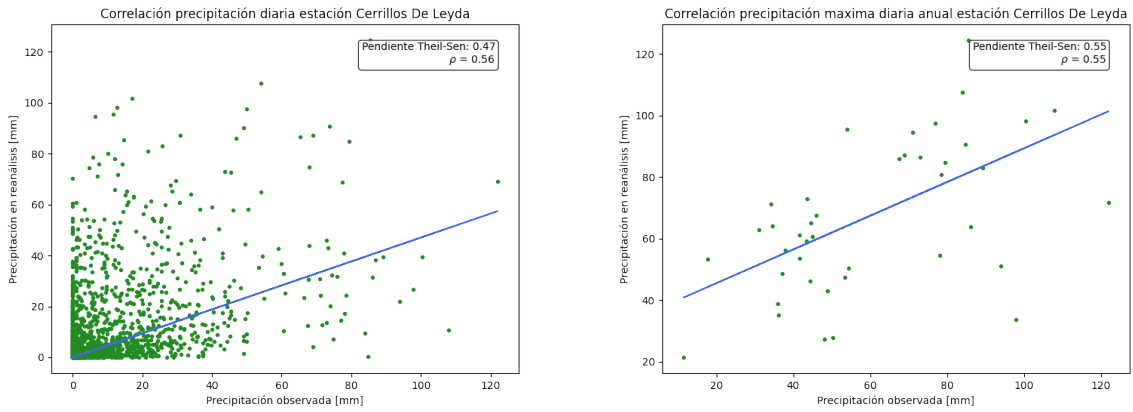


Figura 37: Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Cerrillos de Leyda.

CARMEN DE LAS ROSAS

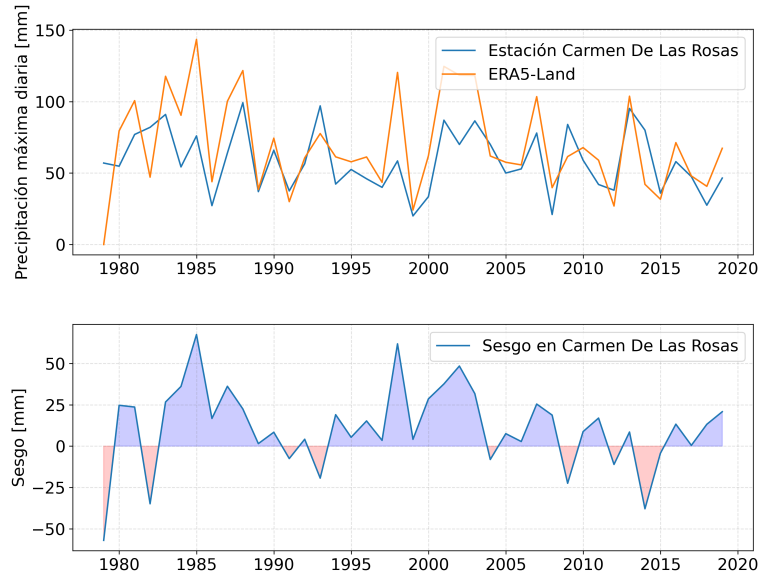


Figura 38: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Carmen de las Rosas y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

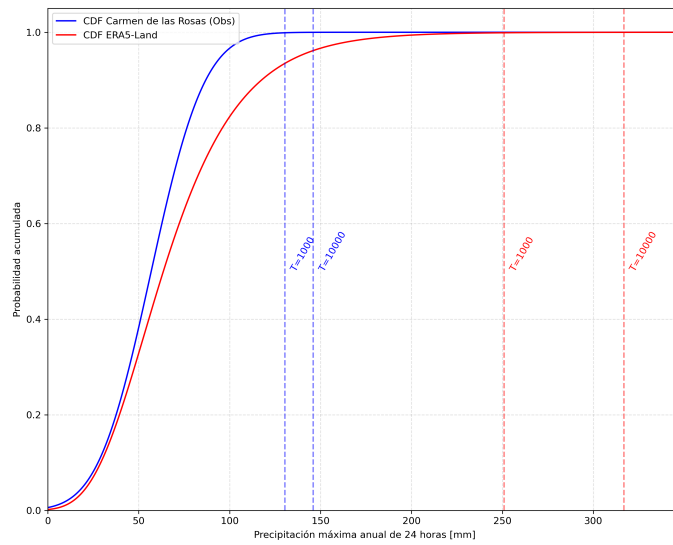


Figura 39: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Carmen de las Rosas.

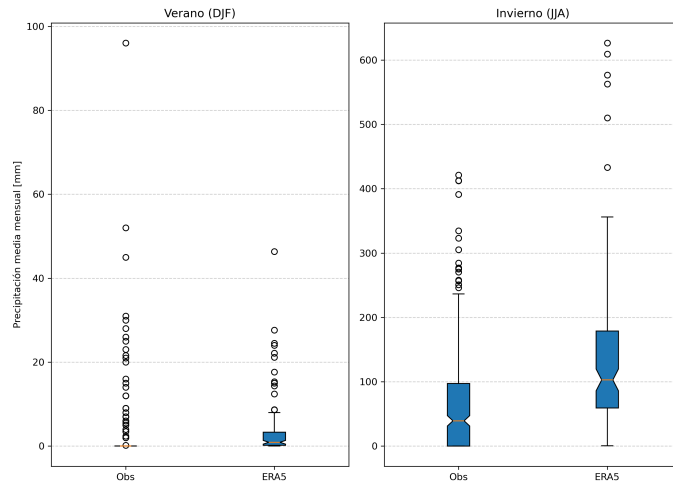


Figura 40: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Carmen de las Rosas y ERA5-Land.

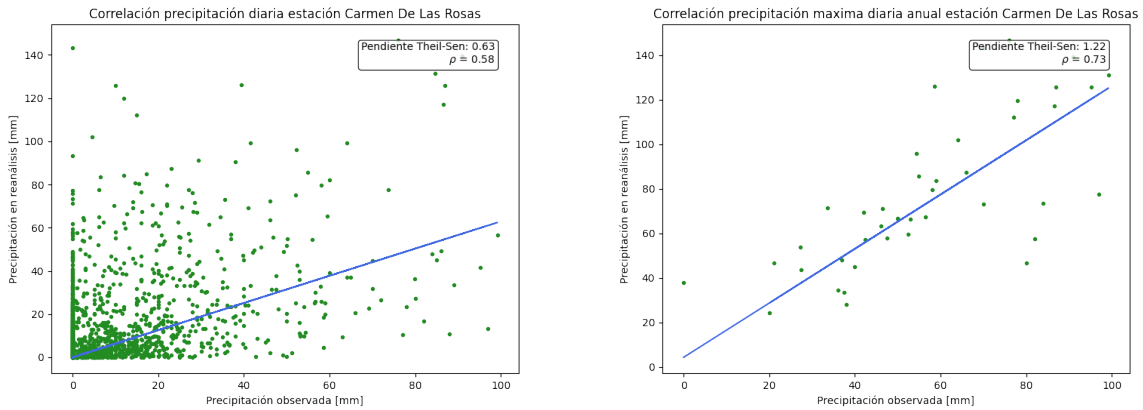


Figura 41: Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Carmen de las Rosas.

RESGUARDO LOS PATOS

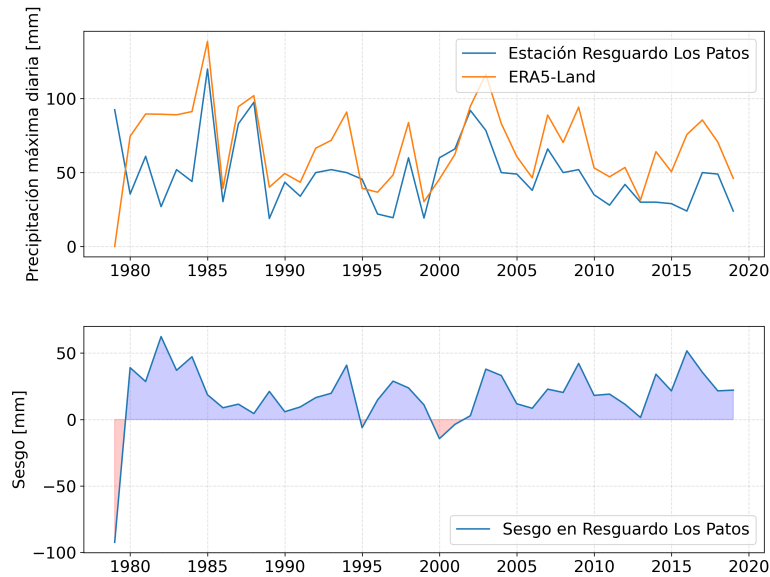


Figura 42: Comparación entre la precipitaciones máximas anuales en Resguardo Los Patos y la celda correspondiente en ERA5-Land (arriba) y su sesgo (abajo).

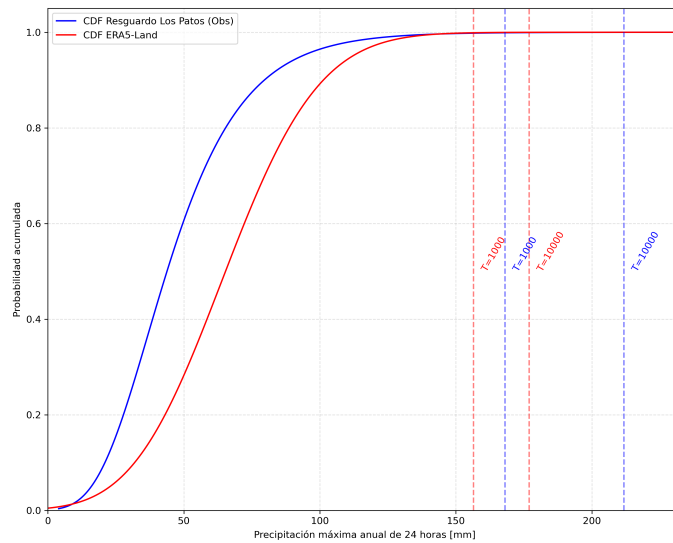


Figura 43: Comparación de distribuciones de probabilidad acumulada y periodos de retorno en la estación Resguardo Los Patos.

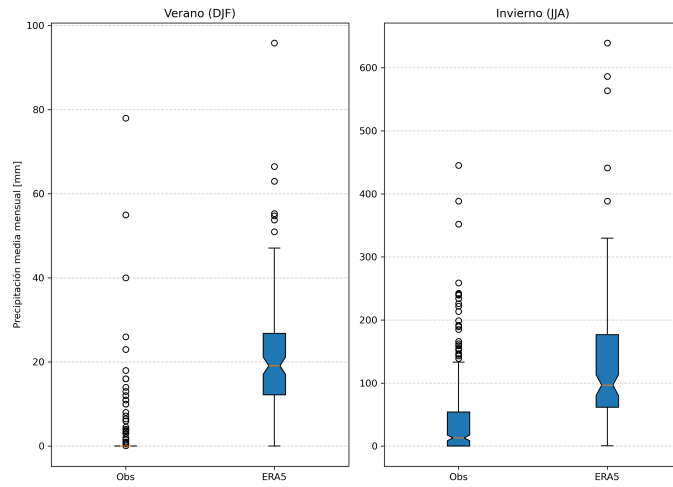


Figura 44: Comparación de precipitación acumulada mensual en invierno y verano en estación Resguardo Los Patos y ERA5-Land.

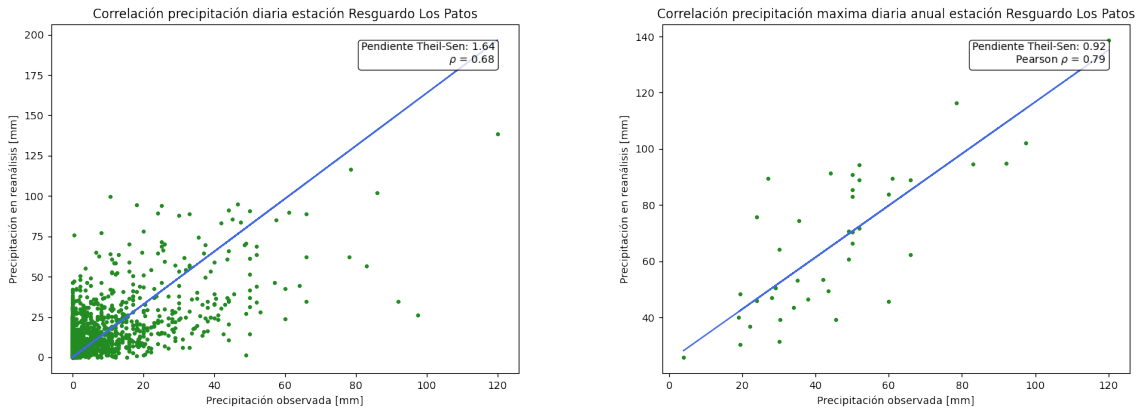


Figura 45: Correlación de precipitaciones diarias (izquierda) y máximas anuales (derecha) para la estación Resguardo Los Patos.