

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE
LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE (PMP): ENFOQUES ESTADÍSTICO,
DE MAXIMIZACIÓN DE HUMEDAD Y BASADO EN MODELOS NUMÉRICOS
DE BASE FÍSICA.**

JOAQUIN MEZA A.¹
ALVARO OSSANDON A¹
ISAIAS ORELLANA¹
JOCELYN LUGO¹
YUSUKE HIRAGA.²
BASTIAN AYCINENA¹

RESUMEN

Una estimación adecuada de la Precipitación Máxima Probable (PMP) es esencial para el diseño de infraestructuras hidráulicas resilientes y la mitigación de riesgos en regiones vulnerables. Los métodos tradicionales, como el enfoque estadístico de Hershfield y el hidrometeorológico basado en maximización de humedad, dependen de suposiciones simplificadas que ignoran procesos físicos complejos, lo que frecuentemente deriva en estimaciones poco realistas, especialmente en zonas con topografía variada. Con esta motivación, el presente estudio realiza un análisis comparativo de tres metodologías para estimar la PMP en las cuencas de los ríos Maipo, Rapel y Aconcagua en Chile central: el estadístico de Hershfield (adaptado con $K=11$), el hidrometeorológico con transposición de tormentas y correcciones orográficas, y el basado en modelos numéricos de base física utilizando WRF con perturbaciones en humedad y transposiciones geoespaciales de las tormentas. Se seleccionaron cinco eventos históricos, evaluando resultados a escalas de cuenca y puntual. Los resultados sugieren que la metodología de base física parece capturar de manera más efectiva los efectos orográficos en comparación con los enfoques tradicionales, generando una variabilidad espacial más detallada y valores generalmente más bajos de precipitación media a nivel de la cuenca, mientras que los métodos convencionales tienden a producir distribuciones más homogéneas que no reflejan completamente las heterogeneidades influenciadas por la topografía de la zona.

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María - email: joaquin.meza@usm.cl;
alvaro.ossandon@usm.cl; isaias.orellana@usm.cl; jlugos@usm.cl

² Department of Civil and Environmental Engineering, Tohoku University - email:
yusuke.hiraga.c3@tohoku.ac.jp

1. INTRODUCCION

Infraestructuras críticas, como represas, tranques de relave y plantas de energía nuclear, se diseñan para resistir el peor escenario posible de precipitación extrema, comúnmente representado por la Precipitación Máxima Probable (PMP). Este concepto, definido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2009) como el mayor evento de precipitación meteorológicamente posible para una duración dada en una cuenca específica, constituye un pilar fundamental en la evaluación de la Crecida Máxima Probable (CMF). Aunque la PMP es un concepto teórico, su estimación cuantitativa es esencial para garantizar la seguridad de estas infraestructuras, convirtiéndola en uno de los desafíos más críticos en hidrología e hidrometeorología (NASEM, 2024). En regiones como Chile central, donde eventos extremos influenciados por Ríos Atmosféricos (RAs) interactúan con la compleja topografía de los Andes, la estimación de este parámetro de diseño adquiere una relevancia aún mayor, especialmente ante el contexto de cambio climático que intensifica la frecuencia e intensidad de tales fenómenos (Viale et al., 2018; Hiraga et al., 2025a).

Históricamente, la estimación de PMP ha dependido fundamentalmente del enfoque estadístico propuesto por Hershfield (1961, 1965) y métodos hidrometeorológicos (Hansen et al., 1982). El método de Hershfield, basado en la ecuación de frecuencia general de Chow (1951), calcula la PMP a partir de la media y desviación estándar de series de precipitación máxima anual observada, incorporando un factor de frecuencia K para la extrapolación. Su simplicidad, al requerir solo registros pluviométricos, ha facilitado su adopción global, con adaptaciones regionales en diversas zonas (Stöwhas 1983; Sherif et al., 2014; Xiong et al., 2024). Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones teóricas significativas que comprometen su fiabilidad (Micovic et al., 2015). Por ejemplo, al basarse únicamente en la media y la desviación estándar de la muestra de datos, ignorando la asimetría positiva, característica de las precipitaciones extremas, lo que puede derivar en extrapolaciones poco realistas, las cuales tienden a ser conservadoramente altas, sin un límite físico superior evidente (Koutsoyiannis, 1999). Estas debilidades son particularmente problemáticas en áreas con diversidad climática y topografía compleja, como las cuencas andinas de Chile central.

Por su parte, los métodos hidrometeorológicos, estándar en prácticas operativas como las de Estados Unidos, integran componentes clave: transposición de tormentas, maximización de humedad y ajuste orográfico (Hansen et al., 1982). La maximización de humedad, ampliamente aplicada (Beauchamp et al., 2013; Chen et al., 2017; Dilshan et al., 2025), amplifica la precipitación observada en eventos históricos mediante la razón entre el agua precipitable (PW) máxima posible y la PW real durante el evento, asumiendo una relación lineal entre cambios en humedad atmosférica y precipitación. Aunque tiene fundamentos más cercanos a los principios físicos que el método estadístico, este enfoque incurre en suposiciones altamente cuestionadas, como la linealidad 1:1 entre humedad y precipitación, que ignora interacciones complejas en terrenos montañosos (Rastogi et al., 2017; Hiraga et al., 2024).

En este contexto, emerge el enfoque basado en modelos numéricos atmosféricos de base física como una alternativa prometedora para superar tales barreras. Este método maximiza la contribución de precipitación de eventos extremos históricos utilizando modelos numéricos de base física (e.g., WRF, MPAS) sin depender de suposiciones

espaciotemporales o físicas restrictivas (Ohara et al., 2011; Tarouilly et al., 2023). Al generar campos de precipitación continuos en el espacio y tiempo, facilita estimaciones en regiones con datos escasos y topografía compleja, demostrando éxito en precipitaciones orográficas inducidas por AR (Ishida et al., 2015; Toride et al., 2019, Hiraga and Meza, 2025), ciclones tropicales (Mure-Ravaud et al., 2019) y sistemas convectivos mesoescala (Hiraga et al., 2025b). Un informe reciente de la Academia Nacional de Ciencias resalta su potencial para actualizar estimaciones de PMP globalmente, especialmente bajo cambio climático (NASEM, 2024), lo que permite simular escenarios futuros.

A pesar de estas ventajas teóricas, se carece de una comparación exhaustiva entre el método basado en modelos de base física y los enfoques tradicionales. Estudios previos han contrastado PMP obtenida a través de métodos estadísticos e hidrometeorológicos, pero sin considerar modelos de base física (Casas Castillo et al., 2010; Lagos-Zúñiga et al., 2014; Afzali-Gorouh et al., 2018; Merrikhpour et al., 2021; Lan et al., 2024). Por otro lado, estudios recientes que utilizan modelos de base física para la estimación de la PMP solo ofrecen comparaciones superficiales, revelando estimaciones más bajas, pero sin explorar con mayor detalle (Ohara et al., 2011; Toride et al., 2019; Hiraga y Meza, 2025). Por lo tanto, una comparación exhaustiva entre los distintos enfoques es crucial para establecer las ventajas de la adopción operativa de enfoques de base física para la estimación de la PMP, particularmente en Chile central, donde cuencas como Maipo, Rapel y Aconcagua enfrentan eventos extremos asociados a RAs intensificados por los Andes.

Basado en este panorama, el objetivo de este estudio es examinar las características metodológicas de la estimación de PMP mediante la comparación de resultados derivados de métodos estadísticos, hidrometeorológicos y basados en modelos numéricos de base física, enfocándonos en cuencas con topografía compleja de Chile central. Se enfatiza la escala de cuenca (precipitación promedio) y puntal (estaciones pluviométricas o puntos de grilla).

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las tres metodologías principales utilizadas para la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) en la zona central de Chile. Cada enfoque se presenta con sus principios fundamentales, ecuaciones relevantes, ventajas y limitaciones, basados en la literatura existente. Se enfatiza su aplicación en contextos con topografía compleja, como las cuencas andinas de Chile central, donde eventos extremos asociados a ARs son predominantes.

2.1.METODO ESTADÍSTICO

El método estadístico propuesto por Hershfield (1961, 1965) estima la PMP a partir de series históricas de precipitación máxima anual, incorporando principios de análisis de frecuencias hidrológicas desarrollados por Chow (1951). De este modo, la PMP se estima mediante la siguiente ecuación:

$$PMP = \bar{P} + K \cdot S \quad (1)$$

donde \bar{P} y S corresponden a la media y desviación estándar de la serie de precipitación máxima en 24 horas anual y K es un factor de frecuencia que representa el número de desviaciones estándar por encima de la media. Este factor K se obtiene a partir de una curva

envolvente construida con datos globales o regionales de estaciones pluviométricas, ajustada para maximizar la estimación. En aplicaciones regionales, como las realizadas en Chile, K se calibra utilizando registros locales que reflejan la variabilidad climática. Stöwahas (1983) propuso un valor de $K=11$ para la estimación de la PMP, el cual ha sido ampliamente adoptado en el diseño de grandes obras de infraestructura. Para este trabajo se considerará $K=11$ para la estimación de la PMP.

Esta simplicidad inherente, que solo requiere datos pluviométricos históricos, facilita su aplicación en regiones con registros limitados y ha impulsado su adopción global a un bajo costo computacional (Sherif et al., 2014; Xiong et al., 2024). Sin embargo, el método ignora procesos físicos subyacentes, como la dinámica atmosférica o los efectos orográficos, lo que puede resultar en estimaciones físicamente incoherentes o excesivamente conservadoras, especialmente en entornos como Chile central donde la heterogeneidad topográfica y la influencia de AR generan subestimaciones o sobrestimaciones al basarse K en datos de climas disímiles (Koutsoyiannis, 1999; Micovic et al., 2015). Además, su incapacidad para incorporar escenarios de cambio climático limita su utilidad en proyecciones futuras, haciendo necesario explorar alternativas más integradoras.

2.2.METODO HIDROMETEOROLOGICO

Los métodos hidrometeorológicos, estandarizados por agencias como el Servicio Meteorológico de Estados Unidos (Hansen et al., 1982), integran observaciones históricas de tormentas con “ajustes físicos” para maximizar la precipitación posible, partiendo de la premisa de que la PMP se obtiene amplificando eventos extremos observados hasta su límite meteorológico. Este enfoque combina componentes clave como la transposición de tormentas, la maximización de humedad y las correcciones orográficas, donde la maximización de humedad, por ejemplo, aumenta la precipitación observada considerando la razón entre el contenido de agua precipitable máxima (PW_{max}) posible y el valor real (PW_{obs}) durante el evento, expresado por la fórmula:

$$P_{max} = P_{obs} \cdot \frac{PW_{max}}{PW_{obs}} \quad (2)$$

donde PW_{max} corresponde al menor valor entre la saturación local (PW_{sat}) y el valor extremo estacional (PW_{horz}) correspondiente a un valor con periodo de retorno de 100 años. Este método asume una relación lineal 1:1 entre humedad y precipitación (Beauchamp et al., 2013; Chen et al., 2017; Dilshan et al., 2025). En Chile central, se ha aplicado esta metodología, transponiendo tormentas desde regiones adyacentes y maximizando humedad con datos de radiosondas (Lagos-Zúñiga et al., 2014).

El proceso comienza con la selección de tormentas históricas relevantes para la cuenca analizada. Luego, para cada tormenta, se calcula la razón entre PW_{obs} y PW_{max} en cada estación o punto de grilla dentro de la cuenca. A continuación, se selecciona el mayor valor de esta razón, y se utiliza para maximizar todos los eventos de tormenta en cada estación o punto de grilla (transposición, ecuación 2). Finalmente, la PMP a escala puntual se define como el valor máximo obtenido en cada punto de grilla a partir de todas las tormentas maximizadas, mientras que la PMP a escala de cuenca corresponde al mayor valor promedio de la cuenca obtenido entre todas las tormentas maximizadas.

Esta integración de elementos físicos, como la humedad atmosférica y la topografía, ofrece estimaciones más realistas que los métodos puramente estadísticos y lo posiciona como estándar en diseños operativos, permitiendo consideraciones regionales específicas (Hansen et al., 1982; Rastogi et al., 2017). No obstante, el enfoque incurre en suposiciones altamente cuestionadas, como la linealidad en la relación humedad-precipitación que ignora interacciones no lineales en terrenos montañosos, por ejemplo, la condensación orográfica forzada por RAs, lo que introduce subjetividad en la transposición y limita su capacidad para capturar dinámicas complejas, especialmente en contextos de cambio climático en Chile central (Hiraga et al., 2024).

2.3.METODOLOGÍA BASADA EN MODELOS NUMÉRICOS DE BASE FÍSICA

Este enfoque emergente utiliza modelos numéricos de predicción (NWP, por sus siglas en inglés) para simular y maximizar eventos extremos históricos, resolviendo ecuaciones diferenciales de gobierno para generar campos de precipitación espacial y temporal. Los principios se centran en maximizar la precipitación mediante perturbaciones y traslaciones de los eventos de precipitación históricos, como el aumento de humedad relativa (HR) y el desplazamiento de sistemas para optimizar impactos orográficos, resolviendo ecuaciones de conservación de masa, momento y energía.

Para llevar a cabo esta maximización, se comienza con la selección de eventos extremos históricos relevantes, como tormentas inducidas por ríos atmosféricos en regiones como Chile central, que sirven como base para las simulaciones. A continuación, se configura el modelo numérico -e.g., Weather Research and Forecasting (WRF)- definiendo dominios anidados con resoluciones crecientes para capturar detalles topográficos y procesos locales, e incorporando parametrizaciones adecuadas para microfísica, convección y dinámica de la capa límite planetaria. Una vez establecido, se aplican perturbaciones a las condiciones iniciales y de borde, tales como incrementos proporcionales en la HR (Toride et al., 2019), o traslaciones geoespaciales (método ABCS, por sus siglas en inglés; Ishida et al., 2015) que simulan la transposición óptima de la tormenta hacia la cuenca de interés, maximizando el flujo de humedad y los efectos orográficos. Estas modificaciones se realizan en un conjunto de diferentes simulaciones, explorando rangos de variabilidad para identificar la combinación que genera la precipitación máxima posible.

Esta metodología no solo incorpora interacciones físicas complejas, como la dinámica de RAs en terrenos andinos, sino que también facilita la integración de escenarios de cambio climático al ajustar condiciones futuras en las simulaciones (Ohara et al., 2011; Ishida et al., 2015; Toride et al., 2019; Tarouilly et al., 2023; Hiraga et al., 2025b; NASEM, 2024). Sin embargo, su implementación demanda recursos computacionales intensivos y expertise en calibración de parametrizaciones del modelo atmosférico, lo que puede introducir incertidumbres adicionales si no se valida exhaustivamente, representando un reto para su adopción operativa en comparación con enfoques tradicionales (Mure-Ravaud et al., 2019; Hiraga et al., 2021). En este trabajo, solo se han realizado las traslaciones geoespaciales, mientras que las maximizaciones de humedad se están ejecutando actualmente.

3. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca la zona central de Chile, centrándose particularmente en las cuencas de los ríos Aconcagua (ARB), Maipo (MRB) y Rapel (RRB), una región de vital importancia hidrográfica y socioeconómica. Esta zona se caracteriza por un clima mediterráneo, con precipitaciones concentradas principalmente en el semestre frío (otoño-invierno) y veranos secos, junto con una notable variabilidad interanual de las lluvias (Garreaud et al., 2009). Su topografía es compleja, con elevaciones que superan los 6,000 metros en los Andes, presentando una transición abrupta desde las llanuras costeras hasta los Andes, lo que influye significativamente en los patrones de precipitación extrema inducida por RAs. Además, esta región alberga cerca del ~55% de la población nacional (INE, 2024), destacándose como un núcleo económico y demográfico clave que enfrenta desafíos hídricos crecientes. La Figura 1 ilustra esta diversidad topográfica y la extensión de las cuencas, resaltando su relevancia para el estudio de la PMP.

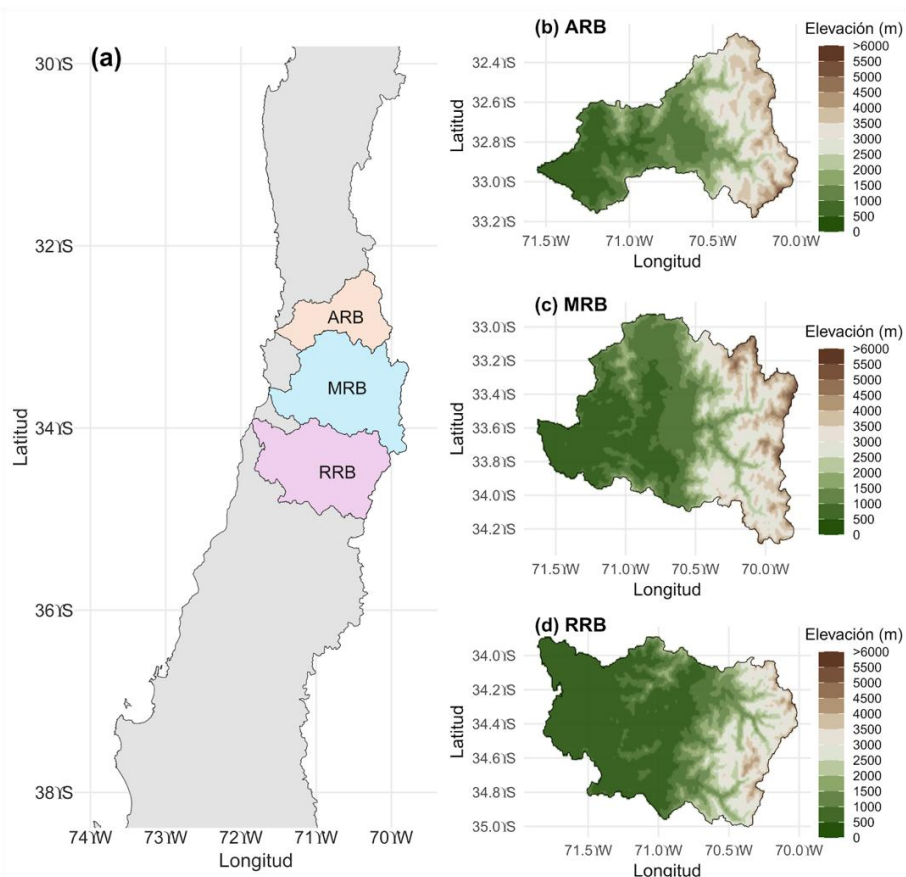


Figura 1. Ubicación y características topográficas de las cuencas analizadas. (a) Mapa de ubicación de las tres cuencas en la zona central de Chile: cuenca del río Aconcagua (ARB), cuenca del río Maipo (MRB) y cuenca del río Rapel (RRB). Paneles (b), (c) y (d) muestran la topografía de cada cuenca respectivamente, con una escala de elevación en metros sobre el nivel del mar.

3.1.DATOS

Para el análisis comparativo de las metodologías de estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) en las cuencas ARB, MRB y RRB en la zona central de Chile (Figura 1), se utilizaron diferentes conjuntos de datos según el enfoque metodológico empleado, todos

derivados del conjunto de reanálisis ERA5 y ERA5-Land del Centro Europeo de Pronósticos a Plazo Medio (ECMWF). Los datos de ERA5 proporcionan información horaria de variables atmosféricas, superficiales y oceánicas, y han sido ampliamente validados por su precisión en representaciones climáticas globales (Hersbach et al., 2020).

Para los métodos estadístico e hidrometeorológico, el análisis se basó en el registro completo de tormentas desde 1950 hasta 2023, abarcando todos los eventos disponibles en este período. Estos enfoques utilizaron series históricas de precipitación máximas en ventanas de 24 horas. En contraste, para la metodología basada en modelos numéricos de base física, se seleccionaron únicamente los cinco eventos de precipitación extrema más significativos por cuenca, identificados como aquellos que generaron la mayor precipitación acumulada a nivel de cuenca en 24 horas, los que son detallados en la Tabla 1. Estos eventos, registrados entre 1950 y 2023, fueron elegidos para maximizar la representatividad histórica de los escenarios más extremos asociados a RAs, sirviendo como base para las simulaciones realizadas con este enfoque.

Tabla 1. Eventos de precipitación extrema seleccionados por cuenca (ARB, MRB y RRB) entre 1950 y 2023, correspondientes a los cinco mayores acumulados de 24 horas a nivel de cuenca, usados como casos de referencia para las simulaciones con modelos numéricos de base física.

ID	ARB		MRB		RRB	
	Evento	P [mm]	Evento	P [mm]	Evento	P [mm]
1	04/07/1984	147.5	04/07/1984	147.1	04/07/1984	138.7
2	20/07/1978	124.1	20/07/1978	138.8	20/07/1978	137.7
3	04/06/2002	112.3	03/06/2002	115.5	10/08/1965	136.5
4	19/07/2001	102.0	27/06/1982	113.0	14/07/1987	133.9
5	12/07/2006	100.8	10/08/1965	109.6	16/06/1986	117.8

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la estimación de la PMP utilizando las tres metodologías descritas: estadística, hidrometeorológica y basada en modelos numéricos de base física. Se comparan los valores obtenidos para una duración de 24 horas, enfocándose en las diferencias entre los enfoques, tanto a escala de cuenca como a escala puntual, con especial énfasis en el método de base física.

4.1. ESCALA DE CUENCA

Para obtener la PMP mediante el método de base física, se emplea el modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF) para simular y maximizar eventos extremos históricos. Se maximizan tormentas históricas relevantes presentadas en la sección 3.1 mediante la perturbación de las condiciones iniciales y de borde, utilizando únicamente la transposición de la posición de la tormenta mediante desplazamientos geoespaciales (método ABCS; Ishida et al., 2015) al norte o sur en rangos de -5° a $+5^{\circ}$, optimizando el impacto orográfico en la cuenca. Cabe destacar que, en esta fase, solo se han realizado las traslaciones geoespaciales, mientras que la maximización de humedad (Hiraga et al., 2021), se encuentra actualmente en ejecución. Estas variaciones generan un conjunto de múltiples

escenarios que exploran las diferentes combinaciones posibles (entre la modificación de la humedad y la transposición de tormentas) para identificar la precipitación máxima en la cuenca de estudio para la tormenta bajo análisis.

A modo de ejemplo, en el Evento Histórico 1 (4 de julio de 1984, Tabla 1), la Figura 2 muestra cómo los desplazamientos latitudinales (shifts) afectan la precipitación máxima acumulada en 24 horas para las tres cuencas analizadas, intensificando los efectos orográficos en función de la dirección y magnitud del desplazamiento. Para la cuenca del río Maipo (MRB), se alcanza un máximo aproximado de 178 mm con un desplazamiento hacia el sur de $\sim 2.0^\circ$ (Figura 2b), representando un aumento de $\sim 20\%$ respecto al valor histórico; patrones similares se observan en ARB y RRB (Figura 2a y c). Cada punto en los gráficos representa una simulación individual dentro del conjunto de múltiples ejecuciones, cada una con una configuración específica de posición de la tormenta, lo que permite explorar variaciones en las transposiciones geospaciales para maximizar la precipitación a nivel de cuenca. Cabe destacar que, en esta fase del estudio, solo se realizaron las traslaciones de las tormentas, mientras que las maximizaciones de humedad relativa se encuentran en ejecución; no obstante, estudios previos en la misma zona de estudio (Hiraga & Meza, 2025) indican que estas podrían generar incrementos adicionales del orden del 20%-30% en la precipitación maximizada.

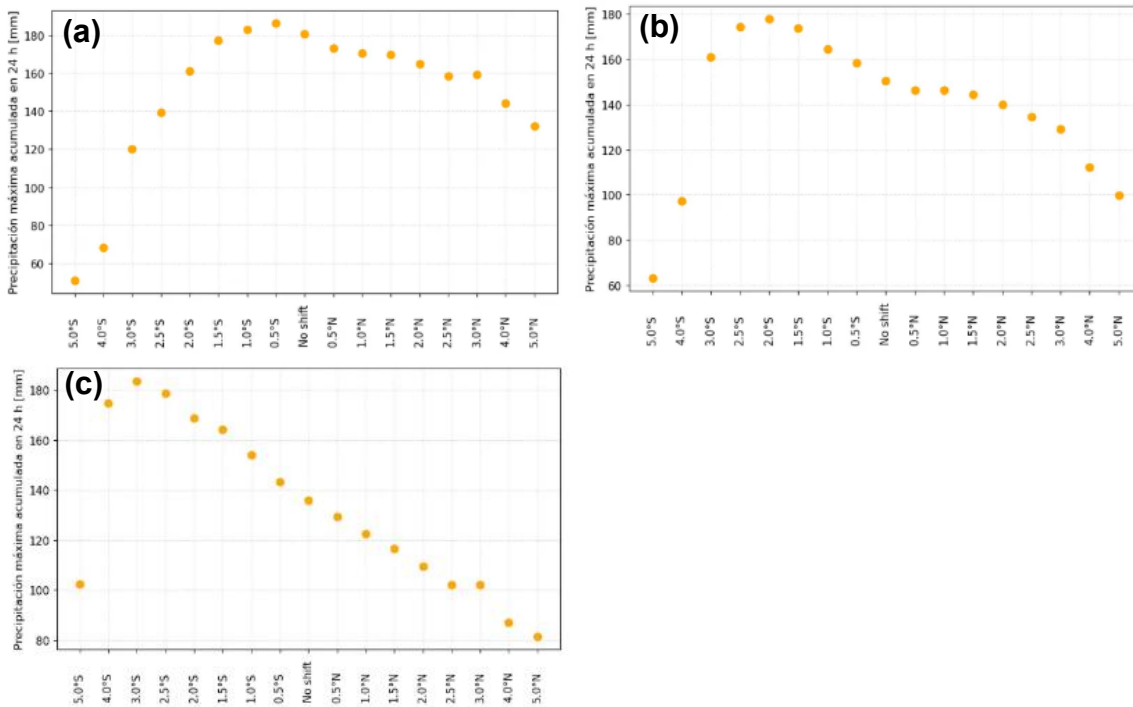


Figura 2. Precipitación máxima acumulada en 24 horas simulada bajo diferentes desplazamientos latitudinales (shifts) para el Evento Histórico 1 (4 de julio de 1984), considerando las cuencas de (a) ARB, (b) MRB y (c) RRB. El eje x representa los desplazamientos en grados latitudinales (S: sur, N: norte), mientras que cada punto corresponde a una simulación individual considerando una transposición geoespacial de la tormenta para maximizar los efectos orográficos.

El procedimiento de estimación se repite de forma idéntica para las otras tormentas y cuencas seleccionadas, generando múltiples realizaciones por evento. Posteriormente, se compara la

precipitación acumulada maximizada de todos los eventos considerados, seleccionando el valor más alto obtenido como la PMP para cada cuenca.

En el caso del método estadístico, primero se calcula la serie de precipitación máxima en 24 horas anual promedio de la cuenca (a partir del promedio espacial de todos los puntos de la grilla ERA5-Land), y luego se estima la PMP utilizando la ecuación (1). Por su parte, para el método hidrometeorológico, se aplica el procedimiento descrito en la sección 2.2

La Tabla 2 muestra los valores de PMP obtenidos para las tres cuencas bajo los distintos enfoques, considerando tormentas de 24 horas de duración. Se observa una marcada diferencia en las estimaciones de la PMP entre los métodos hidrometeorológico y estadístico en comparación con el enfoque de base física. Cabe destacar que, en el método de base física, solo se utilizó la transposición de tormentas para maximizar la precipitación, sin aplicar la maximización de humedad relativa, la cual se encuentra en ejecución y podría aumentar los valores actuales entre un 20% y 30% según estudios previos en la zona (Hiraga & Meza, 2025); esta incorporación es necesaria para una comparación más directa con el método hidrometeorológico. En particular, el método estadístico presenta las estimaciones más altas en todas las cuencas, con diferencias del orden de 89% en ARB, 115% en MRB y hasta 117% en RRB respecto al método de base física. Por su parte, el enfoque hidrometeorológico entrega resultados intermedios, con incrementos de aproximadamente 27%, 42% y 38%, respectivamente. De este modo, considerando el aumento proyectado por la maximización de humedad en el método de base física, es esperable que sus estimaciones se acerquen a las del enfoque hidrometeorológico.

Tabla 2. Valores estimados de PMP en milímetros (mm) para cada cuenca analizada, utilizando los tres enfoques metodológicos: basado en modelos numéricos de base física, enfoque hidrometeorológico y método estadístico.

Cuenca	PMP (mm)		
	Base Física	Hidrometeorológico	Estadístico
ARB	186	237	352
MRB	178	254	383
RRB	183	254	397

4.2. ESCALA PUNTUAL

Para realizar una comparación consistente con la filosofía del método estadístico, los enfoques de base física y meteorológico se aplican considerando cada punto de grilla como una cuenca independiente. De este modo, se obtiene la PMP a escala de punto de grilla. Dado que el enfoque de base física utiliza una resolución espacial específica, los resultados de los métodos estadístico y meteorológico se interpolan a dicha resolución mediante el método de interpolación por distancia inversa ponderada (*Inverse Distance Weighting*, IDW), con $\alpha=2$.

La Figura 3 muestra la distribución espacial de la Precipitación Máxima Probable (PMP) a escala de punto de grilla en la cuenca del Rio Aconcagua (ARB), estimada mediante los tres

enfoques metodológicos. Cada panel utiliza una escala de colores distinta, según los rangos de valores obtenidos por cada método. Se evidencian diferencias notables en la capacidad de los enfoques para representar la influencia del relieve sobre la distribución de la PMP. En particular, el método de base física (Figura 3a) es el único que reproduce adecuadamente el efecto orográfico, de manera consistente con los procesos físicos subyacentes, mostrando valores elevados de PMP entre los 2000 y 4000 metros de altura e, coincidiendo con las zonas de mayor elevación (véase Figura 1b). Este patrón concuerda con el ascenso forzado del aire sobre el relieve, que favorece la condensación y precipitación en zonas altas; sin embargo, en las partes más altas de la cuenca, sobre los 4000 metros, se observa una disminución en la magnitud acumulada de precipitación, probablemente debido a que la mayor cantidad de vapor de agua condensó antes de llegar a elevaciones más altas. En contraste, los enfoques hidrometeorológicos (Figura 3b) y estadístico (Figura 3c) muestran distribuciones más homogéneas y menos correlacionadas con el gradiente altitudinal, lo que indica una menor sensibilidad a la orografía local. Este comportamiento también se observa en las cuencas del Río Maipo (Figura 4) y Río Rapel (Figura 5), confirmando la consistencia del patrón entre cuencas.

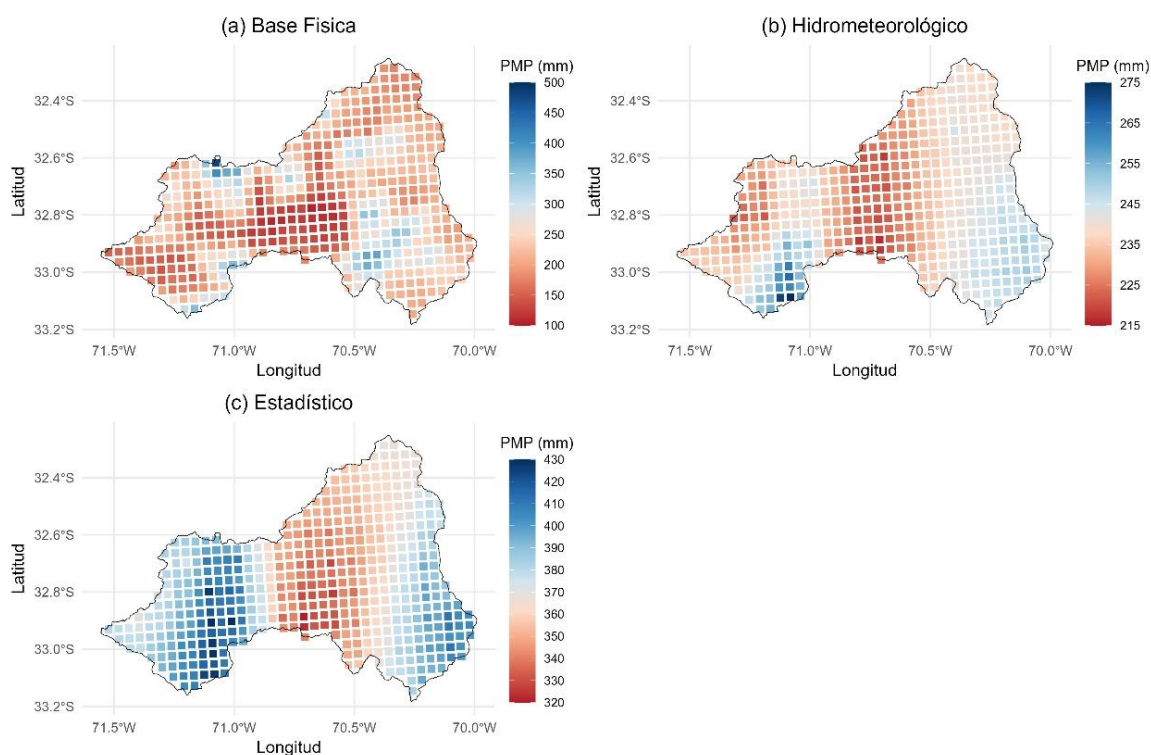


Figura 3. Distribución espacial de la Precipitación Máxima Probable (PMP) a escala de punto de grilla en la cuenca ARB, estimada mediante tres enfoques metodológicos: (a) modelo numérico de base física, (b) enfoque hidrometeorológico y (c) método estadístico. Cada panel presenta una escala de colores distinta para la PMP, de acuerdo con los rangos específicos de valores obtenidos en cada método.

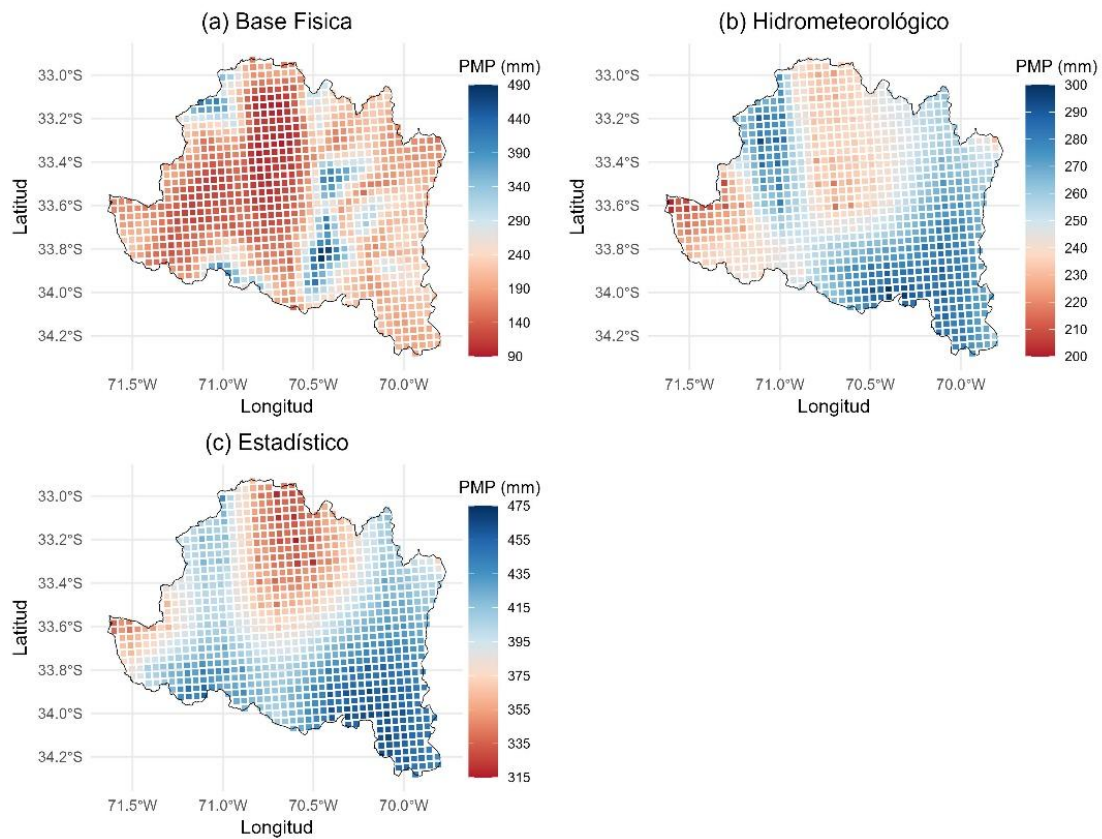


Figura 4. Igual que en la Figura 3, pero correspondiente a MRB.

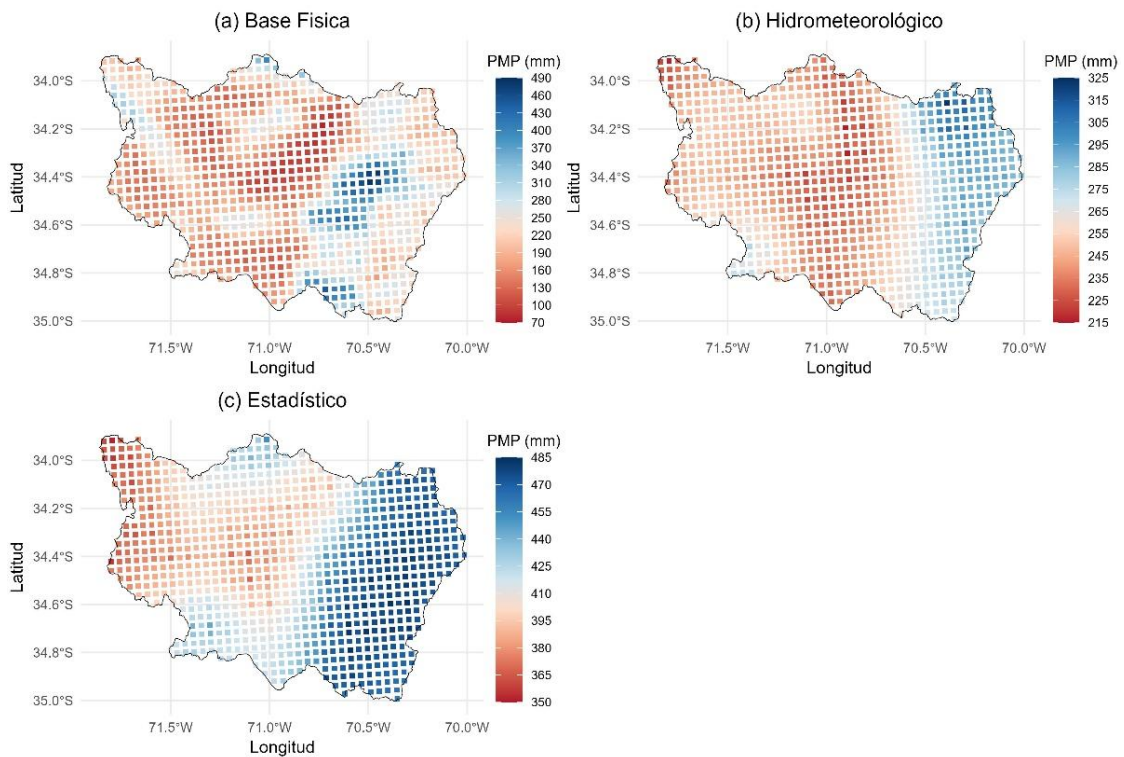


Figura 5. Igual que en la Figura 3, pero correspondiente a RRB.

5. CONCLUSIÓN

Este estudio presentó un análisis comparativo de tres enfoques metodológicos para la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) en cuencas de la zona central de Chile: el método estadístico de Hershfield, el enfoque hidrometeorológico basado en la maximización de humedad, y un enfoque emergente basado en modelos numéricos atmosféricos de base física. Estas metodologías fueron aplicadas considerando tanto la escala de cuenca como la escala puntual para una duración de 24 horas.

A escala de cuenca, se evidenciaron diferencias marcadas en las estimaciones de la PMP entre los métodos tradicionales y el enfoque de base física. En particular, el método estadístico presentó valores más altos, con diferencias del orden de 89% en ARB, 115% en MRB y hasta 128% en RRB respecto al método de base física, mientras que el enfoque hidrometeorológico mostró resultados intermedios, con incrementos de aproximadamente 27%, 43% y 46%, respectivamente, según la cuenca analizada. Cabe destacar que, en el método de base física, solo se utilizó la transposición de tormentas para maximizar la precipitación, sin aplicar la maximización de humedad relativa, la cual se encuentra en ejecución y podría aumentar los valores actuales entre un 20% y 30% según estudios previos en la zona (Hiraga & Meza, 2025). Estos resultados resaltan la relevancia de explorar enfoques que integren explícitamente procesos asociados a la termodinámica y dinámica atmosférica, así como interacciones orográficas, especialmente en regiones con topografía compleja como los Andes centrales.

A escala puntual, el método basado en modelos numéricos de base física mostró mayor capacidad para representar el efecto orográfico, reflejando patrones espaciales de PMP con valores elevados entre los 2000 y 4000 metros de elevación, alineados con las zonas de mayor elevación observadas en los mapas topográficos, aunque con una disminución en la magnitud acumulada sobre los 4000 metros, probablemente atribuible a la condensación previa del vapor de agua en elevaciones inferiores. No obstante, es esperable un aumento de la precipitación por encima de 4000 m al incorporar la maximización de la humedad relativa, tal como evidencian los resultados por zonas de Hiraga y Meza (2025) para tormentas de 72 h en MRB. En contraste, los enfoques estadístico e hidrometeorológico exhibieron distribuciones más homogéneas y poco sensibles al relieve, limitando su utilidad para capturar la variabilidad espacial real de la precipitación extrema. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de adoptar metodologías físicamente consistentes para obtener estimaciones más realistas y localizadas de la PMP, particularmente en el diseño de infraestructuras críticas ante escenarios de cambio climático. En conclusión, este estudio resalta el potencial de los modelos numéricos para mejorar la resiliencia hidráulica en regiones andinas, abriendo vías para futuras investigaciones que integren proyecciones climáticas y validaciones adicionales con datos observacionales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa de Apoyo a la Vinculación Internacional, Modalidad Estadías Cortas (MEC USM) 2024 de la Universidad Técnica Federico Santa María, y por el proyecto interno PI_LII_23_06, titulado “Estimación de la precipitación máxima probable (PMP) en un contexto de cambio climático: Un enfoque basado en métodos numéricos y estadísticos”.

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.
- Chen, X., Hossain, F., & Leung, L. R. (2017). Probable maximum precipitation in the US Pacific Northwest in a changing climate. *Water Resources Research*, 53(11), 9600-9622.
- Chow, V. Te. (1951). A general formula for hydrologic frequency analysis. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 32(2), 231-237.
<https://doi.org/10.1029/TR032I002P00231;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION>
- Dilshan, W., Hiraga, Y., & Kazama, S. (2025). Wildfire-Induced Enhancement in Downstream Flood Discharge in Watersheds of California. *Journal of Flood Risk Management*, 18(2), e70054.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Hansen, E. M. (1982). Application of probable maximum precipitation estimates: United States east of the 105th meridian (Vol. 55). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Hershfield, D.M. 1961. Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of the Hydraulics Division*. 87(5), 99-116. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000651>
- 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., Iseri, Y., Warner, M. D., Duren, A. M., England, J. F., & Levent Kavvas, M. (2024). Response of precipitation increases to changes in atmospheric moisture and its flux in the Columbia River Basin: WRF model-based precipitation maximization for PMP studies. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(3), 04024014.
- Hiraga, Y., & Meza, J. (2025). Extreme precipitation modeling and Probable Maximum Precipitation (PMP) estimation in Chile. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102274.
- Hiraga, Y., Tahara, R., & Meza, J. (2025a). A methodology to estimate Probable Maximum Precipitation (PMP) under climate change using a numerical weather model. *Journal of Hydrology*, 652, 132659.
- Hiraga, Y., Watanabe, S., Yamashita, T., & Takizawa, H. (2025b). Climate Change Effects on Probable Maximum Precipitation of Mesoscale Convective Systems: Model-based estimation and large ensemble-based frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 133724.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). Resultados Censo de Población y Vivienda 2024. <https://visor.censo2024.cl>
- Ishida, K., Kavvas, M. L., Jang, S., Chen, Z. Q., Ohara, N., & Anderson, M. L. (2015). Physically based estimation of maximum precipitation over three watersheds in Northern California: Relative humidity maximization method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(10), 04015014.
- Koutsoyiannis, D. (1999). A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water resources research*, 35(4), 1313-1322.
- Lagos-Zúñiga, M. A., & Vargas M, X. (2014). PMP and PMF estimations in sparsely-gauged Andean basins and climate change projections. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 2027-2042.
- Micovic, Z., Schaefer, M. G., & Taylor, G. H. (2015). Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 521, 360-373.
- Mure-Ravaud, M., Dib, A., Kavvas, M. L., Yegorova, E., & Kanney, J. (2019). Physically based storm transposition of four Atlantic tropical cyclones. *Science of the Total Environment*, 666, 252-273.

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). 2024. Modernizing Probable Maximum Precipitation Estimation. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/27460>.
- Ohara, N., Kavvas, M. L., Kure, S., Chen, Z. Q., Jang, S., & Tan, E. (2011). Physically based estimation of maximum precipitation over American River watershed, California. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(4), 351-361.
- Rastogi, D., Kao, S. C., Ashfaq, M., Mei, R., Kabela, E. D., Gangrade, S., ... & Anantharaj, V. G. (2017). Effects of climate change on probable maximum precipitation: A sensitivity study over the Alabama-Coosa-Tallapoosa River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(9), 4808-4828.
- Stöwhas, L. (1983). Precipitaciones máximas diarias en Chile. In VI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica (pp. 455–473). Santiago, Chile.
- Sherif, M., Almulla, M., Shetty, A., & Chowdhury, R. K. (2014). Analysis of rainfall, PMP and drought in the United Arab Emirates. *International journal of climatology*, 34(4).
- Tarouilly, E., Cannon, F., & Lettenmaier, D. P. (2023). Improving confidence in model-based probable maximum precipitation: how important is model uncertainty in storm reconstruction and maximization?. *Journal of Hydrometeorology*, 24(2), 257-267.
- Toride, K., Iseri, Y., Warner, M. D., Frans, C. D., Duren, A. M., England, J. F., & Kavvas, M. L. (2019). Model-based probable maximum precipitation estimation: How to estimate the worst-case scenario induced by atmospheric rivers?. *Journal of Hydrometeorology*, 20(12), 2383-2400.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. (2018). Impacts of Atmospheric Rivers on Precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671- 1687. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0006.1>
- World Meteorological Organization (WMO). 2009. Manual on estimation of probable maximum precipitation. WMO–No 1045, Geneva, Switzerland. ISBN:978-926-3101045-9 <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00879-5>
- Xiong, J., Guo, S., Abhishek, Yin, J., Xu, C., Wang, J., & Guo, J. (2024). Variation and attribution of probable maximum precipitation of China using a high-resolution dataset in a changing climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(8), 1873-1895.