

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

INCERTEZA NA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL COM O MÉTODO DE HERSHFIELD: O EFEITO DE NOVOS REGISTROS HIDROLÓGICOS EXTREMOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Mino Viana Sorribas¹; Fernando Mainardi Fan²; Diogo Costa Buarque³; João Batista Dias de Paiva⁴; Nilson Oliveira⁵

Abstract: in this study, the Probable Maximum Precipitation (PMP) was estimated with the objective of assessing the associated uncertainties and the impact of recently observed extreme hydrological events. The analysis focused on the record-breaking precipitation event that occurred in May 2024 in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. PMP estimates were compared under retrospective, pre-event, and post-event scenarios using the statistical method proposed by Hershfield, applying two distinct approaches: an empirical K-factor derived from local historical series and a constant K-factor equal to 15. The results demonstrate that the inclusion of new extreme data can result in important alterations in PMP estimates, with sensitivity being most pronounced when the empirical K-factor was applied. Although the fixed, more conservative K-factor yielded more stable results, the 2024 event also led to notable changes in PMP values. This sensitivity has important implications for the design of hydraulic structures and hydrological risk management. The findings suggest that previous PMP assessments in the study region may be underestimated if recent events are disregarded, particularly when the K-factor was empirically derived rather than taken from the original Hershfield nomograph. Ultimately, the study highlights the critical importance of continuously updating historical precipitation records and regularly reassessing statistical parameters to ensure that PMP estimates remain robust and aligned with current hydrometeorological conditions.

Resumo: neste estudo, a Precipitação Máxima Provável (PMP) foi estimada com o objetivo de avaliar as incertezas associadas e o impacto de novos eventos hidrológicos extremos recentemente observados. A análise teve como foco o evento de precipitação recorde ocorrido em maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Foram comparadas as estimativas de PMP em cenários de retrospectiva, pré- e pós-evento, utilizando o método estatístico de Hershfield com duas abordagens distintas: o fator K empírico, derivado de séries históricas locais, e o fator K igual a 15. Os resultados evidenciam que a inclusão de novos dados extremos pode resultar em alterações importantes nos valores estimados de PMP. Nessa aplicação, a sensibilidade foi maior quando se utilizou o fator K empírico. O uso do fator K mais conservador mostrou-se mais estável, porém o evento de 2024 também causou alterações relevantes nos valores da PMP. A sensibilidade tem implicações relevantes no contexto de estruturas hidráulicas e a gestão de riscos hidrológicos. Os resultados indicam que quaisquer estudos anteriores na região em análise podem ter os valores de PMP subestimados, se desconsiderados os eventos recentes, principalmente se o K utilizado foi determinado empiricamente a partir dos dados, e não do gráfico de Hershfield. Por fim, fica evidente que a atualização das séries

¹ Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (mino.sorribas@gmail.com)

² Instituto de Pesquisas Hídricas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (fernando.fan@ufrgs.br)

³ Labhig, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES (diogo.buarque@ufes.br)

⁴ Fluvial Consultoria e Projetos em Engenharia (jbdpaiva@gmail.com e fluvialengenharia@gmail.com)

⁵ Fluvial Consultoria e Projetos em Engenharia (nilsontoliveira@gmail.com)

históricas e a reavaliação contínuas dos parâmetros estatísticos são fundamentais para garantir estimativas de PMP robustas e alinhadas à realidade atual.

Palavras-Chave – Hidrologia Estatística, Eventos Hidrológicos Extremos, Precipitação Máxima Provável

INTRODUÇÃO

A precipitação máxima provável (PMP) é definida como a maior quantidade de precipitação possível, do ponto de vista atmosférico, para uma dada duração, em uma bacia hidrográfica ou em uma determinada área, em uma localização específica e durante um período específico do ano, sem considerar tendências climáticas de longo prazo (OMM, 2009). Uma das finalidades da estimativa da PMP é calcular a cheia máxima provável (CMP ou QMP), utilizada no dimensionamento ou verificação de um projeto hídrico, como uma barragem e de suas estruturas de descarga. Por outro lado, os procedimentos para estimar a PMP são de difícil padronização, pois dependem da quantidade e qualidade dos dados disponíveis, do tamanho e da localização da bacia, da topografia da bacia e da região, dos tipos de tempestades que geram precipitações extremas e do clima (OMM, 2009).

A OMM (2009) apresenta seis métodos que podem ser utilizados para a estimativa da PMP: (i) Método local (maximização da tempestade local ou modelo local); (ii) Método de transposição (transposição de tempestades ou modelo de transposição); (iii) Método de combinação (maximização temporal e espacial da tempestade ou combinação de tempestades ou modelo de combinação); (iv) Método inferencial (modelo teórico ou modelo de raciocínio); (v) Método generalizado (estimativa generalizada); (vi) Método estatístico (estimativa estatística).

Dessa lista, o último método tem sido recomendado pela OMM devido a sua simplicidade e capacidade de estimar a PMP considerando apenas dados de chuva observados, no caso, as chuvas máximas (OMM, 2009; Casas et al., 2008; Xiong et al. 2024). O método estatístico recomendado foi proposto por Hershfield a partir de dados de cerca de 2700 postos pluviométricos dos Estados Unidos (90% dos dados). O manual da OMM para estimativa da PMP indica que o método foi considerado adequado para áreas de até 1.000 km², porém é permissivo com a espacialização dos resultados pontuais em áreas maiores. Esse tipo procedimento pode ser realizado via interpolação dos campos de PMP ou dos parâmetros estatístico pontuais, ou mesmo, diretamente a partir de grades de chuva por satélite, se utilizada essa fonte de dados (Pinto et al. 2001; Yang et al. 2018; Xiong et al. 2024.). Por ser um método baseado em dados observados, a aplicação e resultados do método de Hershfield podem variar conforme se aumenta o número de registros na série de dados ao longo do tempo, em especial quando ocorrem novos eventos extremos recordes.

Em abril e maio de 2024, ocorreu um evento de precipitação sem precedentes no sul da América do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Os acumulados de precipitação chegaram a 600 mm em 3 dias, 750 mm em 7 dias e 900 mm em 14 dias, em pontos monitorados. Segundo Collischonn et al. (2024), a chuva que ocorreu no Rio Grande do Sul superou amplamente os eventos de precipitação de grande escala mais intensos já registrados historicamente no Brasil, no período de 1961 a 2022, pelo menos para áreas com extensão entre 2.000 e 100.000 km² e durações de precipitação entre 3 e 14 dias, configurando-se como o novo recorde de volume de precipitação no Brasil.

Considerando o evento ocorrido e que o método de Hershfield é amplamente utilizado no dimensionamento da PMP para estruturas hidráulicas no Brasil, algumas questões são levantadas: o quanto os resultados do método de Hershfield são alterados considerando este novo evento recorde na série histórica? As PMPs projetadas com o método antes da ocorrência deste evento podem estar

subestimadas? As PMPs projetadas com o método antes da ocorrência do evento podem ter sido superadas? Qual o significado deste evento de 2024 para o cálculo da PMP com o método de Hershfield para o sul do Brasil e para as obras hidráulicas existentes?

Este trabalho propõe iniciar a resposta destas perguntas, por meio de um estudo de estimativa da PMP sem e com o evento de 2024 considerado na série histórica em estações selecionadas para análise.

METODOLOGIA

Estimativa da PMP

A precipitação máxima provável tem sido estimada utilizando o método de Hershfield (1961, 1965) que é um padrão reconhecido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Nesse procedimento a PMP é expressa em termos de parâmetros estatísticos, sendo de fácil uso e compreensão. É possível interpretar o método pela fórmula geral de análise de frequência hidrológica de Chow (1951):

$$P = \bar{P} + \Delta P = P + K \cdot \sigma \quad (1)$$

Essa fórmula indica que um valor hidrológico (P) pode ser representado pela média de todos os valores da série (\bar{P}) mais um certo desvio (ΔP) em relação a essa média. O desvio é aleatório e pode ser grande ou pequeno, negativo ou positivo, e possui duas propriedades importantes: (i) desvio da média, representado pelo desvio padrão (σ); e (ii) a frequência de ocorrência, representado pelo fator de frequência (K).

O método para cálculo da PMP segue essa mesma lógica, de forma que se pode considerar a aplicação para a precipitação máxima diária:

$$P_{max} = \bar{P}_n + K_m \cdot s_n \quad (2)$$

onde: P_{max} é a precipitação diária máxima observada no local de interesse, \bar{P}_n e s_n são a média e o desvio padrão da série de precipitações diárias máximas anuais, respectivamente, e K_m é o fator de frequência.

Portanto, a partir de uma série de dados diários observados em um local, a aplicação da equação anterior considera os seguintes passos:

1. Agregação temporal: calcula-se os valores máximos de precipitação diária em cada ano da série, obtendo assim a série de precipitação diária máxima anual
2. Determinação dos parâmetros estatísticos:
 - calcula-se a média e o desvio padrão da série obtida no passo 1
 - calcula-se a média e o desvio padrão da série obtida no passo 1, excluído o valor máximo da série
3. Determinação do fator de frequência: gráficos de Hershfield (figura 1) ou estimativa empírica (ver equação 3 abaixo)
4. Determinação da PMP: aplicação da equação 2

Inicialmente Hershfield propôs adotar o valor de K_m igual a 15, porém análises posteriores permitiram a construção do gráfico de referência (Figura 1). Nessa abordagem, o valor do fator de

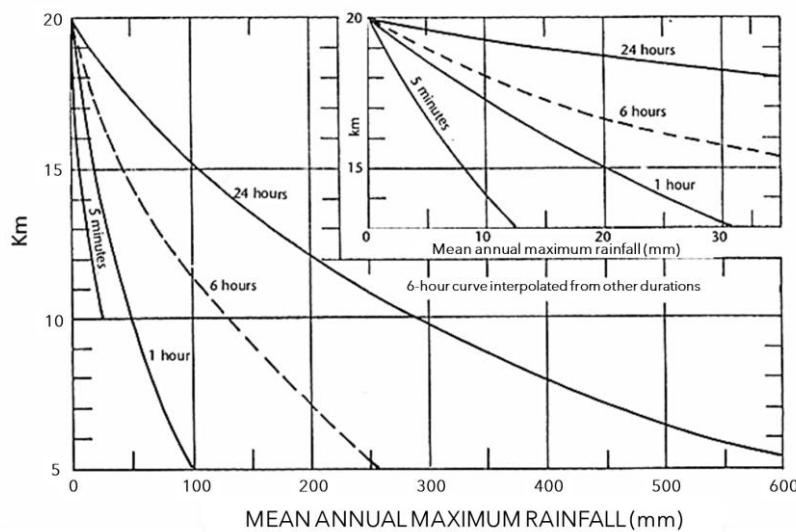
frequência varia entre 5 e 20, em função da precipitação média da série de máximas anuais, com curvas para diferentes durações (Hershfield 1965 apud WMO, 2009). Existem sugestões de ábacos adicionais desenvolvidos pelo mesmo autor que permitem refinar a estimativa considerando o efeito do tamanho da série utilizada, porém a alteração é mais relevante para séries muito curtas. A análise de Koutsoyiannis (1999) corrobora a robustez do método mesmo após décadas de uso e aponta que o fator de frequência igual a 15 equivale a um ajuste das precipitações máximas para um tempo de retorno de pelo menos 60.000 anos, além relatar estudos que sugerem valores superiores a 100.000 anos como referência para a PMP. Por fim, cabe mencionar que uma vez que o método original de Hershfield foi desenvolvido com base em registros de precipitação dos Estados Unidos, isso é algo a ser considerado em sua extração direta para outras regiões, como no Brasil.

Assim, uma forma também utilizada para avaliar a PMP consiste em estimar o fator de frequência a partir dos dados observados, utilizando uma forma invertida da equação que explicita o fator K:

$$K = \frac{P_M - \bar{P}_{n-m}}{s_{n-m}} \quad (3)$$

onde P_M é o maior registro da série de máximas anuais; \bar{P}_{n-m} e s_{n-m} são a média e o desvio padrão da série anual, respectivamente, excluído o maior valor da série. Além disso, a avaliação regional dos valores obtidos permite o desenvolvimento de envoltórias regionais (Casas et al. 2008; Casas et al. 2010).

Figura 1 – Gráfico de Hershfield para o fator de frequência (fonte: WMO, 2009)



Abordagem aplicada

Neste estudo o método de Hershfield foi aplicado para calcular os valores de K e PMP estimados em postos pluviométricos do Rio Grande do Sul em uma comparação pré e pós-evento de 2024. A Tabela 1 demonstra que os registros de precipitação diária em maio de 2024 superaram os valores máximos anteriores em diversos locais. Assim, a proposta se resume em fazer uma análise da PMP retrospectiva (sem os dados de 2024) e comparar os resultados com a PMP estimados com os dados mais recentes (com os dados de 2024).

A análise foi realizada com os dados pluviométricos dos postos 2850016, 2851044, 2951017, 2951070, 2952001, 2952038 coletados na plataforma Hidroweb do SNIRH. Nesse estudo, as estatísticas (média, desvio padrão, máxima) agregadas em escala anual foram realizadas pelo ano calendário, pois a sazonalidade e ano hidrológico não são bem definidos nessa região. Além disso,

outras questões como a independência entre os eventos de setembro e novembro de 2023 ainda é tema a ser debatido; sobretudo na perspectiva dos efeitos nas condições de umidade do solo antecedente e implicações na grande cheia que decorreu em maio de 2024.

A comparação foi realizada considerando a estimativa do K empírica (eq. 3) e adotando K = 15 que, além de recomendado inicialmente por Hershfield, coincidentemente é compatível com a faixa de valores para as precipitações médias anuais da ordem de 90 a 110 mm (Tabela 1 e Figura 1).

RESULTADOS

A Tabela 1 resume os valores dos registros máximos nos postos pluviométricos para as séries de dados até (e incluindo) o ano de 2024 e até 2023. Além disso, apresenta-se o valor máximo da série até 2023 excluído o valor máximo (ver eq. 2). As células em destaque cinza na Tabela 1 indicam os valores máximos até 2024, com valores entre 187 e 398 mm/dia. Até 2023 os valores variavam entre 155 e 229 mm/dia. A Tabela 2 apresenta os valores de média e desvio padrão que também são necessários para computar os valores de K apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Registros de precipitação máxima diária para a séries anuais até (e incluindo) os anos de 2024, 2023 e até 2023 excluído o valor máximo.

Cenário	Até o ano de 2024		Até o ano de 2023		Até o ano de 2023, excluído o valor máximo	
Posto	Máximo (mm)	Data	Máximo (mm)	Data	Máximo (mm)	Data
2850016	229,5	2023-09-04	229,5	2023-09-04	184,4	2022-01-06
2851044	258,3	2024-05-02	180,0	1994-04-21	177,7	2017-06-08
2951017	187,6	2024-05-01	173,0	2008-10-25	165,0	1971-03-16
2951070	270,3	2024-05-02	172,4	2023-11-18	161,6	1997-04-16
2952001	314,0	2024-05-02	215,8	2002-08-09	199,5	2014-02-27
2952038	398,7	2024-05-02	155,0	2017-12-18	143,3	2023-11-18

Tabela 2. Média e Desvio Padrão das Máximas Anuais (mm) nos diferentes cenários.

Cenário	Parâmetro Posto	2850016	2851044	2951017	2951070	2952001	2952038
Até 2024	Média	110,6	105,1	88,7	104,9	112,9	115,5
	Desvio Padrão	46,4	41,6	28,7	39,3	48,3	69,4
Até 2023	Média	108,9	101,0	87,1	100,4	107,6	101,4
	Desvio Padrão	46,8	33,6	26,0	28,4	35,7	25,1
Até 2023, excluído o valor máximo	Média	103,2	98,9	85,7	98,4	104,7	98,5
	Desvio Padrão	39,2	31,3	23,7	26,1	31,2	22,3

A Tabela 3 apresenta os valores estimados do fator K em cada um dos postos, considerando os registros até 2024 e a retrospectiva pré-evento até 2023. É possível observar que os novos registros de 2024 causaram um aumento nos valores de K empíricos na maior parte dos casos (mediana entre postos de +72%) com efeito direto no aumento das estimativas de PMP. A mediana entre postos passou de 185 mm para 319 mm.

Tabela 3. Estimativa fator K e PMP diária com o método de Hershfield

Posto	N*	K (Empírico)		PMP (mm/dia) (K empírico)		PMP (mm/dia) (K = 15)		Chuva máxima observada (mm/dia)	
		2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023
2850016	23	3,22	3,22	260,2	259,7	806,3	810,3	229,5	229,5
2851044	39	4,68	2,59	300,0	188,0	729,4	604,8	258,3	180,0
2951017	63	3,87	3,68	199,8	182,8	519,6	477,0	187,6	173,0
2951070	38	5,98	2,84	339,8	181,1	694,7	526,9	270,3	172,4
2952001	39	5,78	3,56	392,1	234,6	837,4	643,1	314,0	215,8
2952038	21	11,83	2,53	936,0	164,9	1155,9	478,4	398,7	155,0
Mediana	-	5,23	3,03	319,9	185,4	767,8	565,8	264,3	229,5

* O número de registros na série de máximas anuais até 2024

Nota: o K empírico é calculado pela série excluindo o valor máximo.

O principal ponto de destaque é que as estimativas da PMP pelo K empírico com os dados até 2023 foram inferiores aos registros de chuva de 2024, na maior parte dos casos (ver destaque na Tabela 3). A mediana dos fatores K passou de 3 para 5, após a inclusão dos registros de 2024. Chama a atenção que mesmo em postos com mais de 30 anos, o efeito de aumento no valor do K e na PMP também foi considerável. A Tabela 3 apresenta também as estimativas da PMP com uma abordagem mais conservadora, com K=15, porém compatível com o gráfico de Hershfield para os postos em análise. Nesse caso, a comparação indica um aumento na PMP variante de 25 a 35%, decorrente da inclusão dos registros observados em 2024. Considerando os valores da PMP até 2023 entre 477 e 810 mm, essa incerteza pode resultar em incrementos da ordem de 150-250 mm, valores bastante expressivos para precipitações de 1 dia de duração. Outro aspecto relevante é que o posto com a série mais longa (>60 anos, 2951017) apresentou a menor alteração no fator K e na PMP calculada, em ambos os métodos.

Por fim, um caso mais extremo se apresentou para o posto 2952038, no qual o valor calculado da PMP atualizado se aproximou de 1000 mm. Há de se contemplar que essa série é relativamente curta e, portanto, com maior incerteza nos parâmetros estatísticos. Ainda assim, o novo registro de 398 mm é praticamente o dobro do máximo registrado anteriormente de 198 mm, e superior ao observado nos demais postos. O efeito isolado dessa alteração foi suficiente para aumentar a PMP em +140% ao utilizar K=15. Para o K empírico, o aumento foi de +468%, ou seja, de quase 5 vezes. Um experimento adicional utilizando o K = 5 (mediana entre postos) resultaria uma PMP de 462 mm, ou seja, um aumento de +180% na PMP em relação ao valor se o cálculo fosse realizado apenas com os dados pré-evento até 2023.

CONCLUSÃO

Como conclusão do trabalho, apresenta-se respostas para as questões propostas:

- **O quanto os resultados do método de Hershfield são alterados considerando este novo evento recorde na série histórica?**

Verificou-se que os novos eventos afetaram as estimativas de PMP para mais de 60% considerando a estimativa do K de empiricamente, sendo que no posto 2952038 este valor foi de cerca de 500%.

- **As PMPs projetadas (em outros estudos) com o método antes da ocorrência deste evento podem estar subestimadas?**

Caso as PMPs projetadas antes deste evento tenham usado um cálculo de K empiricamente, este estudo indica que a resposta é sim, provavelmente estão subestimadas, pois foram observadas chuvas maiores do que as chuvas calculadas com este método. Por outro lado, se os cálculos anteriores de PMP foram realizados com o valor limite proposto por Hershfield de K igual a 15, é possível que não estejam subestimadas, pois a análise indica que ao utilizar os dados até 2023 já gerou valores maiores do que os observados na série histórica.

- **As PMPs projetadas com o método antes da ocorrência do evento podem ter sido superadas?**

No mesmo raciocínio, caso tenham sido calculadas a partir de um K empírico, sim; e, caso tenham sido calculadas com K igual a 15 a resposta é não, para os locais analisados.

- **Qual o significado deste evento de 2024 para o cálculo da PMP com o método de Hershfield para o sul do Brasil e para as obras hidráulicas existentes?**

Em linhas gerais os resultados sugerem que a adoção de um K empírico como foi demonstrado aqui pode gerar subestimativas. Os resultados demonstram que a adoção de K igual a 15 é uma alternativa que preza pela segurança, já que os valores de PMP calculados não foram superados mesmo com o evento extremo. Sugere-se que explorar o estudo de envoltórias regionais para o fator de K de Hershfield baseada nos dados observados, bem como o efeito do tamanho das séries são temas a serem explorados para melhorar a compreensão e aplicabilidade do K empírico. Fica evidente que a contínua atualização das séries históricas e a reavaliação recorrente dos parâmetros estatísticos são fundamentais para garantir estimativas de PMP robustas e alinhadas à realidade atual.

Este trabalho demonstra que ainda há espaço para construir e avançar na discussão sobre as estimativas de PMP no Brasil. Fica evidente que análises de sensibilidade nas estimativas de PMP pelo método de Herhsfield podem ser necessárias, sendo um tema em aberto. Do ponto de vista prático e estatístico, uma alternativa seria definir e adotar estudos de precipitação máxima para um tempo de retorno bastante extremo, por exemplo, superiores a 60.000 anos ou 100.000 anos, porém reconhecendo que a incerteza no ajuste de distribuições para os quantis associados é fortemente influenciada pelo tamanho das séries históricas.. Além disso, o reconhecimento de mudanças climáticas globais e seus efeitos na intensificação de eventos hidrológicos amplia o leque de debate sobre as estimativas de PMP, seja em questões técnicas (i.e. modelo apropriado, limitações, não-estacionariedade, etc.) ou perspectivas conceituais (i.e. estatístico *versus* “fisicamente possível”), mas também nos desafios relacionados a aplicação e maximização hidrológica das cheias e QMP em grandes bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

- CASAS, M. CARMEN, et al. (2008) *The Estimation of Probable Maximum Precipitation: The Case of Catalonia*. Annals of the New York Academy of Sciences, 1146.1, 291-302.
- CASAS CASTILLO, M. (2010) *et al. Estimation of the Probable Maximum Precipitation in Barcelona (Spain)*. International Journal of Climatology
- CHOW, V. T. (1951) *A general formula for hydrologic frequency analysis*, Eos T. Am. Geophys. Un., 32, 231–237, doi:10.1029/TR032i002p00231.
- COLLISCHONN, W., BREDA, J. P. L. F. , CORREA, S. W., et al. (2024) *Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 29, p. e50-16, 2024. doi:10.1590/2318-0331.292420240088.
- PINTO, E. J. A. (2001) *Abordagem probabilística da estimativa da precipitação máxima provável pelo método de Hershfield*. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos do Países de Língua Portuguesa, Aracaju-SE.
- KOUTSOYIANNIS, D. (1999) *A Probabilistic View of Hershfield's Method for Estimating Probable Maximum Precipitation*, Water Resour. Res., 35(4), 1313–1322, doi:10.1029/1999WR900002.
- HERSHFIELD, D. M. (1961) *Estimating the probable maximum precipitation*. In: Journal of Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers., v. 87, n.5, New York Set., p.99-116.
- HERSHFIELD, D. M. (1965) *Method for estimating probable maximum rainfall*. In: Journal American Water Works Association., v. 57, n.8, New York, Ago., p.65-72.
- OMM – Organização Mundial de Meteorologia. (2009) *Manual for estimation of probable maximum precipitation*. World Meteorological Organization (WMO), Geneva. 190 p.
- XIONG, J., GUO, S., ABHISHEK, Yin, J., et al. (2024) *Variation and attribution of probable maximum precipitation of China using a high-resolution dataset in a changing climate*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 28, 1873–1895, doi:10.5194/hess-28-1873-2024.
- YANG, Y., TANG, G., LEI, X. et al. (2018) *Can Satellite Precipitation Products Estimate Probable Maximum Precipitation: A Comparative Investigation with Gauge Data in the Dadu River Basin*. Remote Sens. 10, 41. doi: /10.3390/rs10010041.