



Modelagem probabilística da precipitação pluvial em diferentes escalas temporais para Santa Helena, Paraná

Fabricio Correia de Oliveira¹, Lisiane Sobucki², Diego Venâncio Thomaz³ Tharsos Hister Giovanella⁴, Anderson Sandro da Rocha⁵

¹Professor e Pesquisador na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Santa Helena - Paraná - Brasil. Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas. E-mail: fcoliveira@utfpr.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-0667>

²Professora e Pesquisadora na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Santa Helena - Paraná - Brasil. Doutora em Ciência do Solo. E-mail: lisiane_sobucki@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1786-1048>

³Professor e Pesquisador na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Santa Helena - Paraná - Brasil. Doutora em Métodos Numéricos. E-mail: dvthomaz@utfpr.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4945-3065>

⁴Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas. Engenheiro Agrônomo. Email: tharsoshg@usp.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7890-5297>

⁵Professor e Pesquisador na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Santa Helena - Paraná - Brasil. Doutor Geografia (Análise Ambiental). E-mail: andersonrocha@utfpr.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-8209>

Artigo recebido em 29/11/2024 e aceito em 06/01/2025

RESUMO

A precipitação é um fenômeno que varia espacial e temporalmente. Visando contribuir com tomadas de decisões mais assertivas e sustentáveis no gerenciamento dos recursos hídricos, torna-se necessário identificar a função de densidade de probabilidade que melhor caracterize os eventos de precipitação, considerando diferentes escalas de tempo. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a precipitação provável em Santa Helena, Paraná, utilizando modelagem probabilística em escalas anual, mensal e decenal, com diferentes probabilidades de ocorrência de valores extremos, e identificar a Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) que melhor se ajusta aos dados objetivo deste trabalho foi determinar a precipitação provável em escala anual, mensal e decenal com várias probabilidades de ocorrência de valores extremos, selecionando a melhor função de densidade de probabilidade para Santa Helena, Paraná. Foram utilizados dados diários de precipitação de um período de 48 anos. As análises foram realizadas em três escalas de tempo: anual, mensal e decenal. Foram analisados os seguintes modelos de distribuição de probabilidade: Normal, Exponencial, Gama e Log-Normal. A avaliação do melhor modelo ajustado foi realizada utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov e determinação do p-valor. A análise probabilística identificou que a função de distribuição de probabilidade que melhor se ajustou foi a Log-Normal para as escalas anual e mensal, e a Exponencial para a escala decenal. O ajuste das funções de probabilidade possibilitou a determinação das chuvas prováveis para as escalas anuais, mensais e decenais, contribuindo para o monitoramento climático e o planejamento das atividades antrópicas dependentes da precipitação pluvial.

Palavras-Chave: clima úmido; densidade de probabilidade; eventos extremos; variabilidade climática.

Probabilistic modeling of rainfall at different time scales for Santa Helena, Paraná

ABSTRACT

Precipitation is a phenomenon that varies spatially and temporally. Aiming to contribute to more assertive and sustainable decision-making in water resource management, it is essential to identify the probability density function that best characterizes precipitation events at different time scales. Thus, the objective of this study was to determine the probable precipitation in Santa Helena, Paraná, using probabilistic modeling on annual, monthly, and 10-day scales, considering different probabilities of extreme value occurrences, and to identify the Probability Distribution Function (PDF) that best fits the data. Daily precipitation data spanning a 48-year period were used. Analyses were conducted on three-time scales: annual, monthly, and 10-day. The following probability distribution models were evaluated: Normal, Exponential, Gamma, and Log-Normal. The best-fitted model was assessed using the Kolmogorov-Smirnov test and the determination of the p-value. Probabilistic analysis identified that the Log-Normal distribution was the best fit for annual and monthly scales, while the Exponential distribution was the best fit for the 10-day scale. The adjustment of probability functions enabled the determination of probable precipitation for annual, monthly, and 10-day scales, contributing to climate monitoring and the planning of anthropic activities dependent on rainfall.

Keywords: humid climate; probability density; extreme events; climate variability.

Introdução

O Brasil tem sua economia baseada na produção agrícola, sendo o maior produtor e exportador de soja e o terceiro de milho do mundo (Bigolin & Talamini, 2024). O Paraná é responsável por boa parte da produção de grãos do Brasil, sendo o terceiro maior produtor de milho e soja. Essas culturas juntamente com as hortaliças e frutíferas compõem a base da economia do estado (Paludo et al., 2020).

Por outro lado, oscilações na produção agrícola surgem devido à ocorrência de pragas, doenças, mudanças no manejo do solo e extremos climáticos, que vem se tornando cada vez mais frequente com o agravamento das mudanças climáticas (Ghini et al., 2008; Sobenko et al., 2016).

Dentre as atividades econômicas, a agricultura é a que apresenta maior dependência das condições climáticas e meteorológicas. Os elementos meteorológicos que mais interferem no crescimento e no desenvolvimento das plantas são a temperatura do ar e a precipitação pluvial, que é responsável pela manutenção da umidade do solo em cultivos não irrigados (Sentelhas et al., 2015; Vieira et al., 2024).

Os impactos ambientais têm gerado grandes desafios no processo de planejamento das atividades agrícolas, uma vez que um bom planejamento deve ser realizado considerando ferramentas de tomadas decisão (Bittner et al., 2023). Entre as ferramentas disponíveis, os modelos probabilísticos são amplamente utilizados (Carvalho et al., 2022; Shen & Xiang, 2023), uma vez que podem prever e estimar parâmetros de interesse, como os elementos climáticos e meteorológicos (Carvalho et al., 2022) ou a produtividades dos cultivos agrícolas (Torsoni et al., 2023).

A precipitação é um fenômeno que flutua espacial e temporalmente. As mudanças climáticas têm causado maiores irregularidades nas frequências das precipitações, tornando mais comum a ocorrência de eventos extremos em muitas regiões (Huang et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zou et al., 2021).

Neste sentido, a determinação de Funções de Densidade de Probabilidade (FDPs) da precipitação, em escala local, pode auxiliar na caracterização dos eventos de precipitação ao longo do tempo, tendo em vista que essas variações têm impacto profundo na produção agrícola, na biodiversidade global e na vida humana (Espeland

& Kettenring, 2018; Habibullah et al., 2022; Shi et al., 2021).

A partir da caracterização estatística de séries históricas de dados de precipitação, pode-se determinar a precipitação provável com uma determinada probabilidade de ocorrência, em diferentes escalas de tempo. Essas informações contribuem com tomadas de decisões e planejamento de atividades agrícolas e do meio urbano (Assad et al., 2008; Bochenek, 2022; Matsunaga et al., 2024). Não obstante, é necessário identificar a FDP que melhor descreve a ocorrência das precipitações, bem como suas acumuladas e complementares, em nível local (Melo et al., 2023; Santos et al., 2021; Souza et al., 2018).

O estabelecimento da FDP mais adequada para uma determinada localidade e escala temporal, permite obter o risco associado à determina quantidade de chuva. O risco quantifica a probabilidade de ocorrência ou superação da chuva (Karczewski et al., 2022). Entretanto, a função mais adequada varia de acordo com o período de tempo considerado, de modo que a precipitação apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Na escala mensal, no estado do Mato Grosso, Brasil, observou-se que a função Exponencial predominou nos meses com menores acumulados de precipitação. Nos meses com maiores precipitações predominou as funções Normal e Esférica (Carvalho et al., 2022).

Entre as FDPs mais utilizadas destacam-se a Normal, Exponencial, Gama e Log-Normal (Yue & Hashino, 2007). A Gama é atualmente a FDP mais amplamente utilizada em caracterizações de precipitação (Montes-Pajuelo et al., 2024; Ye et al., 2018). No entanto, quando se avalia dados locais, outras funções podem ser mais adequadas, por exemplo, a função Log-Normal teve melhor ajuste para representar extremos de precipitação em Cacoal, Rondônia (Santos et al., 2018). Por outro lado, as funções Normal e Gama mostraram o melhor ajuste para os dados de precipitação do município de Pinhais, Paraná (Souza et al., 2020).

Nota-se que, o ajuste das FDPs depende das particularidades do local e da escala de tempo considerada, neste contexto, ressalta-se a importância de pesquisas locais para obtenção de resultados mais acurados.

Visando contribuir com tomadas de decisões mais assertivas e sustentáveis, torna-se necessário identificar a FDP que melhor caracterize os eventos de precipitação para o município de Santa Helena, Paraná, considerando

diferentes escalas de tempo. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a precipitação provável em Santa Helena, Paraná, utilizando modelagem probabilística em escalas anual, mensal e decendial, com diferentes probabilidades de ocorrência de valores extremos, e identificar a Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) que melhor se ajusta aos dados.

Material e métodos

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dados diários de precipitação de um período de 48 anos, compreendendo os anos de 1976 a 2023. A estação meteorológica fornecedora dos dados é de responsabilidade da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, representados pelo AGUASPARANÁ por meio do Instituto das Águas do Paraná (IAT). A estação está situada na bacia Paraná 3, sub-bacia 2, com as seguintes coordenadas geográficas: 24,78° S e 54,24° W e altitude de 261,2 m, Santa Helena, Paraná.

As análises foram realizadas em três escalas de tempo: anual, mensal e decendial. A agregação dos dados, bem como avaliações de

modelos foi realizada utilizando a linguagem de programação Python 3.0, por meio do ambiente virtual Google Colaboratory. Os dados anuais foram obtidos a partir da soma dos dados diários. Para obtenção dos dados mensais, foram somados os dados diários de cada mês separadamente entre todos os anos analisados.

Os dados decendiais acumulam a chuva ocorrida a cada dez dias. Assim, em um ano, foram formados 37 decêndios. Devido aos anos bissextos, o decêndio 37 variou no número de dias, podendo ser cinco ou seis dias. Em seguida, foram determinadas a média, mediana, primeiro e terceiro quartil, desvio padrão, máximo e mínimo da precipitação em cada escala de tempo analisada.

Visando avaliar diferentes FDPs que mais se adequem aos dados de precipitação para cada escala de tempo, foram analisadas as seguintes Funções de Distribuição Acumulada (FDAs): Normal, Exponencial, Gama e Log-Normal (Tabela 1). Para isso foram utilizadas as funções “stats.pdf” e “stats.cdf” da biblioteca scikit-learn (Virtanen et al., 2020).

Tabela 1 - Distribuições de probabilidades e suas respectivas funções de densidade de probabilidade (FDPs) e funções de distribuição acumulada (FDAs).

Distribuição de probabilidade	Funções de densidade de probabilidade (FDPs)	Funções de Distribuição Acumulada (FDAs)
Normal	$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right]$
Exponencial	$f(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$	$F(x; \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
Gama	$f(x; k, \theta) = \begin{cases} \frac{x^{k-1} e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$	$F(x; k, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x}{\theta}\right) & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
Log-Normal	$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right]$

*Em que: x - valor da variável aleatória; μ - parâmetro de localização (Normal, Log-Normal, Exponencial); σ - parâmetro de escala (Normal, Log-Normal); λ - parâmetro de taxa - $1/\beta$, sendo β o parâmetro de escala (Exponencial); k - parâmetro de forma (Gama); θ - parâmetro de escala (Gama).

A avaliação do melhor modelo de distribuição de probabilidade ajustado com os dados observados foi realizada utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) e determinação do p-valor. Para isso foram utilizadas as funções “scipy.stats”, “kstest” e “ksone.ppf” da biblioteca

scikit-learn. Esta função utiliza o método de Máxima Verossimilhança (MLE) para estimar os parâmetros das distribuições por meio da função “fit”.

Como critério de avaliação, com o teste KS foi determinado o Dsup (Eq. 1), o Dcrítico (valor

crítico obtido da tabela da distribuição KS) e o p-valor, considerando nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

$$Dsup = \sup_x |F_{emp}(x) - F_{teo}(x)| \quad (1)$$

O Dsup é a estatística do teste e corresponde a maior diferença absoluta entre a função de distribuição empírica dos dados observados - $F_{emp}(x)$ e a FDA da distribuição teórica em avaliação - $F_{teo}(x)$. Desta maneira, quanto menor o valor de Dsup, maior correlação dos dados observados com a distribuição teórica em avaliação, e assim, $F_{emp}(x)$ é um bom estimador de $F_{teo}(x)$. Se $Dsup < D_{crítico}$, não rejeita-se a hipótese de que a amostra dos dados de precipitação segue a distribuição em avaliação, ou seja, sob um erro de 5% pode-se afirmar que os dados foram retirados de uma população com a distribuição específica avaliada. Diante disso, maior o p-valor do teste KS.

Como alguns modelos não permitem valores nulos ou zeros, antes de ajustar as funções de distribuição, para cada valor de chuva foi adicionado 1000. Ao final dos ajustes, para representação dos resultados, este valor foi subtraído.

Após encontrar a melhor função de distribuição para cada escala de tempo avaliada, foram determinadas as precipitações prováveis considerando as seguintes probabilidades de

ocorrências: 90%, 80%, 75%, 50%, 25%, 20% e 10%. Para isso, foi utilizada a função “stats.ppf” da biblioteca scikit-learn, seguindo a especificidade de cada distribuição.

Para escala anual e mensal, também foi realizada uma análise de tendência dos valores de precipitação. Para isso, foi utilizado o teste de Mann-Kendall e ajuste de regressões lineares. A interpretação da análise foi feita por meio da estatística e tendência do teste de Mann-Kendall e do coeficiente angular da regressão linear.

Resultados e discussão

A análise da série histórica das chuvas ocorridas no período avaliado demonstrou que a precipitação média anual foi de 1748 mm, com máxima de 2246 mm, observada no ano de 1983 e mínima de 1003 mm, ocorrida no ano de 1978. A FDA que melhor se ajustou à série foi a Log-Normal (p-valor>0,05), que apresentou menor Dsup (0,051), sendo o Dcrítico de 0,192. Em relação à frequência dos acumulados anuais de chuva, observou-se que a maior frequência foi entre 1620 a 1774 mm. Também se observa que a tendência ficou muito próximo do valor médio, com variabilidade interanual grande, consequentemente, a tendência não foi significativa pelo teste de Mann-Kendall e do coeficiente angular da regressão linear (Figura 1).

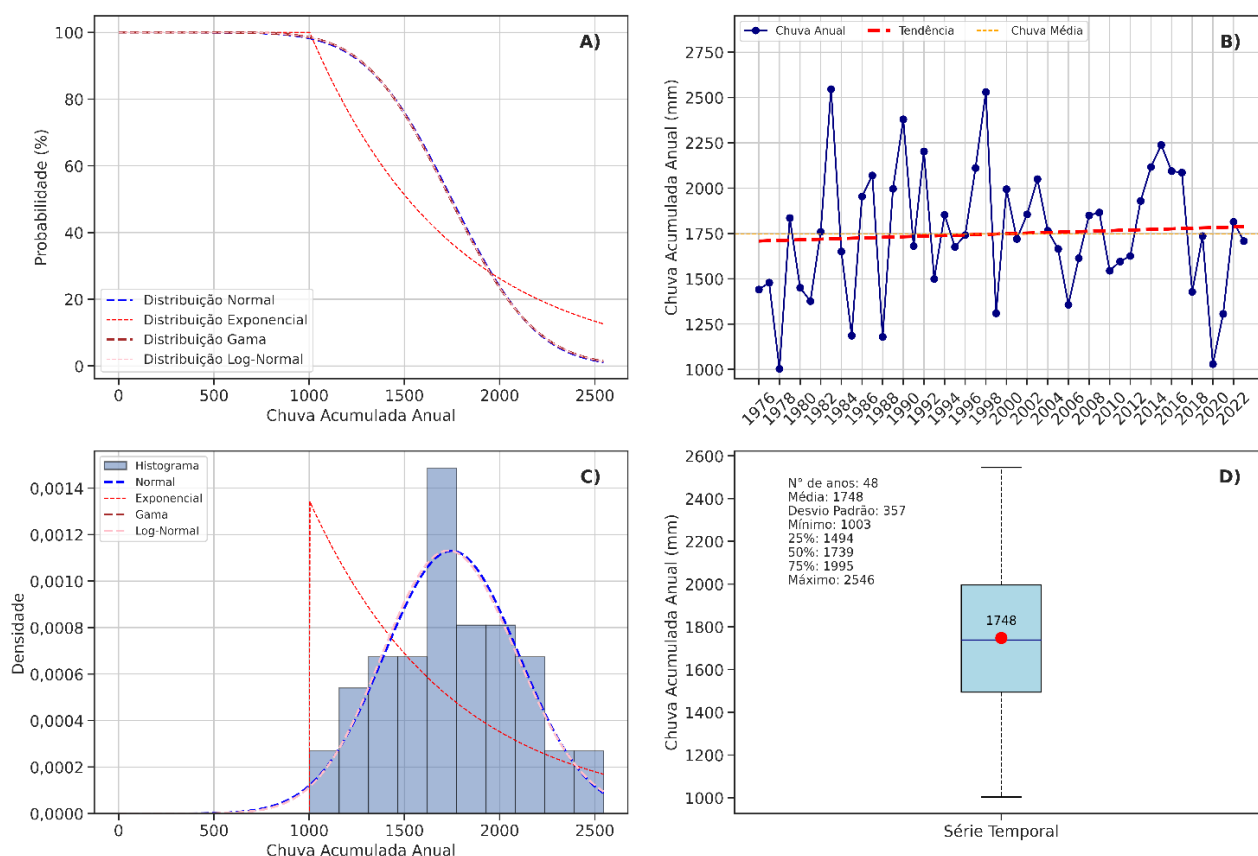


Figura 1 - Chuvas acumuladas anuais de 1976 a 2023 em Santa Helena, PR. A) Funções de Distribuição Acumulada - FDAs, B) Série temporal da chuva anual com tendência linear, C) Densidade e histograma dos dados de chuva anual e D) Box Plot da série temporal de dados.

As funções Gama e Normal, também se ajustaram à série, contudo com maiores p-valor e menores de Dsup. A função Exponencial não foi significativa (Figura 2).

	Coefficientes	Dsup	p-valor
FDAs	Log-Normal _loc = -9185,7; _esc = 10927,8	0,05125	0,99894
	Gama _form = 459,9; _esc = 16,5	0,05132	0,99892
	Normal _loc = 1747,8; _esc = 353,0	0,05667	0,99555
	Exponencial _loc = 1003,1; _esc = 744,7	0,26791	0,00156

Figura 2 - Funções de Distribuição Acumulada (FDAs) e seus coeficientes de localização (loc), escala (esc) e forma (form); Dsup e p-valor, em escala anual, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR.

Os valores do coeficiente angular, intercepto e estatística Mann-Kendall foram: 1,678; -1608,80; e, 64,0, respectivamente.

Em relação à chuva provável anual, a mesma foi determinada utilizando a função Log-Normal, uma vez que foi a que apresentou melhor aderência aos dados anuais. Observam-se maiores valores acumulados com menores probabilidades de ocorrências e vice-versa (Figura 3).

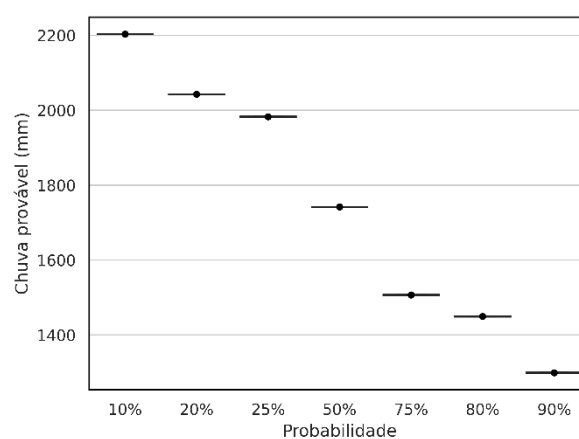


Figura 3 - Chuva provável anual para faixas de valores notáveis de probabilidade de igualar ou superar, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR.

A variação interanual acentuada dos valores acumulados de chuva caracteriza regiões com clima subtropical e sem ocorrências de períodos longos de seca durante o ano. Além disso, são regiões em que os fenômenos El Niño e La Niña influenciam periodicamente nos regimes de chuva (Baú et al., 2013; Schmoeller & Limberger, 2023).

Em relação à aderência dos dados, embora as funções Gama e Normal também tenham se ajustado aos dados, estatisticamente, a Log-Normal apresentou maior robustez, uma vez que caracterizou as assimetrias e variabilidades de valores extremos da série histórica de maneira mais adequada.

A distribuição Log-Normal indica que as precipitações anuais tendem a se concentrar em valores próximos à média, apresentando poucos eventos extremos de altas e baixas precipitações. Esta função foi reportada como adequada em diversas pesquisas que analisaram a aderência de dados de precipitação anual (Melo et al., 2023; Dourado Neto et al., 2005; Santos et al., 2018).

Para algumas atividades relacionadas ao gerenciamento dos recursos hídricos, como projetos de obras hidráulicas, projetos de sistemas de irrigação e planejamento do fornecimento de água no meio urbano, é importante o conhecimento da precipitação provável. Em geral, utiliza-se a probabilidade de 75%. Neste sentido, observou-se

que, existem 75% de probabilidade de chover 1507 mm ou mais, este valor poderá ser utilizado como referência para diversas ações de planejamento urbano e rural (Carvalho et al., 2022; Melo et al., 2023; Passos & Mendes, 2018; Souza et al., 2018).

As análises mensais da série histórica indicaram diferenças consideráveis entre os meses e os valores acumulados no próprio mês. Os meses com maiores variações foram fevereiro, com média e desvio padrão de $162,8 \pm 113,7$ mm e maio com média e desvio padrão de $165,7 \pm 113,0$ mm.

Estas variações sugerem que estes meses estão mais sujeitos a eventos extremos de precipitação, que podem estar associados a eventos climáticos específicos como, frentes frias, surgimento de Complexos Convectivos de Mesoescala (MCC), formação de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e ocorrência de El Niño ou La Niña (Nery, 2005; Schmoeller & Limberger, 2023).

Por outro lado, os meses com maiores estabilidades no regime pluviométrico foram março ($123,4 \pm 76,3$ mm) e julho ($94,2 \pm 75,0$ mm), uma vez que apresentaram menores variações. Para quatro meses foram reportados pelo menos um ano em que não houve precipitação no mês indicado, sendo os meses de abril, junho, julho e agosto (Figura 4).

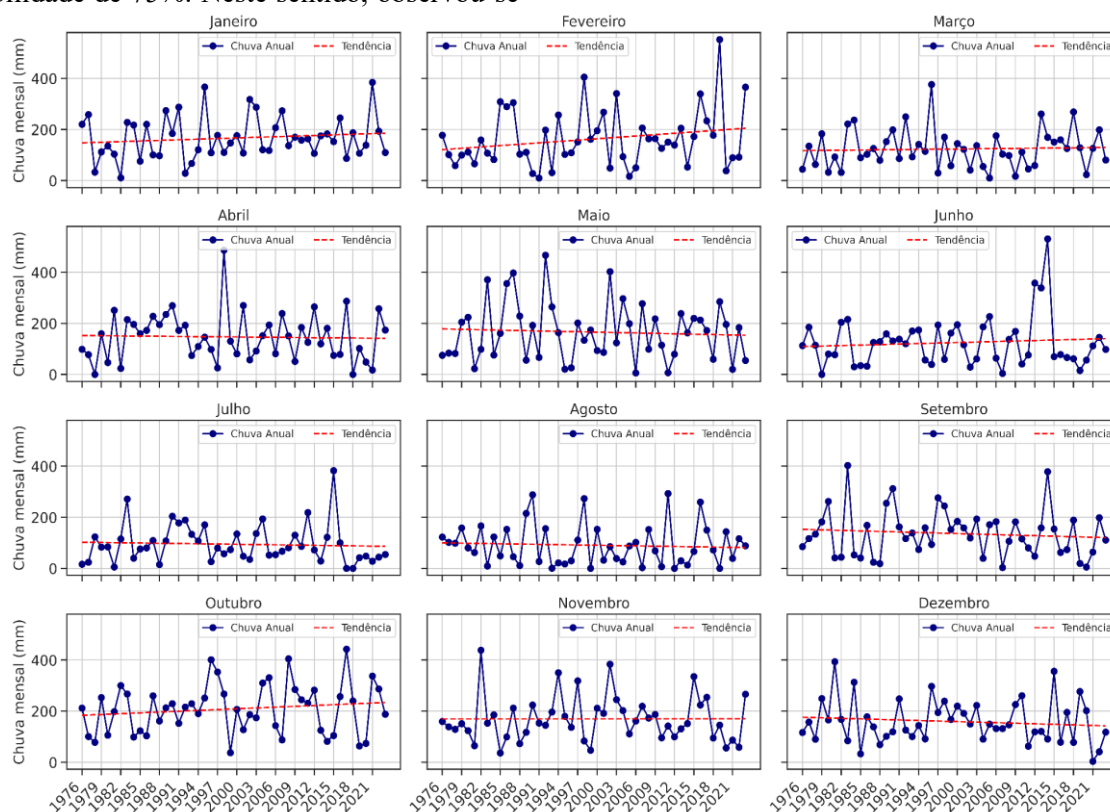


Figura 4 - Séries de acumulados de chuva mensal de 1976 a 2023 e linha de tendência linear para Santa Helena, PR.

A maior média de precipitação foi registrada em outubro (208,59 mm) e a menor média no mês de julho (90,33 mm). Estes valores estão alinhados com o comportamento climático típico da região oeste do Paraná, classificada como Cfa pela classificação de Köppen-Geiger, em que as principais características são verão quente, geadas pouco frequentes e chuvas concentradas, principalmente, nos meses de primavera e verão (Alvares et al., 2013; Rocha et al., 2024).

Em relação à tendência das chuvas em escala mensal, analisando o coeficiente angular, observa-se que seis meses apresentam tendência de crescimento (valores maiores que zero) e seis de decrescimento (valores menores que zero). Entretanto, a estatística e a tendência de Mann-Kendall, não indicaram tendências significativas ($p>0,05$) (Tabela 2).

Tabela 2 - Resultados da análise de tendência dos valores de chuva mensal.

Meses	Coeficiente angular	Intercepto	Tendência Mann-Kendall	Estatística Mann-Kendall
Janeiro	0,80	-1434,7	sem tendência	0,85
Fevereiro	1,78	-3389,9	sem tendência	1,42
Março	0,26	-392,1	sem tendência	0,44
Abril	-0,23	603,5	sem tendência	-0,48
Maiο	-0,53	1222,5	sem tendência	-0,19
Junho	0,66	-1192,6	sem tendência	0,12
Julho	-0,34	769,4	sem tendência	-0,58
Agosto	-0,39	871,0	sem tendência	-0,54
Setembro	-0,69	1517,6	sem tendência	-0,50
Outubro	1,07	-1928,4	sem tendência	1,03
Novembro	0,01	151,5	sem tendência	0,08
Dezembro	-0,72	1593,3	sem tendência	-0,81

Os meses de outubro e novembro foram os mais chuvosos, mesmo considerando o menor

acumulado destes meses, que foi de 37,1 mm e 36,1 mm, respectivamente (Figura 5).

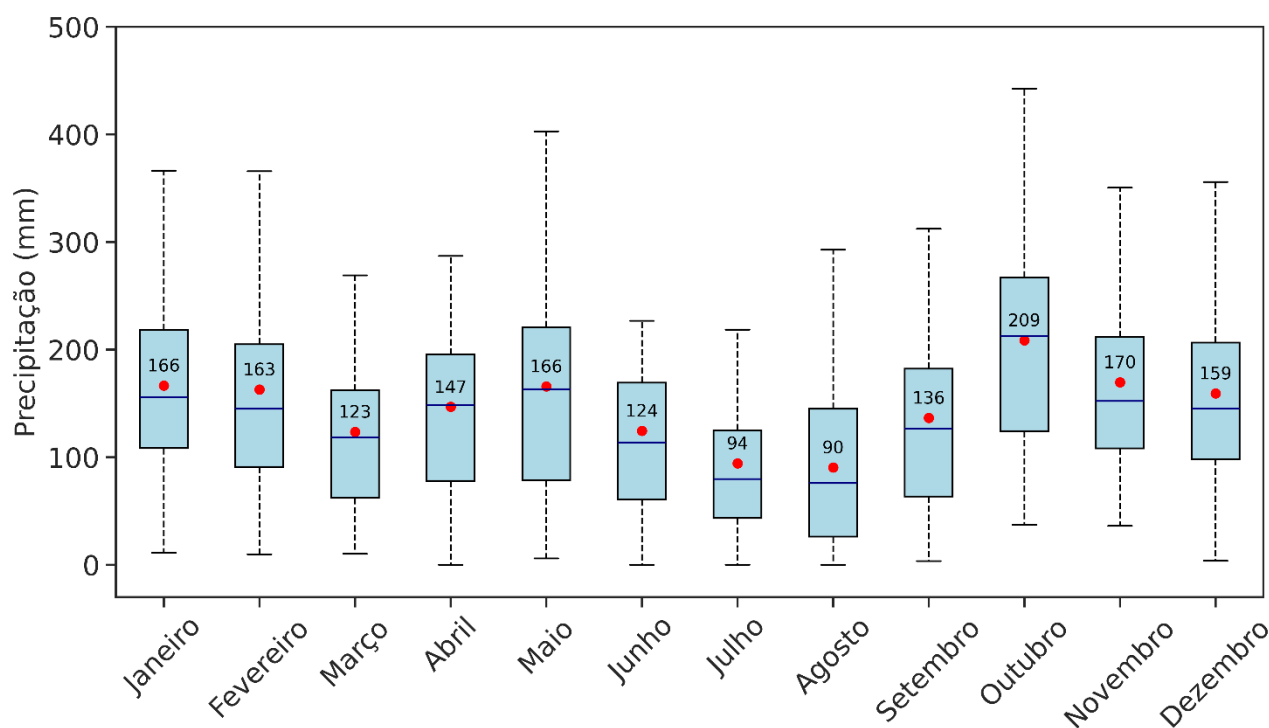


Figura 5 - Distribuição da precipitação mensal em Box Plot considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR. Pontos vermelhos representam a média, linha azul a mediana.

Em relação à FDA estatisticamente mais adequada para cada mês, observou-se que a distribuição Log-Normal foi mais apropriada, representando melhor ajuste em seis meses do ano (fevereiro, março, maio, setembro, novembro e dezembro). A distribuição Gama foi a melhor para

quatro meses do ano (janeiro, junho, julho e outubro). Os meses de abril e agosto foram melhores ajustados por distribuições Normal e Exponencial, respectivamente (Figura 6).

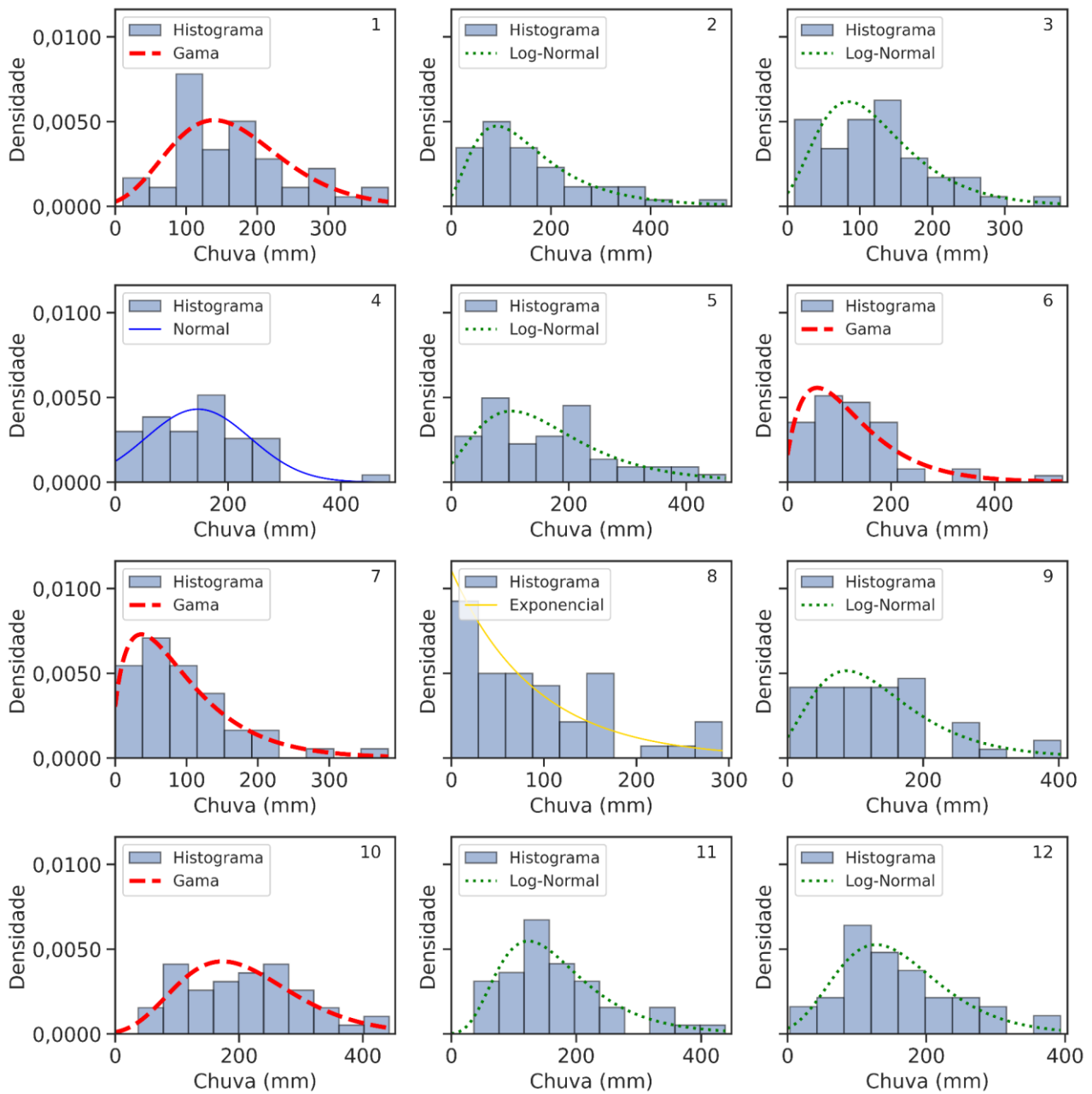


Figura 6 - Histograma e curvas de distribuição de probabilidade mais adequada da precipitação mensal, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR.

Os valores das estatísticas das FDAs que melhor se ajustaram aos dados, bem como os coeficientes podem ser visualizados na Figura 7.

	Mês	Coeficientes	Dsup	p-valor
FDAs	Gama	Janeiro form = 9;2; esc = 27,1	0,081	0,884
	Log-Normal	Fevereiro loc = -47,3; esc = 183,2	0,064	0,982
	Log-Normal	Março loc = -69,4; esc = 178,9	0,070	0,958
	Normal	Abril loc = 146,7; esc = 92,6	0,081	0,887
	Log-Normal	Maio loc = -101,0; esc = 244,1	0,108	0,593
	Gama	Junho form = 2,0; esc = 67,0	0,082	0,875
	Gama	Julho form = 1,7; esc = 57,6	0,063	0,984
	Exponencial	Agosto loc = 0,0; esc = 90,3	0,088	0,819
	Log-Normal	Setembro loc = -87,4; esc = 206,1	0,101	0,670
	Gama	Outubro form = 7,8; esc = 35,3	0,090	0,800
	Log-Normal	Novembro loc = -42,4; esc = 195,4	0,059	0,992
	Log-Normal	Dezembro loc = -140,7; esc = 289,0	0,056	0,996

Figura 7 - Funções de Distribuição Acumulada (FDAs) e seus coeficientes de localização (loc), escala (esc) e forma (form); Dsup e p-valor, em escala mensal, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR.

A predominância das distribuições Log-Normal e Gama associado com a distribuição dos

histogramas permite inferir que existe assimetria nas séries temporais de cada mês para o município em estudo. Pode-se observar também que o mês com menor precipitação média acumulada foi ajustado com o modelo Exponencial. Resultados semelhantes foram observados comparando-se ajustes em períodos chuvosos e secos do ano (Catalunha et al., 2002).

Avaliando diferentes FDAs em três cidades no estado do Acre e sul do estado do Amazonas, com clima Köppen-Geiger do tipo Af, foram observados predominância Normal e Weibull (José et al., 2022). Nos municípios de Jaboticabal-SP (clima Köppen-Geiger tipo Cwa) e Meleiro-SC (clima Köppen-Geiger tipo Cfa) avaliando a função Normal e Gama, observou-se que a Gama apresentou melhores ajustes em escala mensal (André & Anunciação, 2017; Bonfante et al., 2021). A diversidade dos ajustes em diferentes localidades e tipos de clima, reforçam a necessidade de realizar adequação dos parâmetros das funções de distribuição em diferentes intervalos de tempo e localidades, refletindo as especificidades dos microclimas.

Em relação à chuva provável mensal, considerando como referência a probabilidade de 75% de ocorrência (Melo et al., 2023; Passos & Mendes, 2018), observa-se que os meses com maiores valores esperados de precipitação foram: outubro (136 mm), novembro (105 mm) e janeiro (106 mm), e os meses com menores valores esperados de precipitação foram agosto (25 mm) e julho (38 mm). Por outro lado, ao analisar a probabilidade de 10%, verifica-se que nos meses de fevereiro, maio e outubro ocorrem maiores chances de acumulados de precipitação superiores a 300 mm, indicando possibilidade de eventos de chuva intensa nestes períodos (Figura 8).

Níveis de probabilidade (%)	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
10%	275	313	224	264	320	249	194	207	260	339	285	268
20%	231	238	178	224	248	189	145	144	202	285	231	222
25%	215	214	162	208	224	169	129	124	183	266	213	206
50%	157	135	108	146	142	102	75	62	118	196	152	147
75%	106	80	67	83	81	54	38	25	68	136	105	99
80%	95	69	58	68	68	45	31	19	58	123	96	88
90%	68	45	38	27	39	26	17	9	34	91	73	62

Figura 8 - Níveis de probabilidade de ocorrência e precipitação pluvial mensal, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR.

Avaliando as precipitações acumuladas nos decêndios, pode-se observar que a média das precipitações variou de 20,94 mm (decêndio 22) a 72,65 mm (decêndio 30), refletindo a sazonalidade da distribuição pluviométrica na região, semelhante ao observado na escala mensal. O

desvio padrão apresentou valores máximos de até 64,06 mm (decêndio 12) e mínimos de 24,64 mm (decêndio 21), indicando elevada variabilidade interdecendial (Figura 9).

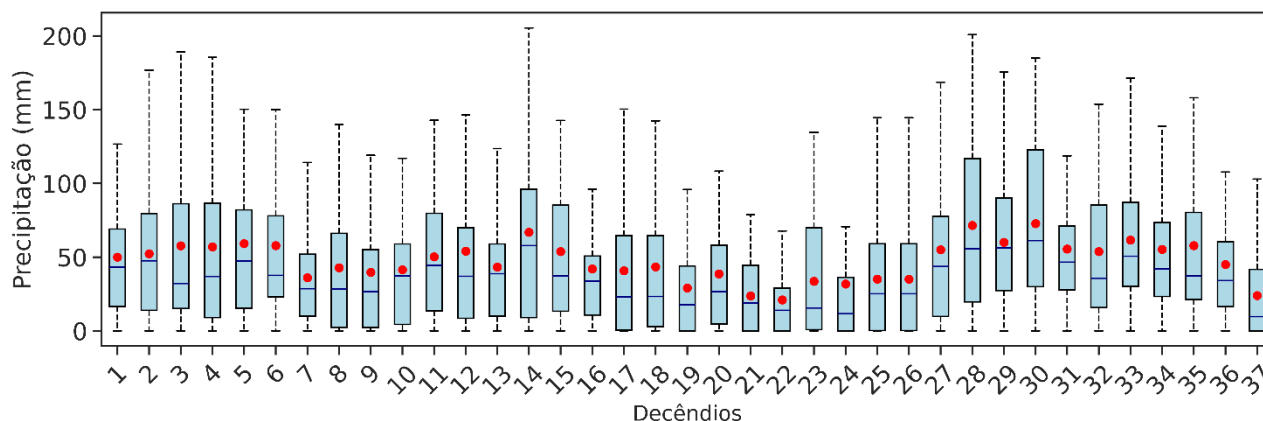


Figura 9 - Distribuição da precipitação decendial em Box Plot, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR. Pontos vermelhos representam a média, linha azul a mediana.

Esta variabilidade também pode ser observada no modelo de distribuição, uma vez que a maioria foi ajustado com o modelo Exponencial, o qual frequentemente se ajusta quando existe grande variabilidade entre os valores (Catalunha et al., 2002). Foram 14 decêndios ajustados com a função Exponencial, 11 com a função Normal, quatro com a função Gama e oito não significativos.

Os valores das estatísticas das FDAs que melhor se ajustaram aos dados decendiais, bem

como os coeficientes, podem ser visualizados na Figura 10.

Adotando-se o nível de 75% de probabilidade de ocorrência (Melo et al., 2023; Passos & Mendes, 2018), a estimativa da precipitação provável em escala decendial demonstrou que a maior precipitação observada foi de 29 mm (decêndio 30), e a menor foi de zero (decêndio 24) (Figura 11).

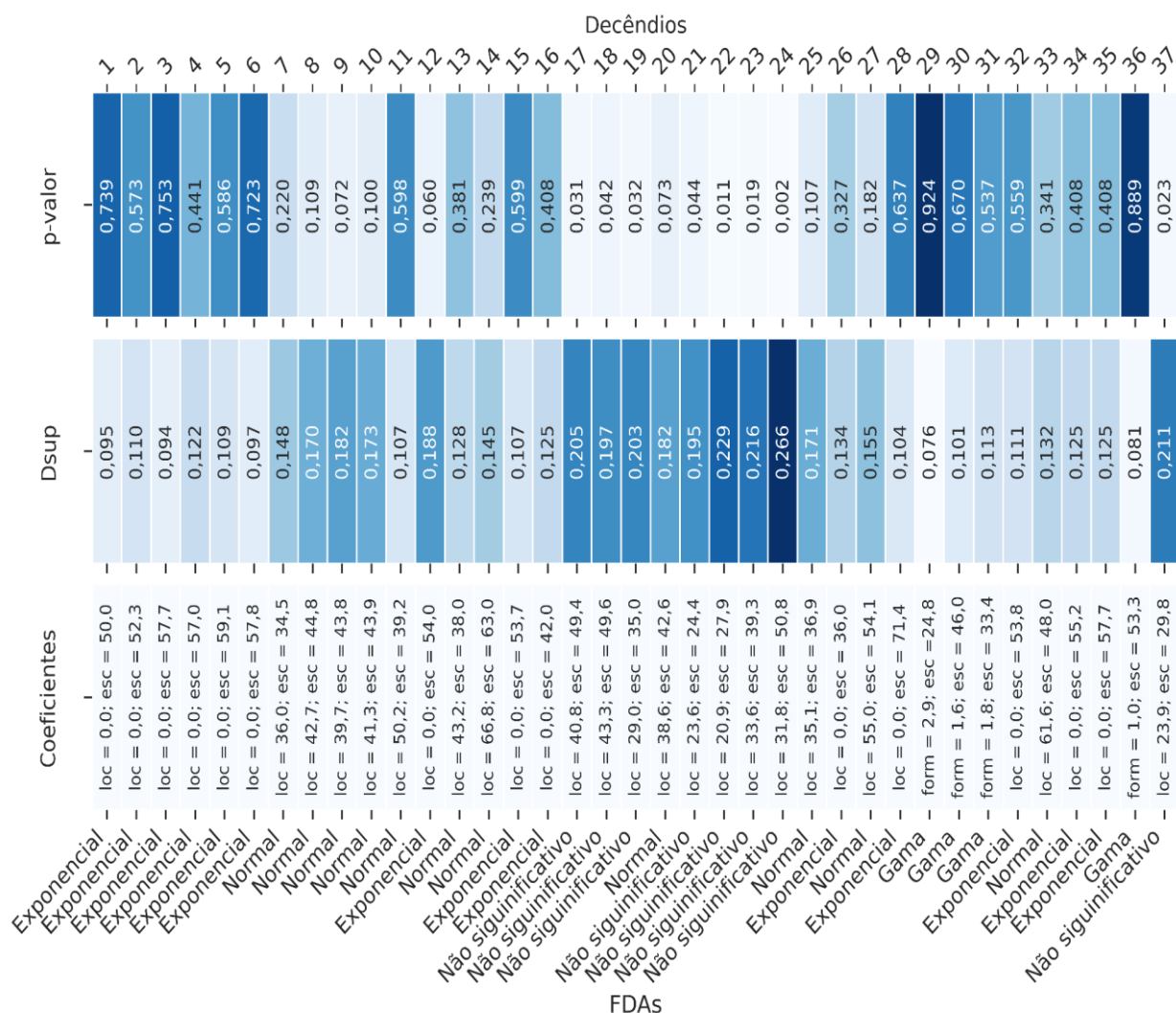


Figura 10 - Funções de Distribuição Acumulada (FDAs) e seus coeficientes de localização (loc), escala (esc) e forma (form); Dsup e p-valor, em escala decendial, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR.

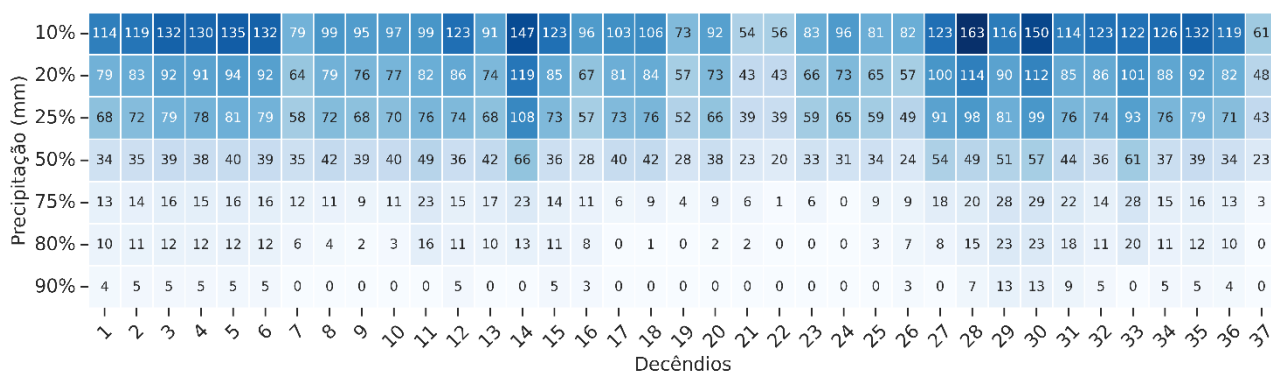


Figura 11 - Níveis de probabilidade de ocorrência e precipitação pluvial decendial, considerando o período de 1976 a 2023 para Santa Helena, PR

Os maiores valores de precipitação foram observados no início e final do ano, a partir do decêndio 1 ao 6 e do 29 ao 37. Entretanto, o ajuste de função exponencial em alguns decêndios sugere a ocorrência de precipitações irregulares em baixa intensidade durante esses períodos. Modelos não

significativos foram identificados nos decêndios 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24 e 37. Possivelmente nestes períodos a ocorrência de precipitações foram esparsas ou atípicas (Catalunha et al., 2002; Santos et al., 2018).

O zoneamento agrícola de risco climático, considerando a cultura da soja, com menor condição de risco (20%), recomenda a semeadura da cultura a partir do decêndio 25 (primeiro decêndio de setembro) (Farias et al., 1997; Giovanella et al., 2024). Estas recomendações corroboram com os resultados observados neste trabalho. Observa-se que, justamente neste decêndio se iniciam as chuvas.

Considerando 75% de probabilidade, as chuvas aumentaram significativamente a partir do decêndio 27 (de 18/09 a 27/09). Neste sentido, o gráfico de precipitação provável em escala decenal, associado ao monitoramento das condições do clima e do tempo, fornecem informações para auxiliar no planejamento das atividades agrícolas, contribuindo para tomadas de decisões estratégicas e acuradas.

Neste trabalho foram realizadas avaliações probabilísticas das chuvas no município de Santa Helena, PR. As análises foram realizadas em três escalas de tempo, anual, mensal e decenal. Os resultados das análises anuais e mensais, forneceram informações que podem ser utilizadas principalmente para prever cenários futuros, fundamentais para o planejamento estratégico e a adaptação às mudanças climáticas (Silva & Gonçalves, 2024; Wollmann & Galvani, 2013), bem como ações de planejamento agrícola, com a identificação dos períodos de maior e menor disponibilidade hídrica (Aparecido et al., 2020; Schmoeller & Limberger, 2023).

A análise em escala decenal intensifica as ações de planejamento e aprimora as tomadas de decisão estratégicas, ao oferecer informações detalhadas para o planejamento de atividades em curtos intervalos de tempo. Na agricultura, essa abordagem é particularmente relevante, pois influencia diretamente o manejo de pragas, doenças e irrigação. Ao permitir a identificação de períodos críticos de secas ou excedentes hídricos, torna-se possível antecipar riscos e implementar práticas de manejo adaptativas (Ghini et al., 2008; Giovanella et al., 2024; Henrique et al., 2017).

Essa precisão facilita a otimização dos recursos, reduzindo perdas e aumentando a eficiência na produção agrícola. Além disso, o monitoramento decenal auxilia na definição de cronogramas de irrigação e aplicação de defensivos agrícolas (Ghini et al., 2008; Sobenko et al., 2016)

Conclusões

A análise probabilística da precipitação pluvial em Santa Helena, PR permitiu identificar que a precipitação média anual foi de 1748 mm, com máxima de 2246 mm (1983) e mínima de 1003

mm (1978). A função Log-Normal ajustou-se melhor aos dados anuais, evidenciando robustez para representar a assimetria e variabilidade dos extremos.

Em escala mensal, os meses de fevereiro e maio apresentaram maiores variações de chuva, enquanto março e julho mostraram maior estabilidade. A distribuição Log-Normal foi mais apropriada, representando o melhor ajuste em seis meses do ano. A distribuição Gama foi a melhor para quatro meses do ano.

Na escala decenal, observou-se elevada variabilidade, com ajustes predominantes pelo modelo Exponencial, refletindo a sazonalidade da distribuição pluviométrica na região.

O ajuste das funções de probabilidade possibilitou a determinação das chuvas prováveis para as escalas anuais, mensais e decenais, contribuindo para o monitoramento climático e o planejamento das atividades antrópicas dependentes da precipitação pluvial.

Agradecimentos

Os autores desta pesquisa expressam sua sincera gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Araucária (FA) pelo apoio financeiro. Também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Santa Helena (UTFPR-SH) pela infraestrutura e recursos oferecidos.

Disponibilidade de dados

Os dados utilizados e produzidos neste artigo estão compartilhados no repositório do GitHub no seguinte link: https://github.com/fcoliveira-utfpr/chuva_probabilidade_sh.

Referências

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- André, R. G. B., & Anunciação, Y. M. T. (2017). A precipitação pluvial provável em Jaboticabal, São Paulo. *Agrometeoros*, 25(2017), 347–359.
- Aparecido, L. E. O., Rolim, G. S., & Moraes, J. R. S. C. (2020). Validation of ECMWF climatic data, 1979–2017, and implications for modelling water balance for tropical climates. *International Journal of Climatology*, 40(15), 1–20.

- <https://doi.org/10.1002/joc.6604>
- Assad, E. D., Marin, F. R., Pinto, H. S., & Zullo Júnior, J. (2008). Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: Base teórica, pesquisa e desenvolvimento. *Informe Agropecuário*, 29(246), 47–60.
- Baú, A. L., Azevedo, C. A. V. de, & Bresolin, A. de A. (2013). Modelagem da precipitação pluvial diária intra-anual da Bacia Hidrográfica Paraná III associada aos eventos ENOS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(8), 883–891. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662013000800013>
- Bigolin, T., & Talamini, E. (2024). Impacts of Climate Change Scenarios on the Corn and Soybean Double-Cropping System in Brazil. *Climate*, 12(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/cli12030042>
- Bittner, B., Marczin, T., & Kovács, T. Z. (2023). Strategic planning in agribusiness. *Acta Agraria Debreceniensis*, 1, 23–27. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/12803>
- Bochenek, B. (2022). Machine Learning in Weather Prediction and Climate Analyses—Applications and Perspectives. 1–16.
- Bonfante, F. M., Cadorin, S. B., & Back, Á. J. (2021). Distribuições de probabilidade para estimativa da chuva mensal. Em *Planejamento e Gestão Territorial: Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade* (p. 165–178).
- Carvalho, M. A. C. C., Uliana, E. M., Silva, B. F. P., Martins, C. A. S., Cruz, I. F., Aires, U. R. V., & Mendes, M. A. S. A. (2022). Precipitação e produtividade de grãos em zonas de transição Cerrado-Amazônia no Brasil: Probabilidade, distribuição espacial e sistemas sinóticos. *Geo UERJ*, 41, e52331. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2022.52331>
- Catalunha, M. J., Sediya, G. C., Leal, B. G., Soares, C. P. B., & Ribeiro, A. (2002). Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 10(1), 153–162.
- Dourados Neto, D., Assis, J. P. D., Timm, L. C., Augusto, P., Sparovek, G., & Martin, T. N. (2005). Probabilidade a séries históricas de precipitação pluvial diária em Piracicaba-SP Adjustment of models of probability distribution to the historical daily rainfall series in Piracicaba, Brazil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 13(2), 273–283.
- Espeland, E. K., & Kettenring, K. M. (2018). Strategic plant choices can alleviate climate change impacts: A review. *Journal of Environmental Management*, 222, 316–324.
- Farias, J. R. B., Almeida, I. R. de, & Garcia, A. (1997). Zoneamento Agroclimático da Cultura da Soja. <https://doi.org/633.340981>
- Ghini, R., Hamada, E., & Bettiol, W. (2008). Mudanças climáticas e doenças de plantas. *Scientia Agrícola*, 65, 98–107.
- Giovanella, T. H., Oliveira, F. C., Tluszczy, J., Jordan, R. A., Ziech, A. R. D., Paula Filho, P. L., & Alencastro, M. E. S. (2024). Dinâmica do coeficiente de resposta da soja ao estresse hídrico em clima subtropical úmido. *Observatório De La Economía Latinoamericana*, 22(10), e7480. <https://doi.org/10.55905/oelv22n10-251>
- Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: Risks and responses. Em *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://doi.org/10.1080/14767058.2017.1347921>
- Habibullah, M. S., Din, B. H., Tan, S. H., & Zahid, H. (2022). Impact of climate change on biodiversity loss: Global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1073–1086. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8>
- Henrique, E., Moura, F., Armando, R., Pereira, de A., Gonçalves, A. O., Júnior, Á., Bordignon, Z., & Marin, F. R. (2017). Simulação de produtividade futura de soja em Piracicaba-SP com base em projeções de mudanças climáticas. *Agrometeoros*, 25(1), 9–17.
- Huang, H., Cui, H., & Ge, Q. (2021). Assessment of potential risks induced by increasing extreme precipitation under climate change. *Natural Hazards*, 108(2), 2059–2079. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04768-9>
- José, J. V., Souza, M. D., Pereira, L. B., Barros, T. H. da S., Leite, H. M. F., & Santos, L. da C. (2022). Probabilidade de ocorrência da precipitação pluvial em três cidades da Bacia Hidrográfica do Alto Juruá. *Irriga*, 27(1), 124–140. <https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n1p124-140>
- Karczewski, M., Kaźmierczak, B., Michalski, A., & Kuchar, L. (2022). Probability function estimation for the maximum precipitation model using kernel estimators. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 24, 260–275. <https://doi.org/10.54740/ros.2022.019>
- Matsunaga, W. K., Sales, E. S. G., Júnior, G. C. A., Silva, M. T., Lacerda, F. F., de Paiva

- Lima, E., dos Santos, C. A. C., & de Brito, J. I. B. (2024). Application of ERA5-Land reanalysis data in zoning of climate risk for corn in the state of Bahia—Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(2), 945–963.
<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04670-3>
- Melo, V. G. M. L., Frizzzone, J. A., de Camargo, A. P., & de Melo, L. L. (2023). Evaluation of irrigation requirement for the design of an irrigation system using a probabilistic approach for the estimation of evapotranspiration and rainfall. *Revista Ciencia Agronomica*, 54, 1–10.
<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230048>
- Montes-Pajuelo, R., Rodríguez-Pérez, Á. M., López, R., & Rodríguez, C. A. (2024). Analysis of probability distributions for modelling extreme rainfall events and detecting climate change: insights from mathematical and statistical methods. *Mathematics*, 12(7), 1–24.
<https://doi.org/10.3390/math12071093>
- Nery, J. T. (2005). Dinâmica climática da região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1(1), 61–75.
- Paludo, A., Becker, W. R., Richetti, J., Silva, L. C. D. A., & Johann, J. A. (2020). Mapping summer soybean and corn with remote sensing on Google Earth Engine cloud computing in Parana state—Brazil. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1624–1636.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1772893>
- Passos, M. L. V., & Mendes, T. J. (2018). Precipitação Pluviométrica Mensal E Anual Provável Para O Município De Turiaçu-MA. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 12(1), 2283–2292.
<https://doi.org/10.7127/rbai.v12n100672>
- Rocha, A. S., Giovanella, T. H., Zatti, G. K., & Oliveira, F. C. (2024). Mapeamento Geoambiental do Oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 06, 4441–4466.
- Santos, P. H. A. B., Delfino, O. A. S., Santos, R. V. R., & Nascimento, M. (2021). Ajuste de um modelo de séries temporais para prever a precipitação pluviométrica. *Research, Society and Development*, 10(6), 1–11.
- Santos, R. S., Vieira, P. D., Evangelista, D. H. R., Oliveira, L. J. C., & Nonato, D. (2018). Caracterização de extremos mensais de precipitação em Coacoal (RO). *Revista Brasileira de Climatologia*, 22(12), 267–280.
- Schmoeller, A. M., & Limberger, L. (2023). Detecção de Padrões de Mudanças Climáticas no Oeste e Sudoeste do Paraná no Período de 1977-2018. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(4), 1697–1713.
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., & Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil—Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, 153(8), 1394–1411.
<https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- Shen, T., & Xiang, Y. (2023). Optimization of probability density functions applicable for hourly rainfall. *Atmosphere*, 14(7), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/atmos14071100>
- Shi, W., Wang, M., & Liu, Y. (2021). Crop yield and production responses to climate disasters in China. *Science of the Total Environment*, 750, 141147.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141147>
- Silva, W. T. C., & Gonçalves, D. V. (2024). Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental para o estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(2), 931–944.
- Sobenko, L. R., Duarte, E., Júnior, F., Neto, O., Santos, A., & Alves, A. (2016). Estimativa da necessidade de irrigação na cultura do milho “safrinha” em Sorriso-MT por métodos agroclimatológicos. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 15(1), 73–85.
<https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p73-85>
- Souza, J. L. M. de, Jerszurki, D., Barroca, M. V., Trentin, C. V., & Gurski, B. C. (2020). Precipitação E Evapotranspiração De Referência Prováveis Para O Município De Pinhais-Pr. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 13(4), 3512–3523.
<https://doi.org/10.7127/rbai.v13n4001031>
- Souza, R. O. R. M., Costa, E. F. N., Sginomiya, A. K., Lima Júnior, J. A., & Souza, J. M. M. (2018). Precipitação provável mensal e anual para o estado do Pará. *Irriga*, 53(2), 249–261.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Torsoni, G. B., de Oliveira Aparecido, L. E., dos Santos, G. M., Chiquitto, A. G., da Silva Cabral Moraes, J. R., & de Souza Rolim, G. (2023). Soybean yield prediction by machine learning and climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(3–4), 1709–1725.
<https://doi.org/10.1007/s00704-022-04341-9>
- Vieira, I. C. O., de Moraes, J. R. da S. C., Santos,

- V. B. D., Costa, D. L. P., de Faria, R. T., de Souza, P. J. de O. P., & Rolim, G. de S. (2024). Modelo de previsão meteorológica decendial para fins agrícolas utilizando regressão linear múltipla. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(3), 1434–1456. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.3.p1434-1456>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E.A., Harris, C.R., Archibald, A.M., Ribeiro, A.H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., Vijaykumar, A., Bardelli, A.P., Rothberg, A., Hilboll, A., Kloeckner, A., Scopatz, A., Lee, A., Rokem, A., Woods, C.N., Fulton, C., Masson, C., Häggström, C., Fitzgerald, C., Nicholson, D.A., Hagen, D.R., Pasechnik, D.V., Olivetti, E., Martin, E., Wieser, E., Silva, F., Lenders, F., Wilhelm, F., Young, G., Price, G.A., Ingold, G.L., Allen, G.E., Lee, G.R., Audren, H., Probst, I., Dietrich, J.P., Silterra, J., Webber, J.T., Slavič, J., Nothman, J., Buchner, J., Kulick, J., Schönberger, J.L., de Miranda Cardoso, J.V., Reimer, J., Harrington, J., Rodríguez, J.L.C., Nunez-Iglesias, J., Kuczynski, J., Tritz, K., Thoma, M., Newville, M., Kümmerer, M., Bolingbroke, M., Tartre, M., Pak, M., Smith, N.J., Nowaczyk, N., Shebanov, N., Pavlyk, O., Brodtkorb, P.A., Lee, P., McGibbon, R.T., Feldbauer, R., Lewis, S., Tygier, S., Sievert, S., Vigna, S., Peterson, S., More, S., Pudlik, T., Oshima, T., Pingel, T.J., Robitaille, T.P., Spura, T., Jones, T.R., Cera, T., Leslie, T., Zito, T., Krauss, T., Upadhyay, U., Halchenko, Y.O., Vázquez-Baeza, Y., 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wollmann, C., & Galvani, E. (2013). Zoneamento agroclimático: Linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual. *Revista Sociedade & Natureza*, 25(1), 179–189.
- Ye, L., Hanson, L. S., Ding, P., Wang, D., & Vogel, R. M. (2018). The probability distribution of daily precipitation at the point and catchment scales in the United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6519–6531. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6519-2018>
- Yue, S., & Hashino, M. (2007). Probability distribution of annual, seasonal and monthly precipitation in Japan. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 863–877. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.863>
- Zhang, F., Biederman, J. A., Dannenberg, M. P., Yan, D., Reed, S. C., & Smith, W. K. (2021). Five decades of observed daily precipitation reveal longer and more variable drought events across much of the Western United States. *Geophysical Research Letters*, 48(7), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2020GL092293>
- Zou, S., Abuduwaili, J., Duan, W., Ding, J., De Maeyer, P., Van De Voorde, T., & Ma, L. (2021). Attribution of changes in the trend and temporal non-uniformity of extreme precipitation events in Central Asia. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94486-w>