









Artigo

## Modelagem Espacial de Chuvas Intensas no Estado da Paraíba

Larissa da Silva Souza<sup>1</sup> , Elias Silva de Medeiros<sup>1</sup> , Marcus Vinícius Galbetti<sup>2</sup> ,  
Carolina Cristina Bicalho<sup>2</sup> , Carlos Antonio Costa dos Santos<sup>3</sup> , Taís Arriero Shinma<sup>2</sup> ,  
Alessandra Querino da Silva<sup>1</sup> , Luciano Antonio de Oliveira<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>*Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, Brasil.*

<sup>2</sup>*Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, MS, Brasil.*

<sup>3</sup>*Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

Recebido em: 23 de Junho de 2022 - Revisado em: 26 de Setembro de 2022 - Aceito em: 1 de Setembro de 2022

### Resumo

O Nordeste Brasileiro (NEB) apresenta, como característica marcante, a irregularidade em acumulados de precipitações, o que é decorrência de vários fatores, tais como as características ambientais e de sistemas atmosféricos. Análises estatísticas adequadas são necessárias para ter conhecimento dos níveis de retorno da precipitação em uma região e são muito importantes para auxiliar ações para prevenção de desastres naturais causados por chuvas máximas. O objetivo dessa pesquisa consistiu em apresentar os níveis de retorno da precipitação máxima diária (PMD) em todo o estado da Paraíba, o qual está localizado na NEB. O conjunto de dados foi composto por 238 estações pluviométricas, abrangendo o período de 1994 a 2020. Para a modelagem estatística foi ajustada a distribuição Gumbel, por meio do método da máxima verossimilhança. Os resultados indicaram que o Sertão Paraibano apresentou as maiores estimadas da PMD nos meses de janeiro a março, com volumes superiores a 75 mm. A Mata Paraibana apresentou as maiores estimativas da PMD nos meses de abril a junho, com valores superiores a 125 mm no mês de junho em regiões litorâneas. As informações obtidas sobre os níveis de retorno da PMD são relevantes e podem ser de grande auxílio na implementação de políticas públicas, visando a diminuição dos impactos causados pelas chuvas intensas.

**Palavras-chave:** inundações, Distribuição Gumbel, Nordeste do Brasil.

## Spatial Modeling of Intense Rainfall in the State of Paraíba

### Abstract

Brazilian Northeast (NEB) presents, as a striking feature, the irregularity in rainfall accumulations, which is due to several factors, such as environmental characteristics and atmospheric systems. Adequate statistical analyzes are necessary to have knowledge of the return levels of precipitation in a region and are very important to assist actions to prevent natural disasters caused by maximum rainfall. The objective of this research was to present the levels of return of maximum daily rainfall in the entire state of Paraíba, which is located in the NEB. The dataset consisted of 238 rainfall stations, covering the period from 1994 to 2020. In the statistical modeling, the Gumbel distribution was adjusted using the maximum likelihood method. The results indicated that Sertão Paraibano presented the highest estimated PMD in the months from January to March, with volumes greater than 75 mm. Mata Paraibana presented the highest PMD estimates in the months from April to June, with values greater than 125 mm in the month of June in coastal regions. The information obtained on the levels of return of maximum daily rainfall is relevant and can be of great help in the implementation of public policies, aimed at reducing the impacts caused by intense rains.

**Keywords:** floods, Gumbel Distribution, Northeast of Brazil.

## 1. Introdução

A Região Nordeste do Brasil (NEB) caracteriza-se pela alta variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica. Observa-se nesta região a ocorrência de eventos extremos, os quais estão associados ao clima e à atuação de diversos sistemas meteorológicos (Abreu *et al.*, 2019). Sabe-se que o clima compreende ao conjunto de fenômenos meteorológicos que caracteriza, durante um longo período, o estado médio da atmosfera e sua evolução num determinado lugar (Torres e Machado, 2008).

Na região NEB, sua porção litorânea apresenta clima Tropical, caracterizado por temperaturas no mês mais frio superiores a 18 °C e a ocorrência de forma pronunciada de uma estação seca e uma chuvosa (Alvares *et al.*, 2013). Em sua porção interior, por sua vez, o NEB apresenta o polígono das secas, região com clima Semiárido, definido por longos períodos sem precipitação e altas temperaturas (Torres e Machado, 2008; Alvares *et al.*, 2013). A atuação dos sistemas meteorológicos, por sua vez, interfere na variabilidade interanual, como a ocorrência do fenômeno La Nina, e sazonal da precipitação, como a atuação da Zona de Convergência Intertropical, principal sistema meteorológico provedor de chuvas no NEB (Abreu *et al.*, 2019; Madeira *et al.*, 2021).

Dentre os estados que compõem a NEB, o Estado da Paraíba apresenta as características supracitadas de forma pronunciada. Em razão da extensão territorial, a porção leste do estado (litoral) apresenta Clima Tropical, pois sofre influência da umidade do Oceano Atlântico. Deslocando-se a oeste, no sentido do Polígono das Secas, os volumes médios de precipitação diminuem. Apesar dessa diminuição, o Estado da Paraíba, em geral, sofre impactos ambientais, econômicos e sociais devido à ocorrência de eventos de chuvas intensas.

De acordo com o Atlas Desastres Naturais (CEPED, 2013), o Estado da Paraíba apresentou 215 registros oficiais de enxurradas (fenômeno caracterizado pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial) entre os anos de 1991 e 2012, em que foram afetadas mais de 350 mil pessoas, deixando cerca de 23 mil desabrigados, 35 mil desalojados e provocando 33 óbitos. No mesmo período, o estado apresentou 136 registros oficiais de inundação (submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas), afetando cerca de 241 mil pessoas, deixando cerca de 2.700 desabrigados, 6 mil desalojados e acarretando 1 óbito. Em razão desses impactos, torna-se necessário o estudo e a modelagem das precipitações intensas no Estado da Paraíba de forma a auxiliar no planejamento e dimensionamento correto de obras de infraestrutura hídrica, como os sistemas de drenagem urbana.

Assim, a previsão e o monitoramento de eventos extremos, tais como inundações alagamentos e enchentes,

são fundamentais para viabilizar sistemas de alerta contra os desastres naturais, planejamento de áreas de risco, dentre outras medidas. Nesse sentido, o estudo e estimação dos níveis de retorno das chuvas são de grande valia para auxiliar a implementação de ações para amenizar os danos causados pela ocorrência de chuvas extremas (Eckhardt *et al.*, 2009). Diversas metodologias estatísticas têm sido utilizadas, no intuito de fornecer informações úteis para os gestores de políticas públicas.

Para modelagem das chuvas máximas, a distribuição Gumbel é amplamente utilizada na literatura, pois os resultados indicam um bom ajuste da distribuição aos dados (Naghetini e Pinto, 2007; Mello e Viola, 2013; Souza *et al.*, 2016; Cotta *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2018). Um estudo da precipitação máxima diária no município de Jataí-GO, evidenciou que um melhor ajuste da distribuição Gumbel em relação a distribuição Generalizada de Valores Extremos (Medeiros *et al.*, 2019). Na região NEB, destaca-se uma pesquisa que utilizou a distribuição Gumbel para modelar as chuvas extremas nas nove capitais nordestinas, estimando níveis de precipitação superiores a 165 mm em um período de retorno de 50 anos (Souza *et al.*, 2016). No município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, foi constatado que a Gumbel se mostrou adequada para modelar a precipitação máxima diária nos meses mais chuvosos na região (Souza *et al.*, 2022).

Diante do exposto, da necessidade e importância do monitoramento das chuvas extremas, a presente pesquisa teve por objetivo modelar a precipitação máxima diária em todo o Estado da Paraíba, Brasil. As estimativas dos níveis de retorno e demais informações obtidas nesse estudo são relevantes e podem ser utilizadas no desenvolvimento de um planejamento estadual mais eficiente, auxiliando na previsão de danos causados por chuvas extremas em um único dia, pois sabe-se que tais chuvas podem resultar em inundações e enchentes, até mesmo em regiões com escassez hídrica.

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de estudo

O Estado da Paraíba, localizado a leste da NEB com área total de 56.500 quilômetros quadrados, está situado entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18" S, e entre os meridianos 34°45'54" e 38°45'45" O. O Estado caracteriza-se por apresentar 4 mesorregiões climáticas definidas por sua localização geográfica e clima: (01) Mata Atlântica na porção litorânea onde o clima é Tropical; (02) Agreste, transição entre o clima Tropical e Semiárido; (03) Borborema, área sob influência do planalto da Borborema, com clima úmido e semiúmido; e, (04) Sertão Paraibano, região semiárida. Assim, para a interpretação e discussões dos resultados, foi proposta a divisão geográfica do estado em

mesorregiões, uma vez que as mesorregiões possuem diferentes características climáticas (Fig. 1).

### 2.2. Coleta e tratamento dos dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos através dos registros dos postos pluviométricos mantidos e disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs), sendo composto por 238 estações pluviométricas, localizadas no Estado da Paraíba e que estão distribuídas irregularmente em todo território do estado da Paraíba. A série histórica compreende um período de 27 anos (1994 a 2020). A utilização desse banco de dados dos últimos 27 anos da AESA, consistiu na padronização do gerenciamento e controle da qualidade dos dados.

A partir desse banco de dados pluviométrico, a construção da série temporal para análise foi executada da seguinte forma: para cada posto pluviométrico, extraiu-se o máximo diário registrado no mês para cada ano, sendo atribuído como precipitação máxima diária, obtendo assim em média 324 observações por estação.

### 2.3. Teste de estacionariedade e independência

Para análise exploratória dos dados foram utilizadas as medidas descritivas (média, mediana e desvio padrão) para a interpretação do comportamento médio das chuvas máximas.

Para verificar a presença de tendência em cada série histórica foi utilizado o teste de Wald-Wolfowitz (Wald e Wolfowitz, 1940). Este teste é baseado em uma estatística não paramétrica, considerando a hipótese nula ( $H_0$ ) de que a série é estacionária (sem tendência) contra uma hipótese alternativa ( $H_1$ ) de não estacionariedade (com tendência). O teste realiza a contagem das observações acima e abaixo do valor mediano da precipitação máxima, verificando se esse número está dentro de uma faixa de distribuição considerada normal.

Para observar a hipótese de independência entre as observações foi proposto o teste de Ljung-Box (L-B),

sendo a hipótese nula construída sobre a existência de observações independentes (Ljung e Box, 1978). Este teste é de extrema importância, uma vez que o método de estimação dos parâmetros adotado nesta pesquisa, método máxima verossimilhança, pressupõe que as observações das séries são independentes.

### 2.4. Distribuição Gumbel

Nesta pesquisa foi proposto o ajuste da distribuição de densidade Gumbel. A sua função densidade de probabilidade é definida pela seguinte equação (Chakraborty et al., 2020):

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[ -\frac{(x - \mu)}{\sigma} \right] \exp \left\{ -\exp \left[ -\frac{(x - \mu)}{\sigma} \right] \right\}, x \in \mathbb{R}. \quad (1)$$

Na Eq. (1)  $\mu$  e  $\sigma$  representam os parâmetros de localização e de escala, respectivamente. A função da distribuição acumulada (Eq. (2)) dada pela seguinte equação:

$$F_x(x; \mu, \sigma) = \exp \left\{ -\exp \left[ -\frac{(x - \mu)}{\sigma} \right] \right\}, x \in \mathbb{R}. \quad (2)$$

As estimativas dos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  foram obtidos pelo método da máxima verossimilhança. Esse método de estimação é comumente utilizado na literatura por apresentar boas propriedades assintóticas e pressupõe a independência entre as observações das séries. De acordo com Souza et al. (2022), as estimativas dos parâmetros são obtidas por meio de funções que dependem dos dados observados, porém, essas funções requerem o uso de métodos numéricos para determinação da solução. Seja  $X_1, X_2, \dots, X_n$  é uma amostra aleatória de máximos de uma variável aleatória da distribuição Gumbel, conforme definido na Eq. (1). Os estimadores dos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ , obtidos pelo método da máxima verossimilhança (Huang et al., 2019)

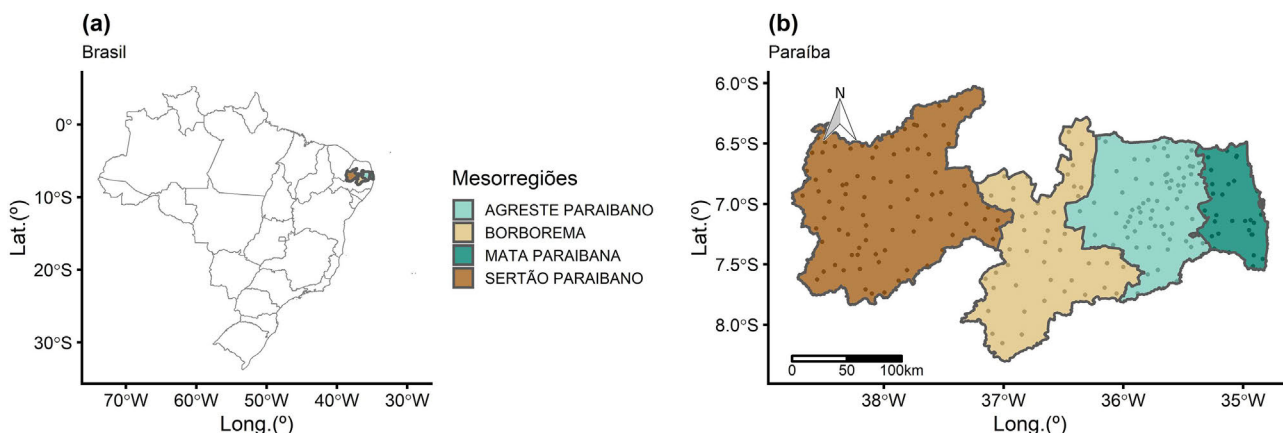


Figura 1 - Mapa dos estados do Brasil (a) e a localização das 238 estações pluviométricas localizadas no Estado da Paraíba (b).

são expressos da seguinte forma:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i \exp(-x_i/\hat{\sigma})}{\sum_{i=1}^n \exp(-x_i/\hat{\sigma})} + \hat{\sigma} = \bar{x} \quad (3)$$

$$\hat{\mu} = -\hat{\sigma} \ln \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \exp(-x_i/\hat{\sigma}) \right]$$

No sistema de Eqs. (3) os termos  $\hat{\mu}$  e  $\hat{\sigma}$  representam os estimadores dos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  da distribuição Gumbel, respectivamente. O termo  $\bar{x}$  representa a média amostral.

### 2.5. Adequação da distribuição Gumbel

O teste Kolmogorov-Smirnov (KS) foi adotado a fim de se verificar a aderência da distribuição Gumbel às observações das séries (Marsaglia *et al.*, 2003). O teste KS apresenta uma estatística não paramétrica, sendo utilizado para verificar a adequação da distribuição aos dados. A estatística é dada pela diferença máxima das funções empíricas  $F(x)$  e teóricas  $G(x)$  da distribuição. O teste é obtido da seguinte forma:

$$D = \max |F(x) - G(x)|. \quad (4)$$

Na Eq. (4) a estatística  $D$  é então comparada com o valor tabelado aproximado para  $1,63/\sqrt{n}$ , quando adotado um nível de 1% de significância. Portanto, a distribuição é adequada para os dados se o valor da estatística  $D$  for menor que o valor tabelado (Souza *et al.*, 2022). Entretanto, nesta pesquisa, por meio do valor da estatística  $D$  foi calculado o valor  $p$  e este comparado ao nível de 1% de significância.

### 2.6. Estimativa dos níveis de retorno

Após verificar a independência das observações das séries e ajustar o modelo aos dados, a próxima etapa consiste em estimar os níveis de retorno (estimativa da precipitação máxima). A estimativa do nível de retorno é obtida da seguinte forma:

$$\hat{x}_p = \hat{\mu} - \hat{\sigma} \{ \ln[-\ln(1-p)] \}. \quad (5)$$

Na Eq. (5), o termo  $\hat{x}_p$  representa a estimativa dos níveis de retorno da precipitação máxima diária associadas ao período de retorno (RT), sendo  $RT = 1/p$  anos.

### 2.7. Análise computacional e fluxograma da pesquisa

Nesta pesquisa, todas as análises estatísticas foram realizadas no *software R* (R Core Team, 2019). Para apresentação gráfica utilizou-se do pacote *ggplot2* (Wickham, 2009), para o teste de estacionariedade o pacote *randtests* (Caeiro e Mateus, 2014) e para ajuste da distribuição Gumbel o pacote *extRemes* (Gilleland *et al.*, 2016).

Para uma melhor apresentação didática é apresentada nesta seção o fluxograma das análises estatísticas que foram realizadas nesta pesquisa (Fig. 2).

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Análise exploratória

Para uma análise exploratória da precipitação máxima diária foram apresentadas medidas descritivas para cada mesorregião do Estado da Paraíba (Tabela 1). Nas mesorregiões da Mata Paraibana e Borborema observa-se uma grande variabilidade da precipitação máxima, com coeficiente de variação entre 92,4% a 135,1%, respectivamente. O Estado da Paraíba se destaca ao apresentar uma grande heterogeneidade da precipitação máxima e períodos chuvosos distintos em cada mesorregião. O Agreste apresentou uma média de 21,8 mm e o desvio padrão observado de 21,73 mm. O Sertão apresentou a maior quantidade de estações pluviométricas com uma média da precipitação máxima diária de 25 mm.

Na distribuição espacial dos valores médios das chuvas máximas diárias para a área em estudo, nota-se que as maiores médias têm uma concentração maior nos meses do primeiro semestre do ano (Fig. 3).

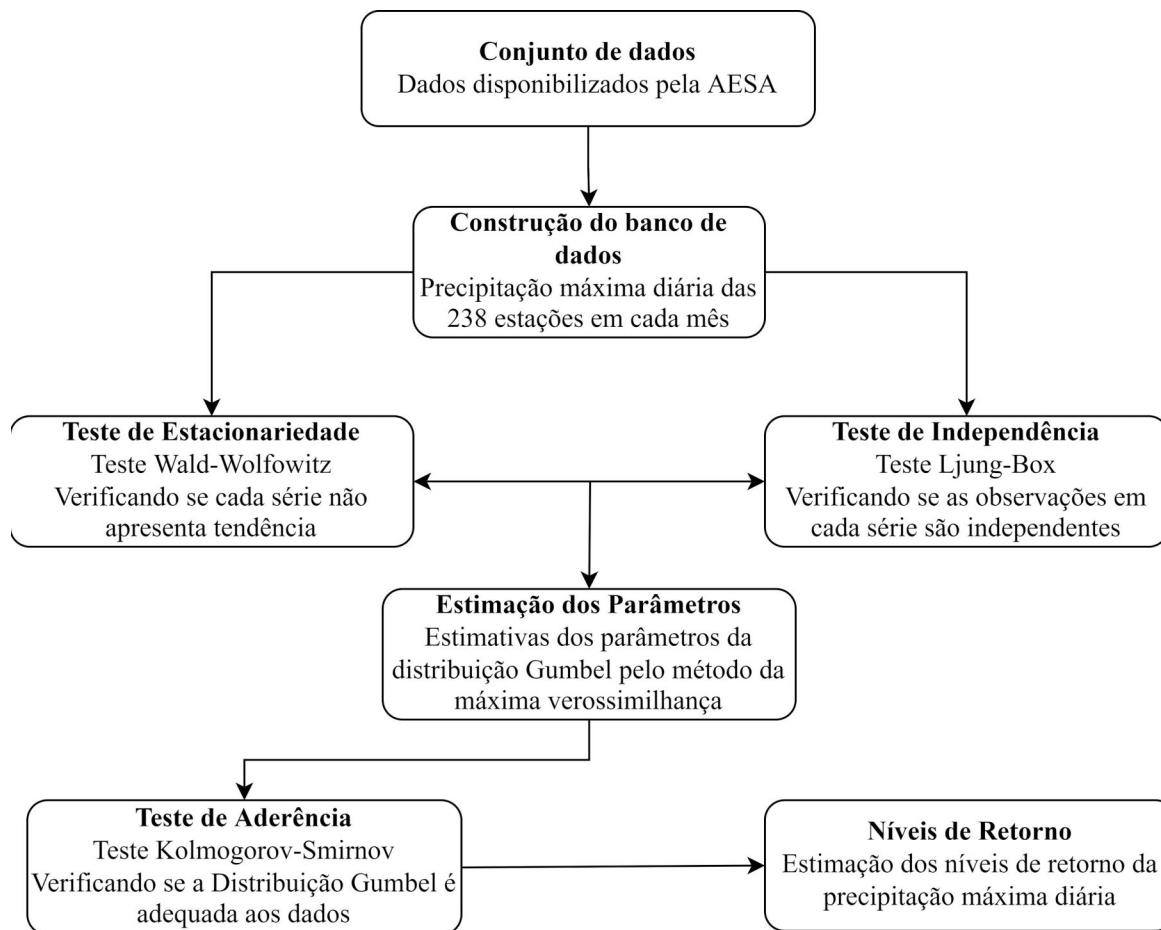
Observa-se na Borborema e Sertão que o período chuvoso se estabelece nas estações do verão e do outono, obtendo as maiores médias nessas estações. Na região do Agreste as chuvas máximas iniciam em março e vão até junho. A Mata Paraibana obteve as maiores médias pluviométricas dentre as regiões no mês de junho.

No Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013) é apresentado que durante o período de 1992 a 2012 ocorreram 215 registros de enxurradas no Estado da Paraíba, sendo as mesorregiões do Agreste Paraibano e Sertão Paraibano concentrando 64% desses registros, com 32% para cada mesorregião. Em relação à ocorrência de enxurradas no Estado, as maiores frequências foram registradas nos meses de janeiro a junho. No relatório CEPED tem-se a ocorrência de um outro de tipo de desastre natural, os alagamentos, em que foram verificados três registros de alagamentos severos no mês de junho, todos ocorrendo na região da Mata Paraibana. Souza *et al.* (2022) ao analisarem dados de chuvas máximas no município de João Pessoa, capital da Paraíba, constataram que o mês de junho apresentou o maior nível médio da precipitação máxima para o período de 1980 a 2019. Diante disto, as análises são com relação aos seis meses do primeiro semestre, período em que ocorrem os maiores níveis de precipitação máxima diária.

### 3.2. Análise de estacionariedade e independência

Pela distribuição espacial dos valores  $p$  do teste de estacionariedade Wald-Wolfowitz, nos meses de janeiro a junho, notou-se que a hipótese de estacionariedade não foi rejeitada em 98,74% das séries históricas ao nível de 1% de significância (Fig. 4A).

A distribuição espacial dos valores  $p$  do teste de independência Ljung-Box nos meses de janeiro a junho,



**Figura 2** - Fluxograma das análises estatísticas que foram realizadas nesta pesquisa.

**Tabela 1** - Medidas descritivas da precipitação máxima diária mensal no estado da Paraíba avaliada em 238 estações pluviométricas no período de 1994 a 2020.

Mesorregião	N	Média	SD	Mediana	CV (%)
Mata Paraibana	33	34,0	31,4	25,0	92,4%
Agreste	71	21,8	21,7	15,8	99,5%
Borborema	48	18,5	25,0	8,9	135,1%
Sertão	86	25,0	29,0	15,1	116,0%

N, quantidade de estações pluviométricas; SD, desvio padrão; CV (%), Coeficiente de Variação.

em todas as 238 estações, constatou-se que 99,79% séries apresentaram um valor p superior a 1%, indicando a não rejeição da hipótese nula (Fig. 4B). Logo, a maioria das séries apresentam observações independentes, ao longo do tempo, implicando que o método da máxima verossimilhança possa ser utilizado para obtenção das estimativas dos parâmetros da distribuição Gumbel.

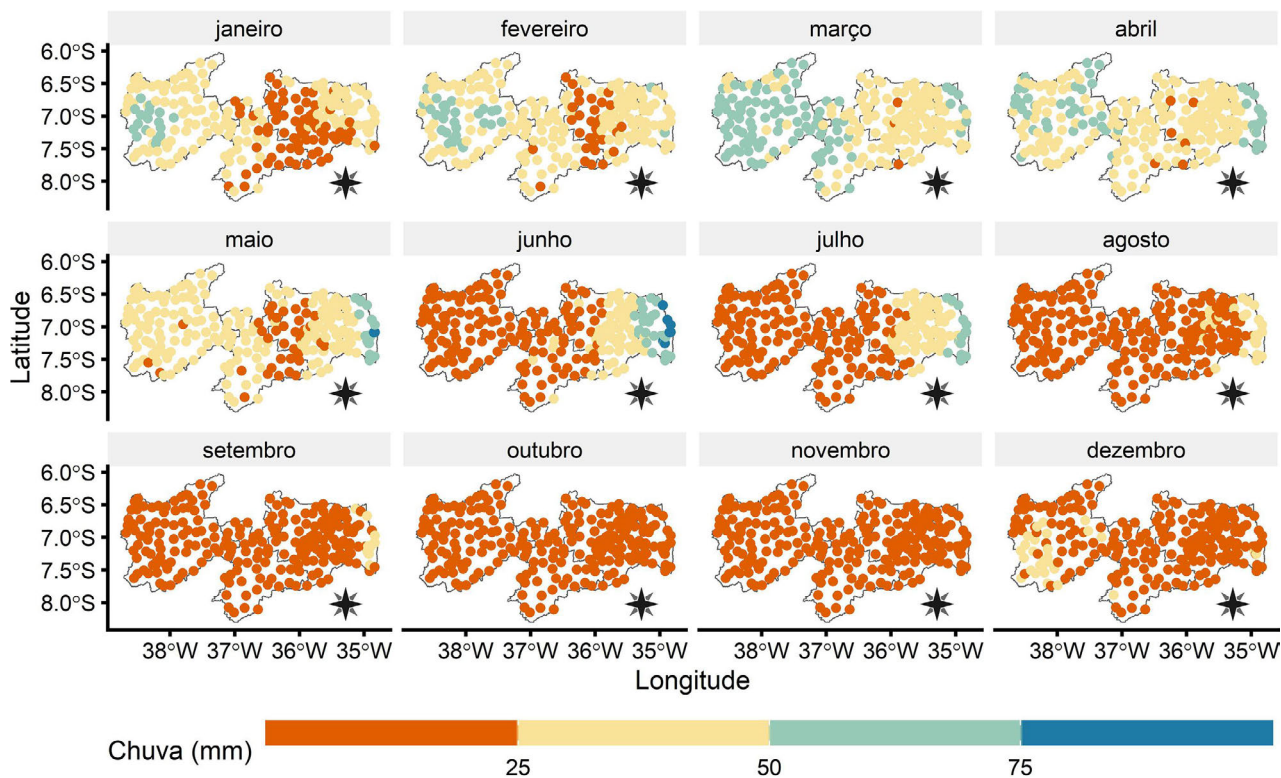
Em termos estatísticos, a utilização do método da máxima verossimilhança para estimativas dos parâmetros de uma distribuição de probabilidade pressupõe independência entre as observações. Assim, tem-se a necessi-

dade da construção de um teste de hipótese para verificar a independência entre os dados. Sabino et al. (2021) apresentaram os ajustes, por meio do método da máxima verossimilhança, em diferentes distribuições de probabilidades, para modelagem da precipitação máxima em 14 estações pluviométricas localizadas no Estado de Mato Grosso. Entretanto, os autores não verificaram a hipóteses de independência, fazendo com que as estimativas não fossem estatisticamente validadas.

### 3.3. Estimativas dos parâmetros da distribuição Gumbel

As estimativas do parâmetro de locação variaram entre 3,9 a 68,0 (Fig. 5A). A mesorregião do Sertão e Mata Paraibana apresentaram os maiores valores estimados deste parâmetro, sendo superiores a 40,0 na maior parte dos locais, mas em períodos distintos, o Sertão de janeiro a março e a Mata Paraibana de março até junho.

As estimativas do parâmetro de escala, na maioria dos locais da mesorregião do Sertão, ficaram entre 20,0 a 30,0, nos meses de janeiro a março. Resultados semelhantes foram observados na Mata Paraibana, porém em



**Figura 3** - Distribuição espacial dos valores médios da precipitação máxima no Estado da Paraíba avaliada em 238 estações pluviométricas no período de 1994 a 2020.

meses distintos, com maiores estimativas nos meses do segundo trimestre do ano (Fig. 5B).

### 3.4. Adequação do ajuste da distribuição

Analisando a distribuição espacial dos valores  $p$  do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), para verificação da adequação da distribuição Gumbel aos dados da precipitação máxima, foi constatado que não ocorreu nenhum valor  $p$  inferior a 1%, indicando que a distribuição Gumbel é adequada para modelagem da precipitação máxima ao nível de 1% de significância (Fig. 6). Cunha Filho *et al.* (2022), ao analisarem as chuvas no município de São Bento do Una, Pernambuco, concluíram que a distribuição Gumbel é adequada ( $p < 0,05$ ) para modelagem da precipitação máxima anual nesta região.

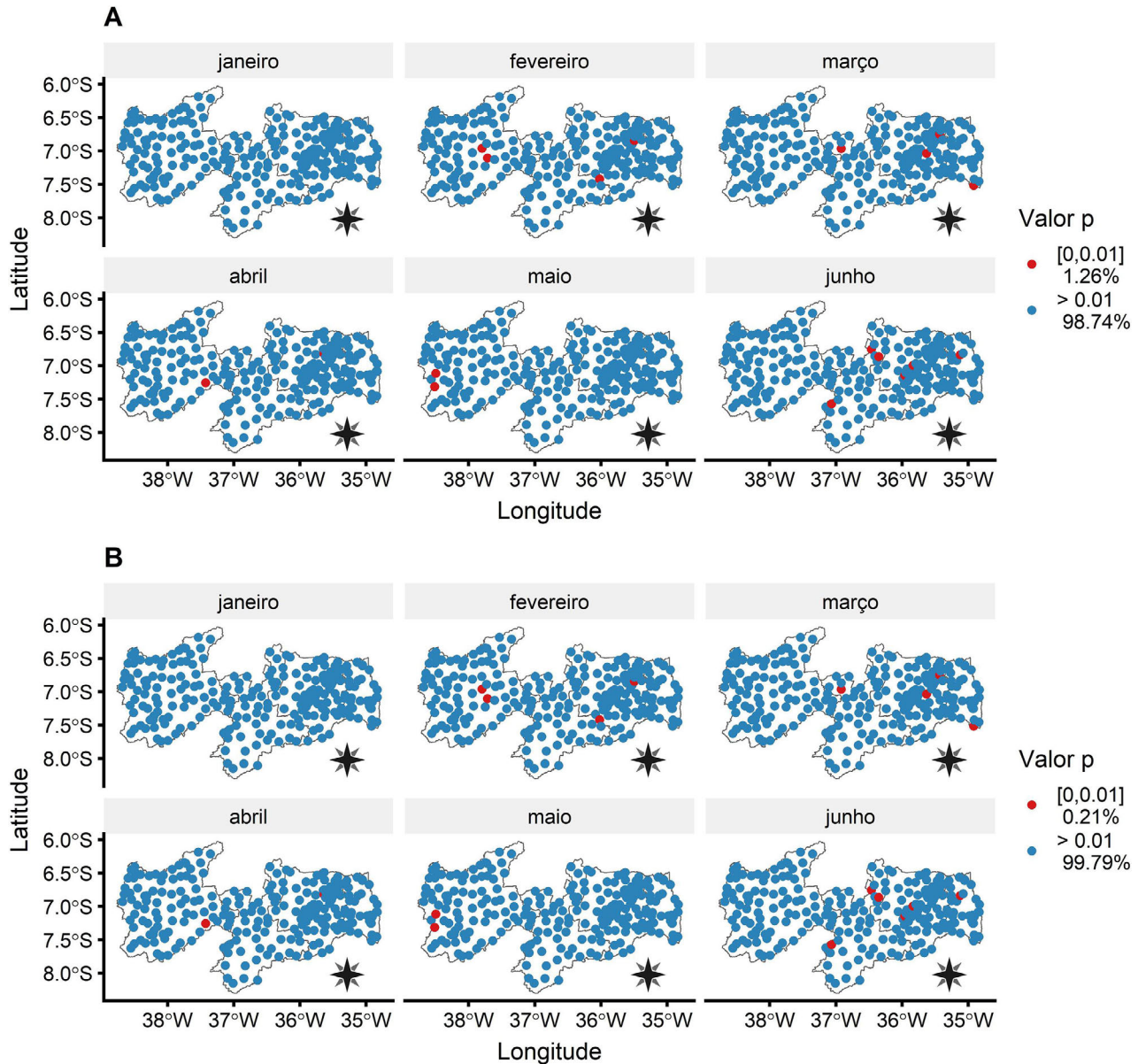
Os resultados deste estudo revelam que a distribuição Gumbel é adequada para modelagem dos dados de precipitação máxima diária (PMD) no Estado da Paraíba entre os meses de janeiro a junho. Resultados semelhantes foram encontrados em Souza *et al.* (2022) que, ao analisarem os dados da PMD no município de João Pessoa, capital da Paraíba, concluíram que a distribuição Gumbel foi adequada nos meses do primeiro semestre do ano. Entretanto, neste estudo supracitado, os autores modelaram apenas dados da PMD em um único local, não investigando os valores máximos em outras regiões do estado, até mesmo regiões próximas ao litoral que apresentam

uma grande importância econômica, que é o caso dos municípios de Cabedelo e Santa Rita, que estão entre os cinco melhores municípios em relação ao Produto Interno Bruto.

### 3.5. Mapas dos níveis de retorno da precipitação máxima diária

As estimativas dos níveis de retorno considerando um período de retorno de 5 anos, evidenciam que as mesorregiões da Mata Paraibana e Sertão apresentaram os maiores registros de precipitação máxima diária, mas sendo em diferentes períodos (Fig. 7A). A mesorregião do Sertão apresentou os maiores índices nos meses de janeiro a março, sendo estimados volumes diários superiores a 75 mm durante o primeiro trimestre do ano. Por outro lado, a Mata Paraibana apresentou as maiores estimativas entre os meses de abril a junho, sendo esperada uma precipitação máxima diária de pelo menos 125 mm no mês de junho em locais litorâneos, onde fica localizado, por exemplo, o município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba.

Semelhantemente, as estimativas para um período de retorno de 50 anos evidenciam que as mesorregiões da Mata Paraibana e Sertão apresentaram os maiores níveis de precipitação máxima em um único dia (Fig. 7B). Em alguns locais do Sertão é esperado um acumulado diário de pelo menos 150 mm em um intervalo de 50 anos. Na



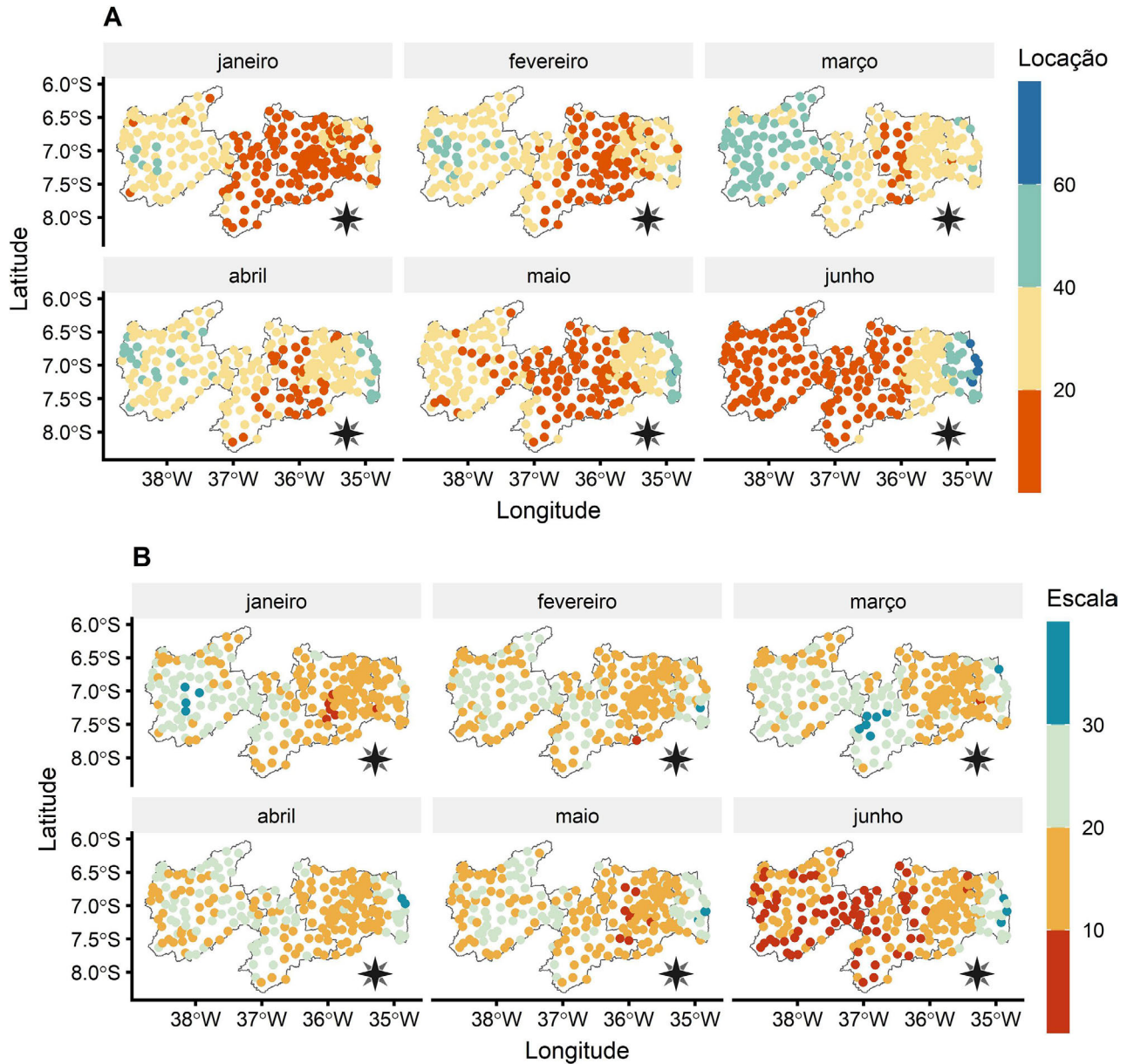
**Figura 4** - Distribuição espacial dos valores p dos testes de estacionariedade (A) e de independência (B) da precipitação máxima diária no Estado da Paraíba avaliada em 238 estações pluviométricas no período de 1994 a 2020.

Mata Paraibana tem-se a ocorrência da estimativa de chuvas diárias superiores a 200 mm no mês de junho.

No Brasil, embora tenham-se diversos órgãos de monitoramento em relação aos níveis diários de chuvas por meio dos pluviômetros, a disponibilidade de informações das séries históricas é referente a um período curto, entre 25 a 40 anos, impactando nas estimativas dos modelos estatísticos. Assim, uma fragilidade nesta pesquisa envolve a utilização de séries históricas de apenas 27 anos, causando um grande viés nas estimativas da PMD para períodos superiores 30 anos.

Em se tratando de construções de grande porte, tais como construções de barragens, adutoras e hidrelétricas, é

mais comum a análise de dados da PMD anual e não mensal, uma vez que estas obras tendem a durar anos para conclusão. Porém, as análises da PMD para cada mês têm a finalidade de fornecer estimativas mais precisas, principalmente em áreas urbanas que vêm sofrendo cada vez mais com os impactos de chuvas máximas, destacando-se os alagamentos, enchentes e deslizamentos de terra sobre imóveis residenciais, resultando no desalojamento de pessoas e até mesmo em vítimas fatais. Adicionalmente, as estimativas da PMD diária em meses chuvosos podem auxiliar no planejamento de projetos com o objetivo de maximizar os recursos hídricos, uma vez que as ocorrências de chuvas extremas estão relacionadas com os inves-



**Figura 5** - Distribuição espacial das estimativas dos parâmetros de locação (A) e de escala (B) da distribuição Gumbel pelo método da máxima verossimilhança.

timentos públicos e a segurança das obras de aproveitamento hídrico (Santos *et al.*, 2016).

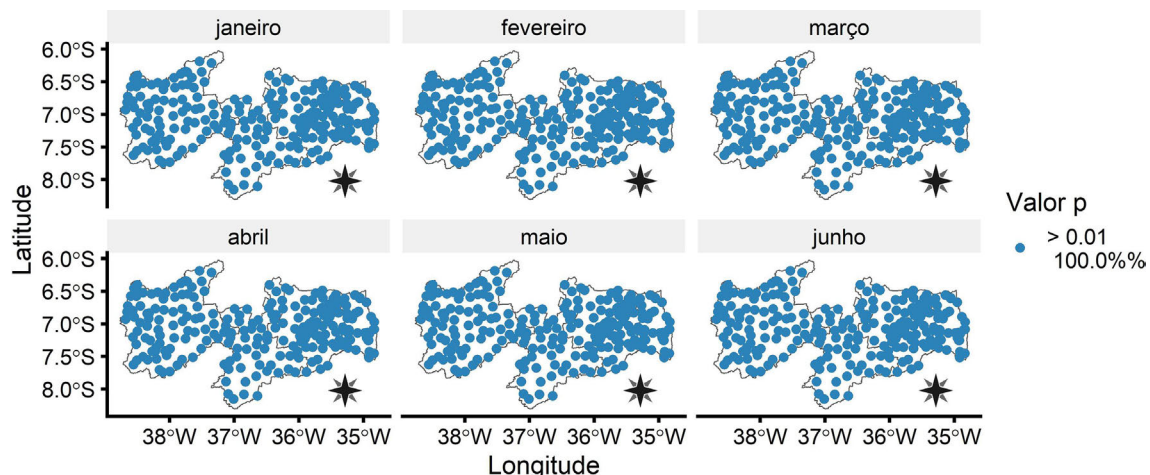
#### 4. Considerações Finais

Nesta pesquisa apresentamos uma modelagem da precipitação máxima diária em 238 estações pluviométricas localizadas no estado da Paraíba, compreendendo o período de 1994 a 2020. Os resultados demonstraram que, em geral, os maiores níveis da precipitação máxima ocorreram nos meses do primeiro semestre, sendo então realizado o ajuste nos meses de janeiro a junho. Mais de 98% das séries de precipitação máxima apresentaram estacio-

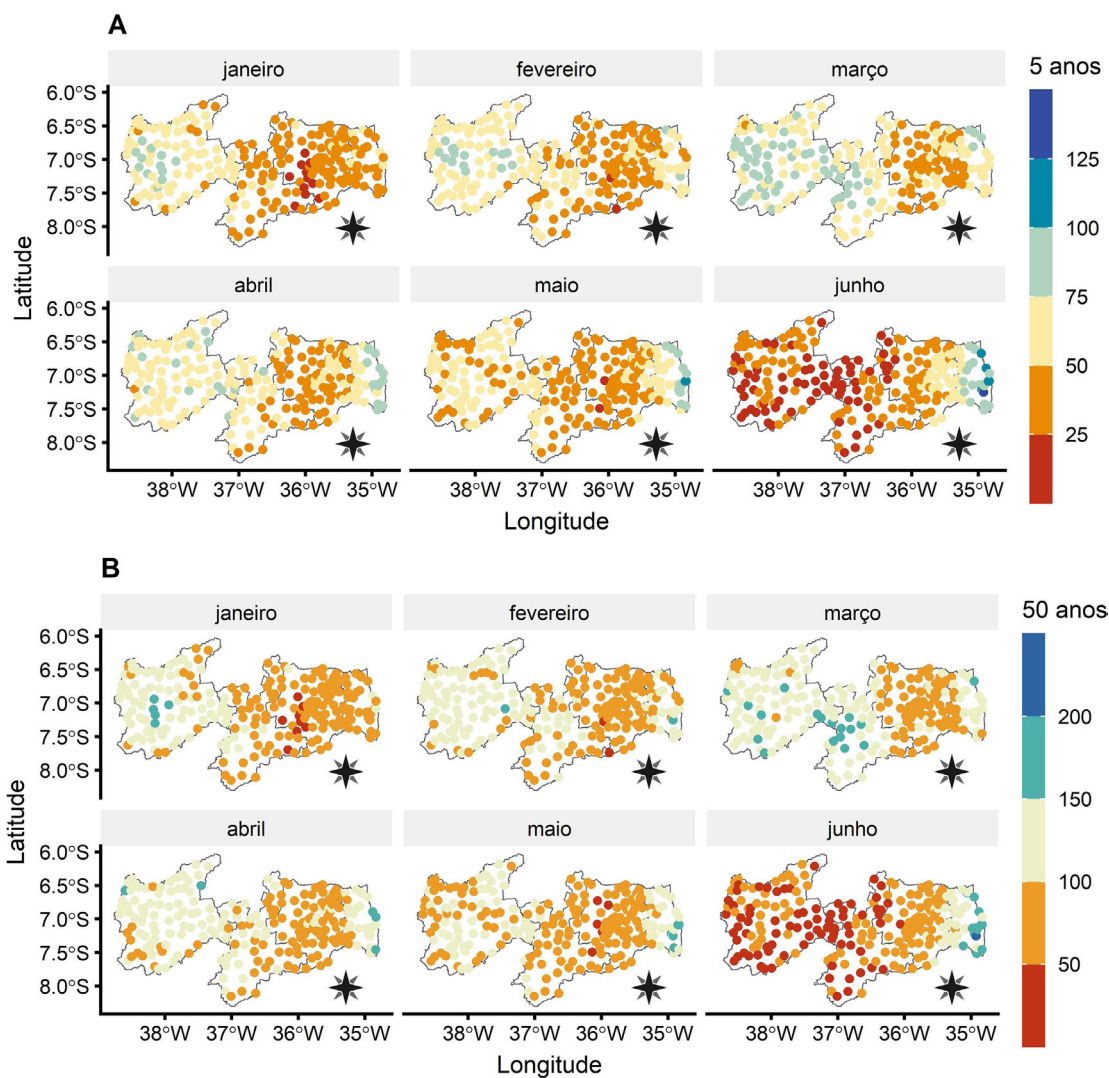
nariedade e observações independentes, permitindo com que os parâmetros da distribuição Gumbel fossem estimados pelo método da máxima verossimilhança. A distribuição Gumbel se mostrou adequada para modelar a PMD no estado da Paraíba, confirmando a hipótese inicial. Essa flexibilidade da distribuição Gumbel tem sido relatada em diversos trabalhos, evidenciando a utilidade dessa distribuição no estudo de eventos extremos, em particular, envolvendo precipitação pluviométrica.

Os resultados das estimativas dos níveis de retorno em períodos de 5 e 50 anos demonstram que as mesorregiões da Mata Paraibana e Sertão apresentaram os maiores registros de PMD, mas sendo em diferentes períodos, o





**Figura 6** - Distribuição espacial dos valores p do teste Kolmogorov-Smirnov (KS) para verificação da adequação da distribuição Gumbel aos dados de precipitação máxima diária no estado da Paraíba avaliada em 238 estações pluviométricas no período de 1994 a 2020.



**Figura 7** - Distribuição espacial das estimativas dos níveis de retorno de 5 anos (A) e de 50 anos (B) da precipitação máxima diária no Estado da Paraíba.

Sertão nos meses de janeiro a março e a Mata Paraibana nos meses de abril a junho. Enfatiza-se que os resultados obtidos na presente pesquisa são relevantes e podem auxiliar no planejamento de políticas públicas no sentido de reduzir o impacto de eventos extremos no estado.

Segundo informações do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013), o Estado da Paraíba apresentou diversos registros de enxurradas, inundações e alagamentos entre os anos de 1991 a 2012. Nesse período foram 215 registros de enxurradas severas, sendo as mesorregiões do Agreste Paraibano e Sertão Paraibano a mais afetadas, compreendendo 64% desses registros. Nesta pesquisa do CEPED constatou-se a ocorrência de 136 registros de inundações, sendo o Sertão Paraibano a região mais afetada, representado 36% desses desastres no estado, porém, o município mais atingido por inundações foi o de João Pessoa, situado na Mata Paraíba, com quatro ocorrências. Em se tratando de alagamentos, foram registradas três ocorrências caracterizada como desastre, todas registradas na mesorregião da Mata Paraibana.

Diante disso, as estimativas dos níveis de retorno da PMD na região em estudo, podem ser de grande auxílio na implementação de políticas públicas em cada mesorregião do Estado da Paraíba, auxiliando no planejamento para execução de obras e mobilização de pessoal, uma vez que, sabendo os meses com maiores probabilidades de chuvas intensas, é possível uma melhor preparação da defesa civil, corpo de bombeiros, entre outros.

As séries históricas do conjunto de dados compreendiam um período de 27 anos, fazendo com que as estimativas para períodos de retorno superiores a este limiar apresentem maiores erros padrões, aumentando consideravelmente a margem de erro em torno de suas estimativas. Diante disso, as estimativas da PMD para longos períodos, como o de 50 anos que foi apresentado neste trabalho, surge a necessidade de uma análise minuciosa do projetista para avaliação desses resultados, conseqüentemente, fazendo parte dos riscos inerentes aos projetos hidrológicos. Vale ressaltar que essa fragilidade na utilização de uma série histórica curta de observações é uma questão comum no Brasil, uma vez as instalações e os registros de estações pluviométricas no país é relativamente recente.

Para trabalhos futuros, tem-se a necessidade da modelagem da dependência espacial da PMD no Estado da Paraíba por meio de técnicas geoestatísticas, obtendo assim um mapa em alta resolução para os níveis de retorno da precipitação máxima diária.

## Referências

ABREU, L.P.; MUTTI, P.R.; LIMA, K.C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Paraíba, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 7, n. 2, p. 82-97, 2019. doi

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.D.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. doi
- CAEIRO, F.; MATEUS, A. **Randtests: Testing Randomness in R**. 2014. Disponível em <https://cran.r-project.org/package=randtests>.
- CEPED. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991-2012. Volume Paraíba**. Florianópolis: Centro Universitário sobre Estudos e Pesquisa sobre Desastres, p. 105, 2013. Disponível em <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>.
- CHAKRABORT, S.; CHAKRAVARTY, D.; MAZUCHELI, J.; BERTOLI, W. A discrete analog of Gumbel distribution: properties, parameter estimation and applications. *J. Appl. Stat.* v. 48, p. 712-737, 2021. doi
- COTTA, H.H.A.; CORREA, W.S.C.; ALBUQUERQUE, T.T.A. Gumbel distribution application for values of extreme precipitation in municipality of Vitória-ES. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 19, p. 203-217, 2016. doi
- CUNHA FILHO, M.; OLIVEIRA, F.H.P.C.; SHINOHARA, N.K.S.; PISCOYA, V.C.; MEDEIROS, R.M.; et al. A modelagem em séries temporais para estimativa de precipitação máxima diária no município de Santo Bento do Una (Pernambuco-Brasil). *Revista Científica Multidisciplinar*, v. 3, n. 2, p. 1-12, 2022. doi
- ECKHARDT, R.R.; HAETINGER, C.; SALDANHA, D.L.; FERREIRA, E.R. FAVA E SILVA, J. DIEFRICH, V.L. Previsão e mapeamento da área urbana inundável na cidade de Lajeado - RS - Brasil. In: **VI International Conference on Engineering and Computer Education (ICECE)**, Buenos Aires, Argentina, 2009.
- GILLELAND, E.; KATZ, R.W. extRemes 2.0: An extreme value analysis package in R. *Journal of Statistical Software*, v. 72, n. 8, p. 1-39, 2016. doi
- HUANG, P.; HU, F.; DONG, F. Parameter estimation of Gumbel distribution and its application to pitting corrosion depth of concrete girder bridges. *Cluster Computing*, v. 22, p. 3405-3411, 2019. doi
- LJUNG, G.M.; BOX, G.E.P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, v. 65, p. 297-303, 1978. doi
- MADEIRA, P.; BENASSI, R.; HASSAN, V. **ZCIT e os Principais Sistemas Meteorológicos no Nordeste**. 2021. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2021/01/22/zcit-e-os-principais-sistemas-meteorologicos-no-nordeste-7545>, acesso em Maio 5, 2022.
- MARSAGLIA, G.; TSANG W.W.; WANG, J. Evaluating Kolmogorov's distribution. *Journal of statistical software*, v. 8, p. 1-4, 2003. doi
- MEDEIROS, E.S.; ALVES, M.A.; SOUZA, S.A. Estimação de nível de retorno da precipitação máxima diária na cidade de Jataí-GO. *Ciência e Natura*, v. 41, p. 1-9, 2019. doi
- MELLO, C.R.; VIOLA, M.R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Rev. Brás. Ciênc. Solo*, v. 37, n. 1, p. 37-44, 2013. doi
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. 2019. Disponível em <https://www.r-project.org/>

- SANTOS, D.C.; ALBUQUERQUE, E.M. Métodos de estimativa de precipitação máxima diária na cidade de João Pessoa-PB. **CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 9, n. 1, p. 88-102, 2016. Disponível em <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/9683>.
- SABINO, M.; SOUZA, A.P.; ULIANA, E.M.; ALMEIDA, F.T.; LISBOA, L.; ZOLIN, C.A. Distribuições de probabilidade para intensidade de precipitação máxima no Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 321-340, 2021. doi
- SANTOS, R.S.; VIEIRA, P.D.; EVANGELISTA, D.H.R.; OLIVEIRA, L.J.C.; NONATO, D. Caracterização de extremos mensais de precipitação em Cacoal (RO). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 267-280, 2018. doi
- SOUSA, F.A.S.; VIEIRA, V.R.; SILVA, V.P.R.; MELO, V.S.; GUEDES, R.W.S. Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 430-439, 2016. doi
- SOUZA, L.S.; MEDEIROS, E.S.; SILVA, A.Q.; OLIVEIRA, L.A. Modeling the maximum daily rainfall in the municipality of João Pessoa-PB, Brazil, using the Extreme Value Theory. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, n. 18, p. 488-503, 2022. doi
- TORRES, F.T.P.; MACHADO, P.J.O. **Introdução à Climatologia**. Santo André: Geographica, 2008.
- WALD, A.; WOLFOWITZ, J. On a test whether two samples are from the same population. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 11, n. 2, p. 147-162, 1940. doi
- WICKHAM, H. **Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York: Springer New York, 2009. doi

### Endereços de Internet

Agência Executiva de Gestão das Águas - AESA: <http://www.aesa.pb.gov.br/>.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.