

Artigo de Pesquisa

ANÁLISE DA VARIABILIDADE E TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO PARÁ, BRASIL (1982-2022)

Analysis of Precipitation Variability and Trend in the State of Pará, Brazil (1982-2022)

Análisis de la Variabilidad y Tendencia de la Precipitación en el Estado de Pará, Brasil (1982-2022)

Diego Lima Crispim¹, Samara Avelino de Souza França², Maria de Nazaré Alves da Silva³, Rafael Estumano Leal⁴, Andreza Lima Mello⁵, Sheyla Cristina Silva de Almeida Brasil⁶

¹ Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará, Belém, Brasil. E-mail: dlimacrispim@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0003-1491-2636>

² Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará, Belém, Brasil. E-mail: avelinosamara@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0001-5095-3772>

³ Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil. E-mail: nazare_alves@hotmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-8658-2368>

⁴ Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará, Belém, Brasil. E-mail: rafael.estumano@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-6879-7170>

⁵ Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará, Belém, Brasil. E-mail: eng.andrezamello@gmail.com

 <http://orcid.org/0009-0005-8261-0949>

⁶ Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará, Belém, Brasil. E-mail: sheylabrasil20@gmail.com

 <http://orcid.org/0009-0000-4056-1302>

Recebido em 05/11/2024 e aceito em 27/03/2025

RESUMO: Este estudo teve como objetivo analisar a distribuição, o comportamento, a variabilidade e a tendência da precipitação no estado do Pará, Brasil, utilizando séries históricas de dados de precipitação total anual e mensal fornecidos pelo *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) para o período de 41 anos (1982 a 2022). A análise estatística incluiu medidas de tendência central, dispersão e separatrizes, seguidas pela aplicação de testes não paramétricos: Mann-Kendall (MK), Spearman e Sen's Slope, todos com um nível de confiança de 95%. Os resultados revelaram que a precipitação média anual no estado do Pará variou entre 2.433,3 mm e 1.617,8 mm, com uma média de 2.087,8 mm. Observou-se sazonalidade no regime pluviométrico, com um período chuvoso de dezembro a maio, sendo março o mês mais chuvoso, com volumes superiores a 330 mm, e um período menos chuvoso de junho a novembro, com agosto apresentando volumes abaixo de 52 mm. Os testes

não paramétricos aplicados indicaram que as tendências observadas nas séries de precipitação anual foram inconsistentes e não significativas, tanto em direção positiva quanto negativa, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Esses achados sugerem que a precipitação anual no estado do Pará não apresenta mudanças significativas ao longo do tempo, evidenciando a necessidade de uma gestão adequada dos recursos hídricos na região, considerando sua variabilidade.

Palavras-chave: Testes não-paramétricos; Variabilidade pluviométrica; Sazonalidade.

ABSTRACT: This study aimed to analyze the distribution, behavior, variability, and trends of precipitation in the state of Pará, Brazil, using historical series of annual and monthly total precipitation data provided by the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) for a period of 41 years (1982 to 2022). The statistical analysis included measures of central tendency, dispersion, and percentiles, followed by the application of non-parametric tests: Mann-Kendall (MK), Spearman, and Sen's Slope, all at a 95% confidence level. The results revealed that the average annual precipitation in the state of Pará ranged from 2,433.3 mm to 1,617.8 mm, with an average of 2,087.8 mm. Seasonal variability in the precipitation regime was observed, with a rainy season from December to May, March being the rainiest month with volumes exceeding 330 mm, and a drier season from June to November, with August showing volumes below 52 mm. The applied non-parametric tests indicated that the trends observed in the annual precipitation series were inconsistent and not significant, both positively and negatively, at a significance level of 5% ($\alpha = 0.05$). These findings suggest that annual precipitation in the state of Pará does not exhibit significant changes over time, highlighting the need for appropriate management of water resources in the region, considering its variability.

Keywords: Non-parametric tests; Rainfall variability; Seasonality.

ABSTRACT: Este estudio tuvo como objetivo analizar la distribución, el comportamiento, la variabilidad y la tendencia de la precipitación en el estado de Pará, Brasil, utilizando series históricas de datos de precipitación total anual y mensual proporcionados por el Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) para un período de 41 años (1982 a 2022). El análisis estadístico incluyó medidas de tendencia central, dispersión y percentiles, seguido de la aplicación de pruebas no paramétricas: Mann-Kendall (MK), Spearman y Sen's Slope, todas con un nivel de confianza del 95%. Los resultados revelaron que la precipitación media anual en el estado de Pará varió entre 2,433.3 mm y 1,617.8 mm, con un promedio de 2,087.8 mm. Se observó variabilidad estacional en el régimen de precipitación, con un período lluvioso de diciembre a mayo, siendo marzo el mes más lluvioso, con volúmenes superiores a 330 mm, y un período menos lluvioso de junio a noviembre, con agosto presentando volúmenes inferiores a 52 mm. Las pruebas no paramétricas aplicadas indicaron que las tendencias observadas en las series de precipitación anual eran inconsistentes y no significativas, tanto en dirección positiva como negativa, al nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). Estos hallazgos sugieren que la precipitación anual en el estado de Pará no presenta cambios significativos a lo largo del tiempo, destacando la necesidad de una gestión adecuada de los recursos hídricos en la región, considerando su variabilidad.

Palabras clave: Pruebas no paramétricas; Variabilidad pluviométrica; Estacionalidad.

INTRODUÇÃO

A precipitação é um dos componentes climáticos mais relevantes a ser pesquisado na região tropical, visto que influencia as características de outros componentes, tais como a temperatura, umidade relativa do ar e vento (ALBUQUERQUE et al., 2010). Bertoni e Tucci (2009) definem a precipitação como toda água oriunda do meio

atmosférico que chega à superfície terrestre em suas várias formas, seja como neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. Entre essas formas de precipitação, a chuva é classificada como a mais relevante para o estudo da hidrologia, em função do seu escoamento.

O regime da precipitação pluviométrica é um dos principais componentes do clima, sendo fundamental para a manutenção da vida no planeta e relacionado com questões dos setores social, econômico e ambiental (ISHIHARA et al., 2014). Nesse sentido, a realização de estudos sobre a distribuição espaço-temporal da pluviometria é importante para determinar sua interferência no ciclo hidrológico, na lavoura, na geração de energia, entre outras atividades (DIAS et al., 2020). Além disso, compreender o comportamento das precipitações, sua sazonalidade, bem como interferências climáticas é fundamental para a segurança de determinadas regiões, da sua população e ecossistemas (BACK; DA SILVA SOUZA; GALATTO, 2025).

De acordo com Menezes et al. (2015), o estado do Pará possui como peculiaridade uma alta variabilidade na precipitação pluviométrica, ocasionada pela influência de vários sistemas atmosféricos que atuam sobre a região. A maioria das pesquisas a respeito da precipitação pluviométrica no estado do Pará é embasada em dados mensais e anuais de estações pluviométricas (MORAES et al., 2005; AMARAL et al., 2016; MENEZES; FERNANDES, 2016; FERREIRA FILHO et al., 2020).

Apesar de já existirem diversos estudos sobre a precipitação no estado do Pará utilizando dados de estações pluviométricas, como os de Amaral et al. (2016), Ferreira Filho et al. (2020) e Menezes e Fernandes (2016), a presente pesquisa se distingue por seu enfoque em uma série histórica de 41 anos (1982-2022), utilizando dados fornecidos pelo *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC). O uso de dados de satélite representa uma alternativa para regiões com lacunas nas redes de estações de monitoramento, como é o caso de áreas do estado do Pará, permitindo uma análise mais abrangente e contínua da precipitação.

Segundo Oliveira et al. (2021), qualquer pesquisa realizada na área de climatologia requer a utilização de métodos específicos para certos estudos sobre o clima, bem como a existência e disponibilidade de bancos de dados meteorológicos anteriores, com adequada qualidade, consistência e que possibilitem obter extensas séries de dados temporais. No entanto, um problema comum constatado por estudiosos da hidroclimatologia é a dificuldade em obter tais conjuntos de dados.

Cordeiro et al. (2023) destacam que, na região amazônica, as estações de medição são poucas e existem grandes lacunas nas séries históricas, ocasionando um problema na realização de estudos hidroclimatológicos na região, que é sabidamente a que tem maior concentração de recursos hídricos no país. Diante desse cenário, os dados de satélite e simulações numéricas têm sido empregados para tais pesquisas, colaborando para a ampliação da abrangência de dados climáticos.

Para Hrachowitz et al. (2013), o uso de dados de satélite pode ser uma alternativa para viabilizar estimativas de precipitação pluviométrica em lugares que não possuem estações de medição ou têm baixa disponibilidade, ou que não englobam toda a área, contribuindo para a gestão e planejamento dos recursos hídricos e estudos sobre previsões de impactos ambientais.

Os estudos que utilizam dados de satélites para analisar o comportamento, a distribuição e a tendência da precipitação pluviométrica ainda são incipientes no estado do Pará (FERREIRA FILHO et al., 2019a, 2020; PESSOA; RODRIGUES; FERREIRA FILHO, 2022). Ferreira Filho et al. (2019a) analisaram a distribuição espacial, comportamento e tendência da precipitação mensal e anual no estado do Acre de 1982 a 2018, verificando duas estações bem definidas: uma menos chuvosa (maio a outubro) e outra mais chuvosa (novembro a abril), com tendência de aumento do volume de precipitação na escala anual.

Ferreira Filho et al. (2020) investigaram o comportamento pluviométrico no estado do Pará de 1986 a 2015, duas estações distintas: uma mais chuvosa (fevereiro a abril) e outra menos chuvosa (agosto a setembro), com os menores índices de chuva no sudeste do estado. Finalmente, Pessoa, Rodrigues e Ferreira Filho (2022) estimaram índices de erosividade de chuva mensal e anual e avaliaram sua distribuição espaço-temporal no estado do Pará, com a maioria das áreas com alta ou muita alta erosividade, especialmente nos meses de janeiro a abril.

Diferentemente de estudos anteriores, o presente trabalho utilizou ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) em combinação com geoestatística para analisar a distribuição, variabilidade e tendência da precipitação no estado do Pará para uma série temporal mais extensa (41 anos), com utilização de dados satelitais fornecidos pelo *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) e a aplicação de análises estatísticas mais sofisticadas, diferentemente de métodos mais convencionais de interpolação e análise utilizados em outros trabalhos. Assim, a análise estatística consistiu em testes não paramétricos como Mann-Kendall (MK), Spearman e Sen's Slope, conferindo maior precisão e confiabilidade nos resultados.

Dessa maneira, este estudo teve como objetivo analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica no estado do Pará, com base em uma série histórica de 41 anos (1982-2022) utilizando dados fornecidos pelo *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), a fim identificar tendências significativas de precipitação na região, visando contribuir para a compreensão das variações climáticas no estado, com ênfase nas áreas com escassez de estações pluviométricas, proporcionando um panorama mais abrangente e preciso da precipitação na região.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O estado do Pará está localizado na região Norte do Brasil (Figura 1) e abrange parte da Amazônia brasileira. Com uma área territorial de 1.245.870,704 km², é o segundo maior estado do país, representando aproximadamente 14,64% do território nacional, o que equivale a 8.510.417,771 km². Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), a população em 2022 era de 8.120.131 pessoas.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1928), o estado do Pará é caracterizado por três subtipos climáticos: "Af", "Am" e "Aw". Menezes et al. (2015) destacam que esses subtipos estão associados ao clima tropical chuvoso, com temperaturas médias anuais variando entre 24 °C e 26 °C e altos índices pluviométricos, próximos a 2.000 mm anuais.

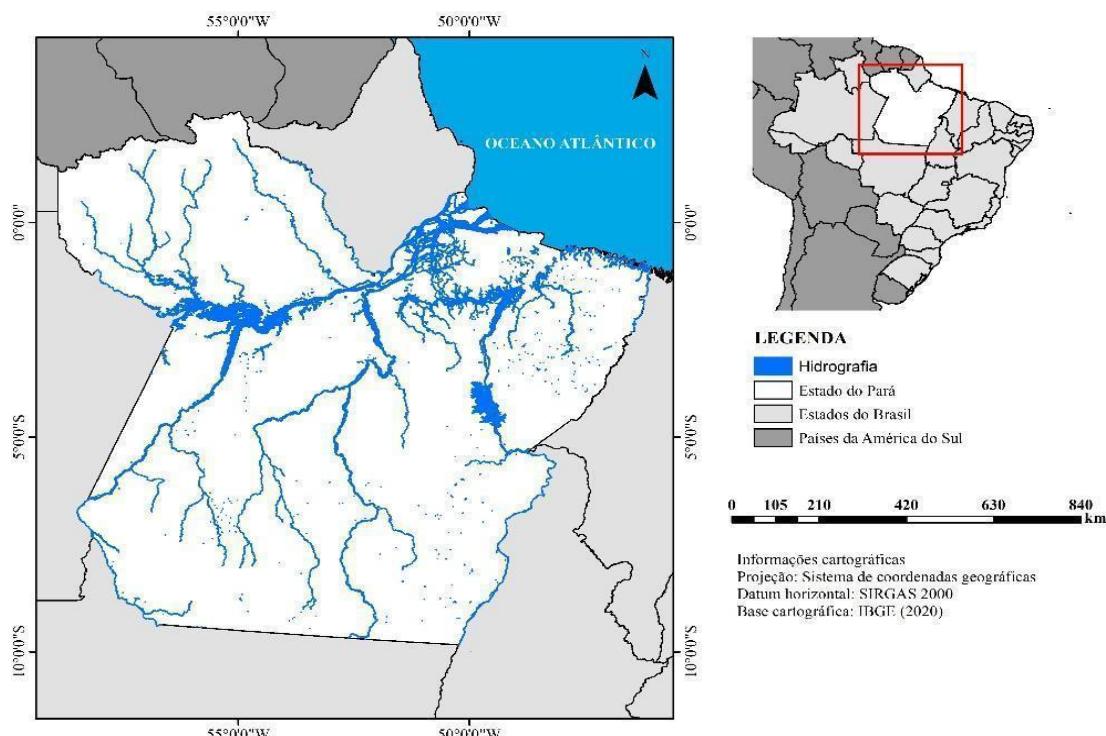


Figura 1. Localização da área de estudo.

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) no estado foi de 0,690 em 2021 (IBGE, 2023). No âmbito econômico, as principais atividades econômicas desenvolvidas são o extrativismo (mineral e vegetal), agricultura, pecuária e indústria, sendo o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* em 2022 de R\$ 29.095 (FAPESPA, 2022). Quanto às características físicas do estado, o relevo é majoritariamente plano, com latossolos e argissolo e vegetação predominantemente de floresta tropical úmida (floresta Amazônica) (RODRIGUES et al., 2007). Quanto à sazonalidade da precipitação, de maneira geral o estado do Pará caracteriza-se por uma estação chuvosa, que na maioria dos municípios vai de dezembro a maio, e por uma menos chuvosa (estação seca) de junho a novembro (MORAES et al., 2005).

Coleta, análise e seleção dos dados

Para realizar a análise da precipitação pluviométrica, utilizou-se um conjunto de dados disponibilizado pelo *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC, 2022), operado pelo *Germany's National Meteorological Service* (DWD). Este centro é uma colaboração do Governo da Alemanha com o *World Climate Research Programme* (WCRP) *Global Climate Observing System* (GCOS).

Segundo Ferreira Filho et al. (2020), as informações do GPCC resultam da combinação de várias bases de dados, incluindo dados de precipitação total mensal provenientes do *Surface Synoptic Observations* (SYNOP) do DWD, da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), dos Estados Unidos, além de boletins climatológicos da *Japan Meteorological Agency* (JMA) *UK's meteorological service* (Met Office).

Esses dados são oriundos de reanálises geradas por modelos climáticos que se ajustam aos dados de campo e interpolam os campos de precipitação (Ferreira et al., 2020). De acordo com Pessoa et al. (2022), o GPCC fornece dados de precipitação mensal e anual com resolução espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ e $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, datados desde 1901. Esses dados são interpolados e calculados por meio de 13 métodos estatísticos, estando disponíveis para acesso público em: <https://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer>.

Os dados foram selecionados em formato de *dataset*, considerando os meses de janeiro a dezembro, o que resultou em uma grade de pontos para a América do Sul. Em seguida, utilizou-se o *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ArcGIS* 10.1 para realizar o recorte da grade de pontos, abrangendo a área territorial do estado do Pará (Figura 2). Os dados utilizados para este estudo foram mensais e anuais, obtidos diretamente do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), abrangendo o período de 1982 a 2022.

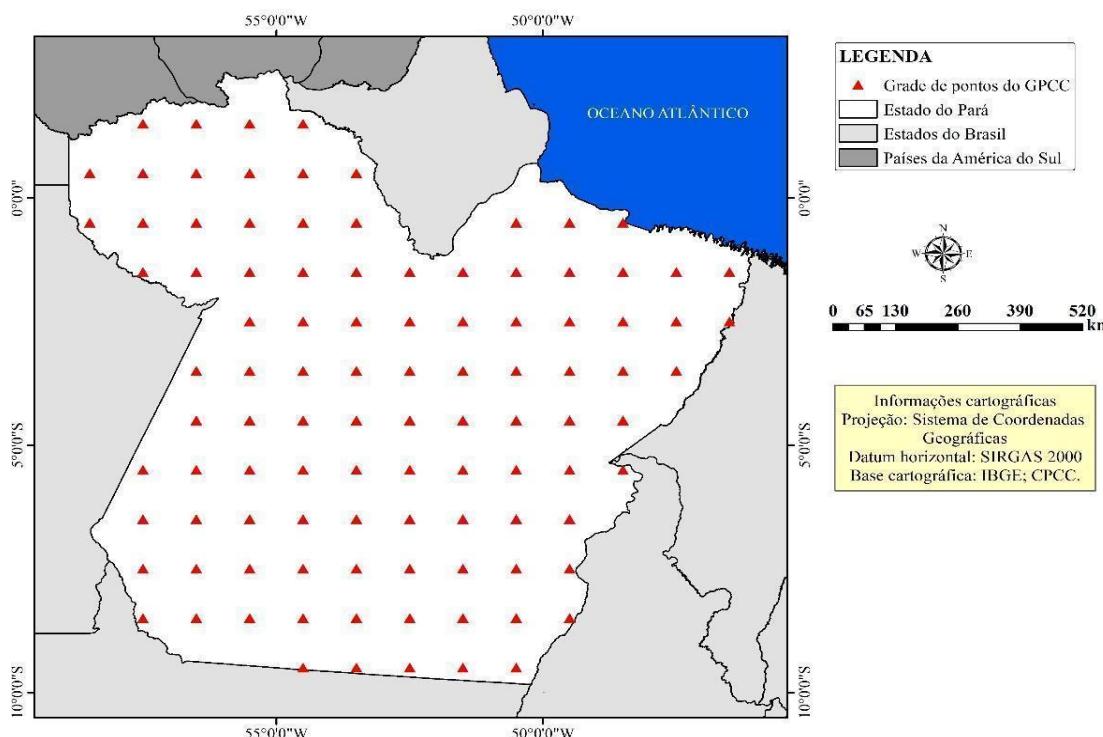


Figura 2. Localização das grades de pontos do GPCC no estado do Pará.

Dinâmica espacial e temporal

Nesta pesquisa, foram empregados métodos baseados em hidrologia e geoestatística para analisar a precipitação em duas dimensões: temporal (ao longo do ano) e espacial (na extensão territorial do estado), utilizando a série histórica do conjunto de dados do GPCC. Para isso, foram elaborados mapas de precipitação pluviométrica por meio de um método de interpolação.

Embora diversos métodos de interpolação, como a Distância Inversa ao Quadrado (IDW), a interpolação polinomial global e local, funções-base radiais e a krigagem (simples, linear ordinária, universal e cokrigagem), sejam comumente utilizados em estudos de precipitação (Ishihara et al., 2014), nesta pesquisa foi apenas a krigagem ordinária que foi aplicada para a construção dos mapas. Este método foi escolhido devido à sua alta aplicabilidade e precisão, especialmente em áreas sem monitoramento hidrológico, como demonstrado em estudos realizados na região Norte (Ishihara et al., 2014; Ferreira Filho et al., 2019a, 2019b; Ferreira Filho et al., 2020). A krigagem é amplamente adotada no mapeamento da precipitação pluviométrica, pois possibilita a geração e espacialização das informações pluviométricas (DAS et al., 2017).

Segundo Zhang et al. (2020), a krigagem é um método de interpolação espacial baseado em geoestatística, que considera de forma integral as características da variabilidade espacial dos pontos amostrais. Além disso, apresenta a vantagem de alta aplicabilidade e precisão nas previsões. Katipoğlu (2022) destaca que esse método estima de maneira otimizada as mudanças espaciais em pontos não amostrados, utilizando informações estruturais do semivariograma. Assim, a krigagem pode ser expressa pela Equação 1:

$$N_p = \sum_i^n P_i \times N_i \quad (1)$$

n: o número de pontos que formam o modelo; N_i : valores de ondulação geoidal dos pontos usados no cálculo de N_p ; N_p : o valor de ondulação procurado; P_i : o valor do peso correspondente a cada valor de N_i usado no cálculo de N .

Dados do Índice Oceânico Niño (ION)

O Índice Oceânico Niño (ION) é uma métrica utilizada para monitorar anomalias na temperatura da superfície do Oceano Pacífico, calculada por meio de uma média móvel de três meses (MARCUZZO et al., 2014). Quando o ION ultrapassa +0,5 °C durante, pelo menos, cinco meses consecutivos, o período é classificado como *El Niño*. Por outro lado, quando o índice fica abaixo de -0,5 °C por cinco meses consecutivos, é caracterizado como *La Niña*. É importante destacar que os valores representados nas cores vermelha, azul e preta indicam, respectivamente, os fenômenos de *El Niño*, *La Niña* e os anos neutros (Tabela 1).

Tabela 1. Valores médios do Índice Oceânico Niño (ION) de 3 meses, referente ao período de 1982 a 2022.

| Anos | DJF | JFM | FMA | MAM | AMJ | MJJ | JJA | JAS | ASO | SON | OND | NDJ |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1982 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 1,1 | 1,6 | 2,0 | 2,2 | 2,2 |
| 1983 | 2,2 | 1,9 | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,3 | -0,1 | -0,5 | -0,8 | -1,0 | -0,9 |
| 1984 | -0,6 | -0,4 | -0,3 | -0,4 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,6 | -0,9 | -1,1 |
| 1985 | -1,0 | -0,8 | -0,8 | -0,8 | -0,8 | -0,6 | -0,5 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,4 |
| 1986 | -0,5 | -0,5 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,2 |
| 1987 | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,3 | 1,1 |
| 1988 | 0,8 | 0,5 | 0,1 | -0,3 | -0,9 | -1,3 | -1,3 | -1,1 | -1,2 | -1,5 | -1,8 | -1,8 |
| 1989 | -1,7 | -1,4 | -1,1 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,1 |
| 1990 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| 1991 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 1,2 | 1,5 |
| 1992 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,4 | 0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,3 | -0,1 |
| 1993 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,1 |
| 1994 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,1 |
| 1995 | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,0 | -0,2 | -0,5 | -0,8 | -1,0 | -1,0 | -1,0 |
| 1996 | -0,9 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,5 |
| 1997 | -0,5 | -0,4 | -0,1 | 0,3 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 1,9 | 2,1 | 2,3 | 2,4 | 2,4 |
| 1998 | 2,2 | 1,9 | 1,4 | 1,0 | 0,5 | -0,1 | -0,8 | -1,1 | -1,3 | -1,4 | -1,5 | -1,6 |
| 1999 | -1,5 | -1,3 | -1,1 | -1,0 | -1,0 | -1,0 | -1,1 | -1,1 | -1,2 | -1,3 | -1,5 | -1,7 |
| 2000 | -1,7 | -1,4 | -1,1 | -0,8 | -0,7 | -0,6 | -0,6 | -0,5 | -0,5 | -0,6 | -0,7 | -0,7 |
| 2001 | -0,7 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,3 | -0,3 | -0,3 |
| 2002 | -0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,3 | 1,1 |
| 2003 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,0 | -0,3 | -0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| 2004 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 2005 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,3 | -0,6 | -0,8 |
| 2006 | -0,9 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | -0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,9 |
| 2007 | 0,7 | 0,2 | -0,1 | -0,3 | -0,4 | -0,5 | -0,6 | -0,8 | -1,1 | -1,3 | -1,5 | -1,6 |
| 2008 | -1,6 | -1,5 | -1,3 | -1,0 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | -0,2 | -0,2 | -0,4 | -0,6 | -0,7 |
| 2009 | -0,8 | -0,8 | -0,6 | -0,3 | 0,0 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,4 | 1,6 |
| 2010 | 1,5 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | -0,2 | -0,7 | -1,0 | -1,3 | -1,6 | -1,6 | -1,6 | -1,6 |
| 2011 | -1,4 | -1,2 | -0,9 | -0,7 | -0,6 | -0,4 | -0,5 | -0,6 | -0,8 | -1,0 | -1,1 | -1,0 |
| 2012 | -0,9 | -0,7 | -0,6 | -0,5 | -0,3 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | -0,2 |
| 2013 | -0,4 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,3 |
| 2014 | -0,4 | -0,5 | -0,3 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| 2015 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,9 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,6 |
| 2016 | 2,5 | 2,1 | 1,6 | 0,9 | 0,4 | -0,1 | -0,4 | -0,5 | -0,6 | -0,7 | -0,7 | -0,6 |
| 2017 | -0,3 | -0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | -0,1 | -0,4 | -0,7 | -0,8 | -1,0 |
| 2018 | -0,9 | -0,9 | -0,7 | -0,5 | -0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,8 |
| 2019 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |

| Anos | DJF | JFM | FMA | MAM | AMJ | MJJ | JJA | JAS | ASO | SON | OND | NDJ |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2020 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | -0,1 | -0,3 | -0,4 | -0,6 | -0,9 | -1,2 | -1,3 | -1,2 |
| 2021 | -1,0 | -0,9 | -0,8 | -0,7 | -0,5 | -0,4 | -0,4 | -0,5 | -0,7 | -0,8 | -1,0 | -1,0 |
| 2022 | -1,0 | -0,9 | -1,0 | -1,1 | -1,0 | -0,9 | -0,8 | -0,9 | -1,0 | -1,0 | -0,9 | -0,8 |

Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (2023).

Os índices ION podem ser classificados conforme as intensidades de ocorrência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña*, podendo ser fraca, moderada ou forte (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação da intensidade do Índice Oceânico *Niño(a)*

| Eventos | ION | Intensidade |
|----------------|---------------|-------------|
| El Niño | 0,5 a 0,9 | Fraca |
| | 1,0 a 1,4 | Moderada |
| | ≥1,5 | Forte |
| La Niña | - 0,5 a - 0,9 | Fraca |
| | -1,0 a - 1,4 | Moderada |
| | ≤ -1,5 | Forte |

Fonte: Adaptado de Golden Gate Weather Services (2008).

Análise da Estatística Descritiva

A estatística descritiva foi utilizada para fornecer um resumo conciso dos dados de precipitação mensal e anual, permitindo a identificação de padrões e a realização de inferências por meio de medidas de tendência central (ex.: média), dispersão e separatrizes. Assim, foram elaborados gráficos da precipitação média anual e mensal para verificar a ocorrência de variabilidade temporal e sazonalidade. Para isso utilizou-se o suplemento “Ferramenta de Análise” - “Estatística Descritiva” do Microsoft Excel para gerar um relatório dos dados de entrada, fornecendo informações sobre a tendência e a variabilidade centrais dos deles.

Testes de Tendência

Para analisar a existência de tendência nas séries históricas de precipitação pluviométrica, foram considerados dados totais anuais acumulados, os quais foram submetidos aos testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall (MK), Spearman e Sen's Slope. Os critérios empregados para o cálculo dos testes de tendência foram: a) grau de confiança de 95%; b) nível de significância α de 0,05; c) valor crítico ($Z_{\alpha/2}$) de 1,960.

A escolha dos testes estatísticos não paramétricos se deu pela sua eficácia em análises de tendência de dados com distribuição não normal e elevada variância, além de serem amplamente empregados em estudos hidrológicos (ASSIS; SOUSA;

LINHARES, 2020; ALVES; DOS SANTOS GONÇALVES; DE MORAIS NASCIMENTO, 2022).

Teste de Mann-Kendall (MK)

O teste de tendência de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) foi amplamente utilizado em estudos que analisam a tendência da precipitação na região amazônica, como demonstrado por Ferreira Filho et al. (2020), Crispim et al. (2019), Dias et al. (2019) e Amaral et al. (2016). Este teste baseia-se na comparação de cada valor da série com os valores restantes, sempre em ordem sequencial, e calcula a quantidade de vezes em que os valores restantes são maiores ou menores que o valor analisado.

A variável estatística S para um conjunto de n dados no teste de Mann-Kendall é definida como o somatório dos sinais da diferença, par a par, de todos os valores do conjunto de dados em relação aos valores futuros, conforme mostrado nas Equações (2) e (3):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sinal}(X_j - X_k) \quad (2)$$

Em que: X_k - representa os valores da série dos dados de precipitação, usualmente empregados os períodos anuais, j e k - consistem em índices de tempo, n - retrata o número de observações da série; e o sinal $(X_j - X_k)$ é determinado pela Eq. (3):

$$\text{Sinal}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } (X_j - X_k) > 0 \\ 0, & \text{se } (X_j - X_k) = 0 \\ -1, & \text{se } (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Para séries com grande número de termos (n), sob a hipótese nula (H_0) de inexistência de tendência nos dados de precipitação, a variável S apresenta uma distribuição normal com média zero e variância definida pela Equação (4).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

O índice Z_{MK} segue uma distribuição normal, em que valores positivos indicam uma tendência de crescimento, enquanto valores negativos sugerem uma tendência de diminuição. A determinação do índice Z_{MK} na distribuição normal é feita por meio da Equação (5).

$$Z_{MK} = \frac{(S - 1)}{\sqrt{Var_{(s)}}}; \text{ se } S > 0; \quad Z_{MK} = \frac{(S + 1)}{\sqrt{Var_{(s)}}}; \text{ se } S < 0 \quad (5)$$

Com base na análise da estatística Z_{MK} , toma-se a decisão final de aceitar ou rejeitar a hipótese nula (H_0). Isso significa que se pode afirmar a consistência dos dados ou, alternativamente, rejeitar a hipótese nula em favor da hipótese alternativa, que propõe a existência de uma tendência nos dados. Como se trata de um teste bicaudal do t de Student, para rejeitar a hipótese nula (H_0), o valor de $|Z_{MK}|$ deve ser maior que $Z_{\alpha/2}$ (ASSIS; SOUSA; LINHARES, 2020).

Teste de Spearman

O teste de Spearman (r_s) é outro método não paramétrico utilizado para analisar a ocorrência de tendências em séries temporais de precipitação (CRISPIM et al., 2019; DIAS et al., 2019; MENEZES; FERNANDES, 2016). Neste teste, assume-se que os dados das séries históricas são independentes e distribuídos de forma homogênea. A hipótese nula (H_0) indica que não há tendência, enquanto a hipótese alternativa (H_1) sugere a ocorrência de uma tendência positiva ou negativa na série.

O teste não paramétrico de correlação ordinal, conhecido como teste de Spearman (r_s), não considera os valores absolutos das variáveis envolvidas, mas sim a ordem em que estão estruturados, seja por tamanho, relevância ou outro critério similar. Nesse caso, os valores das variáveis são substituídos por números que vão de 1 a n , representando a posição, posto ou classificação de cada um em relação aos demais (Fonseca et al., 2010). A correlação ordinal é calculada pela Equação (6).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

Em que: d_i - $y_i - x_i$ (diferença de ranque); n - Tamanho da amostra.

Da mesma maneira como o coeficiente de correlação r , o coeficiente r_s pode admitir valores compreendidos no intervalo $[-1, +1]$, ou seja, pode variar de $-1 \leq r_s \leq 1$.

Em que:

$r_s = +1$, existe concordância completa entre as classificações;

$r_s = 0$, não há relação alguma entre as classificações;

$r_s = -1$, existe completa discordância entre as classificações.

Para a análise de tendência é fundamental determinar os parâmetros baseados nas Equações (7), (8) e (9):

$$Var_{[r_s]} = \frac{1}{n-2} \quad (7)$$

Em que:

$Var_{[r_s]}$ – Variância da amostra;

n - Tamanho da amostra.

$$t_{crit.} = \frac{r_s}{\sqrt{Var_{[r_s]}}} \quad (8)$$

Em que:

$Var_{[r_s]}$ - Variabilidade da amostra;

$t_{crit.}$ = t de student ou $t_{crítico}$.

$$t_{calc} = \frac{r_s}{\sqrt{\frac{n-2}{1-r_s^2}}} \quad (9)$$

De acordo com Silveira et al. (2017), o valor de t_{calc} . obtido deve ser contraposto com o t de Student, em que se $|t_{calc}|$ for igual ou maior que o $t_{crit.}$, a correlação é estatisticamente significativa.

Teste de Sen's Slope

Por último, foi empregado o teste não paramétrico de Sen's Slope (Sen, 1968), que permite calcular a altura da lâmina d'água resultante da precipitação pluviométrica, expressa em milímetros. Dessa forma, a unidade obtida desse teste é mm/ano, podendo ser tanto positiva quanto negativa. Resultados positivos indicam um aumento na lâmina d'água por ano, enquanto valores negativos sinalizam uma redução (DIAS et al., 2019; SILVEIRA et al., 2017). Assim, o teste de Sen's Slope pode ser definido pela Equação (10):

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{J - k} \text{ para } i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

Em que:

X_j e X_k - são os valores dos dados no tempo j e k (j > k), respectivamente.

A mediana dos N valores de Q_i é o estimador da inclinação de Sen's Slope; se N é ímpar, logo o estimador de Sen's Slope é calculado pela Equação (11).

$$Q_{média} = Q \left[\left(\frac{N+1}{2} \right) \right] \quad (11)$$

Se N é par, o estimador da inclinação de Sen's Slope é determinado pela Equação (12).

$$Q_{média} = \frac{1}{2} \left(Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\left[\frac{N+2}{2} \right]} \right) \quad (12)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No estado do Pará, de 1982 a 2022, a ocorrência de *La Niña* foi mais frequente (n = 15; 63,4%) que *El Niño* (n = 10; 48,8%) (Tabela 3), com intensidade predominantemente fraca (46,7%) em contraste a eventos de *El Niño* majoritariamente moderado (40%) ou forte (40%). Esses dados sugerem uma predominância de fenômenos mais fracos de *La Niña*, mas com impactos de longo prazo devido à duração mais prolongada dos eventos.

Tabela 3. Eventos de *El Niño* e *La Niña*, intensidades e duração (meses) durante o período de 1982 a 2022.

| Anos | Eventos | Intensidade | Início/Fim | Duração (meses) |
|-----------|---------|-------------|------------|-----------------|
| 1982/1983 | El Niño | Forte | abr/jun | 15 |
| 1983/1984 | La Niña | Fraca | set/jan | 5 |
| 1984/1985 | La Niña | Fraca | out/ago | 11 |
| 1986/1988 | El Niño | Moderada | set/fev | 18 |
| 1988/1989 | La Niña | Forte | maio/maio | 13 |
| 1991/1992 | El Niño | Forte | maio/jun | 14 |
| 1994/1995 | El Niño | Moderada | set/mar | 7 |
| 1995/1996 | La Niña | Moderada | ago/mar | 7 |
| 1997/1998 | El Niño | Forte | maio/maio | 12 |

| Anos | Eventos | Intensidade | Início/Fim | Duração (meses) |
|-----------|---------|-------------|------------|-----------------|
| 1998/2001 | La Niña | Moderada | jul/fev | 32 |
| 2002/2003 | El Niño | Moderada | maio/fev | 10 |
| 2004/2005 | El Niño | Fraca | jul/jan | 7 |
| 2005/2006 | La Niña | Fraca | nov/mar | 5 |
| 2006/2007 | El Niño | Fraca | set/jan | 5 |
| 2007/2008 | La Niña | Forte | ago/jun | 11 |
| 2008/2009 | La Niña | Fraca | nov/mar | 5 |
| 2009/2010 | El Niño | Moderada | jul/abr | 10 |
| 2010/2011 | La Niña | Forte | jul/abr | 10 |
| 2011/2012 | La Niña | Moderada | set/mar | 5 |
| 2014/2016 | El Niño | Forte | out/abr | 19 |
| 2016/2017 | La Niña | Fraca | ago/dez | 5 |
| 2017/2018 | La Niña | Fraca | out/abr | 7 |
| 2018/2019 | El Niño | Fraca | set/jun | 10 |
| 2020/2021 | La Niña | Moderada | ago/maio | 10 |
| 2021/2022 | La Niña | Moderada | ago/dez | 17 |

A análise da intensidade dos eventos mostra que, para os fenômenos de *El Niño*, houve uma divisão entre eventos fortes (40%), moderados (40%) e fracos (20%), com destaque para o evento de 1982/1983 (intensidade forte) e o de 1997/1998 (intensidade forte), ambos com durações significativas de 15 e 12 meses, respectivamente. Em contraste, os eventos de *La Niña* se caracterizam por um maior número de eventos de intensidade fraca (46,7%) e uma duração média mais longa. O evento de 1998/2001, de intensidade moderada, foi o mais duradouro, com 32 meses. Além disso, a maior parte dos eventos fortes de *La Niña* teve duração inferior aos eventos de *El Niño* fortes, com o evento de 1988/1989 sendo o mais longo (13 meses).

A duração dos eventos também apresenta diferenças importantes entre os fenômenos. Os eventos de *La Niña* foram, em média, mais longos que os de *El Niño*, com duração média de 14 meses em comparação a 10 meses de eventos de *El Niño*. Essa diferença na duração tem implicações importantes, pois eventos mais longos podem prolongar os impactos climáticos, incluindo chuvas excessivas e alagamentos em determinadas regiões, como no estado do Pará, que costuma ser mais afetado por eventos de *La Niña*.

O evento de *El Niño* mais longo foi o de 1986/1988 (18 meses), mas a maioria deles foi relativamente curto, com durações variando de 5 a 15 meses. Essa diferença de duração pode ser relevante, pois eventos curtos podem gerar impactos climáticos mais intensos e de curto prazo, como secas e redução das chuvas, especialmente em áreas dependentes de uma distribuição regular de precipitações.

Quanto à precipitação média anual no estado do Pará, os resultados apresentados na Tabela 4 revelam uma variação significativa, com valores oscilando entre 1.617,8 mm e 2.433,3 mm, e uma média anual de 2.087,8 mm. Esse intervalo demonstra uma

amplitude de 815,5 mm, indicando uma variação notável nas precipitações ao longo do território paraense.

A média obtida, de 2.087,8 mm, está em concordância com as estimativas de Ferreira Filho et al. (2020) e Pessoa et al. (2022), que situam a precipitação média anual em torno de 2.000 mm. Esses resultados reforçam a consistência dos dados, sugerindo uma distribuição de chuvas relativamente estável em relação aos valores observados por esses autores.

Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de precipitação média anual do estado do Pará.

| Estatística descritiva | Valores |
|------------------------------|------------|
| Número de observações | 41 |
| Mínimo | 1.617,8 mm |
| Máximo | 2.433,3 mm |
| Média | 2.087,8 mm |
| Amplitude | 815,5 mm |
| 1º quartil | 1.963,3 mm |
| Mediana | 2.130,1 mm |
| 3º quartil | 2.240,7 mm |
| Amplitude interquartil | 277,4 mm |
| Coeficiente de variação (CV) | 9,33% |
| Desvio-padrão (DP) | 194,7 mm |

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise mais detalhada, por meio do coeficiente de variação (CV) de 9,33%, revela uma baixa dispersão em torno da média. Este valor, por estar abaixo de 15,0%, aponta para uma consistência nos padrões de precipitação, o que indica que, apesar da amplitude observada, a distribuição das chuvas mantém-se relativamente homogênea no período avaliado.

A estatística descritiva também mostra que o 1º quartil e o 3º quartil foram de 1.963,3 mm e 2.240,7 mm, respectivamente, com uma amplitude interquartil de 277,4 mm. Esses valores reforçam a distribuição concentrada em torno da mediana de 2.130,1 mm, sugerindo que a maioria dos registros de precipitação anual se concentra entre esses valores, o que está de acordo com as condições climáticas típicas da região.

Por outro lado, ao comparar esses resultados com o estudo de Moraes et al. (2005), que analisou a variação espacial e temporal da precipitação no Pará entre 1976 e 1998, nota-se que aproximadamente 50% do território estadual apresentou uma precipitação média anual entre 1.900 mm e 2.400 mm. Essa faixa está em consonância com os resultados atuais, o que sugere que, ao longo das últimas décadas, os padrões de precipitação no estado têm se mantido relativamente constantes, corroborando a estabilidade climática regional observada por diferentes autores.

Na Figura 2, observa-se que a precipitação média anual variou ao longo do período analisado. Mais de 58,54% dos anos (24 anos) apresentaram precipitação acima da média da série histórica, enquanto 41,46% dos anos (17 anos) registraram valores

abaixo da média. O ano de 2020 apresentou a menor precipitação média anual, com 1.618,0 mm, enquanto 1985 registrou a maior, com 2.433,0 mm.

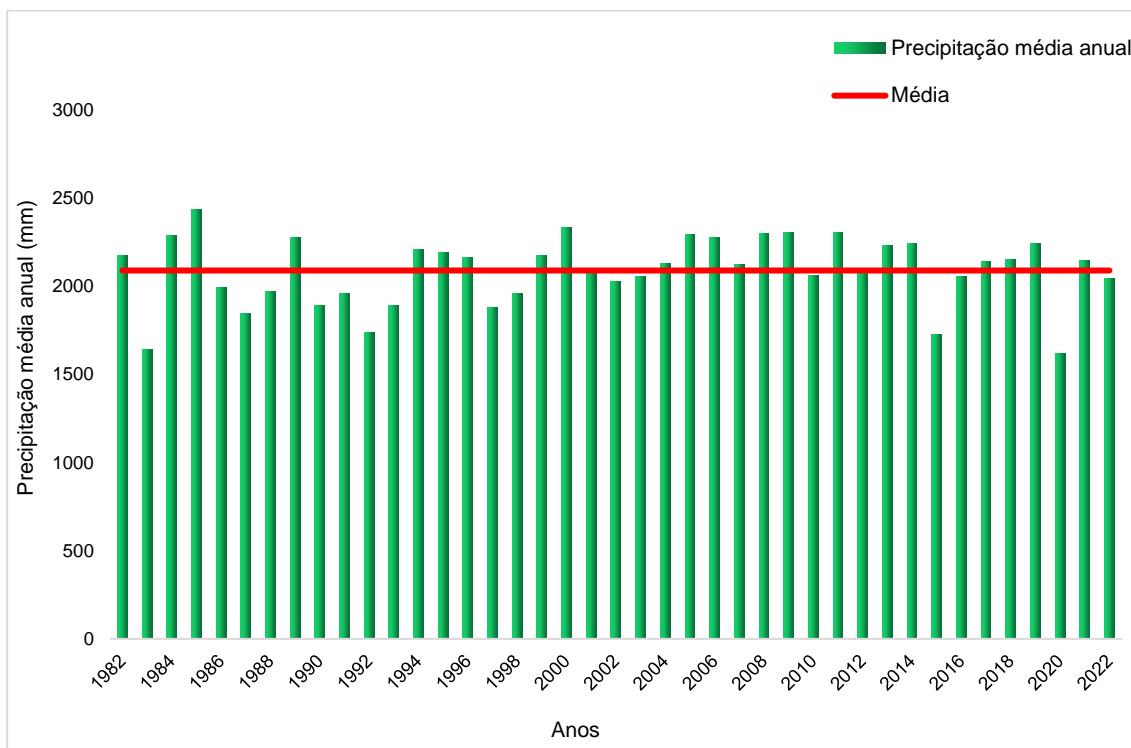


Figura 2. Distribuição da precipitação pluviométrica média anual do estado do Pará (período de 1982 a 2022). **Fonte:** Dados da pesquisa (2023).

O ano de 2020 foi um de *El Niño* de intensidade fraca-moderada e 1985 de *La Niña* de intensidade moderada, fenômenos que influenciam nas precipitações da região amazônica, fortemente afetada pelas circulações atmosféricas e oceânicas. No estado do Pará, o fenômeno *El Niño* pode representar uma estação chuvosa com índice pluviométrico abaixo do normal, enquanto na duração da *La Niña* verificam-se áreas de precipitação acima da média na maioria da Amazônia (LOPES; DE SOUZA; DA SILVA FERREIRA, 2013).

Na Figura 3, é ilustrada a distribuição espacial das precipitações médias anuais no estado do Pará ao longo do período de 1982 a 2022, com base nos dados do GPCC. A análise revela uma clara variabilidade pluviométrica entre as diferentes regiões do estado, destacando um padrão espacial característico. As maiores precipitações médias anuais, com valores superiores a 2.400 mm, concentram-se no trecho norte do estado. Essa região abrange as mesorregiões do Marajó, Metropolitana de Belém, e Nordeste Paraense, que historicamente recebem volumes mais elevados de chuva. Esse padrão pluviométrico elevado também se estende a pequenas porções das mesorregiões do Baixo Amazonas e do Sudoeste Paraense.

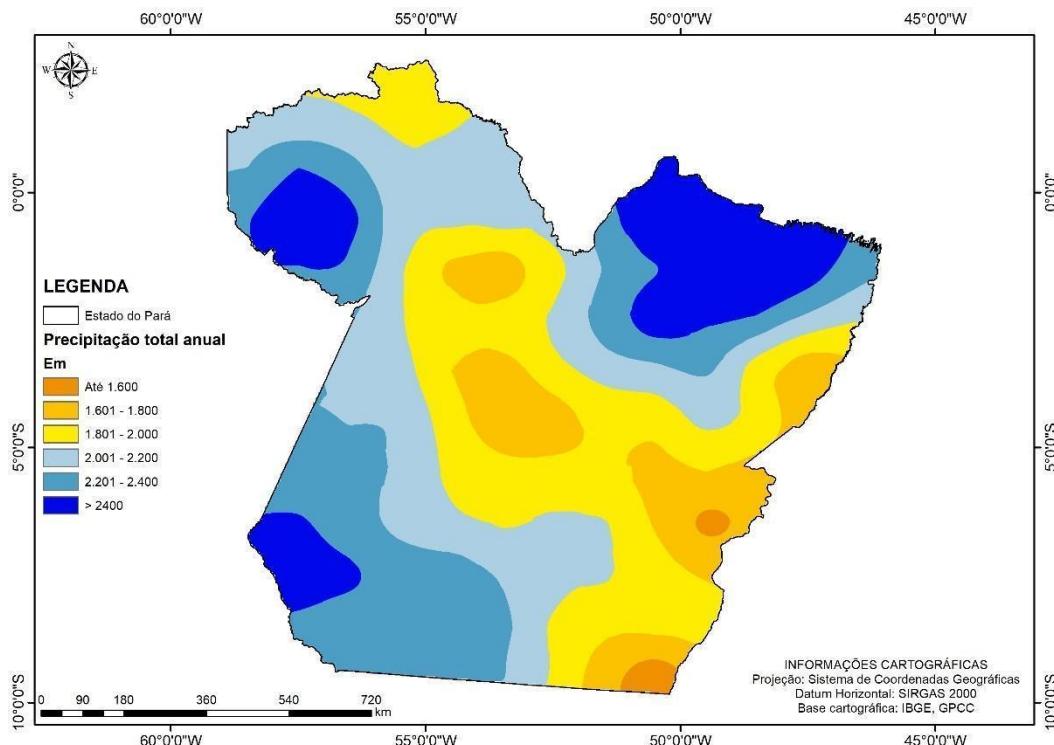


Figura 3. Distribuição da precipitação média anual (em mm) do estado do Pará. **Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Por outro lado, as menores precipitações médias anuais foram observadas na mesorregião do Sudeste Paraense, onde os valores foram inferiores a 1.600 mm. Neste sentido, a variação entre as regiões demonstra a heterogeneidade das precipitações no estado do Pará e a necessidade de considerá-las ao planejar e gerenciar recursos hídricos, uma vez que a disponibilidade de água pode variar significativamente entre as regiões ao longo do período avaliado.

A análise dos resultados mostra concordância com estudos anteriores, como os de Ferreira Filho et al. (2020) e Amaral et al. (2016), que também observaram que as maiores precipitações médias anuais no estado do Pará foram registradas na porção nordeste, abrangendo as mesmas mesorregiões mencionadas, além de uma parte da mesorregião do Baixo Amazonas. Esses autores reportaram valores de precipitação média anual variando entre 2.600 mm e 2.800 mm, reforçando a tendência de elevados índices pluviométricos nesta área.

De acordo com Albuquerque et al. (2010), essa maior concentração de precipitações no nordeste do Pará pode ser atribuída a fatores climáticos, como a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a intensa convecção local e a proximidade com a costa litorânea, que favorecem a formação de chuvas. Além disso, eventos climáticos tropicais de larga escala, como *El Niño* e *La Niña*, também exercem influência sobre a variabilidade pluviométrica, intensificando ou reduzindo as precipitações de acordo com sua ocorrência e intensidade.

A análise da distribuição mensal da precipitação no estado do Pará revela um padrão marcante de sazonalidade ao longo dos 41 anos estudados, conforme ilustrado na Figura 4. O gráfico oferece uma visão detalhada das médias mensais de precipitação,

destacando a regularidade da ocorrência das chuvas ao longo do ano. Esse padrão sazonal é dividido em dois períodos distintos: um caracterizado por maiores volumes de precipitação, que se estende de dezembro a maio, com um pico notável em março (330 mm); e outro, menos chuvoso, que vai de junho a novembro, atingindo seu mínimo em agosto (52 mm).

Com base no estudo de Ferreira Filho et al. (2020), que analisou o comportamento sazonal da precipitação no estado do Pará utilizando a normal climatológica para o período de 1986 a 2015, identificou-se a presença de dois períodos sazonais distintos no regime de chuvas: um mais chuvoso e outro menos chuvoso. Além disso, os autores levantaram a hipótese de que determinados fenômenos climáticos, tais como Linhas de Instabilidade (LI), deslocamento norte-sul da ZCIT com ou sem associação à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), episódios de *El Niño* que reduzem o volume de chuvas no leste da Amazônia ou de *La Niña* que geram chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia ou a combinação de vários deles, podem influenciar exclusivamente certos meses do ano, resultando em variações no regime de chuvas em períodos específicos.

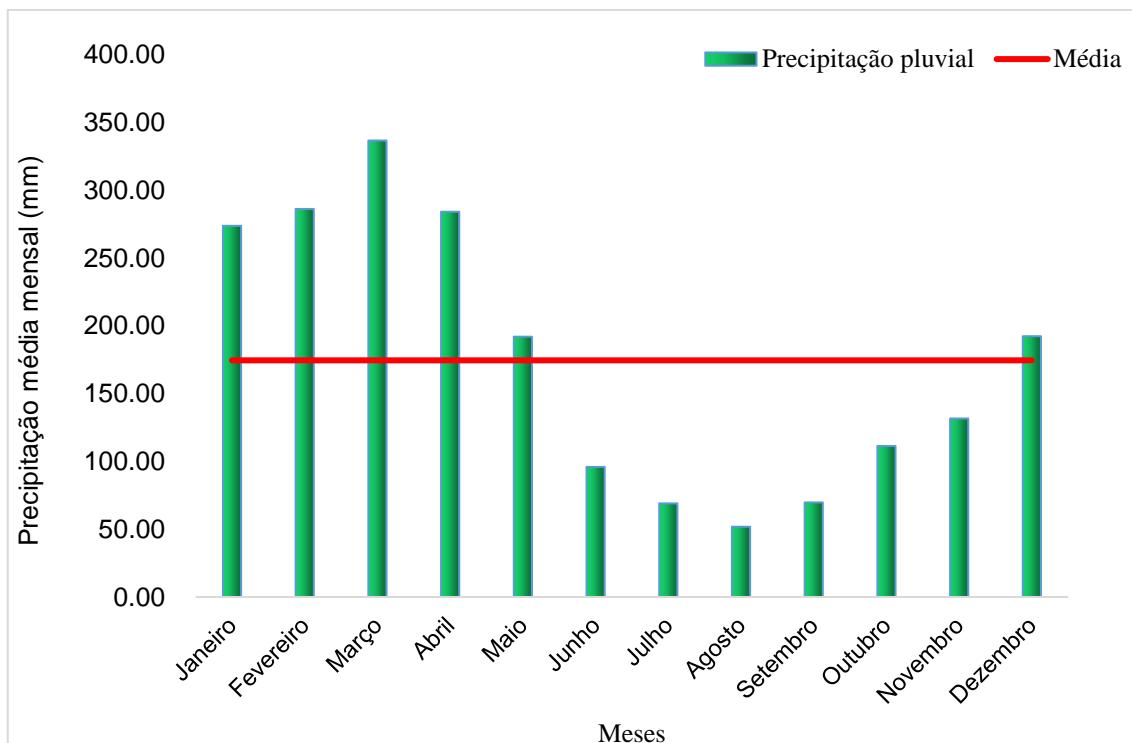


Figura 4. Precipitação média mensal do estado do Pará (período de 1982 a 2022). **Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

A partir dos dados fornecidos pelo GPCC para o período de 1982 a 2022, foi possível realizar a interpolação espacial, permitindo a visualização do comportamento da precipitação média mensal, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6. Os resultados evidenciam a presença de sazonalidade na precipitação mensal, com o início dos índices pluviométricos a partir do mês de dezembro, especialmente na região sul do estado.

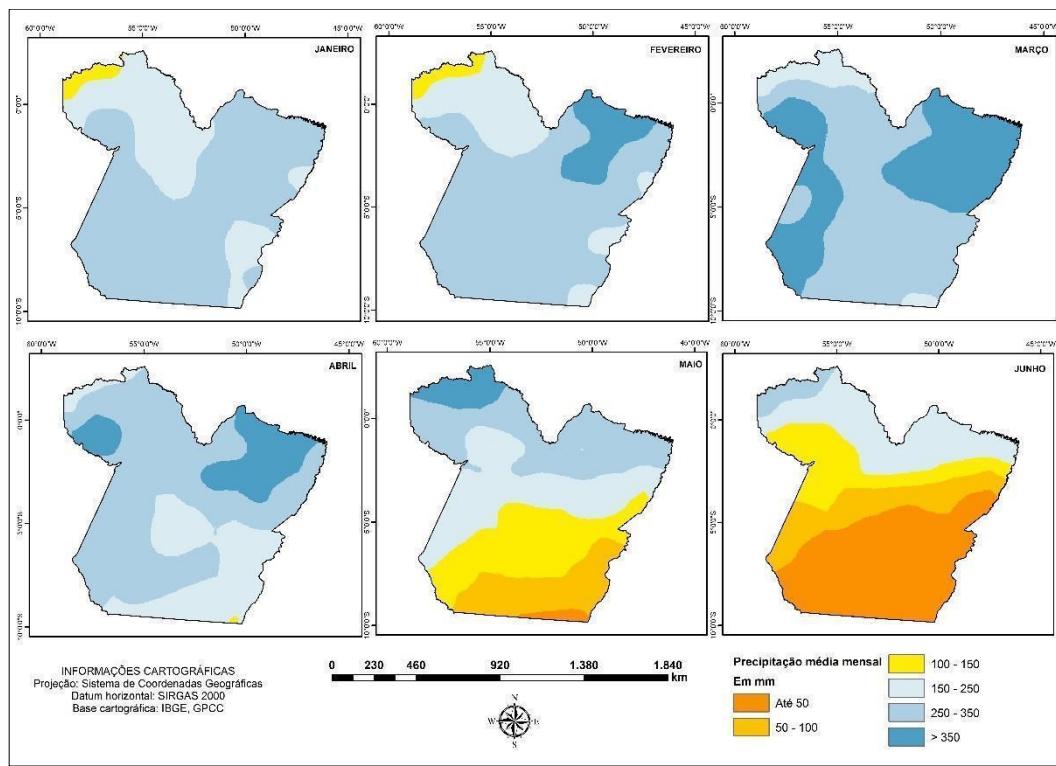


Figura 5. Distribuição espacial da precipitação média mensal de janeiro a junho (1982 – 2022).

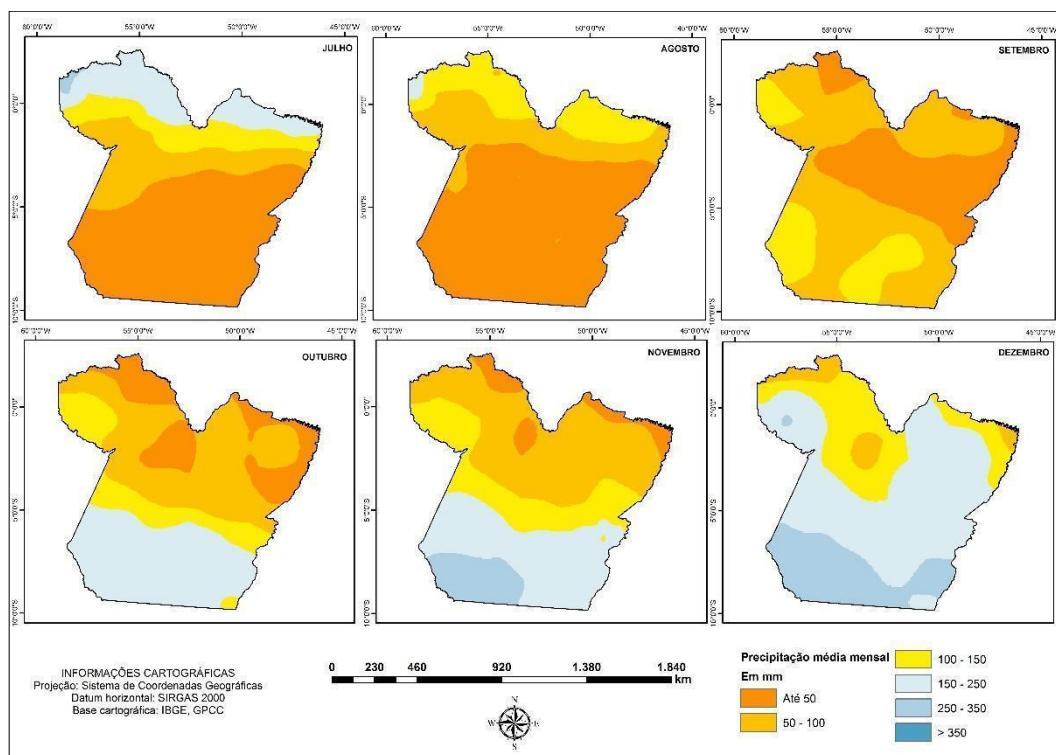


Figura 6. Distribuição espacial da precipitação média mensal de julho a dezembro (1982 – 2022).

Menezes et al. (2015) destacam que o estado do Pará é caracterizado por uma alta variabilidade na precipitação, influenciada por diversos sistemas atmosféricos que atuam na região. Entre esses sistemas, sobressaem-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua interação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), além das Linhas de Instabilidade (LI), frequentemente resultantes da brisa marítima (LOUREIRO et al., 2014).

A ZCIT é uma grande região de convergência de ventos alísios oriundos do Hemisfério Norte e Sul e sua interação com outros sistemas contribuem com grandes volumes de precipitação na Amazônia; a ZCAS, uma extensa faixa de nebulosidade e precipitação direcionada desde o sul/sudeste da região Amazônica até o oceano Atlântico, costuma coincidir com a estação chuvosa no Pará, influenciando os índices pluviométricos no estado; e as LI se formam na costa atlântica, sendo constituídas por conglomerados de nuvens *cumulonimbus* que contribuem significativamente com a chuva que cai durante o período chuvoso no nordeste paraense.

Uma descoberta consistente com os resultados deste estudo e com pesquisas anteriores, como as de Ferreira et al. (2020), Amaral et al. (2016) e Menezes et al. (2015), é a identificação dos meses que apresentam os maiores volumes de precipitação durante o período chuvoso. Tanto neste estudo quanto nos mencionados, o trimestre mais chuvoso compreende os meses de fevereiro, março e abril, sendo que março registra os maiores volumes, com índices superiores a 350 mm.

Na Tabela 5, são apresentados os resultados dos testes não paramétricos aplicados aos dados de precipitação pluvial anual no estado do Pará, abrangendo períodos de diferentes durações entre 1982 e 2022. Os testes incluem Mann-Kendall, Spearman e Sen's Slope, com a finalidade de identificar tendências na série temporal da precipitação. Assim, verifica-se que os valores de Z_{MK} variam entre 0,39 e 0,80, indicando uma tendência positiva (S^+) em todos os períodos analisados.

No entanto, esses valores são baixos e não ultrapassam os limites críticos para rejeitar a hipótese nula, sugerindo que as tendências positivas observadas não são estatisticamente significativas ao nível de 5%. Isso implica que, ao longo desses períodos, embora haja uma leve tendência de aumento na precipitação, ela não é forte o suficiente para ser considerada uma mudança consistente e significativa.

Os valores do coeficiente de correlação de Spearman (rs) para os períodos de 21 e 11 anos são negativos (-0,16 e -0,21, respectivamente), indicando tendências negativas (S^-). Esses resultados sugerem uma leve tendência de redução na precipitação. No entanto, assim como nos períodos mais longos, a ausência de significância estatística, evidenciada pelos valores de t_{calc} e t_{crit} muito próximos, implica que essas tendências não são estatisticamente relevantes. Portanto, não é possível concluir que há uma diminuição substancial da precipitação nesses períodos mais recentes.

Tabela 5. Resultados dos testes não-paramétricos dos dados anuais de precipitação pluvial do estado do Pará (1982 a 2022).

| Testes não paramétricos | Resultados | Índices de tendência |
|-------------------------------------|---|----------------------|
| Mann Kendall (1982-2022) - 41 anos | $Z_{MK} = 0,80$ | S ⁺ |
| Mann Kendall (1992-2022) - 31 anos | $Z_{MK} = 0,44$ | S ⁺ |
| Mann Kendall (2002-2022) - 21 anos | $Z_{MK} = 0,54$ | S ⁺ |
| Mann Kendall (2012-2022) - 11 anos | $Z_{MK} = 0,39$ $r_s = 0,11$ | S ⁺ |
| Spearman (1982 - 2022) - 41 anos | $t_{crit.} = 0,68$ $t_{calc.} = 0,68$ $r_s = 0,05$ | S ⁺ |
| Spearman (1992 - 2022) - 31 anos | $t_{crit.} = 0,29$ $t_{calc.} = 0,29$ $r_s = -0,16$ | S ⁺ |
| Spearman (2002 - 2022) - 21 anos | $t_{crit.} = -0,70$ $t_{calc.} = -0,71$ $r_s = -0,21$ | S ⁻ |
| Spearman (2012 - 2022) - 11 anos | $t_{crit.} = -0,63$ $t_{calc.} = -0,93$ | S ⁻ |
| Sen's Slope (1982 - 2022) - 41 anos | 2,19 mm/ano | S ⁺ |
| Sen's Slope (1992 - 2022) - 31 anos | 1,64 mm/ano | S ⁺ |
| Sen's Slope (2002 - 2022) - 21 anos | -4,44 mm/ano | S ⁻ |
| Sen's Slope (2012 - 2022) - 11 anos | -4,06 mm/ano | S ⁻ |

Nota: S⁺ tendência positiva não significativa; S⁻ tendência negativa não significativa; S⁰ tendência nula.

Menezes e Fernandes (2016) realizaram um estudo sobre a tendência e a variabilidade da precipitação no estado do Pará, referente ao período de 1982 a 2011, no qual observaram uma tendência de queda na precipitação média anual nas estações pluviométricas Santo Antônio, Tracambeua e Cajueiro, e associaram a diminuição da precipitação pela concentração de eventos de El Niño nas últimas 3 décadas.

Os valores de Sen's Slope para os períodos de 41 e 31 anos são positivos (2,19 mm/ano e 1,64 mm/ano, respectivamente), sugerindo um pequeno aumento na precipitação anual. No entanto, como a tendência é classificada como S⁺ (não significativa), esses valores não indicam uma mudança robusta. Em contrapartida, para os períodos de 21 e 11 anos, os valores são negativos (-4,44 mm/ano e -4,06 mm/ano), indicando uma leve tendência de redução da precipitação nos últimos anos. A classificação S⁻ indica que, embora exista uma tendência negativa, ela também não é estatisticamente significativa. Esse resultado sugere que, apesar da possível diminuição da precipitação nos últimos anos, não há evidências fortes para afirmar que isso seja parte de uma mudança climática consistente ou de um padrão de longo prazo.

Esses resultados estão em concordância com o relatório de 2021 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que aponta que, desde 2016, os registros de precipitação no Brasil têm mostrado valores abaixo da média na maioria do território nacional (Brasil, 2021). Além disso, as regiões norte e nordeste do Brasil foram as

mais afetadas por estes eventos críticos de baixa pluviometria, com uma recuperação parcial observada apenas em 2020. A leve tendência de redução da precipitação observada nos períodos mais recentes reforça a importância de políticas públicas para a gestão dos recursos hídricos nessas áreas, considerando que essas regiões são particularmente vulneráveis às mudanças nos padrões de precipitação.

CONCLUSÃO

A análise abrangente dos dados pluviométricos ao longo de 41 anos revelou padrões significativos de variabilidade na precipitação no estado do Pará. Essa investigação demonstrou que o regime pluviométrico apresenta uma sazonalidade marcante, com um período mais chuvoso entre dezembro e maio e um período menos chuvoso entre julho e setembro. Além disso, a análise da precipitação média anual destacou variações regionais distintas, evidenciando que os maiores índices pluviométricos estão concentrados no Nordeste do estado, enquanto os menores são observados no Sudeste.

Os resultados dos testes não paramétricos aplicados aos dados de precipitação pluvial anual no estado do Pará, abrangendo o período de 1982 a 2022, indicam que as tendências observadas são inconsistentes e não significativas, tanto em direção positiva quanto negativa, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Isso sugere que a precipitação anual no estado não apresenta uma mudança significativa ao longo do tempo, mantendo-se estável dentro do nível de significância considerado.

Assim, embora flutuações interanuais possam ocorrer, a análise estatística revela que não há evidências robustas para afirmar uma alteração substancial nos padrões de precipitação, o que é fundamental para a gestão dos recursos hídricos na região. A continuidade da monitorização das séries temporais de precipitação é essencial para detectar eventuais mudanças climáticas futuras, para garantir uma gestão eficaz dos recursos hídricos no estado do Pará e implementar planos e ações de mitigação.

Os resultados reforçam a importância de monitorar continuamente as séries temporais de precipitação para avaliar mudanças futuras com mais precisão e um conjunto de dados mais extenso. A estabilidade nos padrões de precipitação, como observado, pode ter implicações positivas para a gestão dos recursos hídricos, mas a leve tendência negativa nos períodos mais curtos deve ser monitorada para garantir que não evolua para uma tendência estatisticamente significativa que possa impactar a disponibilidade de recursos hídricos e a gestão ambiental no estado do Pará.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M.F. DE; SOUZA, E.B. DE; OLIVEIRA, M. DO C.F.; SOUZA JÚNIOR, J.A. Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: Climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). *Revista Brasileira de Climatologia*, v.6, p.151 – 168, 2010.
- ALVES, J. E.; DOS SANTOS GONÇALVES, T.; DE MORAIS NASCIMENTO, S. A. Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: tendências e variabilidade (1970-2020). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais*, v. 17, n. 2, p. 527-542, 2022.
- AMARAL, M. A. C. M.; JOSÉ, J. V.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, R. D.; BARROS, T. H. S. Distribuição espacial da precipitação pluviométrica em relação à topografia no estado do Pará, *Irriga*, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2016.

- ASSIS, J. P.; SOUSA, R. P.; LINHARES, P. C. F. **Testes de hipóteses estatísticas**. Mossoró: EdUFERSA, 2020.
- BACK, A. J.; DA SILVA SOUZA, G.; GALATTO, S. L. Comportamento sazonal das precipitações pluviométricas máximas anuais no Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 36, p. 291-312, 2025
- BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A. L. L. (EDS.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2009.
- BRASIL. ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2022. 132p.
- CORDEIRO, A. L. DE M.; DA SILVA, F. S.; SILVA, A. M.; COSTA, C. E. A. DE S.; SANTANA, L. R. Variabilidade Espaço-Temporal da Precipitação Pluviométrica na Região Hidrográfica da Calha Norte, Estado do Pará, Brasil. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 12, n. 2, p. 159-170, 2023.
- DAS, M.; HAZRA, A.; SARKAR, A.; BHATTACHARYA, S.; BANIK, P. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India. **MAUSAM**, v. 68, n. 1, p. 41-50, 2017.
- DIAS, A.G.S.; MOURA, A. F.; PESSOA, F.C.L.; CRISPIM, D.L.; FERREIRA FILHO, D.F. Análise de séries pluviométricas no estado do Acre por meio de testes não-paramétricos. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 288-298, 2019.
- DIAS, G. F. DE M.; GOMES, D. J. C.; SERRÃO, E. A. O.; LIMA, A. M. M.; MIRANDA, S. B. D. A.; SILVA JÚNIOR, J. D. A.; SOUSA, A. M. L. Associação entre os eventos de Enos e a distribuição espaço-temporal da precipitação na bacia hidrográfica do rio capim (MA-PA). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p.521-540, 2020.
- FAPESPA. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas.
- Produto Interno Bruto Per Capita (valores correntes), segundo Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação - 2017-2021.** Disponível em: <https://fapespa.pa.gov.br/sistemas/pcn2024/tabelas/11-pib/6-produto-interno-bruto-per-capita-2018-2022.htm>. Acesso em: 27 fev. 2024.
- FERREIRA FILHO, D. F.; CRISPIM, D. L.; PESSOA, F. C. L.; FERNANDES, L. L. Espacialização da precipitação e análises de tendências obtidas através do satélite GPCC PARA o estado do Acre. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 68-79, 2019a.
- FERREIRA FILHO, D. F.; BEZERRA, P. E. S.; DA SILVA, M. D. N. A.; RODRIGUES, R. S. S.; DE MOURA FIGUEIREDO, N. Aplicação de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas da rede hidrográfica: estudo de caso calha norte-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 277-299, 2019b.
- FERREIRA FILHO, D. F.; LIMA, B. R. P.; CRISPIM, D. L.; PESSOA, F. C. L.; FERNANDES, L. L. Análise pluviométrica no estado do Pará: comparação entre dados obtidos de estações pluviométricas e do satélite GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 541-560, 2020.
- GPCC. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). **The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC): operated by DWD under the auspices of the World Meteorological Organization (WMO)**. 2022. Disponível em: [Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Our services - Global Precipitation Climatology Centre \(GPCC\)](https://www.wetterzentrale.de/en/services/global-precipitation-climatology-centre-gpcc/). Acesso em: 24 fev. 2025.
- HRACHOWITZ, M.; SAVENIJE, H.; BOGAARD, T.A.; TETZLAFF, D.; SOULSBY, C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) - a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 6, p. 1198-1255, 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2022 - Panorama 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades@, Pará, Panorama**.2023. Disponível em: cidades.ibge.gov.br/brasil/pa. Acesso em: 27 fev. 2024.
- ISHIHARA, J. H.; FERNANDES, L. L.; DUARTE, A. A. A. M.; DUARTE, A. R. C. L. M.; PONTE, M. X.; LOUREIRO, G. E. Quantitative and Spatial Assessment of Precipitation in the Brazilian Amazon (Legal Amazon) - (1978 to 2007). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, p. 29-39, n. 2014.
- KENDALL, M.G. **Rank Correlation Methods**. 4. ed. Charles Griffin: London, 1975.
- KATIPOĞLU, O. M. Spatial analysis of seasonal precipitation using various interpolation methods in the Euphrates basin, Turkey. **Acta Geophysica**, v. 70, n. 2, p. 859-878, 2022.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

- LOPES, M. N. G.; DE SOUZA, E. B.; DA SILVA FERREIRA, D. B. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, 2013.
- LOUREIRO, R. S. de.; SARAIVA, J.; SARAIVA, I.; SENNA, R. C.; FREDÓ, A. S. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 83-94, 2014.
- MARCUZZO, F. F. N.; Romero, V.; CARDOSO, M. R. D. Tendência do número de dias de chuva no estado do Tocantins e a relação dos seus extremos com o Índice Oceânico Niño. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 1-16, jan.-abr., 2014.
- MANN, H.B. **Non-parametric tests against trend**. *Econometrica* 13, p. 245-259, 1945.
- MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. da. O uso da estatística para regionalização da precipitação no estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, n. 11, p. 64-71, 2015.
- MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L. Análise de tendência e variabilidade da precipitação no estado do Pará. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer, v. 13, n. 24, p. 1580-1591, 2016.
- MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, 2005.
- NOAA - *National Weather Service*. **Monthly Atmospheric & SST Indices**. 2023. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/en_sostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 07 out. 2023.
- OLIVEIRA, T. A.; SANCHES, F.; FERREIRA, C. de C. M. Aplicação e avaliação de técnicas para o preenchimento de falhas de dados pluviométricos em anos habituais, secos e chuvosos. **ENTRE-LUGAR**, v. 12, n. 24, p. 301-320, 2021.
- PESSOA, F. C. L.; RODRIGUES, B. D.; FERREIRA FILHO, D. F. Análise espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado do Pará–Brasil a partir de dados de satélite. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 696-723, 2022.
- RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. C.; SILVA, B. N. R.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; DARTVA, T. A.; SOUTO DE JESUS, A. A.; VENTURIERI, A. Caracterização, mapeamento e classificação dos solos da área de influência da BR-163 (Cuabá-Santarém) e da BR-230 (Transamazônica), no Estado do Pará. In: Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento-Ecológico Econômico da área de influência da rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém)**. Embrapa: Belém, 2007. p. 403-571.
- ZHANG, W.; LIU, D.; ZHENG, S.; LIU, S.; LOÁICIGA, H. A.; LI, W. Regional precipitation model based on geographically and temporally weighted regression kriging. **Remote Sensing**, v. 12, n. 16, p. 2547, 2020.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0