

VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS PLUVIOMÉTRICAS OBSERVADAS NO SEMÁRIDO PERNAMBUCANO BRASILEIRO

Givanildo de Gois

Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Professor Substituto do Instituto de Ciências Atmosférica - ICAT, Maceió, AL, Brasil
givanildo.gois@icat.ufal.br

Paulo Miguel de Bodas Terassi

Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, Professor Visitante, Foz do Iguaçu, PR, Brasil
pmbterassi@usp.br

Josimar da Silva Freitas

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, AM - Brasil
josimarfreitas55@gmail.com

Sandra Bezerra da Silva

Universidade Federal do Acre – UFAC, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais - PPGCA, Cruzeiro do Sul, AC, Brasil
sandra.bezerra@sou.ufac.br

Roberta Fernanda da Paz de Souza Paiva

Universidade Federal Fluminense - UFF, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental - PGTA, Volta Redonda, RJ, Brasil
robertapaz2003@yahoo.com.br

Djailson Silva da Costa Júnior

Universidade Federal do Piauí – UFPI, Pós-Graduação em Ciências Agrárias – PPGCA-CPCE, Piauí, PI, Brasil
djailson.junior@ufpi.edu.br

Kelly Alonso Costa

Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental - PGTA, Volta Redonda, RJ, Brasil
kellyalonso@id.uff.br

Wellington Kiffer de Freitas

Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Geociências (Geoquímica) – PPGeo, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – PGTA, Outeiro de São João Batista s/nº, Campus do Valonguinho, Niterói, RJ, 24020-41, Brasil
wkiffer@id.uff.br

Bruno Serafini Sobral

Instituto de Terras e Cartografia do Estado do Rio de Janeiro - ITERJ
Mestre em Engenharia de Biossistemas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
brunossobral@gmail.com

Marcelo Alves Muniz

Universidade Federal do Acre – UFAC, Campus Floresta, Cruzeiro do Sul, AC, Brasil
marcelo.muniz@ufac.br

Jessica Guerra Inácio de Oliveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Doutoranda em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento – Rio de Janeiro, RJ, Brasil
jessicaguerra.io@gmail.com

Juaneza Barroso Falcao

Centro Universitário Claretiano - CUC, Cruzeiro do Sul, AC, Brasil
juanezaipx@hotmail.com

Núbia Valéria Ferreira

Centro de Estudos Superiores de Maceió - CESMAC, Maceió, AL, Brasil
Valerya.psico@hotmail.com

RESUMO

A chuva é a variável mais importante para o equilíbrio dos ecossistemas e do ciclo hidrológico. Nesta pesquisa, utilizaram-se dados pluviométricos de janeiro de 1975 a dezembro de 2017 (43 anos) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro – Petrolina (PE). O objetivo foi realizar uma análise descritiva e exploratória e verificar tendências por meio dos testes de Mann-Kendall e das rupturas de Pettitt, em escalas mensal e anual. Os resultados indicam que a chuva média anual acumulada foi de 484,51 mm, sendo os meses mais chuvosos de janeiro a abril e dezembro, e os mais secos, julho, agosto e setembro. Os valores médios dos coeficientes de variação da precipitação anual durante as estações chuvosa e seca foram de 44,19% e 55,84%, respectivamente; observaram-se variações de 48,84% a 51,16% para os anos com coeficientes de variação médios anuais de $\pm 84,56\%$ e $\pm 108,57\%$. O Teste de Mann-Kendall (TMK) mostrou tendência decrescente apenas em março. O Teste de Pettitt (TP) indicou rupturas significativas. A distribuição da tendência mensal na estação seca aponta chuvas inferiores à média mensal. Os testes TMK e TP, para a estação seca e para os dados anuais, indicam mudanças abruptas significativas.

Palavras-chave: Chuva. Estatística. Tendência. Ruptura.

RAINFALL VARIABILITY AND TRENDS IN THE SEMARID REGION OF PERNAMBUCO, BRAZIL

ABSTRACT

Rainfall is essential for sustaining ecosystem balance and the hydrological cycle. This study analyzed 43 years of rainfall data (January 1975–December 2017) from the Bebedouro Agrometeorological Station – Petrolina (PE), Brazil. The objective was to perform a descriptive and exploratory assessment of precipitation patterns and evaluate trends using the Mann-Kendall and Pettitt tests at monthly and annual scales. Results show that the mean annual accumulated rainfall was 484.51 mm, with the wettest months occurring from January to April and in December, and the driest months from July to September. The mean coefficients of variation for annual rainfall were 44.19% during the rainy season and 55.84% during the dry season, ranging from 48.84% to 51.16% in years with mean annual coefficients of variation of $\pm 84.56\%$ and $\pm 108.57\%$. The Mann-Kendall test (MK) detected a decreasing trend exclusively in March, while the Pettitt test (P) identified significant breakpoints. Analysis of monthly trends during the dry season revealed rainfall consistently below the monthly average. Overall, the Mann-Kendall and Pettitt tests for the dry season and annual data indicate significant abrupt changes in rainfall patterns.

Keywords: Rainfall. Statistics. Trend. Breakpoint.

INTRODUÇÃO

A literatura científica é rica em estudos sobre a medida da precipitação na região Nordeste do Brasil (NEB) e seus eventos extremos. Esses estudos são fundamentais para ações planejadas que mitiguem os efeitos das irregularidades nos volumes de chuva, além de orientar os gestores públicos na resposta a eventos climáticos extremos (Marengo; Espinoza, 2015; Rodrigues *et al.*, 2019; Holender; Santos, 2023).

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais pesquisadas em diferentes países e regiões do mundo, sejam eles emergentes ou desenvolvidos, devido à sua importância para a manutenção e o equilíbrio dos ecossistemas e do ciclo hidrológico. Ela influencia diversas atividades humanas, entre

as quais se destacam a geração de energia elétrica, a produção de bens de consumo, o transporte, o lazer e o abastecimento de água potável para as cidades, além de impulsionar o desenvolvimento das atividades agropecuárias (Lima, 2001; Reboita et al., 2010; Silva et al., 2012).

O NEB apresenta alta variabilidade espacial e temporal na distribuição das chuvas (Zhou; Lau, 2001; Rodrigues et al., 2019), com acumulados anuais inferiores a 500 mm em áreas semiáridas e superiores a 1.500 mm em áreas costeiras (Rodrigues et al., 2019). A estação chuvosa na região ocorre entre março e junho, enquanto o período seco, na maior parte do NEB, estende-se de agosto a outubro (Yamazaki; Rao, 1977; Rodrigues et al., 2019).

Embora a ocorrência de secas seja uma das características mais marcantes do clima no NEB, diversos sistemas meteorológicos favorecem a precipitação na região, ocasionando extremos pluviométricos anuais entre 300 e 2.000 mm (Rodrigues et al., 2019). Entre esses sistemas destacam-se: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Zhou; Lau, 2001; Souza; Cavalcanti, 2009), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (Kousky, 1981; Coutinho et al., 2010), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (Yamazaki; Rao, 1977; Torres; Ferreira, 2011; Gomes et al., 2015), as Linhas de Instabilidade (LI) (Ferreira; Mello, 2005), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (Fedorova et al., 2009; Lyra et al., 2016), os Sistemas Frontais (SF) (Kousky, 1979) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Chaves; Cavalcanti, 2001; Carvalho et al., 2004).

O ciclo anual de chuvas e vazões varia entre as bacias hidrográficas; a variabilidade interanual do clima associa-se a fenômenos como El Niño e La Niña, bem como à variação de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical e no Atlântico Sul, que podem gerar anomalias climáticas severas. Esses modos de variabilidade e indicadores climáticos oceânicos estiveram presentes em grandes secas, como as de 1877, 1983 e 1998 no Nordeste; 2004–2006 no Sul do Brasil; 2001 no Centro-Oeste e Sudeste; e 1926, 1983, 1998 e 2005 na Amazônia (Marengo, 2007; Marengo et al., 2008a, 2008b). Os riscos derivados das mudanças climáticas, naturais ou de origem antrópica, têm despertado grande preocupação em círculos científicos e políticos, na mídia e na população em geral.

As secas que periodicamente afetam o NEB causam grandes impactos em escalas social, econômica e ambiental. A população da região não convive satisfatoriamente com a instabilidade climática, tornando a seca um grande sofrimento e um sério desafio para a política governamental. As principais consequências estão relacionadas à baixa produção agrícola e ao reduzido suprimento de água para centros urbanos e comunidades rurais (Marengo et al., 2020).

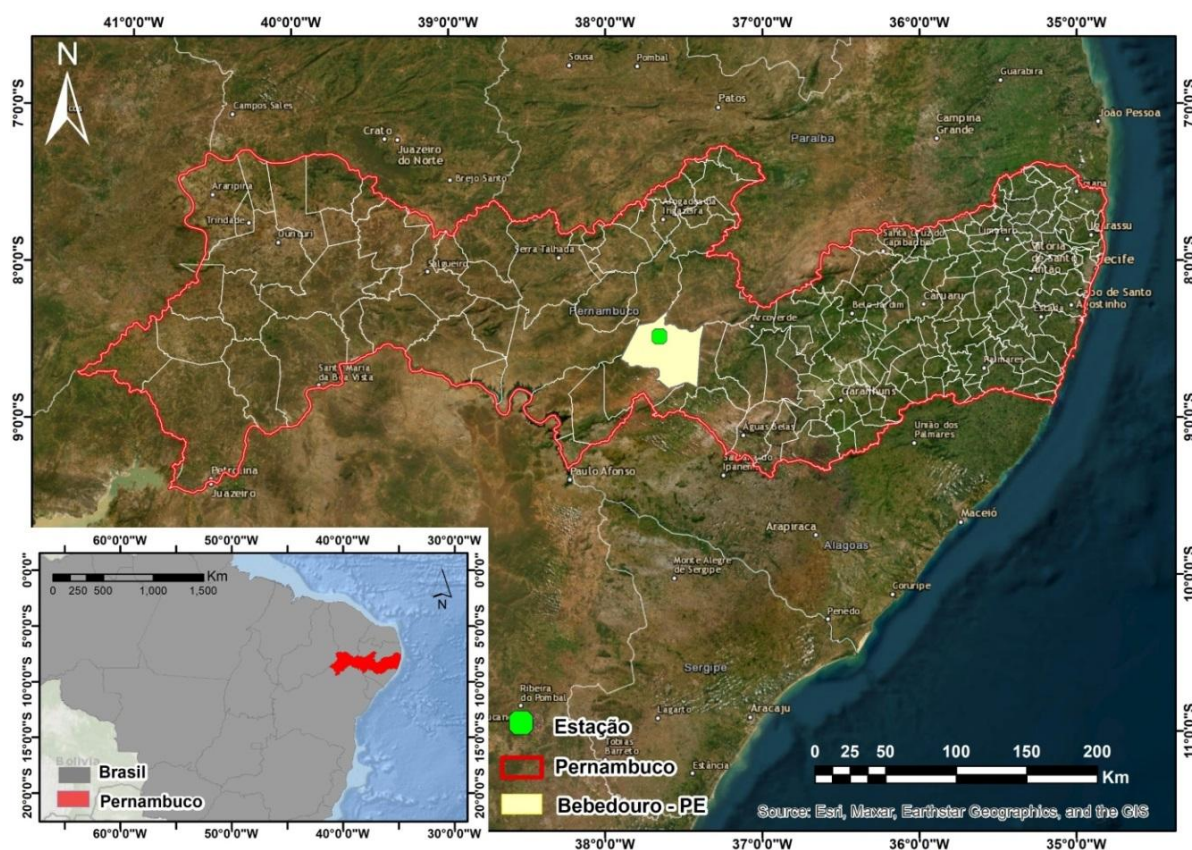
Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo principal realizar uma análise da precipitação na Estação Agrometeorológica de Bebedouro, em Pernambuco (PE), por meio de medidas de tendência central e análise exploratória, além de verificar a existência de tendência e ruptura na série temporal mensal e anual, por meio dos testes de Mann-Kendall (TMK) e Pettitt (P). O manuscrito está estruturado em quatro seções. A primeira seção expõe a metodologia empregada na pesquisa; a segunda apresenta os métodos estatísticos aplicados aos dados; a terceira seção discute os resultados obtidos na pesquisa; e, por fim, a quarta seção traz as conclusões do estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O sítio estudado compreende a Estação Agrometeorológica de Bebedouro, localizada em Petrolina, no estado de Pernambuco (PE). A estação integra o Projeto Bebedouro, desenvolvido pela Embrapa Semiárido, e situa-se nas coordenadas 09°03'53" S e 40°18'49" W, com altitude de 365 m. Limita-se, ao leste, com o rio São Francisco; ao oeste, com a BR-428; ao norte, com as terras onde atualmente está implantado o Projeto Bebedouro II; e, ao sul, com área rural (Figura 1).

Figura 1 - Localização da estação pluviométrica Bebedouro no estado de Pernambuco (PE), 2024



Fonte: Os autores, 2024.

Testes Estatísticos

Os dados mensais de precipitação, referentes ao período de janeiro de 1975 a dezembro de 2017 (43 anos), foram obtidos na Estação Agrometeorológica de Bebedouro, em Petrolina (PE), pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Semiárido.

Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de medidas de tendência central (média, mediana, valor máximo e mínimo) e de dispersão (desvio padrão, coeficiente de variação, quartis inferior e superior e amplitude interquartilica). Os resultados foram apresentados em tabelas e gráficos *boxplot*, gerados com o software livre R, versão 4.4.2 (R Core Team, 2024).

Após a aplicação das medidas de tendência central e dispersão, realizaram-se os testes de Regressão Linear Simples, Mann-Kendall e Pettitt, com o objetivo de identificar possíveis tendências e rupturas nos dados de precipitação.

Regressão Linear Simples

A Regressão Linear Simples é uma técnica estatística utilizada para modelar a relação entre duas variáveis quantitativas: uma dependente (resposta) e outra independente (explicativa) (Montgomery,

2012). O principal objetivo é ajustar uma linha reta que melhor descreva essa relação, possibilitando prever valores da variável dependente a partir da independente.

Matematicamente, o modelo é expresso pela equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (1)$$

Em que:

y = é a variável dependente;

x = é a variável independente;

β_0 = é o intercepto, representando o valor esperado de y quando x = 0;

β_1 é o coeficiente angular (inclinação), indicando a mudança esperada em y para cada unidade de aumento em x;

ε = épsilon é o termo de erro aleatório, assumido com média zero e variância constante.

Teste de Tendência de Mann Kendall

O Teste de Tendência de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é utilizado por diversos pesquisadores (Penereiro et al., 2016; Luiz Silva et al., 2019, entre outros). Baseia-se na estatística “S”, descrita pela Equação (1). Trata-se de um teste que correlaciona as classificações das observações e sua sequência temporal de x_i de n termos ($1 \leq i \leq n$); a sua estatística é definida para uma série temporal $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ou seja, compara cada valor da série com o valor anterior, em ordem sequencial, para determinar a variável estatística (Hamed, 2009; Salviano et al., 2016).

O Teste Mann-Kendall (TMK) é um teste não paramétrico e foi utilizado para testar a significância estatística (crescente ou decrescente) da série temporal climatológica, podendo distinguir um processo de mudança com flutuação natural ou tendência determinística (Li et al., 2019).

Para testar a significância estatística do TMK, utilizam-se duas hipóteses:

H_0 (Hipótese nula): Não há tendência significativa na precipitação pluvial na estação Bebedouro em Pernambuco;

H_1 (Hipótese alternativa): Há tendência significativa na precipitação pluvial na estação Bebedouro em Pernambuco.

Para P-valor $\alpha > 0,05$; Aceita-se H_0 ; Para P-valor $\alpha < 0,05$; Rejeita-se H_0

A estatística do teste é dada pela Equação (2):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{ sinal}(x_j - x_i) \quad (2)$$

em que n é o número de registros, x_i e x_j são os respectivos valores dos registros nos tempos i e j ($j > i$).

A função sinal (sing) é dada pela Equação (3):

$$S = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

A estatística S é normalmente distribuída com média E (S) e variância Var (S). A variação é calculada como:

$$E(s) = 0 \quad (4) \text{ e } Var(s) = \frac{[n(n-1)(2n+5)]}{18} \quad (5)$$

Se ocorrer pontos vinculados, a variância é corrigida pela seguinte equação (6):

$$Var(s) = \frac{1[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)]}{18} \quad (6)$$

Em que, t_p = número de pontos vinculado de índices p até q .

A significância do teste (MK) é definida através do teste bilateral com estatística padronizada Z_{MK} conforme a equação (7):

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}; \text{para } S > 0 \\ 0; \text{para } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}; \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Valores positivos de Z_{MK} indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos de Z_{MK} denotam tendências decrescentes. Geralmente é utilizado o nível de significância de 5% de probabilidade.

Uma estimativa não paramétrica para o valor da orientação da tendência é obtida de acordo com a Equação (8):

$$Q_{ij} = \text{mediana} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right] \forall i < j \quad (8)$$

em que, x_i e x_j = valores da varável em estudo nos anos i e j .

Valores: positivo ou negativo de Q mostra tendência crescente ou decrescente.

Se existir n valores na série temporal, então o numero de pares estimados de Q é definido pelo a equação (9):

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (9)$$

O estimador de declive de Sen é a mediana dos N valores de Q_{ij} .

Teste de Pettitt

As mudanças abruptas nas médias pluviométricas da série temporal na Estação Bebedouro, em Petrolina (PE), foram identificadas pelo Teste de Pettitt (TP). Esse teste é uma adaptação do Teste de Mann-Whitney, que utiliza como referência o momento de ruptura na média da série temporal pluviométrica, o qual verifica se duas amostras x_1, \dots, x_t e x_{t+1}, \dots, x_T pertencem à mesma população ou não (Pettitt, 1979; Volta, 2001; Uliana *et al.*, 2015).

A estatística $K(t) = U_{i,T}$ realiza uma contagem do número de vezes em que um membro da 1ª amostra é maior que o membro da 2ª amostra (Penereiro *et al.*, 2016), determinado pela Equação (9).

A hipótese nula (H_0) do Teste de Pettitt admite ausência de um ponto de mudança. Porém, se a estatística $k(t)$ representa o ponto em que ocorreu uma mudança repentina na série temporal pluviométrica média, ela é calculada por meio do valor máximo de $|U_{t,T}|$, associado a um nível de significância (p) determinado pelas Equações 9 e 10 (Uliana *et al.*, 2015).

A estatística $U_{i,T}$ é então calculada para os valores de $1 < t < T$, e a estatística $K(t)$ do teste corresponde ao máximo em valor absoluto de $U_{i,T}$ e, assim, foram estimados os anos onde ocorreram as mudanças abruptas a partir da Equação (10):

$$k(t) = \max_{1 < t < T} |U_{t,T}| \quad (10)$$

O TP localiza o ponto em que ocorre uma mudança brusca na média de uma série temporal, e a sua significância é dada pela Equação (11):

$$p \cong 2 \exp\{-6k(t)^2/(T^3 + T^2)\} \quad (11)$$

O ponto de mudança brusca é o t, onde ocorreu o máximo de K(t), os valores críticos de k são calculados pela Equação (12):

$$k_{crit} = \pm \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{p}{2}\right)(T^3 + T^2)}{6}} \quad (12)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tipo Climático

A região da Estação Agrometeorológica de Bebedouro, em Petrolina (PE), apresenta clima megatérmico e semiárido do tipo BSwH', segundo a classificação de Köppen-Geiger (Reddy, 1983). De acordo com Alvares et al. (2013), entre os estados do Nordeste do Brasil (NEB), Pernambuco apresenta uma das maiores extensões de território com clima semiárido quente (Bsh), correspondendo a cerca de 61,2% de sua área.

A chuva média anual acumulada na estação de Bebedouro é de 484,51 mm·ano⁻¹ (Figura 2). A estação chuvosa concentra-se nos meses de dezembro a abril, com 87,79% do total anual precipitado; os meses de janeiro, fevereiro, abril, novembro e dezembro contribuem com 65,46% das chuvas. Destaca-se o mês de março, com a maior precipitação média mensal (108,18 mm·mês⁻¹). A estação seca ocorre entre maio e outubro, com 12,21% da precipitação total anual, sendo julho, agosto e setembro os meses mais secos do ano, e agosto apresentando a menor precipitação média (3,46 mm·mês⁻¹).

A temperatura média anual em Bebedouro varia entre 26,40 °C e 27,10 °C, com média mensal de 26,09 °C, mínimas mensais entre 18,64 °C e 22,34 °C (em julho e novembro) e máximas mensais entre 29,60 °C e 34,00 °C (em julho e outubro) (Figura 2).

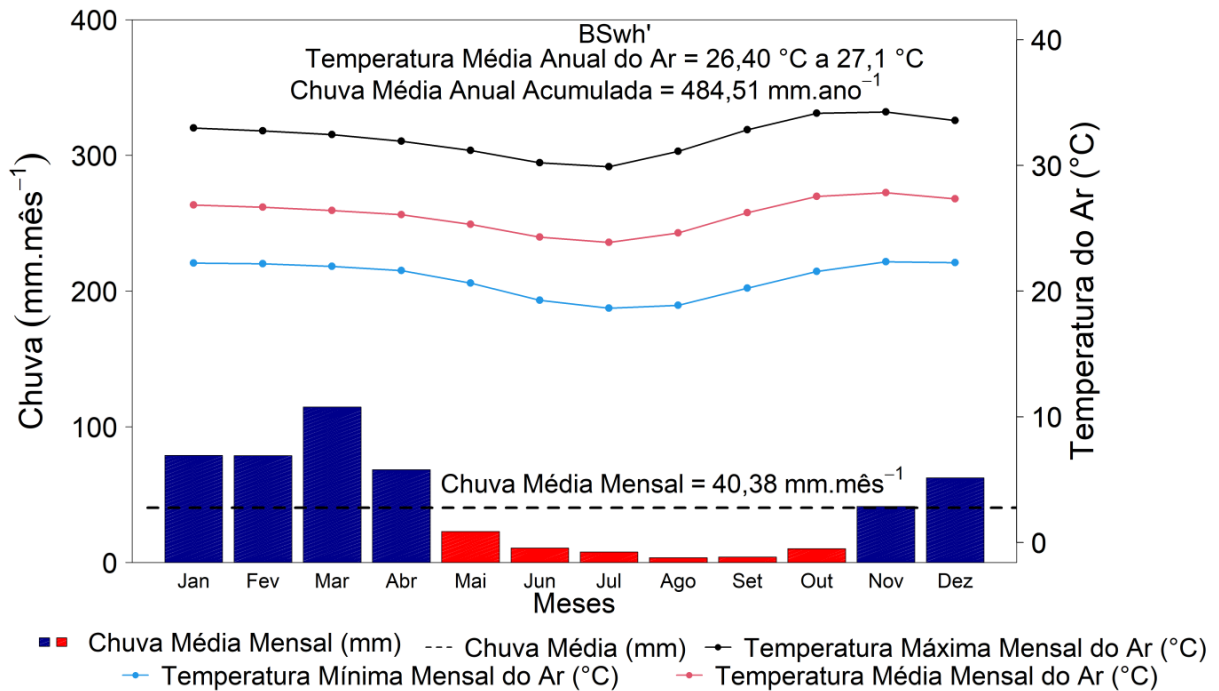
Em relação à umidade relativa do ar, os meses mais úmidos correspondem ao período chuvoso, com médias entre 66,0% e 71,5% (em setembro e outubro) e em torno de 55% nos meses mais quentes do ano. As médias de evaporação acompanham a variação anual do regime térmico, que depende do regime de radiação solar global anual. Os menores valores ocorrem entre fevereiro e julho, com evaporação média entre 181,1 e 199,3 mm·mês⁻¹; os maiores, em setembro (266,3 mm·mês⁻¹) e outubro (298,7 mm·mês⁻¹). O total anual de evaporação é de aproximadamente 2.659 mm, o que contribui para a elevada deficiência hídrica da região (Moura et al., 2007).

Análise Estatística Descritiva

A análise descritiva e exploratória da chuva na Estação Bebedouro, em Pernambuco (PE), apresentada na Tabela 1 e na Figura 3, mostra que a estação seca ocorre entre maio e outubro, com médias pluviométricas superiores às medianas, e a estação chuvosa, entre novembro e abril. De acordo com a série histórica estudada (Tabela 1; Figura 3), observou-se uma chuva média anual acumulada de 484,51 mm·ano⁻¹ e uma chuva média mensal de 40,38 mm·mês⁻¹. Os meses mais chuvosos, com média mensal superior a 40,38 mm, foram dezembro a abril, com destaque para março (108,18 mm). Os meses mais secos, com média inferior a 40,38 mm, foram julho, agosto e setembro, sendo agosto o mais seco (3,46 mm).

Variabilidade e tendências pluviométricas observadas no
 Semário Pernambucano Brasileiro

Figura 2 - Climograma e classificação climática de Köppen-Geiger (1948) para a estação Bebedouro no estado de Pernambuco (PE), 2024



Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros descritivos: média (\bar{x}), mediana (M_d), valor mínimo (V_{\min}), valor máximo (V_{\max}), desvio padrão (D_p), coeficiente de variação (CV), quartis inferior (Q_1) e superior (Q_3) amplitude Interquartilica (AIQ), na estação Bebedouro - (PE)

Meses	\bar{x}	M_d	V_{\min}	V_{\max}	D_p	CV	Quartis		AIQ
							Q_1	Q_3	
			(mm.mensal ⁻¹)			(%)			
Jan	77,52	45,70	2,60	451,30	87,98	113,50	16,35	110,60	94,25
Fev	76,03	57,80	0,00	315,80	68,99	90,75	26,70	87,95	61,25
Mar	108,18	91,00	3,60	354,00	95,00	87,82	32,55	156,30	123,75
Abr	65,96	62,90	0,00	223,60	54,67	82,89	18,60	93,35	74,75
Mai	23,09	12,80	0,00	103,90	25,88	112,08	4,95	28,70	23,75
Jun	10,36	5,70	0,00	62,40	12,82	123,78	2,00	14,75	12,75
Jul	7,81	5,00	0,00	58,20	11,08	141,85	1,95	8,80	6,85

Ago	3,46	1,20	0,00	21,10	5,24	151,52	0,00	4,90	4,90
Set	4,10	0,90	0,00	30,40	7,94	193,82	0,00	2,70	2,70
Out	10,35	0,60	0,00	105,70	20,75	200,49	0,00	12,95	12,95
Nov	38,86	31,50	0,00	144,60	38,16	98,21	7,90	56,80	48,90
Dez	58,81	34,00	0,20	325,70	63,46	107,91	17,60	79,35	61,75

Fontes: Os autores, 2024.

Esses resultados corroboram os de Silva Júnior et al. (2020), cujas séries temporais de precipitação total e máxima (mensal) na estação chuvosa em Recife (PE) apresentaram alta dispersão e grande variabilidade ($CV \geq 30\%$). Vale ressaltar que a grande variabilidade dos dados pluviométricos, segundo os estudos de Salviano, Groppo e Pellegrino (2016), é resultado das mudanças climáticas locais, associadas a fatores antrópicos como desmatamento, desertificação, secas e urbanização desenfreada, ou naturais, como a intensificação da atividade solar e as anomalias climáticas (El Niño e La Niña).

Nos meses mais secos na região da Estação Bebedouro (PE), destacam-se julho ($\bar{x} = 7,81 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $Md = 5,00 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$), agosto ($\bar{x} = 3,46 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $Md = 1,20 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$) e setembro ($\bar{x} = 4,10 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $Md = 0,90 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$). O padrão é semelhante ao da estação chuvosa (novembro a abril), na qual as médias pluviométricas também foram superiores às medianas (Tabela 1).

Os valores mínimos iguais a $0,00 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ foram registrados de fevereiro a novembro, nas estações chuvosa e seca. Contudo, a estação chuvosa apresenta o maior número de meses com chuva superior a $0,00 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ — janeiro (2,60 mm), março (3,60 mm) e dezembro (0,20 mm). Os valores máximos na estação chuvosa superaram $183,06 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$: janeiro (451,30 mm), fevereiro (315,80 mm), março (354,00 mm), abril (223,60 mm) e dezembro (325,70 mm).

De acordo com Silva et al. (2012) e Fisch et al. (1998), as chuvas na região Nordeste do Brasil são influenciadas principalmente pelo deslocamento norte-sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), pelos sistemas sinóticos e pelas Linhas de Instabilidade (LI), que interagem com os sistemas frontais atuantes nos trópicos durante a estação chuvosa. Sobre o Atlântico, a ZCIT migra de sua posição mais ao norte (cerca de 14° N em agosto-setembro) para mais ao sul (cerca de 4° S) durante março-abril, período caracterizado como o mais chuvoso na região, devido ao transporte de umidade trazido pelos ventos alísios de nordeste, aliado a fatores de relevo (Hastenrath; Heller, 1977; Fisch et al., 1998).

Molion (2002) afirmam que a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o NEB, tanto em escalas espaciais quanto temporais, está intimamente relacionada às mudanças nas configurações da circulação atmosférica de grande escala e às interações oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico. O fenômeno El Niño—Oscilação Sul (ENOS) altera o regime pluviométrico do NEB, causando secas severas que afetam a economia, a produção agrícola e as atividades da população.

Quanto aos quartis Q1 e Q3 (Tabela 1; Figura 3), os maiores valores foram registrados em janeiro ($16,35 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $110,60 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$), fevereiro ($26,70 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $87,95 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$), março ($32,55 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $156,30 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$), abril ($18,60 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $93,35 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$) e dezembro ($17,60 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $79,35 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$), respectivamente.

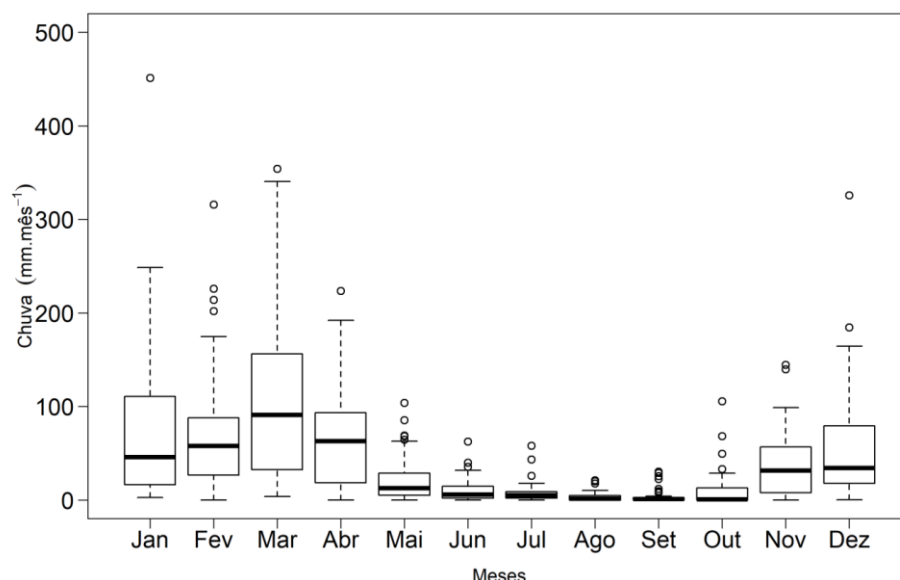
Nas estações seca e chuvosa, os valores de quartis (Q1 e Q3) e amplitude interquartilica (AIQ) variam entre $48,90 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e $123,75 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$. Observa-se forte presença de *outliers* (Figura 3), especialmente durante a estação seca, nos meses de maio e outubro, na região da Estação Bebedouro.

Os menores valores de desvio-padrão (Dp) e amplitude interquartílica (AIQ) da precipitação demonstram alta variabilidade dos dados em torno da média, principalmente nos meses da estação seca (MJJ e ASO), com Dp entre $5,24 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ e $25,88 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$, e AIQ entre $2,70 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ e $23,75 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$. Os maiores valores de coeficiente de variação (CV) foram observados no segundo semestre, entre maio e outubro. Para a Estação Bebedouro, os CVs variaram de 112,08% (maio) a 200,49% (outubro) (Tabela 1; Figura 3).

Comparativamente, os limites superiores (Ls) variaram entre $130,15 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ a $341,93 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$, e os (Li) inferiores entre $-30,78 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ a $-3,93 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$, na estação chuvosa. Na estação seca (Ls) variaram entre $6,75 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ a $64,33 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$, e (Li) negativos entre $-6,93 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ a $-1,35 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ conforme a Figura 3.

Os resultados encontrados para os parâmetros estatísticos da região de estudo corroboram os de Silva *et al.* (2012), que observaram elevados valores dos coeficientes de variação (CV's > 100%) e desvio-padrão, o que evidencia grande variabilidade temporal da precipitação na estação Bebedouro (PE) ao longo do ano (sazonalidade). As maiores variações dos (CV's > 100%) ocorreram entre maio e outubro, meses considerados secos. Esses resultados segundo Silva *et al.* (2012) indicam que a variabilidade da precipitação é maior nos períodos secos e nas regiões com menor pluviosidade. A razão disso está associada à presença de eventos de chuva mesmo no período seco e em regiões com baixa pluviosidade, em face dos altos valores dos desvios padrão, que podem chegar a 80% da precipitação média anual. Ainda segundo os autores, na parte semiárida da região Nordeste do Brasil (NEB) se verifica os maiores valores de CVs, entre 140 e 300% para precipitação. Já no noroeste do NEB, os valores de CVs variaram entre 100 e 200% para a precipitação (Silva *et al.*, 2012).

Figura 3 - Distribuição da chuva mensal na Estação Bebedouro (PE), no período de 1975 a 2017



Fontes: Os autores, 2024.

Na estação chuvosa, observaram-se os maiores valores de desvio-padrão (Dp) entre dezembro e abril, indicando grande variabilidade pluviométrica mensal; situação oposta ocorreu na estação seca, com menores valores entre maio e outubro (Tabela 1). Segundo Silva *et al.* (2012), os valores moderados dos CVs na costa leste do NEB estão associados à regularidade dos sistemas atmosféricos atuantes nessa

parte da região, tais como os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, Distúrbios Ondulatórios de Leste e Sistemas Frontais. Resultados semelhantes foram obtidos por Chaves (1999), que observou maior variabilidade temporal da precipitação na parte nordeste, central e sudoeste do setor sul do Nordeste e norte de Minas Gerais.

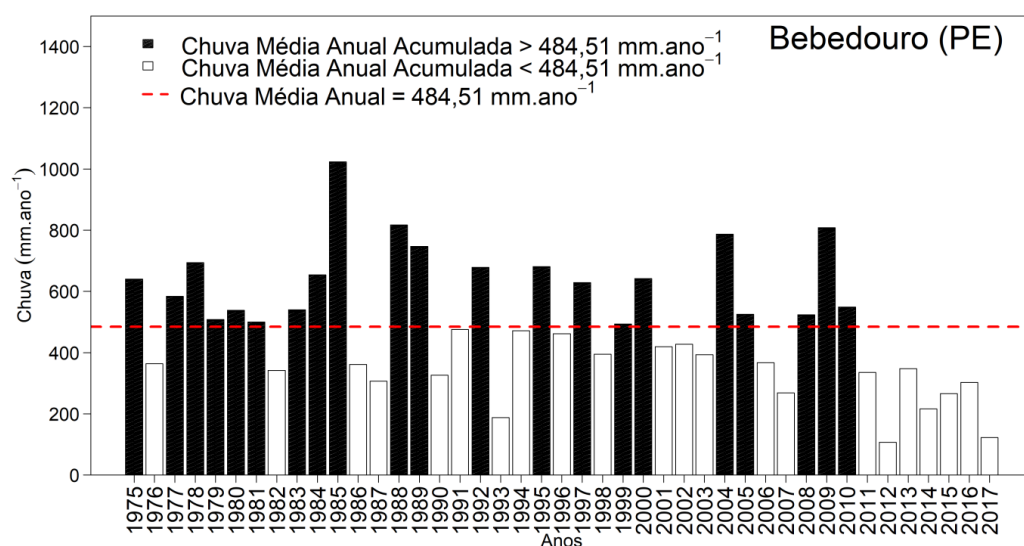
Variabilidade Pluviométrica Interanual

A distribuição interanual das chuvas totais anuais na Estação Bebedouro (PE), no período de 1975 a 2017 (Figura 4), indica a ocorrência de anos com precipitação inferior à média anual ($< 484,51 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) em 22 anos consecutivos (51,16% dos anos), seguidos por 21 anos (48,84%) com valores acima da média anual ($> 484,51 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$). Destacam-se os anos de 1976, 1982, 1986, 1987, 1990, 1991, 1993, 1994, 1996, 1998, 2001, 2002, 2003, 2006, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, seguidos de forte tendência de redução dos totais anuais de chuva. Por outro lado, chuvas anuais acima da média ($> 484,51 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) foram registradas nos anos de 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985, 1988, 1989, 1992, 1995, 1997, 1999, 2000, 2004, 2005, 2008, 2009 e 2010.

Observou-se forte tendência de aumento das chuvas em 1985 ($1.023,50 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$), 1988 ($817,20 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$), 1989 ($746,90 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$), 2004 ($786,70 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) e 2009 ($808,40 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) (Figura 4).

Esses resultados são corroborados pelos estudos de Cabral Júnior e Lucena (2021), realizados em Petrolina (PE), que identificaram aumento médio sucessivo da precipitação entre os quinquênios de 1990–1994 e 2000–2004. A partir deste último período, observou-se uma redução sequencial na média de precipitação até o quinquênio de 2010–2014, quando se registrou o menor valor médio ($311,2 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$). O maior valor médio ocorreu no quinquênio de 1985–1989 ($651,2 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$). Segundo os autores, não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias pluviométricas anuais em Petrolina.

Figura 4 - Distribuição interanual das chuvas na estação Bebedouro (PE), no período de 1975 a 2017



Fonte: Os autores (2024).

Em relação aos valores médios dos coeficientes de variação (CVs) durante as estações chuvosa (NDJ–FMA) e seca (MJJ–ASO) no período de 1975 a 2017, os menores valores de CV de precipitação abaixo

do CV médio anual ($< 84,56\%$) na estação chuvosa (NDJ–FMA) foram registrados em 55,84% dos anos, com destaque para 1975, 1977–1979, 1983, 1985, 1986, 1990, 1992, 1993, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009, 2011, 2014, 2015 e 2017.

Já os CVs acima do valor médio anual ($> 84,56\%$) na estação chuvosa foram observados em 44,19% dos anos: 1976, 1980, 1981, 1982, 1984, 1987, 1988, 1989, 1991, 1994, 1997, 2001, 2002, 2004, 2007, 2010, 2012, 2013 e 2016.

Para a estação seca (MJJ–ASO), os valores de CV abaixo do médio ($< 108,57\%$) foram registrados em 51,16% dos anos: 1975, 1977, 1979, 1980, 1981, 1985, 1987, 1988, 1989, 1993, 1994, 1995, 2000, 2004, 2006, 2007, 2008, 2010, 2012, 2013, 2014 e 2015. Por outro lado, CVs acima do valor médio anual ($> 108,57\%$) ocorreram em 48,84% dos anos: 1976, 1978, 1982, 1983, 1984, 1986, 1990, 1991, 1992, 1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2005, 2009, 2011, 2016 e 2017.

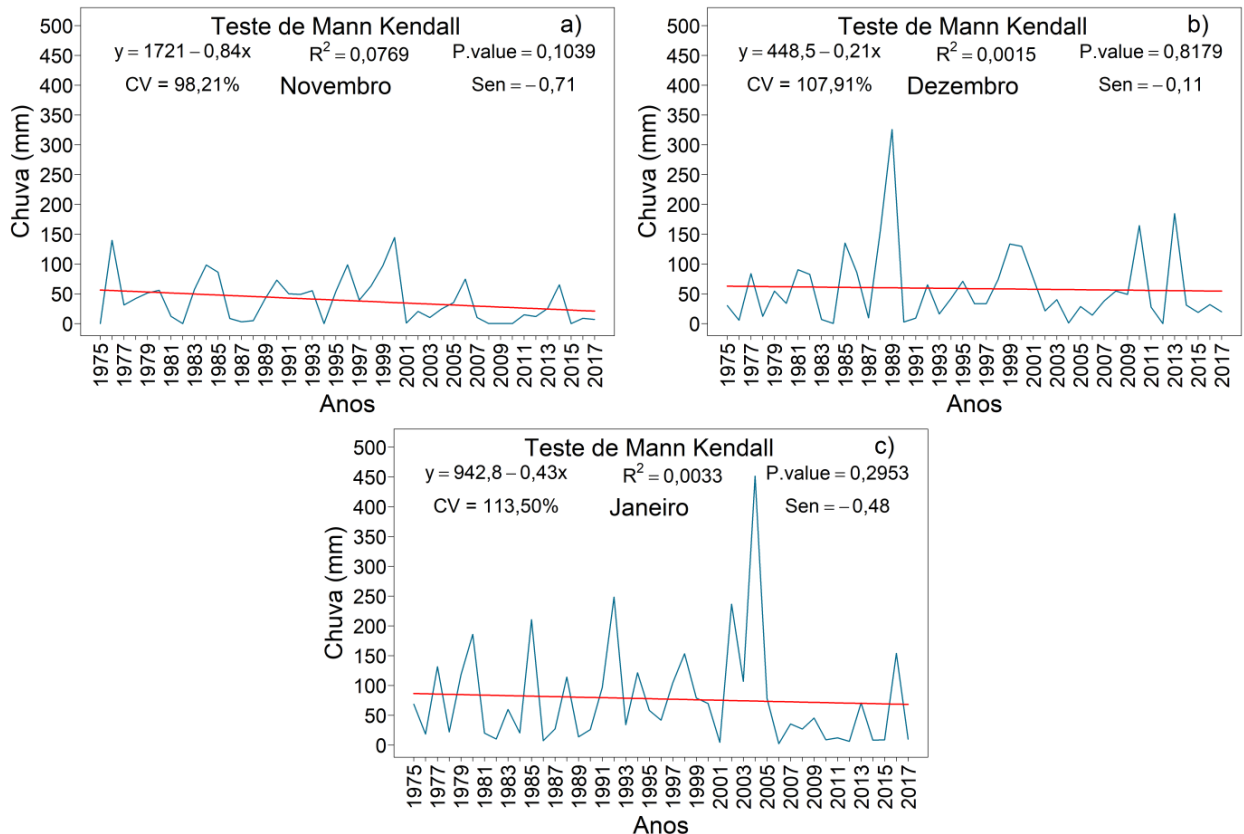
Os resultados observados neste estudo confirmam as conclusões de Silva et al. (2012), que analisaram a variabilidade anual e intra-anual da precipitação no NEB e identificaram que a estação chuvosa nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco ocorre predominantemente em março e abril. A estação chuvosa em todo o setor norte do NEB coincide com o deslocamento mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), entre fevereiro e abril, período conhecido como trimestre chuvoso (FMA). A estação chuvosa nessa área do NEB conhecido com a posição mais sul da ZCIT e com o aparecimento de Linhas de Instabilidade (Uvo, 1989).

Segundo Silva et al. (2012), os menores valores dos CVs da precipitação mensal, anual e das estações chuvosa e seca no Nordeste estão concentrados no primeiro semestre, período em que ocorre a estação chuvosa regional. O menor valor de CV foi observado no mês de março, enquanto os maiores, registrados no trimestre seco (setembro e outubro), apareceram nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco.

Análise de Tendência e Ruptura na Estação Chuvosa

A distribuição temporal mensal da tendência da precipitação pluvial na estação chuvosa, para os trimestres de novembro, dezembro e janeiro (NDJ) e de fevereiro, março e abril (FMA) — Figuras 5 (a), (b) e (c) e Figuras 6 (d), (e) e (f) — mostra que novembro (46,51%), dezembro (34,88%) e janeiro (37,21%) dos anos apresentaram precipitações acima da média mensal do trimestre (58,40 mm), com valores de 38,86 mm, 58,81 mm e 77,52 mm. Padrão semelhante foi observado para os meses de fevereiro (34,88%), março (39,53%) e abril (48,84%), com precipitação acima da média mensal do trimestre (83,39 mm), e valores respectivos de 76,03 mm, 108,18 mm e 65,96 mm. Destacam-se os meses de março e novembro, com a maior e a menor precipitação média mensal (108,18 mm e 38,86 mm), respectivamente, em relação aos demais meses da estação chuvosa.

Figura 5 - Teste de Tendência de Mann-Kendall (a), (b) e (c) para a precipitação pluvial, na Estação Bebedouro – (PE), período chuvoso no trimestre de novembro, dezembro e janeiro (NDJ) 1975 a 2017



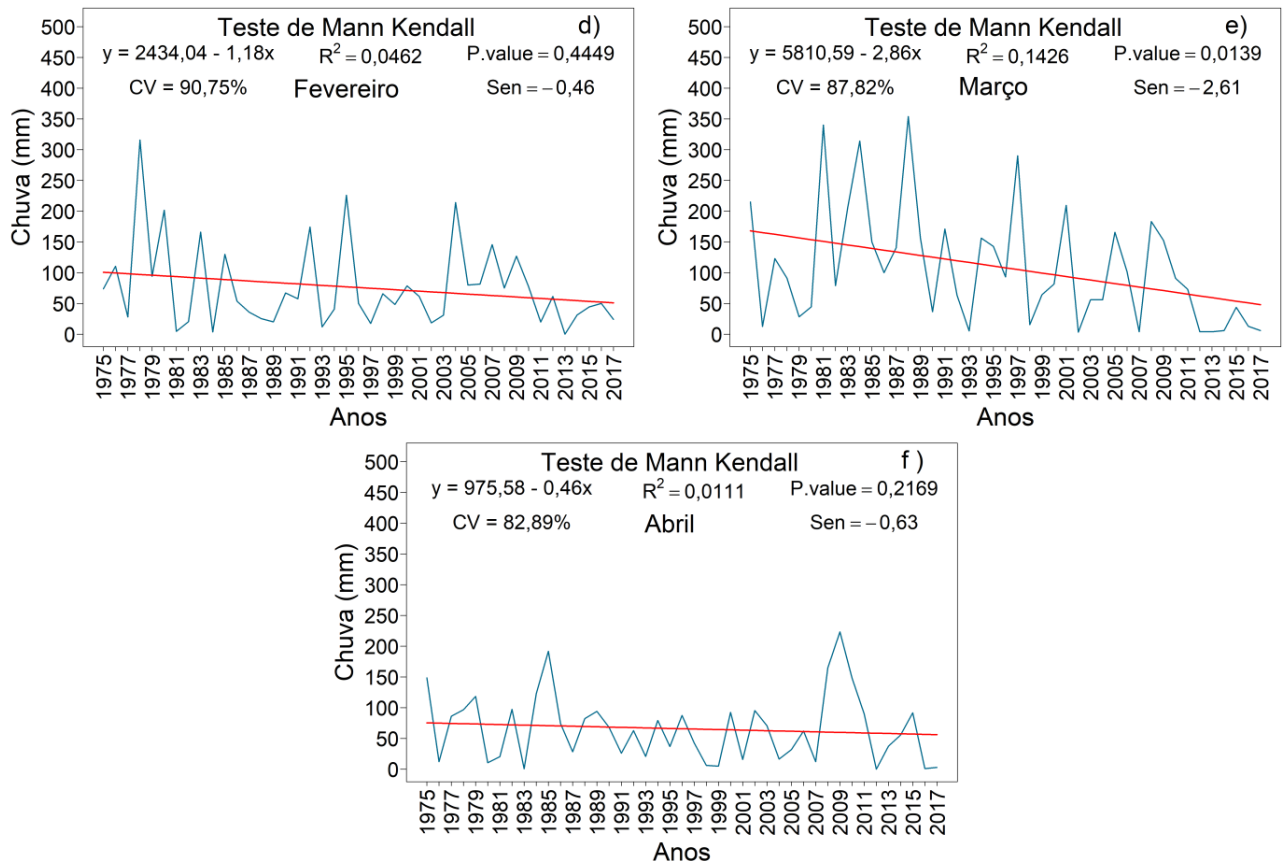
Fonte: Os autores (2024).

Com base no modelo de Regressão Linear Simples (RLS), de modo geral, observa-se na estação chuvosa (NDJ e FMA) uma alta variabilidade das séries temporais mensais de chuva nos anos de 1975 a 2017, seguidas de coeficientes angulares (Δ) negativos ($-0,84$; $-0,20$ e $-0,43$) — Figuras 5 (a), (b) e (c) — e ($-1,18$; $-2,86$ e $-0,46$) — Figuras 6 (d), (e) e (f). Esses valores dos coeficientes de determinação (R^2) e variação amostral (CV) foram observados entre 0,0033 e 0,1426, insignificantes para o R^2 , e entre 82,89% e 113,50% para o CV, indicando uma tendência não estatisticamente significativa (sem tendência) da série temporal na estação chuvosa.

Porém, o mês de março (Figura 6e) se diferencia dos demais meses por apresentar o menor coeficiente angular negativo ($-2,86$) e p-valor (0,0139), seguido pelo maior valor de R^2 (0,1426), significativo e moderado CV de 87,82%, o que indica uma alta variabilidade dos índices pluviométricos na estação chuvosa em Bebedouro (PE).

Em contrapartida, o TMK e o teste de Curvatura de Sen (Sen's Slope) confirmam que apenas o mês de março da série temporal mensal de precipitação (Figura 6e) apresentou tendência negativa e estatisticamente significativa, ou seja, tendência decrescente, rejeitando-se a hipótese nula (H_0) para p-valor $< 0,05$. Nos demais meses da estação chuvosa, aceita-se a hipótese nula (p-valor $> 0,05$), sem detecção de tendência estatisticamente significativa, com variação entre $0,1039 < p\text{-valor} < 0,8179$ — Figuras 5 (a), (b) e (c) e Figuras 6 (d), (e) e (f).

Figura 6 - Teste de Tendência de Mann-Kendall (d), (e) e (f) para a precipitação pluvial, na Estação de Bebedouro – (PE), período chuvoso no trimestre de fevereiro, março e abril (FMA) 1975 a 2017



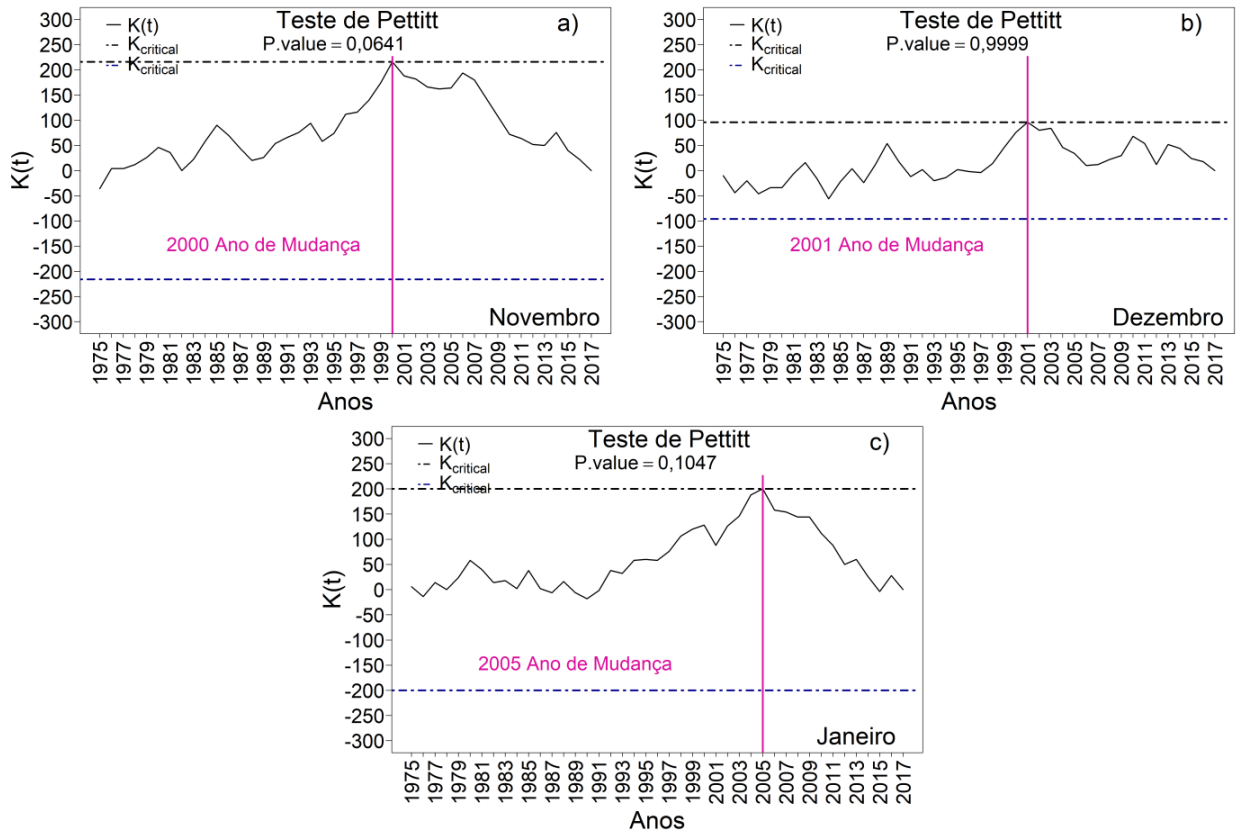
Fonte: Os autores (2024).

Os trimestres NDJ e FMA, segundo os valores de Curvatura de Sen, apresentaram reduções de 38,86 mm de chuva (-0,71 mm/mês por ano), 58,81 mm de chuva (-0,11 mm/mês por ano), 77,52 mm de chuva (-0,48 mm/mês por ano), 76,03 mm de chuva (-0,46 mm/mês por ano), 108,18 mm de chuva (-2,60 mm/mês por ano) e 65,96 mm de chuva (-0,63 mm/mês por ano), respectivamente, nos totais precipitados ao longo de todo o período analisado (1975–2017), conforme as Figuras 3, 5 e 6.

Os resultados do TP para a estação chuvosa, nos trimestres NDJ (Figuras 7a, 7b, 7c), indicam mudanças abruptas significativas ($0,0641 < p\text{-valor} < 0,999$) nos respectivos anos de 2000, 2001 e 2005, com valores críticos entre $\pm 96 < \text{Valor Crítico} < \pm 216$, acompanhados pelas diferenças entre as médias nos períodos anteriores (48,60 mm, 66,38 mm e 95,48 mm) e posteriores (18,30 mm, 45,44 mm e 32,54 mm).

No trimestre FMA (Figuras 8d, 8e e 8f), foram registradas mudanças abruptas significativas ($0,0601 < p\text{-valor} < 0,7671$) nos anos de 2010, 1997 e 1990, com valores críticos variando entre $\pm 114 < \text{Valor Crítico} < \pm 218$, e redução de 34,08% em NDJ e 74,09% em FMA na precipitação local.

Figura 7 - Teste de Pettitt (a), (b) e (c) para a precipitação pluvial, na Estação de Bebedouro (PE) período chuvoso no trimestre de novembro, dezembro e janeiro (NDJ) 1975 a 2017

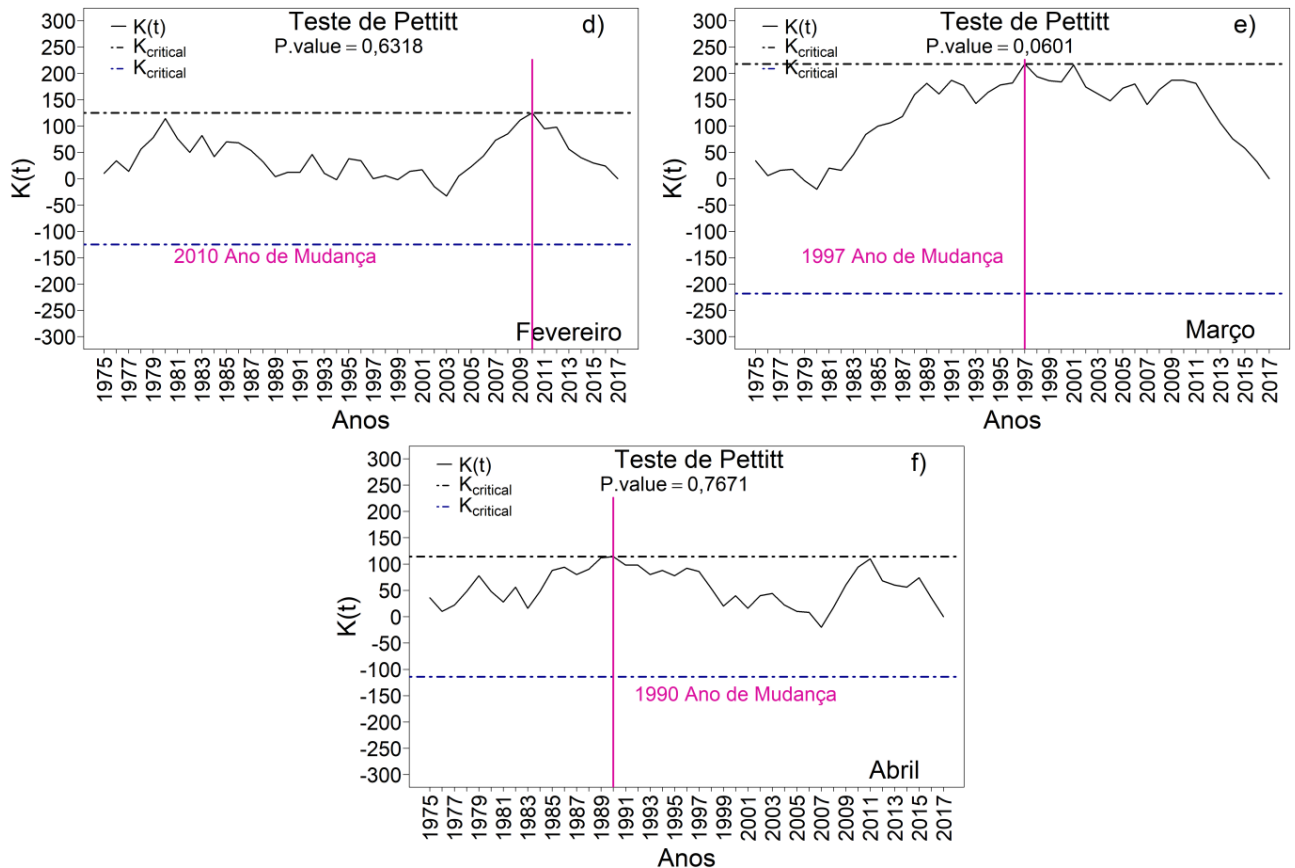


Fonte: Os autores (2024).

Esses resultados corroboram os encontrados por Silva Júnior et al. (2020), que, a partir da aplicação do modelo de regressão linear simples, observaram coeficientes angulares negativos ($\Delta < 0$) para todos os intervalos de altura de chuva, com exceção da faixa ≥ 100 mm. Embora o modelo linear indique tendência, ela não se mostrou estatisticamente significativa diante dos baixos coeficientes de determinação (R^2), fato também verificado no presente estudo.

Com a aplicação do TMK, aos níveis de significância de 5% e 10%, foi constatada a existência de tendência negativa para diversas faixas de precipitação. Para precipitações acima de 100 mm, o teste revelou tendência positiva e levemente significativa, o que indica aumento na ocorrência de chuvas extremamente fortes concentradas em um único dia (≥ 100 mm). Para as demais faixas de precipitação, foi aceita a hipótese nula, sem identificação de tendência significativa ou levemente significativa.

Figura 8 - Teste de Pettitt (d), (e) e (f) para a precipitação pluvial, na Estação de Bebedouro (PE), período chuvoso no trimestre de fevereiro, março e abril (FMA) 1975 a 2017



Fonte: Os autores (2024).

Análise de Tendência e Ruptura na Estação Seca e suas Implicações

A análise de detecção de mudanças abruptas significativas no trimestre MJJ, para o período de 1975 a 2017, identificou que os anos de 1983, 2010 e 1986 apresentaram alterações significativas na série histórica de precipitação da estação seca, com valores de probabilidade elevados ($0,8294 < p\text{-valor} < 1,0000$) e amplitudes críticas entre ± 93 e ± 110 , indicando modificações bruscas no padrão pluviométrico dos períodos anteriores e posteriores a essas quebras: 22,26 mm no período pré-1983 e 23,96 mm no pós-quebra; 3,59 mm antes de 2010 e 11,61 mm depois; e 9,06 mm antes de 1986 e 7,49 mm após essa mudança.

No trimestre de agosto, setembro e outubro (ASO), também foram observadas variações, ainda que com baixos volumes absolutos. Isso sugere que parte dessas mudanças está associada a oscilações interanuais que podem ter origem em teleconexões climáticas, como variações na atuação da ZCIT, influência dos VCANs e anomalias na TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico.

Para o trimestre de maio, junho e julho (MJJ) — Figuras 9 (a), (b), (c) e Figuras 10 (d), (e) e (f) — verificaram-se diferenças consistentes entre as médias de precipitação dos períodos anteriores e

posteriores às quebras: 22,26 mm no período pré-1983 e 23,96 mm no pós-quebra; 3,59 mm antes de 2010 e 11,61 mm depois; e 9,06 mm antes de 1986 e 7,49 mm após essa mudança. No trimestre de agosto, setembro e outubro (ASO), também foram observadas variações, ainda que mantendo baixos volumes absolutos. Destaca-se o mês de setembro, com o maior percentual de anos (81,40%) apresentando precipitação abaixo da média mensal (4,10 mm) em relação aos demais meses da estação seca (Figura 10e).

Esses resultados evidenciam que o regime de chuvas na estação seca da região apresenta alta variabilidade e está sujeito a mudanças abruptas não associadas a tendências lineares persistentes, mas sim a eventos ou períodos específicos que alteram temporariamente a disponibilidade hídrica. Tais oscilações podem estar relacionadas a fenômenos climáticos de grande escala, como o El Niño–Oscilação Sul (ENOS), que influenciam a distribuição temporal e a intensidade das chuvas no semiárido pernambucano.

As implicações para o planejamento agrícola e a gestão hídrica ficam evidentes na agricultura de sequeiro, na qual as mudanças abruptas indicam que o calendário agrícola não pode depender apenas de médias históricas. Estratégias mais flexíveis, com cultivares de ciclo curto e maior tolerância à seca, tornam-se essenciais para mitigar riscos de perda de safra.

Na gestão de reservatórios, a ocorrência de quebras com aumento ou redução súbita de precipitação exige manejo mais dinâmico de açudes e barragens, evitando tanto a escassez quanto o desperdício de água em anos atípicos. O monitoramento climático, diante da alta variabilidade, reforça a necessidade de sistemas de previsão e alerta antecipado para orientar produtores e gestores sobre possíveis desvios no regime pluviométrico.

A política hídrica regional, com planos de uso e distribuição de água, precisa considerar não apenas tendências médias, mas também a frequência e a magnitude das variações abruptas, integrando a gestão de seca e de enchentes em um mesmo arcabouço estratégico.

Assim, os resultados sugerem que a sustentabilidade agrícola e a segurança hídrica em Bebedouro (PE) dependem de políticas adaptativas que incorporem a variabilidade interanual e os eventos de mudança abrupta como elementos centrais do planejamento.

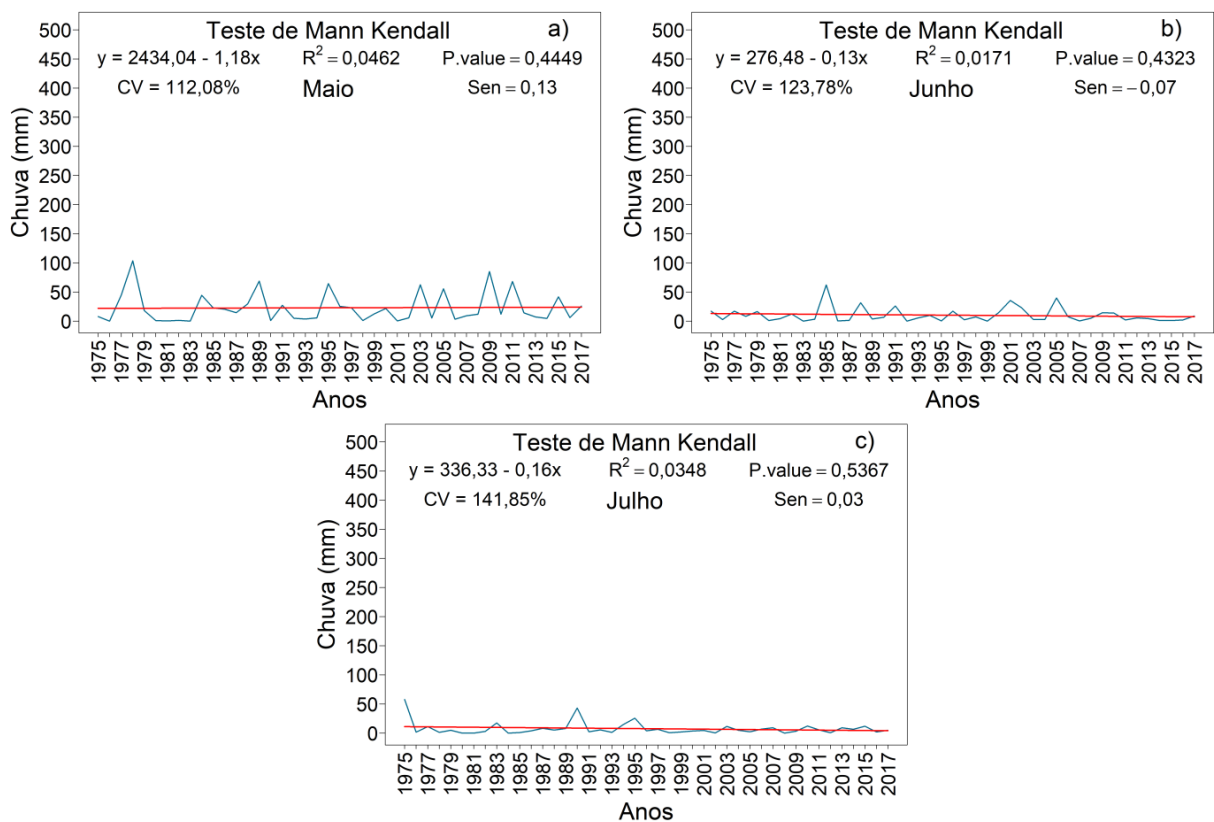
Os resultados da Regressão Linear Simples (RLS) — Figuras 9 (a), (b), (c) e Figuras 10 (d), (e) e (f) — na estação seca apontam para a existência de alta variabilidade das séries temporais mensais no período de 1975 a 2017, com coeficientes angulares (RLS) negativos (−1,18; −0,13 e −0,16) em MJJ e (−0,03; −0,15 e −0,04) em ASO, e baixos valores de R^2 entre $0,0171 < R^2 < 0,0462$ nos meses de MJJ e $0,0006 < R^2 < 0,0585$ em ASO, insignificantes, seguidos por altos valores de CV ($112,08\% < CV < 141,85\%$) em MJJ e ($151,52\% < CV < 200,49\%$) em ASO. Esses resultados indicam uma alta variabilidade da precipitação pluvial acompanhada de tendência não estatisticamente significativa (sem tendência) na estação seca em Bebedouro (PE).

Por outro lado, os testes de Mann-Kendall (TMK) e Sen's Slope (Figuras 9a–c e 10d–f) não encontraram tendências estatisticamente significativas ($p > 0,05$), indicando que não houve evidência robusta de mudança linear na precipitação durante o período analisado.

Apesar de a análise de Sen's Slope apontar reduções em MJJ (23,09 mm; 10,36 mm e 7,81 mm — equivalentes a −0,13 mm, −0,07 mm e −0,03 mm/mês por ano) e em ASO (3,46 mm; 4,10 mm; 10,35 mm, com inclinação aproximada de 0 mm/mês/ano), a ausência de significância estatística sugere que essas variações podem refletir flutuações naturais e não uma tendência de longo prazo, especialmente considerando: (1) A forte influência de modos de variabilidade climática, como El Niño e La Niña, que afetam a distribuição sazonal da precipitação, mas não explicam totalmente as anomalias observadas (Wang et al., 2024; Yu et al., 2023); (2) A recomendação da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2017) de utilizar séries com pelo menos 30 anos para análises de tendência, visto que séries mais curtas ou com alta variabilidade muitas vezes não detectam tendências significativas; e (3) A possibilidade de

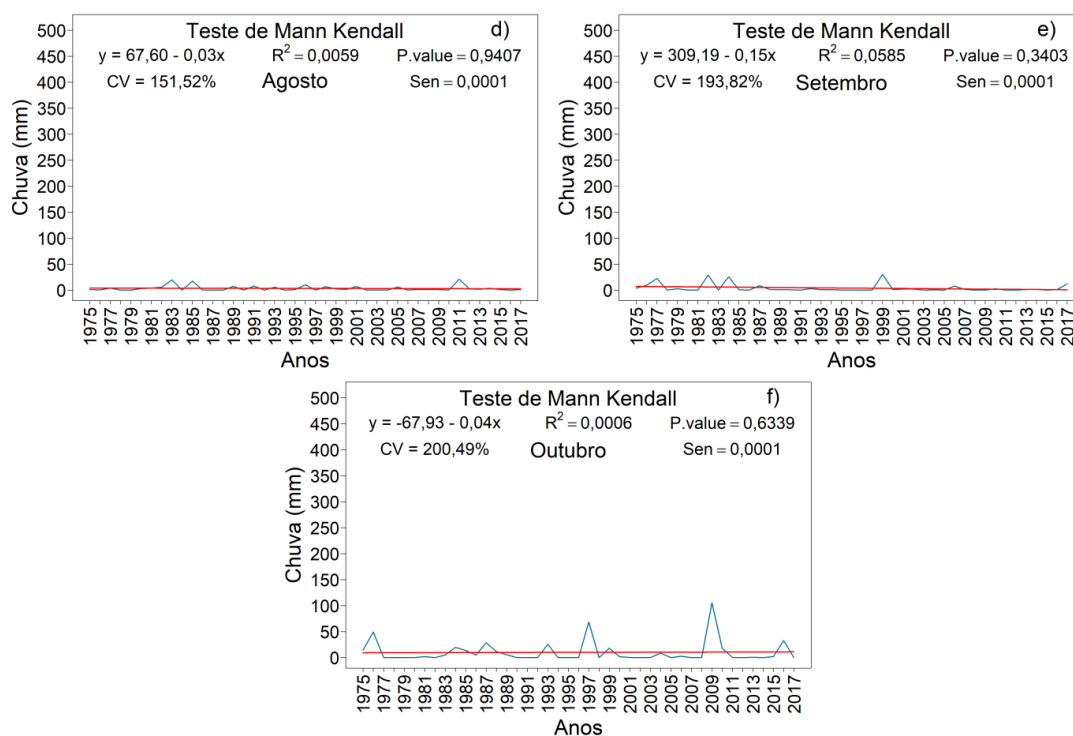
que autocorrelação e características dos dados (como distribuição não normal) dificultem a identificação de tendências reais por meio desses testes estatísticos, podendo resultar na aceitação da hipótese nula mesmo diante de variações observáveis (Hameed et al., 2017; Yue; Wang, 2004).

Figura 9 - Teste de Tendência de Mann-Kendall (a), (b) e (c) para a precipitação pluvial, em Estação de Bebedouro (PE) período seco no trimestre de maio, junho e julho (MJJ) 1975 a 2017



Fonte: Os autores (2024).

Figura 10 - Teste de Tendência de Mann-Kendall (d), (e) e (f) para a precipitação pluvial, em Estação de Bebedouro (PE) período seco no trimestre de agosto, setembro e outubro (ASO) 1975 a 2017



Fonte: Os autores (2024).

Os TP (Figuras 11a, 11b e 11c), para o trimestre MJJ na estação seca, apontam mudanças abruptas significativas ($0,8294 < p\text{-valor} < 1,0000$) nos anos de 1983, 2010 e 1986, com valores críticos no intervalo de $\pm 93 < \text{Valor Crítico} < \pm 110$, seguidos de diferenças entre as médias da estação seca (MJJ) nos períodos anteriores (22,26 mm; 3,59 mm e 9,06 mm) e posteriores (23,96 mm; 11,61 mm e 7,49 mm).

A análise dos TP (Figuras 12d, 12e e 12f) também indicou mudanças abruptas significativas ($0,7931 < p\text{-valor} < 1,0000$) nos anos de 2001, 1988 e 1989, acompanhadas de valores críticos entre $\pm 58 < \text{Valor Crítico} < \pm 112$ e diferenças entre as médias da estação seca (ASO) nos períodos anteriores (3,85 mm; 7,94 mm e 10,84 mm) e posteriores (2,61 mm; 2,46 mm e 10,26 mm). Observou-se uma redução entre 30,90% em MJJ e 94,66% em ASO na precipitação local.

Esses resultados estão de acordo com a pesquisa desenvolvida por Amorim et al. (2020) para o período chuvoso de 1900 a 2014 nas regiões do Semiárido (Oeste e Seridó) do Rio Grande do Norte. A análise de tendência pelo TMK não mostrou tendências significativas para as regiões de estudo; entretanto, a região do Litoral apresentou aumento da precipitação em 130 mm durante a estação chuvosa, ao nível de 1% de significância.

Figura 11 - Teste de Pettitt (a), (b) e (c) para a precipitação pluvial, na Estação de Bebedouro (PE), período seco no trimestre de maio, junho e julho (MJJ) 1975 a 2017



Fonte: Os autores (2024).

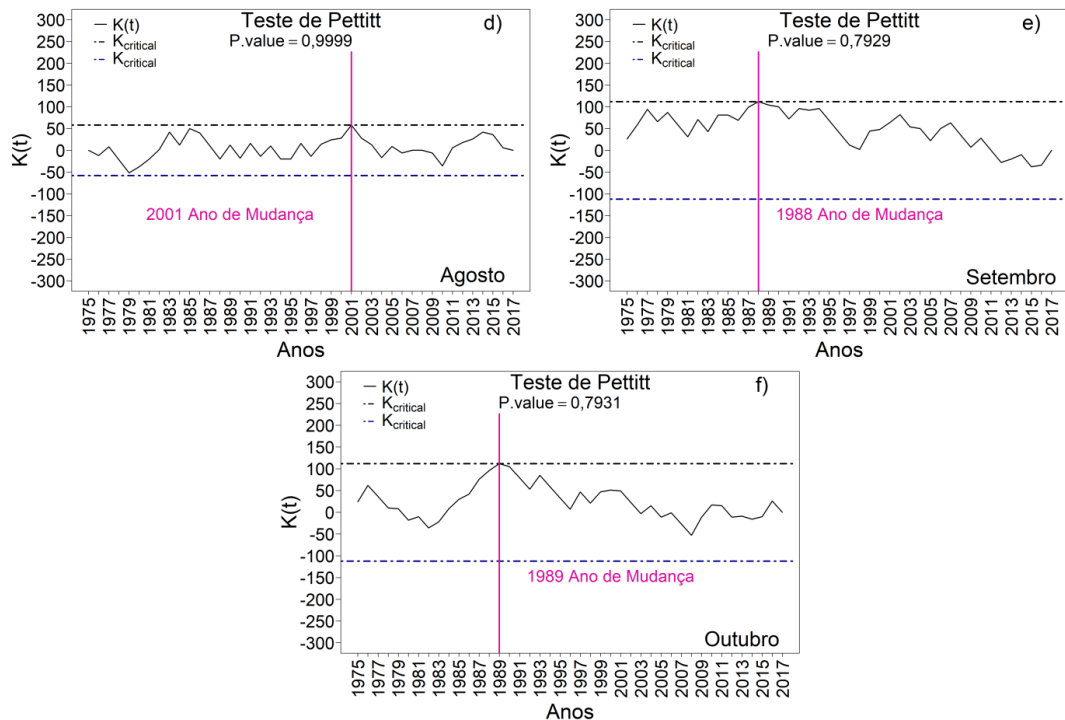
O Teste de Pettitt apontou mudança significativa (p -valor $< 0,05$) na série temporal a partir da década de 1960, período em que os acumulados de precipitação não mostravam alterações no regime pluviométrico, mas passaram a apresentar volumes mais elevados, com médias de 714 mm para 844 mm. Segundo Amorim et al. (2020), a precipitação na região do NEB é fortemente afetada por modos de variabilidade em diferentes escalas temporais, associados aos oceanos Pacífico e Atlântico. A mudança no acumulado de chuva na estação chuvosa do litoral nordestino pode estar relacionada a esses modos de variabilidade.

De acordo com Nóbrega et al. (2014), a precipitação extrema nas regiões próximas à faixa litorânea da Paraíba — como as regiões da Borborema/Agreste e Litoral, confrontadas ao Sertão — está mais associada aos modos do Atlântico.

Nesse sentido, Amorim et al. (2020) afirmam que a ZCIT é um dos principais sistemas que favorecem a precipitação no NEB, atuando entre as estações de verão e outono austral (Zhou; Lau, 2001), principalmente no setor Norte do NEB (NNEB), que em anos chuvosos pode alcançar até 5° S (Melo et al., 2009).

Os VCANs atuam no verão austral, com máxima predominância no mês de janeiro (Kousky, 1981; Coutinho et al., 2010). Os DOL ocorrem durante todo o ano ao longo da costa do NNEB e do Leste do NEB (LNEB), sendo responsáveis por elevados índices pluviométricos nos meses de inverno nessas regiões (Rodrigues et al., 2019). Os SF e a ZCAS atuam sobre o setor sul do Nordeste do Brasil, principalmente nos meses de novembro a janeiro (Ferreira; Mello, 2005).

Figura 12 - Teste de Pettitt (d), (e) e (f) para a precipitação pluvial, na Estação de Bebedouro (PE), no período seco para o trimestre de agosto, setembro e outubro 1975 a 2017



Fonte: Os autores (2024).

Esses resultados estão de acordo com a pesquisa desenvolvida por Amorim et al. (2020) para o período chuvoso de 1900 a 2014 nas regiões do Semiárido (Oeste e Seridó) do Rio Grande do Norte. A análise de tendência pelo TMK não mostrou tendências significativas para as regiões de estudo; entretanto, a região do Litoral apresentou aumento da precipitação em 130 mm durante a estação chuvosa, ao nível de 1% de significância.

O Teste de Pettitt apontou mudança significativa (p -valor $< 0,05$) na série temporal a partir da década de 1960, período em que os acumulados de precipitação não mostravam alterações no regime pluviométrico, mas passaram a apresentar volumes mais elevados, com médias de 714 mm para 844 mm. Segundo Amorim et al. (2020), a precipitação na região do NEB é fortemente afetada por modos de variabilidade em diferentes escalas temporais, associados aos oceanos Pacífico e Atlântico. A mudança no acumulado de chuva na estação chuvosa do litoral nordestino pode estar relacionada a esses modos de variabilidade.

De acordo com Nóbrega et al. (2014), a precipitação extrema nas regiões próximas à faixa litorânea da Paraíba — como as regiões da Borborema/Agreste e Litoral, confrontadas ao Sertão — está mais associada aos modos do Atlântico.

Nesse sentido, Amorim et al. (2020) afirmam que a ZCIT é um dos principais sistemas que favorecem a precipitação no NEB, atuando entre as estações de verão e outono austral (Zhou; Lau, 2001), principalmente no setor Norte do NEB (NNEB), que em anos chuvosos pode alcançar até 5° S (Melo et al., 2009).

Os VCANs atuam no verão austral, com máxima predominância no mês de janeiro (Kousky, 1981; Coutinho et al., 2010). Os DOL ocorrem durante todo o ano ao longo da costa do NNEB e do Leste do

NEB (LNEB), sendo responsáveis por elevados índices pluviométricos nos meses de inverno nessas regiões (Rodrigues et al., 2019). Os SF e a ZCAS atuam sobre o setor sul do Nordeste do Brasil, principalmente nos meses de novembro a janeiro (Ferreira; Mello, 2005).

CONCLUSÕES

A análise do regime pluviométrico em Bebedouro (PE), abrangendo o período de 1975 a 2017, concluiu que a série histórica, embora não apresente tendência linear de longo prazo nos totais anuais, evidencia alterações interanuais críticas para a segurança hídrica e agrícola.

A precipitação média anual acumulada de 484,5 mm permaneceu estatisticamente estável; contudo, essa estabilidade mascara uma reconfiguração na distribuição sazonal das chuvas. O achado mais significativo deste estudo é a detecção de uma tendência de declínio estatisticamente robusta ($p < 0,05$) na precipitação de março, mês que historicamente representa o pico da estação chuvosa, com média de 108,18 mm, fundamental para o desenvolvimento das culturas de sequeiro.

Além disso, os resultados indicam que a dinâmica pluviométrica local é caracterizada mais por mudanças abruptas do que por alterações graduais. A aplicação do Teste de Pettitt revelou a ocorrência de rupturas significativas na série histórica, responsáveis por reduções de 34,08% a 74,09% na precipitação da estação chuvosa. Esse padrão, aliado à alta variabilidade demonstrada pelos elevados coeficientes de variação (superiores a 80% em todos os meses da estação chuvosa), evidencia um quadro de instabilidade crescente.

A resiliência da região, portanto, não está ameaçada por uma redução anual previsível, mas pela intensificação da irregularidade e pela concentração de anomalias em períodos cruciais para a agricultura e o armazenamento de água.

A interpretação conjunta desses achados sugere que as estratégias de convivência com o semiárido, baseadas unicamente em médias climatológicas, tornam-se progressivamente ineficazes. A tendência de queda no mês de março, por exemplo, amplia a incerteza no manejo de reservatórios e compromete o calendário agrícola, que depende da regularidade das chuvas nesse período.

A prevalência de rupturas, em detrimento de tendências lineares, reforça que a gestão dos recursos hídricos deve ser mais dinâmica, capaz de responder a eventos imprevistos que alteram significativamente a disponibilidade de água em curtos intervalos de tempo.

Portanto, este trabalho não apenas caracteriza a climatologia de Bebedouro, mas também oferece um alerta fundamentado em dados: a necessidade de incorporar a alta variabilidade e a ocorrência de eventos de ruptura no planejamento regional.

Recomenda-se que futuras pesquisas investiguem os mecanismos sinóticos e as teleconexões possivelmente associadas aos anos de mudança identificados. Para gestores públicos e tomadores de decisão, os resultados indicam a urgência de políticas hídricas que valorizem a flexibilidade e a gestão adaptativa — como o uso de cultivares de ciclo curto e o aprimoramento dos sistemas de previsão —, pilares essenciais à sustentabilidade socioeconômica do semiárido pernambucano.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos de Pós-Doutorado (PNPD), junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Acre (UFAC), (Processo 086/2013 do Edital CAPES nº 16/2022 - PPGCA/UFAC). O segundo autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de Pós-Doutorado Júnior (PDJ) (processo 165450/2020-7).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, A. C. B. *et al.* Regionalização e análise da tendência da precipitação do Rio Grande do Norte associados a padrões de TSM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 269-280, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786352024>
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Análises estatísticas da precipitação e temperatura do ar em ambientes semiáridos. **Entre-Lugar**, v. 12, n. 24, p. 170-191, 2021. <https://doi.org/10.30612/rel.v12i24.15139>
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)
- CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 10, p. 2614-2626, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2614:ACFAWR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2614:ACFAWR>2.0.CO;2)
- CHAVES, R. R. Variabilidade da precipitação na região Sul do Nordeste e sua associação com padrões atmosféricos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, p. 220-220, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200023>
- COUTINHO, M. L. *et al.* Vórtices ciclônicos de altos níveis sobre o Nordeste do Brasil: climatologia e impactos pluviométricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 115-126, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000300003>
- FEDOROVA, N. N. *et al.* Mesoscale convective complexes on the northeastern coast of Brazil. **Journals of Georgian Geophysical Society**, v. 13, p. 36-49, 2009. Disponível em: <https://ggs.openjournals.ge/index.php/GGS/article/view/654>
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>
- FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, n. 2, p. 101-101, 1998. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>
- GOMES, H. B. *et al.* Easterly wave disturbances over Northeast Brazil: An observational analysis. **Advances in Meteorology**, v. 2015, n. 1, p. 176238, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/176238>
- HAMEED, K. H. Exact distribution of the Mann–Kendall trend test statistic for persistent data. **Journal of Hydrology**, v. 365, n. 1-2, p. 86-94, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.024>
- HAMEED, M. *et al.* Impacts of autocorrelation on trend detection in hydrological time series. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 10, p. 1–17, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3041-5>
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977. <https://doi.org/10.1002/qj.49710343505>
- HOLENDER, B. V.; SANTOS, E. B. Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 584-606, 2023. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16411>
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin and Co. Ltd., 1948.

KENDALL, M. G. **The Advanced Theory of Statistics**. 3. ed. London: Charles Griffin & Company, 1975.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538-551, 1981. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v33i6.10775>

LI, G. *et al.* Reconstruction of sunspot activity, cold and warm events, and drought and flood events in the central plain of China during the northern Song Dynasty using historical documents. **Quaternary International**, v. 525, p. 36-44, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.09.003>

LIMA, J. E. F. W. **Recursos hídricos no Brasil e no mundo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. (Documentos / Embrapa Cerrados, n. 33). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/555374>. Acesso em: 17 set. 2025.

LUIZ SILVA, W. *et al.* Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, p. 353-371, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2600-8>

LYRA, G. B. *et al.* Estimation of monthly global solar irradiation using the Hargreaves–Samani model and an artificial neural network for the state of Alagoas in northeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, p. 743-756, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1541-8>

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 83-96, 2008b. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>

MARENGO, J. A. *et al.* Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008a.

MARENGO, J. A. *et al.* Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, v. 103, p. 2589-2611, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, mar. 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, n. 1, p. 5-28, 2007. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/marengo_valverde_carcterizacao_2007.pdf. Acesso em: 17 set. 2025.

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; SOUZA, P. P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 2, p. 25-41.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

MOURA, M. S. B. *et al.* **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/159649/1/OPB1515.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

NÓBREGA, J. N. da *et al.* Eventos extremos de precipitação nas mesorregiões da Paraíba e suas relações com a TSM dos oceanos tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 197-208, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200005>

PENEREIRO, J. C.; MARTINS, L. L. S.; BERETTA, V. Z. Identificação de variabilidades e tendências interanuais em medidas hidro-climáticas na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 214-231, 2016. <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.38840>

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. <https://doi.org/10.2307/2346729>

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

REDDY, S. J.; AMORIM NETO, M. S. **Dados de precipitação, evapotranspiração potencial, radiação solar global de alguns locais e classificação climática do Nordeste do Brasil**. Petrolina, PE: EMBRAPA/CPATSA, 1983.

RODRIGUES, D. T. *et al.* Spatial and temporal assessment of the extreme and daily precipitation of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite in Northeast Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 549-572, 2019. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1643940>

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 64-73, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>

SILVA, V. P. R. da; PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 163-172, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200005>

SILVA JUNIOR, M. A. B.; FONSECA NETO, G. C.; CABRAL, J. J. S. P. Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 37, n. 1, p. 250-267, 2020. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.239373>

SOUZA, P.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric centres of action associated with the Atlantic ITCZ position. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 14, p. 2091-2105, 2009. <https://doi.org/10.1002/joc.1823>

TORRES, R. R.; FERREIRA, N. J. Case studies of easterly wave disturbances over Northeast Brazil using the Eta Model. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 2, p. 225-235, 2011. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222425.1>

ULIANA, E. M. *et al.* Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, p. 82-88, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1427>

UVO, C. R. B.; NOBRE, C. A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: a posição da ZCIT no Atlântico equatorial. **Climanálise**, v. 4, n. 7, p. 34-40, 1989. Disponível em: <http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.27.09.06/doc/6033.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

VOLTA, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 36, p. 717-726, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000500001>

WANG, S. *et al.* Contributions of ENSO and other climate modes to global precipitation variability. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 7, n. 1, p. 36, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00853-5>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. Geneva: WMO, 2017. Disponível em: <https://library.wmo.int>. Acesso em: 17 set. 2025.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V. B. Tropical cloudiness over the south Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Ser. II, v. 55, n. 2, p. 205-207, 1977. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.2_205

YU, B. *et al.* The global impacts of ENSO on seasonal precipitation and their temporal changes. **Climate Dynamics**, v. 60, p. 1583–1600, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06336-2>

YUE, S.; WANG, C. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. **Water Resources Management**, v. 18, p. 201-218, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>

ZHOU, J.; LAU, K. M. Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 13, p. 1623-1644, 2001. <https://doi.org/10.1002/joc.700>

Recebido em: 03/02/2025

Aceito para publicação em: 13/10/2025