

MÉDIAS CLIMÁTICAS DE LONGO PRAZO DO ESTADO DO TOCANTINS: ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL (1970–2025)

Diony Alves Reis¹

RESUMO

O presente estudo estabelece médias climáticas de longo prazo (com séries de 34 a 57 anos, sendo cinco estações com registro ≥ 40 anos) para o estado do Tocantins, utilizando dados mensais de seis estações meteorológicas convencionais da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com séries históricas que se estendem de 1970 a 2025. As variáveis analisadas compreendem precipitação pluviométrica, temperaturas máxima, mínima e média compensada, umidade relativa do ar e insolação. A análise de tendência temporal foi realizada pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall (Yue & Wang, 2004), com correção para autocorrelação serial pelo método de Yue e Wang (2004) implementado por meio da função *yue_wang_modification_test* do pacote *pymannkendall* (Hussain & Mahmud, 2019) em Python, com estimativa da magnitude das tendências pelo método de Sen (Sen, 1968). Os resultados demonstram que todas as estações com séries de longa duração apresentam tendências de aquecimento estatisticamente significativas ($p < 0,001$) nas temperaturas máxima e mínima anuais, com inclinações de Sen variando de $+0,024$ a $+0,067$ $^{\circ}\text{C ano}^{-1}$, acumulando um aquecimento de $1,3$ a $3,8$ $^{\circ}\text{C}$ ao longo das últimas cinco décadas. Nenhuma estação apresentou tendência significativa na precipitação anual total, com exceção de Peixe (83228), que exhibe declínio pluviométrico estatisticamente significativo (Sen = $-9,9$ mm ano^{-1} ; $p = 0,009$). O regime climático regional segue padrão tropical sazonal (Köppen Aw). As médias climáticas aqui estabelecidas fornecem base estatisticamente robusta para o planejamento agroclimático, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático e a calibração de modelos hidrológicos na região do Matopiba.

Palavras-chave: Mann-Kendall; Yue-Wang; aquecimento regional; risco agroclimático; Cerrado.

LONG-TERM CLIMATE AVERAGES FOR THE STATE OF TOCANTINS: SPATIOTEMPORAL ANALYSIS (1970–2025)

ABSTRACT

This study establishes long-term climate averages (series of 34 to 57 years, five stations with ≥ 40 years) for the state of Tocantins, Brazil, using monthly data from six conventional meteorological stations of the INMET network with historical records spanning from 1970 to 2025. The variables analyzed include rainfall, maximum, minimum and mean temperatures, relative humidity, and sunshine hours. Temporal trend analysis was performed using the non-parametric Mann-Kendall test (Yue & Wang, 2004), with serial autocorrelation correction using the *yue_wang_modification_test()* function from the *pymannkendall* package (Hussain & Mahmud, 2019), with trend magnitude estimated by Sen's slope (Sen, 1968). Results demonstrate that all stations with long-duration series exhibit statistically significant warming trends ($p < 0.001$) in annual maximum and minimum temperatures, with Sen's slopes ranging from $+0.024$ to $+0.067$ $^{\circ}\text{C year}^{-1}$. No significant trend was detected in annual total precipitation, except at Peixe (83228): declining trend (Sen = -9.9 mm year^{-1} ; $p = 0.009$). The established long-term climate averages provide a statistically robust foundation for agroclimate planning, Agricultural Climate Risk Zoning, and hydrological model calibration in the Matopiba region.

Keywords: Mann-Kendall; Yue-Wang; regional warming; agroclimate risk; Cerrado.

¹Professor Doutor do Curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Estadual do Tocantins (Unitins) e no Centro Universitário Católica do Tocantins (UniCatólica), Palmas – TO; dionyodin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4270-2978>

INTRODUÇÃO

As médias climáticas de longo prazo constituem a espinha dorsal do planejamento agrícola, hídrico e ambiental. A Organização Meteorológica Mundial recomenda que as médias climáticas sejam obtidas a partir de séries de pelo menos 30 anos consecutivos, e idealmente 40 ou mais (OMM, 2018). A utilização de séries mais longas é particularmente crítica no contexto atual de mudanças climáticas, em que médias calculadas sobre décadas recentes podem já refletir um clima sistematicamente diferente do padrão histórico.

O estado do Tocantins integra a região do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), uma das últimas fronteiras agrícolas globais (Brasil, 2021). O clima regional é classificado como tropical de savana (Köppen Aw), com a disponibilidade hídrica constituindo o principal fator limitante à produtividade agrícola (Dubreuil et al., 2019). O aquecimento regional verificado em outras partes do Cerrado (Campos & Chaves, 2020) e especificamente no Tocantins (Silva et al., 2020), bem como o aumento comprovado da pressão climática no Matopiba (Marengo et al., 2022; dos Reis et al., 2020) e as projeções regionalizadas para o Tocantins (Rattis et al., 2021), impõem a necessidade de atualização periódica das médias climáticas e de quantificação rigorosa das tendências e dos riscos agroclimáticos associados.

O presente artigo objetiva: (i) estabelecer médias climáticas de longo prazo para seis municípios do Tocantins; (ii) caracterizar os gradientes espaciais de temperatura e precipitação; (iii) detectar e quantificar tendências temporais pelo método de Mann-Kendall; e (iv) discutir os riscos agroclimáticos derivados das mudanças observadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estado do Tocantins está situado na região Centro-Norte do Brasil, entre os paralelos 5°10' e 13°28' de latitude sul e os meridianos 45°44' e 51°31' de longitude oeste, com área de aproximadamente 277.720 km². As estações meteorológicas convencionais estão distribuídas ao longo de um transecto de ~560 km no sentido norte-sul, cobrindo Araguaína, Pedro Afonso, Palmas, Porto Nacional, Peixe e Taguatinga. A Tabela 1 apresenta as características de cada estação.

Dados meteorológicos e controle de qualidade

Foram utilizadas séries históricas mensais obtidas do portal BDMEPweb (INMET, 2026). As variáveis coletadas incluem: precipitação total mensal, temperatura máxima e mínima médias, temperatura média compensada, umidade relativa do ar e insolação total. A série bruta foi submetida a controle de qualidade por testes de limites físicos e consistência termodinâmica ($T_{min} \leq T_{med} \leq T_{max}$). Falhas de até três meses consecutivos foram tratadas segundo Sabino e Souza (2023).

Os dados foram obtidos junto ao INMET-BDMEPweb em junho de 2026, sendo que os registros de 2026 correspondem apenas aos meses de janeiro a junho (ano incompleto). Para o cálculo das médias climáticas mensais, todos os registros mensais disponíveis foram utilizados. Para as análises de tendências temporais anuais, o ano de 2026 foi excluído por não atender ao critério mínimo de meses válidos por ano estabelecido neste estudo (seis meses para temperatura e oito meses para precipitação), de modo que as séries anuais de tendência se encerram efetivamente em 2025.

Terminologia e critério de completude

Este estudo apresenta médias climáticas de longo prazo calculadas sobre os períodos disponíveis de cada estação (34 a 57 anos, sendo cinco estações com ≥ 40 anos e uma – Palmas (83033) – com 34 anos, incluída como série complementar dada sua relevância como capital do estado). Tecnicamente, as "normais climatológicas" em sentido estrito da OMM são médias sobre janelas padrão de 30 anos (1991-2020). As médias aqui apresentadas excedem esse padrão e são designadas "médias climáticas de longo prazo" (OMM, 2018).

Para o estabelecimento das médias mensais, adotou-se o critério de que ao menos 70% dos anos da série deveriam possuir dado válido para o respectivo mês calendário (OMM, 2018). As médias mensais foram calculadas como a média aritmética dos valores válidos de cada variável para cada mês calendário (OMM, 2018). Para a precipitação, as médias representam a média das somas mensais (mm mês⁻¹). A precipitação anual foi calculada como a soma das médias mensais.

Ferramentas de análise

Os dados foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel). Todas as análises estatísticas foram realizadas em Python 3.11;

o teste de Mann-Kendall modificado por Yue-Wang e o estimador de Sen foram calculados com o pacote `pymannkendall` (Hussain & Mahmud, 2019). Os mapas foram elaborados com `shapefile` oficial do IBGE.

Análise de tendências, autocorrelação e homogeneidade

As tendências temporais nas séries anuais foram avaliadas pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall (Yue & Wang, 2004), com nível de significância $\alpha = 0,05$. A magnitude da mudança foi quantificada pelo estimador de inclinação de Sen (Sen, 1968). A série anual de temperatura foi construída como a média das médias mensais válidas de cada ano, exigindo-se ao menos 6 meses com dado válido; a série de precipitação anual foi a soma dos valores mensais válidos, exigindo-se ao menos 8 meses válidos por ano.

Autocorrelação serial: antes da aplicação do teste de Mann-Kendall, verificou-se a autocorrelação de ordem 1 (ACF lag-1) de cada série anual. Séries com autocorrelação significativa (critério: $|r_1| > \frac{2}{\sqrt{n}}$, onde n é o número de observações anuais, correspondendo ao nível de 5%) tiveram o teste corrigido pelo método de Yue e Wang (2004), implementado por meio da função `yue_wang_modification_test()` do pacote `pymannkendall` versão 1.4.3 (Hussain & Mahmud, 2019). O algoritmo de Yue e Wang (2004) estima o tamanho amostral efetivo $n^* = n \frac{(1-r_1)}{(1+r_1)}$, onde r_1 é o coeficiente de autocorrelação lag-1, e reescala a variância do estimador S do Mann-Kendall pelo fator n/n^* . A estatística τ e a inclinação de Sen são calculadas sobre os valores observados, mas a significância estatística é avaliada com base no tamanho amostral corrigido, evitando o aumento espúrio da significância estatística. Para as séries de temperatura, verificou-se autocorrelação lag-1 significativa em todas as estações ($r_1 = 0,50-0,78$), de modo que o teste de Yue-Wang foi aplicado sistematicamente. Para as séries de precipitação, a autocorrelação lag-1 não foi significativa em nenhuma estação ($r_1 = -0,18$ a $+0,22$), razão pela qual foi utilizado o teste de Mann-Kendall original.

Critério de completude das séries anuais: para temperatura, foram incluídos na série anual todos os

anos com ao menos 6 meses válidos dentre as médias mensais disponíveis. Para precipitação, foram incluídos anos com ao menos 8 meses válidos. A completude anual variou entre as estações: Porto Nacional e Taguatinga atingiram >90% de anos com dados completos em ambas as variáveis; Pedro Afonso apresentou lacunas em temperatura nos primeiros anos da série (1977-1982), sem comprometimento do critério de 70% de meses válidos para as médias mensais. A estação de Peixe apresentou variação na quantidade de meses válidos de precipitação ao longo da série, fato que é discutido na seção sobre tendências de precipitação.

Tendências sazonais: para as análises sazonais (DJF, MAM, JJA, SON), foi aplicado o teste de Mann-Kendall original (sem correção de autocorrelação), dado que as séries sazonais possuem menor número de observações (máximo de ~34 anos para a estação mais longa), o que reduz o impacto da dependência serial. O critério de completude foi de ao menos 2 meses válidos por estação do ano em cada ano calendário.

Homogeneidade das séries: aplicaram-se dois testes de homogeneidade, Pettitt (Pettitt, 1979) e *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) de Alexandersson (Alexandersson, 1986). O teste de Pettitt detecta o ano de ruptura na mediana; o SNHT identifica mudanças na média normalizada. Ambos os testes são sensíveis a ausência de homogeneidades instrumentais, mas também reagem a tendências monotônicas fortes (OMM, 2018; Alexandersson, 1986): uma série com tendência linear ascendente produz uma ruptura aparente próxima ao ponto médio temporal, mesmo sem qualquer mudança instrumental. Por isso, os resultados são interpretados em conjunto com a análise de Mann-Kendall.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Rede observacional e disponibilidade de dados

Das oito estações identificadas, seis forneceram séries com dados utilizáveis. Porto Nacional (83064) e Taguatinga (83235): 57 anos (1970–2026). Pedro Afonso (82863): 50 anos, Peixe (83228): 52 anos, Araguaína (82659): 43 anos, e Palmas (83033): 34 anos. Gurupi (83160): todos os valores nulos no banco do INMET; Paranã (83231): desativada em 1994 (Figura 1).

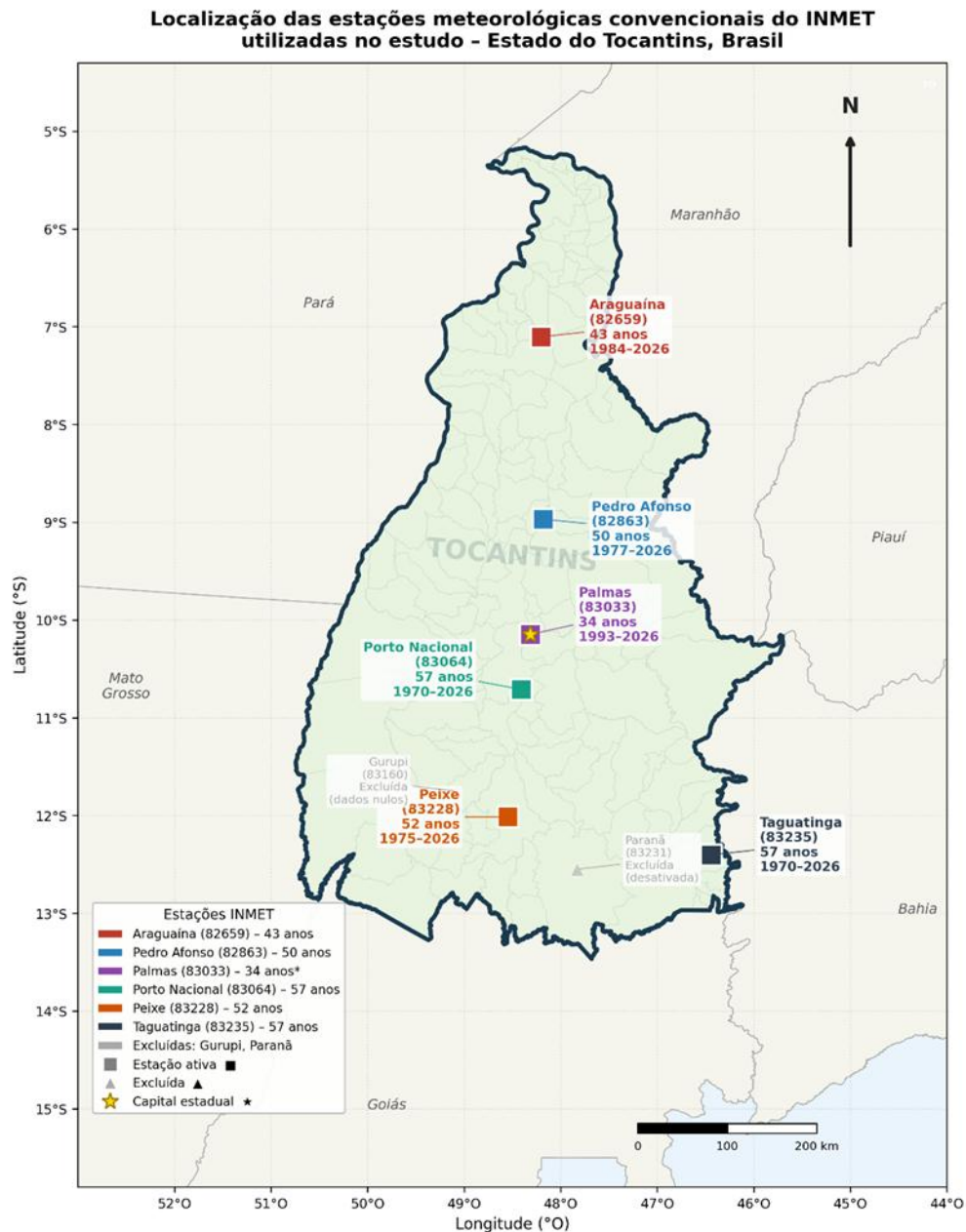


Figura 1. Localização das estações meteorológicas convencionais do INMET no estado do Tocantins utilizadas no estudo. Quadrados coloridos = estações com dados utilizáveis; triângulos cinzas = excluídas; estrela amarela = capital estadual. Linha tracejada indica o transecto norte-sul de análise.

Regime pluviométrico e sazonalidade

O regime pluviométrico segue o padrão tropical sazonal, com estação chuvosa de outubro a abril e seca de maio a setembro. A precipitação anual varia entre 1.468 mm (Peixe) e 1.800 mm (Araguaína), com concentração de 83-86% do volume entre outubro e abril (Figuras 2 e 3).

Regime térmico, amplitude e insolação

A temperatura máxima anual é mais elevada em Palmas (34,5°C) e Pedro Afonso (33,8°C). Taguatinga registra as máximas mais amenas

(32,3°C), em razão de sua maior altitude (604 m) (Tabelas 3, 4 e 7; Figura 4).

As máximas de Tmax média são registradas entre agosto e setembro (Palmas: 37,4°C; Porto Nacional: 36,6°C) (Tabelas 4 e 5). A umidade relativa do ar (Figura 6) atinge mínimos em agosto: Palmas 43,3%, Porto Nacional 46,8%, Peixe 49,7%, próximos ou abaixo do limiar de 40% estabelecido como condição de alerta para pulverizações agrícolas. A insolação total mensal varia entre 280 e 302 h nos meses mais secos (Figura 5).

Climogramas - Estações convencionais do Tocantins

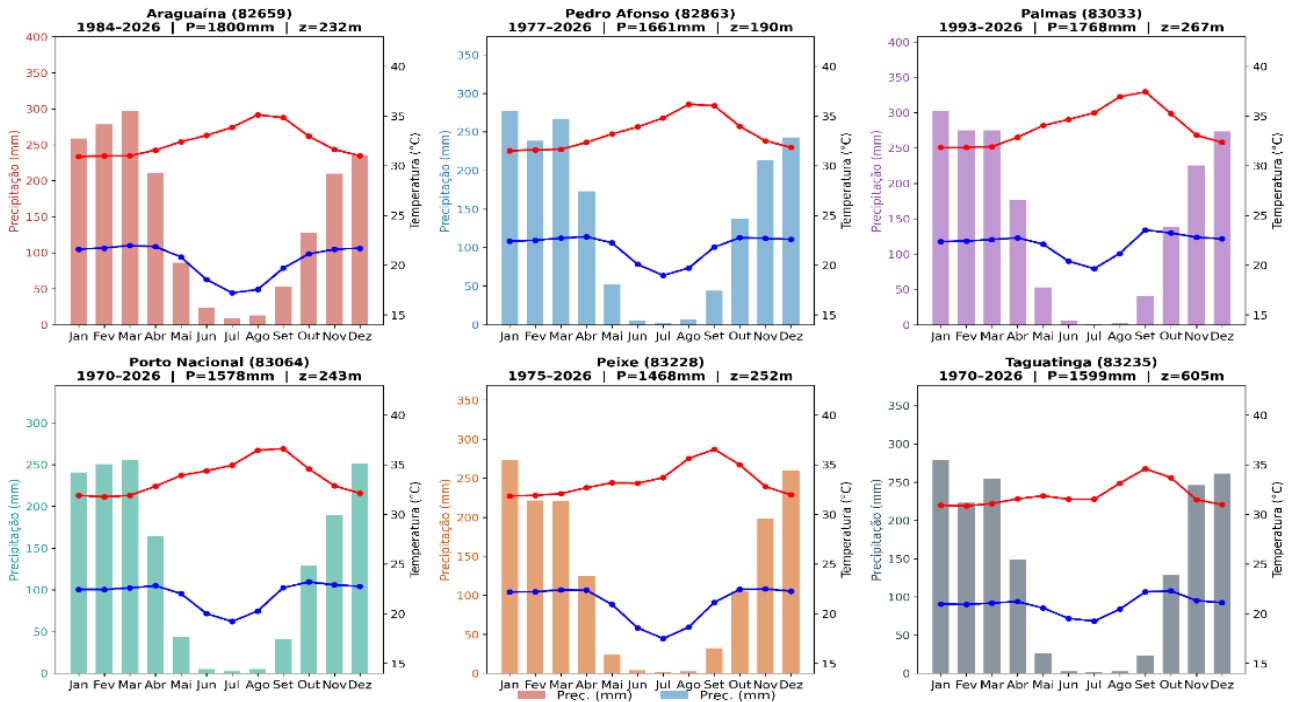


Figura 2. Climogramas das estações meteorológicas convencionais do Tocantins: precipitação mensal (barras) e Tmax e Tmin médias (linhas).

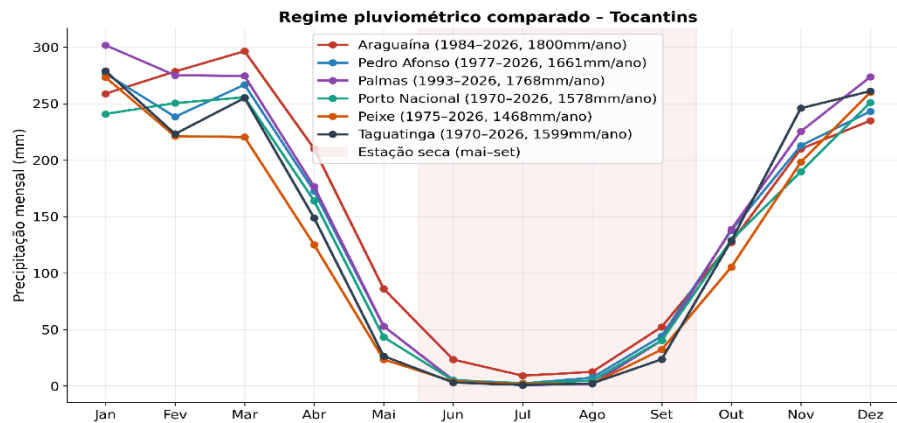


Figura 3. Regime pluviométrico comparado. A faixa sombreada indica a estação seca (maio–setembro).

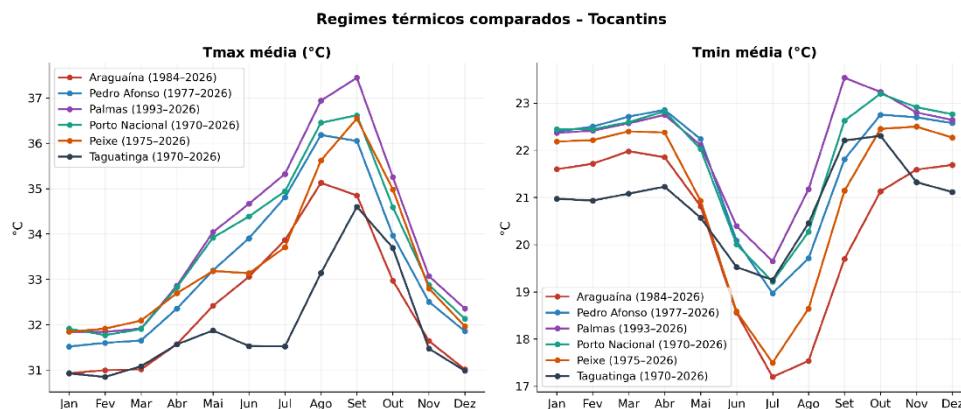


Figura 4. Médias mensais de Tmax (esquerda) e Tmin (direita) para as estações do Tocantins.

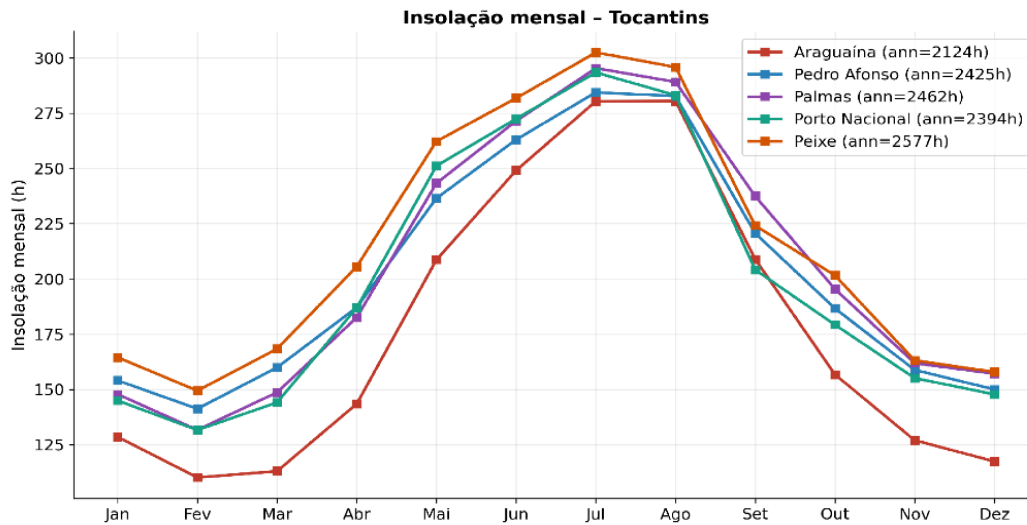


Figura 5. Médias mensais de insolação total para estações com dados suficientes.

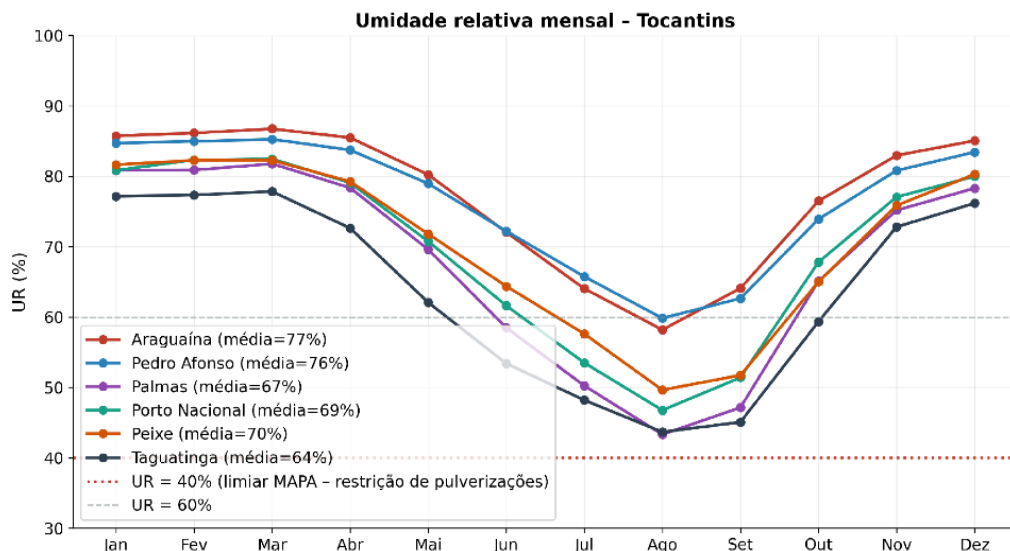


Figura 6. Médias mensais de umidade relativa do ar. Linha pontilhada = 40% (limiar de alerta para pulverizações fitossanitárias, referência MAPA).

Médias climáticas mensais por estação

As Tabelas 2 a 7 apresentam as médias mensais de Tmax, Tmin, Tmed, umidade relativa e precipitação.

Tendências temporais (Mann-Kendall – Yue-Wang – Estimador de Sen)

Os resultados são consistentes: todas as cinco estações com séries longas apresentam aquecimento altamente significativo ($p < 0,001$) em Tmax e Tmin (Tabela 8; Figura 7), conforme Yue-Wang para

autocorrelação serial ($\rho_1 = 0,57-0,82$). As taxas de Sen variam de $+0,037\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ (Araguaína) a $+0,067\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ (Palmas) para Tmax, e de $+0,024\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ (Peixe) a $+0,064\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ (Palmas) para Tmin.

Em contraste, a precipitação anual não exhibe tendência significativa na maioria das estações. A exceção é Peixe ($\tau = -0,307$; $p = 0,009$; Sen = $-9,9\text{ mm ano}^{-1}$), discutida detalhadamente na seção sobre testes de homogeneidade.

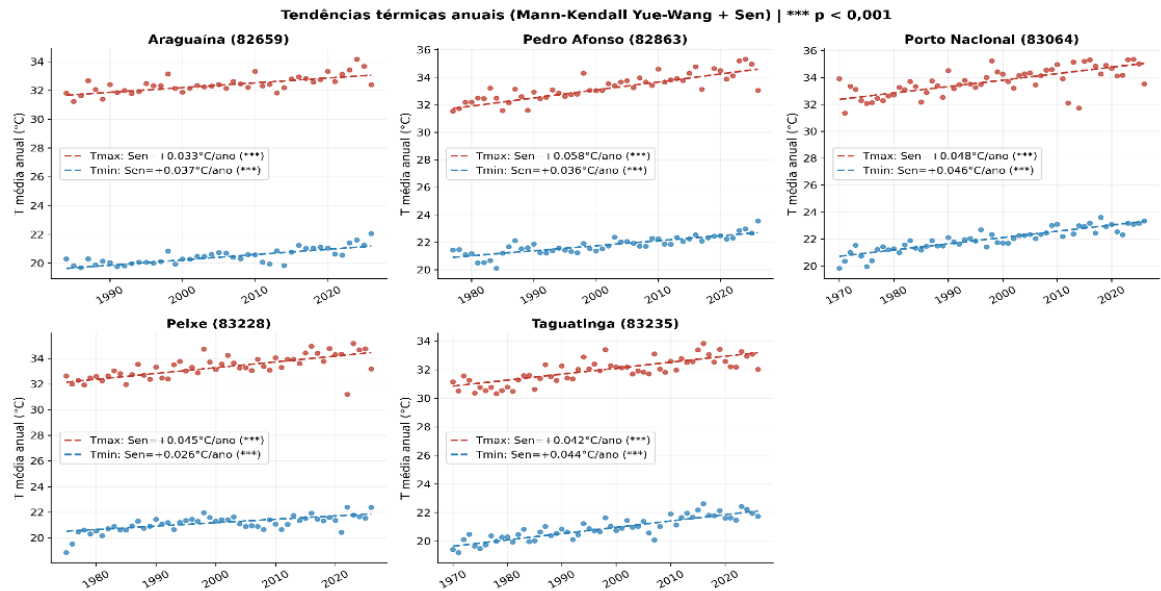


Figura 7. Séries temporais de Tmax e Tmin anuais com estimador de Sen (linha tracejada; Yue-Wang).
*** p < 0,001.

Tabela 2. Médias climáticas de Araguaína (1984–2025).

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	UR (%)	Prec. (mm)
Janeiro	30.9	21.6	25.2	85.7	259
Fevereiro	31.0	21.7	25.2	86.1	279
Março	31.0	22.0	25.4	86.7	297
Abril	31.6	21.9	25.6	85.5	210
Maio	32.4	20.8	25.5	80.2	86
Junho	33.1	18.6	24.7	72.1	24
Julho	33.9	17.2	24.5	64.0	9
Agosto	35.1	17.5	25.5	58.2	13
Setembro	34.8	19.7	26.4	64.1	52
Outubro	33.0	21.1	26.1	76.5	127
Novembro	31.6	21.6	25.7	83.0	210
Dezembro	31.0	21.7	25.4	85.0	235
Anual	-	-	-	-	1801

Fonte: INMET (2026).

Tabela 3. Médias climáticas de Pedro Afonso (1977–2025).

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	UR (%)	Prec. (mm)
Janeiro	31.5	22.4	25.9	84.7	277
Fevereiro	31.6	22.5	26.0	85.0	239
Março	31.7	22.7	26.1	85.3	267
Abril	32.4	22.9	26.6	83.7	173
Maio	33.2	22.2	26.7	79.0	53
Junho	33.9	20.1	25.9	72.2	6
Julho	34.8	19.0	25.7	65.7	2
Agosto	36.2	19.7	26.9	59.8	8
Setembro	36.1	21.8	28.1	62.7	44
Outubro	34.0	22.8	27.4	73.9	138
Novembro	32.5	22.7	26.6	80.8	213
Dezembro	31.9	22.6	26.2	83.4	243
Anual	-	-	-	-	1663

Fonte: INMET (2026).

Tabela 4. Médias climáticas de Palmas (1993–2025).

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	UR (%)	Prec. (mm)
Janeiro	31.8	22.4	26.2	80.8	302
Fevereiro	31.8	22.4	26.2	80.9	275
Março	31.9	22.6	26.3	81.8	275
Abril	32.9	22.7	26.9	78.4	177
Maio	34.0	22.1	27.1	69.6	53
Junho	34.7	20.4	26.6	58.5	5
Julho	35.3	19.6	26.6	50.2	1
Agosto	36.9	21.2	28.3	43.3	2
Setembro	37.4	23.5	29.6	47.2	40
Outubro	35.3	23.2	28.3	65.1	139
Novembro	33.1	22.8	27.0	75.2	225
Dezembro	32.4	22.6	26.6	78.3	274
Anual	-	-	-	-	1768

Fonte: INMET (2026).

Tabela 5. Médias climáticas de Porto Nacional (1970–2025).

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	UR (%)	Prec. (mm)
Janeiro	31.9	22.4	26.1	80.8	241
Fevereiro	31.8	22.4	26.0	82.3	251
Março	31.9	22.6	26.2	82.5	256
Abril	32.8	22.8	26.8	79.1	164
Maio	33.9	22.0	27.1	70.8	43
Junho	34.4	20.0	26.3	61.6	5
Julho	34.9	19.2	26.3	53.5	3
Agosto	36.5	20.3	27.8	46.8	5
Setembro	36.6	22.6	28.9	51.4	41
Outubro	34.6	23.2	27.9	67.8	129
Novembro	32.9	22.9	26.9	77.1	190
Dezembro	32.1	22.8	26.4	80.0	251
Anual	-	-	-	-	1579

Fonte: INMET (2026).

Tabela 6 . Médias climáticas de Peixe (1975–2025).

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	UR (%)	Prec. (mm)
Janeiro	31.8	22.2	25.9	81.6	273
Fevereiro	31.9	22.2	25.9	82.3	221
Março	32.1	22.4	26.1	82.3	221
Abril	32.7	22.4	26.4	79.2	125
Maio	33.2	20.9	25.9	71.8	24
Junho	33.1	18.6	24.6	64.4	4
Julho	33.7	17.5	24.4	57.6	2
Agosto	35.6	18.6	26.1	49.7	2
Setembro	36.5	21.1	27.9	51.7	32
Outubro	35.0	22.5	27.7	65.0	105
Novembro	32.8	22.5	26.6	75.8	198
Dezembro	32.0	22.3	26.1	80.3	260
Anual	-	-	-	-	1467

Fonte: INMET (2026).

Tabela 7. Médias climáticas de Taguatinga (1970–2025).

Mês	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	UR (%)	Prec. (mm)
Janeiro	30.9	21.0	25.0	77.2	279
Fevereiro	30.8	20.9	24.9	77.3	223
Março	31.1	21.1	25.0	77.8	255
Abril	31.6	21.2	25.4	72.6	149
Maio	31.9	20.6	25.3	62.1	27
Junho	31.5	19.5	24.6	53.4	3
Julho	31.5	19.3	24.4	48.2	1
Agosto	33.1	20.5	25.9	43.7	2
Setembro	34.6	22.2	27.5	45.1	24
Outubro	33.7	22.3	27.1	59.4	129
Novembro	31.5	21.3	25.5	72.8	246
Dezembro	31.0	21.1	25.1	76.2	261
Anual	-	-	-	-	1599

Fonte: INMET (2026).

Tabela 8. Resultados do teste de Mann-Kendall (com correção Yue-Wang para temperatura) e estimador de Sen. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; n.s. = não significativo ($\alpha = 0,05$).

Estação	Período	Sen Tmax (°C/ano)	Sig.	Sen Tmin (°C/ano)	Sig.	Sen Prec. (mm/ano)	Sig.
Araguaína	1984–2025	+0,037	***	+0,037	***	-5,0	n.s.
Pedro Afonso	1977–2025	+0,062	***	+0,035	***	+3,2	n.s.
Palmas	1993–2025	+0,067	***	+0,064	***	-8,5	n.s.
Porto Nacional	1970–2025	+0,055	***	+0,047	***	-0,5	n.s.
Peixe	1975–2025	+0,049	***	+0,024	***	-9,9	**
Taguatinga	1970–2025	+0,043	***	+0,046	***	-2,1	n.s.

Fonte: Elaboração do autor. Yue; Wang (2004); Sen (1968). Palmas (34 anos) incluída a título de referência. Períodos encerrados em 2025 (ano incompleto de 2026 excluído).

Autocorrelação e robustez das tendências (Yue-Wang)

A verificação da autocorrelação lag-1 (ACF) revelou autocorrelação serial positiva altamente significativa em todas as séries anuais de temperatura ($\rho_1 = 0,57$ a $0,82$; critério: $|r_1| > \frac{2}{\sqrt{n}}$, ao nível de 5%).

Com a aplicação da correção de Yue e Wang (2004) por meio da função *yue_wang_modification_test()* do pacote *pymannkendall* (Hussain & Mahmud, 2019), todas as tendências de temperatura permanecem altamente significativas ($p < 0,001$). As séries de precipitação não apresentaram autocorrelação significativa ($\rho_1 = -0,18$ a $+0,27$), evidenciando o status de aquecimento sobre o Estado.

Testes de homogeneidade (Pettitt e SNHT)

Os testes de Pettitt (Pettitt, 1979) e SNHT (Alexandersson, 1986) foram aplicados às séries anuais de temperatura e precipitação. Para as séries de temperatura, ambos os testes detectaram pontos de ruptura estatisticamente significativos ($p < 0,001$) em

todas as estações. Contudo, essa detecção deve ser interpretada com cautela: testes de *shift detection* aplicados a séries com tendência monotônica forte detectam inevitavelmente uma ruptura aparente próxima ao ponto médio temporal, mesmo na ausência de qualquer mudança instrumental.

Nas séries deste estudo, os pontos de ruptura detectados para temperatura (Araguaína: 2001–2015; Pedro Afonso: 1997–2003; Palmas: 2002–2010; Porto Nacional: 1990–1997; Peixe: 1986–1997; Taguatinga: 1992–2012) são temporalmente distribuídos e não se concentram em um único ano, o que seria esperado se houvesse uma mudança instrumental sistemática na rede INMET. Esse padrão não permite atribuir o sinal observado exclusivamente a mudanças instrumentais; ao mesmo tempo, a ausência de metadados sobre manutenção, calibração e histórico operacional das estações impede excluir completamente a contribuição de possíveis ausências de homogeneidades não detectadas (Alexandersson, 1986).

Para as séries de precipitação, o Pettitt não detectou ruptura significativa em quatro das cinco estações com série longa (Porto Nacional: $p = 1,000$; Pedro Afonso: $p = 0,574$; Taguatinga: $p = 0,368$; Araguaína: $p = 0,715$). A exceção é Peixe (83228): ruptura em 2000 (Pettitt $p = 0,040$), coincidindo com redução da média anual de 1.521 mm (1975-2000) para 1.311 mm (2001-2025), diferença de 210 mm entre os sub-períodos (Figura 8 e 9).

Esse resultado demanda investigação adicional com estações vizinhas da microrregião

(ANA/INMET) para determinar se a ruptura é de origem instrumental ou reflete uma mudança real do regime pluviométrico local. Os fatores causais desta redução, potencial mudança instrumental, variabilidade climática de baixa frequência ou efeitos de uso e ocupação do solo sobre o ciclo hidrológico regional, constituem hipótese a ser investigada por análise com estações vizinhas da rede ANA/INMET, sem que se possa atribuir causalidade com os dados disponíveis neste estudo.

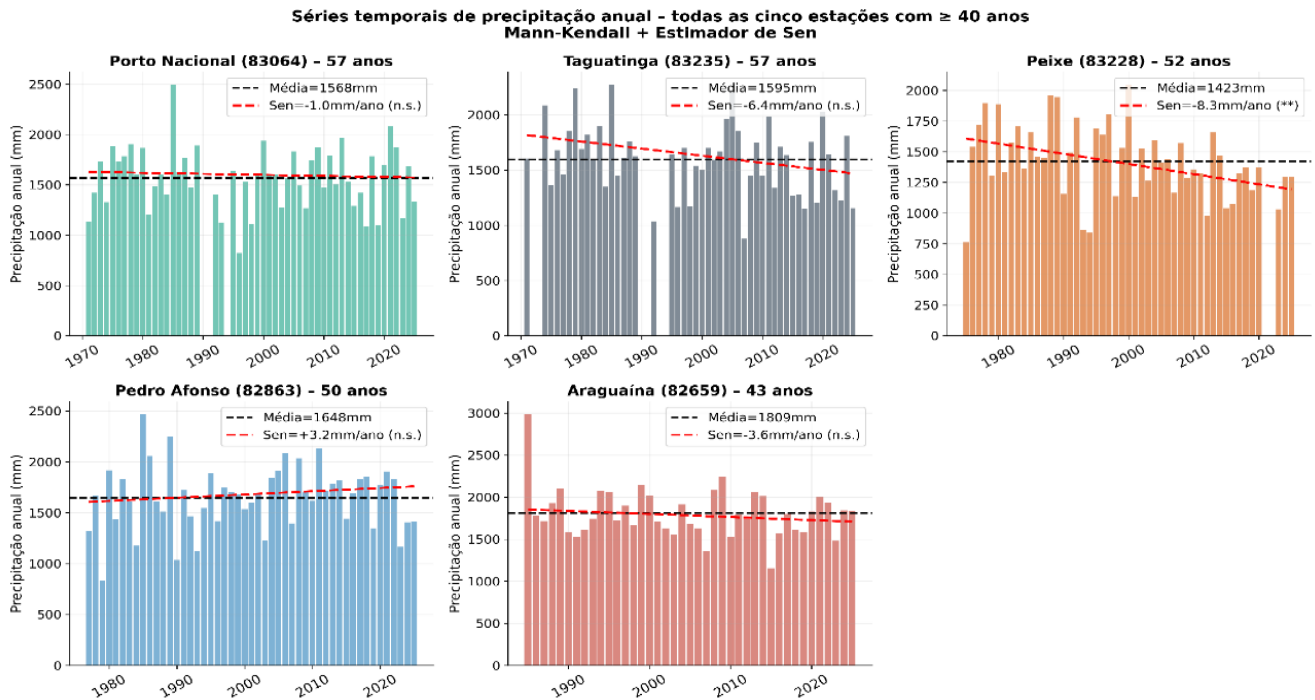


Figura 8. Séries temporais de precipitação anual para as cinco estações com ≥ 40 anos (Araguaína incluída). Linha tracejada preta = média histórica; vermelha = estimador de Sen.

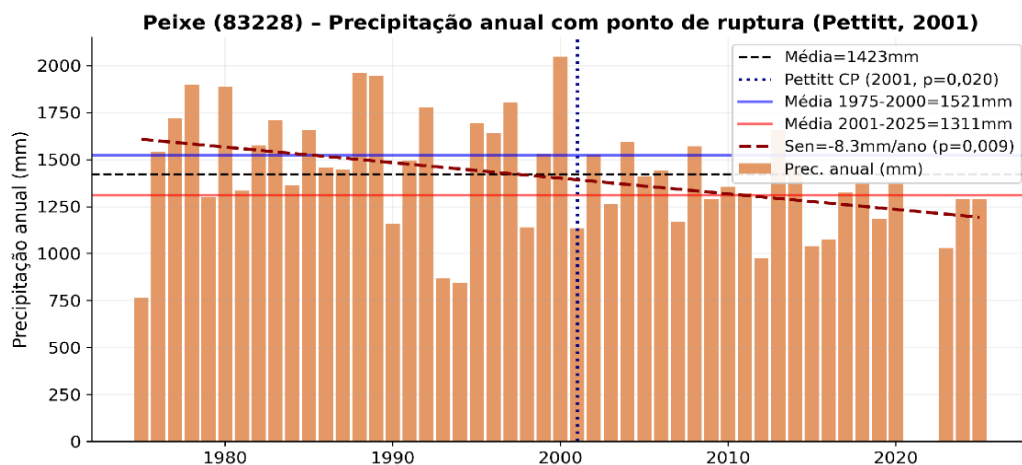


Figura 9. Série anual de precipitação em Peixe (83228) com ponto de ruptura do teste de Pettitt (2000; $p = 0,040$). Médias dos sub-períodos ilustram redução de ~210 mm/ano.

Tendências sazonais de temperatura (DJF, MAM, JJA, SON)

A análise sazonal das tendências revela aquecimento mais intenso no período SON (setembro-outubro-novembro) do que nas demais estações do ano em todas as localidades estudadas (Figura 10). Para Tmax, as taxas de Sen em SON superam 0,054 a 0,094 °C ano⁻¹, chegando a quase o dobro das taxas em DJF (0,025 a 0,064 °C ano⁻¹) nas

mesmas estações. Para as tendências sazonais, foi aplicado o teste de Mann-Kendall original (sem correção de autocorrelação) devido ao menor número de observações das séries sazonais (~34 observações para a série mais longa), com critério de completude de ao menos 2 meses válidos por estação do ano em cada ano calendário.

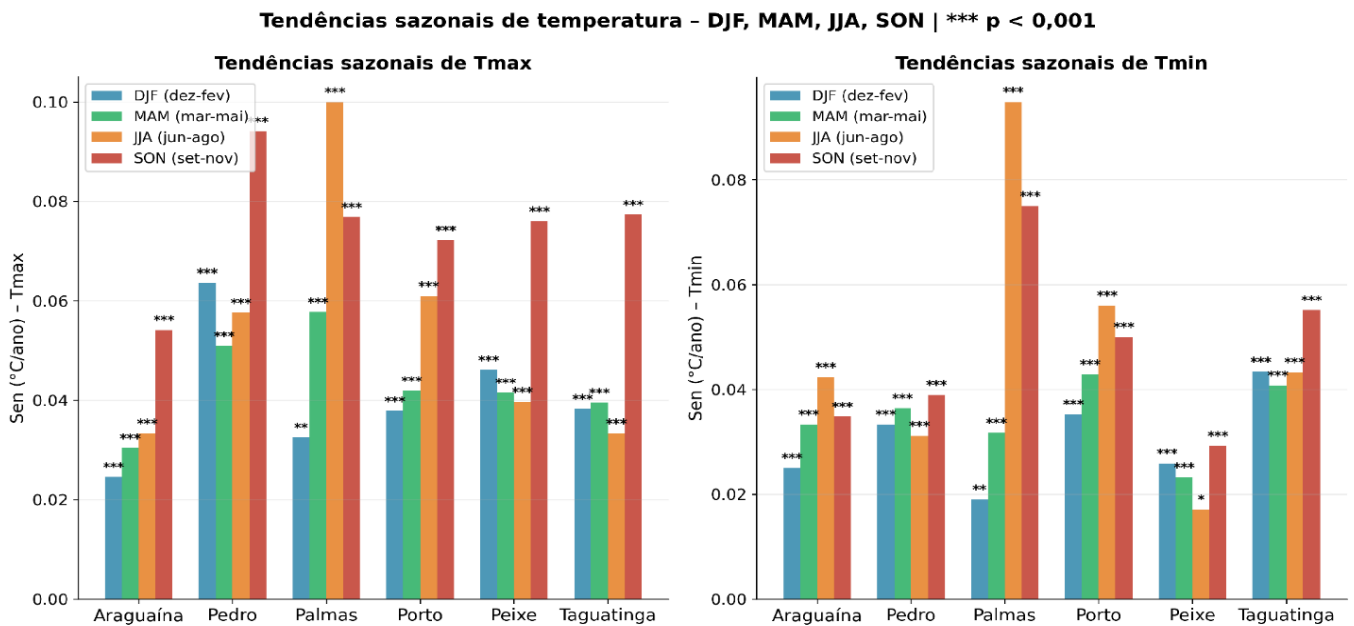


Figura 10. Tendências sazonais de Tmax (esquerda) e Tmin (direita) pelo estimador de Sen (°C ano⁻¹). DJF, MAM, JJA, SON. *** p < 0,001; ** p < 0,01; * p < 0,05.

Análise de sensibilidade: período 1993-2025

Para avaliar se as taxas de Palmas (34 anos) são atípicas, calcularam-se as tendências para o subperíodo 1993-2025 em todas as estações. Palmas (Tmax: +0,067 °C ano⁻¹) é comparável a Pedro Afonso (+0,070 °C ano⁻¹) e Porto Nacional (+0,050 °C ano⁻¹) no mesmo período, descartando a hipótese de que sua taxa seria artefato de sua série mais curta.

Tendências de umidade relativa e insolação

Todas as estações com dados suficientes exibem declínio significativo da UR média anual (p < 0,001), com inclinações de Sen de -0,110 % ano⁻¹ (Porto Nacional) a -0,250 % ano⁻¹ (Pedro Afonso) (Figura 11). Esse declínio é fisicamente coerente com o aquecimento documentado: a temperaturas mais elevadas, a pressão de saturação aumenta exponencialmente (equação de Clausius-Clapeyron) e, sem aumento equivalente do vapor de água absoluto, a UR cai sistematicamente.

Para a insolação total anual, quatro das cinco estações mostram tendência de aumento significativo (p < 0,001): Araguaína (+0,98 h ano⁻¹), Peixe (+0,59 h ano⁻¹), Taguatinga (+0,85 h ano⁻¹) e Pedro Afonso (+0,27 h ano⁻¹). A queda simultânea de UR e aumento de insolação, associados ao aquecimento de Tmax e Tmin, configuram um processo simultâneo de redução da umidade e aquecimento regional com implicações diretas para os riscos hídricos e agroclimáticos.

Efeito de ilha de calor urbana e mudanças de uso do solo

A capital do Tocantins cresceu de ~20.000 habitantes em 1993 para mais de 300.000 em 2025, com expansão intensa da malha urbana no entorno da estação meteorológica (83033), documentada em estudos de clima urbano local (Gomes et al., 2020). Estudos globais indicam que a ilha de calor urbana (ICU) pode contribuir com 0,1 a 0,5 °C por década para estações em áreas metropolitanas em expansão

(Manoli et al., 2019). Na ausência de uma estação rural de referência ou de análise específica de uso e cobertura da terra para o período da série, não é possível quantificar a contribuição da ICU; a urbanização deve ser reconhecida como possível fator contribuinte, sem estimativa de sua magnitude.

A análise de sensibilidade (período 1993-2025) mostrou que as taxas de aquecimento de Palmas são comparáveis às de Pedro Afonso (~30.000 hab. durante toda a série), sugerindo que parte substancial do aquecimento tem origem no forçamento climático regional ou global. Ainda assim, como limitação deste estudo, não é possível atribuir definitivamente as tendências a forçamento global vs. regional vs. local sem estações rurais de referência ou análise de reanálise.

Para Porto Nacional (83064), dois fatores contextuais devem ser considerados: (i) a formação do Lago de Porto Nacional pela UHE de Lajeado (2002), que criou corpo hídrico de ~630 km² na região, podendo influenciar a umidade relativa local, a temperatura noturna e o regime de nebulosidade; e (ii) a estação meteorológica localiza-se em área urbana no centro da cidade, o que pode ter introduzido viés positivo nas leituras de temperatura. A ausência de metadados do INMET sobre o histórico operacional da estação impede quantificar esses efeitos; recomenda-se cautela adicional na interpretação dos dados de Porto Nacional, especialmente no subperíodo pós-2002.

Além da urbanização, a conversão de vegetação nativa do Cerrado para pastagens e lavouras nas microrregiões das estações estudadas pode ter amplificado o aquecimento superficial local via alteração do balanço de energia (aumento do fluxo de calor sensível e redução do latente) (Nobre et al., 2016). Esse mecanismo constitui hipótese plausível, cuja quantificação exige modelagem regional específica.

Classificação climática de Köppen-Geiger

A verificação empírica confirma o tipo Aw (tropical de savana) para todas as estações: a temperatura média do mês mais frio excede 18 °C em todas (mínimo: julho em Taguatinga = 24,4 °C); o mês mais seco recebe precipitação inferior ao limiar $P_{ws} = 100 - \text{Panual}/25$; e o mês mais seco ocorre no inverno austral. Taguatinga permanece dentro do tipo Aw conforme a classificação de Dubreuil et al. (2019).

RISCOS AGROCLIMÁTICOS ASSOCIADOS ÀS MUDANÇAS OBSERVADAS

A combinação das médias climáticas de longo prazo estabelecidas com as tendências de aquecimento significativas configura um quadro de riscos agroclimáticos crescentes. A análise a seguir organiza esses riscos em cinco dimensões, diferenciando os resultados diretamente sustentados pelos dados meteorológicos analisados das inferências baseadas em literatura e estimativas teóricas.

Alteração das janelas de plantio e risco fenológico

As janelas normais de precipitação mostram precipitação efetiva de outubro a abril (~180 dias), resultando em uma janela de plantio definida. Com base no aquecimento documentado, estima-se, segundo modelos agrometeorológicos de desenvolvimento de culturas, que o ciclo de cultivares de soja de grupo de maturação 7.0 a 8.0 pode ser encurtado em 8 a 12 dias para cada 2 °C de aumento em T_{max}, segundo modelos de sensibilidade fenológica ao calor, antecipando o florescimento para períodos de maior déficit hídrico. Para o milho safrinha semeado em fevereiro, as médias de precipitação confirmam queda abrupta de 125–173 mm (abril) para 23–86 mm (maio), criando janela de risco estreita no início da estação seca.

A implicação operacional é que as médias climáticas de longo prazo aqui estabelecidas constituem insumo para revisão das séries históricas do ZARC (Brasil, 2021); contudo, o ZARC usa séries diárias de precipitação, seis classes de solo – com base na água disponível (AD) e parâmetros fenológicos (K_c, E_{Tr}/E_{Tm}), não normais de temperatura ou balanço hídrico climatológico para cada município do Tocantins, incorporando as médias de temperatura aqui estabelecidas e os índices de Sen como estimativas de tendência prospectiva.

Intensificação do déficit hídrico e pressão sobre sistemas de irrigação

As médias de precipitação estabelecidas representam o balanço médio histórico. O aquecimento documentado modifica o balanço hídrico de três formas: (a) a demanda evapotranspirativa estimada de Porto Nacional e Pedro Afonso deve ter aumentado em proporção ao aquecimento documentado, mesmo sem redução significativa na precipitação; (b) o período de 5 a 6 meses com precipitação abaixo de 50 mm mês⁻¹ e

demanda evapotranspirativa estimada de 8–9 mm dia⁻¹ cria uma janela crítica de déficit hídrico; (c) sistemas de pivôs e gotejamento dimensionados nas décadas de 1990-2000 podem ter capacidade insuficiente considerando o aquecimento verificado, segundo a sensibilidade da ETo à temperatura; porém, a confirmação desse subdimensionamento requer análise específica de cada sistema com os dados climáticos atuais.

Estresse térmico em culturas e pecuária

As médias de temperatura máxima de agosto e setembro (35,6–37,4 °C no centro e sul do estado) ultrapassam os limiares de estresse térmico agudo para as principais culturas (Zhao et al., 2017). O Índice de Temperatura e Umidade (ITU), calculado pela fórmula: $ITU = Tbs - [(0,31 - 0,31 \times UR/100) \times (Tbs - 14,4)]$, para agosto em Palmas (Tmax = 36,9 °C, UR = 43,3%) situa-se em $ITU \approx 88$, limiar de estresse severo para bovinos zebuínos em lactação (Volpi et al., 2021). Importa ressaltar que Tmax e UR utilizados são médias mensais, não representando necessariamente condições simultâneas de pico; o ITU máximo diário em agosto poderá ser substancialmente superior ao ITU calculado com médias mensais. O valor calculado constitui uma estimativa conservadora do estresse térmico potencial médio do mês, adequada para caracterização geral do risco, mas não do evento extremo diário.

Riscos fitossanitários e tecnologia de aplicação

A combinação de umidade relativa abaixo de 40% com temperaturas máximas acima de 35 °C cria condições ótimas para ácaros fitófagos como *Tetranychus urticae*, principal praga da soja no Brasil (Padilha et al., 2020). Com base nas tendências observadas neste estudo, estima-se que o início do surto pode se antecipar de agosto para julho com o aquecimento adicional documentado. O déficit de pressão de vapor elevado acelera a evaporação de gotas de calda de defensivos; gotas de diâmetro reduzido (<200 µm) podem evaporar parcialmente antes de atingir o alvo biológico nas condições de agosto em Palmas, conforme estimativas de modelos de evaporação de gotas da tecnologia de aplicação de agrotóxicos, exigindo uso de adjuvantes, aplicações noturnas ou gotas maiores.

Riscos para a gestão hídrica e reservatórios

O período seco de 5-6 meses, com precipitação abaixo de 50 mm mês⁻¹ e demanda evapotranspirativa estimada de 8–9 mm dia⁻¹ (Silva

et al., 2023), impõe exigências severas à infraestrutura de armazenamento hídrico. A tendência negativa de precipitação em Peixe (–9,9 mm/ano; $p = 0,009$), se confirmada por análises futuras com estações vizinhas, representa risco adicional para reservatórios da microrregião. A calibração de modelos hidrológicos com as médias climáticas aqui estabelecidas é uma etapa necessária para a gestão de reservatórios e outorgas de uso da água no estado.

CONCLUSÃO

Este estudo apresentou médias climáticas de longo prazo para seis municípios do Tocantins. Os principais achados são:

- Regime climático regional: todas as estações exibem padrão Aw (Köppen), estação seca de 5–6 meses, precipitação anual entre 1.468 e 1.800 mm e temperatura média anual entre 25,0 °C (Taguatinga) e 27,1 °C (Palmas).
- Tendências térmicas robustas: aquecimento altamente significativo ($p < 0,001$), após correção de Yue-Wang para autocorrelação, em Tmax e Tmin em todas as cinco estações com séries longas, com taxas de Sen de +0,024 a +0,067 °C ano⁻¹.
- Precipitação estável (exceto Peixe): nenhuma tendência significativa na precipitação anual em quatro das cinco estações; Peixe exibe declínio de –9,9 mm/ano ($p = 0,009$) ao longo de 52 anos, com os fatores causais desta redução constituindo hipótese a ser investigada em análise futura com estações vizinhas.
- Riscos agroclimáticos crescentes: encurtamento da janela de plantio; intensificação do déficit hídrico; pressão sobre sistemas de irrigação; aumento do estresse térmico em culturas e pecuária; e risco hídrico na microrregião de Peixe.
- Relevância para o planejamento público: as médias climáticas de longo prazo aqui estabelecidas constituem insumo para atualização do ZARC (Brasil, 2021), revisão de projetos de irrigação, calibração de modelos hidrológicos na bacia Araguaia-Tocantins e formulação de políticas de adaptação às mudanças climáticas.
- Qualidade da rede observacional: lacunas em Gurupi (dados nulos) e Paranã (desativada em

1994) evidenciam a necessidade de expansão e manutenção da rede convencional do Tocantins.

Em síntese, o aquecimento documentado, altamente significativo, espacialmente coerente em todas as estações e mantido após correção de Yue-Wang, representa o principal achado deste trabalho. Sua magnitude é expressiva quando comparada às projeções regionalizadas para o Tocantins (Sousa et al., 2019), embora tal comparação requeira cautela dado que tendências locais observadas e projeções globais diferem em escala espacial, período de análise, variáveis representadas e natureza das estimativas (observação vs. projeção). Recomenda-se a atualização periódica destas médias climáticas, com intervalo máximo de cinco anos, para acompanhar o sinal de aquecimento em curso.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Em conformidade com as diretrizes da CAPES e do CNPq (Portaria n. 2.664/2026), o autor declara que recursos de IA foram utilizados como instrumento auxiliar, nos termos a seguir: (i) organização de dados e desenvolvimento de *scripts* de controle de qualidade com auxílio do assistente Claude (Anthropic, modelo Claude Sonnet 4.6, via Claude.ai, junho de 2026); (ii) produção de figuras em Python/matplotlib com código desenvolvido com suporte de IA; (iii) revisão e aperfeiçoamento do texto pelo autor, com auxílio de IA para verificação de coerência científica; (iv) verificação de referências bibliográficas com buscas assistidas por IA nas bases Springer Nature Link, SciELO, Tandfonline, MDPI, IPCC e FAO. A responsabilidade intelectual, científica e editorial é integralmente do autor humano. Os dados primários (INMET) não foram modificados, sintetizados ou substituídos por IA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. **Journal of Climatology**, 6(6): 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Brasil. **Ministério da Agricultura e Pecuária** (2021). Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático. Brasília: MAPA. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico>
- Campos, J.D.O. & Chaves, H.M.L. (2020). Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação pluvial mensal e anual no bioma Cerrado no período de 1977–2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 35(3): 157–169. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>
- dos Reis, L.C.; Silva, C.M.S.; Bezerra, B.G.; Spyrides, M.C. & Silva, L.M.F.F. (2020). Analysis of climate extreme indices in the MATOPIBA region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, 177: 4457–4478. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02474-4>
- Dubreuil, V.; Fante, K.P.; Planchon, O. & Sant'Anna Neto, J.L. (2019). Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, 39(3): 1446–1456. <https://doi.org/10.1002/joc.5893>
- Gomes, F.D.G.; Fuzeto, I.M.R. & Prates, R.P. (2020). Análise multitemporal do clima urbano em Palmas, estado do Tocantins–Brasil. **Colloquium Exactarum**, 12(2): 1–14. <https://doi.org/10.5747/ce.2020.v12.n2.e314>
- Hussain, M.M. & Mahmud, I. (2019). pymannkendall: a python package for non-parametric Mann Kendall family of trend tests. **Journal of Open Source Software**, 4(39): 1556. <https://doi.org/10.21105/joss.01556>
- INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia** (2026). Banco de Dados Meteorológicos – BDMEPweb: séries históricas de estações convencionais. Brasília: INMET. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>
- Manoli, G.; Fatichi, S.; Schlöpfer, M.; Yu, K.; Crowther, T.W.; Meili, N.; Burlando, P.; Katul, G.G. & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. **Nature**, 573(7772): 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Marengo, J.A.; Jimenez, J.C.; Espinoza, J.C.; Cunha, A.P. & Aragão, L.E.O. (2022). Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, 12: 457. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>
- Nobre, C.A.; Sampaio, G.; Borma, L.S.; Castilla-Rubio, J.C.; Silva, J.S. & Cardoso, M. (2016). Land-

- use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 113(39): 10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- OMM – **Organização Meteorológica Mundial** (2018). Guide to Climatological Practices (3.ed., WMO-No. 100). Geneva: WMO. Disponível em: <https://library.wmo.int/records/item/55743-guide-to-climatological-practices>
- Padilha, G.; Fiorin, R.A.; Cargnelutti Filho, A.; Pozebon, H.; Rogers, J.; Marques, R.P.; Castilhos, L.B.; Donatti, A.; Stefanelo, L.; Burtet, L.M.; Stacke, R.F. & Guedes, J.V.C. (2020). Damage assessment and economic injury level of the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 55: e01836. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01836>
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, 28(2): 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Rattis, L.; Brando, P.M.; Macedo, M.N.; Spera, S.A.; Castanho, A.D.A.; Marques, E.Q.; Costa, N.Q.; Silverio, D.V. & Coe, M.T. (2021). Climatic limit for agriculture in Brazil. **Nature Climate Change**, 11(12): 1098–1104. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01214-3>
- Sabino, M. & Souza, A.P. (2023). Gap-filling meteorological data series using the GapMET software and its implication on reference evapotranspiration estimation in Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 27(2). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101462>
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall tau. **Journal of the American Statistical Association**, 63(324): 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Silva, C.C.; Silva Júnior, J.L.C.; Silva, L.V.B.D.; Silva, Y.M.; Martins, S.C.R. & Bispo, C.G. (2023). Atlas digital da evapotranspiração de referência do Tocantins. **Agri-Environmental Sciences**, 9(2): e023014. <https://doi.org/10.36725/agries.v9i2.8678>
- Silva, R.A.; Ries, E.S. & Maciel, G.F. (2020). Tendências da temperatura anual no estado do Tocantins. **Pesquisa Agrária e ambientais**, 8(4):544-551. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i4.8523>
- Sousa, R.M.; Viola, M.R.; Chou, S.C.; Alves, M.V.G. & Avanzi, J.C. (2019). Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24: e57052. <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.57052>
- Valle Júnior, L.C.G.; Vourlitis, G.L.; Curado, L.F.A.; Palácios, R.S.; Nogueira, J.S.; Lobo, F.A. & Rodrigues, T.R. (2021). Evaluation of FAO-56 Procedures for Estimating Reference Evapotranspiration Using Missing Climatic Data for a Brazilian Tropical Savanna. **Water**, 13(13): <https://doi.org/10.3390/w13070971>
- Volpi, D.; Alves, F.V.; Arguelho, A.S.; Vale, M.M.; Deniz, M. & Zopollatto, M. (2021). Environmental variables responsible for Zebu cattle thermal comfort acquisition. **International Journal of Biometeorology**, 65: 1695–1705. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02124-x>
- Yue, S. & Wang, C. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. **Water Resources Management**, 18(3): 201–218. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>
- Zhao, C.; Liu, B.; Piao, S.; Wang, X.; Lobell, D.B.; Huang, Y.; Huang, M.; Yao, Y.; Bassu, S.; Ciais, P.; Durand, J.-L.; Elliott, J.; Ewert, F.; Janssens, I.A.; Li, T.; Lin, E.; Liu, Q.; Martre, P.; Müller, C.; Peng, S.; Peñuelas, J.; Ruane, A.C.; Wallach, D.; Wang, T.; Wu, D.; Liu, Z.; Zhu, Y.; Zhu, Z. & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 114(35): 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.170176211>