

Representatividade climática entre as estações meteorológicas de Belterra e Santarém, oeste do Pará, Brasil

Climatic representativeness between the Belterra and Santarém meteorological stations, western Pará, Brazil

Tiago Bentes Mandú 

Mestre em Meteorologia

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil

tiagobentes1@gmail.com

Resumo

A disponibilidade de séries meteorológicas longas e contínuas é um requisito fundamental para estudos climatológicos, porém ainda representa um desafio em muitas regiões do Brasil, especialmente na Amazônia. Santarém, município estratégico no oeste do Pará, possui uma estação meteorológica com série relativamente curta, o que limita análises climáticas tradicionais. Em contrapartida, o município vizinho de Belterra dispõe de uma estação convencional com série histórica extensa, configurando uma alternativa potencial para a representação climática regional. Neste estudo, avaliou-se a representatividade da estação de Belterra em relação à estação de Santarém por meio da comparação de variáveis meteorológicas diárias no período comum de 2015 a 2025. Foram analisadas a temperatura máxima, mínima e média do ar, bem como a precipitação diária, utilizando métricas estatísticas de concordância, análise de quantis extremos, ciclos mensais e modelos de regressão linear. Os resultados indicaram que a temperatura média diária apresenta elevada concordância entre as estações, com viés praticamente nulo, alta correlação e bom desempenho estatístico, evidenciando que Belterra é altamente representativa dessa variável em Santarém. Em contraste, as temperaturas máxima e mínima exibiram vieses sistemáticos de sinais opostos, associados a efeitos locais e microclimáticos, limitando sua extrapolação direta. A precipitação diária apresentou elevada dispersão e baixa representatividade espacial, especialmente para eventos extremos. De forma integrada, os resultados demonstram que a representatividade climática entre Belterra e Santarém é fortemente dependente da variável meteorológica. A estação de Belterra pode ser utilizada com segurança para a temperatura média diária, enquanto as demais variáveis requerem cautela ou ajustes estatísticos.

Palavras-chave: representatividade climática; temperatura do ar; precipitação; estações meteorológicas; Amazônia



<https://doi.org/10.28998/contegeo.11i.25.20453>.

Artigo publicado sob a [Licença Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Submetido em: 03/01/2025

Aceito em: 11/02/2026

Publicado: 25/02/2026

e-Location: 20453

Abstract

The availability of long and continuous meteorological records is essential for climatological studies, yet it remains limited in many regions of Brazil, particularly in the Amazon. Santarém, a strategically important municipality in western Pará, has a relatively short meteorological record, which constrains traditional climate analyses. In contrast, the neighboring municipality of Belterra hosts a conventional meteorological station with a long historical series, offering a potential alternative for regional climate representation. This study evaluates the climatic representativeness of the Belterra station relative to the Santarém station using daily meteorological observations from their common period (2015–2025). Daily maximum, minimum, and mean air temperatures, as well as daily precipitation, were analyzed using statistical agreement metrics, extreme quantile analysis, monthly climatological cycles, and linear regression models. The results show that daily temperature exhibits strong agreement between the two stations, characterized by near-zero bias, high correlation, and robust regression performance, indicating that Belterra reliably represents mean temperature conditions in Santarém. In contrast, maximum and minimum temperatures display systematic biases of opposite signs, reflecting local and microclimatic influences that limit their direct spatial extrapolation. Daily precipitation shows high dispersion, weak predictive skill, and substantial differences in extreme values, highlighting its strong spatial variability and limited representativeness. Overall, the findings demonstrate that climatic representativeness between nearby stations is strongly variable-dependent. While the Belterra station can be confidently used as a proxy for mean daily temperature in Santarém, caution is required for temperature extremes and precipitation, which may require statistical adjustment or complementary data sources.

Keywords: climatic representativeness; air temperature; precipitation; meteorological stations; Amazon region.

INTRODUÇÃO

As variáveis meteorológicas desempenham papel central na compreensão do funcionamento do sistema climático e de seus impactos ambientais, ecológicos e socioeconômicos. Temperatura e precipitação, em particular, constituem elementos fundamentais para a caracterização climática, o zoneamento ambiental e a avaliação de riscos associados a extremos e variabilidade climática. Estudos recentes têm demonstrado que a análise integrada dessas variáveis é essencial para identificar padrões espaciais e temporais, bem como para subsidiar aplicações em planejamento territorial, saúde pública, agricultura e gestão ambiental (Bessah *et al.*, 2022; Kalashnikov *et al.*, 2022; Rajesh *et al.*, 2025; Rahaman *et al.*, 2024).

A representatividade espacial das observações meteorológicas é um dos principais desafios em estudos climatológicos, especialmente em regiões onde a rede observacional é limitada ou apresenta séries temporais curtas. Diferenças locais associadas ao uso e cobertura do solo, topografia, urbanização e influência hidrológica podem introduzir vieses significativos entre estações relativamente próximas, afetando tanto valores médios quanto extremos climáticos. Trabalhos realizados em diferentes contextos climáticos mostram que a confiabilidade da extrapolação espacial varia conforme a variável analisada e a escala temporal considerada (Flückiger *et al.*, 2022; Adeyeri *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

Diversos estudos têm destacado que variáveis térmicas apresentam comportamentos distintos quando analisadas em termos de médias e extremos. Enquanto a temperatura média tende a refletir predominantemente forçantes regionais, as temperaturas máxima e mínima são fortemente moduladas por processos locais e microclimáticos, como cobertura vegetal, características da superfície e estrutura urbana (Cheng *et al.*, 2022; Chelani & Gautam, 2022; Tomczyk *et al.*, 2025). Essa diferenciação tem implicações diretas para a modelagem climática, a análise de tendências e a avaliação de impactos ambientais e biológicos (Aschale *et al.*, 2023; Ebtehaj *et al.*, 2023).

A precipitação, por sua vez, é reconhecida como a variável meteorológica de maior complexidade espacial, especialmente em regiões tropicais, onde predomina a convecção local. Estudos apontam que, mesmo em áreas geograficamente próximas, os totais diários e os eventos extremos de chuva podem apresentar grande variabilidade, limitando a representatividade espacial direta entre estações (Bessah *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2025). Essa característica impõe restrições importantes para análises hidrológicas, ambientais e de riscos associados a eventos extremos.

A literatura recente também evidencia que a qualidade e a homogeneidade das séries meteorológicas são aspectos críticos para análises climáticas robustas. Processos de comparação, regionalização e modelagem exigem avaliações quantitativas detalhadas da concordância entre estações, de modo a evitar interpretações enviesadas de tendências e variabilidade (Adeyeri *et al.*, 2022; Rajesh *et al.*, 2025). Nesse contexto, métricas estatísticas, análise de extremos e modelos de regressão têm sido amplamente empregados para investigar relações espaciais entre observações meteorológicas (Rahaman *et al.*, 2024; Wong *et al.*, 2023).

No Brasil, e particularmente na região amazônica, essas questões assumem relevância adicional devido à escassez de séries longas e contínuas em áreas urbanas estratégicas. Santarém, município de grande importância econômica e populacional no oeste do Pará, possui uma estação meteorológica com série relativamente curta, o que limita estudos climatológicos tradicionais baseados em períodos mínimos de 30 anos. Em contrapartida, o município vizinho de Belterra dispõe de uma estação convencional com série histórica extensa, configurando uma oportunidade para avaliar a possibilidade de representação climática espacial entre as duas localidades.

Cabe destacar que a comparação envolve estações de tipologias distintas (convencional e automática). Diferenças instrumentais, rotinas de observação, resolução temporal de registro e procedimentos operacionais podem introduzir discrepâncias sistemáticas entre séries, sobretudo em variáveis sensíveis ao ciclo diurno e aos extremos (como T_{max} e T_{min}). Assim, mesmo sob proximidade entre estações pode refletir não apenas controles climáticos regionais, mas também particularidades de medição e do entorno imediato dos sensores, motivo pelo qual a avaliação quantitativa é necessária antes de qualquer extrapolação espacial.

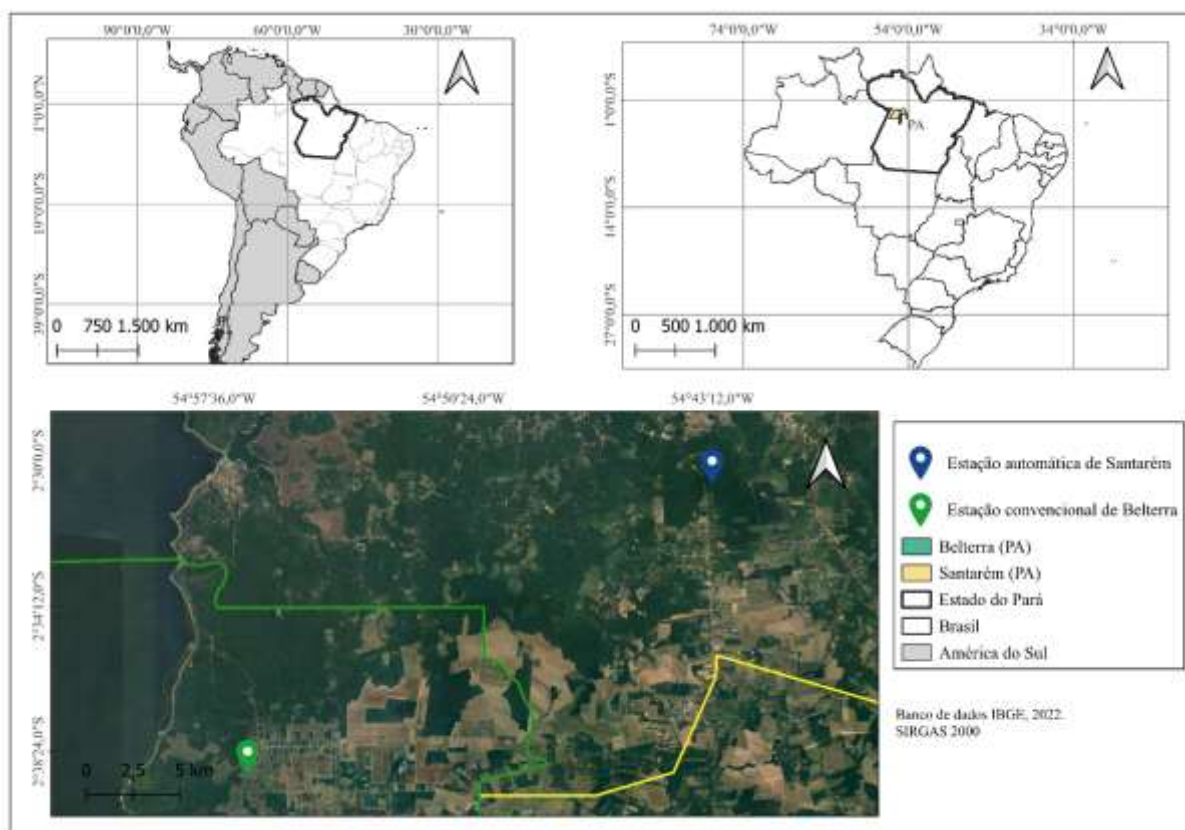
Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a representatividade climática da estação meteorológica de Belterra em relação à estação de Santarém, por meio da comparação de variáveis térmicas e pluviométricas no período comum de 2015 a 2025. A análise é conduzida em múltiplas escalas temporais, incorporando métricas estatísticas de concordância, avaliação de extremos, ciclos sazonais e modelos de regressão linear. Ao investigar de forma sistemática as semelhanças e limitações entre as estações, este trabalho contribui para o debate sobre a extensão e integração de séries meteorológicas em regiões com limitações observacionais, fornecendo subsídios metodológicos e aplicados para estudos climáticos e ambientais no oeste do Pará.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Área de estudo e estações meteorológicas

O estudo foi conduzido na região oeste do estado do Pará (Figura 1), abrangendo os municípios de Belterra e Santarém, inseridos no domínio climático amazônico. Apesar da proximidade geográfica, os municípios apresentam diferenças relevantes quanto ao uso e cobertura do solo, grau de urbanização e influência fluvial, fatores que podem impactar as observações meteorológicas locais.

Figura 1 – Área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores.

Foram utilizadas duas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): (i) a estação convencional de Belterra, em operação contínua desde 1961, e (ii) a estação automática de Santarém, inaugurada em 2007.

Considerando a necessidade de comparabilidade direta entre as séries, as análises foram restritas ao período comum de funcionamento, compreendido entre 2015 e 2025, no qual ambas as estações apresentam dados diários disponíveis.

Dados meteorológicos e pré-processamento

Foram analisadas as seguintes variáveis meteorológicas diárias:

- temperatura máxima do ar ($T_{\max}$, °C);
- temperatura mínima do ar ($T_{\min}$, °C);
- temperatura média do ar ($T_{\text{média}}$, °C);
- precipitação total diária (P , mm).

Os dados foram obtidos em formato diário e submetidos a um processo de padronização e controle de qualidade, incluindo:

1. conversão e uniformização do formato de datas;
2. remoção de registros inválidos ou fisicamente inconsistentes;
3. tratamento de valores ausentes, sem aplicação de preenchimento artificial, de modo a preservar a variabilidade observada;
4. cálculo da temperatura média diária quando necessário, a partir da média aritmética entre $T_{\max}$ e $T_{\min}$.

A completude das séries foi avaliada por meio da razão entre o número de observações válidas e o total de dias do período analisado, permitindo identificar possíveis limitações associadas à disponibilidade de dados.

O pré-processamento dos dados, o pareamento diário entre as séries, o cálculo das métricas estatísticas, os ajustes de regressão e a elaboração das figuras e tabelas foram realizados em ambiente R, por meio de scripts reproduzíveis desenvolvidos pelos autores. As rotinas incluíram: (i) organização e padronização temporal das séries, (ii) seleção de pares diários coincidentes entre as estações, (iii) cálculo das métricas globais de concordância e dos quantis extremos, (iv) estimação de modelos de regressão linear e (v) geração dos gráficos e tabelas finais.

Estratégia de comparação entre as estações

A comparação entre Belterra e Santarém foi realizada a partir de pares diários coincidentes, assegurando que apenas datas comuns às duas estações fossem consideradas. A estação de Belterra foi adotada como referência espacial, em função de sua série histórica mais longa, enquanto a estação de Santarém foi considerada a variável dependente, refletindo o objetivo de avaliar a possibilidade de representação climática.

As análises foram conduzidas em múltiplas escalas temporais:

- diária (métricas globais);
- mensal (ciclo sazonal e diferenças mensais);
- sazonal (estação chuvosa e seca);
- distribuição estatística (quantis extremos).

Métricas estatísticas de concordância

A concordância entre as séries foi avaliada por meio de métricas estatísticas amplamente utilizadas em estudos climatológicos e ambientais.

O viés médio (Bias) foi calculado como:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - B_i)$$

onde S_i representa o valor observado em Santarém, B_i o valor correspondente em Belterra e n o número de observações pareadas.

O erro médio absoluto (MAE) foi definido como:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - B_i|$$

enquanto o erro quadrático médio (RMSE) foi calculado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - B_i)^2}$$

A correlação linear de Pearson (r) foi utilizada para avaliar a associação linear entre as séries:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$$

onde $\bar{B}$ e $\bar{S}$ são as médias das séries de Belterra e Santarém, respectivamente.

Adicionalmente, foi empregado o coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE), amplamente utilizado para avaliar a habilidade preditiva de uma série de referência:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - B_i)^2}{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}$$

Valores de NSE próximos a 1 indicam elevada capacidade de representação, enquanto valores negativos indicam desempenho inferior ao uso da média da série de referência.

As métricas de desempenho adotadas (viés, MAE, RMSE, correlação de Pearson e NSE) são amplamente utilizadas para avaliar concordância, erro e

habilidade de representação entre séries ambientais e meteorológicas, permitindo comparar simultaneamente associação linear, magnitude do erro e desempenho relativo em relação ao uso de uma referência média. O NSE foi empregado por ser uma métrica consolidada para avaliação de habilidade de simulação/representação em séries contínuas. (Nash & Sutcliffe, 1970).

Análise dos extremos climáticos

Para a avaliação dos extremos, foram calculados os quantis empíricos correspondentes ao percentil 5 (P5), mediana (P50) e percentil 95 (P95) para cada variável e estação. Esses quantis permitem caracterizar o comportamento das caudas inferior e superior da distribuição, fornecendo uma visão robusta das diferenças associadas a eventos extremos e condições típicas.

Modelagem por regressão linear

A relação entre as observações de Belterra e Santarém foi adicionalmente investigada por meio de modelos de regressão linear simples, definidos como:

$$S_i = \alpha + \beta B_i + \varepsilon_i$$

onde α é o intercepto, β a inclinação do modelo e ε_i o termo de erro aleatório.

Os parâmetros foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários, e a qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e do teste de significância do coeficiente angular. Esses modelos foram utilizados exclusivamente para fins diagnósticos, visando avaliar a possibilidade de correção estatística das séries, e não como ferramentas preditivas operacionais.

Análises sazonais e ciclo mensal

O comportamento sazonal foi avaliado a partir do ciclo mensal médio, obtido pelo cálculo das médias mensais das variáveis ao longo do período analisado. Adicionalmente, foram calculadas as diferenças mensais diárias (Santarém – Belterra), sintetizadas por meio de boxplots, permitindo avaliar a variabilidade intra-sazonal e a presença de vieses persistentes ao longo do ano.

Síntese metodológica

A abordagem metodológica adotada combina estatísticas descritivas, métricas de concordância, análise de extremos, modelagem linear e avaliação sazonal, permitindo uma análise abrangente e robusta da representatividade climática entre as estações. Essa estratégia garante que a avaliação não se restrinja a uma única métrica ou escala temporal, fornecendo uma base sólida para a interpretação dos resultados e para a aplicação dos achados em estudos climatológicos regionais.

RESULTADOS OU ANÁLISES E DISCUSSÕES

A Tabela 1 sintetiza as métricas estatísticas globais de concordância entre as observações diárias das estações meteorológicas de Santarém e Belterra no período de 2015 a 2025, permitindo avaliar de forma integrada a representatividade da estação de Belterra como proxy climática para Santarém. De modo geral, os resultados evidenciam que o desempenho da representatividade varia substancialmente entre as variáveis analisadas, refletindo tanto diferenças físicas entre os sítios de medição quanto limitações inerentes aos processos atmosféricos observados.

Para a temperatura máxima diária (T_{max}), observa-se um viés negativo de $-1,10\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando que, em média, Santarém registra valores inferiores aos de Belterra. Esse comportamento sugere a influência de características locais, como diferenças de exposição, ventilação e cobertura do solo, que podem modular os extremos diurnos de temperatura. Apesar desse viés sistemático, a correlação relativamente elevada ($r = 0,77$) indica que a variabilidade temporal da T_{max} é bem capturada entre as estações. Entretanto, o valor reduzido do NSE (0,18) aponta que, embora exista coerência temporal, a capacidade preditiva direta de Belterra para reproduzir os valores absolutos de T_{max} em Santarém é limitada, exigindo cautela em aplicações que dependam de extremos térmicos diurnos.

A temperatura mínima diária (T_{min}) apresenta um comportamento distinto, com viés positivo de $1,30\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando que Santarém tende a registrar temperaturas noturnas mais elevadas em comparação a Belterra. Esse resultado é consistente com a maior urbanização de Santarém, que favorece a retenção de calor durante a noite, possivelmente associada a efeitos de ilha de calor urbana. A correlação moderada ($r = 0,53$) indica menor sincronia temporal entre as séries, e o valor fortemente negativo do NSE ($-5,79$) revela que Belterra não é capaz de representar adequadamente a

Tmin de Santarém em termos quantitativos. Assim, o uso direto da estação de Belterra como proxy para temperaturas mínimas em Santarém mostra-se inadequado sem procedimentos de correção estatística.

Em contraste, a temperatura média diária ($T_{média}$) apresenta o melhor desempenho entre todas as variáveis analisadas. O viés praticamente nulo ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) indica excelente concordância nos valores médios, enquanto o baixo MAE ($0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o RMSE ($0,58\text{ }^{\circ}\text{C}$) reforçam a proximidade entre as séries. A correlação elevada ($r = 0,88$) e o NSE positivo e relativamente alto ($0,69$) demonstram que a estação de Belterra reproduz de forma consistente tanto a variabilidade temporal quanto a magnitude da temperatura média diária observada em Santarém. Esses resultados sustentam fortemente a viabilidade do uso de Belterra como estação representativa para estudos baseados em temperatura média, especialmente em análises climatológicas e ambientais de escala regional.

Para a precipitação diária, os resultados indicam maior complexidade e menor concordância entre as estações. O viés positivo de $2,02\text{ mm}$ sugere que Santarém apresenta, em média, totais diários ligeiramente superiores aos de Belterra, possivelmente associados à natureza altamente espacializada e convectiva da precipitação na Amazônia. Embora a correlação moderada ($r = 0,57$) indique alguma coerência temporal entre os eventos de chuva, os elevados valores de MAE ($5,51\text{ mm}$) e RMSE ($12,89\text{ mm}$), aliados ao NSE negativo ($-0,35$), evidenciam que Belterra não representa adequadamente os volumes diários de precipitação em Santarém. Esse resultado reforça a limitação do uso de proxies espaciais para precipitação em regiões tropicais, onde a variabilidade local é dominante.

De forma integrada, os resultados da Tabela 1 indicam que a representatividade climática da estação de Belterra para Santarém é variável e dependente da variável meteorológica considerada. Enquanto a temperatura média diária apresenta elevada robustez e confiabilidade, as temperaturas extremas (máxima e mínima) e, sobretudo, a precipitação diária exibem limitações significativas. Esses achados têm implicações diretas para estudos climáticos regionais, sugerindo que a estação de Belterra pode ser utilizada de forma segura para análises baseadas em temperatura média, mas requer cautela ou ajustes estatísticos quando aplicada a extremos térmicos e precipitação.

Tabela 1 – Métricas estatísticas globais de concordância entre as observações diárias das estações de Santarém e Belterra no período 2015–2025. O viés é definido como Santarém – Belterra

Variável	n	bias	MAE	RMSE	Correlação	NSE
Tmax	2450	-1,10	1,36	1,64	0,77	0,18
Tmin	1568	1,30	1,38	1,59	0,53	-5,79
Tmédia	1565	0,01	0,45	0,58	0,88	0,69
Precip.	1658	2,02	5,51	12,89	0,57	-0,35

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A Figura 2 apresenta o diagrama de dispersão entre a temperatura média diária (Tmédia) observada nas estações meteorológicas de Belterra e Santarém no período de 2015 a 2025, incluindo a linha de regressão linear ajustada e a linha de referência 1:1. Observa-se uma forte relação linear positiva entre as duas séries, evidenciando elevada coerência entre os valores registrados nas duas localidades ao longo de todo o intervalo analisado.

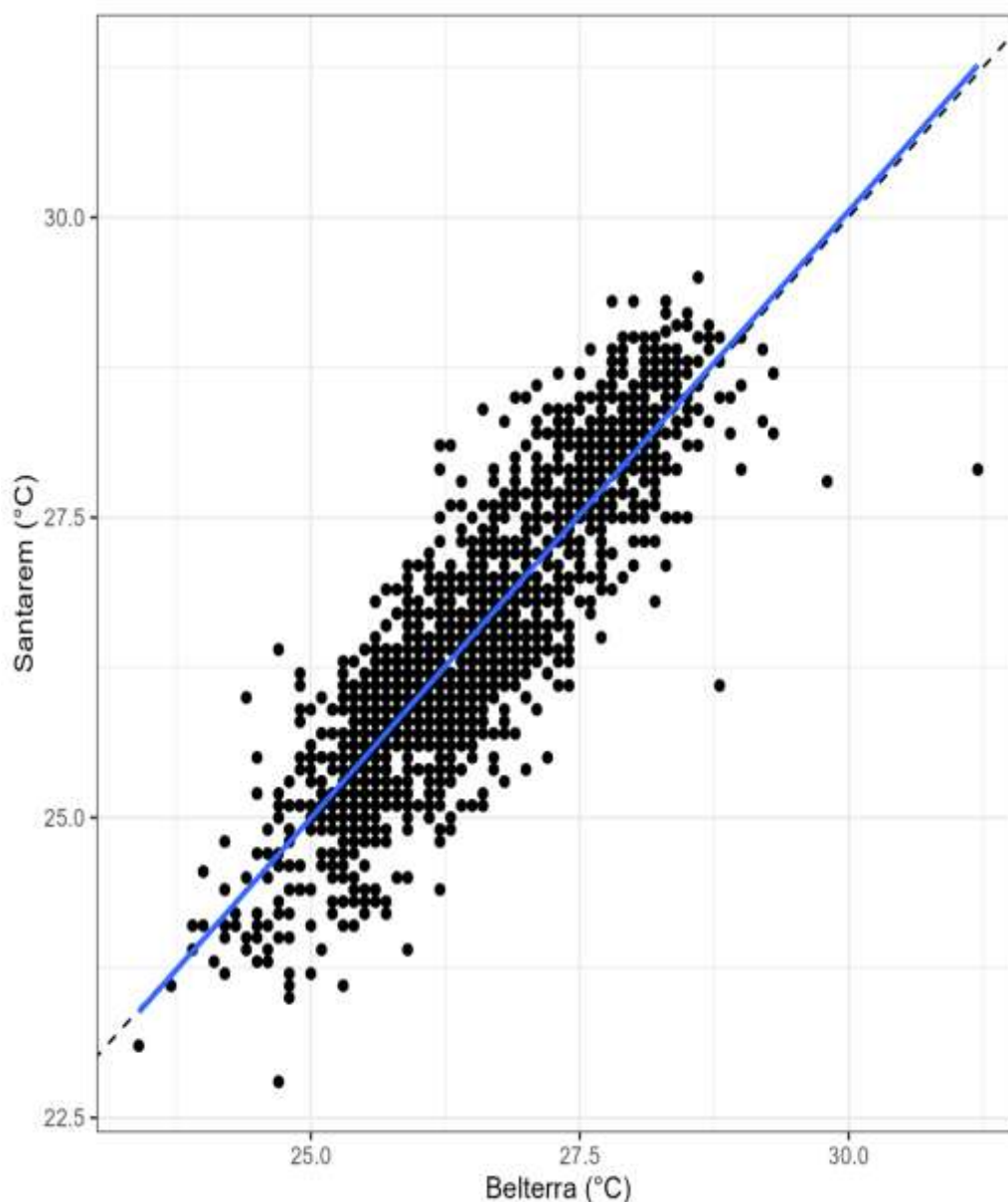
A distribuição dos pontos ao redor da linha 1:1 indica que, para a maior parte dos dias, as temperaturas médias observadas em Santarém são muito próximas daquelas registradas em Belterra. Essa proximidade é corroborada pela inclinação da reta de regressão praticamente unitária, sugerindo que variações na temperatura média em Belterra são transmitidas quase integralmente para Santarém. Esse comportamento reforça a elevada correlação estatística observada entre as séries e confirma que ambas respondem de forma semelhante às forçantes climáticas regionais.

Nota-se, entretanto, uma dispersão moderada em torno da reta de regressão, especialmente nos intervalos intermediários de temperatura média, aproximadamente entre 25 °C e 28 °C. Essa dispersão reflete a influência de fatores locais, como diferenças de uso e cobertura do solo, grau de urbanização e condições microclimáticas específicas de cada estação. Ainda assim, a ausência de desvios sistemáticos marcantes — como curvaturas ou assimetrias pronunciadas — indica que essas diferenças não comprometem a relação linear global entre as estações.

Outro aspecto relevante é a simetria da dispersão ao longo de todo o domínio de valores, sem evidência clara de aumento do erro em faixas específicas de temperatura. Isso sugere que a representatividade de Belterra para a Tmédia de

Santarém é consistente tanto em condições mais amenas quanto em períodos mais quentes, o que é particularmente importante para aplicações climatológicas e ambientais que dependem de médias térmicas diárias.

Figura 2 - Diagrama de dispersão da temperatura média diária (°C) observada nas estações meteorológicas de Belterra (convencional) e Santarém (automática) no período de 2015 a 2025. A linha tracejada representa a relação 1:1, enquanto a linha contínua indica o ajuste de regressão linear entre as duas séries



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A proximidade entre a reta de regressão e a linha 1:1, aliada ao reduzido viés médio identificado nas métricas globais, indica que não há necessidade de correção

sistemática para o uso da temperatura média diária de Belterra como proxy para Santarém. Diferentemente do observado para as temperaturas extremas e para a precipitação, a $T_{média}$ apresenta comportamento robusto e estável, com elevada capacidade de representação espacial entre as duas estações.

De forma integrada, a Figura 2 fornece evidência gráfica clara de que a estação meteorológica de Belterra é altamente representativa da temperatura média diária de Santarém, sustentando sua utilização em estudos climáticos regionais, análises de variabilidade interanual e aplicações ambientais que demandam séries temporais longas. Esses resultados reforçam a conclusão de que a $T_{média}$ é a variável mais adequada para a substituição espacial entre as estações analisadas, dentro do contexto climático do oeste do Pará.

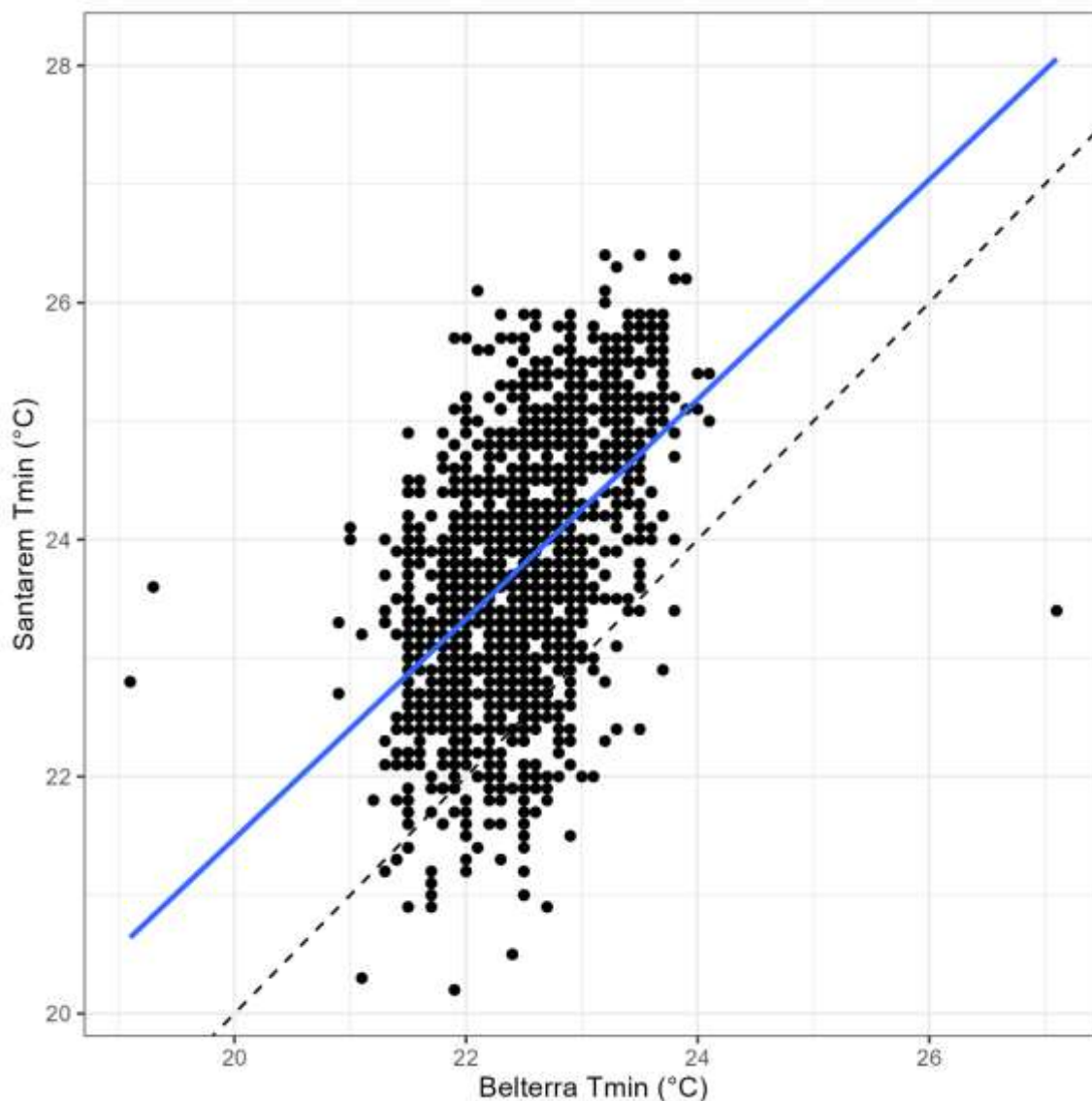
A Figura 3 apresenta o diagrama de dispersão entre a temperatura mínima diária (T_{min}) observada nas estações meteorológicas de Belterra e Santarém no período de 2015 a 2025, incluindo a linha de regressão linear ajustada e a linha de referência 1:1. Diferentemente do observado para a temperatura média diária, a relação entre as T_{min} das duas estações apresenta maior dispersão e desvios sistemáticos em relação à linha 1:1, indicando limitações na representatividade direta de Belterra para essa variável em Santarém.

Observa-se que a maioria dos pontos está posicionada acima da linha 1:1, evidenciando que, para um mesmo valor de T_{min} em Belterra, Santarém tende a registrar temperaturas mínimas mais elevadas. Esse padrão gráfico é consistente com o viés positivo identificado nas métricas globais, indicando um aquecimento noturno sistemático em Santarém em relação a Belterra. Tal comportamento pode ser atribuído, em grande parte, às diferenças de uso e cobertura do solo, ao maior grau de urbanização de Santarém e à consequente retenção de calor durante o período noturno, característica frequentemente associada a ambientes urbanos.

A inclinação da reta de regressão superior à unidade e o deslocamento vertical positivo em relação à linha 1:1 reforçam a presença de um viés estrutural entre as séries. Embora exista uma relação linear estatisticamente significativa entre as T_{min} das duas estações, a dispersão relativamente elevada dos pontos indica que a variabilidade diária da temperatura mínima em Santarém não é plenamente capturada pela estação de Belterra. Esse comportamento se reflete nos valores moderados de

correlação e, sobretudo, no desempenho insatisfatório do coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe, que indica baixa capacidade preditiva direta.

Figura 3 - Diagrama de dispersão da temperatura mínima diária (°C) observada nas estações meteorológicas de Belterra (convencional) e Santarém (automática) no período de 2015 a 2025. A linha tracejada representa a relação 1:1, enquanto a linha contínua indica o ajuste de regressão linear entre as duas séries



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Nota-se ainda que a dispersão dos pontos tende a aumentar em faixas intermediárias de temperatura mínima, aproximadamente entre 22 °C e 25 °C, sugerindo que as diferenças microclimáticas entre as localidades se manifestam de forma mais intensa nessas condições. Em contraste, não se observa um agrupamento

preferencial de desvios extremos em faixas específicas, indicando que o viés é relativamente consistente ao longo do domínio analisado.

Do ponto de vista aplicado, os resultados apresentados na Figura 3 indicam que a estação de Belterra não deve ser utilizada diretamente como proxy para a temperatura mínima diária de Santarém, especialmente em estudos que envolvam conforto térmico noturno, extremos de frio relativo ou análises de impacto urbano. Entretanto, a existência de uma relação linear bem definida sugere que procedimentos de correção estatística, como ajustes por regressão, podem ser empregados para reduzir o viés e melhorar a representatividade dessa variável em aplicações específicas.

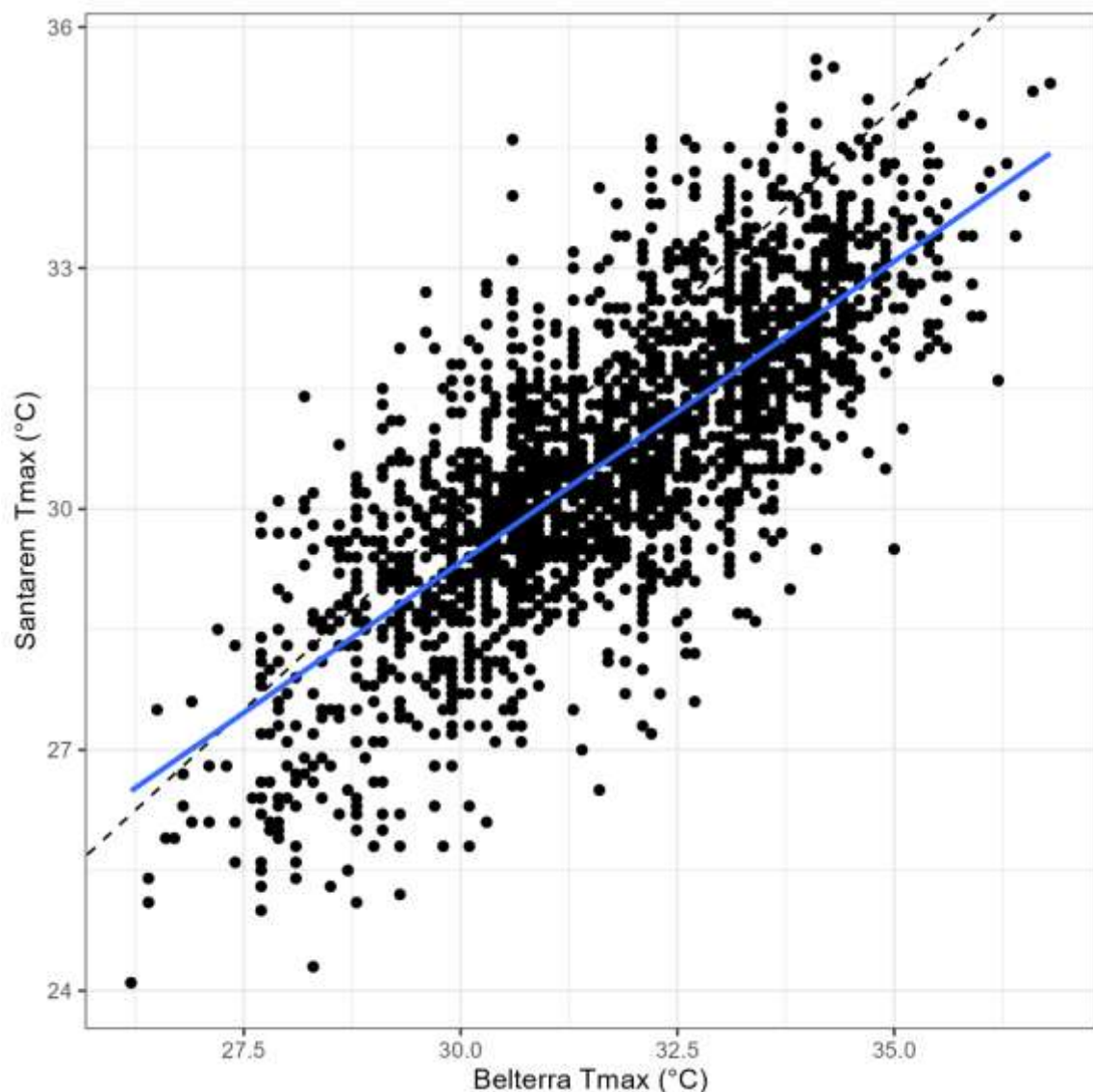
A Figura 4 apresenta o diagrama de dispersão entre a temperatura máxima diária (Tmax) observada nas estações meteorológicas de Belterra e Santarém no período de 2015 a 2025, incluindo a linha de regressão linear e a linha de referência 1:1. Observa-se uma relação linear positiva bem definida entre as duas séries, indicando que ambas respondem de forma coerente às forçantes climáticas regionais responsáveis pela variabilidade dos extremos diurnos de temperatura.

A distribuição dos pontos revela, entretanto, um deslocamento sistemático abaixo da linha 1:1, indicando que, para um mesmo valor de Tmax registrado em Belterra, Santarém tende a apresentar valores ligeiramente menores. Esse comportamento gráfico é consistente com o viés negativo identificado nas métricas globais, confirmando que a estação de Santarém registra, em média, temperaturas máximas inferiores às de Belterra. Tal diferença pode estar associada a fatores locais, como maior influência fluvial, maior umidade atmosférica e diferenças na ventilação e no entorno imediato da estação automática de Santarém.

Apesar desse viés, a concentração dos pontos ao longo da reta de regressão e a inclinação próxima da unidade indicam que a variabilidade temporal da Tmax é bem capturada entre as estações. A correlação relativamente elevada sugere que os períodos mais quentes e mais amenos ocorrem de forma sincronizada em Belterra e Santarém, reforçando a representatividade regional da estação convencional para a análise de padrões sazonais e interanuais da temperatura máxima.

Figura 4 - Diagrama de dispersão da temperatura máxima diária (°C) observada nas estações meteorológicas de Belterra (convencional) e Santarém (automática) no período de

2015 a 2025. A linha tracejada representa a relação 1:1, enquanto a linha contínua indica o ajuste de regressão linear entre as duas séries



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Nota-se também uma dispersão moderada em torno da reta de regressão, especialmente em valores intermediários de Tmax, aproximadamente entre 29 °C e 32 °C. Essa dispersão indica que a Tmax é sensível a condições microclimáticas locais, como cobertura do solo, proximidade de corpos d'água e diferenças de exposição dos sensores, o que limita a substituição direta entre as estações para análises que dependam de valores absolutos precisos.

Em termos aplicados, os resultados apresentados na Figura 4 indicam que a estação de Belterra pode ser utilizada como proxy qualitativa para a análise da

variabilidade da temperatura máxima diária em Santarém, especialmente em estudos de caráter climatológico regional. No entanto, para investigações focadas em extremos térmicos diurnos, ondas de calor ou avaliações de impacto térmico, recomenda-se cautela ou a aplicação de correções estatísticas, de modo a reduzir o viés sistemático observado.

A Figura 5 apresenta o diagrama de dispersão entre os totais diários de precipitação observados nas estações meteorológicas de Belterra e Santarém no período de 2015 a 2025, incluindo a linha de regressão linear ajustada e a linha de referência 1:1. O padrão observado evidencia uma elevada dispersão dos dados, refletindo a natureza altamente variável e espacialmente heterogênea da precipitação na região amazônica.

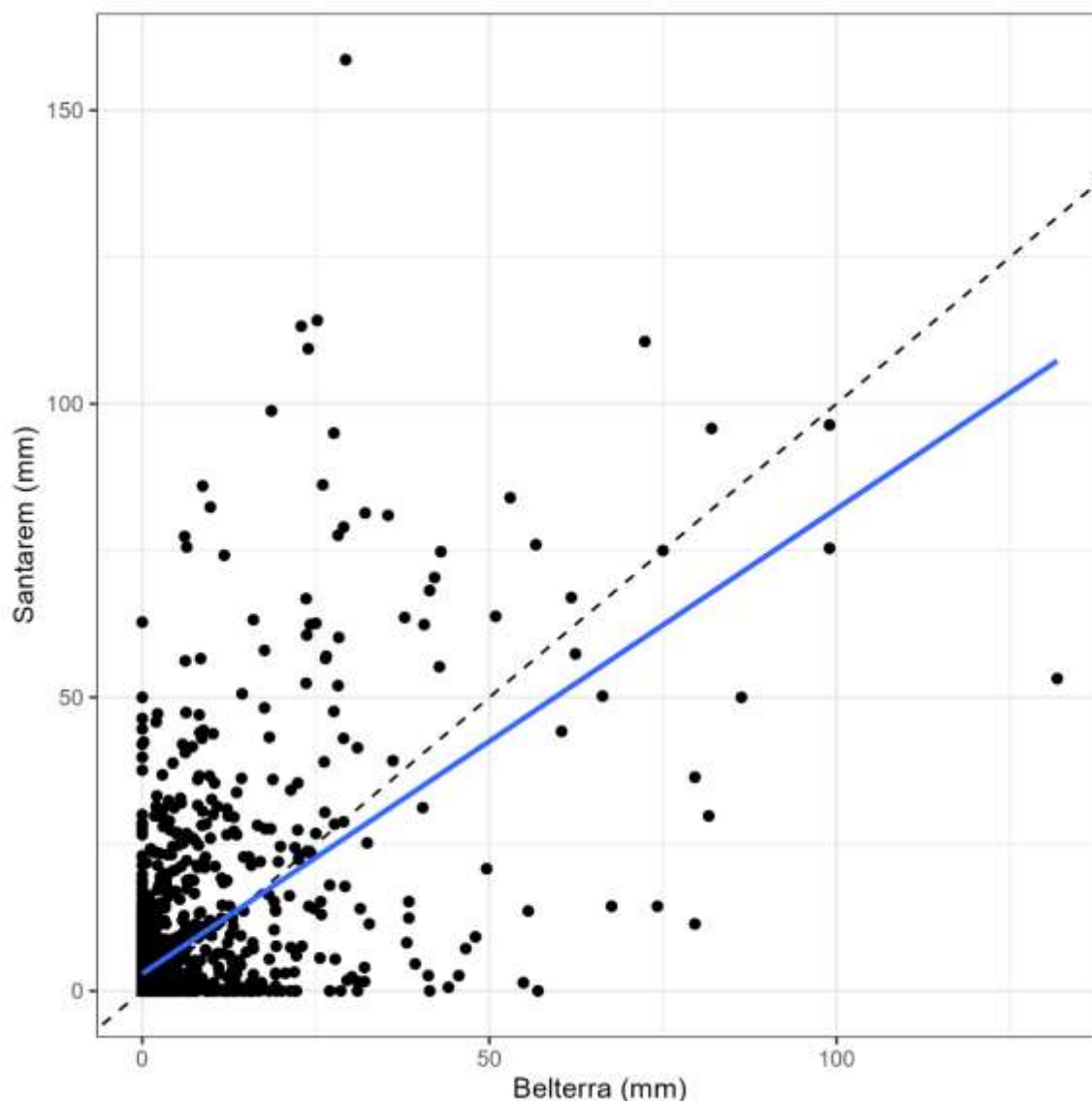
Observa-se uma forte concentração de pontos próximos à origem, indicando a predominância de dias com precipitação nula ou fraca em ambas as estações. No entanto, à medida que os totais diários aumentam, a dispersão se intensifica significativamente, com vários eventos apresentando diferenças substanciais entre Belterra e Santarém. Esse comportamento indica que, embora as duas estações estejam relativamente próximas, os eventos de chuva intensa nem sempre ocorrem de forma simultânea ou com a mesma magnitude nas duas localidades.

A maior parte dos pontos associados a eventos de precipitação moderada e intensa encontra-se abaixo da linha 1:1, indicando que, para um mesmo total diário registrado em Belterra, Santarém tende a apresentar valores inferiores. Esse padrão é consistente com a inclinação da reta de regressão inferior à unidade e com o viés positivo identificado nas métricas globais, sugerindo uma subestimação relativa dos volumes diários em Santarém quando comparados aos de Belterra. Tais diferenças podem estar associadas à natureza convectiva da precipitação tropical, fortemente influenciada por processos locais e de mesoescala, como células convectivas isoladas, linhas de instabilidade e efeitos orográficos de pequena escala.

A correlação moderada observada entre as séries indica que existe alguma coerência temporal na ocorrência dos eventos chuvosos, especialmente em períodos de maior atividade convectiva. Contudo, os elevados valores de erro (MAE e RMSE) e o coeficiente de eficiência negativo evidenciam que a estação de Belterra não é capaz de representar adequadamente os volumes diários de precipitação em Santarém, particularmente para eventos extremos. Esses resultados reforçam a

limitação do uso de proxies espaciais para precipitação em regiões tropicais, mesmo em áreas geograficamente próximas.

Figura 5 - Diagrama de dispersão dos totais diários de precipitação (mm) observados nas estações meteorológicas de Belterra (convencional) e Santarém (automática) no período de 2015 a 2025. A linha tracejada representa a relação 1:1, enquanto a linha contínua indica o ajuste de regressão linear entre as duas séries



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A Figura 6 apresenta a distribuição mensal das diferenças diárias (Santarém – Belterra) para a precipitação, temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmédia) e temperatura mínima (Tmin), sintetizadas por meio de boxplots. Essa abordagem permite avaliar não apenas o viés médio entre as estações, mas também

sua variabilidade sazonal, fornecendo uma visão mais detalhada da representatividade climática de Belterra ao longo do ano.

Para a precipitação, observa-se elevada assimetria e grande dispersão, especialmente nos meses associados à estação chuvosa (fevereiro a abril). As medianas próximas de zero indicam ausência de um viés mensal consistente, porém a ampla extensão dos quartis e a presença de valores extremos positivos e negativos evidenciam a alta variabilidade espacial dos eventos de chuva. Durante a estação seca, as diferenças tendem a se concentrar próximas de zero, refletindo a predominância de dias sem precipitação. Esses resultados reforçam que, embora a sazonalidade regional seja semelhante, a precipitação diária apresenta baixa representatividade espacial entre as estações, sobretudo em meses de maior atividade convectiva.

No caso da temperatura máxima (T_{max}), as diferenças mensais são predominantemente negativas ao longo de todo o ano, indicando que Santarém registra, em média, temperaturas máximas inferiores às de Belterra. Esse viés é mais pronunciado durante os meses centrais do ano, especialmente entre junho e agosto, quando as medianas atingem os valores mais negativos. A maior dispersão observada nesses meses sugere que, durante a estação seca, a T_{max} é particularmente sensível a diferenças locais de cobertura do solo, ventilação e umidade atmosférica, limitando a substituição direta entre as estações para essa variável.

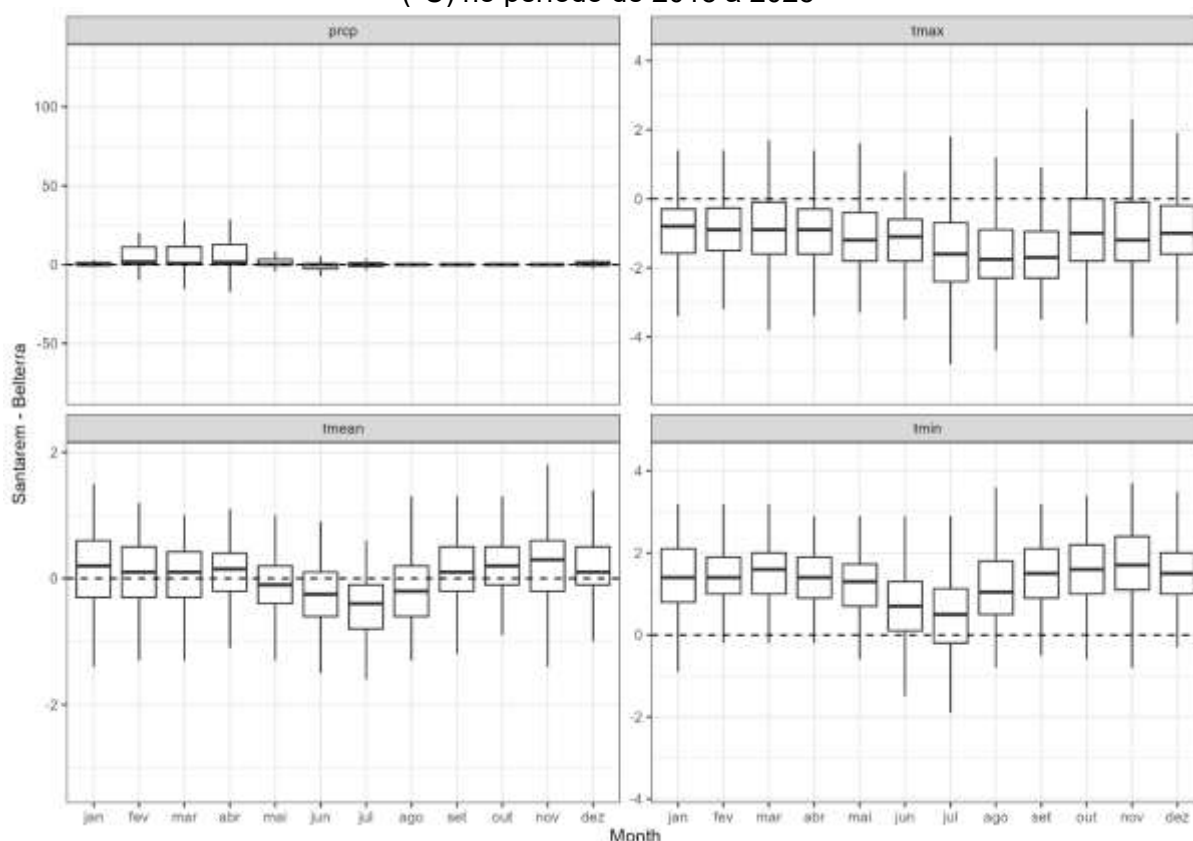
A temperatura média ($T_{média}$) apresenta o comportamento mais equilibrado entre todas as variáveis analisadas. As medianas mensais permanecem próximas de zero ao longo de todo o ano, com leve viés negativo durante o período seco (junho a agosto) e leve viés positivo no final do ano. A dispersão relativamente reduzida indica elevada estabilidade na relação entre as estações, corroborando os resultados das métricas globais e dos diagramas de dispersão, que apontam a $T_{média}$ como a variável mais bem representada espacialmente por Belterra.

Para a temperatura mínima (T_{min}), observa-se um viés positivo persistente ao longo de praticamente todos os meses, indicando que Santarém apresenta temperaturas mínimas sistematicamente mais elevadas do que Belterra. Esse viés é mais acentuado entre setembro e dezembro, período em que as medianas atingem seus maiores valores positivos. Tal padrão é consistente com a influência de fatores urbanos e microclimáticos, como maior retenção de calor noturno em Santarém, e

reforça a limitação do uso direto de Belterra como proxy para Tmin sem correções estatísticas.

De forma integrada, a Figura 6 evidencia que a representatividade de Belterra para Santarém é fortemente dependente da variável e da sazonalidade. Enquanto a temperatura média diária apresenta comportamento estável e consistente ao longo do ano, as temperaturas extremas e a precipitação exibem vieses sazonais e elevada variabilidade. Esses resultados reforçam a necessidade de abordagens diferenciadas para cada variável em estudos climáticos regionais, especialmente quando se busca estender séries temporais curtas por meio de estações vizinhas.

Figura 6 - Distribuição mensal das diferenças diárias (Santarém – Belterra) para a precipitação (mm), temperatura máxima (°C), temperatura média (°C) e temperatura mínima (°C) no período de 2015 a 2025



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A Figura 7 apresenta o ciclo mensal médio da precipitação, temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmédia) e temperatura mínima (Tmin) observadas nas estações meteorológicas de Belterra e Santarém no período de 2015

a 2025. De forma geral, ambas as estações reproduzem de maneira consistente o padrão sazonal climático típico do oeste do Pará, caracterizado por uma estação chuvosa bem definida no primeiro semestre e uma estação seca no segundo semestre, além de um ciclo térmico associado à variação anual da radiação solar e da nebulosidade.

Para a precipitação, observa-se que as duas estações capturam adequadamente a sazonalidade regional, com máximos concentrados entre fevereiro e abril e mínimos entre julho e setembro. No entanto, Santarém apresenta valores médios mensais sistematicamente superiores aos de Belterra durante o pico da estação chuvosa, enquanto diferenças menores são observadas na estação seca. Esse comportamento sugere que, embora a fase sazonal seja bem representada, a magnitude da precipitação mensal difere entre as estações, refletindo a influência de processos convectivos locais e reforçando as limitações já observadas na comparação diária.

No caso da temperatura máxima (T_{max}), ambas as estações exibem um ciclo anual semelhante, com valores mais elevados entre setembro e novembro e mínimos relativos no primeiro trimestre do ano. Belterra apresenta T_{max} médias mensais consistentemente mais elevadas do que Santarém ao longo de todo o ano, com diferenças mais pronunciadas durante a estação seca. Esse padrão é coerente com os vieses negativos identificados anteriormente e indica que fatores locais, como maior ventilação, influência fluvial e maior umidade atmosférica em Santarém, contribuem para a atenuação dos extremos diurnos de temperatura.

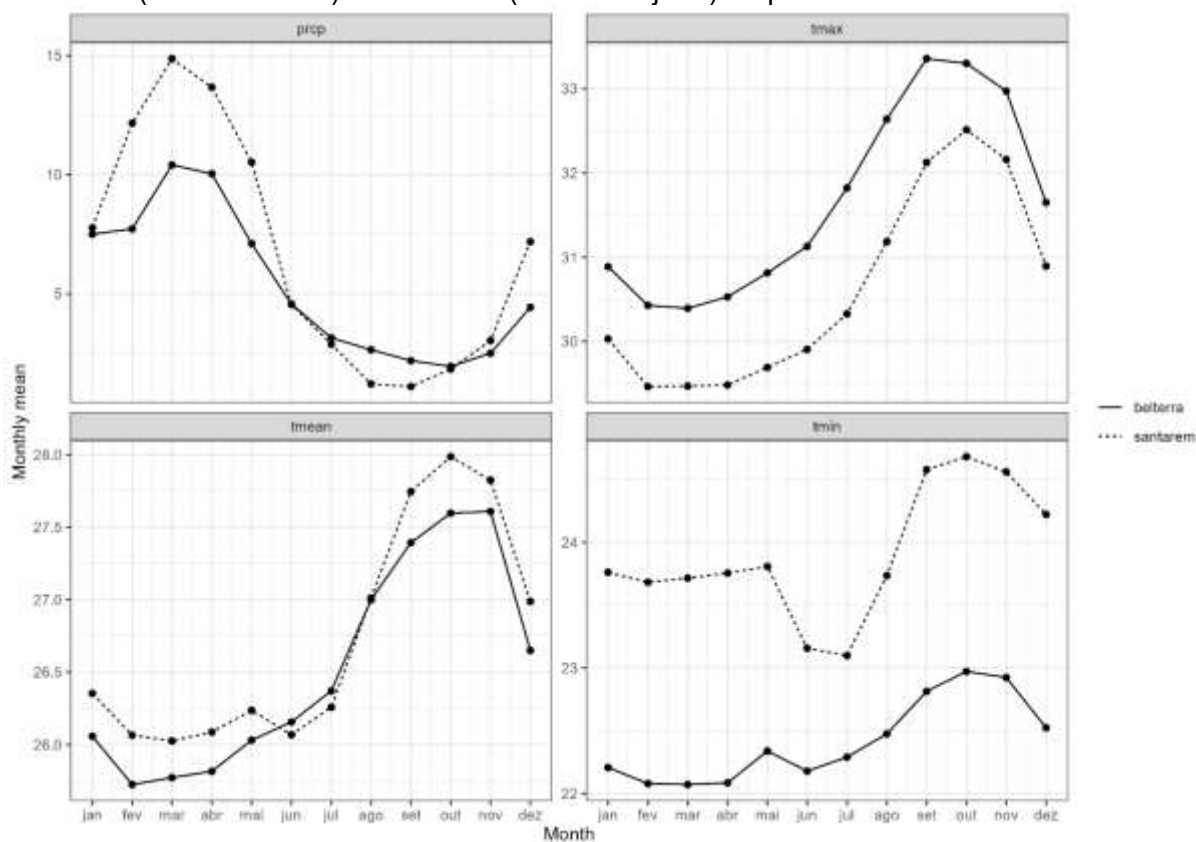
A temperatura média ($T_{média}$) apresenta elevada concordância entre as estações, tanto em termos de fase quanto de amplitude do ciclo anual. As curvas praticamente se sobrepõem durante grande parte do ano, com diferenças mensais reduzidas, especialmente entre maio e agosto. Pequenas discrepâncias são observadas no final da estação seca, quando Santarém tende a apresentar valores ligeiramente superiores. Esse comportamento reforça a robustez da $T_{média}$ como variável representativa e confirma os resultados das análises estatísticas globais e dos diagramas de dispersão.

Para a temperatura mínima (T_{min}), observa-se um ciclo anual semelhante em ambas as estações, com valores mais elevados entre setembro e novembro e menores durante o primeiro semestre. No entanto, Santarém apresenta T_{min} médias

mensais sistematicamente superiores às de Belterra ao longo de todo o ano, com diferenças mais acentuadas no período seco. Esse padrão é consistente com a influência de fatores urbanos e microclimáticos, como maior retenção de calor noturno em Santarém, e reforça a limitação do uso direto de Belterra como proxy para Tmin sem ajustes estatísticos.

De forma integrada, a Figura 7 evidencia que, embora Belterra reproduza adequadamente a fase e a forma do ciclo sazonal das variáveis meteorológicas em Santarém, existem diferenças sistemáticas na magnitude, especialmente para a precipitação e as temperaturas extremas. Em contraste, a temperatura média diária apresenta elevada estabilidade e concordância ao longo do ciclo anual, consolidando-se como a variável mais adequada para a representação climática de Santarém a partir da estação de Belterra.

Figura 7 - Ciclo mensal médio da precipitação (mm), temperatura máxima (°C), temperatura média (°C) e temperatura mínima (°C) observadas nas estações meteorológicas de Belterra (linha contínua) e Santarém (linha tracejada) no período de 2015 a 2025



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A Tabela 2 apresenta os quantis extremos (P5, mediana e P95) das variáveis meteorológicas observadas nas estações de Belterra e Santarém no período de 2015 a 2025, permitindo uma avaliação direta do comportamento dos extremos climáticos e da distribuição central das séries em ambas as localidades. A análise desses quantis complementa as métricas estatísticas globais ao evidenciar diferenças estruturais na magnitude e na assimetria das variáveis.

Para a temperatura máxima (Tmax), observa-se que Belterra apresenta valores sistematicamente mais elevados em todos os quantis analisados. O P5 indica que mesmo nos dias relativamente mais amenos, Belterra registra Tmax superiores às de Santarém, enquanto o P95 evidencia diferenças de aproximadamente 1 °C nos extremos quentes. A mediana também reflete esse deslocamento, confirmando que Santarém tende a apresentar máximas diárias mais baixas. Esse comportamento é consistente com os resultados de viés negativo e com os diagramas de dispersão, reforçando a influência de fatores locais, como maior umidade atmosférica e influência fluvial em Santarém, que atenuam os extremos diurnos de temperatura.

No caso da temperatura mínima (Tmin), o padrão é inverso. Santarém apresenta valores superiores aos de Belterra em todos os quantis, com diferenças particularmente expressivas no P95, onde a discrepância ultrapassa 2 °C. Esse resultado indica que os extremos noturnos mais quentes são significativamente mais frequentes em Santarém, o que é compatível com a maior retenção de calor durante a noite, possivelmente associada à urbanização e a características microclimáticas locais. A diferença observada na mediana reforça que esse aquecimento noturno não se restringe a eventos extremos, mas afeta toda a distribuição da Tmin.

A temperatura média (Tmédia) apresenta elevada similaridade entre as estações, especialmente nos quantis inferiores, onde o P5 é idêntico em ambas as localidades. As diferenças tornam-se ligeiramente mais evidentes na mediana e no P95, com Santarém apresentando valores discretamente superiores. Ainda assim, as discrepâncias são pequenas quando comparadas às observadas para Tmax e Tmin, confirmando que a Tmédia é a variável mais estável e melhor representada espacialmente entre as duas estações.

Para a precipitação diária, os quantis inferiores e a mediana são iguais a zero em ambas as estações, refletindo a predominância de dias sem chuva na série diária. Entretanto, o P95 revela diferenças substanciais, com Santarém apresentando valores

significativamente mais elevados do que Belterra. Esse resultado indica que os eventos de chuva mais intensa tendem a ser mais extremos em Santarém, reforçando a elevada variabilidade espacial da precipitação na região e corroborando os resultados obtidos nos diagramas de dispersão e nas métricas de erro, que apontam baixa representatividade espacial da precipitação diária.

De forma integrada, a Tabela 2 evidencia que as diferenças entre Belterra e Santarém são mais pronunciadas nos extremos climáticos, especialmente para as temperaturas máxima e mínima e para a precipitação intensa. Enquanto a temperatura média apresenta elevada consistência entre as estações, os quantis extremos reforçam as limitações do uso direto de Belterra como proxy para Santarém em análises de extremos térmicos e pluviométricos. Esses resultados têm implicações importantes para estudos de impactos climáticos, indicando que a extensão de séries temporais deve ser feita com cautela e, quando necessário, acompanhada de ajustes estatísticos específicos para cada variável.

Tabela 2 – Quantis extremos (P5, mediana e P95) das variáveis meteorológicas observadas nas estações de Belterra e Santarém (2015–2025)

Variável	Estação	P5	Mediana	P95
Tmax	Belterra	28,6	31,7	34,6
Tmax	Santarém	27,7	30,6	33,6
Tmin	Belterra	21,5	22,5	23,5
Tmin	Santarém	22,1	23,9	25,7
Tmédia	Belterra	24,9	26,4	28,3
Tmédia	Santarém	24,9	26,7	28,9
Precip.	Belterra	0,0	0,0	27,6
Precip.	Santarém	0,0	0,0	35,6

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros dos modelos de regressão linear simples ajustados entre as observações diárias da estação de Belterra (variável independente) e da estação de Santarém (variável dependente) no período de 2015 a 2025. Esses modelos permitem avaliar quantitativamente o grau de dependência linear entre as séries, bem como a capacidade de Belterra em explicar a variabilidade observada em Santarém para cada variável meteorológica.

Para a temperatura máxima (T_{max}), o modelo apresenta inclinação inferior à unidade (0,75) e intercepto positivo (6,86 °C), indicando que aumentos na T_{max} em Belterra resultam em incrementos menos intensos em Santarém. Esse comportamento confirma a atenuação sistemática dos extremos diurnos em Santarém, já evidenciada pelas métricas globais, diagramas de dispersão e quantis extremos. O coeficiente de determinação moderado ($R^2 = 0,59$) indica que cerca de 59% da variabilidade diária da T_{max} em Santarém é explicada por Belterra, sugerindo boa coerência temporal, mas limitações na reprodução dos valores absolutos. O p-valor altamente significativo confirma a robustez estatística da relação.

No caso da temperatura mínima (T_{min}), a inclinação próxima da unidade (0,93) indica que a variabilidade diária é parcialmente transmitida entre as estações. No entanto, o intercepto elevado (2,94 °C) evidencia um deslocamento sistemático positivo, indicando que Santarém apresenta T_{min} consistentemente mais altas do que Belterra, independentemente da magnitude observada. O baixo valor de R^2 (0,28) revela que apenas uma fração limitada da variabilidade diária da T_{min} em Santarém é explicada por Belterra, refletindo a forte influência de fatores locais e urbanos sobre o regime térmico noturno. Esses resultados reforçam que a T_{min} é a variável menos representativa para extrapolação direta entre as estações.

A temperatura média ($T_{média}$) apresenta o melhor desempenho entre todas as variáveis analisadas. A inclinação praticamente unitária (1,01) e o intercepto próximo de zero (-0,28 °C) indicam uma relação quase ideal entre as séries, com mínima necessidade de correção sistemática. O elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,77$) demonstra que a maior parte da variabilidade diária da $T_{média}$ em Santarém é explicada pelos valores observados em Belterra. Esse resultado confirma, de forma quantitativa, que a temperatura média diária é a variável mais robusta para a representação climática de Santarém a partir da estação de Belterra.

Para a precipitação diária, o modelo apresenta inclinação inferior à unidade (0,79) e intercepto positivo (2,92 mm), indicando que, mesmo em dias com baixos acumulados em Belterra, Santarém pode registrar precipitação, e que os incrementos em Belterra não se traduzem linearmente em Santarém. O baixo R^2 (0,33) evidencia a fraca capacidade explicativa do modelo, refletindo a alta variabilidade espacial e a natureza convectiva da precipitação na região amazônica. Apesar da significância estatística do ajuste, a regressão possui utilidade limitada para fins preditivos.

De forma integrada, os resultados da Tabela 3 reforçam que a qualidade da relação linear entre Belterra e Santarém é fortemente dependente da variável meteorológica. Enquanto a temperatura média diária apresenta elevada robustez estatística e física, as temperaturas extremas e, sobretudo, a precipitação exibem limitações significativas. Esses achados indicam que modelos de regressão podem ser utilizados com segurança para ajustes da Tmédia, mas devem ser aplicados com cautela — ou mesmo evitados — para Tmin, Tmax e precipitação, especialmente em estudos voltados a extremos climáticos e impactos ambientais.

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos de regressão linear ajustados entre as observações diárias de Belterra (variável independente) e Santarém (variável dependente)

Variável	Intercepto	Inclinação	R ²	p-valor
Tmax	6,86	0,75	0,59	< 0,001
Tmin	2,94	0,93	0,28	< 0,001
Tmédia	-0,28	1,01	0,77	< 0,001
Precip.	2,92	0,79	0,33	< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A comparação entre as estações meteorológicas de Belterra e Santarém evidenciou que a representatividade espacial entre localidades próximas é fortemente dependente da variável meteorológica analisada, bem como da escala temporal considerada. Esse resultado está em consonância com estudos que demonstram que variáveis atmosféricas respondem de maneira diferenciada às forçantes regionais e locais, especialmente em regiões tropicais e de elevada heterogeneidade ambiental (Bessah *et al.*, 2022; Adeyeri *et al.*, 2022).

Os resultados indicaram que a temperatura média diária apresenta elevada robustez espacial entre as estações, com viés praticamente nulo, alta correlação e coeficiente de determinação elevado. Esse comportamento sugere que a Tmédia é menos sensível a efeitos microclimáticos locais quando comparada às temperaturas extremas, refletindo predominantemente o controle regional da radiação solar e da circulação atmosférica de grande escala. Achados semelhantes são reportados em estudos que destacam a maior estabilidade estatística da temperatura média em análises espaciais e de modelagem climática, mesmo em ambientes com topografia e uso do solo distintos (Flückiger *et al.*, 2022; Rajesh *et al.*, 2025).

Em contraste, as temperaturas máxima e mínima apresentaram vieses sistemáticos de sinais opostos, indicando processos físicos distintos atuando nos extremos térmicos diurnos e noturnos. A atenuação da T_{max} em Santarém em relação a Belterra pode estar associada à maior influência fluvial, maior umidade atmosférica e maior nebulosidade, fatores que reduzem o aquecimento diurno. Por outro lado, a elevação consistente da T_{min} em Santarém sugere maior retenção de calor noturno, possivelmente relacionada à urbanização e às características térmicas da superfície. Estudos realizados em diferentes contextos climáticos e urbanos apontam que extremos térmicos são particularmente sensíveis a efeitos locais, como uso do solo, cobertura vegetal e estrutura urbana (Cheng *et al.*, 2022; Chelani & Gautam, 2022; Tomczyk *et al.*, 2025).

A análise dos quantis extremos reforçou essa interpretação, ao demonstrar que as discrepâncias entre as estações se intensificam nos percentis superiores e inferiores da distribuição, especialmente para T_{max} e T_{min} . Esse comportamento indica que a extrapolação espacial entre estações pode ser aceitável para valores centrais, mas se torna progressivamente menos confiável à medida que se avança para os extremos. Resultados semelhantes são discutidos por estudos que avaliam tendências climáticas e variabilidade extrema, destacando que extremos térmicos tendem a amplificar diferenças locais e microclimáticas (Rahaman *et al.*, 2024; Aschale *et al.*, 2023).

A precipitação diária apresentou o menor grau de representatividade espacial entre as estações, com elevada dispersão, baixos coeficientes de eficiência e diferenças expressivas nos quantis superiores. Esse resultado reflete a natureza altamente localizada e convectiva da precipitação na região tropical, onde eventos intensos podem ocorrer de forma isolada mesmo em distâncias relativamente curtas. A literatura aponta de forma consistente que a precipitação é a variável meteorológica mais difícil de ser representada espacialmente, exigindo cautela em análises comparativas e em processos de regionalização climática (Bessah *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2025).

Os modelos de regressão linear confirmaram essas diferenças de comportamento entre as variáveis. Enquanto a $T_{média}$ apresentou parâmetros próximos da relação ideal (inclinação unitária e intercepto próximo de zero), T_{max} , T_{min} e precipitação exibiram interceptos elevados e inclinações inferiores à unidade,

indicando limitações estruturais na capacidade preditiva direta. Embora estatisticamente significativos, esses modelos apresentam utilidade prática restrita para variáveis fortemente influenciadas por processos locais, conforme também discutido em estudos que utilizam regressões e modelos estatísticos para variáveis meteorológicas e ambientais (Ebtehaj *et al.*, 2023; Levi & Broday, 2024).

A análise do ciclo mensal médio e das diferenças mensais mostrou que Belterra reproduz adequadamente a fase sazonal das variáveis em Santarém, mas apresenta diferenças sistemáticas na magnitude, especialmente durante a estação seca para as temperaturas extremas e durante a estação chuvosa para a precipitação. Esse comportamento é coerente com estudos que indicam que a sazonalidade climática pode ser bem representada regionalmente, mesmo quando há limitações na reprodução dos valores absolutos (Rajesh *et al.*, 2025; Yin *et al.*, 2022).

A coerência do ciclo sazonal entre as estações reflete o controle regional exercido pelos principais sistemas atuantes sobre a Amazônia oriental. Em particular, a intensificação das chuvas no primeiro semestre é consistente com a atuação e migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), enquanto a redução de precipitação no segundo semestre acompanha o enfraquecimento da convecção profunda e o predomínio de condições mais estáveis. Ainda assim, a precipitação diária mantém forte variabilidade espacial, pois eventos convectivos e sistemas organizados (por exemplo, linhas de instabilidade e sistemas de mesoescala) podem produzir acumulados intensos de forma localizada, o que ajuda a explicar a baixa representatividade diária entre Belterra e Santarém, sobretudo nos extremos.

Do ponto de vista aplicado, os resultados deste estudo indicam que a estação de Belterra pode ser utilizada de forma segura e robusta para a representação da temperatura média diária em Santarém, inclusive para análises climatológicas de longo prazo. Entretanto, o uso direto dessa estação como proxy para temperaturas extremas e precipitação diária deve ser feito com cautela, preferencialmente acompanhado de ajustes estatísticos ou restrito a análises qualitativas de variabilidade sazonal. Essa distinção é fundamental para aplicações em estudos ambientais, hidrológicos e de impactos climáticos, nos quais a escolha inadequada da variável pode comprometer a interpretação dos resultados (Danek *et al.*, 2022; Amnuaylojaroen *et al.*, 2023; Sadeghi *et al.*, 2022).

De forma integrada, a discussão reforça que a representatividade climática entre estações próximas não é universal, mas variável-específica, dependente dos processos físicos dominantes e da escala de análise. Esses achados contribuem para o debate sobre a extensão de séries temporais curtas em regiões com limitações observacionais, destacando a necessidade de abordagens metodológicas diferenciadas para cada variável meteorológica, conforme também apontado por estudos recentes em climatologia aplicada e modelagem ambiental (Adeyeri *et al.*, 2022; Wong *et al.*, 2023; Ahmed *et al.*, 2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a representatividade climática entre as estações do INMET de Belterra (convencional) e Santarém (automática) no período comum de 2015–2025, considerando variáveis térmicas e precipitação diária. Os resultados indicam que a representatividade é dependente da variável: a temperatura média diária apresentou elevada concordância e pode ser utilizada com segurança como proxy regional. Em contraste, Tmax e Tmin exibiram vieses sistemáticos compatíveis com efeitos locais, diferenças de entorno e particularidades de medição, recomendando cautela e, quando necessário, correções estatísticas específicas. A precipitação diária apresentou baixa representatividade, sobretudo nos eventos mais intensos, refletindo o caráter convectivo e espacialmente heterogêneo do regime de chuvas. De forma aplicada, os achados reforçam que a extensão de séries curtas deve ser variável-específica e baseada em avaliação quantitativa, especialmente quando o foco envolve extremos climáticos.

A temperatura média diária apresentou o melhor desempenho em todas as análises realizadas, com viés praticamente nulo, elevada correlação, alto coeficiente de determinação e parâmetros de regressão próximos da relação ideal. Esses resultados indicam que Belterra é altamente representativa da temperatura média diária de Santarém, permitindo seu uso confiável em estudos climatológicos regionais, análises de variabilidade sazonal e interanual e aplicações ambientais que demandem séries temporais longas.

Em contraste, as temperaturas extremas exibiram limitações importantes. A temperatura máxima diária apresentou viés negativo sistemático, indicando atenuação

dos extremos diurnos em Santarém, enquanto a temperatura mínima diária apresentou viés positivo persistente, refletindo maior retenção de calor noturno. Esses comportamentos foram reforçados pelos quantis extremos, diagramas de dispersão, ciclos mensais e modelos de regressão, evidenciando que Tmax e Tmin não devem ser extrapoladas diretamente a partir de Belterra sem a aplicação de correções estatísticas específicas.

A precipitação diária foi a variável com menor representatividade espacial, caracterizada por elevada dispersão, baixos coeficientes de eficiência e diferenças expressivas nos quantis superiores. Embora a sazonalidade regional seja bem capturada, os volumes diários e os eventos extremos de chuva apresentam forte controle local, tornando inadequado o uso direto de Belterra como proxy para Santarém em estudos hidrológicos, de extremos pluviométricos ou de impactos associados à precipitação.

De forma integrada, os resultados indicam que a estação de Belterra pode ser utilizada de maneira segura e robusta apenas para a temperatura média diária, enquanto as demais variáveis requerem abordagens diferenciadas, como ajustes estatísticos, uso complementar de produtos de reanálise ou dados de sensoriamento remoto. Esses achados reforçam a importância de avaliações quantitativas detalhadas antes da extensão de séries temporais em regiões com limitações observacionais e contribuem para o planejamento de estudos climáticos e ambientais no oeste do Pará, onde a disponibilidade de dados de longo prazo é um desafio recorrente.

Por fim, este trabalho destaca que a representatividade climática entre estações próximas não é garantida a priori, sendo condicionada pelos processos físicos dominantes, pela escala temporal e pelas características locais de cada sítio de medição. Essa constatação tem implicações diretas para estudos futuros que busquem integrar ou estender séries meteorológicas na Amazônia, ressaltando a necessidade de abordagens metodológicas cuidadosas e específicas para cada variável analisada.

REFERÊNCIAS

ADEYERI, Olusegun Emmanuel; LAUX, Patrick; ISHOLA, Kayode Abiodun; ZHOU, Wei; BALOGUN, Ismaila A.; ADEYEWA, Zainab D.; KUNSTMANN, Harald.

Homogenising meteorological variables: impact on trends and associated climate indices. *Journal of Hydrology*, v. 607, p. 127585, 2022.

AHMED, Abu A. M.; JUI, S. J. J.; CHOWDHURY, Md. A. I.; AHMED, Omar; SUTRADHA, Anindita. The development of dissolved oxygen forecast model using hybrid machine learning algorithm with hydro-meteorological variables. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 3, p. 7851–7873, 2023.

AMNUAYLOJAROEN, Teerachai; KAEWKANCHANAWONG, Piyapong; PANPENG, Piyaporn. Distribution and meteorological control of PM_{2.5} and its effect on visibility in Northern Thailand. *Atmosphere*, v. 14, n. 3, p. 538, 2023.

ASCHALE, Teshome Mekonnen; PERES, Daniel J.; GULLOTTA, Antonio; SCIUTO, Giuseppe; CANCELLIERE, Antonino. Trend analysis and identification of the meteorological factors influencing reference evapotranspiration. *Water*, v. 15, n. 3, p. 470, 2023.

BESSAH, Emmanuel; AMPONSAH, William; ANSAH, Samuel O.; AFRIFA, Anthony; YAHAYA, Bashiru; WEMEGAH, Charles S.; AGYARE, William A. Climatic zoning of Ghana using selected meteorological variables for the period 1976–2018. *Meteorological Applications*, v. 29, n. 1, e2049, 2022.

CHENG, Xiaoyan; PENG, Jun; DONG, Jing; LIU, Yanjun; WANG, Yaping. Non-linear effects of meteorological variables on cooling efficiency of African urban trees. *Environment International*, v. 169, p. 107489, 2022.

CHELANI, A. B.; GAUTAM, S. The influence of meteorological variables and lockdowns on COVID-19 cases in urban agglomerations of Indian cities. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 36, n. 9, p. 2949–2960, 2022.

DANEK, Tomasz; WEGLINSKA, Ewa; ZAREBA, Marcin. The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration: a geostatistical case study from Krakow, Poland. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 11050, 2022.

EBTEHAJ, Iraj; BONAKDARI, Hossein; SAMUI, Pijush; GHARABAGHI, Bahram. Multi-depth daily soil temperature modeling: meteorological variables or time series? *Theoretical and Applied Climatology*, v. 151, n. 3–4, p. 989–1012, 2023.

FLÜCKIGER, Benjamin; KLOOG, Itai; RAGETTLI, Martina S.; EEFTENS, Marloes; RÖÖSLI, Martin; DE HOOGH, Kees. Modelling daily air temperature at a fine spatial resolution dealing with challenging meteorological phenomena and topography in Switzerland. *International Journal of Climatology*, v. 42, n. 12, p. 6413–6428, 2022.

KALASHNIKOV, Dmitri A.; ABATZOGLOU, John T.; NAUSLAR, Nicholas J.; SWAIN, Daniel L.; TOUMA, Dalia; SINGH, Deepti. Meteorological and geographical factors

associated with dry lightning in central and northern California. *Environmental Research: Climate*, v. 1, n. 2, p. 025001, 2022.

LEVI, Yair; BRODAY, David M. Revealing causality in the associations between meteorological variables and air pollutant concentrations. *Environmental Pollution*, v. 345, p. 123526, 2024.

LIU, Yifan; LU, Hao; TIAN, Peng; QIU, Lijuan. Evaluating the effects of dams and meteorological variables on riparian vegetation NDVI in the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, v. 831, p. 154933, 2022.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V.. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

RAHAMAN, Md. Habibur; SAHA, Tapas K.; MASROOR, Md.; ROSHANI; SAJJAD, Haroon. Trend analysis and forecasting of meteorological variables in the lower Thoubal river watershed, India using non-parametrical approach and machine learning models. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 10, n. 1, p. 551–577, 2024.

RAJESH, A. C.; SHAJI, A. M.; REMA, K. P. Spatial and temporal trends of future meteorological variables for 21st century over India: approach with CMIP6 climatic models. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, p. 100170, 2025.

SADEGHI, Behnam; GHAREMANLOO, Mohammad; MOUSAVINEZHAD, Saeid; LOPS, Yann; POUYAEI, Ali; CHOI, Yongil. Contributions of meteorology to ozone variations: application of deep learning and the Kolmogorov-Zurbenko filter. *Environmental Pollution*, v. 310, p. 119863, 2022.

TIAN, Qiang; LU, Jun; CHEN, Xia. An innovative method for measuring the hysteresis effects of soil moisture on meteorological variables at various time scales and climate conditions. *Geo-Spatial Information Science*, v. 28, n. 2, p. 671–684, 2025.

TOMCZYK, Szymon; WERNER, Marek; MALKIEWICZ, Mariusz; BOSIACKA, Beata; GREWLING, Łukasz; GRINN-GOFRON, Agnieszka; ZIEMIANIN, Michał. Influence of meteorological conditions and climate on pollen season of the early-flowering woody taxa in Poland, Central Europe. *International Journal of Biometeorology*, p. 1–13, 2025.

WONG, Pei-Yu; SU, Hsiang-Jung; LUNG, Shih-Chun Candice; WU, Chih-Da. An ensemble mixed spatial model in estimating long-term and diurnal variations of PM_{2.5} in Taiwan. *Science of the Total Environment*, v. 866, p. 161336, 2023.

YIN, Cheng; ZHAO, Wenwu; PEREIRA, Paulo. Meteorological factors' effects on COVID-19 show seasonality and spatiality in Brazil. *Environmental Research*, v. 208, p. 112690, 2022.