

TEMPERATURA DO AR EM CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA: SEIS DÉCADAS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

AIR TEMPERATURE IN CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA: SIX DECADES OF CLIMATE CHANGE

TEMPERATURA DEL AIRE EN CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA: SEIS DÉCADAS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Ludmila Luz Braga
Universidade do Estado do Pará, Brasil
<http://orcid.org/0009-0004-2529-4612>
bragaludmila29@gmail.com

Francisco Emerson Vale Costa
Universidade do Estado do Pará, Brasil
<http://orcid.org/0000-0003-1567-8861>
emersonvale@uepa.br

Carlos Jorge Nogueira de Castro
Universidade do Estado do Pará, Brasil
<http://orcid.org/0000-0003-0153-1551>
carlos.castro@uepa.br

Cleber Assis dos Santos
Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM), Brasil
<http://orcid.org/0000-0003-3240-7238>
cleber.santos@sipam.gov.br

RESUMO

As dinâmicas socioambientais globais têm sido amplamente discutidas por agências de pesquisa internacionais, que indicam uma tendência de aumento da temperatura média em escala mundial. No Brasil, devido à sua vasta extensão territorial e diversidade de ecossistemas, essas dinâmicas apresentam características particulares, o que reforça a necessidade de estudos em escalas regionais e locais para compreender melhor seus impactos e atenuantes. O *objetivo* deste artigo consiste em analisar a tendência de mudanças na temperatura do ar em Conceição do Araguaia no sudeste do Pará, nos últimos 62 anos. A metodologia consiste em: I) aquisição de dados metodológicos com elementos geo-estatísticos; II) Aplicação em testes Shapiro-Wilk, Mann-Kendall e Pettitt (Shapiro, Wilk, 1965; Hamed, Ramachandra Rao, 1998; Villarini, 2016); III) análise da sazonalidade da temperatura do ar. Ao fim destes, os resultados apontam para a elevação das temperaturas máximas

registradas, a temperatura média e máxima do ar, tendo dentre os principais elementos a transformação expressiva da cobertura florestal do município, com a expansão das áreas agropecuárias e urbanas ao longo dos últimos sessenta e dois anos.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Temperatura do ar; Sudeste Paraense; Conceição do Araguaia.

ABSTRACT

Global socio-environmental dynamics have been widely discussed by international research agencies, which indicate a trend of increasing average temperature worldwide. In Brazil, due to its vast territorial extension and diversity of ecosystems, these dynamics present particular characteristics, which reinforces the need for studies at regional and local scales to better understand their impacts and attenuating factors. The objective of this article is to analyze the trend of changes in air temperature in Conceição do Araguaia in southeastern Pará, over the last 62 years. The methodology consists of: I) acquisition of methodological data with geo-statistical elements; II) Application in Shapiro-Wilk, Mann-Kendall and Pettitt tests (Shapiro, Wilk, 1965; Hamed, Ramachandra Rao, 1998; Villarini, 2016); III) analysis of air temperature seasonality. At the end of these, the results point to the elevation of recorded maximum temperatures, average and maximum air temperature, with the expressive transformation of the municipality's forest cover, with the expansion of agricultural and urban areas over the last sixty-two years, among the main elements.

Keywords: Climate Change; Air Temperature; Southeastern Pará; Conceição do Araguaia.

RESUMEN

Las dinámicas socioambientales globales han sido ampliamente discutidas por agencias de investigación internacionales, que indican una tendencia de aumento de la temperatura promedio a escala mundial. En Brasil, debido a su vasta extensión territorial y diversidad de ecosistemas, estas dinámicas presentan características particulares, lo que refuerza la necesidad de estudios a escala regional y local para comprender mejor sus impactos y factores atenuantes. El objetivo de este artículo es analizar la tendencia de cambios en la temperatura del aire en Conceição do Araguaia en el sureste de Pará, en los últimos 62 años. La metodología consiste en: I) adquisición de datos metodológicos con elementos geoestadísticos; II) Aplicación en pruebas de Shapiro-Wilk, Mann-Kendall y Pettitt (Shapiro, Wilk, 1965; Hamed, Ramachandra Rao, 1998; Villarini, 2016); III) análisis de la estacionalidad de la temperatura del aire. Al final de estos, los resultados apuntan a la elevación de las temperaturas máximas registradas, la temperatura promedio y máxima del aire, teniendo entre los principales elementos la transformación expresiva de la cobertura forestal del municipio, con la expansión de las áreas agropecuarias y urbanas a lo largo de los últimos sesenta y dos años.

Palabras clave: Cambio Climático; Temperatura del Aire; Sudeste Paraense; Conceição do Araguaia.

Introdução

A tendência do aumento da temperatura do ar pode ser definida como uma mudança estatisticamente significativa nas principais variáveis meteorológicas, tais como: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, além de outros fenômenos climáticos que ocorrem durante um período superior a 30 anos (Mallakpour & Villarini, 2016). As emissões antropogênicas de aerossóis e gases provenientes da queima de combustíveis fósseis têm sido reconhecidas como a principal causa das mudanças climáticas globais, embora as emissões naturais também contribuam para as mudanças observadas ao longo do século XX (IPCC, 2022). Estas alterações resultam no aumento da temperatura média global, ocasionando consequências significativas para os ecossistemas, biodiversidade, culturas e sociedades (Anderson et al., 2021).

De acordo com os últimos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a dinâmica climática tem passado por mudanças profundas que afetam muitos fatores relacionados ao clima (IPCC, 2021). À medida que as mudanças climáticas se tornam mais evidentes e seus impactos se fazem sentir em escala global, a necessidade de investigar e compreender as tendências climáticas em nível local se torna ainda mais premente (Haines et al., 2006). O município de Conceição do Araguaia, situado na região sudeste do estado do Pará, apresenta um contexto único para o estudo das tendências de temperatura. Sua localização estratégica na região amazônica, uma das áreas mais biodiversas e ecologicamente importantes do mundo, torna essencial uma análise detalhada das tendências locais de temperatura (Silva et al., 2023).

Ao longo das décadas, o município de Conceição do Araguaia tem enfrentado mudanças significativas em seus padrões climáticos, com impactos diretos nas atividades humanas, na agricultura, na biodiversidade e na qualidade de vida das comunidades locais (Streck & Alberto, 2006). Compreender a evolução desses padrões ao longo do tempo e identificar possíveis causas e tendências é crucial para orientar políticas públicas e estratégias de adaptação que possam mitigar os efeitos adversos das mudanças na temperatura do ar na região (McFarland et al., 2015). Por meio da análise de dados meteorológicos históricos e de estudos estatísticos paramétricos e não

paramétricos, é possível identificar padrões claros de aumento das temperaturas máximas, mínimas e médias do ar, bem como possíveis pontos de ruptura e tendências significativas (González-Estrada et al., 2022).

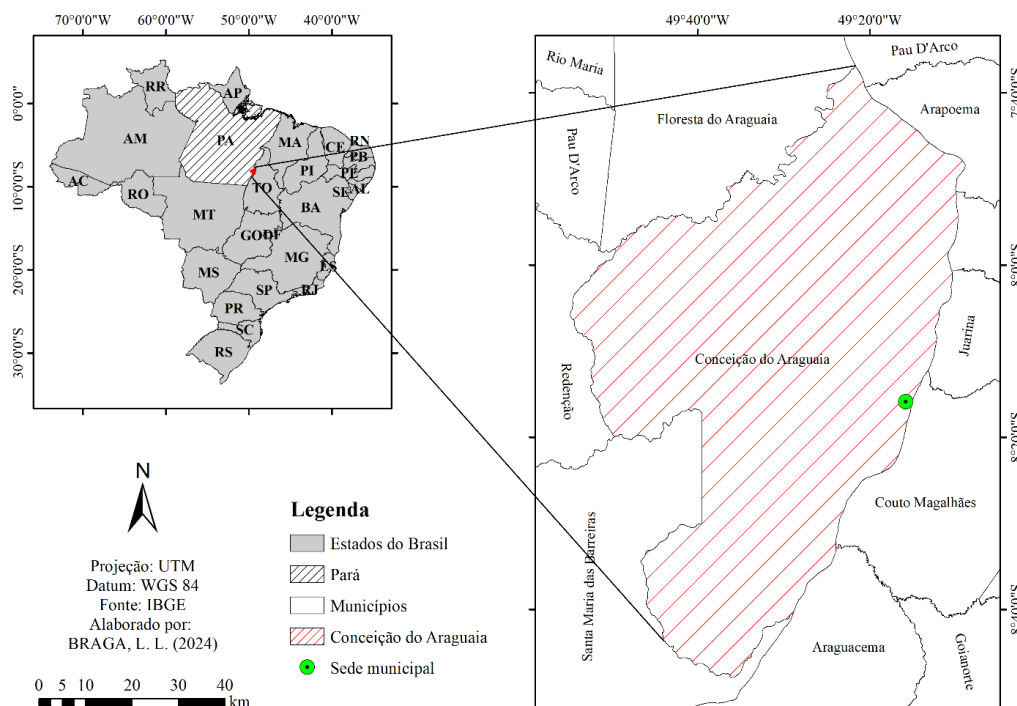
As mudanças na temperatura do ar podem ser influenciadas por uma série de fatores, tanto naturais quanto antropogênicos. Entre os fatores antropogênicos, destacam-se as atividades humanas que resultam na emissão de gases de efeito estufa, como a queima de combustíveis fósseis e a mudança no uso da terra (Marques, 2022). A urbanização e a substituição de áreas vegetadas por cobertura do solo, como pavimentação asfáltica, alteram as características biofísicas do solo e influenciam os padrões de temperatura local (Anderson et al., 2021). Além disso, a radiação solar e suas variações também desempenham um papel na modificação das temperaturas (Allen, 1997).

Estudos têm mostrado que a elevação das temperaturas pode desencadear uma série de consequências ambientais e socioeconômicas (Meehl et al., 2000). A elevação nas temperaturas pode intensificar eventos climáticos extremos, como ondas de calor e furacões, e agravar o aquecimento global, podendo desencadear o derretimento das calotas polares e o aumento do nível do mar (Ummenhofer & Meehl, 2017). Essas mudanças têm implicações profundas na biodiversidade, na agricultura e na disponibilidade de recursos hídricos, exigindo uma resposta coordenada e urgente para mitigar os impactos adversos e promover a adaptação sustentável às mudanças climáticas (Akbari et al., 2015).

Portanto, este trabalho propõe-se a investigar e analisar as mudanças na temperatura do ar ocorridas no município de Conceição do Araguaia ao longo das últimas décadas, com foco especial nas tendências de temperatura do ar. A sistematização de dados meteorológicos históricos permitirá uma compreensão detalhada dessas tendências e dos fatores que contribuem para essas mudanças, fornecendo subsídios importantes para a tomada de decisões informadas e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de adaptação e mitigação (Fleury et al., 2019).

Diante do exposto, este trabalho busca responder a seguinte pergunta científica: Há uma tendência significativa de aumento da temperatura do ar no município de Conceição do Araguaia - PA ao longo dos últimos 62 anos?

O município de Conceição do Araguaia está localizado no estado do Pará, na região sudeste do estado (figura 1). Localizado no quadrante 7°36'53" S e 8°47'56" S; 49°54'51" O e 49°08'52" O.

Figura 1 – Localização geográfica do município de Conceição do Araguaia – PA.

Fonte: Braga (2024).

O centro de sua sede municipal está localizado na latitude 08°15'28" S e longitude 49°15'53" O, estando a uma altitude de 165 metros acima do nível do mar. O município possui uma população estimada de 44.765 habitantes, distribuídos em 5.829 km² de extensão territorial (IBGE, 2024). A região normalmente apresenta um clima tropical, caracterizado por altas temperaturas e estações chuvosas e secas distintas. Quanto à topografia, a região onde está situada Conceição do Araguaia é geralmente plana, com terrenos levemente ondulados. Faz parte do Tocantins – Araguaia, caracterizada por densas florestas tropicais e uma intrincada rede de rios e cursos de água.

Material e métodos

A coleta dos dados meteorológicos foi realizada com base em fontes secundárias, especificamente os registros disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram considerados os dados diários de temperatura do ar, incluindo temperatura média, máxima e mínima. A série temporal abrange o período de 1961 a 2022, proporcionando uma base robusta para análises espaço-temporais.

Os dados adquiridos foram submetidos a processamento em ambiente laboratorial, utilizando técnicas específicas de tratamento e análise. Esse processo permitiu a organização e consolidação das informações em formatos adequados para os objetivos da pesquisa, assegurando a integridade e consistência das séries temporais. As análises realizadas visaram identificar padrões, tendências e variações espaciais e temporais das variáveis meteorológicas ao longo do tempo, com ênfase nas suas implicações para o contexto geográfico estudado.

Para análise do uso e cobertura da terra, foram considerados dados de uso e cobertura da terra, estes foram obtidos por meio da 8ª versão do MapBiomas (Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra por Biomas do Brasil)⁷. O período analisado abrange de 1985 a 2022⁸, fornecendo um panorama detalhado das transformações ocorridas no entorno do município de Conceição do Araguaia – PA. Os dados foram processados utilizando técnicas de análise espacial e estatística, permitindo uma compreensão mais profunda das dinâmicas ambientais e suas implicações climáticas na área de estudo.

O software ArcMAP 10.5 foi adotado para o processamento dos dados rastreados (formato .tif) de uso e cobertura da terra. O conjunto de dados importados foram organizados em camadas georreferenciadas. Foi executada uma extração do uso e cobertura da terra em um buffer com raio de 10 km, a partir do centro da sede municipal, para identificar a porcentagem da área desmatada⁹. O uso desses dados visa identificar as mudanças na cobertura vegetal e o grau de desmatamento ao longo do período estudado. A análise focou em mensurar a proporção das áreas desmatadas e suas variações temporais, permitindo, assim, a avaliação de possíveis correlações entre as alterações no uso do solo e as variações de temperatura do ar observadas no município.

Para análise estatística será adotada uma análise descritiva simples, com base em médias, acumulados e percentis. Além disso, também foram adotados os testes estatísticos de Shapiro-Wilk e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Pettitt.

Teste de Shapiro-Wilk

7 Disponível em sua plataforma oficial (<https://brasil.mapbiomas.org>).

8 A obtenção dos dados foi realizada por meio da plataforma Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>), que permite acesso a grandes volumes de dados geoespaciais e facilita o processamento remoto.

9 Isso permitiu visualizar as mudanças espaciais e percentuais na área desmatada no entorno de Conceição do Araguaia – PA.

O teste de Shapiro-Wilk é um teste estatístico utilizado para verificar se um conjunto de dados segue uma distribuição normal. Ele avalia se os dados se assemelham a uma distribuição gaussiana, que é fundamental em muitos métodos estatísticos. Ele calcula uma estatística W , que é usada para testar a hipótese nula de que os dados são provenientes de uma população com distribuição normal. Se o valor- p associado ao teste for maior que um determinado limite (geralmente 0,05), a hipótese nula de normalidade não é rejeitada, indicando que os dados podem ser considerados como provenientes de uma distribuição normal (González-Estrada et al., 2022).

Desenvolvido por Samuel Shapiro e Martin Wilk em 1965 (Shapiro & Wilk, 1965), este teste é baseado na comparação entre os valores observados e os valores esperados de uma distribuição normal. A hipótese nula (H_0) do teste afirma que os dados são normalmente distribuídos, enquanto a hipótese alternativa (H_1) sugere que os dados não seguem uma distribuição normal.

O teste de Shapiro-Wilk é utilizado para verificar se uma amostra de dados segue uma distribuição normal. A estatística de teste (W) é calculada da seguinte maneira (Equação 01):

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Em que: n é o tamanho da amostra, $x_{(i)}$ é a i -ésima menor observação, a_i são constantes determinadas com base no tamanho da amostra e em coeficientes de covariância previamente calculados. O valor crítico de W é comparado a uma tabela de distribuição crítica, e a hipótese nula é rejeitada se W for menor do que o valor crítico correspondente.

Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é uma ferramenta estatística utilizada para detectar tendências de aumento ou redução, ao longo do tempo, nos valores de séries temporais. Seu uso é bastante comum em estudos climáticos e ambientais (Hamed & Ramachandra Rao, 1998). Esse teste foi empregado para analisar a existência de tendência significativa na temperatura do ar, durante o período de 62 anos, no município de Conceição do Araguaia – PA.

A fórmula do teste de Mann-Kendall calcula uma estatística chamada de estatística de tendência, representada como “S”. Esta estatística é baseada nas diferenças entre pares de observações ao longo da série temporal e é usada para testar se há uma tendência monotônica significativa nos dados. Sendo sua fórmula (Equação 02):

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

Em que: x_j e x_i são observações na série temporal em momentos, j e i respectivamente as séries de observações temporais em ordem cronológica, n é o comprimento da série temporal, sgn é a função de sinal.

A estatística S é usada para testar se há uma tendência monotônica significativa na série temporal. Valores positivos de S indicam uma tendência crescente, enquanto valores negativos indicam uma tendência decrescente. Partindo da premissa de que a hipótese H_0 seja verdadeira, é possível mostrar que S é normalmente distribuída usando a variância de S (Equação 03):

$$V(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

Em que: n é o número de observações, g é o número de grupos vinculados (um grupo amarrado é um conjunto de dados de amostra com o mesmo valor) e t_p é o número de observações iguais no grupo p . Logo a estatística Z do teste de Mann-Kendall foi então calculada (Equação 04):

$$Z(MK) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

A interpretação do teste envolve a análise do valor da estatística de tendência em relação a uma distribuição conhecida. Se a estatística Z for significativamente diferente de zero, isso sugere a presença de uma tendência na série temporal. O resultado de Z igual ou superior a 1,96 representa uma tendência significativa de aumento, em contrapartida o valor de Z igual ou inferior a -1,96 demonstra uma tendência significativa de redução (Alves et al., 2015). Além disso, o teste de Mann-Kendall fornece um valor-p que indica a significância estatística da tendência encontrada. Se

o valor-p for menor que um certo limite (comumente 0,05), considera-se que há uma tendência estatisticamente significativa.

Teste de Pettitt

O teste de Pettitt é utilizado para detectar mudanças abruptas ou descontinuidades em séries temporais, como a mudança de temperatura do ar ao longo de um período específico. Ele é valioso para identificar pontos de ruptura onde ocorrem alterações significativas nos dados, auxiliando na compreensão de eventos extraordinários em séries temporais (Mallakpour & Villarini, 2016). O teste de Pettitt foi usado para identificar anos específicos onde houve uma mudança brusca e significativa na temperatura do ar. Essas mudanças abruptas podem ser fundamentais para entender eventos climáticos extremos, tendências anômalas ou transições significativas no clima ao longo do período estudado.

A fórmula do teste de Pettitt gera uma estatística, geralmente denotada como “U”, que é utilizada para testar a hipótese nula de que não houve mudança estrutural nos dados em um determinado ponto do tempo. Esta estatística é calculada considerando as diferenças entre as somas dos valores acumulados antes e depois de cada ponto na série temporal, buscando identificar um ponto de ruptura estatisticamente significativo (valor-p), sendo calculado da seguinte forma (Equações 05, 06 e 07):

$$K_T = |U_{t,T}|$$

onde,

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j)$$

em que,

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x > 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

Logo, a estatística $U_{t,T}$ é calculada para valores de $1 \leq t \leq T$, e a estatística K_T do teste é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$. Essa estatística localiza o ponto em que houve uma mudança brusca

na média de uma série temporal (Penereiro, Ferreira, 2012). A fórmula busca encontrar o ponto de ruptura t onde a soma das diferenças, considerando tanto a série temporal original quanto sua versão invertida, é máxima. O entendimento do teste envolve analisar a estatística U em relação a um valor crítico.

Se o valor da estatística U exceder o valor crítico, pode-se rejeitar a hipótese nula, indicando a presença de uma mudança significativa na série temporal naquele ponto específico. O ponto de mudança brusca é o valor de t onde ocorre o máximo (ou mínimo) de K_T . O valor crítico (K_{crit}) é calculado da seguinte forma (Equação 08):

$$K_{crit} = \sqrt{\frac{-\ln \ln \left(\frac{p}{2} \right) (T^3 + T^2)}{6}}$$

A sua significância é obtida através da Equação 09:

$$P \approx \left(\frac{-6 K_T^2}{T^3 + T^2} \right)$$

Em que: P é o nível de significância, K_T é o valor crítico; T é o número de anos da série histórica. Quando P é menor do que o nível de significância específica neste estudo (0,05), a hipótese nula é rejeitada.

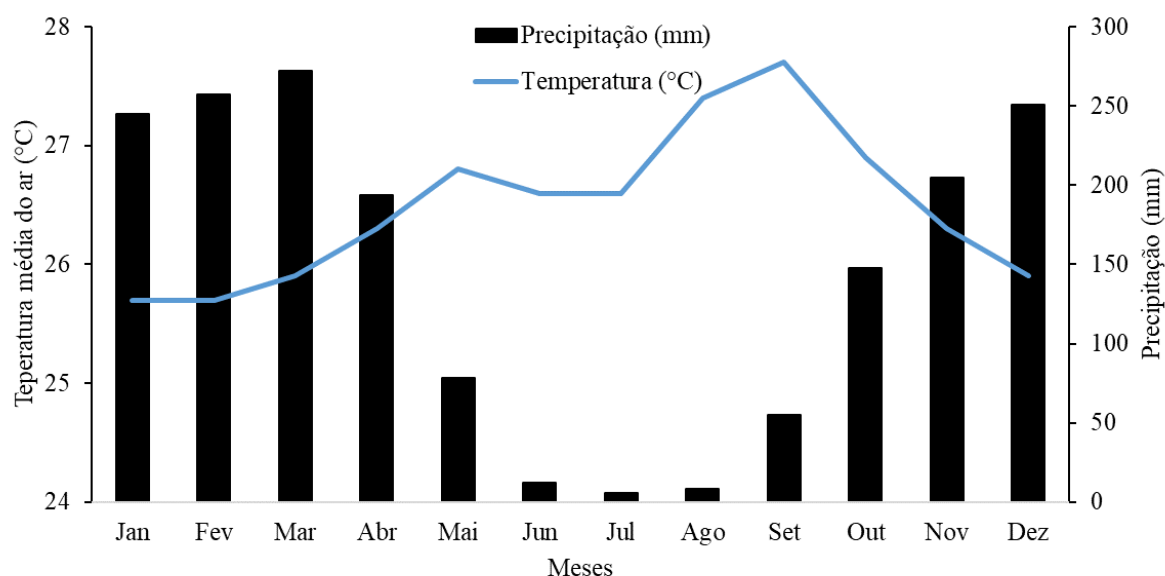
Resultados e Discussão;

Os resultados desta pesquisa foram organizados em três seções analíticas, conforme a metodologia de aproximações sucessivas (Santos, 2008), visando a uma compreensão gradual e aprofundada do fenômeno estudado. A primeira seção aborda a *Caracterização Sazonal da Temperatura do Ar*, descrevendo os padrões e variações ao longo das estações do ano. A segunda seção trata da *Tendência e Ponto de Ruptura da Temperatura do Ar*, onde são examinadas as mudanças temporais e identificados os momentos de alterações significativas nas séries históricas. Por fim, a terceira seção explora as *Possíveis Causas do Aumento da Temperatura do Ar no Município de Conceição do Araguaia*, buscando relacionar fatores ambientais e antrópicos que podem ter contribuído para as variações térmicas observadas.

Caracterização Sazonal da Temperatura do Ar

A figura 2 ilustra os dados climatológicos mensais (1961 – 2022) da temperatura do ar e precipitação no município de Conceição do Araguaia – PA. Os dados revelam uma clara distinção entre dois períodos climáticos, refletindo as características sazonais marcantes da região. Um desses períodos é caracterizado como quente e seco (abril a setembro), em que o mês mais quente e seco é setembro, com temperatura média mensal de 27,7°C e precipitação acumulada de 55 mm. A notável ausência de chuvas nesse período contribui para um clima seco na região, em que a média de chuva acumulada é de 353 mm. Em contraste, o segundo período (outubro a março), é classificado como quente e úmido, em que o mês mais quente e úmido é março com 25,9°C de temperatura média do ar e 272 mm de precipitação acumulada.

Figura 2 – Média climatológica mensal (1961 – 2022) da temperatura do ar e precipitação no município de Conceição do Araguaia – PA.



Fonte: INMET (2023); processamento em laboratório (2024).

A característica distinta deste período é o aumento substancial na umidade atmosférica, impulsionado pela chegada da temporada de chuvas. Essa alternância entre períodos quentes e secos e quentes e úmidos configura a sazonalidade na temperatura em Conceição do Araguaia – PA, desenhando um panorama climático diversificado ao longo dos meses.

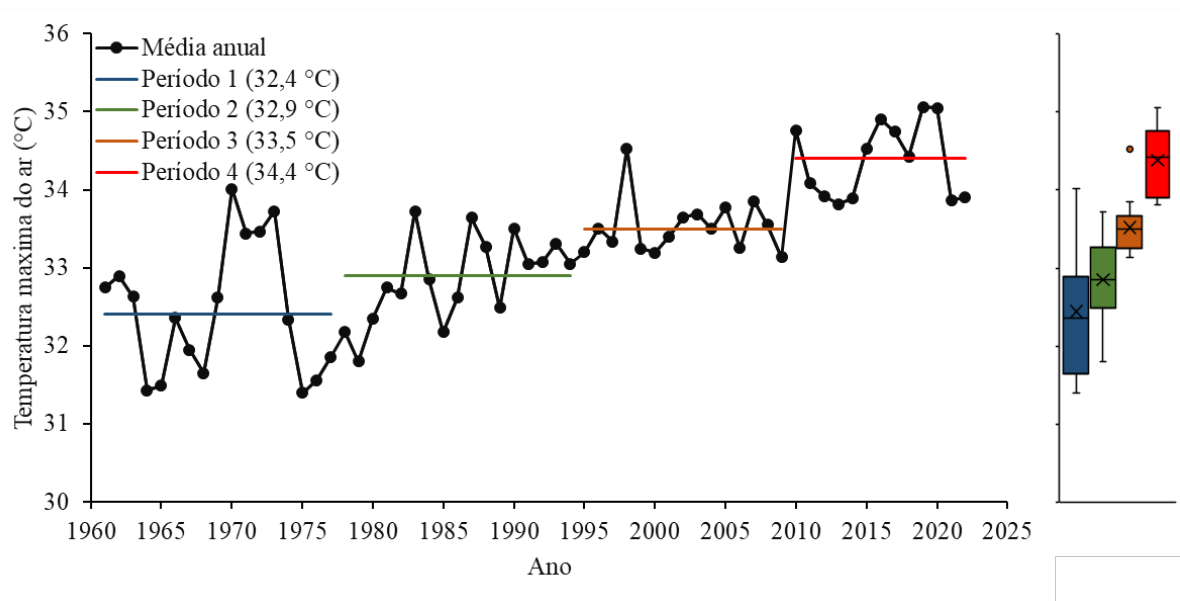
Tendência e Ponto de Ruptura da Temperatura do Ar

O estudo revelou resultados substanciais quanto à tendência e pontos de ruptura na temperatura do ar ao longo de períodos sequenciais, fornecendo uma compreensão aprofundada das mudanças climáticas na região em análise. Os elementos meteorológicos examinados exibiram notáveis pontos de transformação, com a temperatura máxima do ar apresentando uma tendência de aumento significativo.

Temperatura Máxima do Ar

A figura 3 ilustra o resultado do teste de tendência de Mann-Kendall e do ponto de ruptura, identificado com o Teste de Pettitt, para os dados anuais de temperatura máxima do ar. Os resultados do teste de Mann-Kendall mostraram que a temperatura máxima do ar exibiu uma tendência estatisticamente significativa de aumento ($Z = 6,8$; $p\text{-valor} = <0,0001$), com um incremento anual da temperatura máxima da ordem de $0,04^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ ($R^2 = 0,6$).

Figura 3 – Variabilidade temporal da temperatura máxima do ar no município de Conceição do Araguaia – PA, durante o período de 1961 a 2022, destacando os quatro pontos de mudança apontados pelo teste de Pettitt (linhas coloridas). Ao lado direito também é destacado o Boxplot dos valores da temperatura máxima.



Fonte: INMET (2023); processamento em laboratório (2024).

Além disso, o teste de Pettitt identificou quatro pontos de mudança significativa do valor da temperatura máxima do ar. Em média, esses pontos aconteceram em um período de 14,5 anos. O primeiro período (1961-1977), registrou uma média anual de $32,4^{\circ}\text{C}$, para o segundo período (1978-1994), houve um incremento de $0,5^{\circ}\text{C}$ na temperatura máxima do ar, passando para um valor médio de $32,9^{\circ}\text{C}$, no terceiro período (1995-2009) houve outro incremento de $0,6^{\circ}\text{C}$, fazendo com

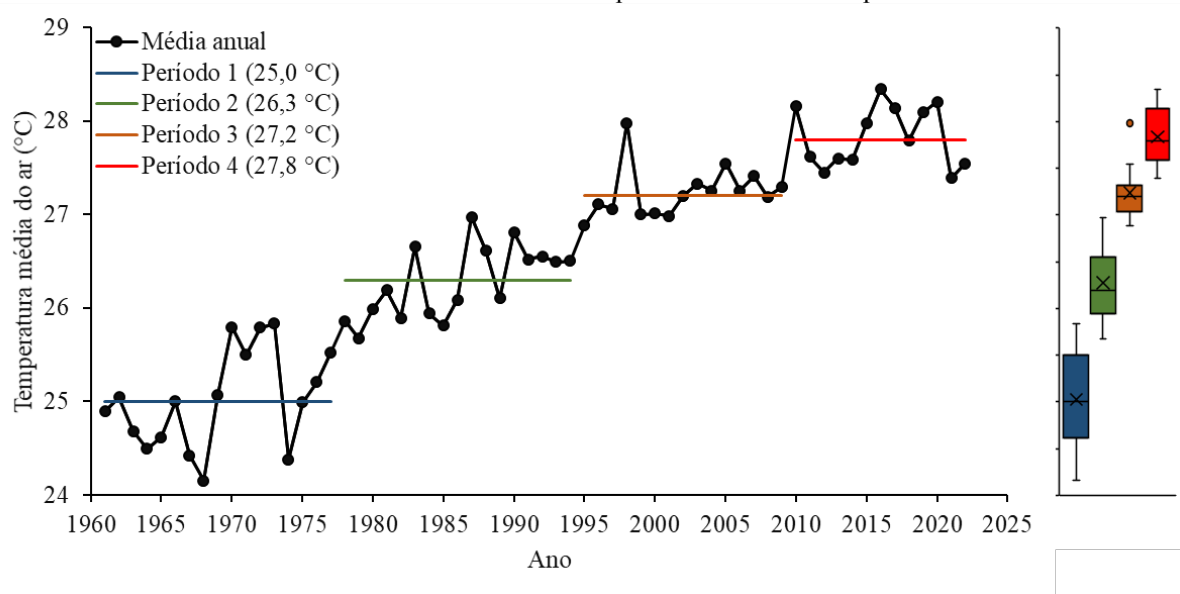
que a temperatura máxima atingisse um valor médio de 33,5°C, e por fim, quarto período (2010-2022) ganhou um novo incremento na temperatura de 0,9°C, passando para uma média anual 34,4°C.

Quanto a esse aumento gradual demonstra uma elevação significativa da temperatura máxima do ar ao longo dos anos. A comparação entre o primeiro e o quarto período, revela um aumento de 2,0 °C.

Temperatura Média do Ar

A análise comparativa entre os períodos destaca que, entre o primeiro e o segundo período, não houve variação na temperatura média, como a figura 4 ilustra.

Figura 4 – Variabilidade temporal da temperatura média do ar no município de Conceição do Araguaia – PA, durante o período de 1961 a 2022, destacando os quatro pontos de mudança apontados pelo teste de Pettitt (linhas coloridas). Ao lado direito também é destacado o Boxplot dos valores da temperatura máxima.



Fonte: INMET (2023); processamento em laboratório (2024).

Quanto aos resultados do teste de Mann-Kendall mostraram que a temperatura média anual do ar exibiu uma tendência estatisticamente significativa de aumento ($Z = 2,04$; $p\text{-valor} = 0,041$), com um incremento total da temperatura média de 2,8°C ao longo dos quatro períodos avaliados. Esses períodos foram identificados com médias anuais de 25,0°C, 26,3°C, 27,2°C e 27,8°C, conforme ilustrado no gráfico. Esses valores indicam um aumento consistente da temperatura média

ao longo dos anos. Entre o terceiro e o primeiro período, observou-se um aumento de 1,1 °C, e entre o quarto e o primeiro período, o incremento total foi de 2,0 °C.

Em análise, considera-se que este aumento gradativo sublinha uma mudança significativa no perfil térmico da região ao longo dos períodos avaliados. A temperatura média do ar, constatou-se um acréscimo notável ao longo dos períodos. A média anual aumentou de 25,0°C no primeiro período para 27,8°C no último, representando um incremento total de 2,8°C. Este aumento progressivo, com aumentos específicos em cada transição de período, destaca uma alteração substancial nas condições térmicas da região.

A média anual da temperatura do ar também apresenta um aumento notável. No primeiro período, a média anual foi registrada em 25,0 °C, passando para 26,3 °C no segundo período, indicando um acréscimo de 1,3 °C. O terceiro período apresentou uma média anual de 27,3 °C, evidenciando um aumento adicional de 1,0 °C em relação ao período anterior. Já no último período, a temperatura média atingiu 27,8 °C, representando um acréscimo de 0,5 °C em relação ao período precedente.

A análise revela que a temperatura média anual aumentou progressivamente, com incrementos específicos em cada transição de período. O aumento total ao longo dos quatro períodos foi de 2,8 °C, indicando uma mudança significativa no perfil térmico da região. Esse fenômeno pode ter diversas implicações, desde alterações nos padrões de flora e fauna até possíveis consequências para atividades humanas dependentes do clima local.

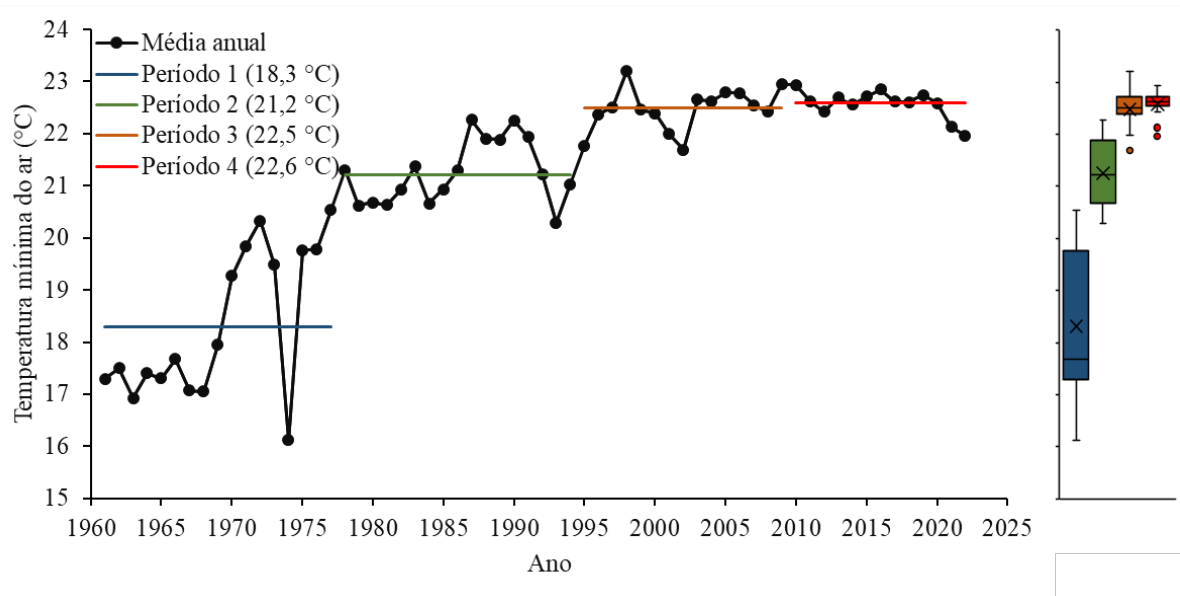
Temperatura Mínima do Ar

Na figura 5, no que diz respeito à temperatura mínima, os resultados do teste de Mann-Kendall mostraram que a temperatura mínima do ar exibiu uma tendência estatisticamente significativa de aumento ($Z = 2,04$; $p\text{-valor} = 0,041$). O teste de Pettitt identificou pontos de ruptura a cada 14,5 anos nas médias anuais de temperatura mínima, sugerindo mudanças significativas nos padrões climáticos ao longo do tempo. A análise estatística, utilizando o teste de Mann-Kendall, corroborou as observações, evidenciando uma tendência de crescimento em todas as temperaturas.

Quanto as taxas anuais de aumento, foram calculadas em 0,042°C para a temperatura máxima, 0,058°C para a temperatura média e 0,079°C para a temperatura mínima, reforçando a evidência de um aquecimento significativo na região estudada. A precipitação (PRP) não

demonstrou uma tendência discernível, com um p-valor de 0,67, indicando a falta de significância estatística na variação da precipitação ao longo dos períodos analisados. Este resultado sugere que, embora as temperaturas estejam em ascensão, a correlação com os padrões de precipitação não é evidente.

Figura 5 – Variabilidade temporal da temperatura mínima do ar no município de Conceição do Araguaia – PA, durante o período de 1961 a 2022, destacando os quatro pontos de mudança apontados pelo teste de Pettitt (linhas coloridas). Ao lado direito também é destacado o Boxplot dos valores da temperatura máxima.



Fonte: INMET (2023); processamento em laboratório (2024).

Em relação à temperatura mínima, observa-se um aumento constante. No primeiro período, a média foi de 18,3°C, subindo para 21,2°C no segundo, 22,5°C no terceiro e 22,6°C no quarto. Os resultados do teste de Pettitt indicam que há um ponto de ruptura a cada 14,5 anos nas médias anuais de temperatura. Esse padrão sugere mudanças significativas nos padrões climáticos ao longo do tempo.

Possíveis Causas do Aumento da Temperatura do Ar

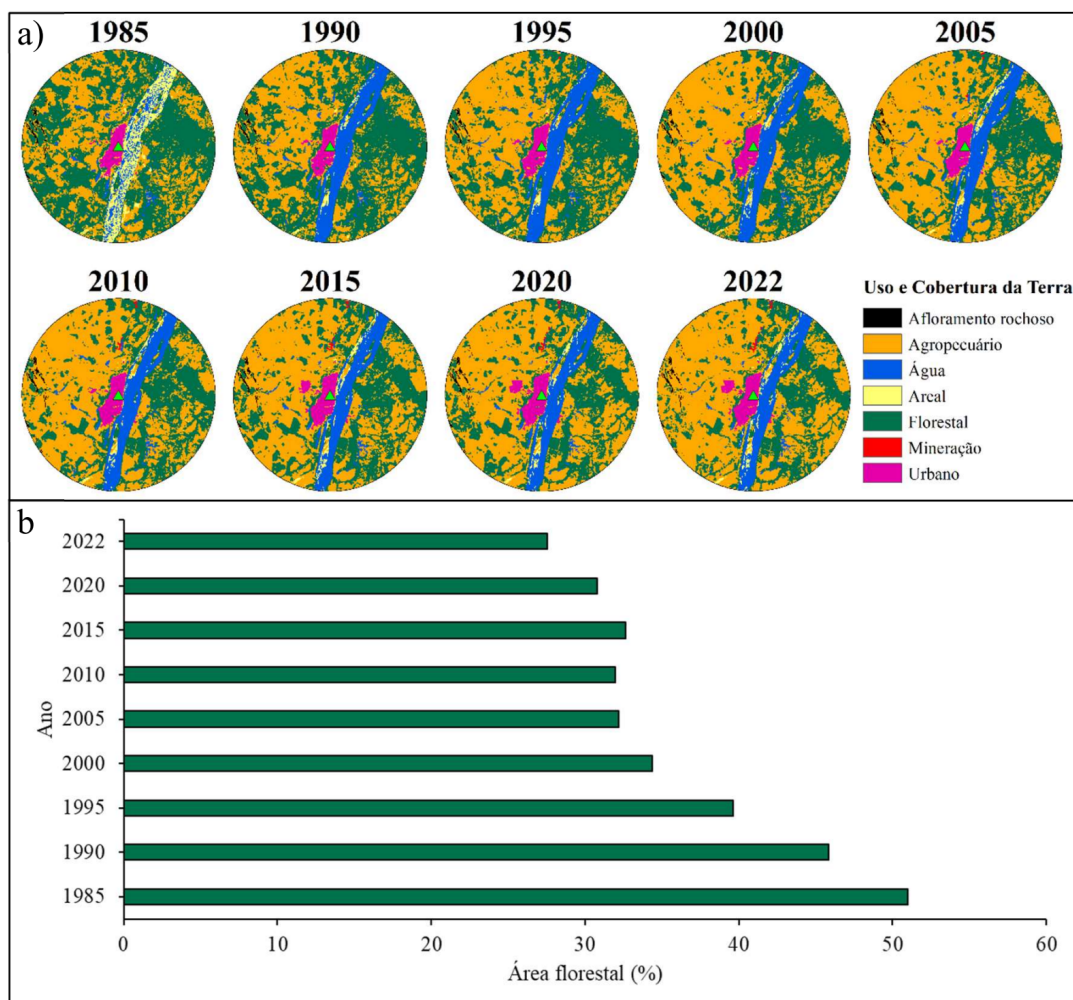
O aumento constante nas temperaturas do ar pode ser devido alguns fatores, sendo eles as atividades humanas, o aumento das concentrações de gases de efeito estufa, desmatamento e a poluição que contribuem para essas mudanças, e compreender essas causas é de suma importância para lidar da melhor forma com os desafios relacionados ao aquecimento regional.

A emissão de gases de efeito estufa resultantes das atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis para geração de energia, transporte e processos industriais. Esses gases, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), formam uma cobertura que retém o calor na atmosfera, levando ao aumento gradual da temperatura média global. Quando se há a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, liberamos dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, o que faz com que haja uma intensificação no efeito estufa (Mitchell, 1989).

Esse acúmulo de gases contribui para prender o calor na atmosfera, resultando no gradual aquecimento do nosso planeta. Além disso, mudanças no uso da terra, como desmatamento e expansão urbana, podem ter um impacto direto nos padrões climáticos locais. A redução da cobertura vegetal afeta a capacidade do solo de absorver e reter umidade, levando a variações nas temperaturas e nos padrões de chuva (Mitchell, 1989).

A figura 6 ilustra a evolução temporal do uso e cobertura da terra no município de Conceição do Araguaia – PA, com um foco especial na cobertura florestal. A parte "a" da figura apresenta mapas que mostram a dinâmica espacial de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2022, enquanto a parte "b" mostra a porcentagem de cobertura florestal ao longo do mesmo período.

Figura 6 – Em “a” está a evolução temporal (1985-2022) da dinâmica espacial de uso e cobertura da terra em relação ao buffer com raio de 10 km, em relação a sede municipal de Conceição do Araguaia – PA (triângulo verde); e em “b” está a evolução temporal (1985-2022) da porcentagem de cobertura florestal, em relação ao buffer com raio de 10 km, em relação a sede municipal de Conceição do Araguaia – PA.



Fonte: MapBiomias (2023); processamento em laboratório (2024).

A análise temporal dos mapas de uso e cobertura da terra (Figura 6a) e o gráfico de barras (figura 6b) revela uma transformação expressiva na cobertura florestal no município de Conceição do Araguaia – PA entre 1985 e 2022. Em 1985, a área florestal representava aproximadamente 50% da cobertura do solo. Observa-se uma redução gradual dessa área a partir de 1990, com declínios mais acentuados a partir de 1995. Entre 2005 e 2022, a perda florestal se torna ainda mais expressiva, resultando em menos de 10% de cobertura florestal em 2022.

A expansão das áreas agropecuárias e urbanas, conforme mostrado nas áreas amarelas e vermelhas nos mapas (Figura 6a), influenciou diretamente o uso e cobertura do solo. As áreas

agropecuárias cresceram constantemente ao longo do período estudado, enquanto as áreas urbanas mostraram uma expansão significativa, especialmente em torno de centros urbanos e corredores de transporte. Esse crescimento está fortemente relacionado com a redução das áreas florestais, indicando a conversão direta de florestas em terras agrícolas e urbanas.

Os dados apresentados na Figura 6 evidenciam um padrão claro de desmatamento, impulsionado principalmente pela expansão das atividades agropecuárias e urbanas. A crescente demanda por terras agrícolas para a produção de alimentos, fibras e biocombustíveis tem sido uma das principais causas do desmatamento no município de Conceição do Araguaia – PA. Este fenômeno é consistente com tendências observadas em outras regiões do mundo, onde a agricultura frequentemente avança às custas das florestas nativas.

O crescimento das áreas urbanas, evidenciado na Figura 6a, reflete o aumento da população e a necessidade de mais infraestrutura e habitação. A urbanização afeta diretamente as florestas e aumenta a demanda por recursos naturais como madeira e água, intensificando a pressão sobre os ecossistemas florestais.

Essas transformações resultam em consequências ambientais significativas, como a perda de biodiversidade, a deterioração dos serviços ecossistêmicos (regulação do clima, manutenção dos ciclos hidrológicos) e o aumento das emissões de gases de efeito estufa. A redução das áreas florestais também pode aumentar o risco de desastres naturais, como inundações e deslizamentos de terra na região.

Considerações Finais;

A análise das tendências da temperatura do ar no município de Conceição do Araguaia revelou padrões significativos de aumento das temperaturas máximas, mínimas e médias do ar ao longo das últimas décadas. Os resultados indicam que a região tem enfrentado mudanças climáticas substanciais, com impactos diretos nas atividades humanas, na biodiversidade e na qualidade de vida das comunidades locais.

Os dados sugerem que a principal causa dessas mudanças é a emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis, embora outros fatores, como mudanças no uso da terra, também possam estar contribuindo para as alterações climáticas observadas. A análise estatística dos dados meteorológicos históricos, utilizando métodos como o teste de Pettitt e o teste

de Mann-Kendall, foi fundamental para identificar padrões claros de aumento das temperaturas e para compreender o peso dessas mudanças ao longo do tempo.

A sistematização de dados secundários realizada nesta pesquisa foi crucial para fornecer uma base sólida para a compreensão das alterações climáticas em escala local. A análise detalhada dos dados meteorológicos permitiu não apenas identificar as tendências climáticas, mas também avaliar os possíveis impactos dessas mudanças na região de Conceição do Araguaia. Essas informações são essenciais para orientar políticas públicas e estratégias de adaptação que possam mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas na região.

Por fim, este estudo destaca a importância de monitorar e analisar continuamente as mudanças climáticas em nível local, a fim de desenvolver estratégias eficazes de adaptação e mitigação. A sistematização de dados secundários é uma ferramenta fundamental para compreender as alterações climáticas em escala local, como demonstrado neste estudo sobre Conceição do Araguaia.

Referências

- AKBARI, H. et al.** Local climate change and urban heat island mitigation techniques – The state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 22, n. 1, p. 1–16, 2015. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>.
- ALLEN, R. G.** Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 2, n. 2, p. 56–67, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1997\)2:2\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:2(56)).
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; FARIAS, A. A.** Comportamento da precipitação pluviométrica e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, n. 6, p. 1601-1614, 2015.
- AMORIM, M. C. de C. T.** Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. *Revista Brasileira de Climatologia*, 15 jun. 2019. <https://doi.org/10.5380/abclima.v0i0.65136>.
- ANDERSON, P. R. et al.** Simulação do efeito estufa, da intensificação do efeito estufa pela presença de CO₂ e do impacto da mudança da cobertura da Terra na temperatura média do meio utilizando o Arduino. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0355>.

ANDRADE, H. O desconforto térmico estival em Lisboa - uma abordagem bioclimática. *Finisterra*, v. 33, n. 66, 13 dez. 2012.

ÁVILA, P. L. R. Análise da precipitação sazonal simulada utilizando o RegCM4 sobre o estado do Pará em anos de extremos climáticos. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 14, n. 1, 2014. <https://doi.org/10.5380/abclima.v14i1.36127>.

CHAPMAN, S. et al. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, v. 32, n. 10, p. 1921–1935, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>.

CORNETTA, A. Ciência, política e a produção histórica do clima. *Revista da ANPEGE*, 23 out. 2022.

ERHARDT, D.; MECKLENBURG, M. Relative humidity re-examined. *Studies in Conservation*, v. 39, supl. 2, p. 32–38, 1994. <https://doi.org/10.1179/sic.1994.39.Supplement-2.32>.

FEARNSIDE, P. M. A floresta amazônica nas mudanças globais. *Acta Amazonica*, v. 33, n. 2, p. 291–310, 2003. <http://acta.inpa.gov.br>.

FLEURY, L. C.; MIGUEL, J. C. H.; TADDEI, R. Mudanças climáticas, ciência e sociedade. *Sociologias*, v. 21, n. 51, p. 18–42, ago. 2019.

GONZÁLEZ-ESTRADA, E.; VILLASEÑOR, J. A.; ACOSTA-PECH, R. Shapiro-Wilk test for multivariate skew-normality. *Computational Statistics*, v. 37, n. 4, p. 1985–2001, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00180-021-01188-y>.

GU, C. Urbanization: Processes and driving forces. *Science China Earth Sciences*, v. 62, n. 9, p. 1351–1360, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9359-y>.

HAINES, A. et al. Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Public Health*, v. 120, n. 7, p. 585–596, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2006.01.002>.

HAMED, K. H.; RAMACHANDRA RAO, A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, v. 204, n. 1–4, p. 182–196, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).

HORTON, D. E. et al. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*, v. 522, n. 7557, p. 465–469, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature14550>.

LAN, L.; WARGOCKI, P.; LIAN, Z. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 5, p. 1057–1062, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.001>.

LIU, Y. et al. A review of water pollution arising from agriculture and mining activities in Central Asia: Facts, causes and effects. *Environmental Pollution*, v. 291, p. 118209, dez. 2021.

MAHMOOD, M. H.; SULTAN, M.; MIYAZAKI, T. Significance of temperature and humidity control for agricultural products storage: Overview of conventional and advanced options. *International Journal of Food Engineering*, v. 15, n. 10, 2019. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0063>.

MALLAKPOUR, I.; VILLARINI, G. A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean. *Hydrological Sciences Journal*, v. 61, n. 2, p. 245–254, 2016. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1008482>.

MARQUES, L. O Antropoceno como aceleração do aquecimento global. *Liinc em Revista*, v. 18, n. 1, p. e5968, 4 abr. 2022.

MCFARLAND, J. et al. Impacts of rising air temperatures and emissions mitigation on electricity demand and supply in the United States: a multi-model comparison. *Climatic Change*, v. 131, n. 1, p. 111–125, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1380-8>.

MEEHL, G. A. et al. Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 81, n. 3, p. 427–436, 2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0427>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0427>2.3.CO;2).

MITCHELL, J. F. B. The “Greenhouse” effect and climate change. *Reviews of Geophysics*, v. 27, n. 1, p. 115–139, 1989. <https://doi.org/10.1029/RG027i001p00115>.

ORMANDY, D.; EZRATTY, V. Thermal discomfort and health: Protecting the susceptible from excess cold and excess heat in housing. *Advances in Building Energy Research*, v. 10, n. 1, p. 84–98, 2016. <https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1014845>.

PENEREIRO, J. C.; MESCHIATTI, M. C. Tendências em séries anuais de precipitação e temperaturas no Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 23, n. 2, p. 319–331, mar. 2018.

SANTOS, M. Metamorfoses do Espaço Habitado: Fundamentos Teóricos e Metodológicos da Geografia. São Paulo: Edusp, 2008.

SAVVIDES, A. et al. Meristem temperature substantially deviates from air temperature even in moderate environments: Is the magnitude of this deviation species-specific? *Plant, Cell & Environment*, v. 36, n. 11, p. 1950–1960, 2013. <https://doi.org/10.1111/pce.12101>.

SAWAN, Z. M. Climatic variables: Evaporation, sunshine, relative humidity, soil and air temperature and its adverse effects on cotton production. *Information Processing in Agriculture*, v. 5, n. 1, p. 134–148, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.09.006>.

- SELF, S.** The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 364, n. 1845, p. 2073–2097, 2006. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1814>.
- SHERWOOD, S. C. et al.** Relative humidity changes in a warmer climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 115, D9, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JD012585>.
- SILVA, R. F. B. da et al.** Balancing food production with climate change mitigation and biodiversity conservation in the Brazilian Amazon. *Science of The Total Environment*, v. 904, p. 166681, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166681>.
- SIQUEIRA NETO, M. et al.** Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 1, p. 63–76, fev. 2011.
- STORCH, D. et al.** Climate sensitivity across marine domains of life: Limits to evolutionary adaptation shape species interactions. *Global Change Biology*, v. 20, n. 10, p. 3059–3067, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12645>.
- STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M.** Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 9, p. 1351–1359, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000900002>.
- UMMENHOFER, C. C.; MEEHL, G. A.** Extreme weather and climate events with ecological relevance: A review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 372, n. 1723, 2017. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>.
- WATRIN, O. DOS S. et al.** Dinâmica do uso e cobertura da terra em Projeto de Desenvolvimento Sustentável na região da rodovia Transamazônica, Pará. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 92–107, 17 fev. 2020.
- WEN, L. et al.** Impacts of the two biggest lakes on local temperature and precipitation in the Yellow River source region of the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology*, v. 2015, p. 1–10, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/248031>.
- ZHANG, P.; ZHANG, J.; CHEN, M.** Economic impacts of climate change on Chinese agriculture: The importance of relative humidity and other climatic variables. *SSRN Electronic Journal*, 2015. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2598810>.
- ZHOU, X.; WANG, Y.-C.** Dynamics of land surface temperature in response to land-use/cover change. *Geographical Research*, v. 49, n. 1, p. 23–36, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1745-5871.2010.00686>.