Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

DETECÇÃO DE MUDANÇAS E ANÁLISE DE TENDÊNCIAS EM PARÂMETROS CLIMATOLÓGICOS NA REGIÃO DO POLO AGROINDUSTRIAL PETROLINA-JUAZEIRO

Temporal trend analysis of meteorological variables – a study on climate change in the Petrolina-Juazeiro agro-industrial hub region

Detección de cambios y análisis de tendencias en parámetros climatológicos en la región del polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro

Leonardo Fagner Ponciano Barbieri
Unidade de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Campina Grande, Paraíba, Brasil
barbierilfp@gmail.com

Magaly de Fatima Correia
Unidade de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande -UFCG
Campina Grande, Paraíba, Brasil
magaly.fatima@professor.ufcg.edu.br

Maria Regina da Silva Aragão
Unidade de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Campina Grande, Paraíba, Brasil
silva_aragao@yahoo.com.br

Resumo: Este estudo investiga tendências de temperaturas máximas e mínimas na região do polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro, e procura elucidar a contribuição das mudanças na ocupação e uso da terra. A irrigação aumentou a umidade atmosférica e a nebulosidade, alterando o clima local, como a redução da amplitude térmica diária (ATD) e da velocidade do vento. A aplicação de técnicas estatísticas não-paramétricas possibilitou detectar tendências de aumento na umidade e temperatura

máxima, particularmente após a década de 1990. A conversão de áreas de vegetação nativa para agricultura e pecuária alterou significativamente o microclima, evidenciando a necessidade de estratégias de uso da terra que considerem os impactos ambientais. Em meados da década de 1990 a região vivenciou um processo de desenvolvimento agropecuário e industrialização, particularmente em Mandacaru, Bahia, pela expansão da agricultura irrigada. Os efeitos nas tendências da temperatura mínima e ATD causados por mudanças no uso da terra foram distintos para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina. Conclui-se que os resultados obtidos podem colaborar para o gerenciamento de recursos naturais e a formulação de estratégias de uso da terra, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico da região.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental. Amplitude térmica diária. Clima local.

Abstract: This study investigates tendencies in maxima and minima temperatures in the Agricultural Pole of Petrolina-Juazeiro aiming to elucidate the contribution of changes in soil use and occupation. The irrigation increased the atmospheric humidity and cloudness, changing the local climate, as the reduction in the daily thermal amplitude (DTA) and wind speed. The appplication of non-parametric statistical techniques allowed to detect tendencies for increase in atmospheric humidity and maximum temperature, particularly after the 90´s decade. The conversion of areas of native vegetation by agriculture and cattle raising changed significantly the microclimate, highlightening the need for strategies of soil use that take into account the environmental impacts. In the middle of the 90´s decade, the region underwent a processes and industrialization, particularly in Mandacaru, Bahia, by the irrigated agriculture expansion. The effects in the tendencies of minima temperatures and DTA caused by soil use changes were distinct for Bebedouro, Mandacaru and Petrolina. It is concluded that the results may colaborate for the management of natural resources and the formulation of soil use strategies, contributing for environmental sustainability and economical growth of the region.

Keywords: Environmental sustainability. Daily thermal amplitude. Local climate.

Resumen: Este estudio investiga las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas en la región del polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro, y busca esclarecer la contribución de los cambios en la ocupación y el uso de la tierra. La irrigación aumentó la humedad atmosférica y la nubosidad, alterando el clima local, como la reducción de la amplitud térmica diaria (ATD) y la velocidad del viento. La aplicación de técnicas estadísticas no paramétricas permitió detectar tendencias de aumento en la humedad y la temperatura máxima, particularmente después de la década de 1990. La conversión de áreas de vegetación nativa a agricultura y ganadería alteró significativamente el microclima, evidenciando la necesidad de estrategias de uso de la tierra que consideren los impactos ambientales. A mediados de la década de 1990, la región experimentó un proceso de desarrollo agropecuario e industrialización, particularmente en Mandacaru, Bahía, debido a la expansión de la agricultura irrigada. Los efectos en las tendencias de la temperatura mínima y la ATD causados por los cambios en el uso de la tierra fueron distintos en Bebedouro, Mandacaru y Petrolina. Se concluye que los resultados obtenidos pueden colaborar en la gestión de los recursos naturales y en la formulación de estrategias de uso de la tierra, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo económico de la región.

Palabras clave: Sostenibilidad ambiental. Amplitud térmica diaria. Clima local.

Submetido em: 30/04/2025
Aceito para publicação em: 18/07/2026
Publicado em: 24/07/2026

1. INTRODUÇÃO

A importância do agronegócio como vetor do crescimento econômico tem se tornado um tema prioritário nos debates sobre desenvolvimento econômico, sustentabilidade ambiental e mudanças climáticas. No Brasil, ainda que insuficientes, estudos sobre expansão do agronegócio e vulnerabilidade ambiental mostram que a construção do reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (1973-1977), foi o mecanismo determinante na transformação recente da sociedade e economia do semiárido brasileiro (VILAR et al., 2020; EKHTIARI et al., 2017). A construção da Usina Hidrelétrica de Sobradinho e o surgimento do polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro transformaram o Semiárido na principal região exportadora de frutas do Brasil. Em contrapartida, a consequente degradação da vegetação nativa (Caatinga), propiciou grandes transformações ambientais e conflitos na gestão dos recursos hídricos (CABRAL JUNIOR et al. 2019; BARBIERI et al., 2017; BARBIERI et al., 2013; CORREIA et al., 2006b).

Na literatura são vários os estudos que ressaltam a importância do monitoramento e controle de impactos ambientais resultantes de mudanças na ocupação e uso da terra em regiões semiáridas. Mudanças no padrão de comportamento de variáveis atmosféricas resultantes da diversificação de atividades agrícolas pode indicar fatores adicionais com influência no clima local e, consequentemente, nos recursos hidrológicos da região (SILVA et al., 2022). Esse tipo de transformação representa, em parte, o efeito da reestruturação do espaço agrário local com impactos no gerenciamento de recursos naturais (BARBIERI et al., 2013 e 2017). Entretanto, ainda são poucas as pesquisas que enfocam os efeitos das adaptações e diversificações nos sistemas de produção no mesmo espaço e tempo como parâmetros importantes na gestão de riscos em cenários de extremos climáticos.

Barbieri et al. (2013) utilizaram técnicas estatísticas (regressão linear e coeficientes de determinação) com o objetivo de avaliar o desempenho de métodos alternativos utilizados pela FAO (Food and Agriculture Organization) e pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) na estimativa da temperatura média diária do ar na região do Polo agrícola Petrolina-Juazeiro. Melo et al. (2018) apresentaram novas informações sobre as tendências dos extremos climáticos relacionados com a temperatura do ar e com a precipitação para a região do lago da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (UHS). A análise de tendências climáticas

e testes de hipóteses estão entre os principais métodos utilizados em estudos de impactos ambientais e são precursores no auxílio da avaliação das consequências sobre a degradação dos recursos naturais em virtude do uso e ocupação do solo sem planejamento. Ahmadi et al. (2018) examinaram as tendências de longo prazo na temperatura em escalas de tempo sazonais e anuais utilizando dois métodos derivados do Mann-Kendall, sendo um com a eliminação dos efeitos de todos os coeficientes de autocorrelação significativos e o outro chamado de teste sequencial de Kendall, além de usarem também o teste de Pettitt.

Do ponto de vista climático, alguns estudos mostram que no Brasil a temperatura média anual aumentou em mais de 0,5ºC durante o século XX. O aumento observado nas temperaturas médias globais do ar na superfície desde meados do século XX foi atribuído ao aumento das forçantes antrópicas (IPCC, 2013). Correia et al. (2011) observaram que no período de 1970 a 2007 a expansão agrícola na região de Petrolina-PE causou redução na amplitude térmica diária (ATD) e aumento da nebulosidade. As autoras ressaltam que a agricultura irrigada em áreas de vegetação esparsa elevou o teor de umidade da atmosfera. No entanto, diminuição ou aumento da ATD pode ser consequência tanto de processos naturais quanto de ações antropogênicas.

O desenvolvimento desse estudo busca respostas para uma questão científica típica de áreas caracterizadas pela presença de barragens e reservatórios artificiais: no cenário de aquecimento global, a intensificação de ações antropogênicas no entorno dos reservatórios pode produzir alterações climáticas em escala regional? Técnicas estatísticas não paramétricas aplicadas para detecção de tendências em séries históricas de dados observacionais coletados na região de estudo foram usadas como alternativa para aumentar a compreensão sobre a importância de ações antrópicas na variabilidade de parâmetros meteorológicos relevantes em projetos de gerenciamento de recursos hídricos e impacto ambiental.

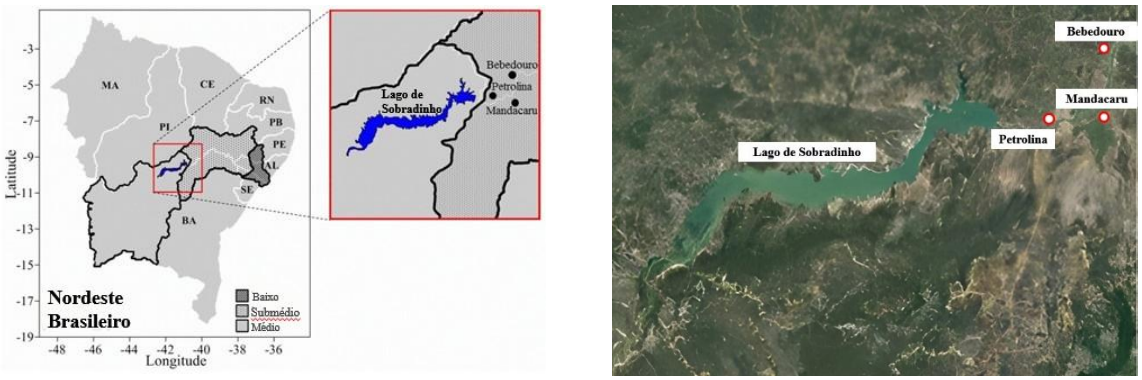
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

Na Figura 1 observa-se a localização da represa de Sobradinho, no extremo leste da região do médio São Francisco e, no destaque, na região do submédio São Francisco, estão representadas as estações climatológicas de Bebedouro e Petrolina, em Pernambuco, e de

Mandacaru, na Bahia. Na imagem de satélite (Fig. 1b), observam-se áreas vegetadas próximas às estações. Petrolina representa uma área urbana, enquanto Bebedouro e Mandacaru têm características de áreas rurais.

Figura 1 - Nordeste brasileiro, com destaque para as sub-regiões do baixo, submédio e parte do médio da BHSF (Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco), localização geográfica do Lago de Sobradinho e das estações climatológicas.



(a) (b)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na região do Vale do Rio São Francisco, o período chuvoso ocorre entre os meses de novembro e abril, sendo março o mês com a maior média histórica, e registros acima de 100 mm (114,7 mm em Bebedouro-PE; 118,6 mm em Mandacaru-BA e 109,8 mm em Petrolina-PE). Entre os meses de maio e outubro está presente o período seco na região, em que ocorre baixa frequência de sistemas precipitantes, devido a atuação dominante da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que inibe o desenvolvimento de nuvens. O mês de janeiro geralmente registra uma maior frequência da atuação de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) na Região Nordeste e, quando as bordas desses sistemas estão sobre uma determinada área, ela estará sob a influência de precipitação convectiva. O contrário ocorre nas áreas sob a influência de correntes descendentes na região central do VCAN, com redução significativa de nebulosidade. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é outro importante sistema produtor de chuva nesta região, sendo mais atuante no mês de março. Em algumas situações, Sistemas Frontais (SF) podem atingir latitudes mais baixas do Brasil onde causam elevados totais pluviométricos.

2.2. Dados

Foram utilizadas séries históricas de médias mensais de observações coletadas nas estações climatológicas situadas em Bebedouro-PE (09°09’ S; 40°22’ W; 365,5 m) e em Mandacaru-BA (09°24’ S; 40°26’ W; 375 m), pertencentes ao CPATSA/EMBRAPA (Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido/ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) no período de anos entre 1975 e 2014. Dados mensais da estação climatológica de Petrolina-PE (09°22’ S; 40°28’ W; 370,5 m), entre os anos de 1975 e 2014, fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Das séries disponíveis para as três estações, foram usadas as seguintes variáveis: velocidade do vento a 10 m, e temperatura máxima e mínima do ar. Além dos dados de superfície, também foram usadas imagens do satélite Landsat-5. A verificação da existência de falhas nos dados foi realizada através da técnica de imputação múltipla (IM) proposta por Rubin (1987). Visando quantificar com mais exatidão o aumento ou redução no teor de vapor d'água da atmosfera, utilizou-se a razão de mistura r(g/kg), conforme indicado por Vianello e Alves (2012). A ATD (amplitude térmica diária) foi calculada pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN, obtido a partir de imagens do satélite Landsat-5, foi utilizado na avaliação de mudanças na cobertura do solo, conforme proposto por Rouse et al. (1973). O cálculo é feito através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo (ρIV - banda 4 – 0,76-0,96 µm) e do vermelho (ρV - banda 3 – 0,63-0,69 µm), e a soma delas (Equação 1). Para reduzir a interferência por nuvens no processo de análise, foram escolhidas imagens do período seco, em quatro datas, sendo uma para cada década (24 de junho de 1987, 17 de agosto de 1995, 24 de setembro de 2003 e 29 de agosto de 2011).

$$IVDN = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \qquad (1)$$

2.3. Análise de Tendências

Para detectar tendências positivas ou negativas nas séries temporais foi utilizado o teste sequencial de Mann-Kendall, MK, proposto inicialmente por Sneyers (1975). Este teste foi concebido para testar a hipótese nula (H0) de ausência de tendência. Tal teste considera que, na hipótese de estabilidade (H0) de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de

forma independente e a distribuição de probabilidade permanece a mesma. Na verificação da homogeneidade da série, premissa exigida na aplicação do método e fundamental em investigações sobre mudanças climáticas, foi utilizado o teste de sequência ou Run Test (BACK, 2001). A estimativa é feita de acordo com a equação 2.

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

A função do sinal é:

$$sinal = \begin{cases} 1, se\ (x_i - x_j) > 0 \\ 0, se\ (x_i - x_j) = 0 \\ -1, se\ (x_i - x_j) < 0 \end{cases}$$

Em que, S é o coeficiente de correlação de ZMK; xi e xj são os dados estimados da sequência de valores; n é o número de elementos da série temporal.

A variância de Var(S) (Equação 3) é calculada quando n é muito grande, fazendo S tender à normalidade.

$$Var(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p-1)(2t_p+5)\right] \quad (3)$$

Em que: tp é o número de dados com valores iguais em um certo grupo p; q é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados de um grupo p.

Após calcular S e Var (S), calcula-se ZMK (Equação 4) para avaliar a presença de tendência na série temporal.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, if\ S > 0 \\ 0, if\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, if\ S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O sinal de ZMK indica se a tendência é positiva (ZMK > 0) ou negativa (ZMK < 0).

Na busca por rupturas bruscas, ou seja, anos em que houve uma mudança significativa no comportamento das séries foi aplicado o teste de Pettitt (PETTITT, 1979), também chamado de teste de homogeneidade, complementando a análise do teste Sequencial de Mann-Kendall. Este teste detecta mudanças na variabilidade dos dados observados, exibindo o ano de ruptura, as médias da série antes e após a ruptura e os ganhos ou perdas após a ruptura.

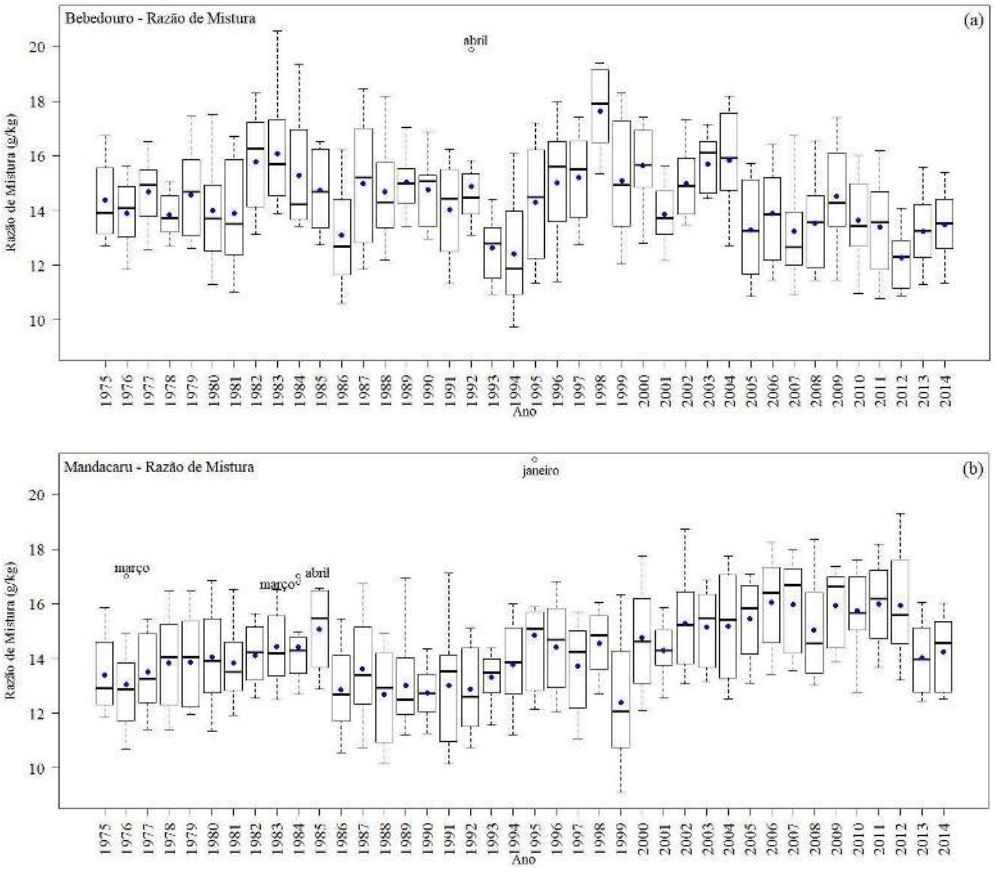
3. RESULTADOS

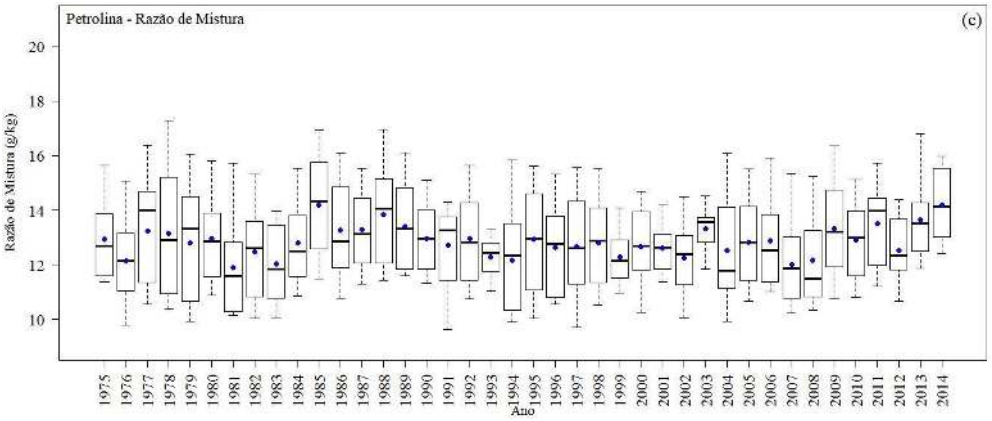
3.1. Características Mensais das Séries Temporais

3.1.1. Umidade Atmosférica

A variação anual da razão de mistura para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina no período de 1975 a 2014 foi analisada através de gráficos de boxplot (Fig. 2). Os valores mais baixos de r (g/kg) são observados em Petrolina. Apesar de uma dispersão relativamente alta ao longo dos anos, não são observadas grandes diferenças (tendência de aumento ou redução nos valores da mediana) ao longo da série. A grande maioria dos dados indicam valores da razão de mistura menores que 14 g/kg (Fig. 2c) em Petrolina.

Figura 2 – *Boxplot* da razão de mistura anual (g/kg): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.





Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As séries de dados coletados em Bebedouro e em Mandacaru mostram padrão de comportamento diferente. Através da amplitude interquartílica, observa-se maior dispersão dos dados em Bebedouro. Em nenhuma das localidades foram observados valores discrepantes. Um resultado relevante observado na série de Mandacaru, é a tendência crescente da mediana a partir de 1993. Uma exceção é o ano de 1999 que mostra uma queda substancial na razão de mistura.

Essa tendência, a partir de meados da década de 1990, coincide com mudanças ambientais significativas na região do polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro. Entre os anos de 1995 e 2000, ações governamentais (incentivos) foram substancialmente incrementadas com foco nas potencialidades da produção de frutas e vinhos, contribuindo para a ampliação das áreas irrigadas. No entanto, o processo que começou com a agricultura irrigada e a estruturação dos perímetros públicos causou também impactos ambientais negativos em algumas áreas devido a práticas inadequadas de manejo de solos. De acordo com Xia Li et al. (2017), conversões de áreas com diferentes coberturas do solo para outros tipos de uso da terra alteram o ciclo hidrológico e o microclima local.

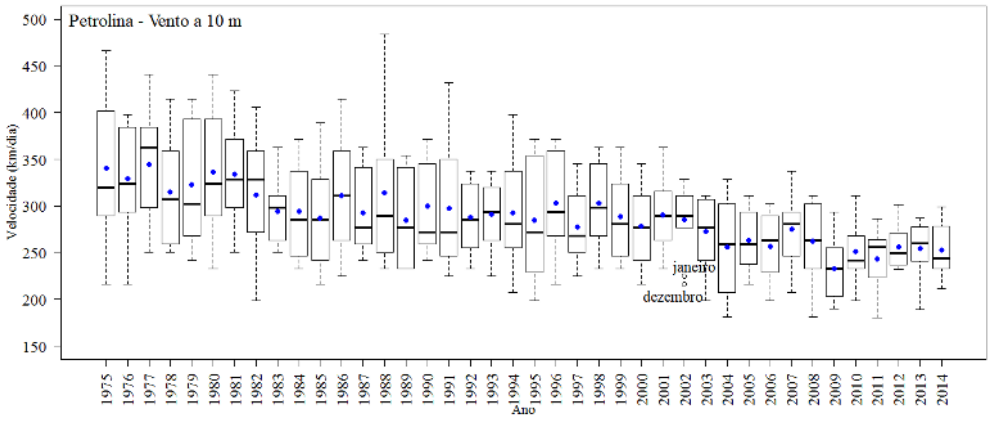
3.1.2. Vento a 10 metros

A variação anual do vento em Petrolina é apresentada na Figura 3. É evidente, a tendência de redução na velocidade do vento ao longo dos anos. Porém, ela é nitidamente mais acentuada depois da construção do reservatório da Hidrelétrica de Sobradinho em 1980.

Na primeira metade da série, até o ano de 1994, a maioria dos anos indica que as médias foram influenciadas pelos valores extremos positivos, ficando acima da mediana. Os

maiores registros na velocidade média do vento ocorreram no ano de 1988. Em 2002, os meses de janeiro e dezembro apresentaram valores discrepantes quando comparados aos demais valores observados no restante do ano.

Figura 3 – *Boxplot* do vento anual (km/dia) a 10 m em Petrolina-PE.



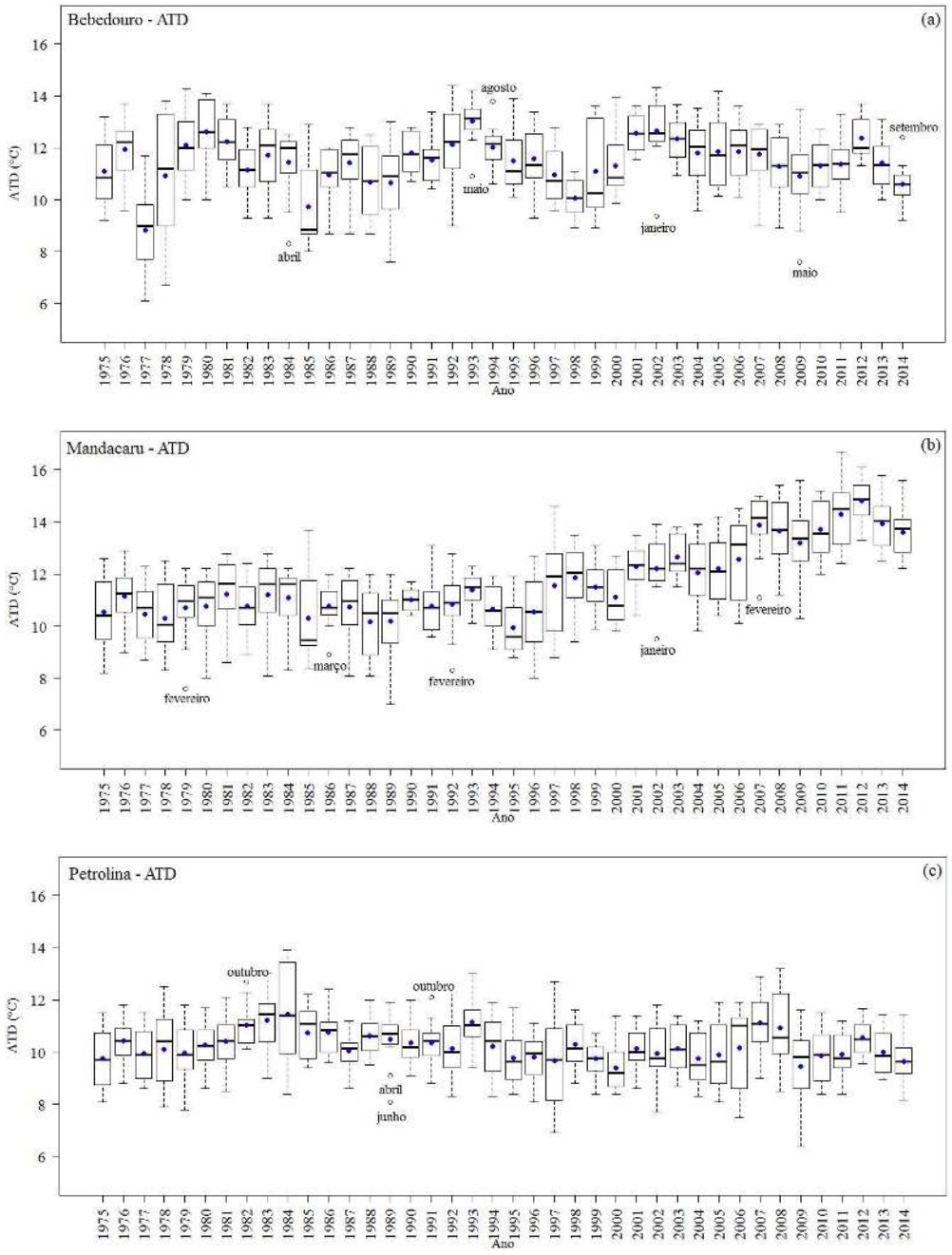
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Nos meses de dezembro e janeiro de 2002 também foram observados outliers na precipitação em Petrolina (não mostrado), com totais pluviométricos acima da média histórica, principalmente o mês de janeiro com 256,4 mm, enquanto a média é de 83,1 mm. A ausência de registros de vento a 10 metros nas estações de Bebedouro e Mandacaru impossibilitaram a análise comparativa entre as três localidades.

3.1.3. Amplitude Térmica Diária (ATD)

A amplitude térmica diária (ATD), definida pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima diária, é representada na Figura 4 pelos *boxplots* das médias mensais da ATD para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina. Nas três localidades foram observados valores discrepantes (*outliers*), representados por círculos, menos frequentes na área urbana (Petrolina). Dentre os 13 anos com outliers apenas dois, 1984 e 1989, tiveram influência do fenômeno La Niña, enquanto nos demais atuava o El Niño (CPTEC/INPE, 2020).

Figura 4 – *Boxplot* anual da ATD (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE. Os meses em que foram detectados valores atípicos estão assinalados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na série de Mandacaru (Fig. 4b), nota-se um crescimento acentuado da ATD a partir de 1996. Esse padrão de comportamento é semelhante ao observado na razão de mistura (Fig. 2b) e na temperatura máxima (não mostrado). A relação positiva entre a razão de mistura e a temperatura máxima é, em parte, esperada. Considerando o aumento nas atividades agropecuárias na região, nos períodos com maior concentração de vapor de água na

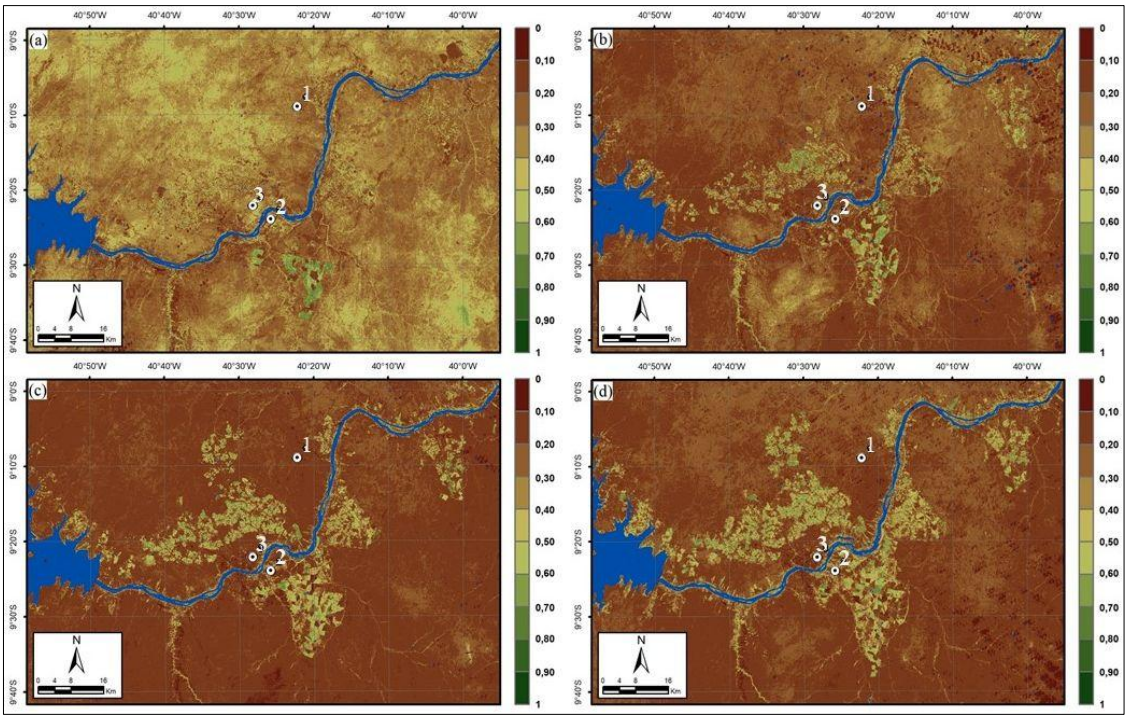
atmosfera é maior a absorção da radiação solar, e também da radiação terrestre de ondas longas, resultando em aumento da temperatura. Outro dado importante observado na ATD é o surgimento de valores atípicos (outliers), anomalamente baixos, observados nos anos de 1979, 1986, 1992, 2002 e 2007, em meses do período chuvoso. O ano de 2007 foi considerado um ano extremamente seco no submédio da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, com exceção do mês de fevereiro. A atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em associação com o posicionamento dos centros de vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) sobre a área oceânica favoreceu o aumento das chuvas na região (GURJÃO et al., 2012). Além disso, tem-se um comportamento inverso da ATD no período entre os anos de 1994 e 2000. Nota-se, uma redução da ATD em Bebedouro (Fig. 4a). A redução da ATD entre 1994 e 2000 também é visível na série de Petrolina (Fig. 4c). Essa queda nos valores da ATD coincide com uma elevação significante da temperatura mínima (não mostrado).

3.2. Expansão Agrícola

A Figura 5 mostra a expansão de áreas irrigadas a partir de quatro imagens classificadas de IVDN, selecionadas em meses do período seco, para evidenciar o efeito da irrigação nas regiões destacadas. Os pontos 1, 2 e 3 apresentados nas imagens indicam a localização geográfica das estações de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE, respectivamente. As áreas em tons de verde correspondem a áreas vegetadas, com valores de IVDN acima de 0,40, as tonalidades entre 0,01 e 0,40 representam solo exposto e aglomerados urbanos, e as áreas na cor azul representam o Rio São Francisco (água). A expansão agrícola é evidente nas imagens de satélite. Esse resultado é consistente com estudos realizados por SÁ et al. (2007). Os autores detectaram um aumento de 47,19% de áreas irrigadas no período entre 1986 e 2006 na região do Polo agrícola Petrolina-Juazeiro. Os autores ressaltam, entretanto, que a maior alteração na cobertura do solo ocorreu na década de 1986 a 1996.

Mudanças na cobertura e no uso da terra podem alterar substancialmente o balanço de energia em superfície e, consequentemente, a transferência de água para a atmosfera (CORREIA et al., 2006a).

Figura 5 – Imagens classificadas da área em estudo, demonstrando a dinâmica da ocupação por áreas irrigadas nos dias: (a) 24/06/1987; (b) 17/08/1995; (c) 24/09/2003 e (d) 29/08/2011.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Dados do Censo Agropecuário do IBGE (2006) e da ANA (2017) indicam que a área irrigada no Brasil tem crescido mais de 4% ao ano, desde a década de 1960. Na Região Nordeste o crescimento da irrigação é mais expressivo no Estado da Bahia, principalmente a partir de meados da década de 1990. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva Paz et al. (2003).

3.3. Teste Sequencial de Mann-Kendall (MK) e Teste de Pettitt

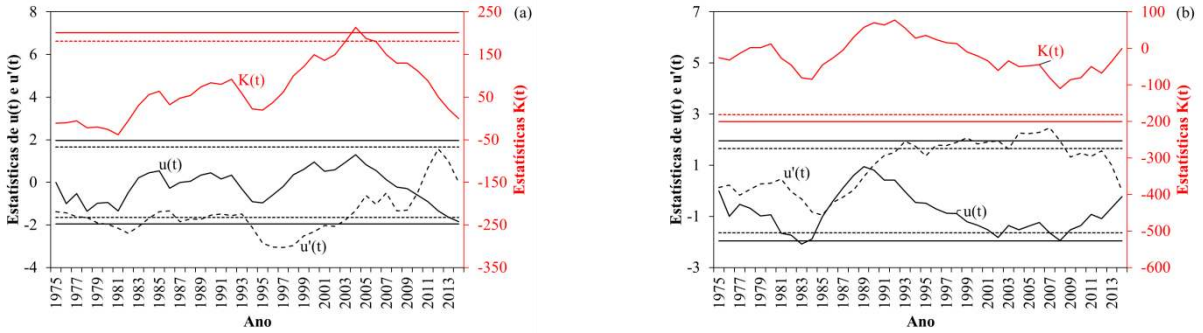
3.3.1. Razão de Mistura

Com base na aplicação do teste não paramétrico de Run, apenas as séries anuais de Bebedouro e Petrolina foram consideradas homogêneas e permitiram a aplicação do teste sequencial de Mann-Kendall. Vários aspectos contribuem para a não homogeneidade das séries. Em dados meteorológicos, atividades antropogênicas e variações climáticas estão entre as causas mais comuns.

A série da estação de Bebedouro (Fig. 6a) mostra uma tendência crescente entre 1981 e 2004, mas com uma mudança durante o período do ENOS estendido (1990-1994). Essa

inversão na tendência é confirmada pelo teste de Pettitt. Em Petrolina (Fig. 6b), é possível observar que o teste de MK apresenta dois cruzamentos seguidos das curvas u(t) e u'(t) entre os intervalos de confiança, indicando um período de instabilidade nos dados possivelmente decorrente de efeitos do ENOS estendido (1990-1994). O teste de Pettitt não indica que houve mudança estrutural (cruzamento da estatística K(t) no intervalo de confiança) nos dados.

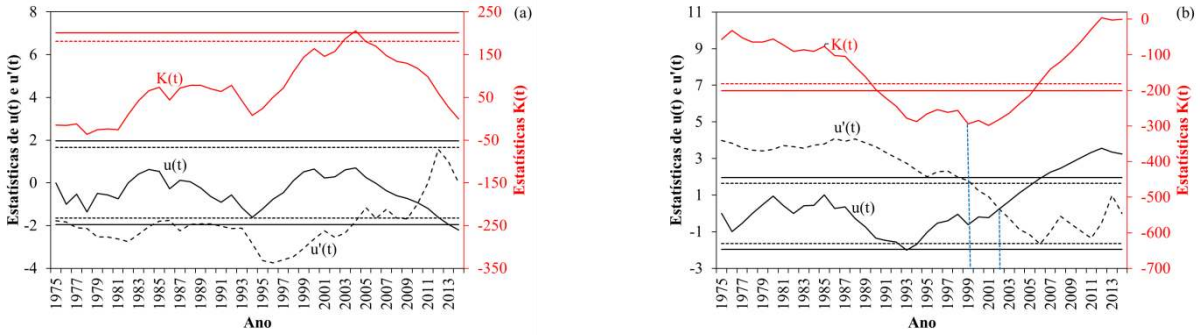
Figura 6 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No período chuvoso, somente as séries temporais de Bebedouro e Mandacaru foram consideradas homogêneas. Em Bebedouro (Fig. 7a) há uma tendência de decréscimo na razão de mistura entre os anos de 1984 e 1994, como pode ser observado pela curva da estatística de u(t), seguido de um aumento até o ano de 2004, iniciando novamente uma tendência negativa até o final da série. Já em Mandacaru (Fig. 7b), a partir de 1993, há um indicativo de tendência de aumento significativa da razão de mistura na atmosfera com o cruzamento entre as curvas u(t) e u'(t) no ano de 2002. O teste de Pettitt indica um ponto de mudança abrupta no ano de 1999. Essa mudança ocorre no instante em que a estatística do teste atinge seu valor máximo em módulo e ultrapassa o limite crítico pré-determinado.

Figura 7 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries da razão de mistura (g/kg) no período chuvoso para: (a) Bebedouro-PE e (b) Mandacaru-BA.

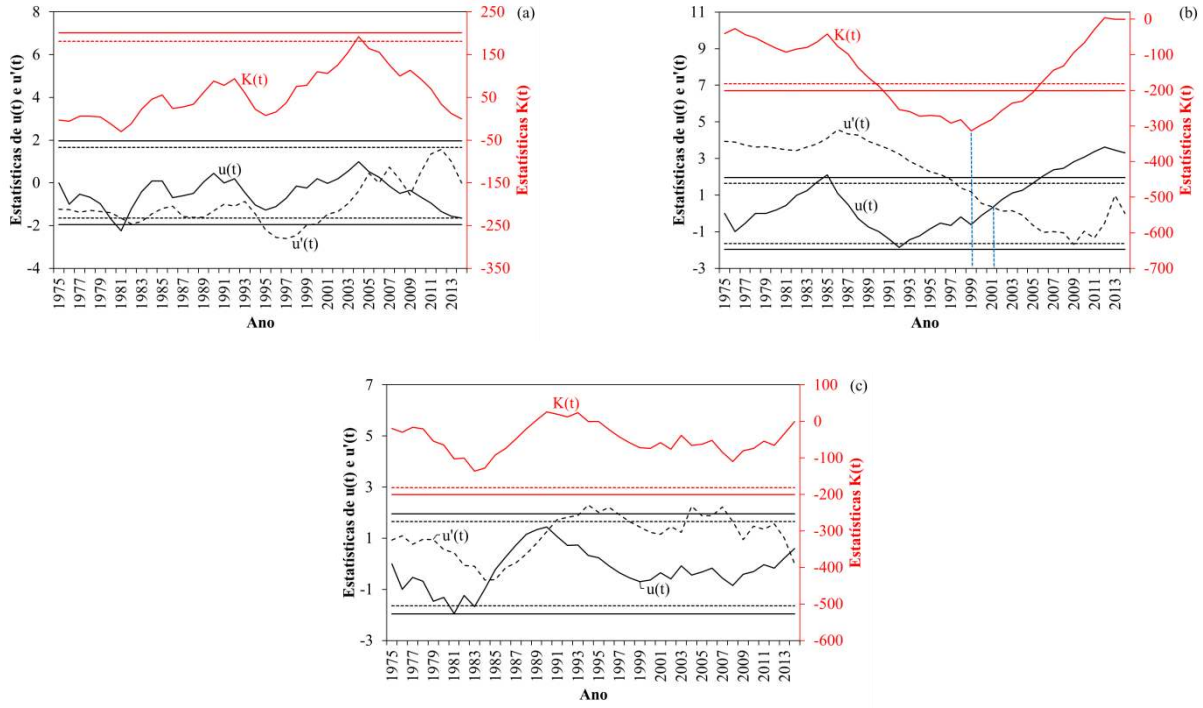


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Esse resultado valida as informações extraídas das imagens do Sensoriamento Remoto. Ambos os métodos foram eficientes em indicar períodos com mudanças substanciais nas localidades analisadas. No final da década de 1990 ocorreram mudanças significativas na região do perímetro irrigado de Mandacaru com modernização de sistemas de irrigação.

Durante o período seco em Bebedouro (Fig. 8a), observa-se tendência de crescimento na razão de mistura, seguida de uma tendência de redução acentuada, a partir de 2004, porém, sem significância estatística. Em Mandacaru (Fig. 8b), a partir do ano de 1992 é observado um aumento da razão de mistura ao longo dos anos, considerado estatisticamente significativo. O teste de Pettitt indica o ano de 1999 como sendo o início da mudança no padrão dos dados. Já em Petrolina (Fig. 8c) ocorre o inverso, com tendência de redução na razão de mistura.

Figura 8 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries da razão de mistura (g/kg) no período seco para: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

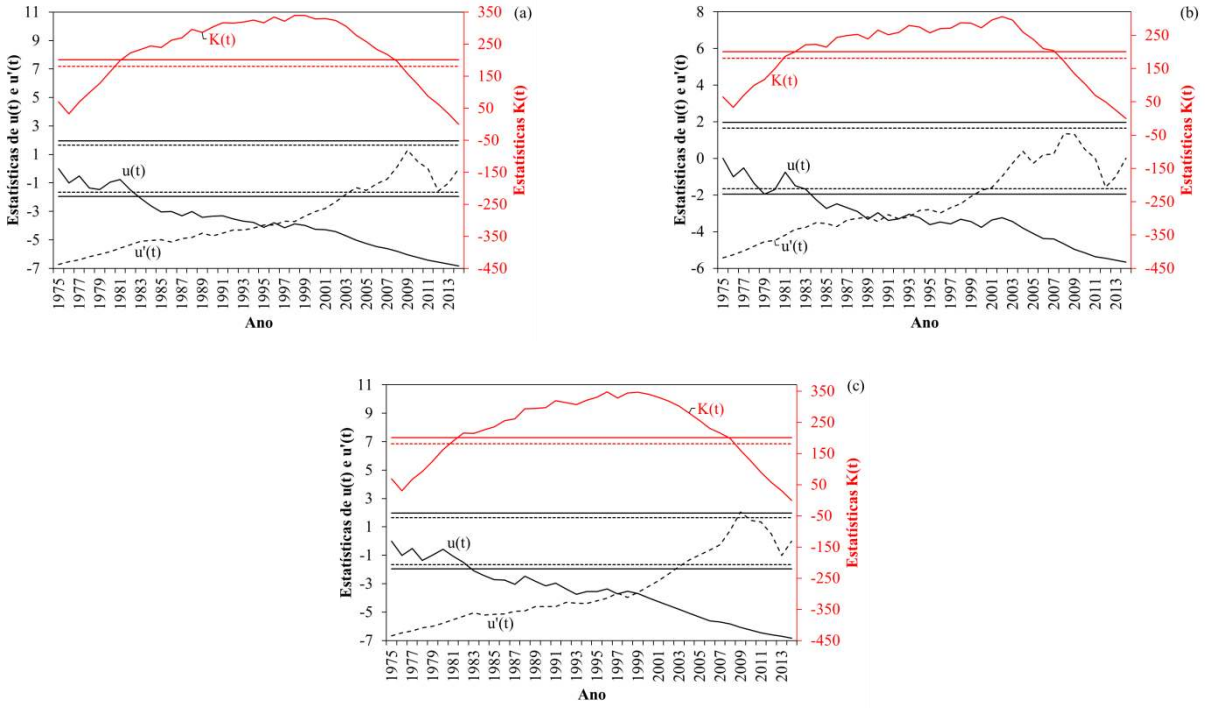


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.3.2. Vento a 10 metros

Os resultados do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do vento a 10m na estação de Petrolina são apresentados na Figura 9. É observada tendência decrescente acentuada na velocidade do vento em todo o período observado da série. No entanto, como as curvas de u(t) e u'(t) se cruzam fora dos limites de confiança do teste de Mann-Kendall não é possível afirmar que houve uma tendência estatisticamente significativa. A diminuição mais abrupta na intensidade do vento é perceptível em 1980. Esse período coincide com a formação do Lago de Sobradinho. Segundo Correia et al. (2006b), um dos efeitos significativos da construção do reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho foi a mudança no padrão de vento local resultante da formação da brisa lacustre. A circulação da brisa é no sentido oposto à dos ventos alísios de leste-sudeste, uma interação que pode justificar, em parte, a redução na intensidade. Além disso, os perímetros irrigados também contribuem para a geração de circulações do tipo brisa. A ausência de observações do vento a 10 metros nas estações de Bebedouro e Mandacaru inviabilizaram a análise nessas localidades.

Figura 9 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt do vento a 10m (km/dia) em Petrolina-PE para as séries: (a) anual, (b) período chuvoso e (c) período seco.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

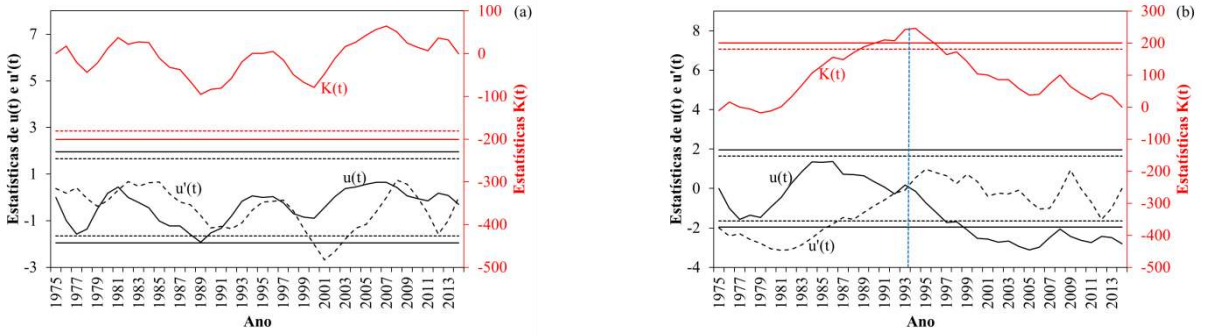
3.3.3. Amplitude Térmica Diária

Na aplicação do teste de Run, apenas a série anual de Mandacaru foi considerada não homogênea. Os resultados da análise de tendência para as séries anuais de Bebedouro e Petrolina são mostrados na Figura 10. Em Bebedouro (Fig. 10a) não foi observada uma tendência bem definida ao longo da série temporal. Em Petrolina (Fig. 10b), nota-se uma tendência de redução da ATD iniciada em 1986 até o final da série temporal. O ano de 1993 é indicado como sendo o início da tendência decrescente significativa pelo teste de Mann-Kendall e confirmado pelo teste de Pettitt ao nível de 95%.

Os resultados da aplicação de MK para o período chuvoso são apresentados na Figura 11. Há pouca variabilidade observada na ATD em Bebedouro (Fig. 11a). Em Mandacaru (Fig. 11b), há o início de uma tendência de aumento já no ano de 1980, seguindo até o final da série temporal, porém, não significativa. Pelo teste de Pettitt, no ano de 2000 seria o início da mudança estatisticamente significativa na série temporal. Em Petrolina (Fig. 11c) há uma tendência de redução na ATD iniciando em meados da década de 1980 e tornando-se

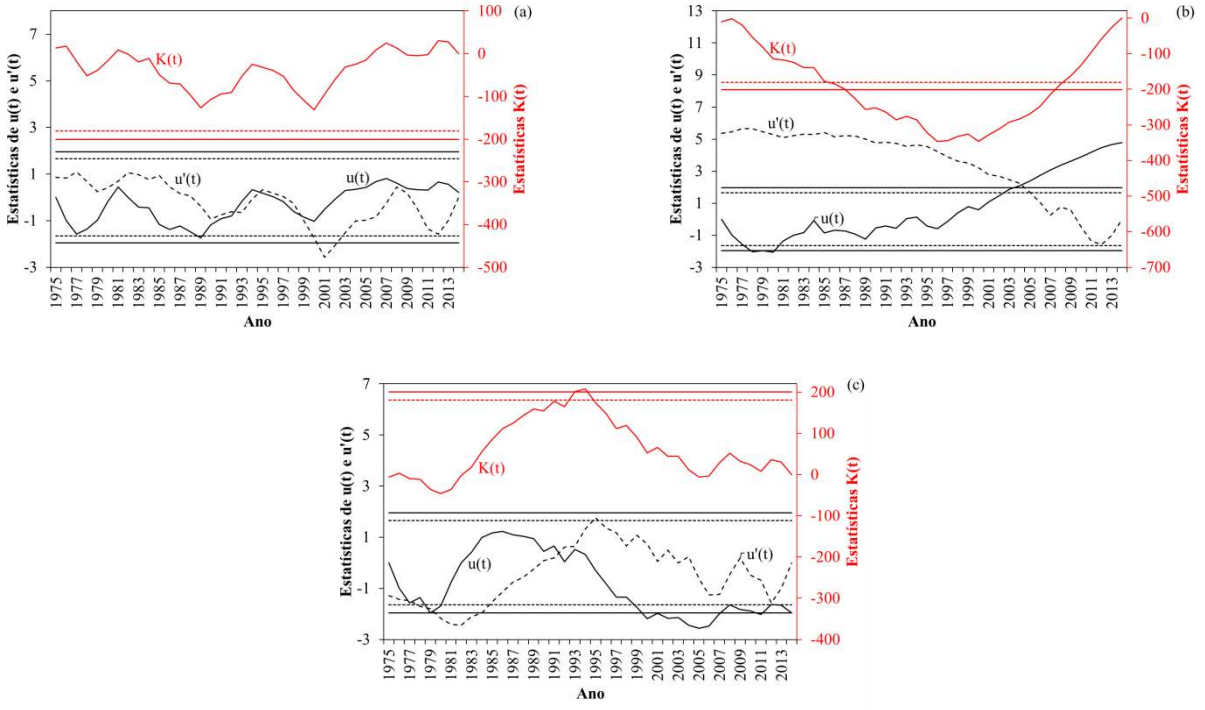
estatisticamente significativa em 1991, com o cruzamento das curvas de u(t) e u'(t). Pelo teste de Pettitt, o ano de 1994 seria o início da tendência significativa.

Figura 10 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 11 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.



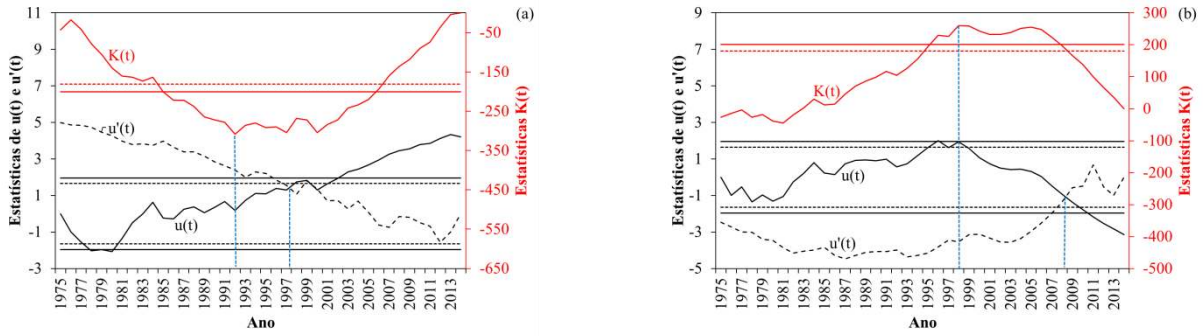
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Esses resultados indicam que a relação entre a temperatura do ar e a composição da cobertura do solo é um dado importante na investigação de mudanças do clima regional. Aumentar a quantidade de áreas agrícolas em ambientes com vegetação nativa do tipo

Caatinga pode levar à redução da temperatura do ar, enquanto o aumento de pastagens em espaços de pecuária extensiva teria o efeito de aumentar a temperatura. Resultado semelhante foi observado por Xu et al. (2020). Segundo dados do IBGE, desde o ano de 1993, áreas extensas de Caatinga têm sido transformadas em pastagens, terras agricultáveis e outros tipos de uso intensivo do solo (IBGE, 2007).

A tendência crescente na ATD em Mandacaru resulta de um crescimento mais intenso da temperatura máxima e de um decréscimo na temperatura mínima conforme ilustrado na Figura 12. A tendência positiva na temperatura máxima tem início em 1992, tornando-se significativa em 1997. No caso da temperatura mínima o teste de Pettitt indica mudança estatisticamente significativa em 1998. A tendência negativa, torna-se significativa em 2008.

Figura 12 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso em Mandacaru-PE: (a) Temperatura Máxima e (b) Temperatura Mínima.



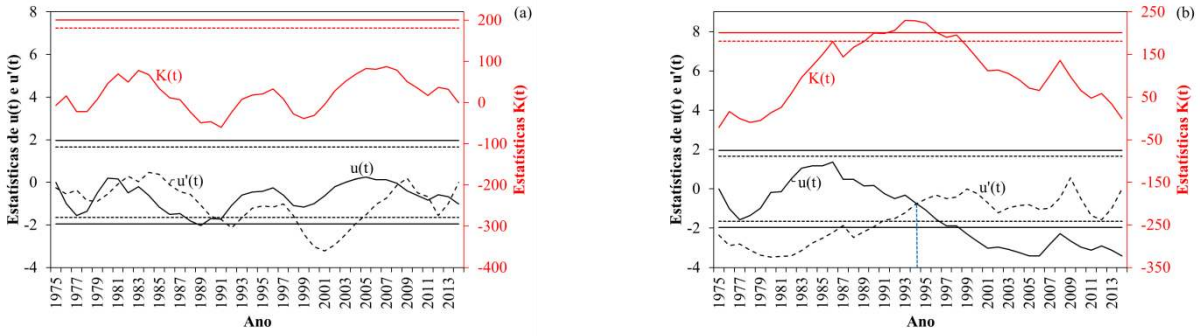
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A mudança na tendência da Tmin durante o período úmido pode ser dividida em duas etapas. Na primeira, a Tmin em Mandacaru aumentou entre 1980 e 1998. Na segunda fase diminuiu rapidamente a partir de 1999. Portanto, os efeitos provenientes das mudanças no uso da terra foram distintos para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina. Esses resultados são consistentes com os descritos por outros autores. Freitas et al. (2010) investigaram o impacto de mudanças no uso da terra, em áreas adjacentes, derivado da conversão de um tipo de uso da terra para outro e verificaram que em muitas situações resultou em mais aquecimento do que resfriamento. Em um estudo sobre variação de estoques de carbono na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Menezes et al. (2021) observaram uma redução de mais de 50% nos

estoques de carbono no bioma Caatinga decorrente da conversão da formação florestal para pecuária ou uso agrícola.

No período seco, apenas as séries de Bebedouro e Petrolina foram consideradas homogêneas pelo teste run. Em Bebedouro (Fig. 13a) não é observada tendência bem definida ao longo da série temporal, considerando que há pouca variabilidade no comportamento da série. Em Petrolina (Fig.13b), é observada tendência de redução na ATD iniciada em 1986 e tornando-se significativa em 1994 pelo teste de Mann-Kendall. O teste de Pettitt confirma o ano de 1994 como o ponto de mudança brusca na série temporal.

Figura 13 – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a tendência da umidade atmosférica, vento, e amplitude térmica diária na região do polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro, para o período de 1975 a 2014. A análise de tendências restritas às séries homogêneas de dados como critério para aplicação do teste sequencial de Mann-Kendall, permitiu uma avaliação mais precisa sobre mudanças no clima regional.

Foram identificadas tendências de aumento na umidade, temperatura máxima e amplitude térmica diária principalmente na região rural que, a partir de meados da década de 1990, vivenciou um processo de desenvolvimento agropecuário e industrialização, com destaque para a expansão da agricultura irrigada em Mandacaru-BA. Um resultado relevante foi a mudança acentuada na tendência da Tmin durante o período úmido em Mandacaru.

Nitidamente, foi detectada uma tendência crescente entre 1980 e 1998. A partir desse ano verificou-se uma queda acentuada. Portanto, os efeitos nas tendências da Tmin e ATD provenientes das mudanças no uso da terra foram distintos para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina.

Foi constatado que o desflorestamento para fins econômicos (agricultura e pecuária) no bioma Caatinga está entre as principais causas de variações na tendência da amplitude térmica diária. Portanto, é possível afirmar que os resultados desse estudo podem contribuir com novas estratégias de mudanças no uso da terra.

REFERÊNCIAS

AHMADI, F. et al. Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. **Meteorological Applications**, v. 25, n. 2, p. 314-321, 2018.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, DF: ANA, 2017. 86 p.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BARBIERI, L. F. P. et al. Desempenho de método de estimativa da temperatura média diária: um estudo em áreas com forte pressão antrópica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 857-874, 2013.

BARBIERI, L. F. P. et al. Impact of climate variations and land use change: a Mann-Kendall application. **Revista Geama**, Recife, v. 10, n. 1, p. 19-27, 2017.

CABRAL JÚNIOR, J. B. et al. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, p. 1-11, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00704-019-02816-w.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake area. Part one: an observational analysis. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 103-113, 2006a.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake area. Part two: a regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 115-128, 2006b.

CORREIA, M. F. et al. Impacto da expansão agrícola da amplitude térmica diária em ambiente semiárido. **Ciência e Natura**, v. 33, ed. suplementar, p. 311-314, 2011.

CPTEC/INPE. **Ocorrências de El Niño e La Niña**. [S. l.]: CPTEC/INPE, 2020. Disponível em: http://enos.cptec.inpe.br/. Acesso em: 20 out. 2020.

EKHTIARI, N. et al. Effects of the lake Sobradinho reservoir (Northeastern Brazil) on the regional climate. **Climate**, v. 5, n. 3, art. 50, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/cli5030050.

FREITAS, S. R.; HAWBAKER, T. J.; METZGER, J. P. Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 3, p. 410-417, 25 jan. 2010.

GURJÃO, C. D. S. et al. Influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no regime hidrológico do Rio São Francisco: uma análise em regiões com fortes pressões antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 774-790, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal IBGE**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em: http://www.ibge.gov.br. Acesso em: 18 out. 2007.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006**: agricultura familiar – primeiros resultados: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

MELO, M. M. M. S. et al. Trends in temperature and rainfall extremes near the artificial Sobradinho lake, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 426-440, 2018.

MENEZES, R. S. C. et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, art. 114943, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). *In*: THIRD ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings [...]**. Washington, DC: NASA, 1973. p. 309-317.

RUBIN, D. B. **Multiple imputation for nonresponse in surveys**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

SÁ, I. I. S. et al. Dinâmica da agricultura irrigada em uma área do vale do São Francisco utilizando técnicas de sensoriamento remoto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: SBA, 2007.

SILVA, G. A. et al. Avaliação do potencial eólico na região de Petrolina-PE utilizando dados de reanálises do ERA5-Land durante a influência relativa dos oceanos Pacífico Tropical e Atlântico Tropical Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 776-792, 2022.

SILVA PAZ, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C. Irrigação: tecnologia e produtividade. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 5, n. 3, p. 30-37, 2003.

SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Genève: Organisation Météorologique Mondiale, 1975. 192 p. (OMM Note Technique, 143).

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. 460 p.

VILAR, A. A. R. et al. Avaliação do impacto de secas severas no Nordeste brasileiro na geração de energia elétrica através do modelo Newave: projeção das energias afluentes e armazenadas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-7786351004.

XIA LI, Y. et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban e rural development: the case of Mu Us Sandy Land, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 697-715, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.011.

XU, S. et al. Spatial scale effects of the variable relationships between landscape pattern and water quality: example from an agricultural karst river basin, Southwestern China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 300, art. 106999, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106999.