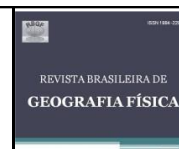




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Influência da variabilidade Climática no Litoral de Maceió, Alagoas-Brasil

Maiane Rodrigues do Nascimento-Universidade Federal de Alagoas

Mayara Rodrigues Nascimento-Universidade Federal de Alagoas

Djane Fonseca da Silva-Universidade Federal de Alagoas

Henrique Ravi Rocha de Carvalho Almeida-Universidade Federal de Alagoas

Artigo recebido em 11/10/2024 e aceito em 08/09/2025

RESUMO

O presente trabalho analisou a variabilidade climática em Maceió e seu litoral, utilizando uma série temporal de 1991 a 2021. Foram examinadas variáveis como precipitação, temperatura, velocidade do vento e nível de marés, com dados do INMET e da Defesa Civil Municipal (CEMAD) para os bairros litorâneos, abrangendo o período de 2015 a 2021 devido à limitação de estações de monitoramento. A pesquisa aplicou o teste de Mann-Kendall, um método estatístico não paramétrico, para identificar tendências nas séries temporais, e o teste T-Student para validar os dados. As variáveis também foram submetidas à Análise de Ondaletas (AO) para identificar escalas temporais e fenômenos que influenciaram as condições climáticas locais. Os resultados evidenciaram tanto aumentos quanto diminuições nas variáveis, com ênfase nas alterações de vento e nas condições dos bairros litorâneos. A AO indicou influências significativas do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), do Dipolo do Atlântico e ciclos de 11 anos relacionados às manchas solares. Este estudo destaca a importância de metodologias robustas para a compreensão do comportamento das variáveis climáticas e meteorológicas, contribuindo para um melhor entendimento das dinâmicas climáticas na região.

Palavras-chave: Fenômenos climáticos, Tendência climática, Análises de Ondaletas.

Influence of Climate Variability on the Maceió Coast, Alagoas- Brazil

ABSTRACT

This study analyzed the climate variability in Maceió and its coastline, utilizing a time series from 1991 to 2021. Variables such as precipitation, temperature, wind speed, and tide levels were examined, using data from INMET and the Municipal Civil Defense (CEMAD) for the coastal neighborhoods, covering the period from 2015 to 2021 due to the limitation of monitoring stations. The research applied the Mann-Kendall test, a non-parametric statistical method, to identify trends in the time series, and the T-Student test to validate the data. The variables were also subjected to Wavelet Analysis (WA) to identify time scales and phenomena that influenced local climate conditions. The results revealed both increases and decreases in the variables, with a focus on wind fluctuations and conditions in the coastal neighborhoods. The WA indicated significant influences from the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), the Atlantic Dipole, and 11-year cycles related to sunspots. This study highlights the importance of robust methodologies for understanding the behavior of climate and meteorological variables, contributing to a better understanding of climate dynamics in the region.

Keywords: Climatic phenomena, Climate trend, Wavelet Analysis.

Introdução

As mudanças climáticas em uma determinada região podem afetar diversos setores da sociedade, influenciando a qualidade de vida nas comunidades, influenciando na saúde humana, nos biomas, na fauna e na flora existentes, na produção de alimentos, na agricultura e na pecuária, bem como as atividades econômicas associadas ao turismo dessa região (Silva et al, 2022). É no conjunto de debates e argumentações das

mudanças climáticas globais que se situa a passagem do clima, enquanto elemento integrante das paisagens, para fenômeno ecológico-político eivado de ameaças e riscos ao futuro da vida na Terra (Mendonça, 2021).

O conhecimento do comportamento atmosférico, bem como das oscilações ambientais e da variabilidade climática, trará subsídios para conscientizar a população e gerar políticas públicas, buscando alertar da necessidade

da prevenção dos riscos ligados aos danos climático-ambientais, trazendo melhoria das condições sociais e econômicas da região (Ferreira e Kemenes, 2023).

A necessidade de compreender as mudanças climáticas e seus efeitos sobre o ambiente natural reforça a importância dos estudos de tendências em séries temporais, dada a incerteza presente na dinâmica dos processos hidrológicos (Gonçalves e Back, 2018). É um dos assuntos que vem ocupando os meios científico e acadêmico nas últimas décadas está relacionado à identificação de tendências climáticas em nível regional e mundial. A verificação das alterações no clima é tida como uma ferramenta para o planejamento da sociedade, pois permite considerar as possíveis consequências do aumento das temperaturas do ar e de mudanças no regime de precipitação (Ipcc, 2013).

Assim como Rocha e Melo (2024) destacam que a região Nordeste do Brasil apresenta uma grande variabilidade climática, tanto dentro de uma mesma estação (intrazonal) quanto entre diferentes anos (interanual). Essa variabilidade climática afeta diretamente os recursos hídricos da região, impactando a vida diária das comunidades locais. Assim, as condições climáticas desempenham um papel crucial na gestão da água e no sustento dessas populações.

Segundo Batista et al. (2021), a cidade de Maceió adquiriu mudanças climatológicas significativas no que se refere a uso e ocupação do solo, pois estudos realizados embasam que ocorreu redução de cobertura vegetal principalmente de classes de vegetação densa, sendo algumas pertencentes ao bioma Mata Atlântica, as quais foram identificados em alguns bairros da cidade, boa parte desse efeito se deve a expansão urbana e de empreendimentos. Esses fatores contribuem para o aumento da temperatura e consequentemente isso faz com que a sensação seja percebida como um desconforto térmico em áreas menos arborizadas e favorecidas por influências hídricas.

As pesquisas climatológicas são realizadas segundo paradigmas em torno do conceito de Clima. Várias metodologias podem ser aplicadas no estudo do clima, a depender do objetivo

específico da pesquisa e da verificação das hipóteses levantadas. Uma grande questão nas pesquisas dentro da Climatologia Geográfica refere-se à dificuldade de mapeamento de cenários que são incertos. Muitos estudos se utilizam de longas séries históricas para a identificação de tendências futuras. Esses estudos são caracterizados pela aplicação de técnicas estatísticas em longas séries temporais sobre os elementos do clima, buscando compreender sua variabilidade e sua tendência (Barbosa, et. al., 2022).

Diante de tais perspectivas, o trabalho analisou o comportamento das variáveis climáticas por meio das tendências climáticas e ondaletas, identificando a influência da variabilidade climática na região do litoral de Maceió. A pesquisa buscou compreender como as variações nas temperaturas e precipitações impactaram a região costeira, oferecendo subsídios para políticas públicas que promovam a sustentabilidade e a resiliência diante das mudanças climáticas.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo refere-se ao Município de Maceió, sobretudo com a abrangência de sua zona costeira. A cidade de Maceió é a capital do estado de Alagoas, possui sua localização na parte litorânea do país, e situa-se entre as latitudes 9° 45'Sul e longitude 35° 42' Oeste (Figura 1). De acordo com o IBGE (2022), Maceió contém área de 512,8 km², e possui cerca de 1.031.597 habitantes, seu clima é diretamente influenciado pelo Oceano Atlântico que fronteira sua costa, com isso possui presenças de formações de lagoas, e geografia com traços diversificados em sua paisagem.

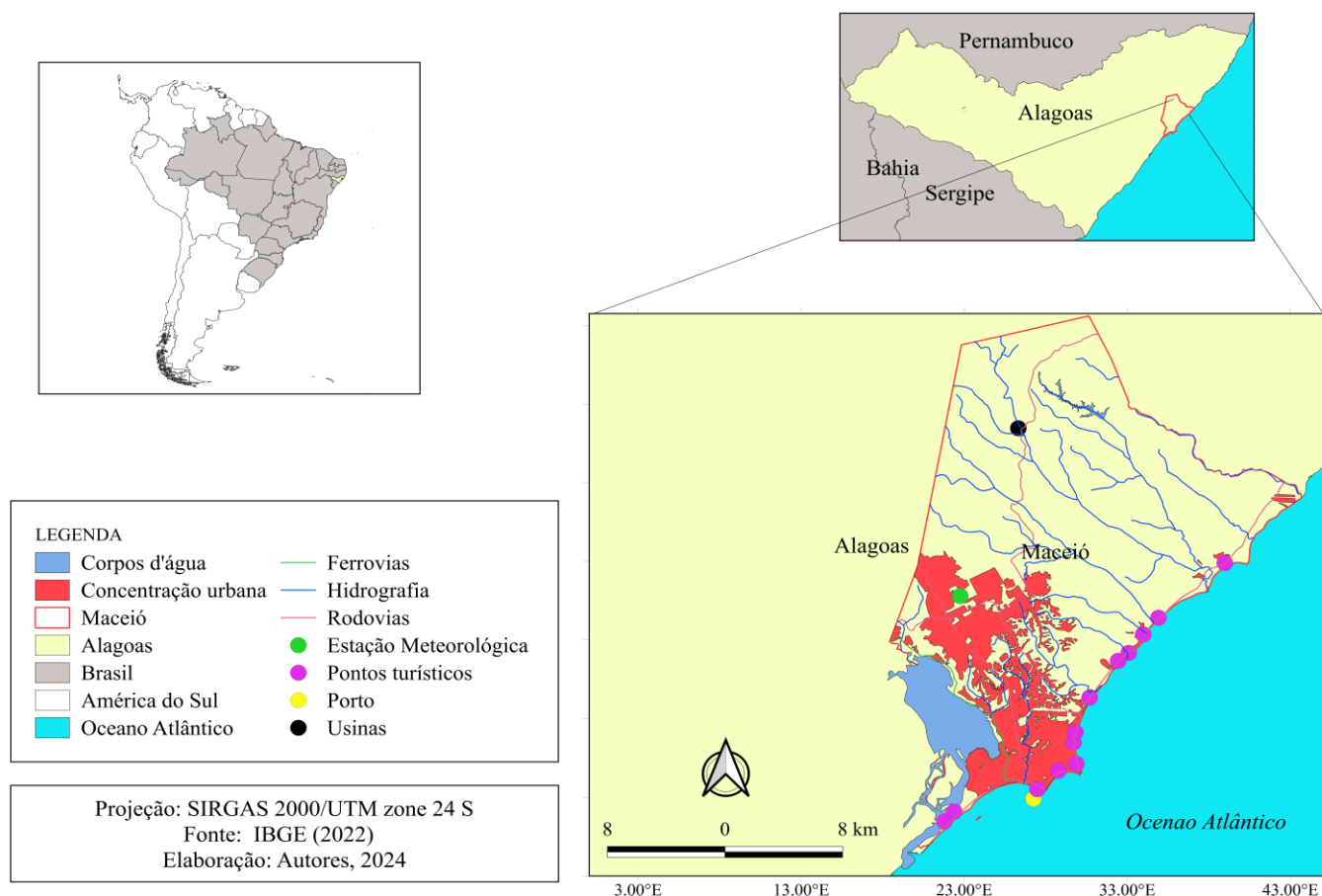


Figura 1. Área de estudo, Maceió no estado de Alagoas, Brasil.
 Fonte: Autores, 2024.

Dados Meteorológicos

Os dados utilizados nas análises foram obtidos das estações convencionais de Maceió, com Latitude: -9.551 e Longitude: -35.770, para o período de 1991 a 2021, coletados na base do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As variáveis analisadas incluíram precipitação total mensal, temperatura média mensal e velocidade média do vento mensal, com falhas preenchidas pela média climatológica mensal.

Além disso, foram utilizados dados de precipitação mensal das estações nos bairros Cruz das Almas e Ipioca, coletados pela Defesa Civil Municipal (CEMAD) entre 2015 e 2021. Embora a limitação temporal se deva à escassez de dados, não houve falhas nas variáveis. Foi realizada uma análise de tendência da precipitação, comparando-a com a estação do INMET, o que permitiu estimar o comportamento das variáveis de temperatura

média e velocidade do vento nas estações litorâneas.

Procedimentos estatísticos semelhantes foram aplicados aos níveis de marés no litoral, com dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e da Administração do Porto de Maceió, abrangendo períodos curtos de observação de 2003 a 2019 devido à falta de marégrafos permanentes em Alagoas.

Análise de Tendências

Para desenvolver a pesquisa, foi utilizada a análise de tendência, permitindo avaliar a presença de tendências nas séries e estimar seu comportamento futuro. O teste de Mann-Kendall, um teste estatístico não paramétrico recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para análises de séries temporais extensas (Cavalcante et al., 2022), foi aplicado. Este teste é comumente utilizado em séries temporais hidrológicas e climatológicas (Chattopadhyay e Edwards, 2016; Bonfim et al., 2020).

Algumas variáveis não tinham uma série robusta de 30 anos devido à instalação recente das estações meteorológicas da Defesa Civil de Maceió (2015-2021). No entanto, a análise do comportamento dessas variáveis e a previsão de tendências futuras justificaram a aplicação do teste de Mann-Kendall. Esse teste não paramétrico avalia a correlação das séries e identifica tendências não previstas. Para as séries que passam no teste, aplica-se o Mann-Kendall modificado, que considera a autocorrelação e remove tendências significativas (Silva Lima et al., 2022).

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

Em que tp é o número de dados iguais em um grupo p e q é o número de grupos com valores iguais na série de dados. O segundo termo ajusta dados censurados. Usando a Eq. 1, um valor positivo de S indica uma tendência crescente, enquanto um valor negativo sugere uma tendência decrescente. Como S é normalmente distribuída, com média zero e variância dadas pelas Eqs. 2, é possível testar se a tendência é significativamente diferente de zero. Se S for significativamente diferente de zero, rejeita-se a hipótese nula (H_0) para um nível de significância, indicando a presença de uma tendência, e a hipótese alternativa (H_1) é aceita. O teste estatístico parametrizado (ZMK) é calculado pela seguinte equação:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A presença de uma tendência estatisticamente significativa é avaliada pelo valor de Z , utilizado para testar a hipótese nula de que não existe tendência. Um valor positivo de ZMK indica uma tendência crescente, enquanto um valor negativo aponta para uma tendência decrescente (Bonfim et al., 2020). Para testar a tendência monotônica, a hipótese nula é rejeitada se o valor absoluto de Z for maior que $Z_{1-p/2}$, conforme a tabela da distribuição normal cumulativa padrão. Neste estudo, foram aplicados os níveis de significância $p = 0,01$ e $p = 0,05$.

Teste de Significância de T-Student

O teste de significância T-Student foi utilizado para validar os dados temporais em relação às variáveis hidrometeorológicas, permitindo determinar se as tendências obtidas pelo teste de Mann-Kendall apresentam significância estatística. Testes paramétricos, como o T-Student, são preferencialmente empregados em análises de dados quantitativos, pois têm maior capacidade de identificar diferenças significativas (Cavalcante et al., 2022). Esse teste é adequado para comparar dois grupos independentes, sem exigir que as amostras tenham o mesmo tamanho.

Segundo Silva (2020), uma hipótese estatística é uma afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações, representando uma declaração sobre a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória. Para amostras grandes ($N > 30$), as distribuições amostrais tendem a ser quase normais, melhorando com o aumento do tamanho da amostra. Em contrapartida, para amostras pequenas, as distribuições podem não ser adequadas, piorando à medida que o tamanho da amostra diminui, o que requer modificações apropriadas (Cavalcante et al., 2022). O teste T-Student é de extrema relevância em pesquisas na área de meteorologia para estimar e validar dados (Kayano e Kousky, 1996; Cavalcante, 2023). A fórmula para o cálculo é apresentada na Equação 3.

$$tc = \frac{t}{\sqrt{n-2}} + t^2 \quad (3)$$

Sendo: tc = valor do percentil e c é o grau de liberdade; $c = 0,95$ ou 95%; t = valor do percentil tabelado de acordo com $v(n-1)$; n = número de dados.

Análise de Ondeletas/Ondaletas ou Wavelet (AO)

As séries temporais das variáveis meteorológicas de Maceió foram submetidas à Análise de Ondaletas (AO) com o objetivo de identificar as escalas temporais presentes, permitindo entender os fenômenos que

influenciavam as variáveis locais e como esses fenômenos climáticos afetavam a região.

O termo Ondaleta refere-se a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas que são geradas por dilatações, $\Psi(t) \rightarrow \Psi(2t)$, e translações, $\Psi(t) \rightarrow \Psi(t+1)$, de uma função base geradora simples $\Psi(t)$, assim, através da ondeleta-mãe, pode ser gerada as chamadas ondeletas-filhas. A base da Transformada de Fourier é que cada função base é obtida a partir de simples dilatações na frequência, conciliando as propriedades de dilatação e translação em um exemplo de função base, sendo obtidas as chamadas funções ondeletas, em que as dilatações e translações são dadas por duas variáveis denominadas j e k , respectivamente (Bolzan, 2006).

Primeiramente os índices para cada variável devem ser tratados e, em seguida, submetidos à AO. Os índices são as anomalias das variáveis, calculadas a partir da climatologia mensal e normalizadas pelo desvio padrão. (Blain e Kayano 2011; Silva et al., 2023) equação 4:

$$[AVar]_{(i,j)} = ([Var]_{(i,j)} - (Var)_{-i} / \sigma_{-i}) \quad (4)$$

Em que: $AVar_{i,j}$ é a anomalia da variável, no ano $j=1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i=1, 2, 3, \dots, 12$; $Var_{i,j}$ é a variável no ano $j=1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i=1, 2, 3, \dots, 12$, o qual foi calculado sua anomalia; $([Var]_{-i})$ é a média climatológica do mês a ser calculado a anomalia e σ_{-i} é o desvio padrão utilizado para cada mês i específico.

A Ondaleta de Morlet é definida como uma exponencial complexa modulada por uma Gaussiana, que é dada pela Equação 5 (Andreoli et al., 2005; Silva, 2017; e Cavalcante et al., 2022):

$$\psi(t) = e^{(i\omega_0 t - \eta^2/2)} \quad (5)$$

Em que $\eta = t/s$, onde t é o tempo, s é a escala da ondaleta em função do tempo ($= 2/dt$) e ω_0 é uma frequência não-dimensional ($\text{lag}1 = 0,7$), escolhidos conforme Andreoli et al. (2005); todos introduzidos no “script” de programação do Software Matlab®.

Resultados e discussão

Tendências de Man Kendall para as variáveis meteorológicas

A análise de tendências da precipitação em Maceió de 1991 a 2021, utilizando o teste de Mann-Kendall, revelou uma tendência interanual positiva de 0,0178 mm e uma tendência total de 0,5546 mm, conforme indicado por Scofield et al. (2014). Enquanto Barbosa et al. (2018) observaram resultados positivos no Agreste Setentrional, o bairro Cruz das Almas apresentou uma tendência interanual negativa de -0,0238 mm, e Ipioca teve -0,0447 mm, sugerindo uma diminuição na precipitação, possivelmente influenciada por fenômenos climáticos.

As análises de temperatura média mostraram uma tendência interanual de 0,0319 °C, com aumento significativo ao longo dos anos, corroborando tendências positivas em outras regiões do Brasil. A velocidade média do vento em Maceió teve uma tendência de -0,0007 m/s, indicando redução, enquanto as características climáticas variam entre Litoral, Agreste e Sertão.

Os dados de nível de maré, limitados pela falta de uma estação, mostraram uma tendência interanual de 0,2535 cm, confirmando um aumento. Silva et al. (2022) identificaram que os meses de março a junho apresentaram os maiores níveis de maré, com um aumento médio de 5,69 cm ao longo de 13 anos, evidenciando um crescimento de 0,438 cm/ano.

Local	Tendência interanual	Tendência para toda série	Status da tendência	Resultado do Teste T
Maceió (precipitação)	0,0178 mm/ano	0,5546 mm	Aumento	Com significância estatística
Bairro Cruz das Almas (Precipitação)	-0,0238 mm/ano	-0,1668 mm	Diminuição	Sem significância estatística
Bairro Ipioca (Precipitação)	-0,0447 mm/ano	-0,3131mm	Diminuição	Sem significância estatística
Maceió (Temperatura média)	0,0319 °C/ano	0,9891 °C	Aumento	Com significância estatística
Maceió (Velocidade do Vento)	-0,0007 m/s	-0,0123 m/s	Diminuição	Sem significância estatística
Litoral de Maceió (Nível de maré)	0,2535 cm/ano	1,2677 cm	Aumento	Sem significância estatística

Tabela 1. Tendências nas séries das variáveis meteorológicas
Fonte: Autores, 2024.

Os valores de tendências para as variáveis analisadas (Tabela 1) foram validados com base nos níveis de significância, apesar de algumas séries terem menos de 30 anos de dados. As séries de precipitação e temperatura do INMET mostraram significância estatística, enquanto as demais não foram validadas devido ao curto período de análise. Observou-se uma diminuição na precipitação nas estações litorâneas, enquanto a estação do INMET em Maceió registrou um aumento. Também foram identificados aumentos na temperatura e diminuições na velocidade do vento e no nível de marés.

Análise de Ondaletas para identificação de influências climáticas

De acordo com o método utilizado nas séries de dados de precipitação, temperatura média e velocidade do vento e nível de marés, observou-se que o litoral de Maceió foi influenciado por fenômenos climáticos. A análise de ondaletas permitiu identificar escalas e intensidades durante o período de 1991 a 2021.

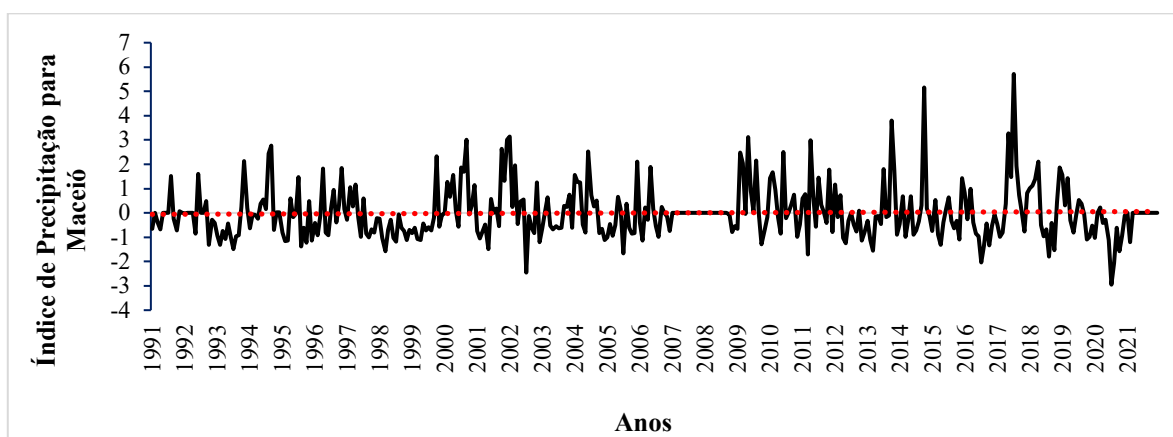
Na série de precipitação, foram encontradas escalas que ajudam a entender seu comportamento, incluindo uma escala sazonal de 0,25 anos, semestral (0,5 anos) e interanual (1 ano). A influência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul

(ENOS) foi identificada em períodos de 1 a 2 anos, com picos intensos entre 2000 e 2015, além de uma presença estendida do ENOS entre 2 e 8 anos, sendo esta última a mais predominante.

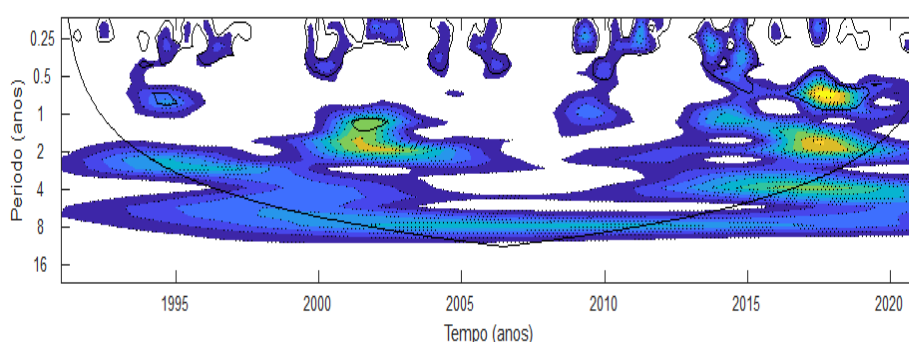
Os resultados da análise de ondaletas corroboram fenômenos e escalas identificados por outros autores, como sazonalidade (Costa et al., 2016), escala semestral (Cavalcante e Silva, 2021), e interanual (Silva et al., 2021). O estado de Alagoas demonstra alta variabilidade em eventos de precipitação, especialmente devido ao El Niño, conforme afirmam Fernandes e Carvalho (2013) e Cavalcante et al. (2022).

O aumento da precipitação nos anos citados está associado ao fenômeno La Niña, que se manifestou de forma moderada até 2018, corroborado por Costa e Araujo (2021) ao analisarem eventos chuvosos no Ceará.

(a)



(b)



(c)

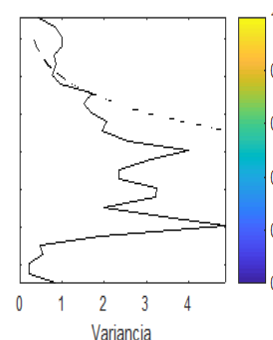


Figura 2. (a) Índice de precipitação para Maceió (1991 a 2021) normalizado pelo desvio padrão; (b) Espectro de energia (EPW) local para Precipitação. Contornos amarelados correspondem a variâncias normalizadas significativas ao nível de 5%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante e (c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.

Fonte: Autores (2024).

Ao analisar, por meio da ondaleta, a precipitação para o bairro de Cruz das Almas (Figura 3 a), utilizando a série de 2015 a 2021, evidenciou-se a ocorrência de escala semestral (0,5 anos) e interanual (1 ano). Essas, por sua vez, demonstraram significância estatística (Figura 3 b) e maior variância (Figura 3 c).

A ondaleta também permitiu encontrar escalas atuantes de ENOS estendido (2 a 8 anos) e Dipolo do Atlântico (8 a 11 anos). A escala do ENOS estendido foi a escala secundária, enquanto a escala de Manchas Solares foi a escala dominante; no entanto, não está localizada dentro do cone de influência.

Assim como Cavalcante e Silva (2021) analisaram escalas sazonal, semestral e interanual para o estado de Alagoas por meio da detecção de ondaletas, para a parte do litoral.

Da mesma forma, a técnica foi utilizada por Nóbrega (2021) para identificar os fenômenos que ocorreram na série histórica abordada, buscando explicar a variabilidade interanual e interdecenal da precipitação pluvial nas Regiões Hidrográficas Tocantins-Araguaia e São Francisco. Foram identificadas escalas semelhantes às encontradas na ondaleta para o bairro de Cruz das Almas. Mesmo a série tendo sido relativamente curta, pode-se associar a ocorrência de fenômenos que determinam a variabilidade climática.

De acordo com Silva et al. (2020), também evidenciaram a presença da escala de 11 anos como a dominante. O sinal da ondaleta demonstrou a influência dessa escala no regime de precipitação da região leste do Nordeste.

Conforme Rocha et al. (2022), ao aplicarem análise de ondaletas para a Bacia do Rio São Francisco, encontraram escalas semelhantes,

as quais associam à influência da ausência ou ocorrência dos fenômenos ou sistemas envolvidos,

como agentes que contribuem para o aumento ou redução da precipitação na região.

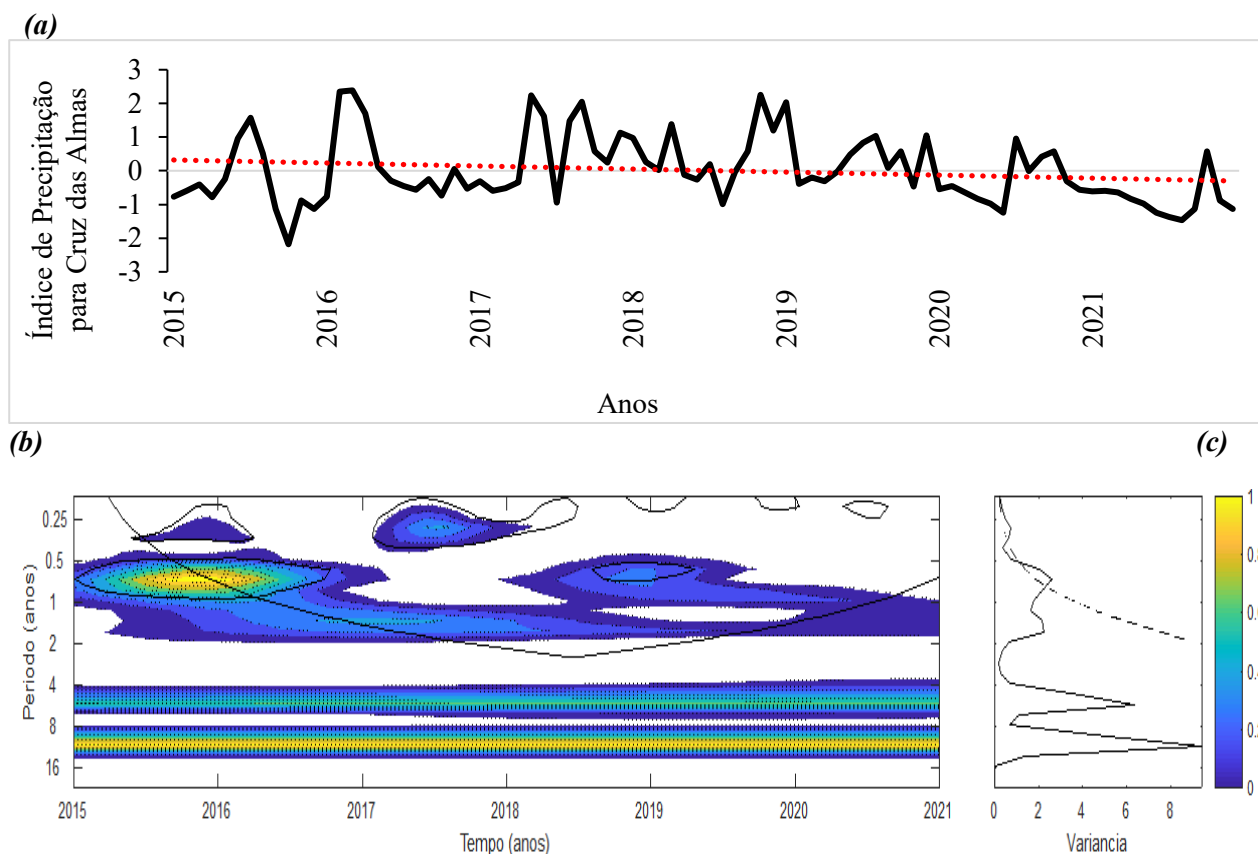


Figura 3. (a) Índice de precipitação padronizada para o bairro de Cruz da Almas (2015 a 2021) normalizado pelo desvio padrão; (b) Espectro de energia (EPW) local para Precipitação. Contornos amarelados correspondem a variâncias normalizadas significativas ao nível de 5%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante e (c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%

Fonte: Autores (2024).

A ondaleta que representa a precipitação no bairro de Ipioca, em Maceió, analisou a série de 2015 a 2021 e revelou uma escala sazonal (0,25 anos) nos anos de 2016 e 2018, coincidente com picos positivos de precipitação. A análise também identificou escalas semestral (0,5 anos) e interanual (1 ano), ambas estatisticamente significativas. Observou-se a influência moderada do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) de 2016 até meados de 2018, sugerindo que a precipitação positiva no bairro poderia estar relacionada ao fenômeno La Niña.

A ondaleta também detectou escalas de ENOS (1 a 2 anos) e do Dipolo do Atlântico (8 a 11 anos), além das Manchas Solares, com esta última sendo a escala dominante. Segundo Cavalcante et al. (2022), escalas semelhantes foram

identificadas na variabilidade da precipitação em Maceió, assim como em estudos de Silva et al. (2020) que destacaram a escala de 11 anos na região Nordeste. Pereira et al. (2018) notaram que a variabilidade pluviométrica na Lagoa de Mundaú também foi influenciada por escalas acima de 10 anos com significância estatística. Rocha et al. (2022) observaram escalas semelhantes na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, ressaltando a influência do El Niño e La Niña na variabilidade climática. Lyra et al. (2018) identificaram, em uma análise de 1961 a 2015 para Maceió, escalas de 0,25 a 0,5 anos para precipitação, corroborando os resultados encontrados nas ondaletas dos bairros Cruz das Almas e Ipioca.

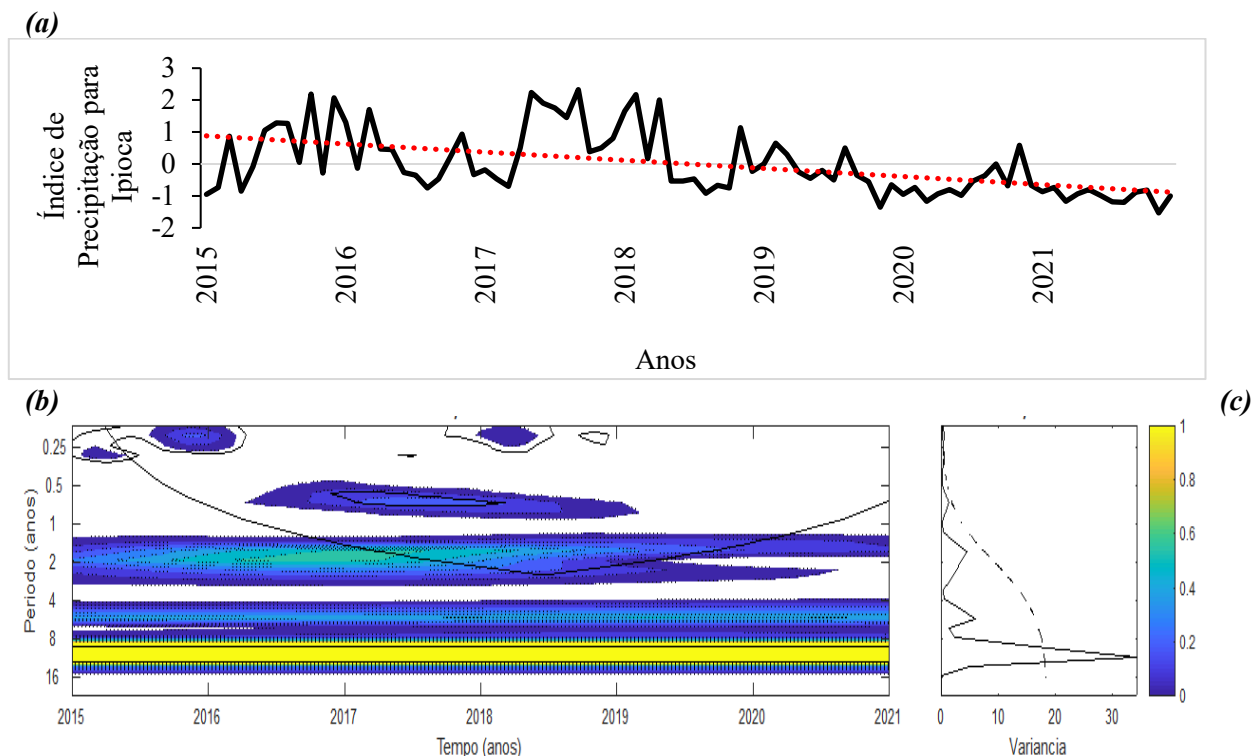


Figura 4. (a) Índice de precipitação padronizada para o bairro de Ipioca (2015 a 2021) normalizado pelo desvio padrão; (b) Espectro de energia (EPW) local para Precipitação. Contornos amarelados correspondem a variâncias normalizadas significativas ao nível de 5%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante e (c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%

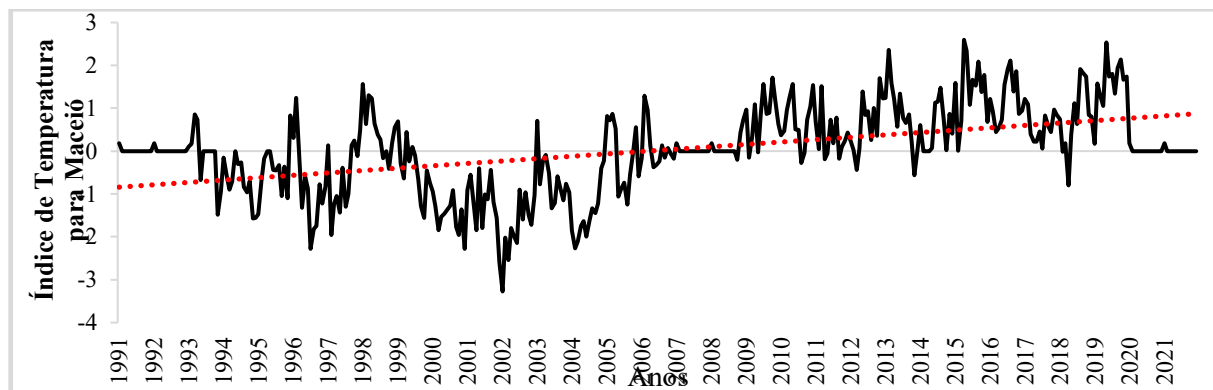
Fonte: Autores (2024).

A série de temperatura média (Figura 5 b) apresentou uma escala de sazonalidade (0,25 anos). Ao analisar o pico do aumento da temperatura (Figura 5 a), percebe-se tal evidência no ano de 2015, bem como a presença das escalas semestral (0,5 anos) e interanual (1 ano). Contudo, notou-se a ocorrência de outras escalas mais prolongadas, sendo estas o ENOS, que normalmente ocorre de 1 a 2 anos, e o ENOS estendido (2 a 8 anos), que apresentou temperaturas mais baixas de 2000 a 2006, segundo a Figura 14 a. A série também demonstrou, conforme a análise, a presença do Dipolo do Atlântico (8 a 11 anos) e a atuação de Manchas Solares (11 anos). Mesmo tendo pouca significância estatística dentro do cone de influência, essa última evidenciou uma escala dominante para a série, de acordo com a Figura 5 c.

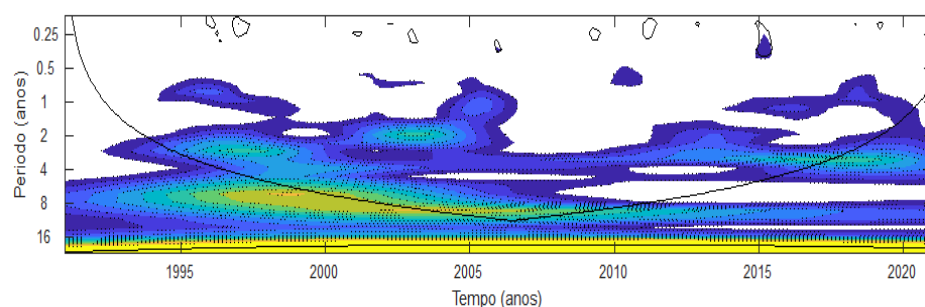
A série de temperatura também foi analisada por Gomes e Silva (2019) e Vilani e Sanches (2013), que observaram sazonalidade, semestralidade e interanualidade (Rocha, 2018). Assim como as escalas temporais de 1 a 2 anos relacionadas ao ENOS e de 1 a 8 anos ligadas ao ENOS estendido. A relação da escala de 8 anos com a ocorrência do Dipolo do Atlântico e a de 11 anos com o ciclo de manchas solares também foram encontradas por Silva et al. (2013).

Ao acompanhar o registro do maior índice negativo, nota-se que ocorreu em meados de 2002, em que a anomalia normalizada de temperatura em Maceió diminuiu cerca de quase 4 graus em relação à média. Em Gomes e Silva (2018), também foi identificado um registro de temperatura em diminuição.

(a)



(b)



(c)

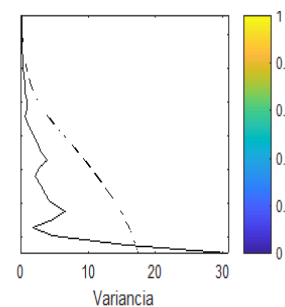


Figura 5. (a) Índice de temperatura para Maceió (1991 a 2021) normalizado pelo desvio padrão; (b) Espectro de energia (EPW) local para Precipitação. Contornos amarelados correspondem a variâncias normalizadas significativas ao nível de 5%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante e (c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%

Fonte: Autores (2024).

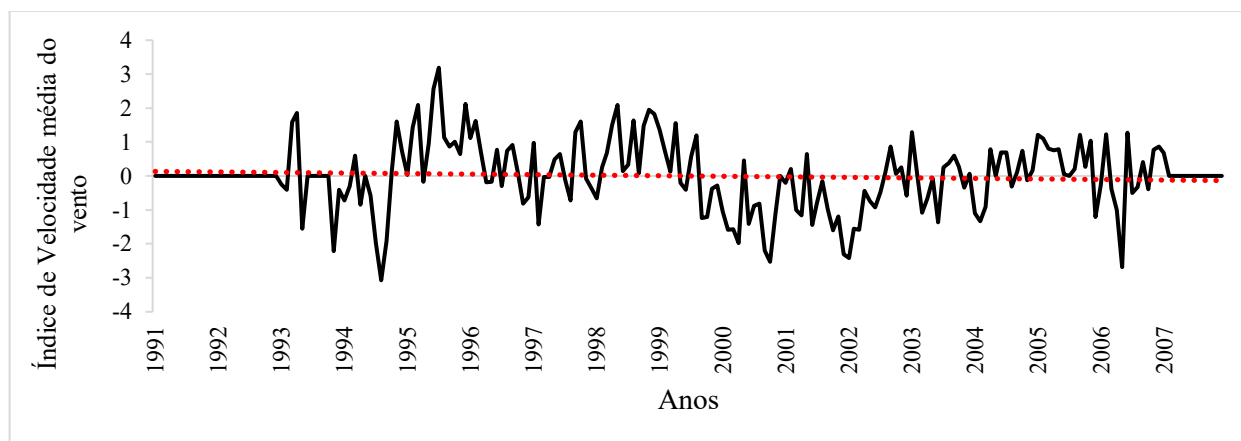
A ondaleta analisada para a série de velocidade do vento (Figura 6 a) evidenciou escala sazonal (0,25 anos), semestral (0,5 anos) e interanual (1 ano). De acordo com a ondaleta, nota-se que, por volta de 1994 a 1995, os fenômenos que atuaram nessa escala causaram queda nos níveis de velocidade do vento no litoral de Maceió (Figura 6 b e 6 c). A análise também identificou o ENOS (de 1 a 2 anos), que atuou de maneira moderada no período citado e em 2003 a 2005, causando o mesmo efeito sobre a velocidade do vento.

Ainda foi possível visualizar, através do espectro da ondaleta, o ENOS estendido, com forte sinal de 1997 a 2007 (2 a 8 anos), de acordo com os picos da velocidade do vento nesse período (Figura 6 b). Observou-se também a presença do

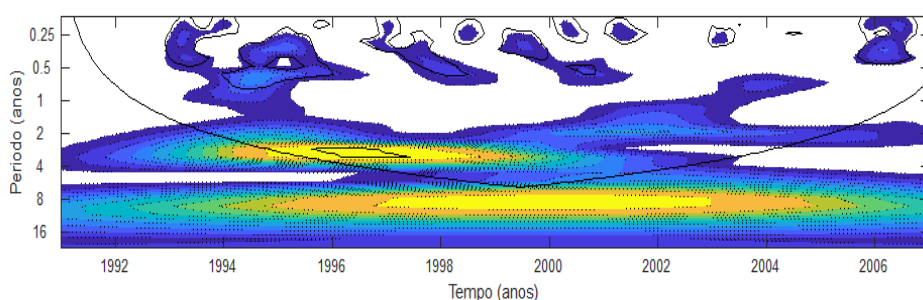
Dipolo do Atlântico (8 a 11 anos) e das Manchas Solares (11 anos); muito embora ambos tenham se posicionado fora do cone de influência, ou seja, sem significância estatística, atuaram como escalas dominantes na análise de ondaletas para a velocidade média do vento.

Resultados semelhantes de escalas e fenômenos atuantes foram encontrados em trabalhos que utilizaram o método para determinar interferências meteorológicas em determinado meio, sendo estes: presença de sazonalidade (0,25 anos), escala semestral (0,5 anos), ocorrência de ENOS (entre 1 e 2 anos), bem como ENOS estendido (de 2 a 8 anos), manchas solares na escala de 11 anos, e Dipolo do Atlântico na escala temporal de (8 a 11 anos) (Silva et al., 2020).

(a)



(b)



(c)

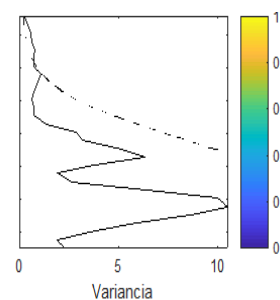


Figura 6. (a) Índice de velocidade do vento para Maceió (1991 a 2007) normalizado pelo desvio padrão; (b) Espectro de energia (EPW) local para Precipitação. Contornos amarelados correspondem a variâncias normalizadas significativas ao nível de 5%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante e (c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.

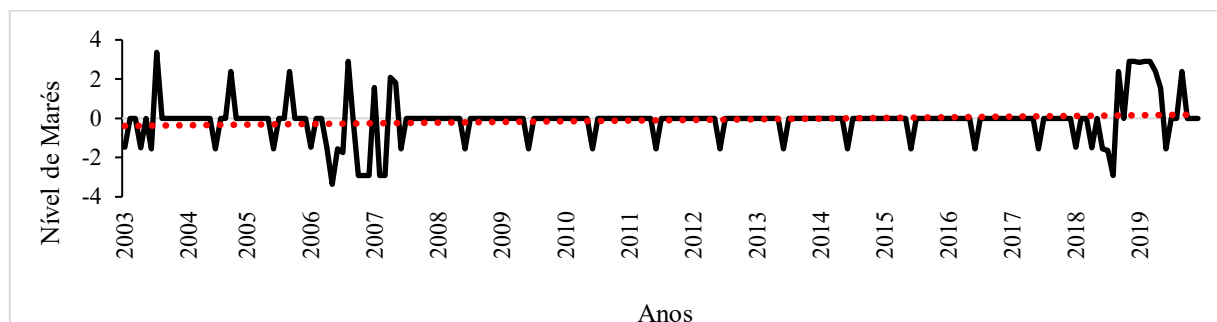
Fonte: Autores (2024).

A análise da ondaleta para o nível de marés no litoral de Maceió (Figura 7 a) demonstrou a ocorrência de sinais da escala sazonal (0,25 anos). Também se notou a escala semestral (0,5 anos) entre 2004 e 2006, com sinal mais forte durante os anos de 2007 a 2017, conforme indicado pela ondaleta (Figura 7 b e 7 c). Além disso, foi evidenciado um fraco sinal de escala interanual (1 ano) no final da série, em 2019, assim como a escala de ENOS (1 a 2 anos) entre 2018 e 2019. A série também apresentou uma fraca ocorrência do ENOS estendido (2 a 8 anos) entre 2014 e 2019. As escalas do Dipolo do Atlântico (8 a 11 anos) e o ciclo de Manchas Solares (11 anos) coincidiram com o período influente de 2015 a 2019.

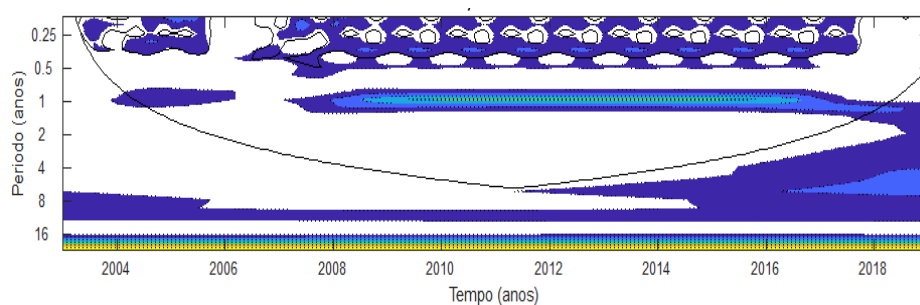
Conforme Silva (2017), Cavalcante et al. (2022), ao utilizar a análise de ondaletas, encontrou escalas sazonais mais longas, variando de 0,25 anos a 22 anos, com escalas de 4-8 anos, 11 anos e 16 anos como as dominantes para a região Leste do Nordeste do Brasil.

Da mesma forma, Rocha et al. (2022) também evidenciaram escalas de 4-8 anos, 11 anos e 16 anos, e até mais longínquas para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando a análise de ondaletas para a identificação de sinais de influência de fenômenos e sistemas meteorológicos por meio de variáveis climáticas.

(a)



(b)



(c)

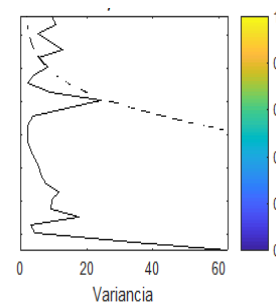


Figura 7. (a) Índice de nível de marés para Maceió (1991 a 2021) normalizado pelo desvio padrão; (b) Espectro de energia (EPW) local para Precipitação. Contornos amarelados correspondem a variâncias normalizadas significativas ao nível de 5%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante e (c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%

Fonte: Autores (2024).

Conclusões

Através da realização da análise de Ondaleta, foi verificada a influência das variáveis meteorológicas, observando-se que a precipitação, o vento e a temperatura apresentaram comportamentos distintos durante a série temporal de 1991 a 2021. Demonstrou-se que, em Maceió, a precipitação aumentou em 0,5546 mm, enquanto os bairros Cruz das Almas e Ipioca apresentaram diminuições de -0,1668 mm e -0,3131 mm, respectivamente. O aumento da temperatura média foi de 0,9891 °C para toda a série, a velocidade média do vento apresentou uma redução de -0,0123 m/s, e o nível de marés aumentou em 1,2677 cm.

Os resultados das tendências de Mann-Kendall demonstraram que o comportamento das variáveis ao longo dos anos pode estar associado à dinâmica do meio físico de Maceió e seu litoral. Ao adotar a Análise de Ondaletas (AO), verificou-se a influência dos fenômenos e sistemas meteorológicos que ocorreram no litoral durante o período analisado, identificando assim a duração temporal e a intensidade dessa influência. Cabe destacar que a AO evidenciou a influência do ENOS e do ENOS estendido, do Dipolo do Atlântico, assim como escalas mais duradouras, como a de 11 anos, ligadas ao ciclo de manchas solares, que atuaram sobre as variáveis mencionadas.

Salienta-se a importância do uso de metodologias que auxiliam na identificação do

comportamento das variáveis climáticas e meteorológicas, principalmente frente às modificações provocadas pelas mudanças climáticas.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas (PPGMET – UFAL) com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) e implementação da bolsa.

Referências

- Andreoli, R. V., & Kayano, M. T. (2005). Enso-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. *International Journal of Climatology*, 25(15), 2017-2030.
- Barbosa, J. P. M., Campos, A. B. de, & Santos, V. M. N. dos. (2022). Metodologias e Escala na Climatologia Geográfica – Técnicas Estatísticas e Visão Multi-Escalar para a Compreensão do Comportamento do Clima. *Geografia (Londrina)*, 31(1), 277–296. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2022v31n1p277>
- Barbosa, V. V., De Souza, W. M., Galvêncio, J. D., & Sobral, M. D. C. M. (2018). Influência da variabilidade climática na produção de leite na região semiárida do nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23.
- Batista, B. A., Oliveira-Júnior, J. F., Santiago, D. B., & Santos, C. T. (2021). Avaliação da expansão urbana na Cidade de Maceió, Alagoas–Nordeste do Brasil. *Research, Society and Development*, 10(11), e253101119537.
- Blain, G. C., & Kayano, M. T. (2011). 118 anos e dados mensais do índice padronizado de precipitação: Série meteorológica de Campinas, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(1), 137-148.
- Bolzan, M. J. A. (2006). Transformada em ondelete: Uma necessidade. *Revista Brasileira de Ensino em Física*, 28(4).
- Bonfim, O. E. T., Silva, D. F. D., Kayano, M. T., & Rocha, L. H. D. S. (2020). Análise dos eventos climáticos extremos e de suas causas climáticas para redução de riscos nas bacias hidrográficas Aguapeí e Peixe, São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(spe), 755-768.
- Cabral, J. J. D. S. P., Gusmão, A. D., Antonio, M., Silva Junior, B., & Barros, E. N. (2021). Mudanças climáticas e subsidência do terreno como dificuldades para a gestão urbana de uma avenida marginal de curso d'água em cidade costeira. *Revista de Geografia (Recife)*, 38(2).
- Carlos, S. M., Cunha, D. A., & Pires, M. V. (2019). Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 57, 455-471.
- Carvalho, A. A. D., Montenegro, A. A. D. A., Silva, H. P. D., Lopes, I., De Moraes, J. E., & Silva, T. G. (2020). Tendências da precipitação pluvial e da temperatura no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(1), 15-23.
- Carvalho, A. L. D., Souza, J. L. D., Lyra, G. B., & Porfírio, A. C. S. (2013). Ocorrência de períodos secos na região de Rio Largo, Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 173-180.
- Castelhano, F. J., & Siqueira Pinto, J. E. S. (2022). Tendências e alterações climáticas no Estado de Sergipe, nordeste do Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, 42, e185565.
- Cavalcante, I. B. da S., Silva, D. F., & Brandão, C. B. (2023). Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação em Maceió-AL e de suas causas climáticas. *Pesquisas em Geociências*, 49(4), e123971. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.123971>
- Cavalcante, I. B. S. (2022). Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação em Maceió-AL e de suas causas climáticas. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas.
- Cavalcante, I. S. B., & Silva, D. F. (2021). Período de retorno de eventos extremos em Alagoas e suas causas climáticas. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, 2.
- Chattopadhyay, S., & Edwards, D. R. (2016). Long-term trend analysis of precipitation and air temperature for Kentucky, United States. *Climate MDPI*, 4(10), 1-15.
- Costa, G. B., & Lyra, R. F. D. F. (2012). Análise dos padrões de vento no estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 31-38.
- Costa, J. A., Santos, M. A. C. M., Mendes, K. P., Silva, G., Miranda, V. G., Monteiro, B. L., & Silva, D. F. (2016). Ciclos, períodos de eventos extremos e escalas temporais na precipitação da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe (CE). *Revista Geonordeste*, 27, 132.
- Costa, M. S. D., & Araújo, R. A. F. D. (2021). Variabilidade climática: A precipitação como parâmetro de estudo para os casos de dengue no Litoral, Sertão, Serra e Sul Cearense entre

- 2007 e 2019. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 591-601.
- Silva, D. F. (2009). Análise de aspectos climatológicos, agroeconômicos, ambientais e de seus efeitos sobre a Bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE). (Tese de doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- Silva, D. F. (2017). Aplicação de Análises de Ondaletas para Detecção de Ciclos e Extremos Pluviométricos no Leste do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2).
- Silva, D. F., Costa, I. M., Mateus, A. E., & De Sousa, A. B. (2013). Previsão climática e de ciclos climáticos para o estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(4), 959-977.
- Silva, D. F., Souza Neto, P. F., Silva, S. D., Lima, M. J. S., Cavalcante, I. B. S., Oliveira, S. T., Mendonça, H. S., Batista, B. A., Rocha, L. H. S., Almeida, H. R. R. de C., Pereira, M. P. S., & Araujo, L. E. (2021). Identificação das causas climáticas dos eventos extremos e dos impactos dos ENOS Canônico e Modoki nas macrorregiões de Alagoas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 1880-1897.
- Silva, D., Lima, M., Souza Neto, P., Gomes, H., Silva, F., Almeida, H., Costa, R., & Pereira, M. (2020). Caracterização de Eventos Extremos e de suas Causas Climáticas com Base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), 449-464.
- Silva, E. M. D., Sousa, M. N. M. D., Silva, F. B. S. D., Silva, L. L. D., & Barbosa, W. A. (2022). A Relação entre a Climatologia e as Infrações Ambientais na área de Proteção Ambiental da Serra de Baturité no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 157-165.
- Fernandes, R. C., & Carvalho, A. L. (2013). Espacialização da precipitação pluvial no município de Piranhas, Alagoas. *Ciência e Natura*, 35(2), 295-303. <https://doi.org/10.5902/2179-460X782>
- Ferreira, F. E. P., Lopes, J. R. F., & Nery, A. R. (2021). Análise espacial das tendências climáticas e sua influência na agricultura irrigada no Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 29, 602-625.
- Ferreira, L. G. C., & Kemenes, A. (2023). A influência dos eventos climáticos extremos na climatologia da planície litorânea piauiense. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32(19), 634-657. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16349>
- Ferreira, S. P., Gomes, V. P., Galvêncio, J. D., Dos Santos, A. M., & De Souza, W. M. (2017). Avaliação da tendência espaço-temporal da precipitação pluviométrica em uma região semiárida do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Climatologia*, 21.
- Gomes, M. L., & Silva, S. T. (2019). Padrões dominantes de oscilação da temperatura do ar no estado de Mato Grosso por meio de ondeletas. *Revista Interdisciplinar Animus*, 1(7), 5-23.
- Gonçalves, F. N., & Back, Á. J. (2018). Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(3), 592-602. <https://doi.org/10.19084/RCA17204>
- IBGE. (2022). Cidades de estados. Alagoas, Maceió. IBGE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio.htm>. Acesso em 22 de novembro de 2022.
- Instituto Nacional de Meteorologia. (2021). *Banco de dados meteorológicos para pesquisa (BDMEP)*. Disponível em <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em 08 de novembro de 2021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Lyra, M. J. A., Bonfim, O. E. T., Januário, I. R., Silva, Y. U., & Mesquita, G. A. L. (2018). Aplicação de metodologias distintas no comportamento pluviométrico de Maceió/AL. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 9(3), 104-112.
- Mendonça, F. (2021). Mudanças climáticas globais: controvérsias, participação brasileira e desafios à ciência. *Humboldt - Revista de Geografia Física e Meio Ambiente*, 1, 1-28.
- Nóbrega, J. N., dos Santos, C. A. C., de Sousa, F. D. A. S., Bezerra, B. G., de Albuquerque Moura, G. B., & de Brito, J. I. B. (2021). Estudos de Variabilidades Interanuais e Interdecenais da Precipitação Pluvial das Regiões Hidrográficas Tocantins-Araguaia e São Francisco no Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(2), 1116-1130.
- Pereira, T. D. S., Costa, D. D., Fragoso Júnior, C. R., Montenegro, S. M. G. L., & Uvo, C. B. (2018). Principais fatores de oscilação do clima controlando a variabilidade da precipitação durante a estação seca no nordeste brasileiro: estudo de caso das bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. *Revista Água*, 10(11).

- Rocha, A. F. (2018). Espectro cruzado e coerência wavelet: um estudo de variáveis micrometeorológicas em frações urbanas na cidade de Cuiabá, MT. (Tese de doutorado). Universidade Federal de Mato Grosso.
- Rocha, A. J. P., & Melo, Z. N. (2024). DNBCPC desertificação no Nordeste brasileiro em conexão às perspectivas climáticas. *Conexão ComCiência*, 3(4). <https://doi.org/10.52521/revccc.v3i4.10646>
- Rocha, L. H. D. S., Silva, D. F., Kayano, M. T., & Bonfim, O. E. T. (2022). Homogeneidade, Eventos Extremos e suas Causas Climáticas: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 199-212.
- Scofield, G. B., De Angelis, C. F., & De Sousa Jr, W. C. (2014). Estudo das tendências do total de precipitação e do número de dias chuvosos no Litoral Norte de São Paulo. *RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(3), 19-31.
- Silva Lima, M. J., Silva, D. F., Melo, M. L. D., & Cabral Júnior, J. B. (2022). Análise das causas climáticas sobre o núcleo de desertificação de Irauçuba-CE: Analysis of climate causes on the desertification nucleus of Irauçuba-CE. *Geosciences= Geociências*, 41(4), 857-868.
- Silva, D. F., Souza Neto, P. F., Santos Rocha, L. H., Almeida, H. R. R. de C., Santos, F. D. S., Gomes, H. B., & Cavalcante, I. B. (2023). Estudo das ocorrências, similaridades e causas dos eventos extremos de precipitação em Portugal. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32(19), 415-440. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16292>
- Silva, D. V., Mata-Lima, H., Martins, M. C. B. S., Araújo, M. C. B., Kern, P., Silva, M. C. G., Freitas, A. C., Oliveira, A. K., Uliano, B. R., Cristiano, S. C., Gatto, D. B., Almeida, H. R. R. C. A., Freitas, M. C., Aires, M., Ganguilhet, G., Carvalho, M. C., Costa, C. R., Martins, M. C. B. S., & Silva, M. C. G. (2022). Gestão ambiental e sustentabilidade em áreas costeiras e marinhas: conceitos e práticas - volume II. INVIDES- Instituto Virtual Para O Desenvolvimento Sustentável.
- Silva, E. M. D., Sousa, M. N. M. D., Silva, F. B. S. D., Silva, L. L. D., & Barbosa, W. A. (2022). A Relação entre a Climatologia e as Infrações Ambientais na área de Proteção Ambiental da Serra de Baturité no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 157-165.
- Silva, L. E. F. (2020). Análise de tendência em séries históricas de vazão: uso de teste estatístico paramétrico. *Brazilian Applied Science Review*, 4(3), 998-1018.
- Silva, R. A., Silva, V. P. R., Cavalcanti, E. P., & Dos Santos, D. N. (2010). Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(5), 501-509.
- Vilani, M. T., & Sanches, L. (2013). Análise de Fourier e Wavelets aplicada à temperatura do ar em diferentes tipologias de ocupação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 1340-1346.