





EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA MÁXIMA NO LESTE DO NORDESTE DO BRASIL RELACIONADOS AO ENOS

*Extreme maximum temperature events in eastern northeast
brazil related to ENSO*

*Eventos de temperatura máxima extrema en el noreste este
de Brasil relacionados con ENOS*

Pedro Fernandes de Souza Neto  



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
piurosfernandes@hotmail.com

Djane Fonseca Da Silva  

Universidade Federal de Alagoas - UFAL
djanef.dasilva@icat.ufal.br

Lucas Henrique Santos Rocha  

Universidade Federal de Alagoas - UFAL
lucas.santos@icat.ufal.br

Maiane Rodrigues do Nascimento  

Universidade Federal de Alagoas - UFAL
maianerodrigues707@gmail.com

Marcos Paulo Santos Pereira  

Instituto Ayni / UFAL
marcospspereira@hotmail.com

Resumo: Os relatórios do IPCC, desde 2007, indicam uma situação preocupante em relação ao aumento da temperatura no planeta, e essa elevação foi confirmada no relatório do IPCC em 2022. Desde 2009, no cenário brasileiro, algumas pesquisas chamam a atenção para essa situação em áreas costeiras, as quais apontaram possibilidade de aumento do nível do mar estar relacionado ao aumento de temperatura em cidades litorâneas brasileiras. Desse modo, o objetivo desta pesquisa é analisar as temperaturas médias máximas das capitais do leste do nordeste do Brasil, verificando suas tendências e ao mesmo tempo, relacionar os máximos de temperatura com o ENOS. Foram usados dados de temperatura máxima de seis (6) capitais do Nordeste e dados do Índice de Oscilação

Sul, entre o período de 1980 a 2020. Esses dados foram submetidos às estatísticas Teste de Mann-Kendall, teste de significância de T-Student e Análises de Ondaletas Cruzadas. Foram observadas tendências de aumento anuais e ao longo da série para todas as cidades, e comparando os anos com as décadas também se observa aquecimento em todas capitais. A aplicação inédita de Análise de Ondaletas cruzadas para temperatura máxima em áreas do Nordeste do Brasil trouxe resultados importantes e inéditos, sendo possível observar que, na maioria das cidades, a fase predominante do máximo da temperatura máxima vem antes do máximo do IOS, mostrando um padrão semelhante na maioria das cidades, e este pode auxiliar na previsão antecipada de ondas de calor, ressaltando a importância de realizar estudos como esse para outras regiões do Brasil.

Palavras-chave: Aquecimento. Tendências climáticas. IOS. Ondaleta Cruzada.

Abstract: IPCC reports, since 2007, indicate a worrying situation regarding the increase in temperature on the planet, and this increase was confirmed in the IPCC report in 2022. Since 2009, in the Brazilian scenario, some research has drawn attention to this situation in areas coastal areas, which pointed to the possibility of rising sea levels being related to rising temperatures in Brazilian coastal cities. Therefore, the objective of this research is to analyze the average maximum temperatures of the capitals in the east of northeastern Brazil, checking their trends and, at the same time, relating the maximum temperatures with ENSO. Maximum temperature data from six (6) capitals in the Northeast and data from the Southern Oscillation Index were used, between the period from 1980 to 2020. These data were subjected to statistics Mann-Kendall test, T-Student significance test and Crossed Wavelet Analysis. Increasing trends were observed annually and throughout the series for all cities, and comparing the years with the decades, warming is also observed in all capitals. The unprecedented application of Cross Wavelet Analysis for maximum temperature in areas of the Northeast of Brazil brought important and unprecedented results, making it possible to observe that, in most cities, the predominant phase of the maximum temperature comes before the maximum IOS, showing a similar pattern in most cities, and this can help in the advance prediction of heat waves, highlighting the importance of carrying out studies like this for other regions of Brazil.

Keywords: Heating. Climate trends. SOI. Cross Wavelet.

Resumen: Los informes del IPCC, desde 2007, indican una situación preocupante en cuanto al aumento de la temperatura en el planeta, y este aumento fue confirmado en el informe del IPCC de 2022. Desde 2009, en el escenario brasileño, algunas investigaciones han llamado la atención sobre esta situación en las zonas costeras. áreas, lo que señaló la posibilidad de que el aumento del nivel del mar esté relacionado con el aumento de las temperaturas en las ciudades costeras brasileñas. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar las temperaturas máximas promedio de las capitales del este del noreste de Brasil, verificando sus tendencias y, al mismo tiempo, relacionando las temperaturas máximas con ENOS. Se utilizaron datos de temperatura máxima de seis (6) capitales del Nordeste y datos del Índice de Oscilación del Sur, entre el período de 1980 a 2020. Estos datos fueron sometidos a la prueba estadística de Mann-Kendall, prueba de significancia T-Student y Análisis de Ondas Cruzadas. Se observaron tendencias crecientes anualmente y a lo largo de la serie para todas las ciudades, y comparando los años con las décadas, el calentamiento también se observa en todas las capitales. La inédita aplicación del Análisis de Ondas Cruzadas para la temperatura máxima en zonas del Nordeste de Brasil trajo resultados importantes e inéditos, permitiendo observar que, en la mayoría de las ciudades, la fase predominante de la temperatura máxima precede a la IOS máxima, mostrando una patrón similar en la mayoría de las ciudades, y esto

puede ayudar en la predicción anticipada de olas de calor, destacando la importancia de realizar estudios como este para otras regiones de Brasil.

Palabras clave: Calefacción. Tendencias climáticas. IOS. Ondícula cruzada.

Submetido em: 22/07/2024

Aceito para publicação em: 25/12/2024

Publicado em: 10/01/2025

1. INTRODUÇÃO

No Brasil a atividade agrícola é responsável por cerca de 30% do PIB, e variações nas condições ambientais podem ter grandes implicações na produtividade de diferentes culturas. Há vários eventos climáticos extremos associados ao aquecimento global que podem afetar o setor agrícola, entre eles, Ondas de calor.

No estado de São Paulo, por exemplo, a temperatura média do mês de setembro de 2000 foi 32,1°C, ou seja, 4,4°C acima da média histórica, que é 27,7°C, causando um prejuízo de aproximadamente 50 milhões de dólares ao segmento de criação de animais em virtude da morte prematura dos animais (BLAIN e KAYANO, 2011). Ondas de calor com temperaturas máximas diárias acima de 32°C são responsáveis não só pela morte de animais, mas também pela queda da produção agrícola. Outro exemplo, seriam os Veranicos, períodos com dias mais quentes e secos durante estações atípicas (outono e inverno), os quais podem resultar em maior necessidade de irrigação (COSTA, 2008).

A agricultura em regiões tropicais é uma das atividades econômicas mais vulneráveis ao aquecimento global. As culturas já adaptadas ao clima nessas regiões sofrerão com temperaturas mais altas e mudanças na distribuição pluviométrica no decorrer do tempo. O cultivo da soja pode se tornar cada vez mais difícil na região Sul e alguns estados do Nordeste podem perder entre 70% a 80% de sua área agricultável (JUNGES et al., 2022).

Estudos como OMM (1992), STOZHKOV et al. (1995) e GUYOT (2018) também referem-se a uma possível variação climática devido às flutuações de insolação ou de outros fenômenos naturais.

Os relatórios do IPCC em 2007 já indicavam uma situação inquietante quanto ao aumento da temperatura no planeta. Neste, foi debatido sobre o aumento de temperatura global nos próximos 100 anos, entre 1,4°C e 5,8°C, considerando a média de 1990 como referência. O relatório do IPCC (2007) confirmou os resultados do IPCC (2001), indicando uma situação realmente inquietante quanto ao aumento da temperatura no planeta e seus efeitos nas atividades humanas futuras.

Já o IPCC (2022) concluiu, entre os cenários estudados, que há mais de 50% de chance de aumento da temperatura global atingir ou ultrapassar 1,5°C entre 2021 e 2040, e especificamente em um cenário de emissões extremamente altas, o mundo pode atingir esse limiar ainda mais cedo – entre 2018 e 2037.

Como consequência do aumento da concentração de GEE na atmosfera, a elevação na temperatura média do planeta já é uma realidade e, de acordo com o último relatório do IPCC (2022), uma elevação de 2°C na temperatura média da Terra parece inevitável, mesmo que todas as medidas para reduzir as emissões e capturar carbono se concretizem. No cenário mais pessimista, mantendo-se as atividades atuais, as previsões são de um aumento de mais de 6°C na temperatura média da Terra, com consequências catastróficas para os ecossistemas e a humanidade. Embora os modelos adotem uma margem de incerteza, para a maioria dos cientistas que estuda esse campo, não restam dúvidas quanto ao risco das mudanças climáticas e do papel humano no agravamento delas (MARENGO et al., 2009).

Ainda segundo o IPCC (2022), os impactos extremos do clima e das mudanças climáticas, incluindo mega secas, chuvas extremas, ondas de calor terrestres e marinhas e derretimento de geleiras estão afetando a América Latina e a região do Caribe, da Amazônia aos Andes e de Águas do Pacífico às do Oceano Atlântico. O relatório mostra que os riscos hidrometeorológicos, infelizmente, levaram à perda de centenas de vidas, a graves danos à produção agrícola e às infraestruturas, provocando também deslocamento humano. Espera-se que o aumento crescente do nível do mar e o aquecimento dos oceanos continuem a afetar os meios de subsistência costeiros, o turismo, a saúde, a alimentação, a energia e a segurança hídrica.

Aumento de temperatura e tendências positivas em séries dessa variável para o Nordeste do Brasil foram relatadas por Marengo et al. (2009) e por Dantas et al. (2015).

Desta forma, diante da importância do tema e da necessidade de mais estudos sobre eventos extremos de temperatura para a região leste do nordeste do Brasil (LNEB), que é uma área costeira de extrema importância para o turismo, pesca, habitação, entre outros, o objetivo desta pesquisa é analisar as temperaturas médias máximas das capitais do LNEB, verificando suas tendências e ao mesmo tempo, através da análise estatística de coerência e fase, apontar relação dos máximos de temperatura com o ENOS.

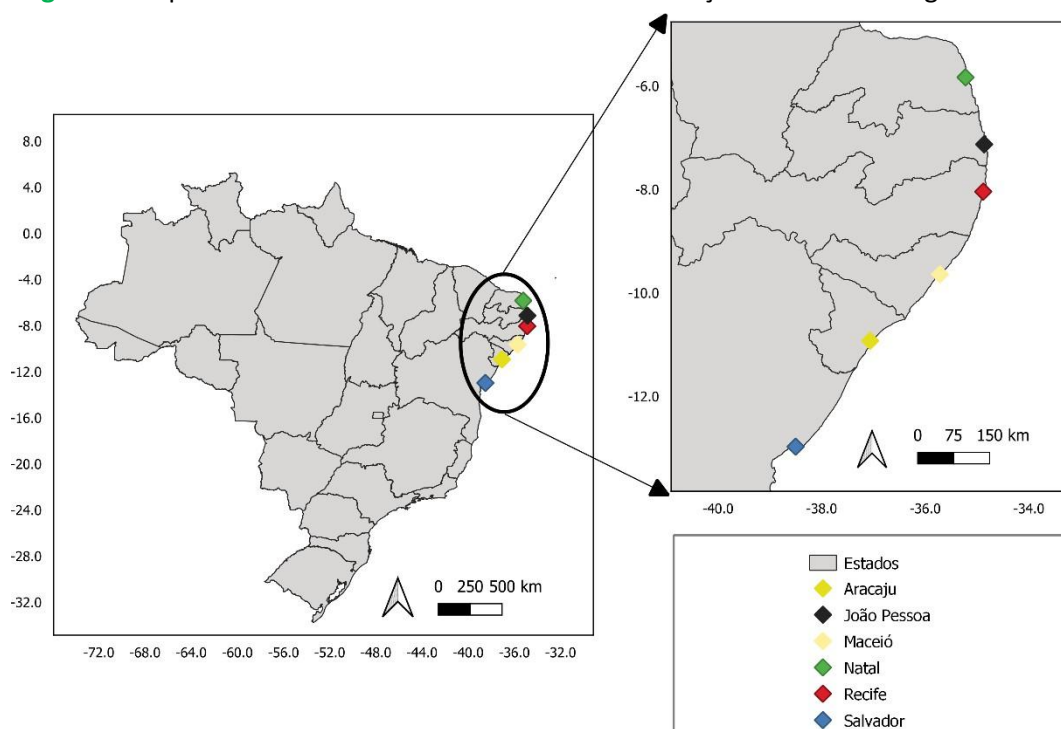
2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A Região Nordeste (Figura 1) do território brasileiro é composta por nove estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Ocupando uma área de 1.561.177,8 km², equivalente a 18,3% do Brasil, limita-se com as regiões Norte (a oeste), Centro-Oeste (a sudoeste), Sudoeste (ao sul), além de ser banhado pelo Oceano Atlântico, ao norte e leste (DA SILVA, 2017).

A faixa costeira do Leste do Nordeste (LNEB) (até 300 km do litoral) se estende do Rio Grande do Norte ao sul da Bahia, também conhecida como Zona da Mata, e apresenta clima quente e úmido com totais pluviométricos anuais variando de 600 a 3.000 mm. Composto pelos Estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco (incluindo o Distrito Estadual de Fernando de Noronha), Rio Grande do Norte e Sergipe. O período mais chuvoso vai de abril a julho, com o pico de chuvas em maio, postos de Olinda e Salvador (MOLION e BERNARDO, 2002). Existem alguns sistemas de circulações atmosféricas que atuam na região Nordeste, como as frentes frias provenientes de regiões subantárticas e as brisas terrestres e marítimas, que ocorrem no litoral do Nordeste durante o ano todo. Já as perturbações ondulatórias dos alísios que atuam no Nordeste principalmente no período de maio a agosto, quando o deslocamento dessas ondas se dá de leste para oeste a partir do Oceano atlântico (SILVA et al, 2021).

Figura 1 - Capitais do Leste do nordeste brasileiro em relação ao Brasil e à região Nordeste.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

2.2. Dados

Foram utilizados dados de temperatura máxima de seis (6) capitais da região Leste do Nordeste, entre o período de 1980 a 2020, sem falhas. Esses dados são provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para o mesmo período, foram adquiridos dados do Índice de oscilação sul (IOS) no site da NOAA (USA) em <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>. Esses dados também não apresentam falhas.

2.3. Tendências climáticas

As séries de temperatura máxima serão submetidas à análise de tendência pelo teste de Mann-Kendall e será verificado o comportamento anual e das séries estudadas ao longo do período de análise.

O teste é indicado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliação de tendências significativas em séries dados temporais compatíveis com aplicações ambientais, é um teste não paramétrico. Esse teste foi proposto a princípio por Mann (1945), posteriormente melhorado por Kendall (1975), gerando a relação estatística. É

amplamente utilizado para testar tendências em séries temporais hidrológicas e climatológicas (XU, et al., 2005; BI et al., 2009; SILVA e DEREZYNSKI., 2010; BLAIN e KAYANO, 2011; SOUZA NETO, 2019; CABRAL JÚNIOR et al., 2019; MEDEIROS et al., 2021).

A estatística do teste é descrita como:

$$(1) S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{Sign}(\chi_i - \chi_j)$$

Em que: χ_j são os dados estimados da sequência de valores, n é o comprimento da série temporal e o sinal $(\chi_i - \chi_j)$ é igual a -1 para $(\chi_i - \chi_j) < 0$, 0 para $(\chi_i - \chi_j) = 0$, e 1 para $(\chi_i - \chi_j) > 0$.

Kendall (1975) demonstrou que S é, em geral, distribuída com média $E(S)$ e variância $\text{Var}(S)$, para uma situação em que pode haver valores iguais de x , são expressas pelas equações:

$$(2) E[S] = 0$$

$$(3) \text{AVari}, j = \frac{(\text{Vari}, j - \bar{\text{Vari}})}{\sigma_i}$$

Sendo (tp) é número de dados com valores iguais em um determinado grupo (pth) e q é o número de grupos com valores iguais na série de dados em um certo grupo p . O segundo termo corresponde a um ajuste para dados censurados.

O teste estatístico parametrizado (ZMK) é descrito pela seguinte equação:

$$(4) Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{para } S > 0; \\ 0 & \text{para } S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{para } S < 0 \end{cases}$$

A presença de uma tendência estatisticamente significativa é avaliada usando o valor de Z . Essa estatística é usada para testar a hipótese nula, ou seja, que não existe tendência. Um valor positivo de ZMK indica um aumento da tendência; quando negativa, indica uma tendência decrescente. Para testar a tendência crescente ou decrescente no nível de significância de p , a hipótese nula é rejeitada se o valor absoluto de Z for maior que $Z_{1-p/2}$, utilizando-se a tabela da distribuição normal cumulativa padrão (SILVA e DEREZYNSKI, 2010). Os níveis de significância de $p = 0,01$ e $0,05$ foram adotados neste estudo.

Uma estimativa não paramétrica para o valor da inclinação da tendência é dada por:

$$(5) \beta = \text{Median}\left[\frac{z^i - z^j}{j - i}\right] \text{ para } i < j$$

Em que: x_j e x_i são os pontos dados medidos no tempo j e i , respectivamente.

Esse método também foi utilizado conforme descrito por Xu, et al., (2005); Bi et al. (2009); Blain (2009); Da Silva (2009); Silva et al., (2010); Blain e Kayano (2011); Nóbrega e Santiago (2016); Da Silva (2017); Lima et al. (2019); Bonfim et al. (2021).

2.4. Teste de Significância de T-Student

Para verificar se há ou não significância estatística nas tendências obtidas no teste de Mann-Kendall, foi utilizado o teste T-Student.

Para amostras de tamanho $N > 30$, que são chamadas de grandes amostras, as distribuições das amostras de diversas estatísticas são quase normais e melhores com o crescimento de N . Já para amostras com tamanho $N < 30$, que são as pequenas amostras, as distribuições amostrais de diversas estatísticas são ruins, e tornam-se piores com o decréscimo de N , de tal forma que devem ser introduzidas as modificações adequadas.

Um dos testes de significância mais empregado é o “T-Student”, sendo amplamente utilizado nos estudos de pesquisas na área da meteorologia (FIGUEROA, 1997; CASTRO, 2002; DA SILVA, 2009; SOUZA NETO, 2019; BONFIM et al., 2021), sendo descrita conforme a equação 6:

$$(6) \quad tc = \frac{t}{\sqrt{n-2}} + t^2$$

Em que: tc = valor do percentil e é o grau de liberdade. Foi usado $p = 0,95$ ou 95%; t = valor do percentil tabelado de acordo com $u(n-1)$; n é o número de dados.

2.5. Análise de longo prazo

Para a análise decadal, foram comparadas as temperaturas máximas médias anuais das seis (6) capitais com a média decadal (de cada dez anos), verificando assim se o ano é mais quente ou não que a média da década, encontrando tendências e anomalias em relação a década, ou seja, comparando o ano específico com o período de 10 anos, como também verificado nas aplicações de Marengo et al. (2009).

2.6. Ondaleta cruzada

Com os dados de temperatura máxima das capitais do LNEB e dados do IOS, foram realizadas correlações avançadas através da Ondaleta cruzada, a qual indica se há coerência entre as séries e *lags* entre os máximos das mesmas.

Autores como Torrence e Webster (1999), Grinsted et al. (2004) e Kayano e Blain (2007), indicam que a coerência da Ondaleta Cruzada (CWT) de duas séries temporais X e Y pode ser descrita por:

$$(7) \quad R_n(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^X(s))|^2}{S(s^{-1}W_n^X(s))S(s^{-1}W_n^Y(s))}$$

Em que: R_n é a coerência; S é um operador de suavização.

De acordo com Grinsted et al. (2004), é interessante interpretar a Equação 7 como sendo o coeficiente de correlação de Pearson, localizado no espaço tempo-frequência (BLAIN e KAYANO, 2011).

A descrição completa desse método é dada em Grinsted et al. (2004) e em Blain e Kayano (2011) e acrescenta-se que a análise cruzada de ondaletas foi aplicada utilizando o algoritmo elaborado por Aslak Grinsted - Copyright (C) 2002/2004 no Software Matlab.

3. RESULTADOS

3.1. Tendências climáticas

Realizando a análise das tendências das cidades deste estudo (Tabela 1), verificou-se que todas as capitais apresentaram uma tendência de aumento, tanto anual quanto na tendência da série toda, e todas com significância estatística. A cidade que apresentou a maior tendência de aumento anual foi a de Salvador, com a tendência de 0,03 °C por ano, e a que apresentou a menor tendência foi a cidade de Natal, com o valor de aproximadamente 0,01 °C por ano.

Já a tendência total da série, para o período de 1980 até 2020, novamente a cidade de Salvador foi a que apresentou a maior tendência, chegando a 1,54 °C, e Natal com a menor tendência, em aproximadamente 0,4 °C. Sendo possível observar que as demais cidades apresentam um aumento da temperatura em aproximadamente 1 °C em Recife, Aracaju e Maceió.

Importante ressaltar que esses resultados corroboram com aumento de temperatura encontrado por IPCC (2007; 2022) em temperatura máximas média global, Kayano e Blain (2007) para Campinas, em São Paulo, e por Da Silva et al. (2022) para Santiago, no Chile. Tendências positivas e aumento de temperatura também foram encontrados no Nordeste do Brasil por Marengo et al. (2009) e por Dantas et al. (2015).

Já Castelhana e Pinto (2022), também utilizando o teste de Mann-Kendall, observaram uma ampla tendência, ao longo de todo estado de Sergipe, para aumento nos extremos tanto nas temperaturas máximas quanto mínimas, corroborando com os resultados encontrados aqui; e MEDEIROS et al. (2021) encontrou os mesmos resultados de tendências para Lagoa Seca, Paraíba.

Tabela 1 - Tendências climáticas nas séries de temperatura máximas para as seis (6) capitais do LNEB e status do teste de Mann Kendall e T-Student.

Cidade	Tendência anual (°C)	Tendência total na série (°C)	Status	Teste T-student
Maceió	0,0234	0,936	Aumento	Com significância estatística
Recife	0,0269	1,076	Aumento	Com significância estatística
Salvador	0,037	1,54	Aumento	Com significância estatística
João Pessoa	0,017	0,68	Aumento	Com significância estatística
Aracaju	0,0243	0,972	Aumento	Com significância estatística
Natal	0,00991	0,397	Aumento	Com significância estatística

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

3.2. Análise entre as escalas anual e decadal

Analisando a diferença da temperatura máxima média do ano e a temperatura máxima da década, é possível observar para Maceió (Figura 2) a maior diferença positiva ocorreu no de 2009, em um pouco mais de 1 °C, já a menor aconteceu no ano de 1981, em torno de -0,9 °C. Para a cidade de Recife (Figura 3), a diferença foi menor que a vista em

Maceió, ocorrendo a maior diferença no ano de 1998, em aproximadamente 0,72 °C e a menor diferença no ano de 1981, em torno de -0,6 °C. Para Salvador (Figura 4) as diferenças positivas são bem maiores em relação as diferenças negativas, com a maior diferença positiva ocorrendo no ano de 1987, em torno de 1,65 °C e a menor em 19982 com a diferença de -0,4 °C.

Desse modo, no ano de 1987, Salvador já atingiu o máximo de aumento esperado estimado pelo IPCC, de 1,4 °C no relatório de 2007, e de 1,5 °C no relatório de 2022 (IPCC 2007; 2022).

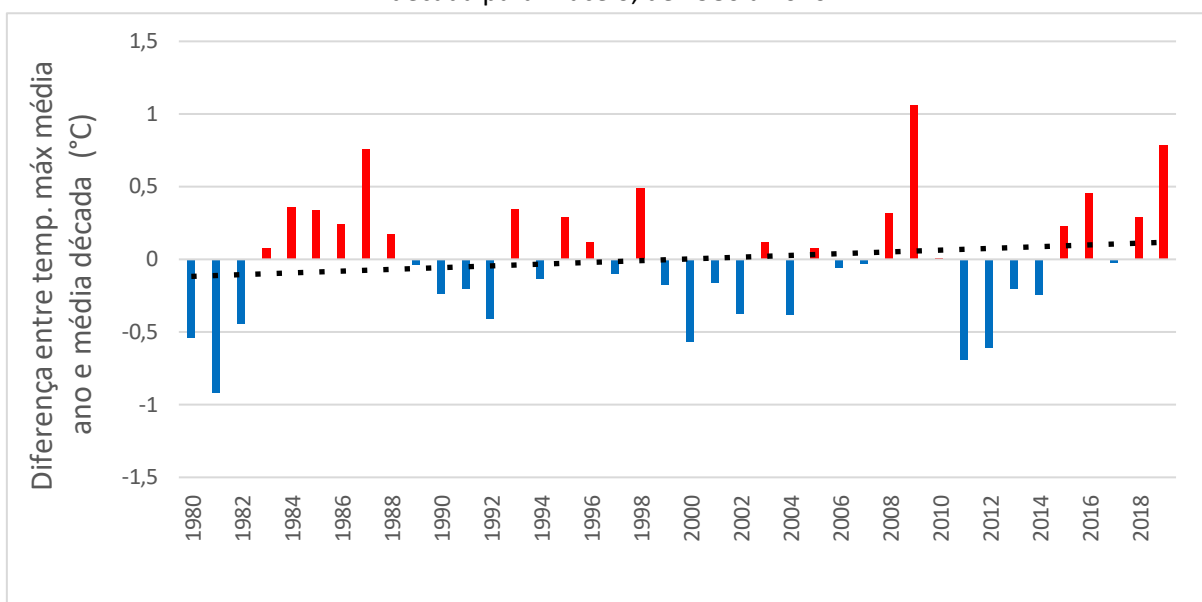
Na Figura 5, para João Pessoa, a maior diferença ocorreu no ano de 2019 com 1,15 °C e a menor em 1981, com -0,82 °C. A cidade de Aracaju (Figura 6) foi a segunda que apresentou a maior diferença, ficando atrás apenas de Salvador, e essa diferença ocorreu no ano de 2020 com o valor de 1,2 °C, e a menor diferença ocorreu em 2017, com a diferença de aproximadamente -0,74 °C. Por último, a cidade de Natal (Figura 7) foi a segunda cidade deste estudo que apresentou as diferenças menores, na frente apenas de Recife, sendo a maior diferença ocorreu no ano de 2010 com o valor em torno de 0,76 °C e a menor diferença no ano de 1992, com a diferença de -0,51 °C.

É possível observar para a última década (2010-2020) houve uma alternância entre diferenças positivas e negativas para todas as cidades, porém, para as cidades de Maceió, Recife, Salvador e João Pessoa é possível observar que nos últimos cinco anos houve uma predominância de diferença positiva, mostrando assim um possível aquecimento nos últimos anos nessas quatro cidades. Durante esse mesmo período para Aracaju e Natal, ocorreu uma variabilidade entre diferenças positivas e negativas, sendo de maneira mais intensa em Aracaju, que durante os últimos cinco anos ocorreram as duas maiores diferenças, tanto positiva (1,2 °C) quanto negativa (-0,74 °C).

A maioria das capitais estudadas apresentou aumento de temperatura máxima ao longo dos anos, principalmente após o ano de 2015, como também encontrado por Da Silva et al (2022), em estudo para Santiago, Chile, o qual atingiu 3,7°C acima da média em 2016.

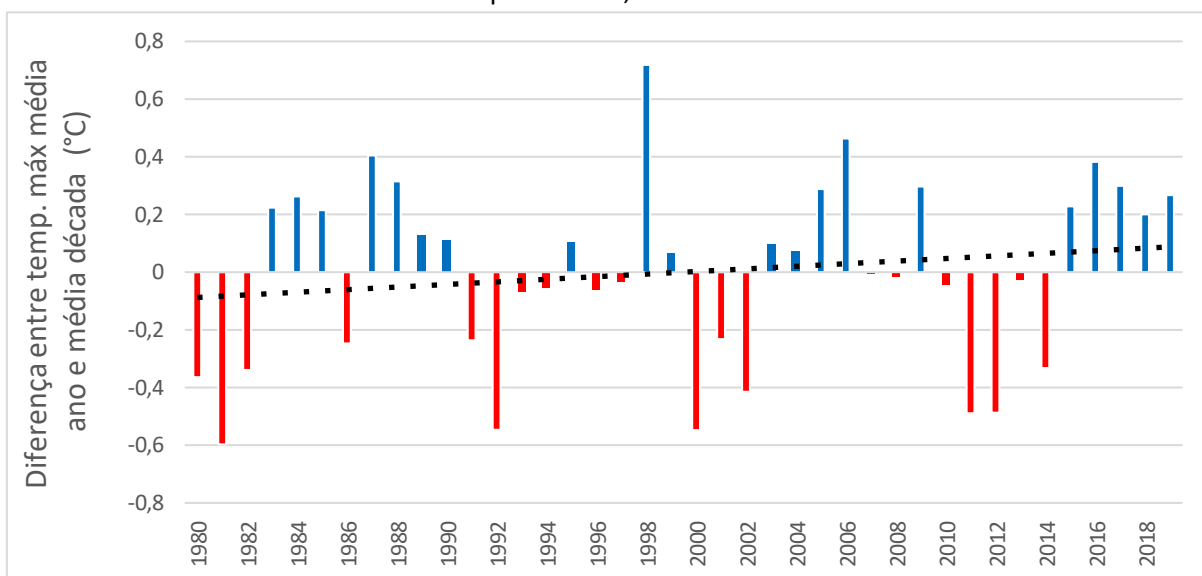
Já para a região Nordeste do Brasil, Lacerda (2015) também encontrou tendências positivas a longo prazo em séries de temperatura para Pernambuco, incluindo a ilha de Fernando de Noronha. No Sertão e do Agreste de Pernambuco, o aumento das temperaturas máximas e sua tendência positiva, sugere que essas regiões tendam à aridificação.

Figura 2 - Comparação da temperatura máxima média anual com temperatura máxima média da década para Maceió, de 1980 a 2020.



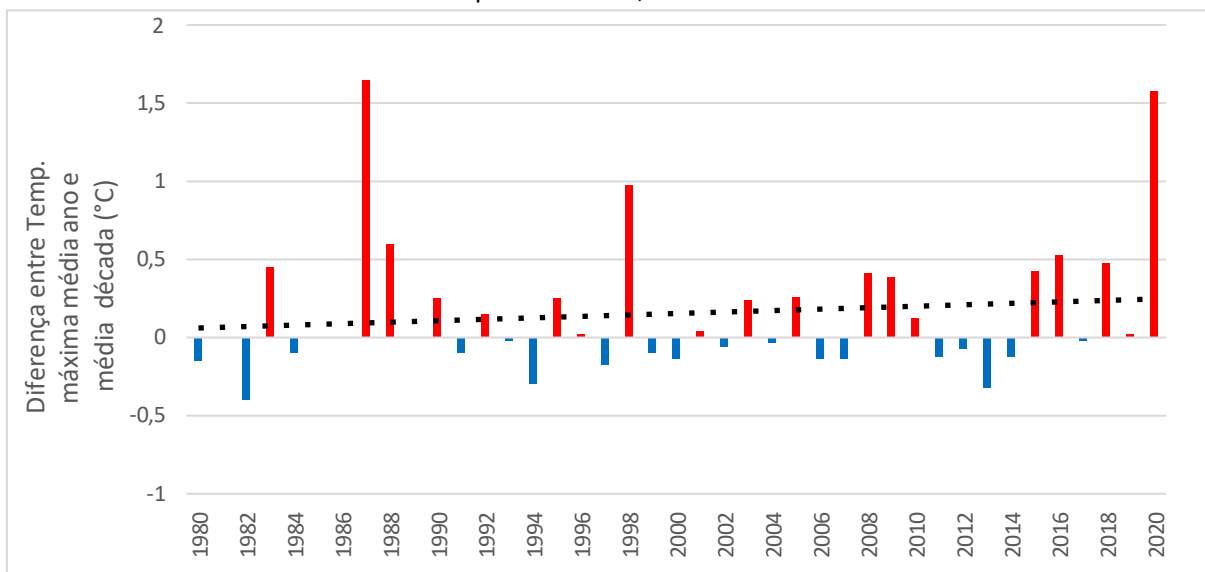
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 3 - Comparação da temperatura máxima média anual com temperatura máxima média da década para Recife, de 1980 a 2020.



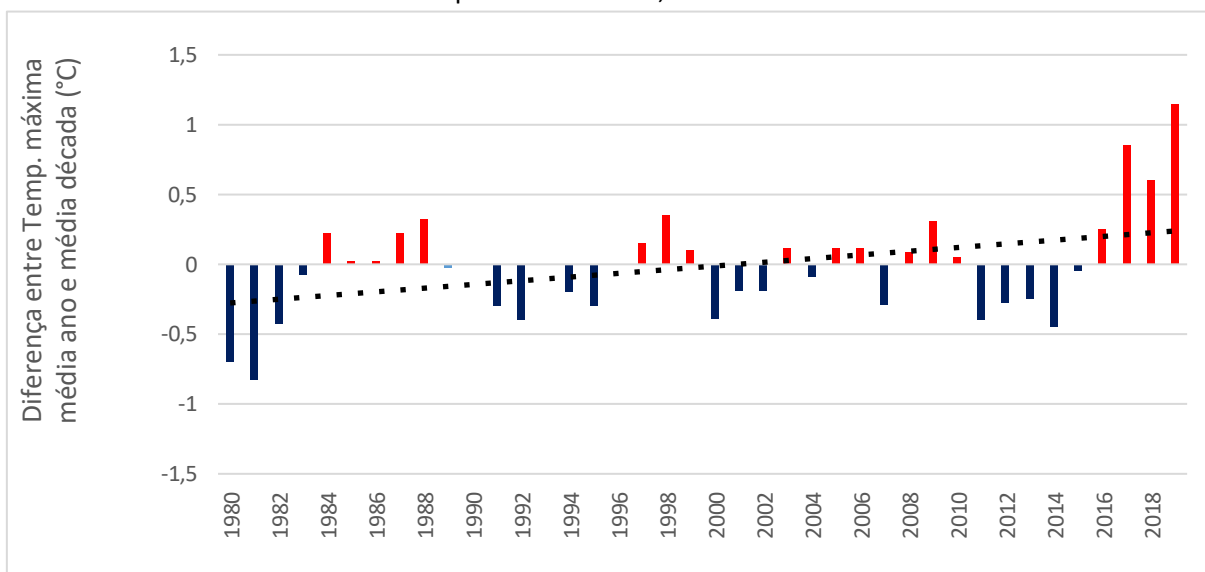
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 4 - Comparação da temperatura máxima média anual com temperatura máxima média da década para Salvador, de 1980 a 2020.



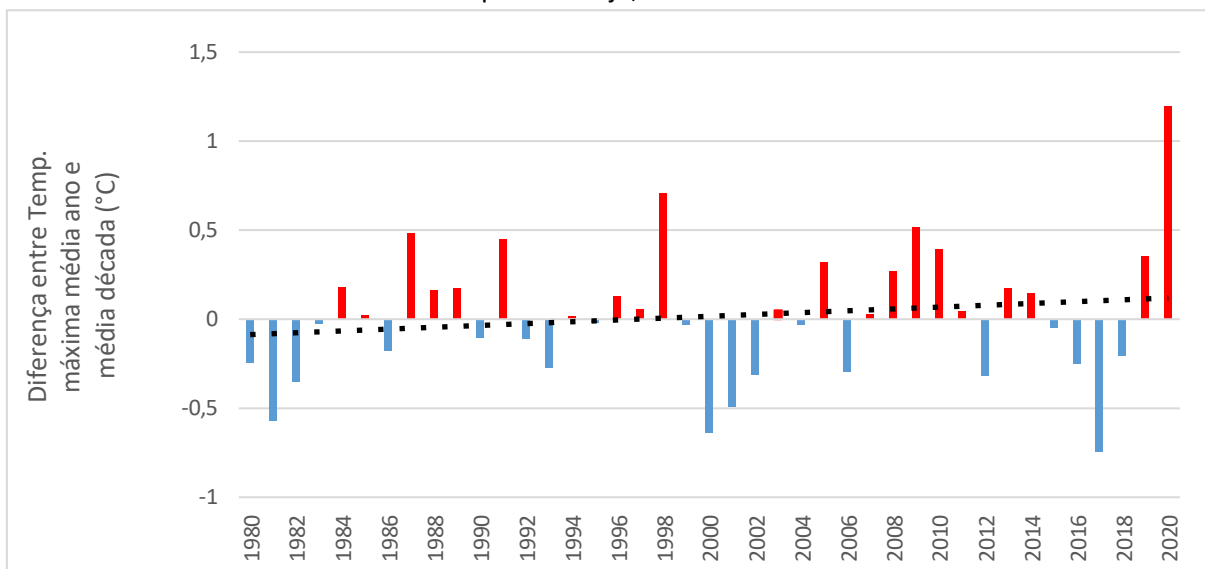
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 5 - Comparação da temperatura máxima média anual com temperatura máxima média da década para João Pessoa, de 1980 a 2020.



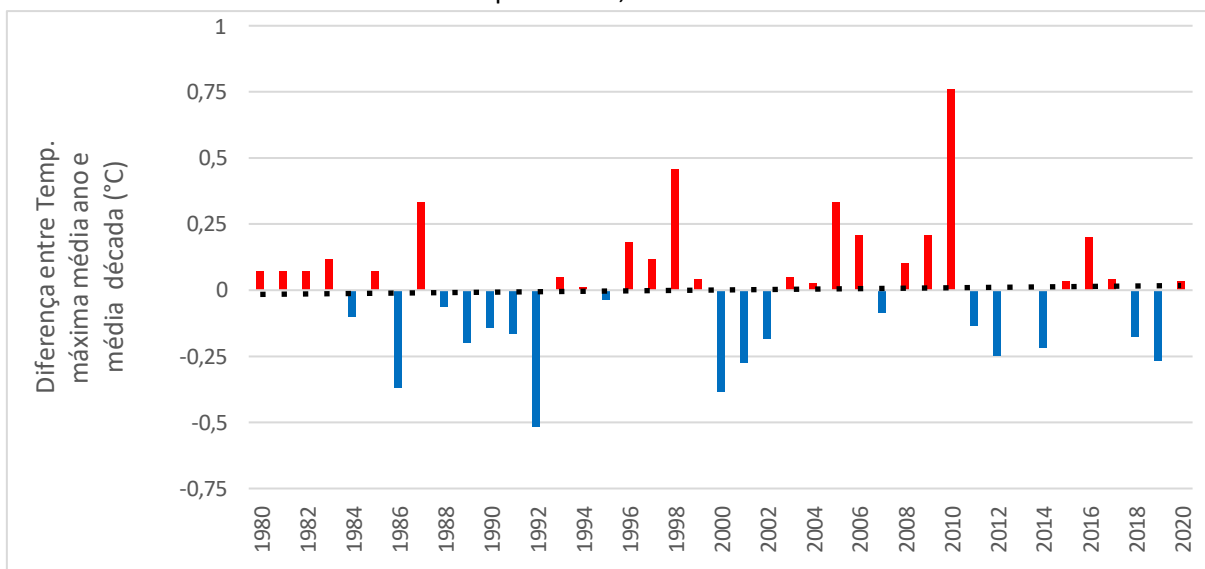
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 6 - Comparação da temperatura máxima média anual com temperatura máxima média da década para Aracaju, de 1980 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 7 - Comparação da temperatura máxima média anual com temperatura máxima média da década para Natal, de 1980 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

3.2. Análise de Ondaletas Cruzadas e Coerência

As análises de Ondaletas cruzadas e coerência realizadas aqui indicam influência e relação entre IOS e Temperatura máxima, relação essa também verificada em Dantas et al. (2015) e Da Silva et al. (2022).

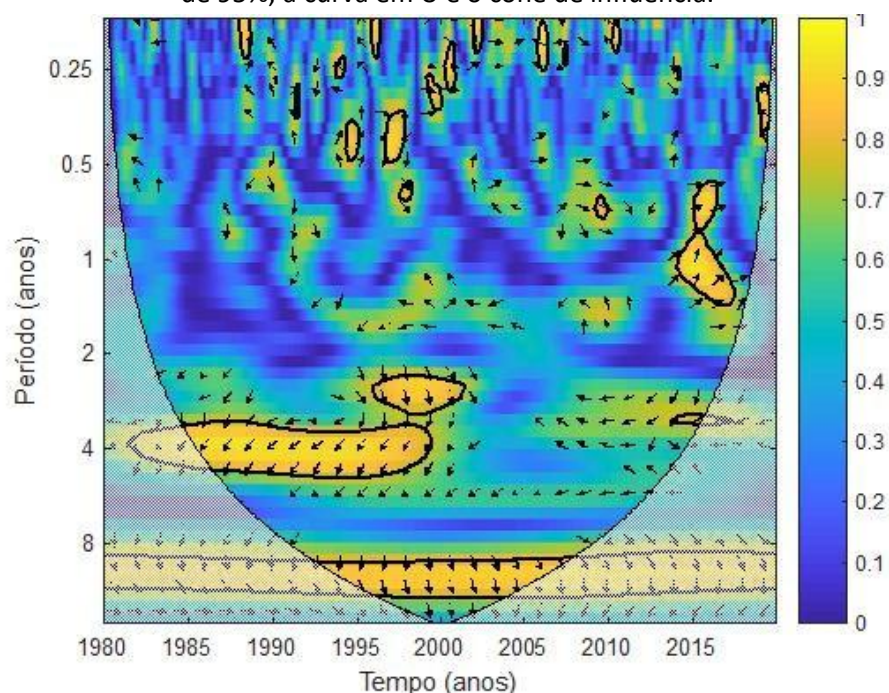
Maceió

Na análise da ondeleta cruzada entre a temperatura máxima e o IOS, para a cidade de Maceió (Figura 8) é capaz de constatar que existe forte coerência na escala temporal entre 1 e 2 anos, por volta de 2010 a 2013 com as setas direcionadas para cima e direita, criando um ângulo de aproximadamente 45° , mostrando que o máximo de temperatura ocorre aproximadamente 45 dias depois do máximo do IOS.

É possível observar na escala temporal em torno de 4 anos, entre 1985 a 2000, têm-se forte coerência com setas inclinadas para baixo e esquerda formando um ângulo de 135° graus negativo, sendo a escala com maior coerência, ocorrendo o máximo de temperatura 18 meses (ou 1 ano e 6 meses) antes do máximo do IOS.

Também ocorrem coerências na escala temporal de 2 anos e de 11 anos, em que ambas as séries formam o ângulo de 90° negativo, ficando capaz de analisar que o máximo de temperatura na escala temporal de 2 anos ocorre 6 meses antes do máximo do IOS e na escala temporal de 11 anos o máximo da temperatura ocorre 33 meses (ou 2 anos e 9 meses) antes do máximo do IOS.

Figura 8 - Ondaleta cruzada de coerência (XWT) entre Temperatura máxima de Maceió X IOS, para o período de 1980-2020. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%; a curva em U é o cone de influência.

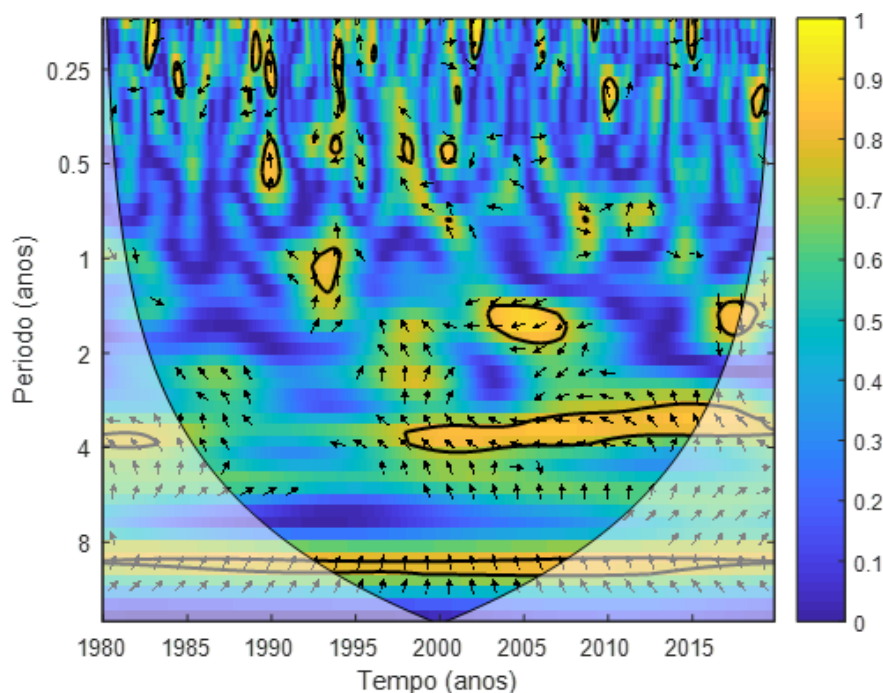


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Recife

Na análise da ondeleta cruzada entre a temperatura máxima e o IOS, para a cidade de Recife (Figura 9) verifica-se forte coerência na escala temporal de aproximadamente 4 anos, de 1997 ao fim da série, em 2020, com as setas, em sua maioria, para a esquerda, indicando que as séries correlacionadas estão fora de fase, assim, quando há o máximo de uma variável a outra diminui. Já na escala de 11 anos, o ângulo positivo de 90 graus, mostra que o máximo da temperatura máxima ocorre 45 dias após o máximo de IOS.

Figura 9 - Ondaleta cruzada de coerência (XWT) entre Temperatura máxima de Recife X IOS, para o período de 1980-2020. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%; a curva em U é o cone de influência.



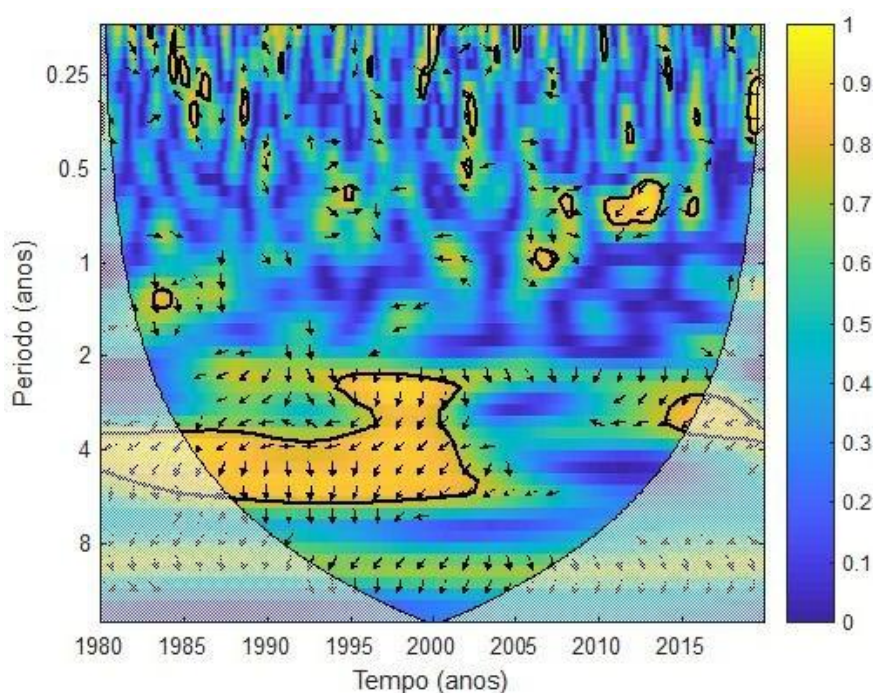
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Salvador

A ondeleta cruzada da temperatura máxima e o IOS para Salvador (Figura 10), foi possível observar coerência na escala temporal de 2 anos entre aproximadamente 1995 até 2001 e na escala temporal de 4 anos entre aproximadamente 1989 até 1996, ocorrendo a formação do ângulo de 90° negativo, indicando assim que o máximo de temperatura na escala temporal de 2 anos ocorre 6 meses antes do máximo do IOS, e na escala temporal de 4 anos o máximo de temperatura ocorre 12 meses antes do máximo do IOS.

Entre aproximadamente 1997 a 2003, é possível verificar coerência com a escala temporal de aproximadamente 4 anos, formando setas com um ângulo de aproximadamente 135° negativos, mostrando assim que o máximo da temperatura ocorre 18 meses antes do máximo do IOS.

Figura 10 - Ondaleta cruzada de coerência (XWT) entre Temperatura máxima de Salvador X IOS, para o período de 1980-2020. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%; a curva em U é o cone de influência.

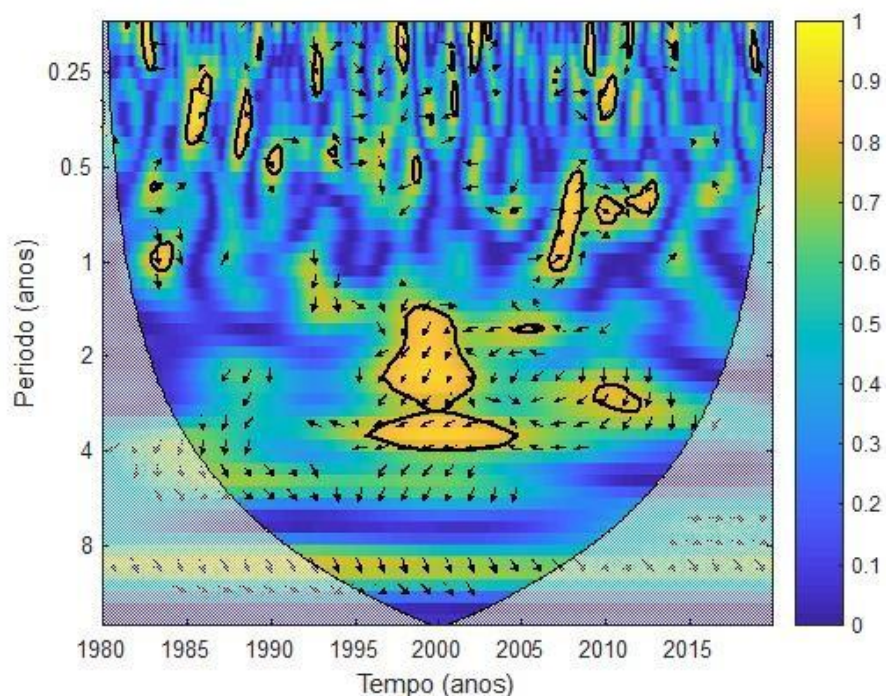


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

João Pessoa

A análise da ondeleta cruzada para João Pessoa (Figura 11), mostra coerência na escala temporal em aproximadamente 2 anos e 3 anos entre aproximadamente 1998 a 2002, com as setas formando um ângulo de aproximadamente 135° negativos, mostrando que o máximo de temperatura máxima ocorre 9 meses e 13 meses e 15 dias, respectivamente, antes do máximo do IOS.

Figura 11 - Ondaleta cruzada de coerência (XWT) entre Temperatura máxima de João Pessoa X IOS, para o período de 1980-2020. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%; a curva em U é o cone de influência.

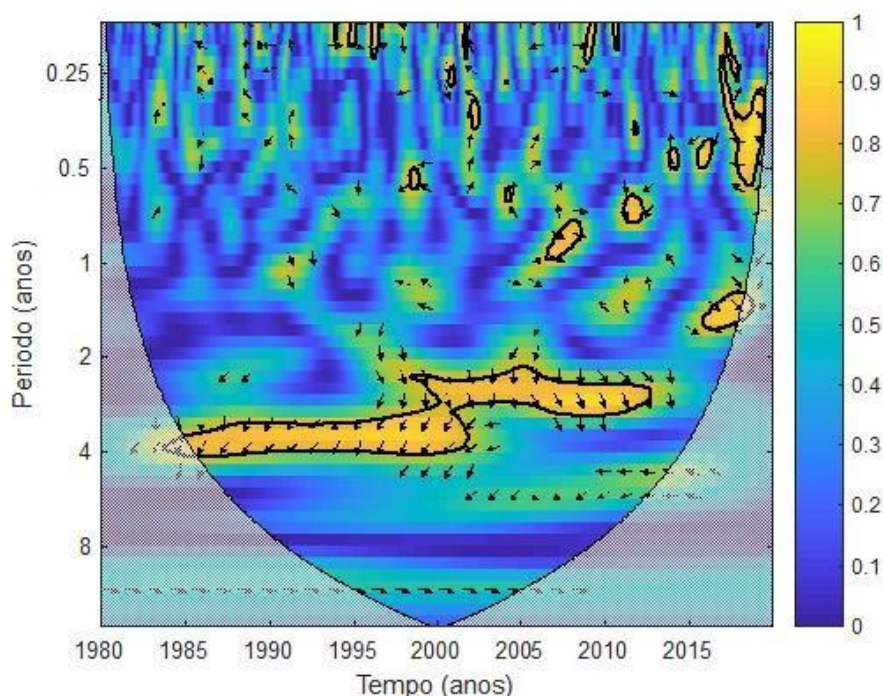


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Aracaju

A ondeleta cruzada para a cidade de Aracaju (Figura 12), é possível verificar fase em coerência na escala predominante temporal de 4 anos entre aproximadamente 1985 a 2002, com as setas gerando um ângulo de aproximadamente 135° negativos, mostrando que o máximo da temperatura ocorre 18 meses antes do máximo do IOS. Diferente das demais, na escala de 11 anos, não houve coerência entre as séries para Aracaju.

Figura 12 - Ondaleta cruzada de coerência (XWT) entre Temperatura máxima de Aracaju X IOS, para o período de 1980-2020. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%; a curva em U é o cone de influência.



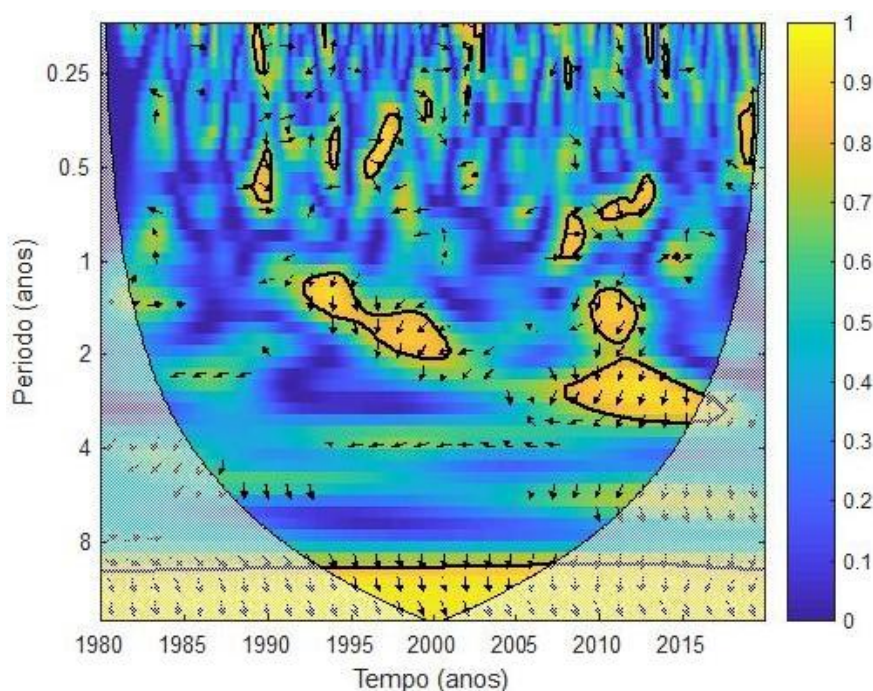
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Natal

Para a análise da ondeleta cruzada da temperatura máxima e o IOS para a cidade de Natal (Figura 13), apresentou coerência na escala temporal entre 1 e 2 anos entre aproximadamente 1993 a 2002, e em torno de 3 anos, durante 2011 a 2015, apresentando setas que formam aproximadamente 90° negativos, fazendo com que os máximos da temperatura ocorrem respectivamente 3 meses, 6 meses e 9 meses antes do máximo do IOS.

Na escala temporal dominante de 11 anos, durante todo o período, é possível verificar coerência formando setas com aproximadamente 90° negativos, sendo possível verificar que o máximo da temperatura máxima para Natal ocorre 33 meses antes do máximo do IOS.

Figura 13 - Ondaleta cruzada de coerência (XWT) entre Temperatura máxima de Natal X IOS, para o período de 1980-2020. Contornos contínuos englobam variâncias significativas ao nível de confiança de 95%; a curva em U é o cone de influência.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Após a análise das ondeletas cruzadas para a temperatura máxima e o IOS para as seis cidades do leste do Nordeste brasileiro, foi possível observar que na maioria das cidades, a fase predominante do máximo da temperatura máxima vem antes do máximo do IOS, na escala mais significativa e com correlação persistente, a escala de 11 anos, mostrando um padrão semelhante na maioria das cidades, e este pode auxiliar na previsão antecipada de ondas de calor.

Salvador mostrou essa forte e persistente correlação ocorrendo máximo de temperatura máxima após máximo de IOS. O máximo de temperatura máxima ocorrendo após o máximo de IOS também foi encontrado por Da Silva et al. (2022) para Santiago, no Chile.

4. CONCLUSÕES

Foram observadas tendências de aumento anuais e na série completa para todas as cidades do LNEB. Comparando os anos com as décadas também se observa aquecimento em todas capitais.

A aplicação inédita de Análise de Ondaletas cruzadas para temperatura máxima média das seis capitais do Nordeste brasileiro trouxe resultados importantes e inéditos. Após a análise das ondeletas cruzadas para a temperatura máxima e o IOS para as seis cidades do leste do Nordeste brasileiro, foi possível observar que na maioria das cidades, a fase predominante do máximo da temperatura máxima vem antes do máximo do IOS, na escala mais significativa e com correlação persistente, a escala de 11 anos, mostrando um padrão semelhante na maioria das cidades, e este pode auxiliar na previsão antecipada de ondas de calor, e mostra a importância de realizar estudos como esse para outras regiões do Brasil.

Salvador mostrou essa forte e persistente correlação ocorrendo máximo de temperatura máxima média após máximo de IOS, o que sugere que o método indica relação entre as variáveis e pode ser usado para previsão de extremos de temperatura máxima mediante ocorrência de ENOS.

REFERÊNCIAS

- BI, Y.; GAO, C.; WANG, Y.; LI, B. Estimation of straw resources in China. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 25, n. 12, p. 211-217, 2009.
- BLAIN, G. C. O teste de Mann-Kendall: a necessidade de considerar a interação entre correlação serial e tendência. **Acta Scientiarum**. Agronomia, 2013.
- BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. 118 years of monthly Standardized Precipitation Index data: meteorological series of Campinas, state of São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 137-148, 2011.
- BONFIM, O. E. T.; SILVA, D. F. D.; KAYANO, M. T.; ROCHA, L. H. D. S. 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**, v. 35, p. 755-768, 2021.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, C. M. S. E.; de ALMEIDA, H. A.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, p. 215-225, 2019.

CASTELHANO, F. J.; PINTO, J. E. S. DE S. Tendências e alterações climáticas no Estado de Sergipe, nordeste do Brasil. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 42, p. e185565, 2022. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.185565>

CASTRO, C. A. C., 2002. **Interações Trópicos-Extratópicos na escala de tempo intra-sazonal durante o verão austral e seus efeitos na América do Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

COSTA, C.P. W. **Análise espacial e temporal de índices climáticos derivados das temperaturas máximas e mínimas para o Rio Grande do Sul**. 2008. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

DANTAS, L. G.; SANTOS, C. A. C.; OLINDA, R. A. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande – PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 423 – 434, 2015.

DA SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, ambientais, agroeconômicos e de seus efeitos sobre a Bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE)**. 2009. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

DA SILVA, D. F. Aplicação de Análises de ondaletas para detecção de ciclos e extremos pluviométricos no leste do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 187-198, 2017.

DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T.; SOUZA NETO, P. F.; SANTOS, F. D. S. Coerência entre variabilidade climática do oceano pacífico e eventos extremos climáticos em Santiago (Chile). **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 31, n. 18, p. 631–648, 2022. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.16037>

DINIZ, G. B.; BERLATO, M.A.; CLARKE, R.T.; FONTANA, D.C. Identificação de regiões homogêneas de temperaturas máxima e mínima do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 303-312, 2003.

FIGUEROA, S. N. **Estudo dos sistemas de circulação de verão sobre a América do Sul e suas simulações com modelos numéricos**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-7121-TDI/672), São José dos Campos, 1997.

GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear processes in geophysics**, v. 11, n. 5/6, p. 561-566, 2004.

GUYOT, M. S. D. **Agroecologia e convivência com o semiárido para a resiliência às mudanças climáticas no sertão da Bahia**. 2018. Tese (Doutorado em energia nuclear na agricultura) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York. 2007.

Intergovernmental panel on climate change (IPCC) Climate Change 2022: Impacts, adaptation and Vulnerability. Acesso em 08 de março de 2022. Disponível em https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf

JUNGES, A.H.; TAZZO, I.F.; CARDOSO, L. S.; CERA, J.C. Avaliação da onda de calor ocorrida em janeiro de 2022 no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.30, e027078, 2022.

KAYANO, M. T.; BLAIN, G. C. Análisis de ondeletas de series mensuales de precipitación, temperaturas máximas y mínimas mensuales en Campinas. In: **CONGRESO VENEZOLANO DE AGROMETEOROLOGIA**, 4. Maracay, Anais Fundacite Táchira. 2007.

KENDALL, M. Rank correlation measures. **Charles Griffin**, London, v. 202, n. 15, 1975.

LACERDA, F. F. **Tendências de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no Nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

LIMA, M. C. G. **Influência dos eventos extremos da precipitação e das mudanças climáticas no padrão hidroclimático da bacia hidrográfica do Rio Mundaú e a vulnerabilidade da população**. 2019. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 245–259, 1945.

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. Rio de Janeiro: **FBDS**. 2009.

MEDEIROS, R. M.; DE ARAÚJO, W. R.; DE HOLANDA, R. M.; SABOYA, L. M. F.; DE FRANÇA, M. V.; NETO, F. C. R. Oscilações climáticas e suas tendências para Lagoa Seca–Paraíba, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e345101321506-e345101321506, 2021.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, p. 1-10, 2002.

NOAA, 2024. Disponível em: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>. Acesso em 21/02/2024.

NÓBREGA, R.S.; SANTIAGO, G. A. C. F. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, v. 63, p. 9-26, 2016.

OMM, **Boletim da OMM**. 1992. Acesso em: 12/03/2020. Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/42943>

SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C. Tendências observadas nos índices extremos diários de temperatura e precipitação na cidade do Rio de Janeiro. In: **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém (PA). 2010.

SILVA, A. S. D.; SILVA, E. M. D.; LEAL, J. B. V.; SALES, D. C.; MOURA, I. J. M.; ALVES, J. M. B. Distúrbios ondulatórios de leste no nordeste brasileiro: um estudo de caso utilizando modelagem numérica de mesoescala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 (suppl), p. 637-649, 2021.

SOUZA NETO, P. F. **Identificação de impactos da variabilidade climática sobre os Oceanos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

STOZHKOVA, Y. I.; ZULLO, J.; MARTIN, I. M.; PELLEGRINO, G. Q.; PINTO, H. S.; BAZILEVSKAYA, G. A.; ... TURTELLI, A. Rainfalls during great Forbush decreases. **Il Nuovo Cimento C**, v. 18, p. 335-341, 1995.

TORRENCE, C.; WEBSTER, P. J. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system. **Journal of climate**, v. 12, n. 8, p. 2679-2690, 1999.

XU, X.; ZHANG, Y.; LIN, K.; DI, H.; YANG, R. Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 10, p. 1084-1091, 2005.