



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Climatologia das Ondas de Calor Registradas no Estado do Pará, Brasil

Tiago Bentes Mandú¹, Ana Carla dos Santos Gomes², Ana Lucia da Silva Nascimento³, Eduardo Almeida da Silva⁴, Maria Uilhiana Gomes de Andrade⁵, Matheus Henrique Bezerra de Melo⁶, Amanda Carolina da Silva Queiroz⁷, Glaucete Vitor da Silva⁸, Sarah Suely Alves Batalha⁹, Iolanda Maria Soares Reis¹⁰, Gabriel Brito Costa¹¹, Rogério Favacho da Cruz¹², Wellington Conceição da Silva¹³, Ana Vitória Padilha Mendes¹⁴, Éder Bruno Rebelo da Silva¹⁵, Maria Roseane Pereira dos Santos¹⁶, Sivaldo Filho Seixas Tavares¹⁷, Vivianne Martins de Alfaia¹⁸, Eliane Leite Reis de Sousa¹⁹, Losany Branches Viana²⁰, Deyviane Ramos Alves²¹, Safira Noronha da Silva²².

¹Mestre em meteorologia, Doutorando em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (SP), e-mail: tiagobentes1@gmail.com (autor correspondente). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5049-2099>. ²Doutora em Ciências Climáticas, docente do curso de Ciências Atmosféricas na Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: ana.gomes@ufopa.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7499-8342>. ³Mestra em meteorologia, Doutoranda em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (SP), e-mail: analuciasne@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4453-0666>. ⁴Bacharel em Meteorologia, Mestrando em Ciências Climáticas pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN (RN), e-mail: eduardometeorologistaufn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5809-0454>. ⁵Licenciada em Física, Mestranda em Ciências Climáticas pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN (RN), e-mail: uilhiana.andrade@gmail.com. ⁶Graduando em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN (RN), e-mail: matheushbm10@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8267-5938>. ⁷Mestra em Ciências Climáticas, Doutorando em Meteorologia no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e-mail: amandacarolsq@outlook.com. ⁸Doutora em Ciências Ambientais, docente do Centro de Formação interdisciplinar, Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: glaucetesilva@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7505-2898>. ⁹Doutora em Ciências Ambientais, docente da Escola de Ensino Técnico do Estado do Pará Francisco Coimbra Lobato-EETEP(A), e-mail: ssa.batalha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5153-2379>. ¹⁰Doutora em agronomia, docente do Instituto de Biodiversidade e Florestas, Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: iolandareis@outlook.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6619-0730>. ¹¹Doutor em Ecologia Aplicada, docente Instituto de Biodiversidade e Florestas, Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: gabrielbritocosta@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5254-489X>. ¹²Especialista em Gestão Empresarial, docente do Campus Alenquer, Universidade Federal do Oeste do Pará, e-mail: rogeriofavacho@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9510-0586>. ¹³Mestre em saúde e produção animal, Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA(PA), e-mail: wellington.medvet@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9287-0465>. ¹⁴Graduanda em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: nha_2309@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-4297>. ¹⁵Mestrando na área de concentração produção vegetal em sistemas agrícolas, Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA(PA), e-mail: eder.b.rebelo@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2964-8471>. ¹⁶Graduanda do Bacharelado Interdisciplinar em Ciências da Terra, Universidade Federal do oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: roseanemaria022@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3721-6564>. ¹⁷Especialização em Saúde Coletiva pela Faculdade Serra Geral, e-mail: sivaldo.filho11@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5996-1795>. ¹⁸Mestranda em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN(RN), e-mail: alfaiavivmartins@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3895-5040>. ¹⁹Graduada em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará, e-mail: elianeleitestm@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2813-5524>. ²⁰Graduanda em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: lbranchesv@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3926-8042>. ²¹Graduanda em Farmácia, Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: annealvesz@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2295-6631>. ²²Graduanda em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA (PA), e-mail: safiranononha98@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2281-6484>.

Artigo recebido em 28/09/2021 e aceito em 07/08/2022

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo caracterizar as ondas de calor observadas no estado do Pará, região Norte do Brasil, durante 40 anos. Foram utilizados dados diários de temperatura máxima do ar para o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2019 de 15 estações meteorológicas convencionais situadas na região de estudo. A Análise de Cluster foi empregada a fim de identificar regiões homogêneas de temperatura máxima do ar enquanto que a identificação das ondas de calor foi realizada usando os índices CTX90pct e GDE. Os resultados apontam por meio da Análise de Cluster que existem 3 regiões com comportamento homogêneo da temperatura máxima do ar, sendo a maior variabilidade na escala interanual, com destaque para os anos de 1998, 2005, 2010, 2015, 2016 que apresentaram o maior número de eventos registrados. A análise permitiu verificar que as ondas de calor apresentam similaridades espaço-temporal, com elevada variabilidade interanual e sazonal, informações que podem servir de subsídio para implementação de medidas públicas que visem reduzir os impactos negativos que as ondas de calor podem causar na população paraense. Palavras-Chave: Amazônia; desastres naturais; eventos climáticos extremos

Climatology of Heat Waves in The State of Pará, Brazil

ABSTRACT

Heat Waves (HW) are one of the extreme climatic events that most impact the various branches of society. This study aimed to characterize the HW observed in the state of Pará, northern Brazil, for 40 years. Daily data of maximum air temperature were used for the period from January 1980 to December 2019, from 15 conventional meteorological stations located in the study region. Cluster Analysis was used to identify homogeneous regions of maximum air temperature, while the identification of HW was performed using the CTX90pct and DD indices on an annual, seasonal and monthly scale. Six characteristics of HW were evaluated: occurrence, frequency, mean duration, mean intensity, maximum intensity and severity degree, so that through student's t-test it was verified whether the means of the characteristics of the HW are equal between the clusters. The results indicate through CA that there are 3 regions with homogeneous behavior of maximum air temperature, being the greatest variability in the interannual scale, especially for the years 1998, 2005, 2010, 2015, 2016 that presented the highest number of events recorded. The t-test showed that in clusters, for the six characteristics, a similarity in the mean behavior is observed, indicating that the events of HW present spatial similarity in the state. The analysis allowed us to verify that HW present space-temporal similarities, with high interannual and seasonal variability, information that can serve as a subsidy for the implementation of public measures aimed at reducing the negative impacts that heat waves can cause on the population of Pará state.

Keywords: Amazon; natural disasters; extreme weather events

Introdução

Os desastres naturais são definidos como o resultado de um fenômeno natural extremo de ocorrência rara sobre um sistema social, gerando diversos danos e prejuízos que estão além da capacidade dos afetados de lidar com o impacto (Abe et al., 2019; Szymczak et al., 2022). Os desastres de origem meteorológica, são chamados de eventos climáticos extremos, definidos por Ambrizzi (2014) como condições incomuns de tempo que ocorrem em um lugar particular e causam impactos negativos aos diversos ramos da sociedade, como riscos de morte, danos a construções, perdas financeiras e atividades agrícolas.

De acordo com Robinson (2001) e Feron et al. (2019), na literatura científica não existe definição universal para definir as ondas de calor (OC). Em estudos realizados na América do Sul (AS), OC são definidas como um período de 3 dias consecutivos ou mais em que a temperatura do ar de uma região permanece acima de sua média climatológica, causando estresse térmico e sensação de desconforto para a população (Geirinhas et al., 2018a; Rusticucci et al., 2017; Diniz et al., 2020; MANDÚ et al., 2021). De acordo com Raei et al. (2018), as OC podem ser analisadas considerando a intensidade, duração, frequência e extensão espacial, que são suas quatro principais características.

Em latitudes médias a formação das OC está associada a anticiclones subtropicais quase estacionários que se formam próximos a área afetada, geralmente ligados a ondas de escala planetária, que produzem anomalias positivas de temperatura, que persistem por quatro ou mais dias

e podem apresentar intensidade moderada a forte dependendo da persistência do sistema de bloqueio atmosférico atuante (Pezza et al., 2012; Jacondino et al., 2019; Piticar et al., 2019; Marengo et al., 2022). Geirinhas et al. (2018b) mostraram que em municípios brasileiros localizados na porção tropical, a ocorrência do evento está ligada a um aquecimento anômalo nos baixos níveis da atmosfera, ligadas ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o Hemisfério Norte (HN), fazendo com que se tenha o maior número de eventos durante o inverno boreal. Os impactos causados pelas OC podem ocorrer de forma direta e indireta. Referente aos impactos diretos, pode-se citar a exposição ao calor extremo que pode ocasionar desidratação, exaustão física, perda de consciência e outras emergências médicas (Gerrard, 2019; Lapola et al., 2019; Zhao et al., 2019; Guo et al., 2020).

Os impactos indiretos referem-se à redução nas horas de trabalhadores ao ar livre, diminuição no número de visitas em parques e exposições a céu aberto, e há uma maior demanda por água e energia elétrica, forçando os sistemas existentes, podendo causar racionamento e escassez (Steffen et al., 2014; Nicholls e Strengers, 2018; Mahadevia et al., 2020; Bose-O'Reilly et al., 2021). De acordo com Sutanto et al. (2020), as ondas de calor podem contribuir com a ocorrência de incêndios florestais, assim como para eventos de seca meteorológica, induzidos pelas elevadas temperaturas, deficit na precipitação pluviométrica e baixa umidade do solo.

Diversos episódios severos de OC já foram registrados no Brasil e no Mundo, como por

exemplo o observado no verão de 2003 na Europa, que de acordo com Robine et al. (2008) ocasionou mais de 50.000 mortes. Na Califórnia, Knowlton et al. (2011) reportaram que um evento de OC foi responsável por um gasto superior a 179 milhões de dólares em serviços hospitalares. Geirinhas et al. (2019) mostraram que um evento com duração de oito dias ocorrido em fevereiro de 2010 foi responsável por mais de 700 óbitos de idosos na região metropolitana do Rio de Janeiro. Pesquisas realizadas na China, apontam que em 2013 cerca de 3,4% da produção oriunda de plantações foram perdidas devido a um evento que durou aproximadamente 14 dias, o prejuízo foi de aproximadamente 4 bilhões de dólares (Xia et al., 2018).

Estudos que abordam a ocorrência de ondas de calor no Brasil ainda são insuficientes para representar a larga extensão territorial do país. Das pesquisas existentes, cita-se a realizada por Bitencourt et al. (2016), que verificaram a ocorrência do evento dividindo o país em três regiões, mostrando aspectos de frequência, duração e intensidade. Geirinhas et al. (2018b) a partir de seis capitais dispostas entre as cinco regiões geográficas, mostraram a ocorrência e condições sinóticas associadas ao evento, e Reis et al. (2019) avaliaram a evolução temporal do fenômeno na região subtropical do país, que compreende as regiões Sul e Sudeste. Entretanto, estudos dedicados a estados brasileiros situados na região tropical ainda são escassos.

O Estado do Pará tem como principais atividades agrícolas a produção de arroz, feijão, milho e mandioca, culturas que tem sua produtividade e rendimento ligadas diretamente pela quantidade e distribuição de precipitação e variação sazonal de temperatura (Santos e Oliveira, 2017; Aguilla et al., 2020). De acordo com Orlov et al. (2019), os impactos das OC na agricultura são diversos, dentre eles, destaca-se o risco que os trabalhadores estão expostos ao calor excessivo, assim como a redução na produtividade, e os prejuízos econômicos devido a perdas de safras.

Considerando a importância do entendimento da ocorrência de episódios de ondas de calor no estado do Pará, esta pesquisa baseia-se na problemática de que esses eventos ainda não têm suas principais características compreendidas neste estado e que tal fenômeno afeta a economia, infraestrutura das cidades e na qualidade de vida da população. Portanto, o presente estudo possui a seguinte questão norteadora: Quais são as principais características dos eventos de ondas de calor registrados no estado do Pará?. Uma hipótese associada à pergunta é que considerando os resultados de estudos observacionais e de modelagem realizados em outras localidades é provável que ocorra episódios de ondas de calor neste estado.

Diante do exposto, o presente estudo teve por objetivo avaliar as características espaço-temporais das OC registradas no estado do Pará. A escolha deste estado baseou-se nos prejuízos econômicos que as OC podem causar, tanto para o setor público quanto para o setor produtivo, dada a extensão territorial do estado. Pretende-se contribuir com informações relevantes para um tema ainda incipiente no Brasil.

Material e métodos

A área de estudo é o Estado do Pará, que está localizado na região norte do Brasil, e tem sua posição geográfica apresentada na Figura 1. O Estado do Pará possui 144 municípios e extensão territorial de aproximadamente 1.247.954.666 km², representando 32,8% do Norte brasileiro, e 14,7% de todo o território do país, segundo estimativas populacionais realizadas em 2019 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, sua população é de aproximadamente 8,4 milhões de habitantes (IBGE, 2020). O clima do Pará de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger atualizada por Peel et al. (2007), é tropical com temperatura média do ar anual entre 24 e 26 °C, com baixa amplitude térmica, e regime pluviométrico anual entre 1.500 e 2.000 mm.

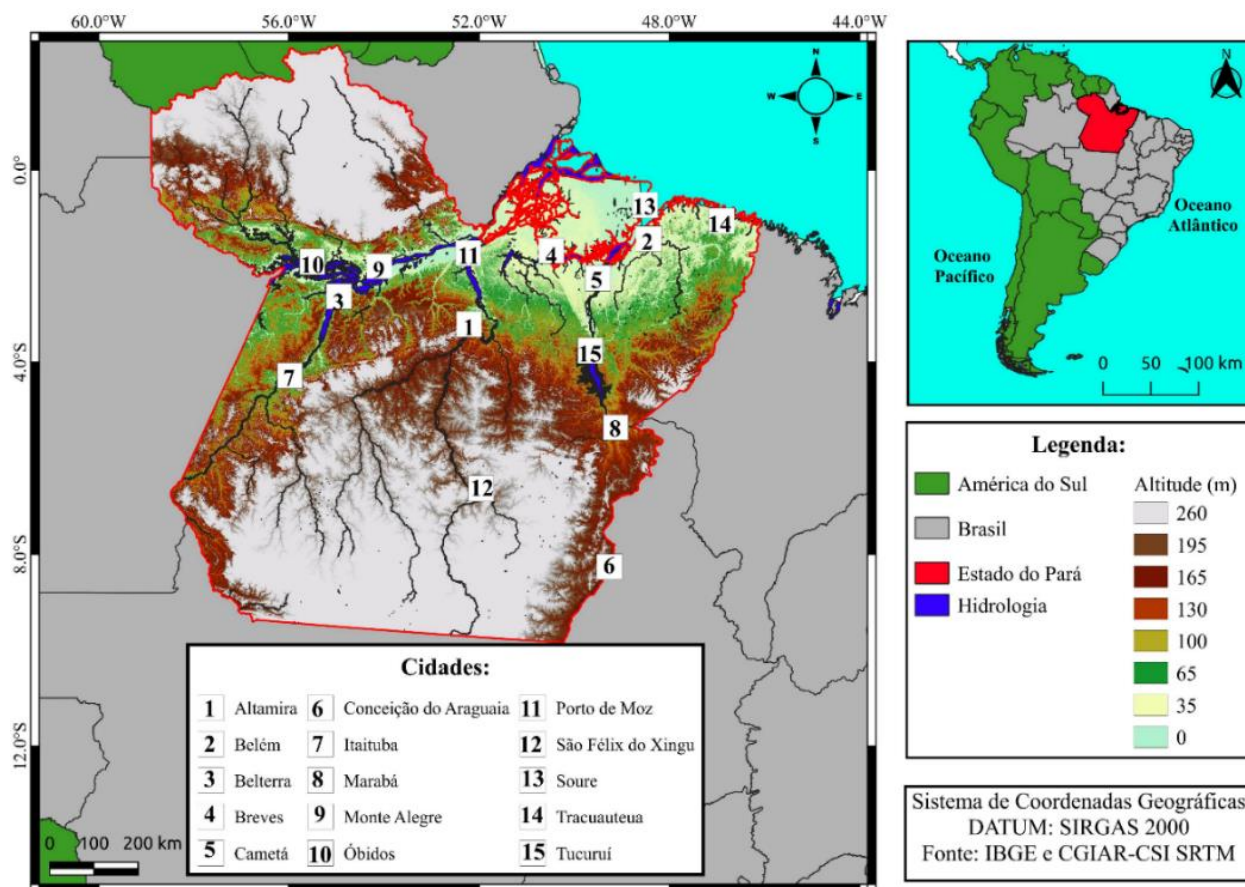


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo. Fonte: IBGE (2020), adaptado pelos autores. O mapa de elevação do estado foi criado usando a versão 4 do banco de dados CGIAR-CSI SR

Foram utilizados registros diários de temperatura máxima do ar para 15 cidades paraenses do período de 1980 a 2019, disponibilizados na plataforma eletrônica do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), informações dessas estações são mostradas na Tabela 1. Salienta-se que a escolha desses 15 municípios é baseada na quantidade de dados disponíveis, pois são os únicos no estado que possuem estações meteorológicas convencionais do INMET, com período de dados suficientes para realizar estudos climatológicos. A homogeneidade dos dados foi realizada a partir da metodologia de Sugahara et al. (2012), que é baseada na variação interquartil, que é um método objetivo que visa remover registros espúrios a partir de características da temperatura máxima do ar de cada cidade.

Diante da ausência dos dados contida na quantidade de falhas na Tabela 1, e da importância

de se usar conjuntos de dados completos salientada por Bitencourt et al. (2020), o preenchimento destes registros foi realizado usando o Multivariate Imputation by Chained Equations (MICE). O MICE é uma metodologia estatística univariada baseada no amostrador de Gibbs, uma técnica de simulação Bayesiana que a partir de múltiplas interações estima registros onde se tem falhas, baseado no método de imputação escolhido (Horton & Lipsitz, 2001). No presente estudo foi utilizado o método da Média Preditiva Correspondente (MPC), que segundo Li et al. (1991) determina estes registros ausentes a partir do modelo de regressão linear que apresentar maior similaridade com os valores existentes. A escolha do uso do MICE via MPC é baseada no desempenho satisfatório que essa metodologia apresentou na imputação de dados climáticos, observada em estudos recentes como o de Alves & Gomes (2020).

Tabela 1. Descrição das estações meteorológicas utilizadas no estudo.

Estação Meteorológica	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude(m)	Quantidade de falhas (%)
1. Altamira	82353	-3,21	-52,21	109,0	11,2
2. Belém	82191	-1,43	-48,43	10,0	0,3
3. Belterra	82246	-2,63	-54,95	152,0	2,1
4. Breves	82188	-1,68	-50,48	40,0	19,9
5. Cametá	82263	-2,25	-49,5	10,0	39,8
6. Conceição do Araguaia	82861	-8,26	-49,26	165,0	2,7
7. Itaituba	82445	-4,28	-55,98	15,0	6,7
8. Marabá	82562	-5,36	-49,13	84,0	8,7
9. Monte Alegre	82181	-2,00	-54,1	38,0	1,3
10. Óbidos	82178	-1,91	-55,51	46,0	4,9
11. Porto de Moz	82184	-1,73	-52,23	15,0	1,4
12. São Félix do Xingu	82668	-6,63	-51,96	220,0	29,3
13. Soure	82141	-0,73	-48,51	10,0	13,3
14. Tracuateua	82145	-1,06	-46,90	20,0	12,2
15. Tucuruí	82361	-3,76	-49,66	35,0	10,1

Foi utilizada a Análise de Cluster (AC) para definir regiões homogêneas de temperatura máxima do estado, metodologia amplamente utilizada para gerar grupos com alta homogeneidade interna em estudos climáticos (Oliveira et al., 2017). AC foi performada usando o Agrupamento Hierárquico Aglomerativo (AHA) a partir do método de Ward e matriz de distância euclidiana como medida de dissimilaridade (Ferstl et al., 2017). De acordo com Rebetez e Reinhard (2008), no AHA cada amostra é inicialmente tratada como um cluster e o método prossegue, sistematicamente mesclando os grupos cuja cada junção causa uma perda mínima de informação, ou seja, se tem um aumento mínimo no total da soma de erros dentro do novo cluster.

A validação dos clusters criados foi realizada a partir do índice de Silhouette que avalia o quanto uma observação é semelhante as outras

observações contidas no cluster, e assim permite verificar se as cidades foram incluídas no cluster correto, valores próximos de -1 indicam que a observação foi incluída em um cluster inadequado, quando próximo de 0 indica que a observação não se enquadra em nenhum cluster, e quanto mais próximo de 1 indica que a observação foi inserida no cluster correto (Rousseeuw, 1987).

A identificação das OC foi realizada usando o índice CTX90pct, que considera eventos de OC quando 3 dias consecutivos ou mais apresentam temperatura máxima do ar acima do percentil climatológico 90, onde se calcula um percentil 90 para cada dia do ano, considerando assim ciclo sazonal anual, centrado cada dia em uma janela temporal de 15 dias (Perkins e Alexander, 2013). Assim, se tem um valor de percentil diferente para todos os dias do ano, considerando assim o ciclo sazonal. O CTX90pct

não permite avaliar a intensidade das OC, por isso o índice Graus-Dias de Excedência (GDE) será utilizado. Segundo Díaz et al. (2006), o GDE expressa a soma de temperatura excedente baseada no CTX90pct durante toda a duração de cada episódio de OC. No presente estudo, serão avaliadas seis características das OC, descritas na Tabela 2, sendo a característica de severidade proposta por Geirinhas et al. (2018).

No presente estudo, essas características foram avaliadas de forma anual, sazonal e mensal, visando caracterizar de forma espaço temporal as

ondas de calor no estado. O teste t de Student foi empregado para comparar as características entre os clusters definidos a partir da climatologia da temperatura máxima do ar, afim de verificar se as ondas de calor apresentam similaridade média a esses grupos. O teste t de Student possui as seguintes hipóteses: Nula (H0) os dados fornecem evidência de que as médias são iguais; Alternativa (H1) não há argumentos suficientes para aceitar H0, ou seja, as médias apresentam diferença (Levine, 2000). Foi considerado o nível de significância de 5% para rejeição de H0

Tabela 2. Características das ondas de calor analisadas no presente estudo

Característica	Descrição	Unidade de medida
Ocorrência	Número total de ondas de calor registradas	Adimensional
Frequência	Quantidade de dias do ano/mês/estação que estiveram em ondas de calor	Dias
Duração Média	Quantidade de dias que durou cada onda de calor	Dias
Intensidade Média	Média da soma da temperatura do ar que esteve acima do esperado durante a onda de calor	°C
Intensidade Máxima	Evento de maior intensidade observada	°C
Severidade	Episódios moderados (duração de 3-6 dias), graves (de 6-10 dias) e, extremos (superior a 10 dias)	Adimensional

Resultados e discussões

Foram definidos 3 grupos homogêneos de temperatura máxima do ar anual (Figura 2). O 1º cluster é composto pelos municípios de Altamira, Cametá, Conceição do Araguaia, Itaituba, Marabá e Tucuruí; o 2º por Belém, Breves, Óbidos, Porto de Moz, São Félix do Xingu, e Tracuateua e no 3º por Belterra, Monte Alegre e Soure. Machado et al. (2010) apontam que na análise de cluster (AC) a proximidade das estações meteorológicas não implica no mesmo comportamento da temperatura

do ar no Rio Grande do Sul, onde pontos espacialmente distantes pertencem ao mesmo grupo. Conforme a Figura 2A, no Pará isso é observado em Óbidos e São Félix do Xingu no 2º cluster e para Soure no 3º cluster. O índice de Silhouette mostrou valor médio de 0,34 com menor valor de 0,31 para o cluster 1 e o maior de 0,42 no cluster 3, valores semelhantes aos observados por Araújo et al. (2019) na AC aplicada a temperatura do ar no Nordeste Brasileiro, mostrando que as cidades foram agrupadas de forma satisfatória nos 3 clusters criados.

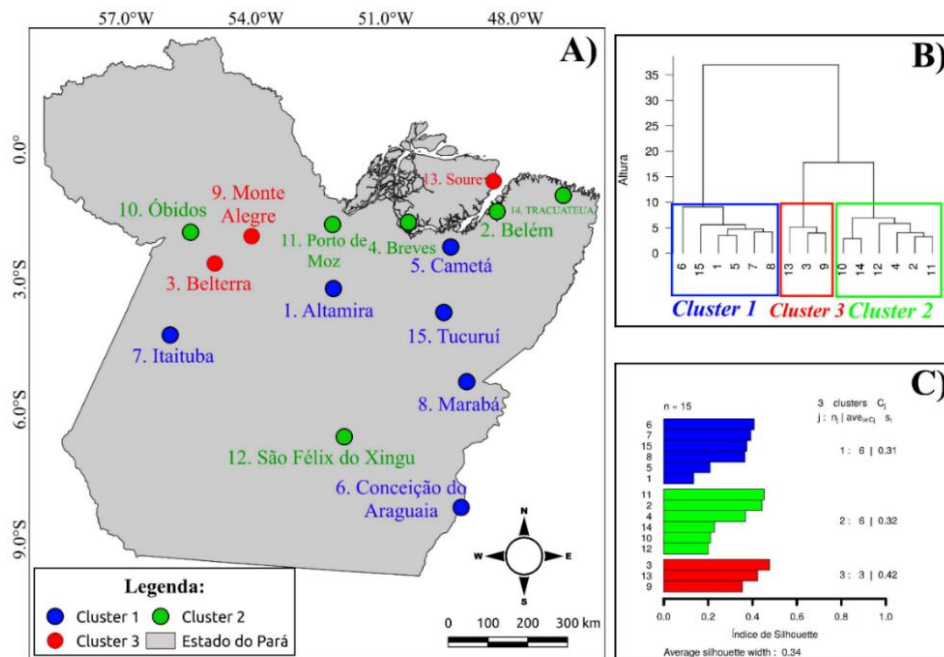


Figura 2. Resultado na análise de cluster, A) distribuição espacial das regiões homogêneas da temperatura máxima anual, B) Dendograma com os clusters gerados e C) Índice de Silhouette.

De acordo com a Tabela 3, com exceção a temperatura mínima, os parâmetros apresentam maior valor no cluster 1, que contém estações meteorológicas situadas mais a norte do estado. Constata-se valores reduzidos de desvio-padrão e variância, que é esperado pois trata-se de um

estado situado na região tropical, cujo a variação de temperatura é restrita devido a radiação solar quase constante recebida durante o ano inteiro, fazendo com que o desvio-padrão e a variância apresentem baixos valores (Fisch et al., 1998).

Tabela 3. Estatística descritiva da temperatura máxima do ar diária para às 3 regiões homogêneas de temperatura no estado do Pará.

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Máximo (°C)	37,5	35,3	34,8
Média (°C)	32,9	32,0	31,1
Desvio-padrão (°C)	1,6	1,2	1,3
Variância (°C)	2,4	1,5	1,8
Amplitude (°C)	11,3	9,0	8,8
Mínimo (°C)	26,2	26,3	26,0

O comportamento anual das OC registradas no estado do Pará está contido na Figura 3A. Os cluster 1 e 3 registraram eventos em 26 dos 40 anos analisados, enquanto no 2º cluster, 25 anos registraram no mínimo 1 episódio de OC. Os três clusters apresentaram registros em todos os anos a partir de 2003, sugerindo um acréscimo que pode

estar relacionado com o aumento da temperatura do ar no estado conforme foi mostrado por Salviano et al., (2016). Os clusters 1 e 2 apresentaram o maior registro de 25 OC em 2010, enquanto no 3º foi de 23 OC em 2016, percebe-se também elevado número de eventos para os 3 grupos em 1998, 2005, 2009-2010 e 2015-2016, que coincide com

períodos de severa estiagem registradas no estado (Zeng et al., 2008; Asner et al., 2010; Lewis et al., 2011; Jiménez-Muñoz et al., 2016).

Na escala sazonal (Figura 3B) também é possível observar diferenças e similaridades entre os grupos, como o mesmo número de eventos registrados no inverno (46 OC) nos clusters 1 e 2, sendo também observados os maiores valores para todos os clusters nesta estação, e na primavera (40 OC) para os clusters 1 e 3. Os menores valores foram observados no verão no cluster 1 e 2, e no outono para o 3º grupo, sendo esse o menor registro geral, referente a variabilidade, as estações de inverno e primavera apresentam comportamento com maior semelhança entre os grupos, enquanto a maior diferença é vista no outono. Geirinhas et al. (2018) apontam que em um município na região Amazônica a ocorrência de ondas de calor tende a ser maior na estação menos chuvosa, o que foi

constatado no estado do Pará pois como mostram Ferreira-Filho et al. (2020), essa estação ocorre no inverno e primavera, estações com os maiores registros de OC.

O comportamento mensal (Figura 3C), mostra que todos os grupos apresentam registros de janeiro a dezembro, evidenciando que condições atmosféricas que favorecem a ocorrência de OC podem ocorrer durante os 12 meses do ano. O maior registro observado em agosto tanto no cluster 1 quanto no 2 que apresentaram o mesmo valor (19 episódios), e o menor (7 OC) em março no cluster 2, com registros simultâneos para os meses dezembro e março entre os clusters 2 e 3. Elevada variabilidade é observada para os 3 grupos, tanto entre eles quanto para os meses, mostrando que no estado do Pará o número de eventos apresenta diferença entre essas três escalas de tempo.

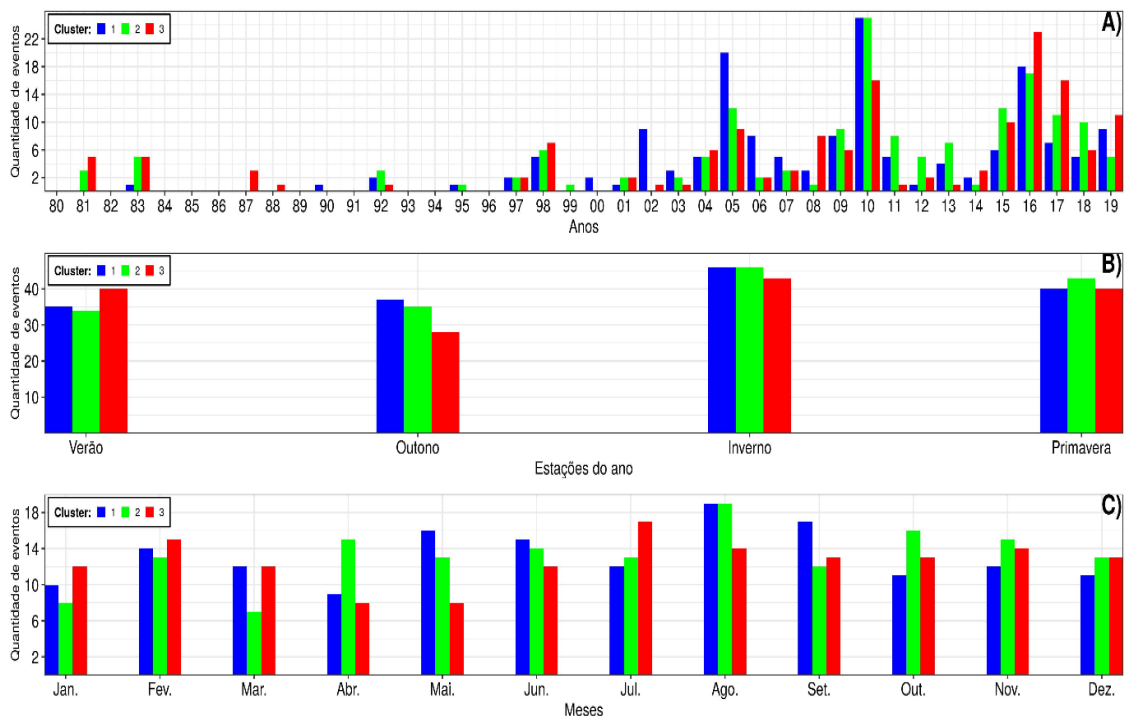


Figura 3. Ocorrência A) anual, B) sazonal, e C) mensal das ondas de calor registradas no estado do Pará.

Na Figura 4 é apresentada a frequência, com variabilidade semelhante ao observado na ocorrência. Nota-se na escala anual (Figura 4A) que o mesmo número de eventos não implica no número de dias em OC, pois em 2010 os grupos 1 e 2 apresentaram o mesmo número de registros, mas no cluster 2 a frequência anual foi 30 dias maior do que no cluster 1, outra diferença observada é em 2016 que o grupo 3 apresenta mais registros que os demais, entretanto a frequência foi

2 dias maior no grupo 1. O que aponta que mesmo que a ocorrência e frequência apresente semelhanças na variabilidade interanual, diferenças podem ser observadas principalmente em anos com alta ocorrência das OC (Perkins et al., 2012).

A partir da Figura 4B é possível verificar que para o cluster 1, a frequência foi maior no inverno (192 dias), seguido do verão (172 dias) que

foi a estação que apresentou a menor ocorrência (Figura 3B), no outono foram observados 160 dias e 143 dias na primavera. Para o 2º grupo é observado o máximo de 206 dias no inverno, seguido do verão com 196 dias, primavera 176 dias e o outono 144 dias. O 3º grupo apresentou o maior registro (225 dias) no verão, e o menor de 134 dias no outono, com 198 dias e 181 dias observados na primavera e inverno, respectivamente. De maneira geral, é no primeiro semestre que se tem a maior frequência, sugerindo que os eventos sejam mais prolongados, quando comparado com as estações do 2º semestre do ano.

A frequência mensal (Figura 4C) mostra elevada variabilidade tanto entre os meses quanto

entre os grupos, com os máximos e mínimos ocorrendo em diferentes meses para os três grupos. A maior similaridade entre os grupos 1 e 2 foi observada em junho, em junho houve uma forte similaridade entre os três grupos com variação de apenas 1 dia. A maior diferença de 42 dias foi vista em março entre os clusters 2 e 3. O que comprova a diferença espacial no número de dias em ondas de calor no estado do Pará, que pode estar relacionado com as diferenças entre as características climáticas dos municípios que compõem os clusters, carretados por fatores como latitude, longitude, topografia, relevo, e proximidade de corpos d'água.

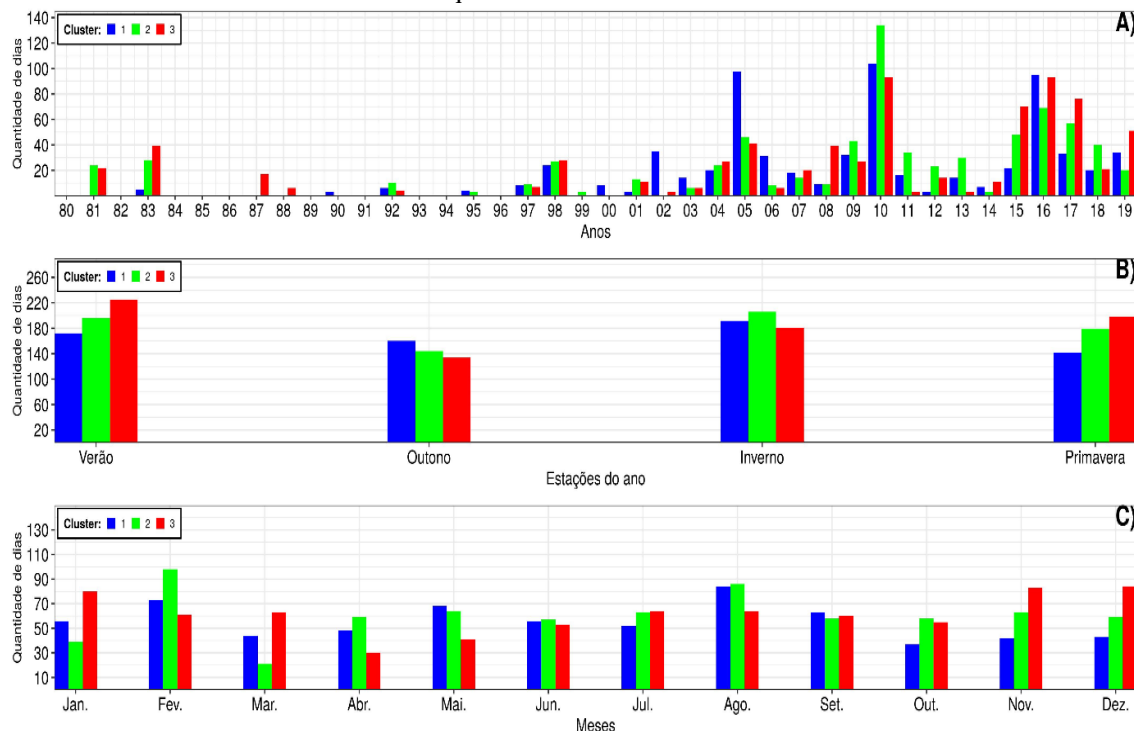


Figura 4. Frequência A) anual, B) sazonal, e C) mensal das ondas de calor registradas no estado do Pará

O Comportamento da duração média é apresentado na Figura 5. Analisando a escala anual (Figura 5A), o cluster 1 apresenta média de 3,9 dias com elevada variabilidade durante todo o período, sendo maior entre 2007 e 2015, com a duração mínima de 3 dias observada em 1900, 1992, 2001, 2008 e 2012, os máximos observados em 1980 (5 dias) e 2016 (5,3 dias). No cluster 2 a duração mínima foi observada em 1995, 1999, 2003, e 2014, com os maiores registros de 8 e 9 dias, observados em 1981 e 2008, e a média deste grupo foi 4,3 dias. No 3º cluster a média foi de 4,8 dias, com o máximo observado em 1983 (7,8 dias), com os eventos com duração de 3 dias observados em

2002, 2006, 2011 e 2013. Constatando que variabilidade temporal é observada em todos os grupos, com o 3º cluster apresentando a maior média.

A partir da análise sazonal (Figura 5B), verificou-se que o cluster 1 é o que apresenta a maior média no verão (4,9 dias) e a menor na primavera (3,5 dias) com elevada variabilidade temporal em todos os grupos, no cluster 2 os eventos têm duração maior no verão (5,8 dias) e no inverno (4,5 dias), e as menores na primavera (4,2 dias) e outono (4,1). Para o grupo 3, no verão se tem a maior duração (5,2 dias), seguido da

primavera (4,9 dias), outono (4,8 dias) e inverno (4,2). Evidencia-se que é no verão que todos os grupos apresentam a maior duração média, com os menores valores todos acima de 3 dias diferindo entre os grupos.

Referente a escala mensal (Figura 5C), assim como nas demais escalas de tempo é observada variabilidade tanto entre os meses, quanto entre os grupos. No cluster 1 o máximo (5,6 dias) é observado em janeiro, e o mínimo (3,4 dias)

em outubro. No grupo 2 o máximo de 7,5 dias é visto em fevereiro e o mínimo de 3,0 dias em março, sendo esse o maior e menor valor observado dentre todos os meses. Já no 3º cluster se tem o máximo em janeiro (6,7 dias) e o mínimo em abril (3,7 dias). Os maiores valores para os 3 grupos ocorrem no primeiro trimestre do ano, com os mínimos apresentando maior diferença entre os grupos, o mesmo que foi observado na escala sazonal (Figura 5B).

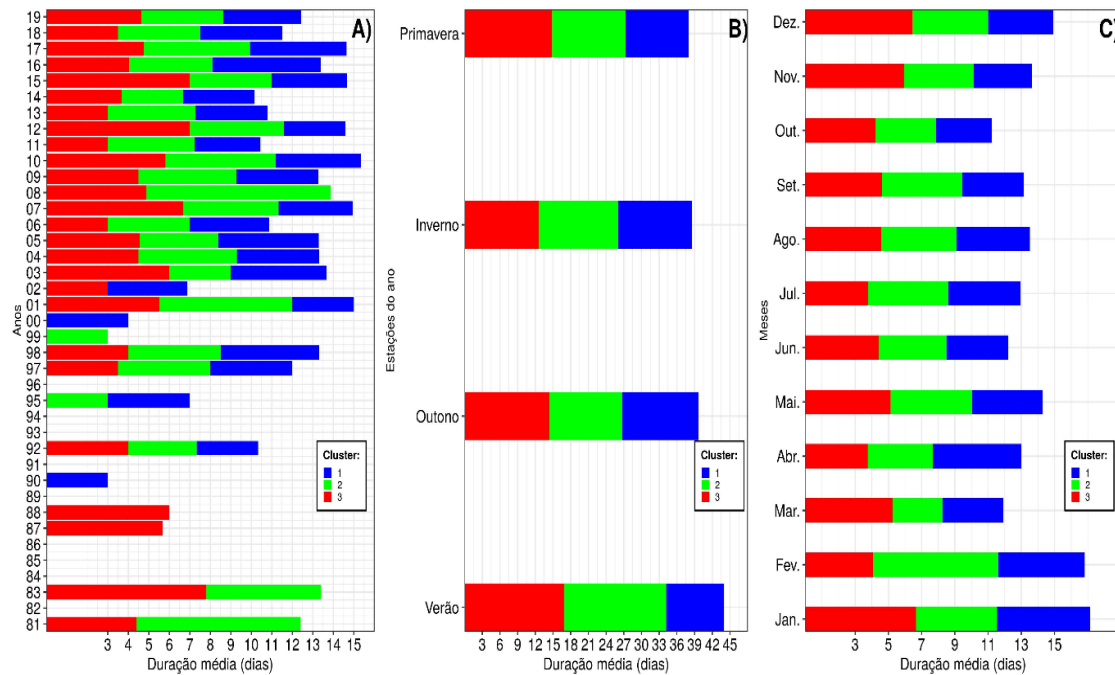


Figura 5. Duração média A) anual, B) sazonal, e C) mensal das ondas de calor registradas no estado do Pará.

Analisando a intensidade média anual (Figura 6A) o cluster 1 apresenta intensidade média anual de 4,9°C, o cluster 2 de 4,3°C e o 3º cluster de 5,3°C. Nota-se evidente mudança temporal no comportamento desta característica da onda de calor. Com os picos observados em 1981, 1983, 1992, 1995 e 1998 entre os clusters de forma uniforme, diferente do verificado nos anos subsequentes como, por exemplo, em 2001, 2007, 2012, 2015, e 2015. Destaca-se 1981, 1983, 1988 e 2007 que tiveram a ocorrência muito inferior ao ano de 2007, mas apresentaram maior intensidade, mostrando que anos com baixa ocorrência e frequência podem apresentar alta intensidade.

A partir da Figura 6B a análise sazonal revela que os eventos têm a maior intensidade no verão, reduzindo linearmente sua intensidade média nos 3 clusters entre as estações, mostrando

que mesmo que seja no inverno o maior número de ondas de calor (Figura 3B), elas são mais intensas no verão e outono, apontando que as condições atmosféricas associadas as OC nessas estações tendem a intensificar o fenômeno.

Mensalmente (Figura 6C) elevada variabilidade é vista entre dezembro e abril, enquanto comportamento com maior uniformidade é observado entre maio e outubro. Para os cluster 1 e 3 a maior intensidade média é observada em janeiro, enquanto que no cluster 2 os eventos são mais intensos em fevereiro, as menores intensidades são observadas em junho para os clusters 1 e 2, e em setembro para o 3º cluster. Lopes (2013) mostrou que no período de dezembro a abril se tem uma maior atuação de sistemas meteorológicos no estado como a ZCIT e a Alta da

Bolívia, o que pode favorecer a variabilidade das ondas de calor.

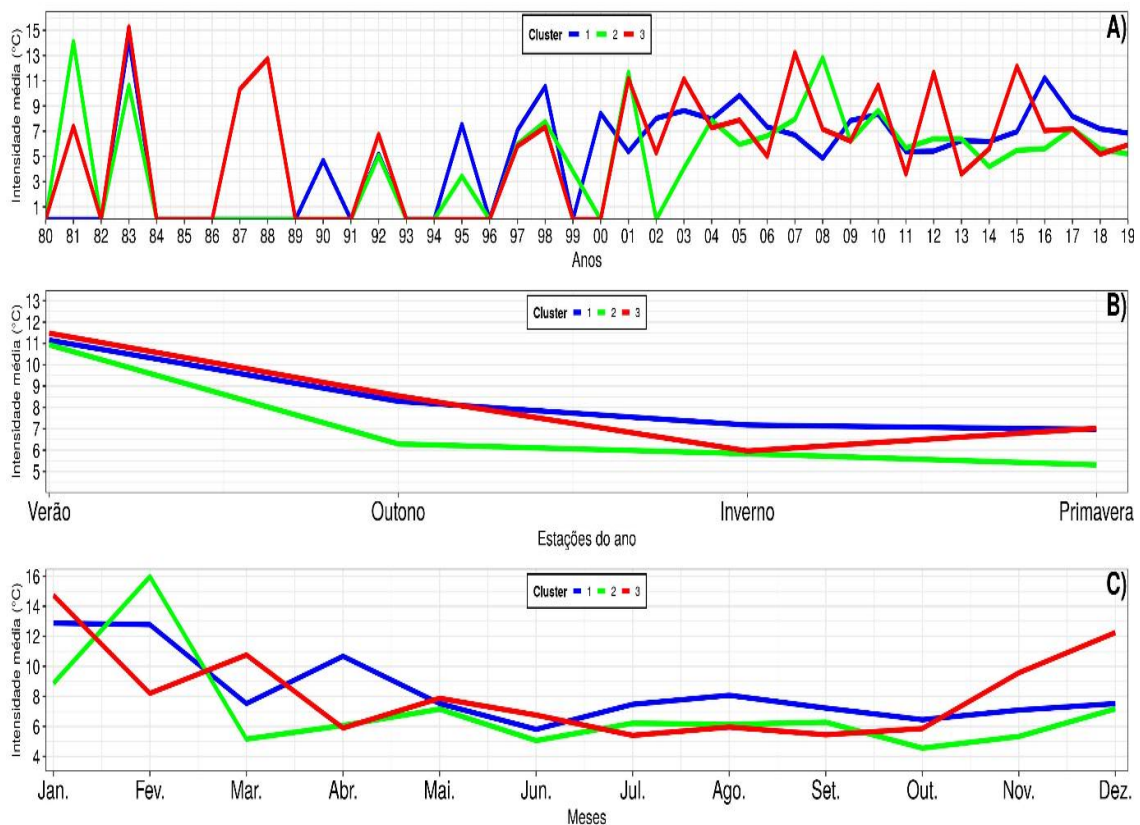


Figura 6. Intensidade média A) anual, B) sazonal, e C) mensal das ondas de calor registradas no estado do Pará.

Na Figura 7 é apresentada a intensidade máxima média, onde é possível observar que na escala anual (Figura 7A) o comportamento interanual é diferente do observado na intensidade média. Foi em 2005, 2010 e 2015-2016 que foram observados os eventos de maior magnitude das OC, os quais também são os anos que registraram as três últimas maiores secas na região amazônica e ocasionaram diversos danos à saúde da população dessa região (Gomes et al., 2018). De acordo com Kong et al. (2020), durante episódios de secas pode-se esperar eventos de ondas de calor mais severos, sugerindo que durante os anos mencionados a intensidade máxima pode ter sido maior.

Sazonalmente (Figura 7B) é observado que para o cluster 1 e 2 a maior intensidade foi no verão, já no cluster 3 esse máximo é observado no outono, enquanto a menor magnitude para o cluster

3 é observado no inverno, e na primavera para os outros dois clusters. Mostrando que mesmo que se tenha um número maior de eventos no inverno, os episódios mais intensos são vistos em outras estações do ano, o que realça a importância de analisar distintas características das OC.

No comportamento mensal (Figura 7C) é possível observar que o máximo observado no verão para o cluster 1 ocorreu em janeiro de 2005, enquanto os máximos dos clusters 2 e 3 foi em fevereiro e março de 2010, respectivamente. De acordo com Panisset et al. (2018), tanto em 2005 quanto em 2010 a temperatura do ar no estado do Pará foi muito acima do esperado, condição que colaborou com os máximos de intensidade observados. No outono e primavera se tem registros entre 8°C e 30°C que segundo Díaz et al. (2006) já são suficientemente elevados para prejudicar a saúde humana

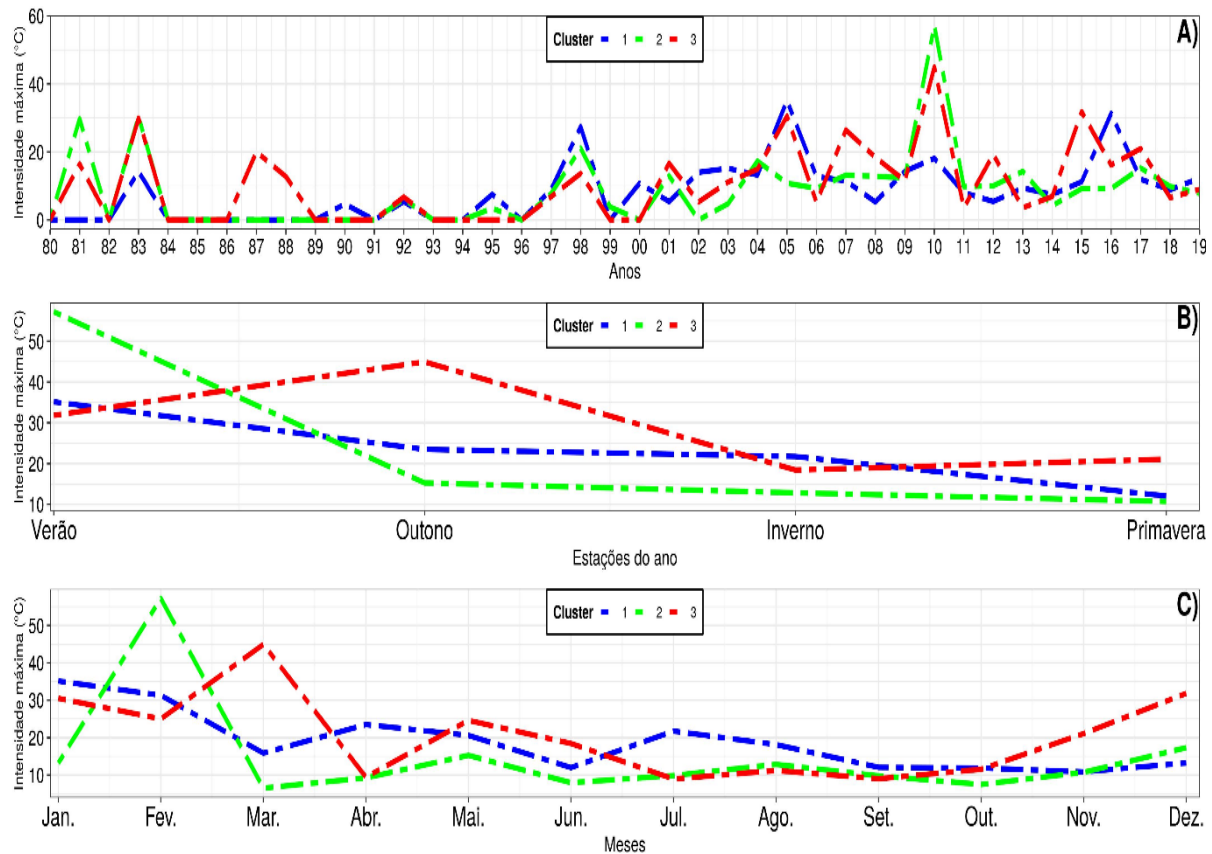


Figura 7. Intensidade máxima média A) anual, B) sazonal, e C) mensal das ondas de calor registradas no estado do Pará.

A severidade das ondas de calor baseada na duração, considerando 3 níveis, está contida na Figura 8. Anualmente (Figura 8A) no 1º cluster, se teve o maior número de OC moderadas em 2005 e 2010, 6 anos com registros de OC graves, e eventos extremos vistos em 1998, 2005 e 2016. No cluster 2, ocorreram mais OC moderadas em 2010 e 2016, 13 anos com eventos graves, com OC extremas em 1981, 1983, e 2010. O 3º cluster também apresentou o maior número de OC moderadas em 2010 e 2016, 10 anos com OC graves, e os anos de 1983, 2005, 2007, 2008, 2010, 2012, 2015, e 2017 com registros de OC extremas. Mostrando que no Pará os eventos extremos possuem baixa ocorrência, conforme foi observado em capitais brasileiras por Geirinhas et al. (2018b).

Na perspectiva sazonal (Figura 8B), os eventos moderados foram maiores no inverno para o cluster 1, não foram observados OC graves na primavera no 2º cluster, no cluster 3 somente a primavera apresenta episódios extremos, com o máximo observado no cluster 3 no verão. Mensalmente (Figura 8C), os eventos moderados

apresentam comportamento semelhante entre os meses e os clusters, sem nenhum registro de OC graves em outubro no 2º cluster e episódios extremos só foram observados em fevereiro.

A Tabela 4 apresenta um comparativo das características das ondas de calor registradas nos 3 clusters. Os clusters 1 e 2 registraram o mesmo número de episódios de OC, enquanto o cluster 3 apresentou 7 eventos a menos, sendo esse o que apresentou a maior frequência, superior a 9,6% do cluster 1, e 1,8% do cluster 2. A duração também apresentou similaridades entre os grupos, com a mesma ordem entre os grupos do observado na frequência, a intensidade média entre os grupos 1 e 3 é semelhante, com diferença de $\sim 1,1^{\circ}\text{C}$ com o cluster 2, com o evento de maior intensidade observado neste grupo. No grau de severidade é possível observar que foram registrados mais eventos moderados no grupo 1º, grave para 2º e extremos no 3º. Permitindo observar que mesmos que se tenha mais eventos nos clusters 1 e 2, os observados no 3º cluster apresentam a maior duração média, e o maior número de OC extremos

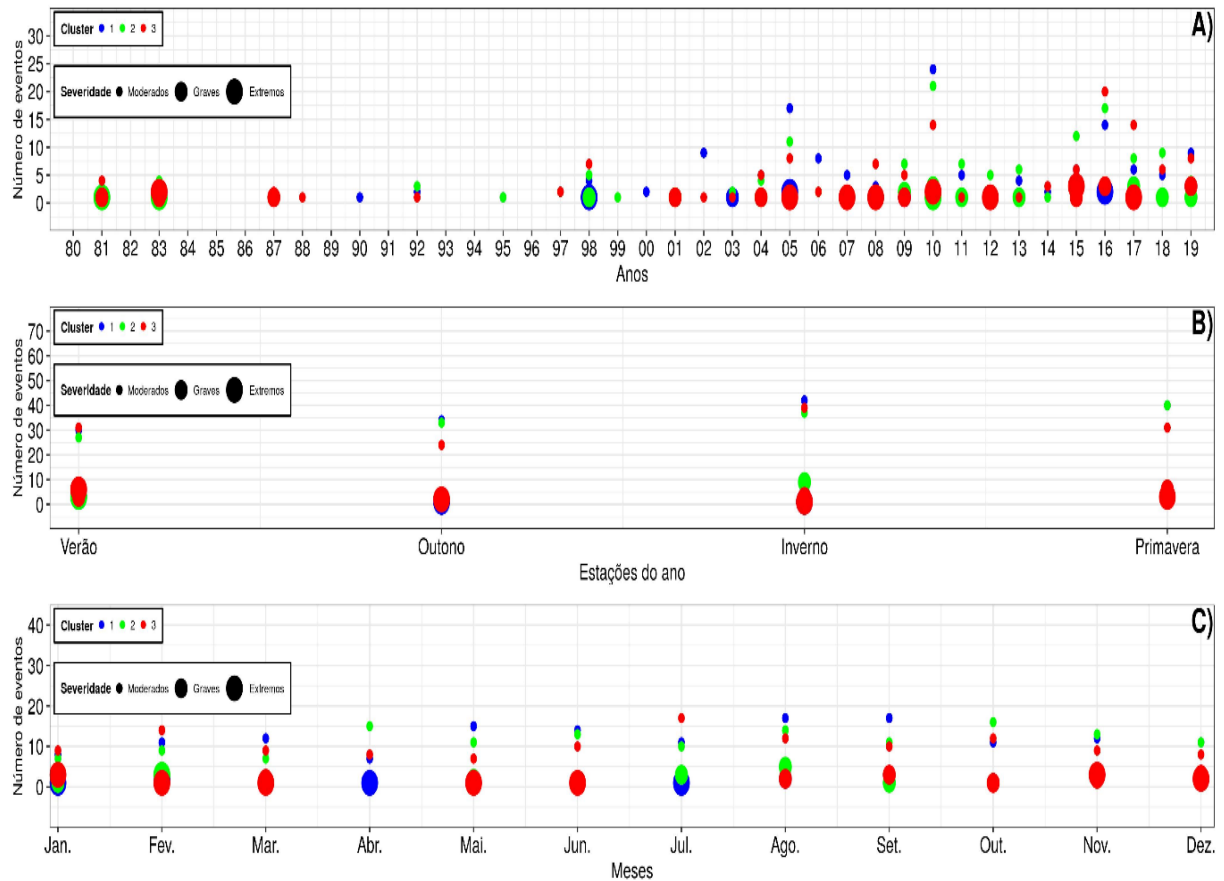


Figura 8. Severidade A) anual, B) sazonal, e C) mensal das ondas de calor registradas no estado do Pará

Tabela 4. Comparativo geral das características das ondas de calor registradas no estado do Pará.

Característica		Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Ocorrência		158	158	151
Frequência		667	725	738
Duração média		4,2	4,6	4,9
Intensidade média		8,3	6,9	8,2
Intensidade máxima		35,1	57,2	44,9
Severidade	Moderadas	146	137	125
	Graves	7	18	14
	Extremas	5	3	12

A Tabela 5 apresenta o resultado do teste t de Student, onde não foram encontradas diferenças significativas entre as médias das 6 características entre os 3 clusters, sugerindo que de maneira geral o comportamento dessas características é similar mesmo em regiões com diferente comportamento

da temperatura máxima do ar, o que revela que no estado do Pará as ondas de calor apresentam similaridade espacial no comportamento médio, mesmo que sejam observadas variações entre os grupos e entre as características

Tabela 5. Teste t de Student do comparativo das características das ondas de calor observadas em 3 grupos homogêneos de temperatura máxima do ar.

Característica anual	Cluster 1 x Cluster 2	Cluster 1 x Cluster 3	Cluster 2 x Cluster 3
Ocorrência	1	0,8875	0,8850
Frequência	0,8029	0,7587	0,9558
Duração média	0,5004	0,2663	0,6897
Intensidade média	0,5452	0,6778	0,3317
Intensidade máxima	0,8864	0,3802	0,5088
Severidade anual	Moderados	0,8412	0,6305
	Graves	0,0582	0,2030
	Extremos	0,5564	0,1860

Os resultados indicam que apesar da variabilidade observada entre os clusters, o teste t de Student mostra que o comportamento médio é semelhante para todas as características analisadas, concordando com Bitencourt et al. (2019), que observaram similaridade espacial principalmente na duração e intensidade média das OC registradas no estado do Pará. Geirinhas et al. (2018b) apontam que os episódios de OC do Brasil estão ligados ao deslocamento anual da Zona de Convergência Intertropical, sistema meteorológico que causa segundo Reboita et al. (2010) e Teodoro et al. (2019) expressiva influência em todo o estado, o que pode justificar a similaridade no comportamento médio observada pelo teste t.

Geirinhas et al. (2018) mostram que as OC no Brasil apresentam elevada variabilidade temporal, principalmente na ocorrência e frequência, que ocorre devido aos diversos processos dinâmicos e termodinâmicos na atmosfera que favorecem ou inibem os eventos de OC. O que foi observado nos presentes resultados principalmente na escala anual para os 3 clusters, corroborando também com estudos realizados em outros países (Rusticucci et al., 2016; Mandú et al., 2020; Royé et al., 2020; Moraes et al., 2022).

Bitencourt et al. (2016) apontam que no Brasil as OC ocorrem predominantemente na primavera e no verão, difere do observado no

presente estudo, com todas as estações apresentando elevado número de eventos. Boeck et al. (2010) afirmam que é necessário caracterizar as OC em todas as estações, uma vez os impactos causados por elas podem ser diferentes dentre estas estações. A predominância na ocorrência e frequência no inverno, também foi observada em outros estudos conduzidos no país por Reis et al. (2019) e Silveira et al. (2019), indicando que os sistemas meteorológicos atuantes no Brasil na estação de inverno favorecem um maior número de OC. Steffen et al. (2014) assinalam que a umidade reativa do ar favorece eventos de OC mais persistentes e intensos, corroborando com o observado nos presentes resultados, uma vez que é no verão e outono que se tem os maiores valores de umidade relativa do ar no estados, estações que apresentaram a maior duração, intensidade média e máxima.

Nos anos de 1983, 1998, 2015, e 2016 foram registradas a ocorrência do El Niño Oscilação Sul, evento climático extremo que na sua fase quente (El Niño) favorece a ocorrência de eventos de OC (Firpo et al., 2012; Wu et al., 2012; Naveena et al., 2021). Condição que foi observada nos presentes resultados com um maior número de eventos, que apresentaram alta durabilidade e intensidade. Em 2005 e 2010 também foi observado esse aumento que foram anos de seca no estado, que segundo Kong et al., (2020) e Geirinhas et al. (2021) resulta em um aumento de 2 a 4 vezes na ocorrência e intensidade das OC, mostrando que em períodos de estiagem ocorre um acréscimo no número de ondas de calor.

O comportamento mensal, permitiu observar que todos os meses do ano estão suscetíveis a eventos com diferentes graus de duração, intensidade e severidade. Meehl e Tebaldi (2004), apontam que, condições de céu claro e baixos valores de velocidade do vento são os principais mecanismos dinâmicos que favorecem as OC. Geirinhas et al. (2018) também observaram em diversas capitais do Brasil esse comportamento. Esses autores salientam a necessidade de abordagens que visem analisar como esses eventos impactam nos diversos segmentos da sociedade considerando diferentes meses. Os resultados do presente estudo por sua vez podem colaborar com essa implementação no estado do Pará.

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar climatologicamente as ondas de calor no estado do Pará para três escalas temporais distintas. O uso dos índices CTX90pct e GDE

serviram como limiares para identificar as principais características das ondas de calor no período de estudo, onde se constatou semelhança espacial no comportamento médio, variabilidade temporal e espacial dentre as características, principalmente na frequência e intensidade máxima.

Foram registrados 467 eventos de ondas de calor no estado, com duração média de 4,6 dias, e intensidade média de 7,8°C, com os modos de variabilidade principalmente interanual coerentes com estudos realizados no Brasil e em outros países. O trabalho ainda evidenciou que em anos onde foram registradas secas e El Niño na região, o número de OC foi consideravelmente maior, indicando que esses dois eventos climáticos extremos possuem impacto direto no estado. Por fim, vale ressaltar que esse é um dos primeiros estudos voltados ao estado do Pará, onde foi abordado de forma geral os principais aspectos do fenômeno mostrando suas principais características e evolução temporal durante os últimos 40 anos.

A necessidade de estudos posteriores voltados ao entendimento das ondas de calor é de fundamental importância para o desenvolvimento de políticas públicas capazes de minimizar e evitar os impactos a fim de garantir uma maior qualidade de vida da população. Esse estudo ainda instiga a necessidade de pesquisas focadas em municípios paraenses de forma individual, a fim de fornecer subsídios para o governo municipal, assim como estudos para diferentes estados brasileiros que visem caracterizar o fenômeno.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de mestrado. Os autores agradecem ao Instituto de Engenharia e Geociências (IEG) da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) e ao grupo de pesquisa Ciências Atmosféricas na Amazônia.

Referências

- Abe, S., Ozawa, M., Kawata, Y. 2019. Science of Societal Safety: Living at Times of Risks and Disasters. California, Springer Nature, 244p
- Aguila, L. S. H., da Costa, V. S., Vasques, S. R., da Silva, S. M., Vieira, P. A., Sinnemann, C., Alves, B. R. S. 2020. Efeito do sistema de cultivo e arranjo de plantas de soja sobre a produtividade de cultivar adaptada ao ambiente

- de Terras Baixas de clima temperado. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(3): 2571-2584.
- Alves, L. E. R., Gomes, H. B. 2020. Validação da Imputação Múltipla via Predictive Mean Matching para Preenchimento de Falhas nos Dados Pluviométricos da Bacia do Médio São Francisco. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 43(1): 199–206.
- Ambrizzi, T. 2014. Variabilidade e mudança no clima: passado, presente e futuro. *Mudanças climáticas: do global ao local*. In: Philippi Jr., A. (ed.). *Mudanças climáticas: do global ao local*. Editora Manole, p. 1-38.
- Araújo, G. R. G., Silva, C. M. S. E., Silva, A. G. 2019. Evaluation of cumulus parametrizations Emanuel and Grell of regional climate model RegCM4: Simulating precipitation and surface temperature over north eastern of Brazil during the southern Autumn. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(1): 231–240.
- Asner, G. P. & Alencar, A. 2010. Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective. *New Phytologist*, 187 (3): 569–578.
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Maia, P. A., Amorim, F. T. 2016. Frequência, Duração, Abrangência Espacial e Intensidadedas Ondas de Calor no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4), 506-517.
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Franke, A. E., Silveira, R. B., & Alves, M. P. 2020. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. *International Journal of Climatology*, 40(4): 2464-2478.
- Boeck, H. J., Dreesen, F. E., Janssens, I. A., Nijs, I. 2010. Climatic characteristics of heat waves and their simulation in plant experiments. *Global Change Biology*, 16(7): 1992-2000.
- Bose-O'Reilly, S., Daanen, H., Deering, K., Gerrett, N., Huynen, M. M. T. E., Lee, J., Nowak, D. 2021. COVID-19 and heat waves: new challenges for healthcare systems. *Environmental Research*, 198, 111153.
- Díaz, J., García-Herrera, R., Trigo, R. M.; Linares, C., Valente, M. A., De Miguel, J. M., Hernández, E. 2006. The impact of the summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it? *International Journal of Biometeorology*, 50(3): 159-166.
- Diniz, F. R., Gonçalves, F. L. T., Sheridan, S. 2020. Heat wave and elderly mortality: Historical analysis and future projection for metropolitan region of São Paulo, Brazil. *Atmosphere*, 11(9): 933-946.
- Ferreira Filho, D. F., Lira, B. R. P., Crispim, D. L., Pessoa, F. C. L., Fernandes, L. L. 2020. Análise pluviométrica no estado do Pará: comparação entre dados obtidos de estações pluviométricas e do satélite GPCC. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26 (1): 541-560.
- Ferstl, F., Kanzler, M., Rautenhaus, M., Westermann, R. 2016. Time-hierarchical clustering and visualization of weather forecast ensembles. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(1): 831-840.
- Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Llanillo, P. J., Jorquera, J., Sepulveda, E., Torres, G. 2019. Observations and projections of heat waves in South America. *Scientific reports*, 9(1): 1-15.
- Firpo, M. Â. F., Sansigolo, C. A., Assis, S. V. 2012. Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1): 95–106.
- Fisch, G., Marengo, J. A., Nobre, C. A. 1998. The climate of Amazonia - a review. *Acta Amazônica*, 28(2): 101–126.
- Geirinhas, J. L., Trigo, R. M., Libonati, R., Coelho, C. A., Palmeira, A. C. 2017. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4): 1760-1776.
- Geirinhas, J. L., Trigo, R. M., Libonati, R., Peres, L. D. F. 2019. Caracterização Climática de Ondas de Calor no Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(3): 333-350.
- Geirinhas, J. L., Trigo, R. M., Libonati, R., Castro, L. C., Sousa, P. M., Coelho, C. A., Peres, L. F., Mônica, A. F. M. 2019. Characterizing the atmospheric conditions during the 2010 heatwave in Rio de Janeiro marked by excessive mortality rates. *Science of The Total Environment*, 650(1): 796-808.
- Geirinhas, J. L., Russo, A., Libonati, R., Sousa, P. M., Miralles, D. G., Trigo, R. M. 2021. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, 16(3): 034036.
- Gerrard, M. B. 2017. Heat Waves: Legal Adaptation to the Most Lethal Climate Disaster (So Far). *UALR L. Rev.*, 40(1): 515-544.
- Gomes, A. C. S., Costa, G. B., Silva, J. T., Coutinho, M. D. L., Silva Costa, M., Fitzjarrald, D. R. 2018. Seca e a saúde das populações residentes em regiões da Amazônia brasileira

- nos anos de 2005, 2010 e 2015. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23(1): 290-306.
- Guo, E., Wang, Y., Bao, Y., Sun, Z., Bao, Y., Quan, L. 2020. Spatiotemporal variation of heat and cold waves and their potential relation with the large-scale atmospheric circulation across Inner Mongolia, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(1): 643-659.
- Horton, N. J., Lipsitz, S. R. 2001. Multiple imputation in practice: Comparison of software packages for regression models with missing variables. *American Statistician*, 55(3): 244–254.
- IBGE. 2020. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas>. Acesso: 28 de mar. de 2020.
- Jacondino, W. D.; Nascimento, A. L. D. S.; Nunes, A. B., Conrado, H. 2019. Análise sinótica do mês de abril de 2018 na região Sul do Brasil: episódio de calor extremo. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25(1): 1982-203. Disponível: 10.5380/abclima.v25i0.60992. Acesso: 20 abr. 2020.
- Jiménez-Muñoz, J. C.; Mattar, C.; Barichivich, J.; Santamaría-Artigas, A.; Takahashi, K.; Malhi, Y.; Sobrino, J. A. & Van Der Schrier, G. 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific reports*, 6(1), 33130.
- Knowlton, K., Rotkin-Ellman, M., Geballe, L., Max, W., Solomon, G. M. 2011. Six climate change-related events in the United States accounted for about \$14 billion in lost lives and health costs. *Health Affairs*, 30(11): 2167-2176.
- Kong, Q., Guerreiro, S. B., Blenkinsop, S., Li, X. F., Fowler, H. J. 2020. Increases in summertime concurrent drought and heatwave in Eastern China. *Weather and Climate Extremes*, 28, 100242.
- Lapola, D. M., Braga, D. R., Di Giulio, G. M., Torres, R. R., Vasconcellos, M. P. 2019. Heat stress vulnerability and risk at the (super) local scale in six Brazilian capitals. *Climatic Change*, 154(3): 477-492.
- Levine, R. A. 2000. Statistical methods in the atmospheric sciences. *Journal of the American Statistical Association*, 95(449): 344-344.
- Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., Van der Heijden, G. M., Nepstad, D. 2011. The 2010 amazon drought. *Science*, 331(6017): 554-554.
- Lopes, M. N. G. 2013. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. *Revista Brasileira de Climatologia*, 12(1): 84-102.
- Machado, J. P., Blank, D. M. P., Zonta, J. H., Justino, F. B. 2010. Comportamento da precipitação e da temperatura no Rio Grande do Sul baseado na análise de agrupamento. *Ciência e Natura*, 32(1): 49-63.
- Mandú, T. B., Gomes, A. C. D. S., Costa, G. B., Neves, T. T. D. A. T. 2020. Avaliação de tendência nas ondas de calor registradas em Manaus/AM, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27.
- Mandú, T. B., da Silva Nascimento, A. L., Jacondino, W. D., & Gomes, A. C. D. S. 2021. Impacto das Ondas de Calor no Conforto Térmico Humano na Região da Floresta Nacional do Tapajós, Oeste do Pará. *Biodiversidade Brasileira-BioBrasil*, 11(4): 98-108.
- Mahadevia, D., Pathak, M., Bhatia, N., Patel, S. 2020. Climate Change, Heat Waves and Thermal Comfort—Reflections on Housing Policy in India. *Environment and Urbanization ASIA*, 11(1): 29-50.
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Barreto, N., Cunha, A. P., Ramos, A. M., Skansi, M., Salinas, R. 2022. The heat wave of October 2020 in central South America. *International Journal of Climatology*, 42(4): 2281-2298.
- Meehl, G. A., Tebaldi, C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686): 994–997.
- Moraes, S. L., Almendra, R., Barrozo, L. V. 2022. Impact of heat waves and cold spells on cause-specific mortality in the city of São Paulo, Brazil. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 239, 113861.
- Naveena, N., Satyanarayana, G. C., Rao, K. K., Umakanth, N., Srinivas, D. 2021. Heat wave characteristics over India during ENSO events. *Journal of Earth System Science*, 130(3): 1-16.
- Nicholls, L., Strengers, Y. 2018. Heatwaves, cooling and young children at home: Integrating energy and health objectives. *Energy research & social science*, 39(1): 1-9.
- Oliveira, P. T., Santos E Silva, C. M., Lima, K. C. 2017. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1–2): 77–90.
- Orlov, A., Sillmann, J., Aaheim, A., Aunan, K., Bruin, K. 2019. Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker

- Productivity: A Case Study of Europe. *Economics of Disasters and Climate Change*, 3(3): 191-211.
- Panisset, J. S., Libonati, R., Gouveia, C. M. P., Machado-Silva, F., França, D. A., França, J. R. A., Peres, L. F. 2018. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology*, 38(2): 1096-1104.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5): 1633-1644.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V. 2013. On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13): 4500-4517.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V., Nairn, J. R. 2012. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophysical Research Letters*, 39(20): 1-5.
- Pezza, A. B., Van Rensch, P., Cai, W. 2012. Severe heat waves in Southern Australia: Synoptic climatology and large-scale connections. *Climate Dynamics*, 38(1-2): 209-224.
- Piticar, A., Cheval, S., Frighenciu, M. 2019). A review of recent studies on heat wave definitions, mechanisms, changes, and impact on mortality. *Forum geografic*, 8(2): 109-119.
- Raei, E., Nikoo, M. R., AghaKouchak, A., Mazdizasni, O., Sadegh, M. 2018. GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Scientific data*, 5(1): 1-15.
- Rebetez, M., Reinhard, M. 2008. Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91(1-4): 27-34.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. D., Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista brasileira de Meteorologia*, 25(2): 185-204.
- Reis, N. C. S., Boiaski, N. T., Ferraz, S. E. T. 2019. Characterization and spatial coverage of heatwaves in subtropical Brazil. *Atmosphere*, 10(5): 1-15.
- Robine, J. M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J. P., Herrmann, F. R. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes rendus biologiques*, 331(2): 171-178.
- Robinson, P. J. 2001. On the definition of a heat wave. *Journal of applied Meteorology*, 40(4): 762-775.
- Rousseeuw, P. J. 1987. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20(1): 53-65.
- Royé, D., Codesido, R., Tobías, A., Taracido, M. 2020. Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain. *Environmental Research*, 182(1): 109027.
- Rusticucci, M., Kysely, J., Almeida, G., Lhotka, O. 2016. Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4): 679-689.
- Rusticucci, M.; Barrucand, M., Collazo, S. 2017. Temperature extremes in the Argentina central region and their monthly relationship with the mean circulation and ENSO phases. *International Journal of Climatology*, 37(6): 3003-3017.
- Salviano, M. F., Groppo, J. D., Pellegrino, G. Q. 2016. Trend's analysis of precipitation and temperature data in Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(1): 64-73.
- Santos, C. A. C., Oliveira, V. G. 2017. Trends in Extreme Climate Indices for Pará State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32 (1): 13-24.
- Silveira, R. B., Alves, M. P., Barreiro, M., Bitencourt, D. P. 2019. Ondas de calor nas capitais do Sul do Brasil e Montevideu-Uruguaí. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(4): 1259-1276.
- Szymczak, R. K., Marosz, M., Grzywacz, T., Sawicka, M., Naczyk, M. 2021. Death zone weather extremes mountaineers have experienced in successful ascents. *Frontiers in Physiology*, 12: 998-1009.
- Sugahara, S., Da Rocha, R. P., Ynoue, R. Y., Silveira, R. B. 2012. Homogeneity assessment of a station climate series (1933-2005) in the Metropolitan Area of São Paulo: instruments change and urbanization effects. *Theoretical and applied climatology*, 107(3-4): 361-374.
- Sutanto, S. J., Vitolo, C., Napoli, C., D'andrea, M., Lanen, H. A. 2020. Heatwaves, droughts, and fires: Exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale. *Environment international*, 134(1): 1-10.
- Steffen, W., Hughes, L., Perkins, S. 2014. Heatwaves: hotter, longer, more often. *Climate Council of Australia*.
- Teodoro, T. A., Reboita, M. S., Escobar, G. C. J. 2019. Caracterização da Banda Dupla da Zona

- de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(2): 282-298.
- Wu, Z., Lin, H., Li, J., Jiang, Z., Ma, T. 2012. Heat wave frequency variability over North America: Two distinct leading modes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D2): 1-10.
- Xia, Y., Li, Y., Guan, D., Tinoco, D. M., Xia, J., Yan, Z., Yang, J., Liu, Q., Huo, H. 2018. Assessment of the economic impacts of heat waves: a case study of Nanjing, China. *Journal of Cleaner Production*, 1711(1): 811-819.
- Zeng, N., Yoon, J. H., Marengo, J. A., Subramaniam, A., Nobre, C. A., Mariotti, A. & Neelin, J. D. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environmental Research Letters*, 3(1): 014002.
- Zhao, Q., Li, S., Coelho, M. S., Saldiva, P. H., Hu, K., Huxley, R. R., Abramson, M. J., Guo, Y. 2019. The association between heatwaves and risk of hospitalization in Brazil: A nationwide time series study between 2000 and 2015. *PLoS medicine*, 16(2), e100275