

COMPARAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS ONDAS DE CALOR, NOS DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS, ENTRE OS ANOS DE 1991 A 2020

Karime Pechutti Fante¹

Leonardo Brandão do Prado²

INTRODUÇÃO

Os eventos de ondas de calor são caracterizados como anomalias térmicas com duração temporal persistente (Valverde e Rosa, 2023; Fante, 2018; Boni et.al. 2023). Em um contexto majoritariamente tropical, como no Brasil, o implemento das temperaturas pode gerar situações de maior desconforto térmico humano, impactos na saúde, incremento nos riscos de incêndios, redução na produção agrícola, aumento na demanda por eletricidade e água (Valverde e Rosa, 2023, p. 3783).

Em referência às ondas de calor, comumente tal manifestação é causada pela atuação de sistemas atmosféricos de alta pressão que permanecem ativos, dificultando o fluxo de massas de ar extratropicais, reduzindo a formação de nuvens e, conseqüentemente, ampliando a recepção de radiação solar na superfície terrestre. Tal fenômeno ganha maiores proporções quando processos físicos agem conjuntamente e contribuem para a gênese e permanência das ondas de calor, ampliando seu nível de severidade e espaço temporal de atuação.

De acordo com Perkins-Kirkpatrick *et. al.* (2016, p.104) as ondas de calor podem ser modificadas a partir da amplificação local causada pelos efeitos do clima urbano e ilhas de calor; atuações sinóticas como bloqueios nas ondas de Rossby e de sistemas anticiclônicos de alta pressão; condições prévias ao evento, como períodos de secas; alterações nos eventos de modulação de larga-escala como o ENOS (El Niño e Oscilação Sul) e Dipolo do Oceano Índico, entre outros.

Apesar de bem conhecido, este fenômeno não pode ser compreendido de maneira universal. Cada região geográfica, de acordo com sua manifestação atmosférica característica e fatores geográficos do clima associados, corresponde a essas anomalias de modo singular. Geirinhas *et. al.* (2017, p. 1761) esclarece os processos de gênese e agravamento das ondas de calor no Brasil ocorrem devido a alterações nos padrões

¹ Professora doutora, Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Rio Claro-SP, karime.fante@unesp.br.

² Doutorando em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), leonardobprado@gmail.com.

normais de sistemas atmosféricos que atuam nas diferentes faixas latitudinais. Segundo os autores, nas regiões equatoriais os episódios de calor e seca estão associados à migração ao norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), associados ao aquecimento anormal da temperatura superficial marítima sobre o Oceano Atlântico Tropical Norte e também com a fase quente do fenômeno ENOS na região do Pacífico Equatorial; na região central do Brasil, esses padrões podem ser induzidos pela migração para oeste do Anticiclone do Atlântico Sul em associação às anomalias da temperatura superficial marítima sobre o Oceano Atlântico Sul; e, por fim, impactos gerados nas médias latitudes podem influenciar as condições do sul do Brasil ao estabelecer um padrão de circulação atmosférica em larga escala caracterizadas por anomalias quase estacionárias, de 500 hPa, que induzem o movimento de subsidência vertical da atmosfera (Geirinhas et. al., 2017, p. 1761).

No campo teórico, a identificação desses eventos extremos também não é consensual. Alguns autores defendem a conceituação de ondas de calor a partir da manifestação mais aguda das temperaturas, com elevados percentis, e pouca permanência temporal, como o trabalho proposto por Silveira (2014), em que uma onda de calor pode ser identificada a partir da permanência de 3 dias com temperaturas máximas acima do percentil 90; outros, entendem que o evento deve ser considerado quando os limiares de temperaturas máximas e mínimas atingem valores expressivos, superiores ao Percentil 90, e que, inclusive, pode ser percebido com a atuação de 2 dias consecutivos (Díaz, 2002); e, em outros casos, como a metodologia adotada nesta pesquisa, os eventos de calor podem ser assimilados a partir de períodos de longa duração, superiores a 6 dias, com temperaturas máximas acima do Percentil 90, como apontado pela Equipe de Especialistas em Detecção de Mudanças Climáticas e Índices - ETCCDI, associados a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e aplicado para diversas realidades climáticas como pode ser visto em (Cueto et. al., 2018; Gebrechorkos et. al., 2018; Parkins et. al., 2012).

Em um país de dimensão continental, como o Brasil, compreender os padrões atmosféricos críticos para a formação das ondas de calor se torna imprescindível para proteção social.

De acordo com Dubreuil et. al. (2018) atualmente o país conta com 8 tipos climáticos: Af, Am, As, Aw, Bsh, Cfa, Csa, Cwa, consideradas como “núcleos fortes”, além das áreas de transição, locais onde há grande diversidade climática. Este estudo foi a base para a definição dos locais a serem estudados nesta pesquisa. De acordo com

Dubreuil et. al. (2018), a identificação das regiões climáticas brasileiras, foi proposta a partir de uma atualização da classificação clássica proposta por Koppen (1900, 1901), pautada não apenas no dado médio de temperatura e precipitação de toda série, mas a partir da frequência dos tipos de tempo anuais, analisadas entre os anos de 1961 a 2015, para um conjunto de 208 estações e postos meteorológicos representativos da diversidade espacial e geográfica brasileira. Após essa definição, Dubreuil et. al. (2018) pôde definir espacialmente as regiões brasileiras que apresentaram em 50% dos anos, ou mais, a frequência de um único tipo climático (figura 01).

Considerando a proposta suscitada por Dubreuil et al (2018), o estudo tem como objetivo avaliar a frequência das ondas de calor nas regiões centrais de cada tipo climático, considerando as diferentes espacialidades geográficas e sinóticas, entre os anos de 1991 a 2020.

METODOLOGIA

Os dados diários de temperatura máxima utilizados na pesquisa foram obtidos junto ao banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a fim de avaliar a frequência das ondas de calor na última normal climatológica, período de 1991-2020, para cada tipo climático definido por Dubreuil et. al. (2018).

Definiram-se oito estações meteorológicas convencionais. Em todas as estações meteorológicas eleitas constatou-se mais de 50% dos anos analisados com um único tipo climático, os chamados “núcleos fortes”, como pode ser observado no quadro 01. As cidades escolhidas localizam-se em todas as macro regiões político-administrativas do país e apresentam características geográficas singulares (Figura 01).

Devido a descontinuidade nos registros dos dados de algumas estações foi necessário o preenchimento de falhas pautadas em três soluções. Para as falhas isoladas, de um único dia, foi realizado o preenchimento a partir da média do dia anterior e posterior, representada pela equação:
$$n = \frac{n_{-1} + n_{+1}}{2}$$

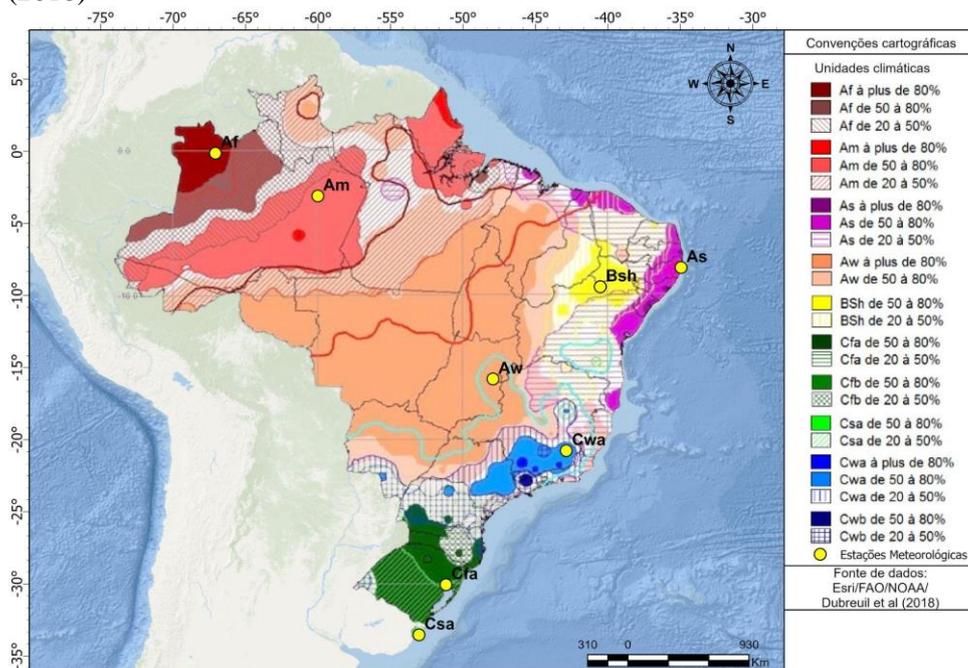
Quando falhas contínuas, com mais de 2 dias consecutivos foram encontradas, retornou-se ao banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e considerou-se as estações automáticas do mesmo município ou ponto de coleta. Caso ambas as estações disponíveis no local, convencional e automática, não registrassem dados para o mesmo período, optou-se pela terceira solução que foi o preenchimento de dados a partir de estações próximas que estivessem dentro do mesmo tipo climático

estabelecido por Dubreuil et. al. (2018) e acima de 50% de frequência para o tipo climático. As estações de apoio, para suplementação de dados, podem ser observadas no quadro 01.

Quadro 1. Informações sobre as estações meteorológicas estudadas na pesquisa.

Unidade Climática	Definição	Estação meteorológica	Código estação	Estação de apoio para suplementação de falhas
Af	Clima tropical sem estação seca	São Gabriel/AM	82331	Fonte Boa/AM
Am	Clima tropical de monção	Manaus/AM	82900	Manaus/AM
As	Clima tropical com verão seco	Recife/PE	83377	João Pessoa/PB
Aw	Clima tropical com inverno seco	Brasília/DF	82983	Brasília/DF
Bsh	Clima seco, semi árido, com baixa latitude e altitude	Petrolina/PE	83967	Petrolina/PE
Cfa	Clima subtropical úmido, sem estação seca, com verão quente	Porto Alegre/RS	83997	Porto Alegre/RS
Csa	Clima subtropical úmido, com verão seco e quente.	Santa Vitória do Palmar/RS	83642	Jaguarão/RS
Cwa	Clima subtropical úmido, com inverno seco e verão quente	Viçosa/MG	82106	Viçosa/MG

Figura 1 - Localização das cidades analisadas e os tipos climáticos do Brasil, a partir de Dubreuil et. al. (2018)



A partir do preenchimento das falhas, foi aplicado o índice *Warm Spell Duration Index (WSDI)*, um índice utilizado pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), agência do governo federal dos Estados Unidos. De acordo com a técnica, os eventos extremos podem ser identificados a partir da análise do Percentil 90, das temperaturas máximas diárias, para a série histórica de cada estação previamente definida. Na sequência verificou-se a permanência dos eventos extremos de calor, ao menos, 6 dias consecutivos, para a identificação das ondas de calor, como preconizado por Lobell et. al (2008), Ryden (2017) e Gebrechorkos et. al. (2018). Posteriormente foi realizada a contagem total e percentual das ondas de calor para as últimas 3 décadas 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020, para cada unidade climática pré-estabelecida.

Os resultados foram comparados têmporo-espacialmente, bem como a tendência linear da série dada a partir da técnica do método dos mínimos quadrados. De acordo com Lemma (1992, p.155) a equação da regressão linear método dos mínimos quadrados pode ser definida por:

$$y = \alpha + \beta x$$

Onde:

- $\alpha = \frac{\sum y}{n} - \beta \frac{\sum x}{n}$
- $\beta = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$
- x = período atual
- n = número de períodos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados identificados na análise temporal e comparação entre as 3 últimas décadas observou-se que na maior parte das 8 cidades analisadas constatou-se uma tendência de aumento nas ondas de calor. Verificou-se tendências expressivas estatisticamente, com a análise do R-quadrado, em Manaus (0,75), Recife (0,9592), Brasília (0,9098), Petrolina (0,9231) e Santa Vitória (1), indicando maior aumento da tendência nas ondas de calor. Nas cidades de São Gabriel (0,1904), Porto Alegre (0,1579) e Viçosa (0,3827) tal padrão não pôde ser verificado e, em observação aos resultados da técnica de regressão linear e estudo o R-quadrado. Nestas cidades houve tendências pouco expressivas no número de ondas de calor, especialmente pela diminuição dos eventos extremos na década de 2001-2010, em Porto Alegre e Viçosa, e pelo pico isolado, observado em São Gabriel, entre 2001-2010, comparado às demais décadas de estudo.

Em relação à frequência e ocorrências das ondas de calor observou-se que a cidade de Brasília foi a que mais presenciou eventos extremos. Dentre as demais, Brasília pôde

experienciar 54 ondas de calor, seguido das cidades de Manaus e Recife, ambas com 47 ondas. Os menores valores foram constatados na cidade de Santa Vitória do Palmar, ao sul do Brasil, com 21 ocorrências, e São Gabriel, localizado na região norte, com 23 ondas.

É interessante ressaltar que Santa Vitória se localiza no extremo meridional do país. Devido a sua localização os principais sistemas regionais atuantes tem origem extratropical e que, muitas vezes, aferem a localidade temperaturas mais amenas devido a distância do centro global de maior recepção solar e regiões próximas à linha do Equador.

São Gabriel, no entanto, encontra-se no outro oposto do Brasil. Situado em meio a Floresta Amazônica, com latitude $-0,1^{\circ}$ e longitude -67° o local é conhecido pela pouca amplitude térmica, ao longo do ano, e temperaturas elevadas, contudo, ao observar o resultado obtido percebe-se que foi um dos locais com menor presença de ondas de calor. Tal estudo merece maior aprofundamento, mas, segundo Geirinhas et. al. (2017, p. 1761), na região norte o processo de gênese das ondas de calor podem ser associados à migração ao norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Além disso, a localização em meio a Floresta Amazônica, induz a um acúmulo importante de umidade e consequente condensação das águas, formando nuvens que evitam a radiação direta e induzem a processos de precipitação em determinadas épocas do ano. Em complemento, a grande célula de circulação de Hadley, próximo à linha do Equador, possui por característica eventos de baixa pressão, inibindo a formação de sistemas persistentes de alta pressão (Ynoe et.al, 2017), como os que geram as ondas de calor.

Ao analisar as 3 últimas décadas verifica-se que os últimos anos, 2011-2020, foram os que mais ocorreram ondas de calor em 6, das 8 cidades analisadas. Para todas as cidades a expressiva frequência de ondas de calor na última década representa mais de 30% das ocorrências dos eventos extremos de calor, atingindo valores importantes de até 68,1% dos eventos registrados em Recife, e de 57,4% em Brasília. Este resultado demonstra não apenas a maior ocorrência dos eventos com temperaturas superiores ao Percentil 90, em todo o país, mas também a maior repetição de dias com temperaturas elevadas nos últimos anos, independente do clima ao qual se insere, e da região geográfica que se localiza. As únicas exceções foram identificadas em São Gabriel, que apresentou 69,6% das ocorrências entre 2001-2010, e, em Manaus, que teve o mesmo percentual de ondas de calor, 46,8%, nas duas décadas 2001-2010 e 2011-2020.

Ainda em referência às cidades de Recife e Brasília, que tiveram os maiores percentuais de ondas de calor na última década, se faz necessário ressaltar as condições geográficas em que estão inseridas. De acordo com Geirinhas et. al. (2017, p. 1761) um dos maiores precursores das ondas de calor ocorre pelo deslocamento à oeste do Centro de Alta Pressão do Atlântico Sul e isso pode estar representando a elevado número de ondas de calor em Recife, que se localiza na porção mais oriental comparado às demais cidades estudadas. Brasília, por sua vez, é uma cidade tipicamente continental, a condição locacional distante do litoral e proximidade da zona tropical impulsiona a ocorrência de dias quentes, persistentes, e resistentes à dissipação e a chegada de novos sistemas atmosféricos, gerando ondas de calor muitas vezes prolongadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ondas de calor constituem-se como um evento meteorológico extremo com potencial de desarranjos e impactos sociais e econômicos.

A partir desta pesquisa evidencia-se o aumento na frequência de dias com temperaturas elevadas e de ampla permanência durante a última normal climatológica (1991-2020). Diante de todas as cidades analisadas, em diferentes tipos climáticos, a última década foi a que presenciou o maior número de ondas de calor, com temperaturas máximas acima do Percentil 90.

Diante da realidade imposta para as cidades brasileiras, principalmente Brasília e Recife que totalizaram 54 e 47 ondas de calor respectivamente, novos e mais detalhados estudos precisam ser desenvolvidos compreendendo todo o país e como cada realidade socio-espacial estará vulnerável a eventos climáticos cada vez mais frequentes.

Palavras-chave: Ondas de calor, Tipos climáticos, eventos extremos, temperatura.

REFERÊNCIAS

BONI, Z.; BIENKOWSKA, Z.; CHWALCZYK, F.; JANCEWICZ, B. MARGINEAN, I.; SERRANO, P. Y. What is a heat(wave)? Na interdisciplinay perspective. *Climate Change*, set. 2023, 176:129

Characterizing extremes over Americas. Disponível em: <<https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/subseasonal/atlas/Tindices-html/WSDI-ts.html>>. Acesso em: 8 jul. 2024.

DIAZ, J.; JORDÁN, A.; GARCIA, R.; LÓPEZ, C.; ALBERDI, J.C.; HERNÁNDEZ, E. (et. al.). Heat waves in Madrid 1986-1997: effects on the health of the elderly. **Int. Arch. Occup. Environ Health**, 75, p. 163-170, 2002.

FANTE, K. P. **Eventos extremos de temperatura e seus impactos no conforto térmico humano**: estudo de caso em Presidente Prudente, Brasil, na perspectiva da Geografia do Clima. 2019, 327 f. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente/SP. [s.n].

GARCÍA-CUETO, O. R. et al. Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, n. 1-2, p. 775–790, 20 set. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-018-2620-4>. Acesso em: 01/07/2024.

GEBRECHORKOS, S. H.; HÜLSMANN, S.; BERNHOFER, C. Changes in temperature and precipitation extremes in Ethiopia, Kenya, and Tanzania. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 1, p. 18–30, 14 ago. 2018. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.5777> Acesso em: 01/07/2024.

GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; COELHO, C. A. S.; PALMEIRA, A. C. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**. Set, 2017; 38: 1760-1776.

IEMMA, A. F. Estatística descritiva. Piracicaba/SP. Φσρ Publicações. 1992, 182 p.

KÖPPEN W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Zeitschrift*, 1900, 6, 657–679.

KÖPPEN W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Meteorologische Zeitschrift*, 1901, 18, 106–120.

LOBELL, D. B. et al. Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 9, 2008. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2008GL034145> Acesso em: 01/07/2024.

PERKINS, J.; et al. Increasing frequency, intensity, and duration of observed global heatwaves. **Geophysical Research Letters**, v. 39, 2012. Acesso em: 01/07/2024.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; WHITE, C. J.; ALEXANDER, L. V.; ARGÜESO, D.; BOSCHAT, G.; COWAN, T.; EVANS, J. P.; EKSTRÖM, M.; OLIVER, E. C. J.; PHATAK, A.; PURICH, A. Natural hazards in Australia: heatwaves. **Climate change**. Volume 139, Issue 1, p. 101–114. nov. 2016.

RYDÉN, J. Statistical modelling of warm-spell duration series using hurdle models. *SORT*, v. 41, n. 1, p. 177–188, 2017. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112758/41.1.9.ryden.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01/07/2024.

SILVEIRA, R. D. **Risco climático, vulnerabilidade socioespacial e eventos climáticos extremos relacionados ao calor e ao frio no estado do Rio Grande do Sul – Brasil**. 2014. 379 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente.

VALVERDE, M. C.; ROSA, M. B. Heat waves in São Paulo State, Brazil: Intensity, duration, spacial scope, and atmospheric characteristics. *International Journal of Climatology*, mar. 2023; 43: 3782-3798.

YNOUE, Rita Yuri et al. **Meteorologia: noções básicas**. São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 09 jul. 2024. 2017.