Revista Brasileira de Geografia

FREQUÊNCIA, DURAÇÃO E INTENSIDADE DE ONDAS DE CALOR EM ALGUMAS CAPITAIS DO BRASIL NO PERÍODO DE 1981 A 2023

Bruno Lofrano-Porto
Helen Gurgel
Hendesson Alves
Amarílis Bahia Bezerra
Eliane Lima e Silva
Eucilene Alves Santana
Marina Miranda
Universidade de Brasília
Djacinto Aparecido Monteiro dos Santos Júnior
Renata Libonati
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Peter Zeilhofer
Universidade Federal do Mato Grosso

RESUMO

Ondas de calor (OC) estão se tornando mais frequentes e trazendo impactos sociais, econômicos, ambientais e na saúde humana. Dessa forma, espera-se identificar as OC que aconteceram em 15 capitais brasileiras entre 1981 e 2023 e caracterizá-las em relação à ocorrência, duração e intensidade a partir do fator de excesso de calor. Além disso, aplicou-se o teste de Mann-Kendall para identificar tendências temporais. Constatou-se que as OC no interior do Brasil ocorrem no período seco, enquanto no litoral ocorrem nos meses chuvosos. Oito cidades apresentaram aumento significativo na frequência de OC. Quatro cidades tiveram aumento na duração e seis na intensidade. Belo Horizonte, Belém, Brasília, Goiânia e Manaus apresentaram maior risco para OC em relação à frequência, duração ou intensidade.

Palavras-chave: Ondas de calor; fator de excesso de calor; análise de tendências; padrões sazonais.

ABSTRACT

Heat Waves (HW) are becoming more frequent and causing social, economic, environmental and human-health impacts. Therefore, we aimed to identify the HW that occurred in 15 Brazilian capitals between 1981 and 2023 and describe them regarding incidence, duration and intensity through the excess heat factor. In addition, the Mann-Kendall test was applied to identify temporal trends. We observed that HW in the central part of mainland Brazil occur in the dry period, while coastline HW happen in the months with more rainfall. Eight cities showed significant increase in HW frequency. Four cities showed increase in duration and six showed in intensity. Belo Horizonte, Belém, Brasília, Goiânia and Manaus had higher HW risk regarding frequency, duration or intensity.

Key words: Heat waves; excess heat factor; trend analysis; seasonal patterns.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são uma realidade do Século XXI, exigindo que o mundo se prepare e se adapte para mitigar seus impactos, que já são observados globalmente. O sexto relatório (AR6) de avaliação do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*), de 2022, indica que o aquecimento global já atingiu 1,1 °C e que o aumento anual na temperatura global está se acelerando nas últimas décadas devido à ação humana, sobretudo pela alta emissão de gases do efeito estufa - GEE. Para além das altas emissões de GEE, é importante também citar os efeitos das ilhas de calor urbanas (ICU) que causam aumento da temperatura em áreas densamente urbanizadas em relação às áreas rurais adjacentes e tendem a ocorrer em áreas de urbanização muito acelerada como é o caso de muitas capitais (Borges *et al.*, 2022; Amorim, 2020). Já no ano de 2024, o aumento de temperatura superou os 1,5 °C, considerado o mais quente já registrado desde o período pré-industrial (WMO, 2024). Com o aumento de temperatura, eventos climáticos extremos (ECE), como ondas de calor (OC) estão se tornando mais frequentes e elas causam diversos impactos no mundo, tanto para ecossistemas naturais como para saúde humana (IPCC, 2022). Uma pesquisa recente indicou que cerca de 48.000 mortes em excesso podem ser atribuídas às OC no Brasil, entre 2000 e 2018, apenas nas 14 principais regiões metropolitanas do país (Monteiro dos Santos *et al.*, 2024a). Paralelamente, estudos ao redor do mundo também encontraram associações entre OC e aumentos de mortalidade, ressaltando os impactos severos que o calor extremo tem na saúde humana (Yang *et al.*, 2019; Thompson *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2017).

O sexto relatório de avaliação do IPCC afirma que a América do Sul e a América Central são áreas altamente expostas e vulneráveis aos ECE, dessa forma, muito impactadas pelas mudanças climáticas. Essas regiões são marcadas pela alta desigualdade socioeconômica e pobreza, além de serem, na maioria, muito povoadas e terem população crescente, o que intensifica o grau de exposição e o potencial de impacto (IPCC, 2022). Ademais, um estudo baseado na aplicação de diferentes modelos climáticos indicou que há a tendência de aumento significativo de OC na América do Sul, especialmente na sua porção norte, com a expectativa de aumento podendo chegar de 5 a até 10 vezes mais OC até 2100 (Feron *et al.*, 2019). Observa-se, entretanto, uma lacuna de estudos detalhando esses eventos e seus impactos nessa área, apesar de trabalhos nesse sentido estarem se tornando mais comuns recentemente, com destaque especial para estudos que tentam descrever os impactos na saúde, associar a outros ECE, desenvolver métodos e identificar populações de risco (Monteiro dos Santos *et al.*, 2024a; Libonati *et al.*, 2022a; 2022b; Cheng *et al.*, 2018).

São muitas as métricas de identificação e classificação de OC, porém, a maioria é pensada exclusivamente na identificação de extremos de temperatura. Dessa forma, com o intuito de estabelecer uma métrica de identificação das OC, bem como das suas intensidades, focada nos impactos que esses ECE causam na saúde, Nairn e Fawcett (2014) desenvolveram um índice denominado fator de excesso de calor (EHF – *Excess Heat Factor*). O EHF considera a diferença entre as temperaturas médias diárias e o percentil 95 das médias diárias para definir os períodos de OC. Em seguida, esse método usa a diferença entre a temperatura média diária com a média dos 30 dias anteriores para indicar sua intensidade, pois esse é o período esperado de aclimatação do corpo à mudança de temperatura. Portanto, esse índice foi criado com objetivo principal de auxiliar análises sobre OC e saúde. Assim como em outros índices amplamente utilizados na literatura (por exemplo:

CTX90PCT e CTN90pct), os limiares utilizados para identificação de OC através do EHF são definidos a partir do histórico local, podendo se adaptar à especificidade de cada região estudada.

Um estudo recente aplicou o EHF para identificação e caracterização de tendência temporal de ocorrência e duração de OC para 14 regiões metropolitanas brasileiras (RMB) e avaliou seu impacto na saúde por meio de um cálculo de excesso de mortalidade no período de 1970 a 2020 (Monteiro dos Santos *et al.*, 2024a). Considerando a importância do referido estudo, mas pensando também que o trabalho teve foco principal nas análises de correlação com dados de saúde, buscou-se ampliar as análises específicas sobre o comportamento das OC, de forma a oferecer um diagnóstico mais amplo e mais atualizado. Para isso, utilizou-se a série histórica de 1981 a 2023 e ampliou-se a área de estudo, analisando, além das 13 cidades iniciais (Belém, Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Goiânia, Manaus, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo), as cidades de Porto Velho e Campo Grande e, além disso, também foi avaliada a relação das OC com a umidade do seu período de ocorrência.

Considerando as vulnerabilidades e diversidades regionais, torna-se fundamental a identificação e caracterização das OC no Brasil, para subsidiar o planejamento e a ação efetiva na mitigação dos impactos, juntamente com ações que visam diminuir as emissões de GEE que contribuem para a intensificação da mudança climática. Dessa forma, esse estudo tem como objetivo identificar as OC em 15 capitais brasileiras por meio do fator de excesso de calor no período entre 1981 e 2023, e caracterizar a frequência, sazonalidade, duração e intensidade desses eventos. A partir disso, espera-se fornecer uma compreensão importante da evolução histórica desse tipo de ECE em algumas das regiões mais populosas do país para auxiliar no planejamento, na mitigação de seus riscos e na adoção de medidas de adaptação.

MATERIAL E MÉTODOS

Trata-se de um estudo ecológico e quantitativo descritivo, com um recorte temporal de análise de 43 anos (1981-2023), e abrangência espacial de 15 capitais estaduais brasileiras. Foram escolhidas as três capitais mais populosas de cada uma das cinco grandes regiões do país. A definição de OC adotada foi o EHF (Nairn e Fawcett, 2014) e utilizou-se como período de referência os anos de 1981-2010. A abordagem singular deste estudo, é a forma de calcular a classificação da intensidade das OC na aplicação do EHF, que foi baseada na moda da classificação dos dias que compõem a OC.

Fonte de dados

Para garantir a disponibilidade dos dados para uma série temporal extensa, foram selecionadas estações meteorológicas convencionais, visto que estas estão presentes há mais tempo do que as estações automáticas. Priorizaram-se dados das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), contudo, em cidades onde estas não estavam disponíveis, foram utilizados dados disponibilizados pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA).

A relação das cidades analisadas e suas respectivas estações meteorológicas pode ser observada na tabela 1. Para o preenchimento das lacunas nos dados foi replicado o último valor válido, até que fosse encontrado outro valor válido (para falhas pequenas, de menos de um mês). Considerando que os dados de cada estação possuíam falhas e outliers diferentes, optou-se por elaborar um documento, detalhando as correções realizadas no conjunto de dados oriundo de cada estação e esse documento, bem como o banco de dados consolidado agrupando todas as estações (em formato tabular .xlsx) estão disponibilizados no material suplementar 1. É importante ressaltar que em três cidades analisadas, a estação climatológica de referência foi diferente do que foi desenvolvido por Monteiro dos Santos et al (2024a), são elas: Fortaleza, Curitiba e Florianópolis (verificado a partir da latitude e longitude).

Cidade	**Estação**	**Órgão Responsável**	**Grande Região**	**Dados Faltantes Temperatura**	**Dados Faltantes Umidade**	**Período**
Manaus/AM	82332	INMET	Norte	1,86 %	13,52 %	1981 a 2023
Belém/PA	82191	INMET	Norte	0,73 %	10,42 %	1981 a 2023
Porto Velho/RO	82824	ICEA	Norte	0,11 %	0,11 %	1981 a 2023
Fortaleza/CE	82398	ICEA	Nordeste	0,02 %	0,01 %	1981 a 2023
Salvador/BA	83229	INMET	Nordeste	1,65 %	1,16 %	1981 a 2023
Recife/PE	82900	INMET	Nordeste	0,78 %	1,24 %	1981 a 11-11-2021
Brasília/DF	83377	INMET	Centro-Oeste	0,30 %	0,28 %	1981 a 2023
Goiânia/GO	83423	INMET	Centro-Oeste	2,41 %	0,27 %	1981 a 2023
Campo Grande/MS	83612	ICEA	Centro-Oeste	0,10 %	0,30 %	1981 a 2023
São Paulo/SP	83781	INMET	Sudeste	5,06 %	6,24 %	1981 a 2023
Rio de Janeiro/RJ	83755	ICEA	Sudeste	< 0,01 %	0,01 %	1981 a 2023
Belo Horizonte/MG	83587	INMET	Sudeste	0,61 %	5,28 %	1981 a 2023
Curitiba/PR	83840	ICEA	Sul	< 0,01 %	0,04 %	1981 a 2023
Porto Alegre/RS	83967	INMET	Sul	2,08 %	8,98 %	1981 a 2023
Florianópolis/SC	83899	ICEA	Sul	0,02 %	3,94 %	1981 a 2023
OBS: As porcentagens de dados faltantes apresentadas são os valores após as correções descritas no material suplementar 1.						

Tabela 1 – Estações meteorológicas utilizadas. Fonte: INMET, ICEA.

Foram utilizados dados do período de 1981-2023 e analisadas as variáveis temperatura média e umidade média, ambas em nível diário. Para a cidade do Recife, entretanto, a série de dados foi interrompida em 11 de novembro de 2021, devido à indisponibilidade de registros posteriores nas estações do INMET.

Ondas de calor

Para a identificação dos períodos de OC, foi utilizada a abordagem de Nairn e Fawcett (2014) que estabeleceram o índice EHF, que caracteriza também a intensidade e duração desses eventos. Para isso, o EHF é composto por dois índices: o de significância (E_{Sigg}) e o de aclimatação (E_{Accl}). O E_{Sigg} é o que define as ondas de calor e é calculado utilizando a média das temperaturas médias diárias de períodos de três dias (PTD) em comparação com o percentil 95 dos valores de temperatura média diária do período de referência (T95), que nesse caso foi de 1981-2010, e se o valor dessa diferença for positivo, então todos os dias nesse PTD são considerados dias de OC. Paralelamente, é calculado o E_{Accl} a partir da comparação do PTD com a média dos últimos 30 dias, com o objetivo de gerar um fator multiplicador para o E_{Sigg} e assim indicar a intensidade das OC. Dessa forma, o E_{Sigg} identifica as OC e o E_{Accl} age para identificar severidade. Ao final é feita uma multiplicação condicional. Para o caso do valor de E_{Accl} ser maior que 1, multiplicam-se os dois índices. Por outro lado, se o E_{Accl} for menor 1, multiplica-se o E_{Sigg} por 1, de acordo com a fórmula abaixo.

$$EHF = E_{Sigg} \times max(1, E_{Accl})$$

Por meio dessa metodologia, a intensidade das OC é obtida a partir do percentil 85 (EHF_{85}) de todos os valores positivos do EHF. Dias com EHF abaixo do EHF_{85} são consideradas de baixa intensidade, com $EHF>EHF_{85}$ e menores que $3*EHF_{85}$ são severas e com $EHF>3*EHF_{85}$ são consideradas extremas.

É importante destacar que, apesar do EHF trabalhar sempre com PTD, os seus valores e a classificação de intensidade (baixa intensidade, severa e extrema) são gerados para cada dia do ano, ou seja, em uma onda de calor de cinco (5) dias, por exemplo, pode haver três dias severos e dois dias de baixa intensidade. Dessa forma, optou-se por classificar a intensidade das OC baseada na moda da classificação dos dias que a compõem.

Com o intuito de identificar os períodos do ano em que há mais ocorrência de OC, foi calculada a porcentagem de dias de OC que acontecem em cada mês do ano para cada cidade. Especificamente para essa análise, optou-se por utilizar os dias de OC, ao invés do número de eventos, pois há eventos que acontecem no final de um mês e perduram até o começo do próximo, o que poderia gerar duplicatas no cálculo. Para esse estudo, as estações do ano foram consideradas como: a) verão - corresponde aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro; b) outono - abrange os meses de março, abril e maio; c) inverno - compreende os meses de junho, julho e agosto; e d) primavera - inclui os meses de setembro, outubro e novembro.

Além do indicador de severidade, já integrado ao cálculo do EHF, foi observada a duração desses períodos e se eles acontecem nas estações mais úmidas ou mais secas de cada capital. Da mesma forma, foi desenvolvida uma análise descritiva dos períodos e estações do ano em que a ocorrência das OC é mais frequente. Todos esses cálculos foram estabelecidos por meio de um script *python* desenvolvido no ambiente *google colab* (Material suplementar 2).

Para descrever o comportamento das OC nas principais capitais estaduais brasileiras, foi aplicada estatística descritiva e gerados gráficos e tabelas. Os dados foram agregados em quatro (4) períodos distintos: 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 e 2010-2023. Porém, em todas as análises estatísticas temporais utilizaram-se os dados agregados temporalmente por ano.

Além da identificação das OC, foi aplicado o teste não paramétrico de Mann-Kendall, utilizando a biblioteca *pymannkendall* em script *python*. O teste teve como objetivo identificar tendências das OC ao longo dos anos da série temporal em relação à frequência de ocorrência, duração e intensidade das OC ao longo dos anos. É importante citar que o teste de Mann-Kendall avalia existência e direção da tendência, mas não magnitude. O estudo de Monteiro dos Santos et al (2024a) aplicou testes de regressão linear para avaliação de tendência temporal. Utilizou-se o intervalo de confiança de 95% (IC-95%) para o teste. Os scripts utilizados para esta análise estão disponíveis no material suplementar 3. Também foi analisado se havia autocorrelação serial entre os valores das variáveis de frequência, intensidade e duração em todas as capitais. Como foram utilizados valores anuais, não houve evidências de autocorrelação serial em nenhuma cidade para as variáveis de duração e intensidade. Já para a variável de frequência, houve indícios moderados a altos de autocorrelação serial para algumas cidades (Belém, Goiânia e Manaus), porém, como foram poucas cidades, foi feita a escolha pelo teste padrão de Mann-Kendall.

RESULTADOS

As evidências resultantes das análises realizadas são dispostas, primeiro, apresentando os desfechos com a aplicação do EHF nas capitais estaduais, seguida da apresentação do comportamento da intensidade das OC e, por fim, mostrando a análise de tendência em cada uma dessas cidades.

Identificação das OC por meio o EHF

A Figura 1 apresenta o número total de OC identificado em cada cidade analisada, agrupados nos períodos 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 e 2011-2023. No período analisado foram registradas 2528 OC na área de estudo, sendo 353 entre 1981 e 1990; 517 entre 1991 e 2000; 598 entre 2001 e 2010; 1060 entre 2011 e 2023. As cidades com maior ocorrência de OC ao longo da série histórica foram: Belém (234), Manaus (211) e Goiânia (210). Já as capitais Fortaleza, Salvador e Campo Grande apresentaram as menores quantidades de períodos de temperatura extrema, com 93, 117 e 131, respectivamente (Mapa 1). Além disso, a maioria das áreas analisadas apresentaram mais ocorrências de OC nos anos mais recentes, com exceção de Campo Grande, Curitiba e Fortaleza.

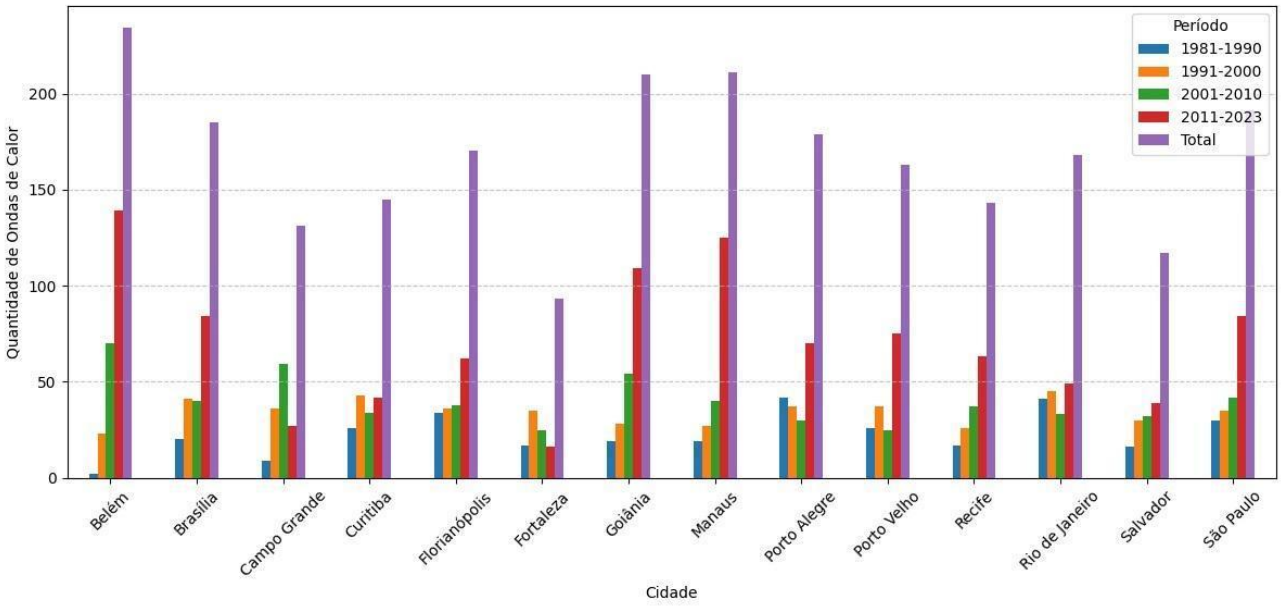


Figura 1 – Ondas de calor por segmento da série histórica. Fonte: Elaboração própria.

Adicionalmente, o Mapa 1 apresenta a localização das capitais além dos totais de ocorrências de OC que ocorrerem em cada localidade. A partir dessa visualização podemos identificar concentrações de alta ocorrência de ondas de calor no litoral do Sul e Sudeste, bem como no interior do país no Centro-Oeste e Norte. Houve baixa ocorrência de OC na região Nordeste, comparativamente às outras regiões.

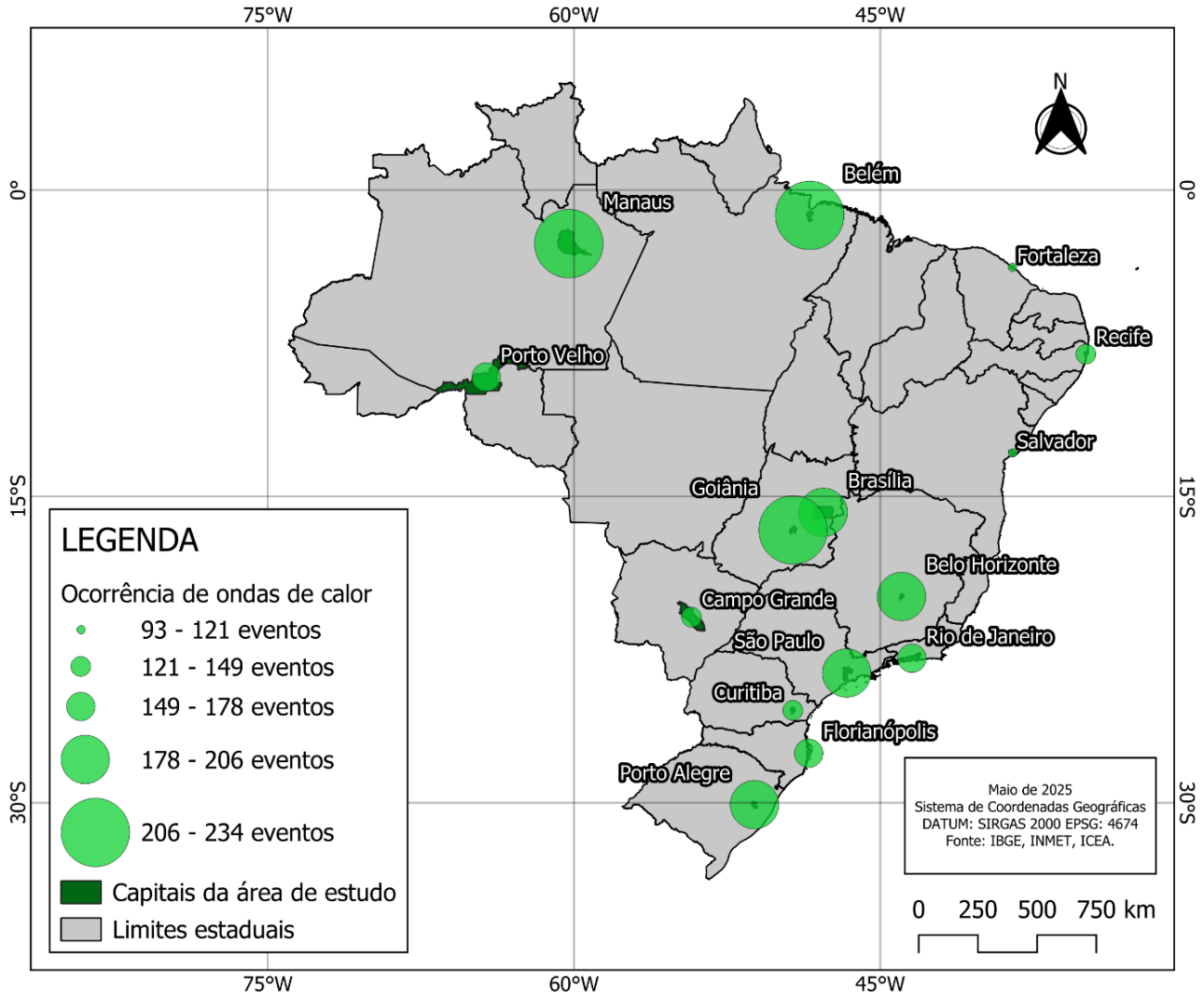
O mapa de calor que apresenta a ocorrência de OC por ano nas capitais estudadas (Figura 2), indica uma tendência de aumento na frequência de OC para a maioria das cidades. As cidades de Belém, Manaus, Goiânia e São Paulo apresentam, visualmente, uma diferença notável entre os valores mais baixos no começo da série e mais altos ao final.

As OC nas capitais analisadas tendem a se concentrar em períodos específicos do ano, porém, esse período varia conforme as macrorregiões. Para cada capital estudada foram elencados os três meses em que houve mais dias de calor extremo, bem como o percentual do total que compreende esses três meses (Tabela 2). Assim, foi possível identificar o comportamento sazonal das OC, bem como apontar os períodos mais críticos em relação ao calor extremo.

Todas as cidades avaliadas tiveram mais de 50% dos dias de OC concentradas em apenas três meses do ano. Cinco cidades tiveram concentração de OC muito alta (> 80%), oito tiveram concentração intermediária (>60% & <80%) e apenas duas apresentaram um padrão de maior dispersão de OC ao longo do ano (<60%). Não foram encontradas OC no inverno em praticamente nenhuma das áreas de estudo (Tabela 2).

As OC ocorrem principalmente no começo e fim do ano em todas as regiões do Brasil. Nas Regiões Nordeste, Sudeste e Sul a maioria das OC são registradas no verão, enquanto nas regiões Norte e Centro-Oeste ocorrem principalmente na primavera. A maioria das OC no Brasil acontecem nos meses quentes, variando entre primavera e verão, dependendo da região, com uma maior frequência de OC no verão nas regiões litorâneas e na primavera nas regiões mais interioranas. Belo

Horizonte, Belém e Campo Grande apresentaram as OC de forma mais dispersa entre os meses do ano. A porcentagem de OC observada em cada mês e em cada cidade é disponibilizada na Figura 3.



Mapa 1 – Mapa de círculo proporcionais das capitais estudadas e a ocorrência de OC. Fonte: IBGE, INMET, ICE.

Além da sazonalidade da ocorrência das OC, foi observado que em algumas regiões do país elas são mais frequentes nos períodos úmidos, enquanto em outras nos períodos secos. Constatou-se que nas cidades litorâneas a amplitude dos valores de umidade é menor do que nas cidades que estão no interior do continente (Figura 4). Na região norte, as ondas de calor figuram principalmente nos meses em que há uma queda, ainda que pequena, na umidade média. Na região Centro-Oeste, as OC se apresentam também com maior frequência no período mais seco, porém, não tanto no auge da estiagem, que costuma ser o mês de agosto, e ainda surgem um pouco no começo da transição para o período mais úmido. Em Porto Alegre, as OC são quase exclusivamente em janeiro, fevereiro e dezembro, sendo o período mais seco. Nas outras cidades da região Sul, a amplitude dos valores de umidade foi muito baixa, portanto, as OC ocorrem em períodos majoritariamente

úmidos. Nas cidades localizadas nas regiões Sudeste e Nordeste, as OC situam-se mais frequentemente nos períodos de maior umidade do ano.

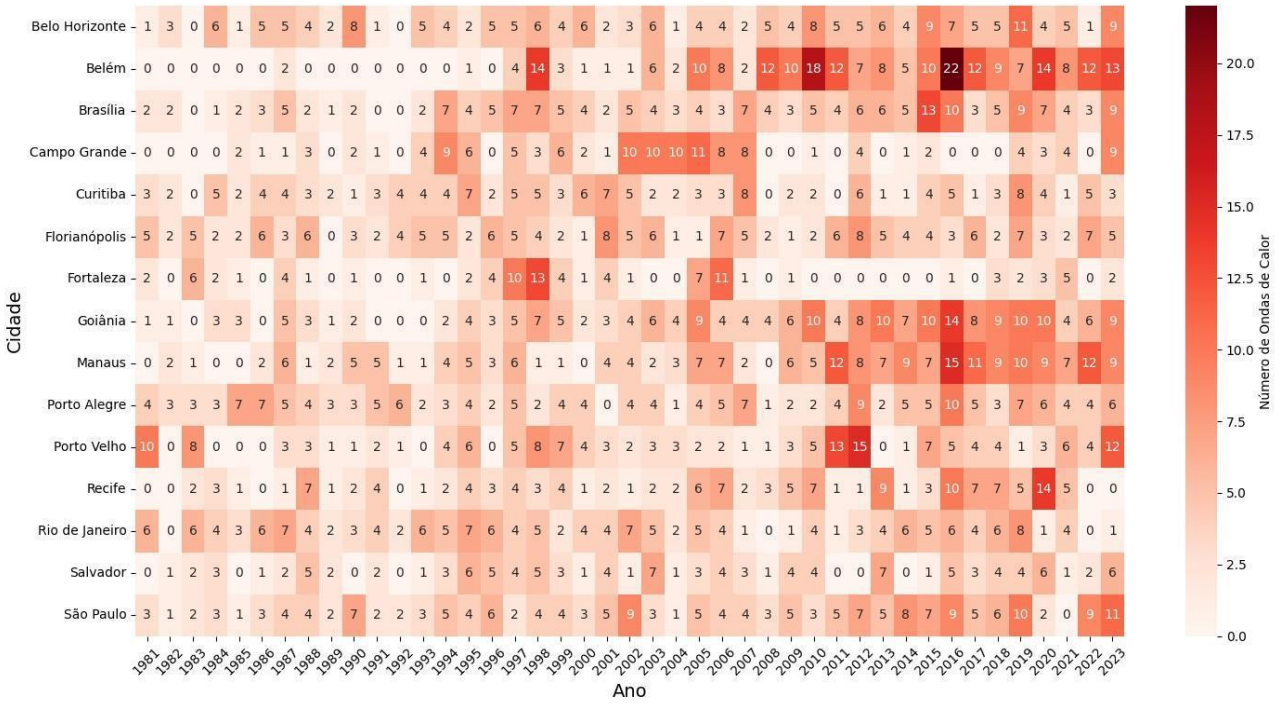


Figura 2 – Frequência de OC por ano e por cidade. Fonte: Elaboração própria.

Além de identificar os eventos e os dias de OC, o EHF permite avaliar a duração desses eventos. As OC se tornaram mais longas ou tiveram duração relativamente constante em quase todas as cidades estudadas (Figura 5). Fortaleza e Recife se sobressaem por apresentarem um aumento importante na duração média das OC, entre 1991 e 2000, e por apresentarem OC mais curtas nos anos mais recentes. Florianópolis e Porto Velho foram as únicas cidades cuja duração média das OC foi maior no período de 1981-1990. Manaus apresentou o maior aumento na média da duração das OC entre o começo e o fim da série histórica, tendo OC, em média, quase 4 dias mais longas no período de 2011 a 2023 em comparação com o período de 1981 a 1990.

Caracterização de intensidade das Ondas de Calor por meio do fator de excesso de calor

A análise da média dos valores positivos de EHF nos permite observar a intensidade das OC (Figura 6). Em Belo Horizonte, Brasília, Goiânia e São Paulo foi observado um aumento considerável nos valores médios de EHF ao longo do período analisado. Em muitas cidades não foram observadas flutuações nos valores, sugerindo que as ondas de calor não estão se tornando mais intensas. Porto Alegre e Campo Grande, em comparação com as demais capitais, se destacaram por apresentarem valores elevados durante todo o período.

Cidade	Percentual de dias que ocorre dentro dos meses de maior ocorrência	Meses de maior ocorrência	Estação do ano mais frequente
Belo Horizonte	57,5%	Janeiro, outubro, fevereiro	Verão
Belém	51,9%	Novembro, outubro, agosto	Primavera
Brasília	75,1%	Outubro, setembro, novembro	Primavera
Campo Grande	61,3%	Setembro, outubro, dezembro	Primavera
Curitiba	80,5%	Janeiro, fevereiro, dezembro	Verão
Florianópolis	86,1%	Janeiro, fevereiro, março	Verão
Fortaleza	64,5%	Dezembro, fevereiro, janeiro	Verão
Goiânia	71,4%	Setembro, outubro, novembro	Primavera
Manaus	68,8%	Outubro, setembro, agosto	Primavera
Porto Alegre	83,5%	Janeiro, fevereiro, dezembro	Verão
Porto Velho	68,7%	Setembro, agosto, outubro	Primavera
Recife	78,8%	Março, fevereiro, janeiro	Verão
Rio de Janeiro	82,8%	Janeiro, fevereiro, dezembro	Verão
Salvador	88,6%	Março, fevereiro, janeiro	Verão
São Paulo	62,8%	Janeiro, fevereiro, dezembro	Verão

Tabela 2 – Meses de maior ocorrência das OC nas 15 cidades estudadas. Fonte: Elaboração própria

A maioria das OC registradas no Brasil (97,2%) foi classificada como de baixa intensidade, embora muitas tenham apresentado alguns de seus dias com intensidades maiores. Foram observadas cinco OC extremas e 65 severas. Apenas quatro cidades apresentaram OC extremas, mas todas apresentaram pelo menos duas OC severas, com a maioria dessas ocorrências encontradas no século XXI. As cidades de Belo Horizonte e Porto Alegre apresentaram o maior número de OC severas ou extremas e Belo Horizonte foi a única cidade com mais de uma OC extrema (tabela 3).

Análise de tendência por meio de teste de Mann-Kendall

Foi aplicado o teste de Mann-Kendall para avaliar a tendência histórica da ocorrência, duração e intensidade das OC para o período de 1981-2023. Primeiramente, foi observada a tendência da ocorrência de OC por ano. O teste foi estatisticamente significativo (p-valor<0,05) para 8 cidades: Belo Horizonte, Belém, Brasília, Goiânia, Manaus, Porto Velho, Recife e São Paulo e, nelas todas, a tendência foi de aumento na frequência de ocorrência das OC (tabela 4).

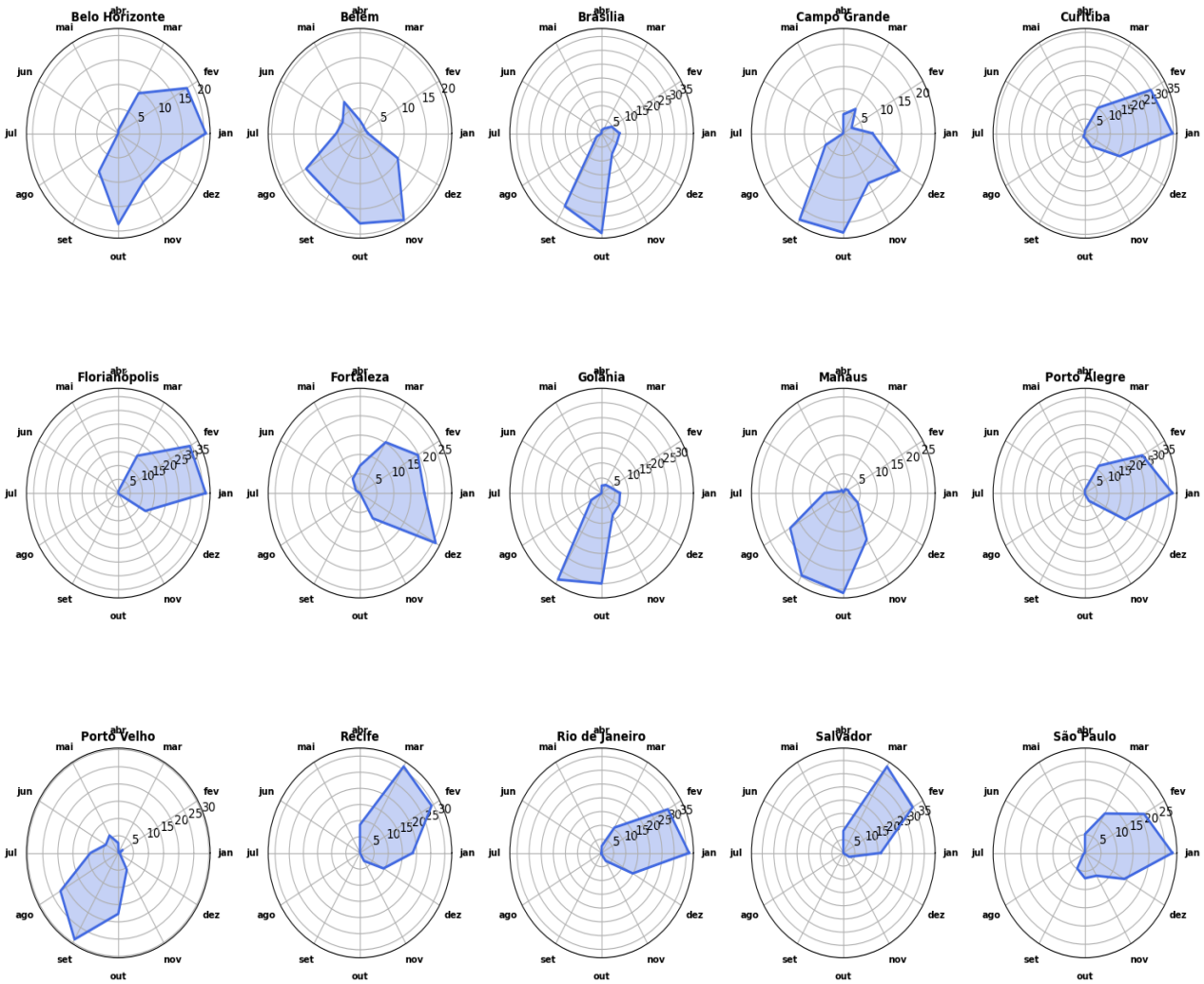


Figura 3 – Porcentagem de OC por mês do ano nas 15 cidades estudadas. Fonte: Elaboração própria.

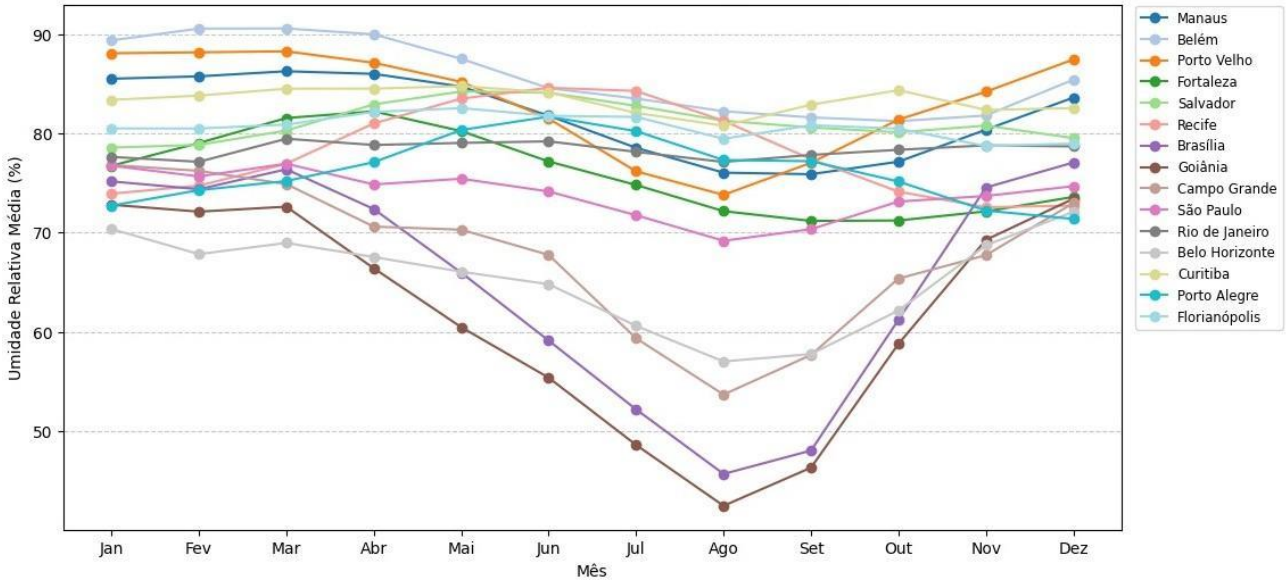


Figura 4 – Umidade média mensal das cidades ao longo dos anos da série histórica. Fonte: Elaboração própria.



Figura 5 – Duração média das OC por período e por cidade. Fonte: Elaboração própria.

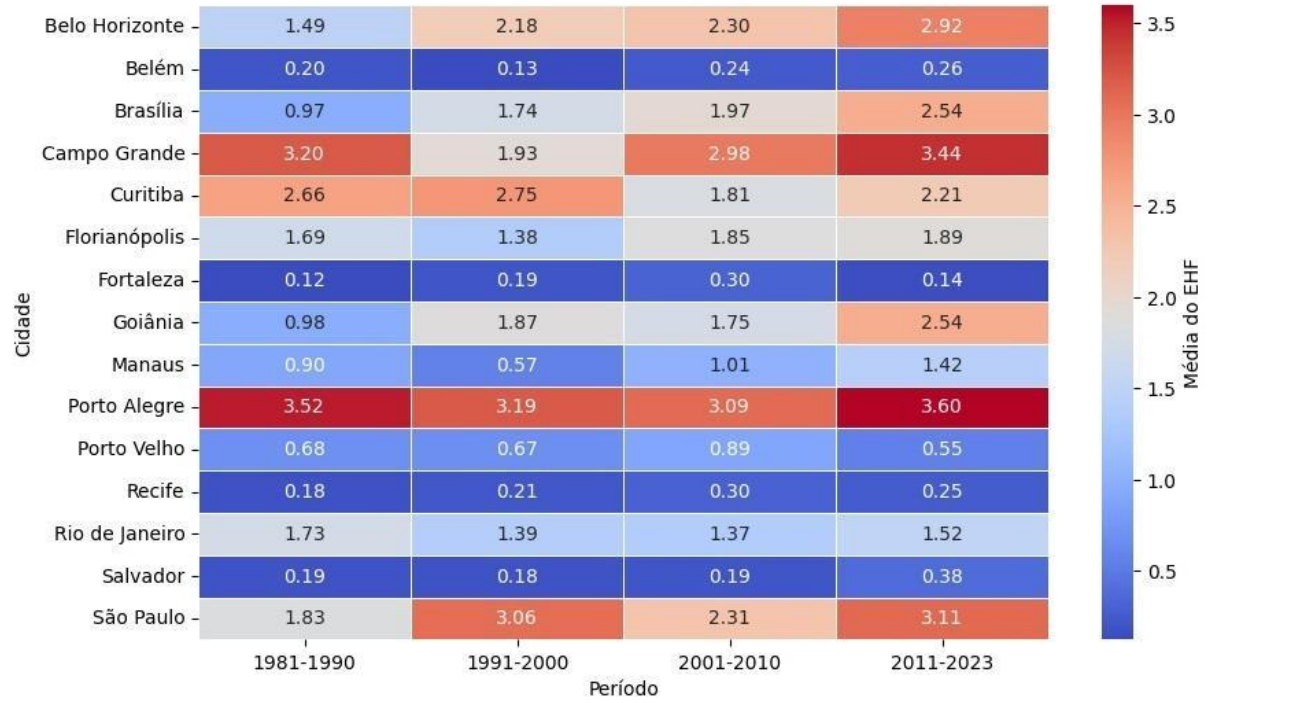


Figura 6 – Média dos valores de EHF dos dias de OC. Fonte: Elaboração própria.

Cidade	OC de baixa intensidade	OC Severas	OC Extremas	Total
Belo Horizonte	180	6	2	188
Belém	229	5	0	234
Brasília	182	3	0	185
Campo Grande	125	5	1	131
Curitiba	141	3	1	145
Florianópolis	164	5	1	170
Fortaleza	91	2	0	93
Goiânia	205	5	0	210
Manaus	206	5	0	211
Porto Alegre	171	8	0	179
Porto Velho	157	6	0	163
Recife	141	2	0	143
Rio de Janeiro	165	3	0	168
Salvador	115	2	0	117
São Paulo	186	5	0	191

Tabela 3 – Número de OC por intensidade em cada cidade. Fonte: Elaboração própria.

Em relação à duração das OC, foi identificado um padrão significativo de aumento na duração das OC em quatro capitais: Belém, Brasília, Goiânia e Manaus. Nas demais cidades o teste não apresentou IC de 95% e não foi possível observar nenhuma tendência (tabela 5).

Por fim, o teste de tendência para intensidade considerou a média dos valores positivos do EHF em cada ano. Foi identificada tendência estatisticamente significante de aumento na intensidade das OC em sete capitais: Belo Horizonte, Belém, Brasília, Goiânia, Manaus, Recife e Salvador. Nas demais cidades o teste não apresentou p-valor < 0,05 e não pode ser observada nenhuma tendência (tabela 6).

Em síntese, os testes realizados indicaram uma tendência de aumento na ocorrência de OC em 53,3% das cidades estudadas, bem como um aumento da duração em 26,7% das capitais e de intensidade em 46,6%. As capitais Belém, Brasília, Goiânia e Manaus apresentaram tendência de aumento nas três métricas avaliadas. Belo Horizonte e Recife apresentaram uma tendência de aumento em duas das três métricas avaliadas. Dessa forma, acredita-se que essas seis cidades estejam em situação de maior ameaça em relação à OC, reforçando a necessidade urgente de ações de mitigação de impactos e adoção de medidas de adaptação.

Cidade	Tau de Mann-Kendall	Tendência	P-Valor
Belo Horizonte	0,27	Aumento	0,0098
Belém	0,62	Aumento	< 0,0001
Brasília	0,41	Aumento	< 0,0001
Campo Grande	0,10	Sem Tendência	0,3390
Curitiba	0,02	Sem Tendência	0,8820
Florianópolis	0,10	Sem Tendência	0,3496
Fortaleza	-0,05	Sem Tendência	0,6394
Goiânia	0,58	Aumento	< 0,0001
Manaus	0,55	Aumento	< 0,0001
Porto Alegre	0,12	Sem Tendência	0,2505
Porto Velho	0,21	Aumento	0,0483
Recife	0,28	Aumento	0,0069
Rio de Janeiro	-0,11	Sem Tendência	0,2877
Salvador	0,19	Sem Tendência	0,0730
São Paulo	0,39	Aumento	0,0002

Tabela 4 – Resultados do teste de Mann-Kendall para o número de OC por ano nas 15 capitais estudadas. Fonte: Elaboração própria.

DISCUSSÃO

As tendências de aumento na frequência da ocorrência de OC na maioria das capitais analisadas corroboram os achados de Monteiro dos Santos e colaboradores (2024a). Porém, pelo fato de serem metodologias de análise de tendência diferentes, as cidades onde houve significância estatística não foram as mesmas. No estudo de Monteiro dos Santos et al (2024a) apenas Rio de Janeiro e Porto Alegre não tiveram tendência estatisticamente significativa de aumento na ocorrência de OC. O teste de Mann-Kendall não avalia a intensidade da tendência de aumento na frequência de OC, porém, analisando os valores anuais ao longo da série histórica, observa-se que Belém, Goiânia, Manaus e Recife tiveram um aumento maior na frequência de Ondas de Calor. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo, especialmente em áreas onde a frequência das OC tem crescido de forma significativa.

Em relação ao estudo de Monteiro dos Santos et al (2024a), o método de análise de tendência temporal da intensidade das OC foi diferente. O presente estudo utilizou, além da quantidade de eventos extremos e severos (que foram definidos de maneira diferente) a média do valor do EHF para todas as OC dos períodos analisados, trazendo um detalhamento maior para a análise e

permitindo a observação de pequenos aumentos de intensidade que acontecem entre as OC de baixa intensidade, por exemplo. Para mais, as cidades de Manaus, Brasília e Goiânia foram identificadas por Monteiro dos Santos e colaboradores (2024a) como as que tiveram maior aumento na duração, e essas três cidades figuram entre as quatro elencadas aqui como tendo aumento significativo na duração.

Cidade	Tau de Mann-Kendall	Tendência	P-Valor
Belo Horizonte	0,14	Sem Tendência	0,1655
Belém	0,49	Aumento	< 0,0001
Brasília	0,56	Aumento	< 0,0001
Campo Grande	0,10	Sem Tendência	0,3428
Curitiba	-0,01	Sem Tendência	0,9320
Florianópolis	0,09	Sem Tendência	0,4071
Fortaleza	-0,08	Sem Tendência	0,4614
Goiânia	0,41	Aumento	< 0,0001
Manaus	0,41	Aumento	< 0,0001
Porto Alegre	0,12	Sem Tendência	0,2612
Porto Velho	0,14	Sem Tendência	0,1875
Recife	0,14	Sem Tendência	0,1956
Rio de Janeiro	0,07	Sem Tendência	0,5119
Salvador	0,12	Sem Tendência	0,2689
São Paulo	0,17	Sem Tendência	0,1076

Tabela 5 – Resultados do teste de Mann-Kendall para intensidade de OC por ano nas 15 capitais estudadas. Fonte: Elaboração própria

O EHF indicou que a maioria das OC acontece na primavera e no verão ao longo de todo o território, o que também está de acordo com os achados de Monteiro dos Santos e colaboradores (2024a). Além disso, Geirinhas e colaboradores (2020) avaliaram associação entre mortalidade e OC (medidas pelo EHF) nos meses de verão para municípios do estado do Rio de Janeiro, reforçando que esses são os meses de maior importância para as OC nessa área. Outras metodologias de OC aplicadas em várias áreas do Brasil também tiveram resultados similares, indicando o EHF como um bom índice para a identificação das OC na região (Bitencourt *et al.*, 2016).

Por mais que o Rio de Janeiro não tenha apresentado tendência de aumento na frequência, duração ou intensidade das OC, os extremos de temperatura ainda são um relevante problema para a saúde pública do município. Extremos de temperatura medidos a partir do tempo de exposição

(em horas) a temperaturas extremas, ao invés de métricas diárias como as de OC, foram capazes de explicar melhor a mortalidade por diversas causas no período de 2012-2024, de acordo com estudo de Araújo Morais e colaboradores (2025). Dessa forma, sugerimos, para investigações futuras, pesquisas que avaliem diferenças nos impactos à saúde entre ondas de calor (escala diária) e extremos de temperatura (escala horária).

Cidade	Tau de Mann-Kendall	Tendência	P-Valor
Belo Horizonte	0,31	Aumento	0,0033
Belém	0,56	Aumento	< 0,0001
Brasília	0,49	Aumento	< 0,0001
Campo Grande	0,08	Sem Tendência	0,4600
Curitiba	-0,01	Sem Tendência	0,9416
Florianópolis	0,14	Sem Tendência	0,2017
Fortaleza	-0,03	Sem Tendência	0,8129
Goiânia	0,48	Aumento	< 0,0001
Manaus	0,43	Aumento	0,0001
Porto Alegre	-0,05	Sem Tendência	0,6452
Porto Velho	0,12	Sem Tendência	0,2528
Recife	0,25	Aumento	0,0164
Rio de Janeiro	-0,07	Sem Tendência	0,4963
Salvador	0,22	Aumento	0,0359
São Paulo	0,10	Sem Tendência	0,3571

Tabela 6 – Resultados do teste de Mann-Kendall para intensidade das OC por ano nas 15 capitais estudadas. Fonte: Elaboração própria.

Nas cidades de Belém, Manaus e Porto Velho, que se localizam no bioma amazônico, foi identificada tendência de aumento na frequência de ocorrência de OC, com as duas primeiras apresentando situação muito crítica, pelo grau do aumento e pela ampliação na intensidade e duração das OC. Um estudo comparativo desenvolvido por Silva et al (2023) também indicou aumento na frequência e duração de OC na região amazônica a partir do ano de 1991. Para mais, outro estudo desenvolvido especificamente sobre a capital do Amazonas indicou, com confiança de 99%, aumento na intensidade e frequência das OC na cidade, especialmente a partir de 1996 (Mandú *et al.*, 2020). Ademais, o bioma amazônico, em toda a América do Sul, esteve sob estresse térmico por mais de um terço do tempo entre 1979 e 2020 (Miranda *et al.*, 2024). Todos esses estudos corroboram com os achados de que a região Norte no Brasil, em especial as cidades de Manaus e Belém, estão sendo mais impactadas em relação à variabilidade climática e o aumento das OC.

Em nenhuma das três cidades da região Sul do Brasil foi identificado padrão estatisticamente significativo de aumento na ocorrência ou na duração das OC. Porém, outros estudos que avaliaram essa área observaram aumento na intensidade e na persistência desses tipos de eventos na porção subtropical do Brasil (Reis, 2017; Silveira *et al.*, 2019). É importante notar que nenhum desses estudos utilizou o EHF como métrica para a identificação das OC e a diferença na metodologia de identificação pode impactar a detecção de padrões. Por outro lado, um estudo que aplicou dois índices diferentes (CTX90pct e CTN90pct) verificou que a cidade de Porto Alegre teve altas quantidades de OC por ano para o período de 1961-2014 (Geirinhas *et al.*, 2018).

Algumas cidades identificadas neste estudo como mais ameaçadas por eventos de ondas de calor (OC) — em razão do aumento significativo na frequência, duração e intensidade desses fenômenos, como observado em Belém, Manaus, Brasília e Goiânia — ainda não recebem a devida atenção quanto à gravidade do problema. Essas são áreas onde altas temperaturas e, no caso do Centro-Oeste, a baixa umidade, já são bem comuns. Por outro lado, a região Sul, que tem um período frio mais acentuado que o resto do Brasil, por vezes traz à tona maior preocupação em relação à OC, mas não foi observado nenhum padrão estatisticamente significativo de que as OC no Sul estão mais intensas, duradouras ou frequentes.

A ocorrência das OC no Brasil é bastante concentrada nos meses de setembro a fevereiro. Nas regiões litorâneas, tais fenômenos tendem a ocorrer nos meses mais úmidos e, nas áreas que há maior efeito da continentalidade, as OC são mais comuns no período seco. Além disso, dentre as quatro cidades que apresentaram um período seco muito bem definido e bastante marcante (Belo Horizonte, Brasília, Campo Grande e Goiânia - Figura 4), três dessas estão entre o grupo com mais ameaçado pelas ondas de calor (todas menos Campo Grande), pois Brasília e Goiânia apresentaram aumento significativo na frequência de ocorrência, duração e intensidade das OC e Belo Horizonte apresentou aumento na frequência e intensidade. Em Brasília, Goiânia e em Campo Grande as OC acontecem principalmente no fim do período seco e começo do aumento da umidade (Figura 4), já em Belo Horizonte, as OC são mais difusas ao redor do ano, começando a acontecer também no fim do período seco, mas também acontecendo já no período mais úmido.

Além dos riscos gerados pelos extremos de temperatura, já foi observado que, no Brasil, as OC são associadas a ECE de seca nas regiões Nordeste e Sudeste, bem como nas áreas da Amazônia e do Pantanal. Para mais, esses eventos compostos de OC e seca estão ligados ao aumento de incêndios florestais recentemente, como os que aconteceram no Pantanal em 2020 (Libonati *et al.*, 2022a; 2022b). Dessa forma, os biomas Amazônia e Pantanal são os que têm sofrido maior impacto, visto que as OC das regiões Norte e Centro-Oeste acontecem comumente no período seco. Ademais, a associação entre seca, ondas de calor e incêndios pode gerar impactos de grande dimensão sobre a saúde, como foi observado também no Pantanal em 2020 (Monteiro dos Santos *et al.*, 2024b).

As OC, de acordo com o EHF, são medidas utilizando-se apenas a temperatura média diária, portanto, considera-se calor extremo quando a média de um período de três dias é muito elevada em relação ao esperado. Muitas outras metodologias de identificação de OC, como a definida pela própria OMM e adotada pelo INMET, utilizam valores de temperatura máxima como métrica, pois esse seria o momento de maior desconforto. Para mais, a amplitude térmica é uma característica climática, frequentemente, comentada em estudos descritivos sobre OC. No geral, ela é explorada no momento de caracterização do clima e antes da avaliação específica sobre OC ou para discutir

se a metodologia de definição das OC é adequada para determinada localidade (Bitencourt *et al.*, 2016; Ely e Kogima, 2019; De Melo e Brito, 2018). Porém, ainda não há evidências sobre os possíveis impactos da amplitude térmica diária dos dias de OC. O EHF não avalia a amplitude térmica nem o tempo de exposição diário às altas temperaturas, porém, por utilizar a temperatura média, ao invés da máxima, por exemplo, ele consegue captar uma realidade mais holística, pensando no dia como unidade temporal. Medidas que adotem como métrica a temperatura máxima podem apresentar viés de confundimento, quando ocorrem dias com alta amplitude térmica, contudo, com curto tempo de exposição a temperaturas realmente extremas.

As mudanças climáticas e os ECE também podem ser associadas a propagação de doenças vetoriais, pois as características ambientais podem influenciar diretamente os ciclos de vida e reprodução dos vetores, possivelmente afetando a distribuição e sazonalidade das doenças vetoriais (Yu, Seto e Hai, 2010). Para mais, já foi observado que as altas anomalias de temperatura causada pelas mudanças climáticas estão ampliando a área de transmissão da dengue no Brasil e na América do Sul (Barcellos *et al.*, 2024). Dessa forma, a mitigação das mudanças climáticas e dos ECE, como ondas de calor pode demonstrar sinergismo com a prevenção e controle de doenças vetoriais.

Por fim, é importante pensar em estratégias de mitigação de impactos das ondas de calor. No geral, é importante que haja comunicação do risco, e que a população busque por ambientes frescos e que tente manter boa hidratação (Hatvani-Kovacs *et al.*, 2018; Floss e Barros, 2020). Para mais, é muito importante que sejam feitas recomendações para as condições climáticas específicas, por exemplo para as diferenças entre ondas de calor úmidas no litoral e secas no interior. Porém, ainda não há recomendações para mitigação de impactos das OC com tanta especificidade. Adicionalmente, são necessárias adaptações de planejamento no espaço urbano, especialmente nas cidades identificadas como sob maior risco. Estratégias de intervenção no ambiente construído que já demonstraram sucesso incluem: prioridade para prédios baixos e médios, integração de grandes parques e áreas verdes, utilização de materiais mais frescos e implementação de formas de ventilação nos edifícios, além da participação de comunidades locais para diminuição de desigualdades (Joshi *et al.*, 2024).

CONCLUSÃO

As ondas de calor no Brasil ocorrem majoritariamente nas estações quentes (primavera e verão), mas há variação dependendo da macrorregião, o que também impacta em características específicas como a umidade das OC. Observou-se que nas regiões Norte e Centro-Oeste as OC acontecem na primavera, o período mais seco dessas cidades, e nas demais regiões elas são mais frequentes no verão, acompanhadas de umidade relativa do ar mais alta.

Considerando o padrão de aumento na frequência de ocorrência das OC na maior parte das cidades estudadas, torna-se fulcral a adoção de medidas de adaptação para os cenários de risco por elas apresentados, para mitigação dos impactos desses ECE visando a proteção da população, especialmente aqueles mais vulneráveis ou vulnerabilizados. Isso é ainda mais importante nas cidades de Belo Horizonte, Belém, Brasília, Goiânia, Manaus e Recife, que foram identificadas com maior ameaça de OC e que são cidades nos quais o debate sobre tais eventos ainda é incipiente.

As principais limitações do presente estudo estão relacionadas aos dados utilizados. Primeiramente, foi necessário utilizar dados de fontes diferentes, pois nem todas as cidades elencadas possuem estações convencionais mantidas pelo mesmo órgão. Além disso, é importante notar que a paisagem do local de cada estação é diferente e isso pode impactar o microclima e dificultar o comparativo, de forma que seria interessante um estudo de descrição da paisagem e do clima específico de cada uma. Ademais, como os dados trabalhados contemplam um período muito extenso (43 anos), é inevitável serem encontradas falhas ou inconsistências. Porém, os tipos de falhas e erros e, portanto, das correções necessárias, variou consideravelmente entre cada uma das cidades, de forma que foi necessário descrever detalhadamente todos os tratamentos realizados no banco de dados (material suplementar 1) para garantir a replicabilidade do estudo.

Os resultados obtidos neste estudo contribuem de maneira significativa para o campo da pesquisa sobre ondas de calor (OC) em cidades brasileiras, ao apontarem a necessidade de maior atenção e aprofundamento nesse tema. No entanto, reconhece-se que tais resultados ainda podem ser insuficientes para subsidiar, de forma robusta, a criação de um sistema nacional consolidado para o monitoramento de OC no Brasil, em especial para a aplicação no setor saúde. Nesse contexto, destaca-se a importância de intensificar os estudos voltados às OC, de modo a possibilitar uma compreensão mais aprofundada sobre o comportamento desses eventos em diferentes cidades e regiões do país, considerando suas particularidades em termos de frequência, intensidade e duração. Além disso, sugerimos que estudos futuros investiguem as diferenças de impactos à saúde entre OC (períodos de alguns dias) e extremos de temperatura (picos pontuais), estudando, por exemplo, possíveis vantagens de diagnósticos de extremos de temperatura pode apresentar em contrapartida ao diagnóstico de OC. Adicionalmente, investigações futuras poderiam avançar na mensuração dos impactos sociais, ambientais e econômicos associados às OC, fornecendo subsídios mais consistentes para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção, mitigação e redução dos riscos decorrentes desses eventos extremos. Sugere-se, ainda, a realização de análises comparativas entre as metodologias de detecção de tendências utilizadas neste estudo e outros estudos sobre o mesmo tema, de modo a avaliar suas contribuições e limitações no contexto brasileiro.

Financiamento

O estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), chamada N° 18/2023 (processo 444938/2023-0) e pelo Instituto Francês de Pesquisa para o Desenvolvimento (IRD) (id: 15AYCA622286). O apoio dessas instituições foi fundamental para a viabilização da pesquisa, mas a independência editorial e científica foi mantida.

Submetido em 1 de junho de 2025.

Aceito para publicação em 23 de junho de 2026.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Ilhas de calor urbano em cidades de pequeno e médio porte no Brasil e o contexto das mudanças climáticas. **Confins**. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia, n. 46, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.31403>

ARAUJO MORAIS, Joao Henrique *et al.* Quantifying heat exposure and its related mortality in Rio de Janeiro City: evidence to support Rio's recent heat protocol. **medRxiv**, p. 2025.01. 17.25320740, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1101/2025.01.17.25320740>

BARCELLOS, Christovam *et al.* Climate change, thermal anomalies, and the recent progression of dengue in Brazil. **Scientific reports**, v. 14, n. 1, p. 5948, 2024. DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56044-y>

BITENCOURT, Daniel Pires *et al.* Frequência, Duração, Abrangência Espacial e Intensidade das Ondas de Calor no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 506-517, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150077>

BORGES, Vanessa Oliveira *et al.* Zonas climáticas locais e as ilhas de calor urbanas: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 98-127, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15755>

CHENG, Jian *et al.* Heatwave and elderly mortality: An evaluation of death burden and health costs considering short-term mortality displacement. **Environment international**, v. 115, p. 334-342, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.041>

DE MELO, Jordanna Sousa; DE BRITO, José Ivaldo Barbosa. Análise de ondas de calor e de frio em passo fundo/rs por quatro diferentes métodos. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782)**, v. 3, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2018vol3n3352>

ELY, Deise Fabiana; KOGIMA, Karitha Campos. Índices térmicos para a identificação de ondas de calor aplicados ao estado do Paraná, Brasil. **Geo UERJ**, n. 34, p. e40947-e40947, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.40947>

FERON, Sarah *et al.* Observations and projections of heat waves in South America. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 8173, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>

FLOSS, Mayara; BARROS, Enrique Falceto. Estresse por calor na Atenção Primária à Saúde: uma revisão clínica. **Revista Brasileira de Medicina de Família e Comunidade**, v. 15, n. 42, p. 1948-1948, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5712/rbmfc15(42)1948>

GEIRINHAS, João Lucas *et al.* Heat-related mortality at the beginning of the twenty-first century in Rio de Janeiro, Brazil. **International journal of biometeorology**, v. 64, p. 1319-1332, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01908-x>

GEIRINHAS, João Lucas *et al.* Caracterização climática de ondas de calor no Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11137/2018_3_333_350>

GUO, Yuming *et al.* Heat wave and mortality: a multicountry, multicommunity study. **Environmental health perspectives**, v. 125, n. 8, p. 087006, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp1026>

HATVANI-KOVACS, Gertrud *et al.* Policy recommendations to increase urban heat stress resilience. **Urban Climate**, v. 25, p. 51-63, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.001>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Sexto Relatório de Avaliação (AR6) - Mudanças Climáticas 2021: Relatório de Síntese**. IPCC. 2022. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

JOSHI, Ketaki *et al.* Understanding the synergy between heat waves and the built environment: a three-decade systematic review informing policies for mitigating urban heat island in cities. **Sustainable Earth Reviews**, v. 7, n. 1, p. 25, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42055-024-00094-7>

LIBONATI, Renata *et al.* Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 1, p. 015005, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle>

LIBONATI, Renata *et al.* Drought–heatwave nexus in Brazil and related impacts on health and fires: A comprehensive review. **Annals of the new York Academy of Sciences**, v. 1517, n. 1, p. 44-62, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1111/nyas.14887>

MANDÚ, Tiago Bentes *et al.* Avaliação de tendência nas ondas de calor registradas em Manaus/AM, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 405-425, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.73931>

MIRANDA, Vitor FVV *et al.* Heat stress in South America over the last four decades: a bioclimatic analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 911-928, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04668-x>

Monteiro dos Santos, Djacinto *et al.* Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. **PLoS one**, v. 19, n. 1, p. e0295766, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295766>

Monteiro dos Santos, Djacinto *et al.* Compound dry-hot-fire events connecting Central and Southeastern South America: an unapparent and deadly ripple effect. **npj Natural Hazards**, v. 1, n. 1, p. 32, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00031-w>

NAIRN, John R.; FAWCETT, Robert JB. The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. **International journal of environmental research and public health**, v. 12, n. 1, p. 227-253, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph120100227>

REIS, Nicolle Cordero Simões dos. **Variabilidade das ondas de calor na região subtropical do Brasil.** 2017. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SILVA, Nathiel de Sousa *et al.* Ocorrência de Ondas de Calor com Dados de Reanálises em áreas do Nordeste, Amazônia e Centro-Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 441-451, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863740067>

SILVEIRA, Rafael Brito *et al.* Ondas de calor nas capitais do Sul do Brasil e Montevidéu-Uruguai. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1259-1276, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1259-1276>

THOMPSON, Ross *et al.* Heatwave mortality in summer 2020 in England: An observational study. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 10, p. 6123, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19106123>

WMO. World Meteorological Organization. **State of the Climate 2024**. Update for COP29. 2024.

YANG, Jun *et al.* Heatwave and mortality in 31 major Chinese cities: definition, vulnerability and implications. **Science of The Total Environment**, v. 649, p. 695-702, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.332>

YU, G. W.; SETO, Edmund; HAI, W. X. Environment and climate change with vector-born diseases. *In*: **Proceedings of the 5th international academic conference on environmental and occupational medicine**. Dujiangyan. 2010.