

Estado da publicação: O preprint não foi publicado em outro meio.

Mortalidade Associada ao Calor Extremo: definição de marcadores térmicos para um sistema de alerta em Belo Horizonte – MG

Taíza Lucas, Amanda Magalhães, Daniele Ferreira, Gabriel Camilo, Magda Parajára, Fernanda Menezes, Aline Sales, Waleska Teixeira Caiaffa

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.15303>

Submetido em: 2026-03-18

Postado em: 2026-03-20 (versão 1)

(AAAA-MM-DD)

Folha de Rosto

Mortalidade Associada ao Calor Extremo: definição de marcadores térmicos para um sistema de alerta em Belo Horizonte – MG

Heat-Related Mortality: Defining Thermal Markers for a Heat Alert System in Belo Horizonte, MG, Brazil

Título resumido: Marcadores de temperatura e alertas de calor

Taíza de Pinho Barroso Lucas (taizaead@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5554-5161>)
1,2,3

Amanda Silva Magalhães (amandasmagalhaes@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5112-2866>)^{2,3}

Daniele Gomes Ferreira (danieleff00@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9890-1963>)²

Gabriel Andrade Camilo (gabrielcamiloufmg@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2333-070X>)^{1,4}

Magda do Carmo Parajára (magdaparajara@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7019-1365>)^{2,3}

Fernanda Carvalho de Menezes (menezes.bhe@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2413-1633>)^{2,3}

Aline Dayrell Ferreira Sales (dayrellferreira@yahoo.com.br; <https://orcid.org/0000-0002-7848-6835>)^{2,3}

Waleska Teixeira Caiaffa (caiaffawaleska@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5043-4980>)^{1,2,3}

¹Coordenadoria Especial de Mudanças Climáticas da Prefeitura de Belo Horizonte

²Observatório de Saúde Urbana de Belo Horizonte da Universidade Federal de Minas Gerais (OSUBH-UFGM)

³Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública da Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Minas Gerais

⁴Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais

Autor correspondente: Taíza de Pinho Barroso Lucas, Residente Pós-doutoral em Saúde Pública, Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: taizaead@gmail.com. End.: Rua Tenente Brito de Melo, 516/504, Barro Preto – Belo Horizonte – Minas Gerais. CEP: 30180-072.

Resumo

Objetivo: Estimar marcadores de temperatura máxima diária para definição de níveis de alerta de ondas de calor em Belo Horizonte.

Métodos: Estudo de série temporal (2014–2024) com dados diários de temperatura do ar da estação automática da Pampulha (Instituto Nacional de Meteorologia) e óbitos por todas as causas do Sistema de Informação sobre Mortalidade. A associação entre temperatura máxima diária e mortalidade foi estimada por regressão quasi-Poisson com modelos de defasagem distribuída não linear, considerando defasagens de 0 a 21 dias e ajuste para tendência temporal, sazonalidade e dia da semana. A temperatura de mortalidade mínima foi utilizada como referência para estimativa de riscos relativos, e percentis elevados da temperatura subsidiaram a definição de limiares operacionais.

Resultados: A temperatura de mortalidade mínima foi 29,3°C. O risco de mortalidade aumentou progressivamente nos percentis superiores, com riscos relativos de 1,04 no percentil 90; 1,09 no percentil 95; 1,17 no percentil 98; e 1,26 no percentil 99. Foram propostos quatro níveis de alerta combinando limiares de temperatura máxima e persistência térmica: nível 1 ($\geq 32,0^{\circ}\text{C}$), nível 2 ($\geq 33,1^{\circ}\text{C}$), nível 3 ($\geq 34,6^{\circ}\text{C}$) e nível 4 ($\geq 35,8^{\circ}\text{C}$). Observou-se maior frequência e intensidade de ondas de calor em anos associados ao fenômeno El Niño.

Conclusão: Marcadores de alerta baseados em percentis elevados da temperatura máxima combinados à persistência térmica produziram níveis coerentes com o aumento do risco de mortalidade no município, com potencial aplicação na vigilância e resposta em saúde pública.

Palavras-chave: Ondas de calor; Mortalidade; Temperatura ambiental; Estudos de séries temporais; Vigilância em saúde pública.

Abstract

Objective: To estimate daily maximum temperature markers for defining heatwave alert levels in Belo Horizonte.

Methods: A time-series study (2014–2024) was conducted using daily air temperature data from the Pampulha automatic weather station of the National Institute of Meteorology and all-cause mortality data from the Mortality Information System. The association between daily maximum temperature and mortality was estimated using quasi-Poisson regression with distributed lag non-linear models, considering lags from 0 to 21 days and adjusting for long-term trend, seasonality, and day of the week. The minimum mortality temperature was used as the reference for estimating relative risks, and high percentiles of temperature were used to define operational thresholds.

Results: The minimum mortality temperature was 29.3°C. Mortality risk increased progressively at higher percentiles, with relative risks of 1.04 at the 90th percentile, 1.09 at the 95th percentile, 1.17 at the 98th percentile, and 1.26 at the 99th percentile. Four alert levels were proposed by combining maximum temperature thresholds and thermal persistence: level 1 ($\geq 32.0^\circ\text{C}$), level 2 ($\geq 33.1^\circ\text{C}$), level 3 ($\geq 34.6^\circ\text{C}$), and level 4 ($\geq 35.8^\circ\text{C}$). A higher frequency and intensity of heatwaves were observed in years associated with the El Niño phenomenon.

Conclusion: Alert markers based on high percentiles of maximum temperature combined with thermal persistence produced levels consistent with the increase in mortality risk in the municipality, with potential application in public health surveillance and response.

Keywords: Heatwaves; Mortality; Ambient temperature; Time series studies; Public health surveillance.

Introdução

As ondas de calor têm apresentado aumento em frequência e intensidade no contexto do aquecimento global, configurando-se como um dos principais extremos climáticos associados às mudanças climáticas recentes¹. Em ambientes urbanos, esses eventos produzem impactos desproporcionais sobre a saúde, ampliando a morbidade e a mortalidade em função da densidade populacional, das características do ambiente construído e das desigualdades socioambientais².

Não existe uma definição universal de “onda de calor”, pois sua caracterização depende da climatologia local e dos impactos associados. Organismos internacionais recomendam abordagens orientadas ao risco³⁻⁴, identificadas por limiares térmicos relativos à distribuição histórica local. No Brasil, o critério operacional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) adota temperatura máxima diária ≥ 5 °C acima da média mensal por pelo menos cinco dias⁵, definição que pode não contemplar a diversidade geoclimática do território.

Belo Horizonte (BH) apresenta eventos de calor concentrados na primavera, período de transição para o regime úmido com extremos térmicos típicos do clima Tropical Continental⁶⁻⁷. Evidências indicam que a frequência e intensidade das ondas de calor aumentam em anos de El Niño⁸, com intensificação progressiva na América do Sul entre 1979 e 2023⁹.

Os efeitos das temperaturas elevadas incluem sobrecarga dos sistemas cardiovascular e respiratório e redução da capacidade de aclimação fisiológica¹⁰⁻¹¹. As manifestações variam de agravos leves a óbito, com riscos acentuados para idosos e populações em situação de vulnerabilidade social¹²⁻¹³.

Diversos países estruturaram sistemas de alerta ajustados às suas realidades climáticas¹⁴⁻¹⁵⁻¹⁶⁻¹⁷. No Reino Unido, o sistema evoluiu para uma orientação explícita ao impacto à saúde¹⁸. Em Hong Kong, desenvolveu-se o Hong Kong Heat Index¹⁹, enquanto, no Brasil, o Rio de Janeiro adotou um índice que combina temperatura e umidade relativa para orientar ações preventivas²⁰⁻²¹.

Em BH, o aprimoramento do Plano Municipal de Gestão de Riscos e Desastres Climáticos demanda parâmetros epidemiologicamente fundamentados para orientar respostas intersetoriais. Este estudo teve como objetivo estabelecer limiares de temperatura máxima diária para definição de níveis de alerta e caracterização de ondas de calor em Belo Horizonte, fornecendo base teórico-metodológica para a gestão de riscos climáticos no município.

Métodos

Área de Estudo

O município de Belo Horizonte, com uma área territorial de 331,4 km², localiza-se na região Sudeste do Brasil e abriga aproximadamente 2,3 milhões de habitantes ²². O clima enquadra-se no Tropical Continental de Altitude, inserido no Subdomínio Tropical Montano e no Domínio Tropical Brasil Central, conforme classificação atualizada da climatologia brasileira proposta por Novais⁶. Essa abordagem incorpora elementos atmosféricos, fisiográficos e dinâmicos regionais, representando uma sistematização recente da classificação climatológica do território nacional.

As características físicas da cidade se distinguem entre as porções Sudoeste–Sul e Norte. A porção Sul apresenta formações do Supergrupo Minas, compostas por rochas metassedimentares resistentes ao intemperismo, associadas a relevo ondulado e dissecado, com altitudes superiores a 1.300 m ²³. Essas variações geomorfológicas modulam o comportamento térmico urbano, sobretudo em áreas adjacentes à Serra do Curral, que apresentam menores temperaturas médias e maior volume de precipitação em comparação com outras áreas do município ⁷. A interação entre topografia, altitude, gradientes térmicos e a baixa umidade relativa associada aos períodos de atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), somada à elevada impermeabilização do solo, contribui para padrões distintos de exposição ao calor no território municipal.

Fontes de dados

Os dados de mortalidade foram obtidos do Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM). Foram extraídos os registros diários de óbitos por todas as causas de residentes de Belo Horizonte, abrangendo o decênio 2014–2024. A opção pela mortalidade geral visa capturar o impacto sistêmico do estresse térmico sobre a saúde pública municipal.

Os dados meteorológicos são provenientes da rede de monitoramento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O município dispõe de uma estação convencional e de duas automáticas, instaladas em setores com características geoecológicas distintas. Para este estudo, selecionou-se a Estação Automática da Pampulha (EAP; Código A521; lat: -19,88; long: -43,97), situada na porção noroeste da capital. A escolha fundamenta-se na representatividade espacial e altimétrica da estação, situada a 854 m de altitude — cota próxima ao valor médio do sítio urbano belo-horizontino. Apesar da complexidade da morfologia urbana e da consequente formação de microclimas, a EAP encontra-se em posição estratégica em relação ao centroide da mancha urbana, oferecendo uma síntese dos parâmetros climáticos da cidade. Foram utilizados os registros diários de temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin), bem como as respectivas médias mensais, para o período 2014–2024. As anomalias térmicas foram calculadas tendo como referência as Normais Climatológicas de 1991–2020 ²⁴.

Análises Estatísticas

Etapa 1 – Análise Exploratória dos dados

Realizou-se inicialmente uma análise exploratória para caracterizar o comportamento das Tmax e Tmin no decênio 2014–2024, contrastando-as com as Normais Climatológicas de 1991–2020 ²⁴. Identificaram-se episódios de ondas de calor com base no desvio térmico de 5 °C acima da média climatológica mensal, critério operacional do INMET ⁵. Todavia, neste estudo, ajustou-se a persistência temporal de três dias consecutivos.

Esta calibração fundamenta-se nas diretrizes da OMS e OMM ³, que preconizam a adaptação de critérios às especificidades climatológicas locais, sendo frequente a adoção de durações de dois a três dias em abordagens orientadas a impactos na saúde³. Ressalta-se, também, que o limiar de três dias já é adotado pela Defesa Civil Municipal na gestão de riscos de Belo Horizonte, o que confere validade operacional e institucional aos marcadores propostos. Após a identificação dos episódios, verificou-se a influência da variabilidade climática interanual, especificamente das fases do El Niño e de La Niña ²⁵, sobre a magnitude e duração dos eventos. Para as modelagens subsequentes, optou-se pelo uso da Tmax, dada a sua ampla aplicação em definições globais de extremos térmicos ^{26–27} e sua consolidada associação com desfechos de mortalidade na literatura epidemiológica ^{28–29–30–31–32–33}.

Etapa 2 – Identificação de Marcadores de Calor Persistente

Para definir o marcador térmico mais representativo dos eventos extremos, realizaram-se análises de correlação e de regressão linear a partir dos episódios identificados na Etapa 1. Aplicou-se inicialmente a correlação de Pearson entre a Tmax e as temperaturas de bulbo seco observadas às 06h, 10h, 14h e 18h. Posteriormente, ajustaram-se modelos de regressão linear, simples e múltipla, para avaliar o poder explicativo de diferentes combinações horárias ao longo do ciclo diário na predição da Tmax.

Etapa 3 – Variação Intra e Interdiária da Temperatura

Investigou-se a variação da Tmax ao longo do ciclo diurno e entre os dias por meio de um Modelo Aditivo Generalizado (GAM)³⁴, com finalidade descritiva. A Tmax foi definida como variável resposta, tendo a hora do dia e a sequência temporal como covariáveis. O modelo utilizou splines cíclicos para a hora do dia e splines cúbicos penalizados para a dimensão temporal, permitindo ajustar tendências sazonais e de longo prazo. Essa abordagem possibilitou modelar as variações intra- e interdiárias sem superajuste, visando caracterizar a persistência térmica durante os episódios de ondas de calor³⁴.

Etapa 4 – Modelagem da associação entre temperatura e mortalidade

Empregou-se o modelo não linear de defasagem distribuída (Distributed Lag Non-linear Model – DLNM), com distribuição quasi-Poisson²⁸⁻³⁵, para estimar a associação entre a temperatura do ar e a mortalidade por todas as causas. Na dimensão exposição-resposta, utilizou-se um spline cúbico natural com nós internos nos percentis 50 e 90 da distribuição térmica³⁶⁻³⁷. Para a dimensão defasagem-resposta, aplicou-se um spline cúbico natural com três nós internos igualmente espaçados na escala logarítmica, considerando uma defasagem de 0 a 21 dias³⁸. O ajuste para sazonalidade e tendências de longo prazo foi realizado por meio de uma variável de estrato temporal composta por ano, mês e dia da semana. A seleção das especificações finais baseou-se no menor valor do Critério de Informação de Akaike (Q-AIC), conforme detalhado na Tabela S1 (Material Suplementar).

Previamente à escolha da Tmax como preditor principal, avaliou-se a aplicabilidade do índice Heat Adjusted Air Temperature (HAAT). Contudo, a análise demonstrou que a conversão do limiar mínimo estabelecido pela NOAA (80°F, aproximadamente 26,7°C) e a exigência de

umidade relativa (UR) $\geq 40\%$ inviabilizam a aplicação do índice ao regime climático de Belo Horizonte, caracterizado por períodos de baixa umidade, particularmente durante os episódios de ondas de calor (Figura S2 – Material Suplementar). Tal limitação difere das condições observadas em estudos de calor e mortalidade nos municípios de São Paulo e do Rio de Janeiro²⁰, nos quais a maritimidade exerce maior influência sobre os parâmetros térmicos locais.

Etapa 5 – Limiares de Risco e Parâmetros para o Protocolo de Calor

Com base nos resultados do modelo DLNM, estimou-se a Temperatura de Mortalidade Mínima (TMM), definida como o valor associado ao menor risco de mortalidade. Para evitar estimativas instáveis nos extremos da distribuição, a TMM foi limitada aos percentis 1 a 99 da Tmax diária³⁹. Os riscos relativos (RR) e seus respectivos intervalos de confiança de 95% (IC95%) foram estimados utilizando a TMM como valor de referência.

Para avaliar a robustez dos achados, realizaram-se análises de sensibilidade testando distintas posições de nós na dimensão exposição–resposta e diferentes períodos de defasagem, priorizando-se o modelo com melhor ajuste global via Q-AIC⁴⁰. Com base nos RR estimados, na TMM e na persistência de dias consecutivos de calor extremo, definiram-se os parâmetros térmicos que subsidiaram os níveis de alerta do Protocolo de Calor do município. As análises foram realizadas no software R (versão 4.4.2), utilizando os pacotes *dlm*⁴¹ e *gmm*^{42–43}, com processamento descritivo complementar em planilhas eletrônicas.

Resultados

Etapa 1

Os dados meteorológicos (2014–2024) evidenciam desvios sistemáticos em relação às Normais Climatológicas de 1991–2020. A temperatura máxima média do período foi de 28,4°C, representando um incremento de aproximadamente 1°C sobre o padrão histórico, enquanto a média das mínimas (17,6°C) manteve-se ligeiramente abaixo da referência climatológica.

As anomalias mensais revelam que a Tmax apresentou desvios positivos em todos os anos analisados (Figura 1A), com variações entre +0,2°C e +2,3°C. Este aquecimento é pronunciado no trimestre setembro–novembro, com pico médio em setembro (aproximadamente +2,3°C), caracterizando a intensificação e o prolongamento do aquecimento primaveril. Tal

comportamento é ratificado pelos valores absolutos (Figura 1B), nos quais as médias das máximas superam consistentemente os 30°C nesse período, evidenciando o estresse térmico sazonal a que a população de Belo Horizonte está exposta.

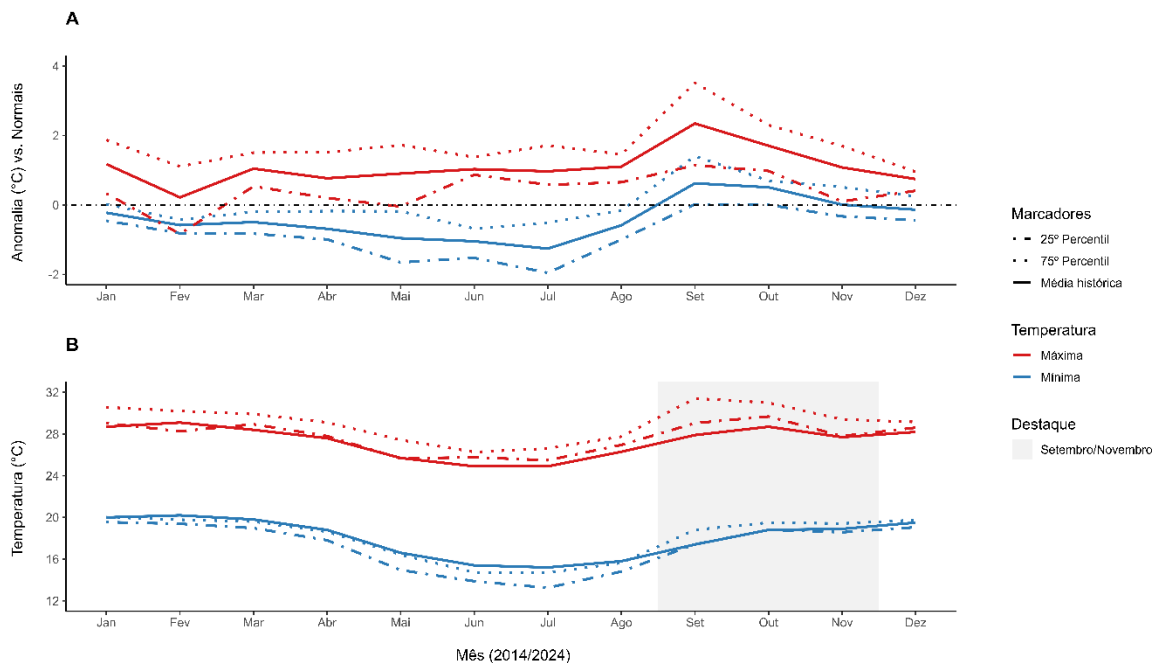


Figura 1. Anomalias mensais médias (2014–2024) da Tmax e Tmin em relação às Normais Climatológicas 1991–2020 (A) e valores médios mensais absolutos (B). As linhas tracejadas indicam os percentis 25 e 75, e o sombreamento destaca o período de setembro a novembro, quando os desvios positivos de Tmax são mais intensos. Fonte de dados: INMET.

Em contraste, a Tmin apresentou anomalias negativas persistentes entre março e agosto (Figura 1A), com mínimo médio em julho (-1,3 a -1,5°C), indicando maior resfriamento noturno invernal. A partir de setembro, observa-se uma inflexão no padrão térmico, com elevação gradual da Tmin até dezembro, aproximando-se ou superando as normais climatológicas na maioria dos anos — exceto em 2021 e 2022. Esse padrão evidencia um aquecimento assimétrico, dominado pelo incremento das temperaturas máximas, especialmente na transição inverno–primavera (Figura 1B). Tal assimetria é central para a avaliação da exposição urbana, visto que os impactos à saúde em Belo Horizonte mostram-se mais sensíveis à elevação das temperaturas diurnas.

A partir dos registros diários de Tmax, identificaram-se as ondas de calor anuais (Tabela 1). O ano de 2015, sob influência de um El Niño de intensidade muito forte, registrou o maior número de eventos da série, concentrados entre setembro e novembro. Os anos de 2019 e 2024 registraram quatro episódios cada. Embora 2023 tenha contabilizado apenas três eventos, o ano concentrou a onda de calor de maior duração e intensidade do decênio. Nesse período, registrou-

se a Tmax absoluta da série 38,4°C, excedendo em mais de 10°C a normal climatológica mensal, acompanhada por elevações concomitantes nas temperaturas mínimas.

Tabela 1: Ondas de calor em Belo Horizonte, MG, de 2014 a 2024.

Ano	Data Inicial	Data Final	Número de Dias
2014	29/09/2014	01/10/2014	3
	12/10/2014	15/10/2014	4
	17/10/2014	19/10/2014	3*
2015	22/09/2015	27/09/2015	6*
	14/10/2015	17/10/2015	4*
	20/10/2015	22/10/2015	3*
	03/11/2015	07/11/2015	5*
	10/11/2015	13/11/2015	4*
2016	19/10/2016	21/10/2016	3**
2017	20/10/2017	22/10/2017	3**
2018	-	-	-
2019	10/09/2019	13/09/2019	4
	17/09/2019	21/09/2019	5
	04/11/2019	06/11/2019	3
	08/11/2019	11/11/2019	4
2020	18/09/2020	20/09/2020	3**
	27/09/2020	03/10/2020	7**
	06/10/2020	09/10/2020	4**
2021	09/09/2021	11/09/2021	3**
	13/09/2021	15/09/2021	3**
2022	-	-	-
2023	11/07/2023	13/07/2023	3*
	23/09/2023	28/09/2023	6*
	09/11/2023	19/11/2023	11*
2024	01/05/2024	03/05/2024	3*
	12/05/2024	14/05/2024	3*
	23/08/2024	25/08/2024	3
	02/09/2024	05/09/2024	4

Legenda: Ocorrência de El Niño (*) e LaNiña (**). Fonte de dados: INMET e NOAA.

Etapa 2

A Tabela 2 apresenta os modelos de regressão entre as temperaturas horárias e a Tmax durante episódios de ondas de calor (2014–2024). A temperatura das 06h (T06h) apresentou correlação

moderada com a Tmax ($R = 0,46$), explicando 21% de sua variabilidade, desempenho semelhante ao observado para a temperatura das 10h ($R^2 = 0,20$).

Tabela 2: Modelos de regressão linear entre temperaturas horárias e a Tmax durante episódios de ondas de calor em Belo Horizonte de 2014–2024

Modelo	Preditores	R	R ²	R ² ajust.	Erro-padrão (°C)
M1	T06h	0,46	0,21	0,20	1,21
M2	T10h	0,44	0,20	0,19	1,22
M3	T14h	0,80	0,64	0,64	0,81
M4	T10h + T14h + T18h	0,88	0,77	0,76	0,66

Fonte de dados: INMET.

Em contraste, a temperatura das 14h (T14h) revelou forte associação com a Tmax ($R = 0,80$), respondendo por 64% da variabilidade observada com o menor erro-padrão isolado ($0,81^{\circ}\text{C}$). O modelo múltiplo (M4), integrando as leituras das 10h, 14h e 18h, obteve o melhor ajuste ($R^2_{\text{ajust}} = 0,76$), indicando que a persistência térmica ao longo do ciclo diurno é o principal determinante da magnitude das ondas de calor no município.

Etapa 3

A modelagem via GAM ratificou um padrão diurno consistente durante os episódios de calor extremo. O comportamento observado corrobora os achados da Etapa 2, consolidando a temperatura das 14h como o marcador central da Tmax em Belo Horizonte. Verificou-se uma elevação térmica progressiva no período matutino, com o platô máximo situando-se entre 14h e 16h, seguido por um declínio gradual no período noturno. O ajuste do spline temporal revelou uma marcada persistência térmica entre dias sucessivos, caracterizando o prolongamento da exposição ao calor e a manutenção de limiares críticos de saúde ao longo de cada episódio de onda de calor.

Etapa 4

No decênio analisado, a média diária de óbitos por todas as causas foi de 47,6. O incremento de mortalidade observado em 2020 associou-se ao contexto pandêmico, sem correlação com extremos térmicos. Em contraste, os episódios de calor de setembro de 2015 e, mais notadamente, de novembro de 2023, exibiram um padrão consistente de elevação na

mortalidade concomitante aos picos de Tmax e Tmin e à queda acentuada da UR (Figura 2). Nota-se que, durante as ondas de calor, todos os valores de UR registraram-se abaixo de 40%.

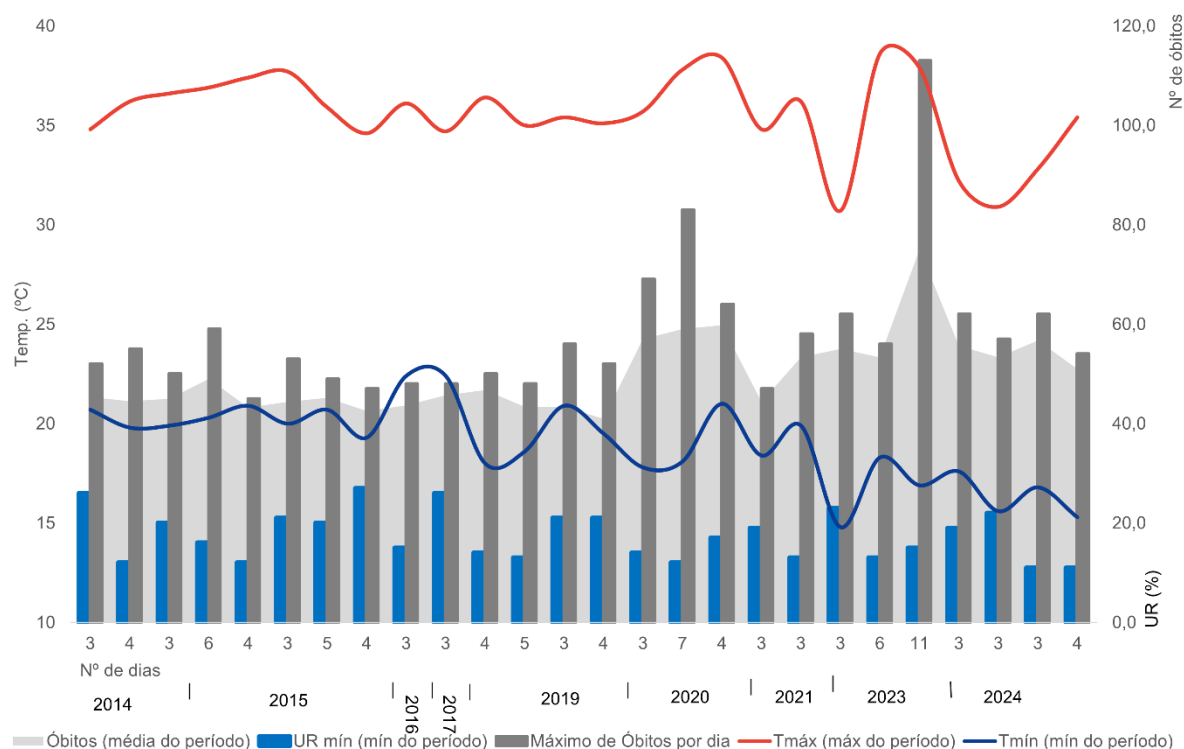


Figura 2 - Eventos de ondas de calor em Belo Horizonte (2014–2024) e relação com mortalidade e variáveis meteorológicas. Colunas: número máximo diário de óbitos por evento; área sombreada: média de óbitos por período; linhas: Tmax (vermelho) e Tmin (azul); barras azuis: umidade relativa mínima; eixo inferior: duração (nº de dias). Fonte: INMET e DATASUS.

A análise estratificada revelou que aproximadamente 40% dos dias avaliados apresentaram temperaturas acima da Temperatura de Mortalidade Mínima (TMM = 29,3 °C). Observou-se um efeito dose-resposta progressivo: a média de óbitos elevou-se de 48,0/dia (acima da TMM) para 55,1/dia nos dias com Tmax \geq 35,8°C (P99), conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Número de dias e média de mortes por faixa de temperatura (2014-2024) em Belo Horizonte, MG.

Tmax (°C)	Número de Dias	Média de mortes por dia
$\geq 29.3^{\circ}\text{C}$ (TMM; P59)	1626	48,0
$\geq 32.0^{\circ}\text{C}$ (P90)	423	48,7
$\geq 33.1^{\circ}\text{C}$ (P95)	197	49,8
$\geq 34.6^{\circ}\text{C}$ (P98)	80	51,4
$\geq 35.8^{\circ}\text{C}$ (P99)	40	55,1

Fonte de dados: INMET e DATASUS.

A modelagem via DLNM confirmou a relação não linear e o formato em "U" da curva de risco (Figura 3). Acima da TMM (P59), o risco relativo (RR) de mortalidade apresentou crescimento acentuado em percentis elevados: RR=1,09 (IC95%: 1,04–1,14) no P95 e atingindo RR=1,26 (IC95%: 1,13–1,41) no P99, considerando o efeito cumulativo de 0 a 21 dias.

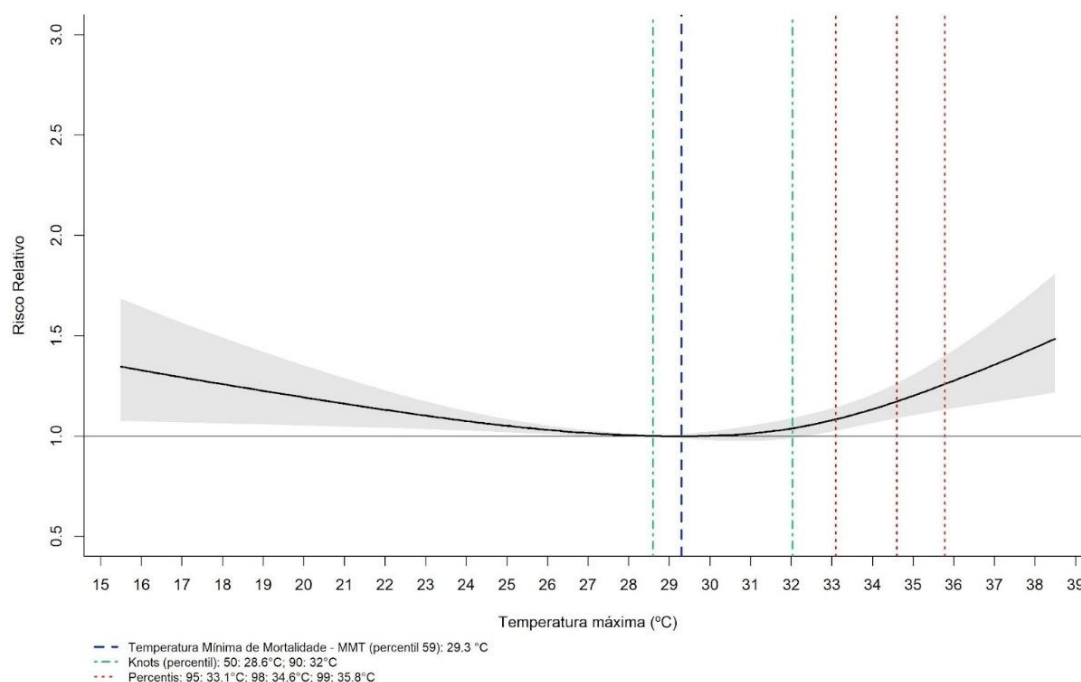


Figura 3: Associação cumulativa entre a Tmax e a mortalidade por todas as causas em Belo Horizonte (lag 0–21 dias), tendo como referência a TMM. A linha contínua representa a curva exposição–resposta e a área sombreada o intervalo de confiança de 95%. A linha tracejada azul indica a TMM (percentil 59), as linhas pontilhadas verdes os nós do modelo (percentis 50 e 90) e as linhas tracejadas–ponto vermelhas os percentis extremos (95, 98 e 99). Dados: INMET e DATASUS.

Etapa 5

A partir da modelagem DLNM, definiram-se os níveis de alerta para o Protocolo de Belo Horizonte (Tabela 4), adotando-se a Tmax como variável de referência. Os limiares térmicos basearam-se na TMM (29,3°C) e nos percentis 90, 95, 98 e 99, que apresentaram aumentos progressivos no risco relativo de mortalidade.

Tabela 4: Níveis de alerta de calor em Belo Horizonte, MG.

Nível / Alerta	Critérios para o nível de alerta (Tmax e nº de dias consecutivos)	Classificação	Risco à Saúde
Inicial	$29,3^{\circ}\text{C} < \text{Tmax} < 31,9^{\circ}\text{C}$	ATENÇÃO	Risco Muito Baixo

Alerta 1	$32^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 33,1^{\circ}\text{C}$ 3 dias consecutivos	ONDA DE CALOR LEVE	Risco Baixo
Alerta 2	$33,2^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 34,6^{\circ}\text{C}$ 3 dias consecutivos	ONDA DE CALOR MODERADA	Risco Moderado
Alerta 3	$34,7^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 35,8^{\circ}\text{C}$ 3 dias consecutivos	ONDA DE CALOR INTENSA	Risco Alto
Alerta 4	$T_{\text{max}} > 35,8^{\circ}\text{C}$ 2 dias consecutivos	ONDA DE CALOR EXTREMA	Risco Muito Alto

Fonte de dados: INMET e DATASUS.

O nível inicial (Atenção) compreende o intervalo imediatamente superior à TMM (29,3 a 31,9 °C). Para os níveis de Alerta 1, 2 e 3 (ondas de calor leve, moderada e intensa), estabeleceu-se o critério de três dias consecutivos com temperaturas entre 32,0–33,1°C, 33,2–34,6°C e 34,7–35,8°C, respectivamente. Para o nível de Alerta 4 (extremo), adotou-se o limiar de dois dias consecutivos acima de 35,8°C (P99), justificando-se a redução da persistência mínima em função do risco crítico observado neste percentil.

A distribuição horária (Figura 4) confirma um padrão diurno bem definido, com a concentração dos picos térmicos entre 12h e 17h e valor máximo entre 14h e 15h. Esse padrão é particularmente evidente no nível de Alerta 4, reforçando a Tmax como o marcador preditivo mais robusto para a operacionalização do sistema de alerta e para a definição de janelas de maior vulnerabilidade térmica em BH.

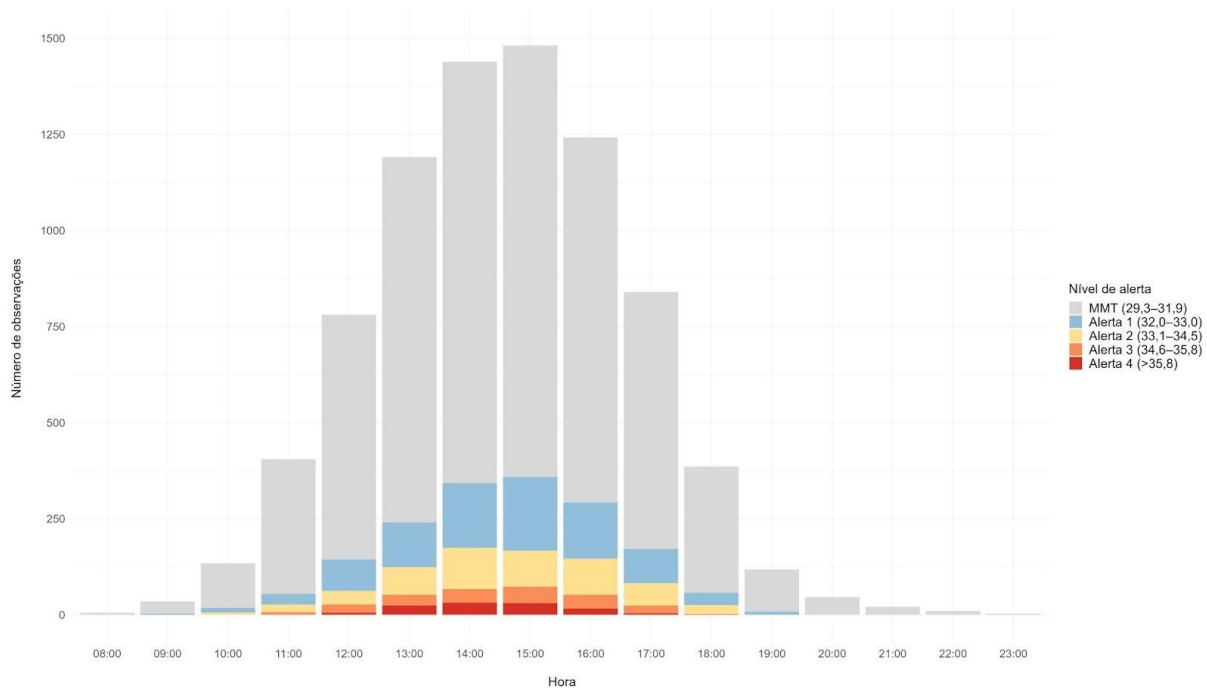


Figura 4 - Distribuição horária da temperatura máxima por níveis de alerta em Belo Horizonte, MG, de 2014 a 2024. Fonte de dados: INMET.

Discussões

Os resultados indicam que os impactos do calor extremo sobre a mortalidade em Belo Horizonte estão associados à elevação da Tmax e à persistência de dias consecutivos com valores extremos. Esse padrão ratifica as limitações das definições exclusivamente meteorológicas de ondas de calor quando aplicadas à saúde pública e sustenta a adoção de critérios baseados em impacto, calibrados às especificidades climáticas locais, conforme preconizado pela OMS e [pela](#) OMM (3,4).

A relação não linear entre temperatura e mortalidade, com formato em "U" e TMM em 29,3°C, converge com evidências de estudos multicêntricos globais ³⁸⁻³⁹⁻⁴⁰. Contudo, diferentemente de regiões de clima temperado, onde o frio exerce peso substancial, o padrão em Belo Horizonte revela um aumento mais acentuado do risco em temperaturas acima da TMM. Esse comportamento é coerente com achados em cidades tropicais, onde o calor extremo é o componente dominante da associação temperatura–mortalidade ³⁵⁻³⁸.

A elevação progressiva do risco relativo nos percentis superiores (P95, P98 e P99) fornece base empírica para os níveis escalonados do protocolo. O incremento consistente do risco a partir do percentil 90, atingindo RR = 1,26 no percentil 99 (> 35,8°C), justifica a diferenciação operacional entre alertas. A incorporação da persistência térmica reflete a exaustão fisiológica causada por exposições consecutivas, fator crítico já descrito em estudos epidemiológicos ³⁻¹⁰⁻³¹.

A inaplicabilidade do índice HAAT em Belo Horizonte deve-se à elevada variabilidade climática e ao tempo seco durante os períodos extremos térmicos. Em Belo Horizonte, os bloqueios atmosféricos associados à intensificação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) favorecem simultaneamente temperaturas elevadas e baixa umidade ⁶⁻⁷, reforçando a Tmax como marcador mais robusto.

Como cidade de clima Tropical Continental de Altitude, Belo Horizonte apresenta forte sazonalidade, com picos de calor na primavera. Esse período combina elevada radiação solar, baixa umidade e irregularidade pluviométrica, o que amplia o estresse térmico urbano ⁶⁻⁷. Diferente de ambientes quentes e úmidos, onde as mínimas noturnas elevadas impedem o resfriamento corporal, em Belo Horizonte, a elevação das máximas diurnas mostrou associação mais consistente com a mortalidade, padrão típico de regiões com estação seca bem definida

A análise horária reforça essa interpretação: os valores máximos concentram-se entre 12h e 17h, período de maior exposição populacional às atividades laborais e aos deslocamentos urbanos¹¹⁻¹². Além disso, a maior frequência e intensidade das ondas de calor em anos de El Niño são compatíveis com evidências de intensificação de extremos térmicos durante as fases quentes do ENOS na América do Sul⁸⁻⁹, o que exige planejamento estratégico em saúde pública.

Comparativamente, os resultados dialogam com os protocolos de cidades como o Rio de Janeiro e São Paulo²⁰⁻⁴², que também utilizam níveis graduados de risco. A proposta para Belo Horizonte diferencia-se ao ancorar os limiares exclusivamente na temperatura máxima e na persistência térmica, refletindo as particularidades geográficas da continentalidade e da altitude local, o que favorece a comunicação institucional e a eficácia operacional do sistema de alerta.

Conclusões

Este estudo cumpre o objetivo de estabelecer marcadores térmicos para um sistema de alerta em Belo Horizonte, integrando evidências epidemiológicas locais à gestão de riscos. A pesquisa demonstra que a temperatura máxima diária e sua persistência temporal são os parâmetros mais eficazes para subsidiar respostas em saúde pública na capital, superando definições puramente meteorológicas ao vincular o alerta ao impacto real na mortalidade.

A aplicabilidade deste protocolo é direta: os limiares definidos oferecem à Defesa Civil e aos serviços de saúde uma régua operacional clara, permitindo o escalonamento de ações de mitigação proporcionais ao risco. Ao ancorar o sistema na Tmax, favorece-se a comunicação institucional e a tomada de decisão em cenários de previsibilidade climática, como os episódios de El Niño, tornando a proteção à saúde mais proativa e menos reativa.

Reconhece-se como limitação o uso de uma única estação meteorológica, o que restringe a captação da heterogeneidade térmica intraurbana decorrente do relevo e da ocupação do solo em Belo Horizonte. Pesquisas futuras que incorporem dados microclimáticos e análises estratificadas por grupos vulneráveis poderão refinar, de forma espacial, os limiares aqui propostos.

Por fim, a abordagem desenvolvida constitui uma referência metodológica para municípios de clima tropical de altitude e de continentalidade marcada. Ao diferenciar-se das capitais litorâneas, este trabalho reforça que a eficácia de um protocolo de calor reside em sua calibração geográfica local, servindo de modelo para municípios que enfrentam dinâmicas térmicas singulares e buscam fortalecer suas políticas de adaptação às mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET e ao DATASUS pela disponibilização pública dos dados. A pesquisadora Amanda Cristina de Souza Andrade e aos servidores da Prefeitura de Belo Horizonte e da Prefeitura do Rio de Janeiro que contribuíram com discussões para a aplicabilidade dos marcadores ao Protocolo de Calor.

Conflito de interesses

Os autores informam a inexistência de qualquer tipo de conflito de interesses.

Financiamento

O estudo não contou com financiamento específico.

Ética em pesquisa

O estudo utilizou exclusivamente dados secundários agregados e de domínio público, sem identificação individual, sendo dispensada a apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa, conforme as Resoluções nº 466/2012 e nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

Declaração de dados

Os dados de pesquisa estão contidos no próprio manuscrito, sendo que os dados brutos estão disponíveis sob demanda.

Contribuição dos autores

TPL concebeu o estudo, coordenou a análise climatológica e redigiu a versão inicial do manuscrito. WTC contribuiu para a concepção do estudo, delineamento epidemiológico, interpretação de dados e acompanhamento da redação do manuscrito. ASM contribuiu para o delineamento epidemiológico, análise e interpretação dos achados. DGF, GAC, MCP, FCM e ADFS contribuíram para a curadoria de dados, análises descritivas e revisão crítica do texto. Todos os autores aprovaram a versão final.

Referências

- 1 Perkins-Kirkpatrick SE, Lewis SC. Increasing trends in regional heatwaves. *Nat Commun.* 2020;11(1):3357. doi: 10.1038/s41467-020-16970-7.
- 2 Das S, Choudhury MR, Chatterjee B, Das P, Bagri S, Paul D, et al. Unraveling the urban climate crisis: exploring the nexus of urbanization, climate change, and their impacts on the environment and human well-being a global perspective. *AIMS Public Health.* 2024;11(3):963–1001. doi: 10.3934/publichealth.2024050.
- 3 World Meteorological Organization; World Health Organization. Heatwaves and health: guidance on warning-system development. Geneva: World Meteorological Organization; 2015. (WMO-No. 1142).
- 4 World Health Organization. Heat and health [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2024 [cited 2025 Mar 17]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>
- 5 Fundação Oswaldo Cruz; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Clima em síntese: estudos sobre saúde e ondas de calor no Brasil, 2015–2025. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz; 2025. Relatório técnico.
- 6 Novais GT, editor. Climas do Brasil: classificação climática e aplicações. 1st ed. Porto Alegre (RS): Totalbooks; 2023.
- 7 Lucas TPB. Gênese e espacialidades das precipitações nas estações chuvosas de 2010/2011 e 2011/2012 em Belo Horizonte, Minas Gerais, e suas correlações com os impactos hidrológicos [tese]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2015. 332 p.
- 8 Wu S, Luo M, Liu Z, Wang X, Huang Z, Li X. Longer- and slower-moving contiguous heatwaves linked to El Niño. *Geophys Res Lett.* 2024;51:e2024GL109067. doi: 10.1029/2024GL109067.
- 9 Marengo JA, Costa MC, Cunha AP, Espinoza JC, Jimenez JC, Libonati R, et al. Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Front Clim.* 2025;7:1529082. doi: 10.3389/fclim.2025.1529082.
- 10 Ebi KL, Capon A, Berry P, Broderick C, de Dear R, Havenith G, et al. Hot weather and heat extremes: health risks. *Lancet.* 2021;398(10301):698–708. doi: 10.1016/S0140-6736(21)01208-3.
- 11 Pan American Health Organization. Heatwaves: a guide for health-based actions [Internet]. Washington (DC): PAHO; 2021 [cited 2025 Mar 17]. Available from: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/54979>
- 12 Sorensen C, Ali S, Rajabifard A, et al. Treatment and prevention of heat-related illness. *N Engl J Med.* 2022; 387:123–133.
- 13 Brasil. Ministério da Saúde. Nota técnica nº 18/2023-SVSA/MS: orientações sobre cuidados diante de ondas de calor [Internet]. Brasília (DF): Ministério da Saúde; 2023 Nov 27 [cited 2025 Mar 17]. Available from: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/notas-tecnicas/2023/nota-tecnica-no-18-2023-svsa-ms>

- 14 Adélaïde L, Chanel O, Pascal M. Health effects from heat waves in France: an economic evaluation. *Eur J Health Econ.* 2022;23(1):119–131. doi: 10.1007/s10198-021-01357-2.
- 15 Ministerio de Sanidad (ES). Plan nacional de actuaciones preventivas de los efectos del exceso de temperaturas sobre la saúde 2025 [Internet]. Madrid: Ministerio de Sanidad; 2025 [cited 2025 Mar 17]. Available from: https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/calorExtremo/publicaciones/docs/planNacionalExcesoTemperaturas_2025.pdf
- 16 Portugal. Ministério da Saúde. Direção-Geral da Saúde. Plano de Contingência para Temperaturas Extremas – Módulo Calor 2014 [Internet]. Lisboa: Direção-Geral da Saúde; 2014 [cited 2025 Mar 17]. Available from: <https://heathealth.info/wp-content/uploads/i020217.pdf>
- 17 Michelozzi P, De' Donato F, Bargagli AM, D'Ippoliti D, De Sario M, Marino C, et al. Surveillance of summer mortality and preparedness to reduce the health impact of heat waves in Italy. *Int J Environ Res Public Health.* 2010;7(5):2256–2273.
- 18 UK Health Security Agency. Adverse Weather and Health Plan 2025–2026 [Internet]. London: UKHSA; 2025 [cited 2025 Dec 16]. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/adverse-weather-and-health-plan>
- 19 Lee KL, Chan YH, Lee TC, Goggins WB, Chan EYY. The development of the Hong Kong Heat Index for enhancing the heat stress information service of the Hong Kong Observatory. *Int J Biometeorol.* 2016;60(10):1569–1578. doi: 10.1007/s00484-015-1094-7.
- 20 de Souza JB, Silva FM, Oliveira AC, Pereira LM, Santos DR, Costa PS, et al. Quantifying heat exposure and its related mortality in Rio de Janeiro City: evidence to support Rio's recent heat protocol [preprint]. *medRxiv.* 2025 Jan 18. doi: 10.1101/2025.01.17.25320740.
- 21 Hong Kong Observatory. The Year's Weather 2023 [Internet]. Hong Kong: HKO; 2024 [cited 2025 Dec 16]. Available from: <https://www.hko.gov.hk/en/wxinfo/pastwx/2023/ywx2023.htm>
- 22 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE; 2022.
- 23 Parizzi MG, Sebastião CS, Viana CS, Pflueger MC, Campos LC, Cajazeiro JMD, et al. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. *Geografias.* 2010;6(2):49–68.
- 24 Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil: 1991–2020. Brasília (DF): INMET; 2022.
- 25 National Weather Service (NOAA). Historical El Niño/La Niña episodes (1950–present) [Internet]. Silver Spring (MD): NWS; 2025 [cited 2025 Sep 26]. Available from: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- 26 Ma W, Xu X, Peng L, Kan H. Impact of extreme temperature on hospital admission in Shanghai, China. *Sci Total Environ.* 2011;409(19):3634–7.
- 27 Heo S, Bell ML, Lee JT. Comparison of health risks by heat wave definition: applicability of wet-bulb globe temperature for heat wave criteria. *Environ Res.* 2019;170:70–8.

- 28 Sahani J, Kumar P, Debele S, Emmanuel R. Heat risk of mortality in two different regions of the United Kingdom. *Sustain Cities Soc.* 2022;80:103758.
- 29 de'Donato F, Scortichini M, De Sario M, de Martino A, Michelozzi P. Temporal variation in the effect of heat and the role of the Italian heat prevention plan. *Public Health.* 2018;161:154–62.
- 30 Li G, Li Y, Tian L, Guo Q, Pan X. Future temperature-related years of life lost projections for cardiovascular disease in Tianjin, China. *Sci Total Environ.* 2018;630:943–50.
- 31 Zhang B, Li G, Ma Y, Pan X. Projection of temperature-related mortality due to cardiovascular disease in Beijing. *Environ Res.* 2018;162:152–9.
- 32 Martínez-Solanas È, Basagaña X. Temporal changes in temperature-related mortality in Spain and effect of the implementation of a Heat Health Prevention Plan. *Environ Res.* 2019;169:102–13.
- 33 Bettaieb J, Toumi A, Leffondre K, Chlif S, Ben Salah A. High temperature effect on daily all-cause mortality in Tunis 2005–2007. *Rev Epidemiol Sante Publique.* 2020;68(1):37–43.
- 34 Wood SN. Generalized additive models. *Annu Rev Stat Appl.* 2025;12:497–526.
- 35 Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz J, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet.* 2015;386(9991):369-75.
- 36 Boudreault J, Lavigne É, Campagna C, Chebana F. Estimating the heat-related mortality and morbidity burden in the province of Quebec, Canada. *Environ Res.* 2024;257:119347.
- 37 Rodrigues M, Carvalho D. Projections of heat- and cold-related mortality under climate change scenarios in Portugal: a modelling study. *Atmosphere.* 2025;16:196.
- 38 Kephart JL, Sánchez BN, Moore J, Schinasi LH, Bakhtsiyarava M, Ju Y, et al. City-level impact of extreme temperatures and mortality in Latin America. *Nat Med.* 2022;28:1700-5.
- 39 Tobías A, Hashizume M, Honda Y, Sera F, Ng CFS, Kim Y, et al. Geographical variations of the minimum mortality temperature at a global scale: a multicountry study. *Environ Epidemiol.* 2021;5(5):e169.
- 40 Yang J, Ou CQ, Ding Y, et al. Daily temperature and mortality: a study of distributed lag non-linear effect and effect modification in Guangzhou. *Environ Health.* 2012;11:63.
- 41 Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm. *J Stat Softw.* 2011;43(8):1-20.
- 42 Moraes SL. O impacto das ondas de calor e de frio na mortalidade em São Paulo [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2017.
- 43 Turner H, Firth D. Generalized nonlinear models in R: an overview of the gnm package [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 25]. Available from: <https://cran.r-project.org>

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença [Creative Commons CC-BY](#).
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.