

ONDAS DE CALOR E DE FRIO EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE: EVIDÊNCIAS ENTRE 1994 E 2060

Heatwaves and Cold Spells in a Tropical Highland Climate: Evidence from 1994 to 2060

João Batista Ferreira Neto

Universidade de São Paulo (USP)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2901>

joao.geo@usp.br

Camila Bertoletti Carpenedo

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9034-789X>

camila.carpenedo@ufpr.br

Gabriel Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2093-9942>

pereira@ufsj.edu.br

Contribuição ao VI Simpósio Interdisciplinar de Pós-Graduação e Pesquisa (VI SINPE)

RESUMO

As mudanças climáticas têm provocado alterações significativas nos padrões térmicos regionais, com aumento de eventos extremos de temperatura do ar. Este estudo analisa essa dinâmica no município de São João del-Rei (MG), com foco na frequência e duração de ondas de calor e de frio. Foram comparados o período histórico (1994–2024) e projeções futuras (2030–2060) com base em dois cenários do CMIP6: SSP1-1.9 (mitigação intensa) e SSP5-8.5 (altas emissões de gases de efeito estufa). Utilizaram-se dados de reanálise do ERA5 (ECMWF) e simulações do modelo climático MRI-ESM2.0, processados em ambiente Linux com os softwares CDO, Python e QGIS. Os resultados indicam que, mesmo no cenário mitigado, as ondas de calor mantêm frequência semelhante à do presente, enquanto no cenário SSP5-8.5 há um aumento expressivo desses eventos. Ambos os cenários também projetam aumento na ocorrência de ondas de frio, sugerindo intensificação da variabilidade térmica local. Esses achados reforçam a urgência de políticas adaptativas que considerem os extremos térmicos em ambas as direções.

Palavras-chave: climatologia aplicada; extremos meteorológicos; projeções climáticas; vulnerabilidade urbana.

ABSTRACT

Climate change has led to significant alterations in regional thermal patterns, including an increase in extreme air temperature events. This study examines this dynamic in the municipality of São João del-Rei (MG), focusing on the frequency and duration of heatwaves and cold spells. The historical period (1994–2024) was compared with future projections (2030–2060) based on two CMIP6 scenarios: SSP1-1.9 (strong mitigation) and SSP5-8.5 (high greenhouse gas emissions). Reanalysis data from ERA5 (ECMWF) and simulations from the MRI-ESM2.0 climate model were used,

processed in a Linux environment with CDO, Python, and QGIS. The results indicate that, even under the mitigation scenario, heatwaves maintain a similar frequency to the present, while the SSP5-8.5 scenario shows a significant increase in these events. Both scenarios also project a rise in cold spell occurrences, suggesting an intensification of local thermal variability. These findings reinforce the need for adaptive policies that address thermal extremes in both directions.

Keywords: applied climatology; meteorological extremes; climate projections; urban vulnerability.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais, intensificadas pelas emissões de gases de efeito estufa desde a Revolução Industrial, têm provocado alterações significativas no regime térmico da atmosfera terrestre. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), é extremamente provável que o aquecimento global continue a intensificar eventos extremos de temperatura, especialmente ondas de calor, ao passo que a ocorrência de ondas de frio tenderá a se tornar menos frequente e menos intensa. Esse processo, embora global, manifesta-se com especificidades em diferentes contextos regionais e locais, exigindo investigações espacializadas (IPCC, 2021, cap. 11).

As ondas de calor são definidas como eventos de vários dias consecutivos com temperaturas persistentemente elevadas em relação à climatologia local, podendo causar impactos severos na saúde pública, na agricultura, no consumo energético e na mortalidade, especialmente entre populações vulneráveis (Barriopedro *et al.*, 2023; Kendrovski *et al.*, 2017; Moraes, Almendra e Barrozo 2022). Já as ondas de frio são caracterizadas por quedas acentuadas de temperatura abaixo dos limiares climatológicos, com potenciais efeitos negativos para a biodiversidade, a produção agrícola e as populações expostas a condições precárias de abrigo térmico (Bustos; Melo, 2016). Ambos os extremos são eventos críticos do ponto de vista socioambiental, pois podem provocar colapsos em infraestruturas urbanas, sobrecarga dos sistemas de saúde e desequilíbrios ecológicos, sobretudo em regiões de maior vulnerabilidade.

Em paralelo, municípios situados em áreas de relevo acidentado, com clima tropical de altitude, como São João del-Rei–MG, apresentam dinâmicas térmicas particulares que justificam estudos localizados. O município está inserido na região fisiográfica do Campo das Vertentes, em Minas Gerais, com relevo montanhoso composto por vales encaixados e serras, como a do Lenheiro e a de São José, com altitudes que variam entre 860 m e 1.338 m (Honório, Neto; Negreiros, 2020).

O clima é classificado como tropical de altitude (Cwa), com verões chuvosos e invernos secos, e médias térmicas anuais entre 17 °C e 21 °C, influenciadas pelas altitudes e pela orientação das vertentes (Sá Júnior *et al.*, 2012).

Na escala regional, conforme demonstrado por Neto (2021), a Região Sudeste do Brasil apresenta forte heterogeneidade térmica, com desconforto por frio predominante nas áreas serranas, como as Serras da Mantiqueira, Espinhaço e Canastra, e desconforto por calor em zonas de menor altitude, como o norte de Minas Gerais e a cidade do Rio de Janeiro, onde os índices médios de UTCI indicam estresse térmico moderado para ambas as situações.

Além dessas particularidades ambientais, a realidade socioeconômica de São João del-Rei contribui para compreender como a população local pode ser afetada por extremos térmicos. São João del-Rei se caracteriza por uma economia diversificada, com destaque para os setores de serviços, agropecuária, indústria e turismo histórico-cultural, além da presença de instituições federais de ensino superior, como a UFSJ e o IF Sudeste-MG. A cidade exerce papel de polo microrregional no Campo das Vertentes, articulando-se com municípios vizinhos na oferta de serviços essenciais e no dinamismo econômico regional (Carvalho, 2024). Segundo dados do SEBRAE (2024), em 2022 o município registrou 22.740 empregados formais, um crescimento de 7,09% em relação ao ano anterior, e uma remuneração média de R\$ 2.990,58. Os setores com maior número de trabalhadores foram o comércio varejista (5.256), a educação (2.701) e a administração pública (2.296). Ainda em 2022, o município contabilizou 3.943 estabelecimentos ativos, sendo a maioria composta por microempreendedores individuais (58,1%), seguido por microempresas (28,3%) e empresas de pequeno porte (3,76%). No campo educacional, destacam-se as 12.254 matrículas no ensino superior, distribuídas principalmente entre a Universidade Federal de São João del-Rei (7.350 alunos), o Centro Universitário Presidente Tancredo Neves (2.510) e o IF Sudeste-MG (576), consolidando a cidade como referência regional em formação acadêmica.

Diante dessas considerações, a nossa hipótese é que o município de São João del-Rei apresentará, no horizonte temporal de 2030 a 2060, um aumento estatisticamente significativo na frequência, duração e intensidade das ondas de calor, acompanhado de uma redução na ocorrência e intensidade das ondas de frio, em comparação ao período histórico de 1994 a 2024. Esta hipótese fundamenta-se nas projeções globais do IPCC (2021) e busca verificar se tais tendências, observadas em escala planetária, manifestam-se também, de forma concreta e quantificável, em uma escala local.

Vale destacar, contudo, que a literatura recente tem apontado para um quadro mais complexo: apesar da tendência global de declínio nas ondas de frio, algumas regiões vêm registrando episódios mais intensos ou frequentes desses eventos, impulsionados por alterações na circulação atmosférica, como o enfraquecimento do vórtice polar e instabilidades na corrente de jato (Zhang *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2025). Além disso, tem-se observado um aumento de transições abruptas entre calor e frio, os chamados “flips térmicos”, que ampliam os riscos e reduzem o tempo de adaptação das populações

expostas (Wu *et al.*, 2025). Tais evidências reforçam a importância de testar a hipótese proposta com base na realidade térmica local.

Assim, o objetivo geral deste estudo é analisar e comparar a frequência, duração e intensidade de ondas de calor e de frio no município de São João del-Rei, entre o período histórico recente (1994–2024) e o futuro próximo (2030–2060).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Dados

Este estudo utilizou duas fontes principais de dados:

- Para o período histórico (1994–2024), foram empregados dados diários de temperatura do ar a 2 metros provenientes da reanálise ERA5, disponibilizada pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*);
- Para o período futuro (2030–2060), utilizaram-se as projeções climáticas do modelo global MRI-ESM2.0 (*Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0*), integrante do conjunto de modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), com dados obtidos por meio da API do *Climate Data Store* (CDS). Segundo Reboita *et al.* (2024), em uma avaliação abrangente de 50 modelos do CMIP6 para a América do Sul, o MRI-ESM2-0 destacou-se entre os modelos com melhor desempenho na simulação da temperatura do ar próxima à superfície, especialmente na Região Sudeste do Brasil.

As projeções climáticas foram simuladas com base em dois cenários contrastantes de mudanças socioeconômicas e emissões futuras, definidos pelas Vias Socioeconômicas Compartilhadas (*Shared Socioeconomic Pathways – SSPs*):

- SSP1-1.9: cenário de baixíssimas emissões, compatível com as metas climáticas do Acordo de Paris, caracterizado por transição energética, estratégias sustentáveis e contenção do aquecimento global abaixo de 1,5 °C, sendo considerado altamente mitigador (O'Neill *et al.*, 2016);
- SSP5-8.5: cenário de altas emissões de gases do efeito estufa, associado a um mundo com forte dependência de combustíveis fósseis, rápido crescimento econômico e aumento acelerado das temperaturas globais. Considera-se um cenário “business-as-usual” intensificado (O'Neill *et al.*, 2016).

Os dados foram extraídos para uma área centrada na região de São João del-Rei, considerando um recorte espacial aproximado entre 19°S a 23°S de latitude e 47°W a 42°W de longitude. Para análises pontuais, adotou-se como referência o centroide do município, localizado em

aproximadamente 21,135°S e 44,260°W, com o objetivo de captar especificamente os valores do pixel que corresponde ao núcleo urbano municipal.

O recorte temporal adotado, 31 anos para o período histórico (1994–2024) e 31 anos para o futuro próximo (2030–2060), segue a recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM), que estabelece o uso de séries mínimas de três décadas para a definição de normais climatológicas (WMO, 2017).

2.2. Pré-processamento dos Dados

Os dados climáticos foram processados em ambiente Linux, com o uso das ferramentas NCO (NetCDF Operators) e CDO (Climate Data Operators). Inicialmente, foram realizados ajustes nos metadados e remoção de variáveis auxiliares incompatíveis com os padrões esperados, como lat_bnds e lon_bnds vinculadas ao tempo. Em seguida, os arquivos foram convertidos para o calendário padrão gregoriano, assegurando compatibilidade entre os períodos histórico e futuro.

2.3. Identificação das Ondas de Calor e de Frio

A identificação das ondas de calor e de frio foi realizada com base em índices desenvolvidos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), vinculado à Organização Meteorológica Mundial (WMO), conforme metodologia descrita em (Zhang *et al.*, 2011; Frich *et al.*, 2002) (Tabela 1). As ondas de calor foram determinadas por meio do Heat Wave Frequency Index (HWFI), adotando-se a definição segundo a qual esses eventos correspondem a seis ou mais dias consecutivos com temperaturas máximas diárias superiores ao 90º percentil da climatologia de referência. Já as ondas de frio foram identificadas com base no Cold Wave Frequency Index (CWFI), que considera como onda de frio os períodos com pelo menos seis dias consecutivos em que a temperatura mínima diária (TN) se mantém inferior ao 10º percentil da série climatológica. Ambos os procedimentos foram aplicados de forma padronizada aos dois intervalos analisados (1994–2024 e 2030–2060).

Tabela 1: Critérios adotados para identificação de ondas de calor e de frio.

Tipo de Evento	Indicador	Critério Percentil	Duração Mínima
Onda de Calor	Tmax	> P90	≥ 6 dias
Onda de Frio	Tmin	< P10	≥ 6 dias

Fonte: Autores (2025).

2.4. Visualização e Análises Complementares

As séries temporais anuais da temperatura do ar foram extraídas e análises foram realizadas em Python, utilizando bibliotecas como xarray, pandas e matplotlib para manipulação dos dados e construção de gráficos comparativos. Os produtos cartográficos foram elaborados no software QGIS (versão 3.42.1), após a conversão dos arquivos no formato NetCDF (.nc) para o formato GeoTIFF (.tiff).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos índices de ondas de calor (HWFI) e de ondas de frio (CWFI) evidenciou padrões contrastantes entre o período histórico (1994–2024) e as projeções futuras (2030–2060). Esses resultados refletem as tendências divergentes dos extremos térmicos sob diferentes cenários de mudanças climáticas (SSP1-1.9 e SSP5-8.5), destacando variações tanto na frequência quanto na duração dos eventos. As informações obtidas a partir do tratamento dos dados observacionais e projetados estão sistematizadas na Figura 1, permitindo uma comparação visual e quantitativa entre os dois períodos analisados.

Para sintetizar os principais achados e destacar as diferenças projetadas entre os cenários e o período histórico, apresenta-se a Tabela 2 abaixo, que compara a frequência e a duração dos eventos extremos de calor e frio nas três faixas temporais analisadas.

Tabela 2: Comparativo da frequência e duração das ondas de calor e de frio nos três períodos analisados.

Período / Cenário	Eventos Ondas de Calor	Dias Onda de Calor	Eventos Ondas de Frio	Dias Onda de Frio
Histórico (1994–2024)	21	159	18	123
SSP1-1.9 (2030–2060)	18	165	85	147
SSP5-8.5 (2030–2060)	94	192	91	162

Fonte: Autores (2025).

No período histórico (1994–2024), ocorreram 21 ondas de calor, correspondendo a 159 dias com registros de calor extremo. Nas projeções futuras (2030–2060), no cenário SSP1-1.9, foi observado uma redução para 18 eventos de ondas de calor, apesar de mais dias com ondas de calor, totalizando 165 dias médios. No cenário SSP5-8.5, a frequência de eventos aumenta em mais de 4 vezes, com 94 eventos, com 192 dias com ondas de calor.

Em relação às ondas de frio, foram identificadas 18 ocorrências, totalizando 123 dias com este tipo de evento no período histórico (1994–2024). As projeções futuras (2030–2060) indicam um aumento expressivo na frequência de ondas de frio no cenário SSP1-1.9, para 85 eventos, com 147

dias médios com ondas de frio. Já no cenário SSP5-8.5, também há aumento na frequência de ondas de frio, para 91 ocorrências, totalizando uma média de 162 dias com episódios de frio extremo.

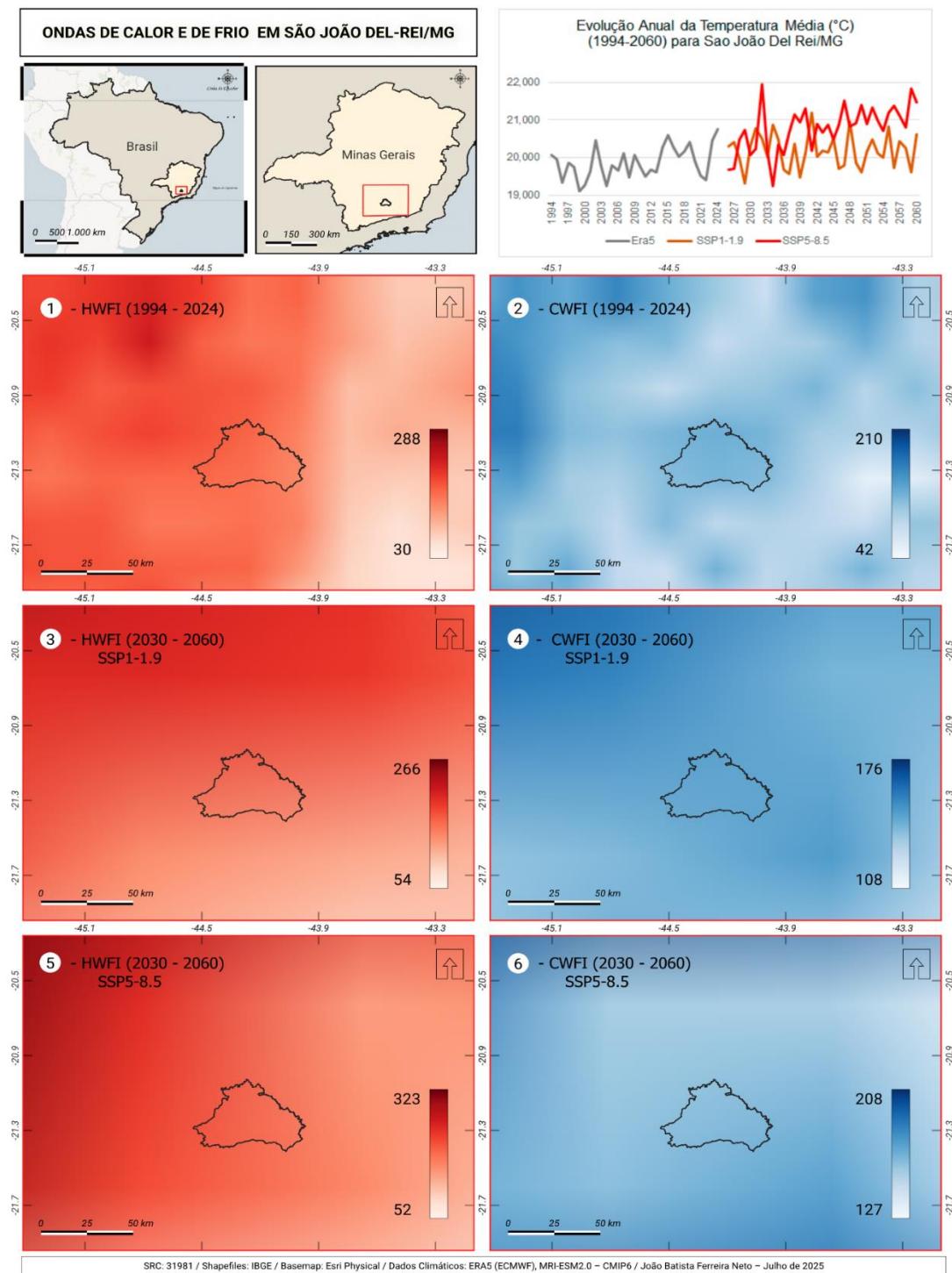


Figura 1 - Localização da área de estudo (São João del-Rei-MG), a evolução da temperatura média anual entre 1994 e 2060, além dos mapas com a distribuição espacial da frequência de eventos extremos de temperatura. Os mapas estão organizados da seguinte forma: o painel (1) mostra a frequência de ondas de calor (HWFI) no período histórico (1994-2024), enquanto o painel (2) apresenta a frequência de ondas de frio (CWFI) no mesmo intervalo. Os painéis (3) e (4) representam, respectivamente, as projeções da frequência de ondas de calor e frio para o período de 2030 a 2060 sob o cenário de baixas emissões (SSP1-1.9). Já os painéis (5) e (6) exibem essas mesmas projeções sob o cenário SSP5-8.5.

Entre 1994 e 2024, as temperaturas médias anuais exibem oscilações modestas em torno de um patamar relativamente estável, sem indicar tendência consistente de aquecimento. A partir de 2030, as projeções passam a divergir: sob o cenário SSP1-1.9, os valores permanecem próximos da média histórica, com variações suaves e sem alteração estrutural no regime térmico; já no SSP5-8.5, observa-se um aquecimento gradual, que se intensifica após 2040, culminando em médias anuais que ultrapassam 21,5 °C de forma recorrente.

Os resultados mostram uma ambivalência térmica significativa no horizonte futuro (2030–2060), com aumento simultâneo na frequência e duração de ondas de calor e de frio, especialmente no cenário SSP5-8.5. A hipótese formulada foi parcialmente confirmada, uma vez que se verificou o aumento das ondas de calor, mas não a redução das ondas de frio, como inicialmente previsto.

A comparação entre os dois cenários futuros revela contrastes marcantes. No cenário SSP1-1.9, mais conservador e associado a fortes políticas de mitigação climática, a frequência e duração das ondas de calor (18 eventos e 165 dias) permanecem praticamente estáveis em relação ao período histórico (21 eventos e 159 dias), indicando que estratégias globais de controle de emissões podem conter o agravamento dos extremos térmicos. Já no cenário SSP5-8.5, que simula um mundo com uso intensivo de combustíveis fósseis e crescimento econômico desregulado, a projeção de 94 eventos de ondas de calor em 192 dias sugere uma ruptura no padrão térmico atual, com multiplicação dos episódios e sobreposição temporal ao longo dos anos.

Esse comportamento está de acordo com Bitencourt *et al.* (2016), que identificaram a ampliação da duração e frequência das ondas de calor em Minas Gerais desde os anos 2000, mesmo sob influência da fase fria da Oscilação Decadal do Pacífico. A tendência projetada para São João del-Rei reforça que, sob os cenários de altas emissões de gases do efeito estufa, os eventos extremos tenderão a se tornar mais frequentes, duradouros e intensos, superando em muito a normal climatológica recente.

Entretanto, os dados relativos às ondas de frio projetadas, tanto no SSP1-1.9 (85 eventos e 147 dias) quanto no SSP5-8.5 (91 eventos e 162 dias), apresentaram valores que superam substancialmente os observados no período histórico (18 eventos e 123 dias). Esse aumento desafia a expectativa de que o aquecimento global levaria à redução progressiva das ondas de frio. Em vez disso, sugere um cenário de maior variabilidade térmica, possivelmente associado a perturbações na circulação atmosférica, como já apontado por Singh; Sippel; Fischer, 2023.

Esses autores destacam que, no contexto mineiro, alterações térmicas extremas são moduladas por múltiplos fatores, como relevo, urbanização, mudanças no uso da terra e padrões oceânicos, que podem favorecer tanto eventos de calor como de frio, dependendo das condições sinóticas regionais. A intensificação simultânea de ambos os extremos em São João del-Rei parece expressar essa

complexa interação, sendo um indicativo de que o clima tropical de altitude da região poderá amplificar os contrastes térmicos futuros.

Além disso, a permanência das ondas de frio como fenômeno significativo também se alinha a estudos localizados. Em municípios mineiros, Costa (2018) observou aumento de mais de 100% nas internações por infarto agudo do miocárdio durante eventos de frio extremo, e Silva e Costa (2023) reforçaram essa evidência ao documentar elevação de até 64% nos atendimentos hospitalares por IAM em Ituiutaba (MG). Esses resultados evidenciam a vulnerabilidade das populações expostas, principalmente em regiões tropicais com histórico limitado de preparo para o frio.

A intensificação das ondas de calor no cenário global tem sido associada a aumentos expressivos na mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias, com efeitos especialmente graves em climas tropicais e subtropicais. Em São Paulo, Son *et al.* (2015) observaram aumento de até 6,1% na mortalidade nos dias mais quentes e 8,6% nos dias mais frios, com maior risco entre idosos e mulheres.

Por outro lado, a persistência de ondas de frio em climas tropicais de altitude revela uma lacuna estrutural no planejamento urbano. A limitada infraestrutura de aquecimento, aliada à precariedade das moradias em áreas vulneráveis, agrava os impactos do frio intenso, mesmo que menos frequente. Soma-se a isso a negligência histórica da agenda climática brasileira quanto ao frio, sustentada por uma memória social marcada pela imagem de um “país quente” (Acselrad, 2010). Essa percepção compromete a adoção de medidas de emergência e adaptação adequadas a esses eventos extremos.

Na agricultura local, o impacto das ondas de calor e frio converge em uma ameaça dupla. Estudos globais indicam que ondas de frio podem causar perdas agrícolas até cinco vezes maiores que as de calor ($\geq 2\%$ ao ano) em culturas como milho e soja (Van Passel *et al.*, 2017). No Sul de Minas e Campo das Vertentes, a cafeicultura e hortaliças são altamente sensíveis tanto a geadas tardias quanto ao calor noturno intenso, o que pode comprometer produtividade, qualidade e renda dos pequenos produtores.

O impacto sobre o trabalho rural também deve ser considerado em planos de adaptação local. A exposição a calor extremo durante o dia e frio repentino à noite reduz produtividade e aumenta riscos ocupacionais, fadiga, desidratação, hipotermia, especialmente entre trabalhadores informais.

Portanto, os dados aqui discutidos apontam para a necessidade de políticas locais de adaptação tanto ao calor quanto ao frio, superando a noção simplificada de um futuro apenas mais quente. A coexistência de extremos térmicos opostos exige que municípios como São João del-Rei se preparem para um novo regime climático, marcado pela intensificação e irregularidade dos eventos extremos, o que poderá impactar desde a saúde pública até o planejamento urbano, o abastecimento de energia e a produção agropecuária.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante destacar que o período histórico recente (1994–2024) já representa um novo patamar climático mais quente e mais extremo em comparação aos níveis pré-industriais, refletindo a intensificação dos eventos térmicos observada em escala global. Este cenário reforça que, mesmo nos cenários futuros mais conservadores, como o SSP1-1.9, o presente já se configura como uma referência crítica de desconforto térmico, elevando o risco de impactos sociais, econômicos e ambientais relevantes.

Embora a maior parte das discussões públicas e políticas se concentre nas ondas de calor, como símbolos do aquecimento global, é essencial compreender que as mudanças climáticas não se resumem ao aumento linear das temperaturas médias. Trata-se de uma intensificação da variabilidade climática, com amplificação de extremos, incluindo tanto eventos de calor severo quanto ondas de frio abruptas e fora de época. Como demonstrado neste estudo, mesmo diante do aquecimento global, há projeções de aumento na frequência e duração das ondas de frio, sobretudo no cenário SSP5-8.5. Esse dado reforça a necessidade de políticas adaptativas que considerem os extremos térmicos em ambos os sentidos, e não apenas o calor.

Embora os dados utilizados neste estudo sejam oriundos de modelos climáticos com resolução espacial regional (aproximadamente 1,25°, ou cerca de 140 km × 140 km), e, portanto, não capturem com precisão as variações microclimáticas do município de São João del-Rei, os resultados obtidos oferecem uma estimativa relevante sobre as tendências térmicas projetadas para a região. Ondas de calor e de frio são fenômenos atmosféricos que atuam em escalas amplas, frequentemente afetando grandes áreas de forma simultânea. Dessa forma, os dados analisados constituem uma base válida para interpretar as tendências regionais que provavelmente também incidirão sobre o município.

No entanto, é fundamental reconhecer que as características físico-territoriais específicas da região, como o relevo acidentado da Serra do Lenheiro, a altitude elevada, os fragmentos de vegetação nativa remanescente e a configuração urbana descontínua, podem gerar efeitos microclimáticos locais que não são captados pela resolução espacial do modelo utilizado. Tais elementos podem modular a intensidade, frequência e duração dos eventos térmicos extremos em escala local, fazendo com que a realidade futura de São João del-Rei não corresponda exatamente ao padrão projetado regionalmente. Ou seja, embora a tendência geral de aumento das ondas de calor e redução das ondas de frio seja coerente com os cenários globais e regionais, a forma como esses fenômenos se manifestarão no município pode variar substancialmente, como, por exemplo, neste estudo, em que as ondas de frio tendem a aumentar. Isso reflete as especificidades locais ainda não representadas nesse tipo de modelagem. Esse é, de fato, um dos principais desafios ambientais para o estudo climático em escala local.

Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros adotem modelos climáticos regionais com maior resolução espacial ou aplicar downscaling estatístico, ou dinâmico nas saídas dos modelos climáticos, além de integrarem variáveis físico-ambientais e socioeconômicas do território, de modo a construir diagnósticos mais sensíveis às singularidades microclimáticas e às vulnerabilidades específicas do município de São João del-Rei.

REFERÊNCIAS

- ACSELRAD, H.; HERCULANO, S.; PADÚA, J. A. **Justiça ambiental e Cidadania**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2010. 315p.
- BARRIOPEDRO, D.; GARCÍA-HERRERA, R.; ORDÓÑEZ, C.; MIRALLES, D. Heat Waves: Physical Understanding and Scientific Challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 61, n. 2, 2023.
- BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; MAIA, P. A.; AMORIM, F. T. Frequência, duração, abrangência espacial e intensidade das ondas de calor no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 506–517, 2016.
- BUSTOS, P.; MELO, B. C. Agricultural Productivity and Structural Transformation: Evidence from Brazil. **American Economic Review**, v. 106, n. 6, p. 1320–1365, 2016.
- CARVALHO, M. F. V. São João del-Rei polo microrregional: desenvolvimento regional e aperfeiçoamento de recursos já existentes. **Revista Pesquisa e Debate**, v. 36, n. 2, p. 159–173, 2024.
- COSTA, R. A. As ondas de frio e sua influência na saúde pública do Pontal do Triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, v. 14, ed. esp., p. 190–204, 2018.
- FRICH, P. L.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P. M.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A. M. G.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, p. 193–212, 2002.
- HONÓRIO, L. W. N.; FERREIRA NETO, J. B.; NEGREIROS, A. B. Análise da variabilidade da precipitação em São João del-Rei e Tiradentes, Minas Gerais – Brasil. In: SEMINÁRIO ACADÉMICO INTERNACIONAL APEC. 25., 2020. Barcelona. **Anais...** Barcelona: APEC, 2020. p. 56-65.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- KENDROVSKI, V.; BACCINI, M.; SÁNCHEZ MARTINEZ, G.; WOLF, T.; PAUNOVIĆ, E.; MENNE, B. Quantifying projected heat mortality impacts under 21st-century warming conditions for selected European countries. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 7, p. 729, 2017.

VAN PASSEL, S.; MASSETTI, E.; MENDELSOHN, R. A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture. **Environmental and Resource Economics**, v. 67, n. 4, p. 725–760, 2017.

MORAES, S. L. de; ALMENDRA, R.; BARROZO, L. V. Impact of heat waves and cold spells on cause-specific mortality in the city of São Paulo, Brazil. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 239, p. 113861, 2022.

FERREIRA NETO, J. B. FERREIRA. **Zoneamento bioclimático brasileiro**. 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2021.

O'NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J. F.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B. M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016.

REBOITA, M. S.; FERREIRA, G. W. S. Assessment of precipitation and near-surface temperature simulation by CMIP6 models in South America. **Environmental Research: Climate**, v. 3, n. 2, 2024.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L. G.; SILVA, F. F.; ALVES, M. C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1/2, p. 1–7, 2012.

SEBRAE. **Observatório DataMPE Brasil: perfil econômico de São João del-Rei–MG**. Brasília: Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2024. Disponível em: <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/sao-joao-del-rei>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SINGH, J.; SIPPEL, S.; FISCHER, E. M. Circulation dampened heat extremes intensification over the Midwest USA and amplified over Western Europe. **Communications Earth & Environment**, v. 4, art. 432, 2023.

SILVA, C. O.; COSTA, R. A. A relação das ondas de frio com a incidência do infarto agudo do miocárdio (IAM) em Ituiutaba–MG: estudo de caso do ano de 2019. **Revista Hygeia**, Uberlândia, v. 19, e. 1923, 2023.

SON, J. Y.; GOUVEIA, N.; BRAVO, M. A.; FREITAS, C. U.; BELL, M. L. The impact of temperature on mortality in a subtropical city: effects of cold, heat, and heat waves in São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, n. 1, p. 113–121, 2016.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. WMO-No. 1203. Geneva: WMO, 2017. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166. Acesso em: 15 jan. 2025.

WU, S.; LUO, M.; LAU, G. N. C.; ZHANG, W.; WANG, L.; LIU, Z.; LIN, L.; WANG, Y.; GE, E.; LI, J.; FAN, Y.; CHEN, Y.; LIAO, W.; WANG, X.; XU, X.; QI, Z.; HUANG, Z.; CHAN, F. K. S.; CHEN, D. Y.; LIU, X.; PEI, T. Rapid flips between warm and cold extremes in a warming world. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, art. 3543, 2025.

ZHANG, Y.; LI, Q.; GE, Y.; DU, X.; WANG, H. Growing prevalence of heat over cold extremes with overall milder extremes and multiple successive events. **Communications Earth & Environment**, v. 3, n. 73, 2022.

ZHANG, XUEBIN; ALEXANDER, LISA, V.; HEGERL, GABRIELE, C.; JONES, PHILIP, D.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B.; ZWIERS, F. W. **Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 2, n. 6, p. 851–870, 2011.