



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

RAFAEL VIEIRA FOGAÇA

**ANÁLISE DAS ONDAS DE CALOR NA CIDADE DE SÃO PAULO:
TENDÊNCIAS E IMPACTOS NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Sorocaba

2025

RAFAEL VIEIRA FOGAÇA

**ANÁLISE DAS ONDAS DE CALOR NA CIDADE DE SÃO PAULO:
TENDÊNCIAS E IMPACTOS NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Manuel Enrique Gamero
Guandique

Sorocaba
2025

F655a	<p>Fogaça, Rafael Vieira</p> <p>Análise das ondas de calor na cidade de São Paulo : tendências e impactos no contexto das mudanças climáticas / Rafael Vieira Fogaça. -- Sorocaba, 2025</p> <p>24 p. : il., tabs.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba</p> <p>Orientador: Manuel Enrique Gamero Guandique</p> <p>1. Climatologia. 2. Mudanças climáticas. 3. Meteorologia. 4. Estatística. I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos
pelo autor(a).

RAFAEL VIEIRA FOGAÇA

**ANÁLISE DAS ONDAS DE CALOR NA CIDADE DE SÃO PAULO:
TENDÊNCIAS E IMPACTOS NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 02/12/2025

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 02 de dezembro de 2025.

RESUMO

As ondas de calor são eventos extremos que têm se tornado mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas, gerando impactos ambientais, sociais e de saúde pública. Este trabalho analisa a ocorrência e a evolução das ondas de calor na cidade de São Paulo, utilizando séries históricas de dados meteorológicos da estação INMET Mirante de Santana (julho de 2006 a dezembro de 2024) para identificar padrões e tendências ao longo dos anos. A metodologia empregada inclui análise estatística descritiva e ferramentas de visualização de dados para caracterizar a frequência, duração e intensidade desses eventos. Os resultados identificaram 22 eventos de onda de calor no período, com duração média de 6,82 dias e intensidade média de 7,5 °C acima da climatologia mensal. Embora a tendência de frequência anual (0,1081 eventos/ano) não tenha apresentado significância estatística ($p=0,1198$), foi observada uma tendência significativa de aumento nas temperaturas máximas diárias (0,082 °C por ano, $p < 0,0001$). A primavera foi a estação com maior número de dias sob onda de calor (102 dias). A pesquisa destaca a importância do monitoramento contínuo das temperaturas para a adaptação da infraestrutura urbana e a proteção da população. Conclui-se que a compreensão desses fenômenos é essencial para minimizar seus impactos e planejar estratégias sustentáveis para a cidade.

Palavras-chave: Análise de dados, mudanças climáticas, tendências climáticas

ABSTRACT

Heat waves are extreme events that have become more frequent and intense due to climate change, causing environmental, social, and public health impacts. This study analyzes the occurrence and evolution of heat waves in the city of São Paulo, using historical meteorological data from the INMET Mirante de Santana station (July 2006 to December 2024) to identify patterns and trends over the years. The methodology includes descriptive statistical analysis and data visualization tools to characterize the frequency, duration, and intensity of these events. The results identified 22 heat wave events during the period, with an average duration of 6.82 days and an average intensity of 7.5 °C above the monthly climatology. Although the annual frequency trend (0.1081 events/year) was not statistically significant ($p=0.1198$), a significant upward trend in daily maximum temperatures was observed (0.082 °C per year, $p < 0,0001$). Spring was the season with the highest number of heat wave days (102 days). The research underscores the importance of continuous temperature monitoring to adapt urban infrastructure and protect the population. It is concluded that understanding these phenomena is essential to minimizing their impacts and planning sustainable strategies for the city.

Keywords: Data analysis, climate change; climate trends

SUMÁRIO

1 Introdução	6
2 Objetivos	7
3 Revisão bibliográfica.....	8
4 Metodologia	12
5 Resultados e discussão	14
5.1 Análise das tendências temporais	14
5.2 Caracterização dos eventos	15
5.3 Análise sazonal	17
5.4 Síntese da discussão	18
6 Conclusão	19
Referências	21

1 INTRODUÇÃO

Ondas de calor (OCs) são eventos meteorológicos extremos caracterizados por períodos prolongados de temperaturas anormalmente altas. Esses eventos são frequentemente associados ao aquecimento global, que é impulsionado por atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis e o uso indiscriminado da terra. O aquecimento global tem aumentado a frequência e a intensidade desses eventos extremos, afetando diversas regiões ao redor do mundo. (SILVA et al., 2022; FANTE, 2024).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial, uma OC é caracterizada por um período em que as temperaturas máximas diárias ultrapassam em pelo menos 5°C a média climatológica do mês, considerando registros históricos da região analisada. Para que esse evento seja classificado como uma onda de calor, essa condição deve persistir por um período mínimo de cinco dias consecutivos. Esse fenômeno pode ser influenciado por fatores como padrões atmosféricos de bloqueio, intensificação de sistemas de alta pressão e mudanças climáticas globais, resultando em impactos significativos na saúde humana, na biodiversidade e nas atividades econômicas. (World Meteorological Organization, 2023)

As OCs têm diversos impactos no ambiente, como o aumento do desconforto térmico, especialmente em regiões de alta umidade, como a Amazônia e o Nordeste do Brasil. As temperaturas extremas também podem alterar os ecossistemas, afetando a biodiversidade local, ao modificar os padrões de crescimento e distribuição das espécies. Além disso, o calor excessivo eleva a evapotranspiração, intensificando a perda de água pelas plantas, o que pode agravar a seca em áreas já vulneráveis a essa condição. (COSTA et al., 2024)

No campo da saúde pública, as OCs apresentam sérias consequências, como o aumento de mortes e doenças relacionadas ao calor, incluindo insolação e exaustão térmica, além de agravar problemas respiratórios, como a asma. O sistema de saúde também sofre com a sobrecarga, principalmente em regiões com infraestrutura limitada. As altas temperaturas podem ainda afetar a saúde mental, intensificando sintomas de ansiedade e estresse, especialmente em crianças com transtornos do neurodesenvolvimento. (SILVEIRA et al., 2019; SILVA, 2024)

2 OBJETIVOS

Diante desse cenário, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo analisar a evolução das ondas de calor na cidade de São Paulo, considerando o período de julho de 2006 a dezembro de 2024, utilizando séries históricas de dados meteorológicos e técnicas de análise estatística e visualização de dados. Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para a conscientização sobre os impactos das mudanças climáticas e subsidiar ações para a redução dos efeitos adversos das ondas de calor na cidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É importante destacar que cidades com alto grau de urbanização podem experimentar aumentos de temperatura devido a dois fatores distintos, porém ambos de origem antropogênica. De um lado, há a elevação da temperatura global provocada pela emissão de gases de efeito estufa; de outro, o desenvolvimento dos chamados fenômenos de ilha de calor urbano (ICU), especialmente em megacidades como Rio de Janeiro e São Paulo. Essas cidades possuem centros urbanos altamente desenvolvidos, onde as temperaturas frequentemente são superiores às registradas em áreas rurais (LUCENA et al., 2013; PERES et al., 2018). O fenômeno das ICUs pode intensificar eventos extremos de calor, como as ondas de calor (OCs), aumentando a mortalidade, especialmente entre populações idosas e vulneráveis (GOUVEIA; HAJAT; ARMSTRONG, 2003; SON et al., 2016).

Do ponto de vista meteorológico, as ondas de calor ocorrem principalmente em contextos de estabilidade atmosférica. Pesquisas indicam que essas anomalias térmicas estão relacionadas à atuação de sistemas anticiclônicos de bloqueio que permanecem ativos por certo período. Esses fenômenos costumam ser marcados pela ausência de chuvas e por condições de solo e atmosfera já secas. A gravidade dos impactos está associada à intensidade, duração e abrangência espacial desses eventos. (GERSHUNOV; DOUVILLE, 2008)

Diversos processos, atuando em diferentes escalas de tempo e espaço, interagem na formação das ondas de calor. Quando mais de um desses fatores ocorre simultaneamente, o evento tende a ser mais intenso, duradouro e abrangente. Destaca-se entre os principais fatores de intensificação: fenômenos climáticos de grande escala como o El Niño–Oscilação Sul (ENOS), secas anteriores relacionadas ao uso da terra, sistemas anticiclônicos de alta pressão, padrões sinóticos como bloqueios atmosféricos e distúrbios nas ondas de Rossby, além da influência do uso do solo local que pode agravar ainda mais os efeitos. (FANTE, 2024)

Barriopedro et al. (2023) destacam que as ondas de calor envolvem mudanças na circulação atmosférica, como estagnação ou reforço de sistemas de alta pressão (anticiclones), que favorecem subsidência, céus limpos e aquecimento radiativo na superfície.

Esses blocos anticiclônicos (“blocking”) são centrais na física das ondas de calor. Estudos recentes mostram que sistemas de bloqueio persistentemente estacionários causam subsidência (descida de ar), radiação clara e advecção de ar

quente, o que amplifica e prolonga os episódios de calor extremo. (CHAN; CATTO; COLLINS, 2022)

Além disso, mudanças climáticas estão fortalecendo esses padrões bloqueadores em algumas regiões: por exemplo, Hao et al. (2025) relacionam o aumento de extremos térmicos à intensificação de sistemas de bloqueio nas latitudes médias, em combinação com aquecimento global de longo prazo.

Os sistemas de bloqueio (anticiclones persistentes) são cruciais para a formação de ondas de calor. Eles interrompem o fluxo normal de jatos, favorecem subsidência, e produzem condições de céu limpo que permitem intenso aquecimento por radiação solar. (CHAN; CATTO; COLLINS, 2022)

Woollings et al. (2018) descrevem o comportamento dos bloqueios e seu papel em extremos climáticos, enfatizando que esses regimes persistentes modulam significativamente a variabilidade e frequência das ondas de calor.

A circulação atmosférica em grande escala, como ondas de Rossby e padrões de jato, interage com os bloqueios para determinar a localização, duração e intensidade das ondas de calor. Em escala hemisférica, os episódios de calor extremo frequentemente correspondem a regimes atmosféricos caracterizados por sistemas de alta pressão que se fixam ou se movem lentamente, combinados com trens de pacotes de ondas de Rossby (Rossby Wave Packets) que modulam a circulação em latitudes médias. (CHAPMAN et al., 2025)

As variabilidades oceânicas, como a mudança na temperatura da superfície do mar (TSM), também influenciam fortemente os padrões de bloqueio atmosférico e a probabilidade de ondas de calor no Brasil. Por exemplo, Carpenedo & Ambrizzi (2020) investigaram a relação entre o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e o Modo Anular Sul (SAM), mostrando que, em certas fases desse padrão climático, o ASAS se desloca para latitudes mais ao sul, intensificando a subsidência sobre o continente e favorecendo condições de bloqueio e calor extremo.

Além disso, Qian et al. (2024) mostram que anomalias de circulação durante ondas de calor apresentam estruturas barotrópicas (mesmo sinal em diferentes níveis) que são moldadas por interações oceano-atmosfera, contribuindo para a persistência dos eventos.

O fenômeno da ilha de calor urbana (ICU) refere-se ao aquecimento local nas cidades comparado às áreas rurais, devido à urbanização, baixa vegetação, materiais de baixa reflectância, densidade construtiva, entre outros. (VUJOVIC et. al, 2021)

Kong et al. (2021) revisaram a literatura sobre as sinergias entre ICU e ondas de calor, apontando que, durante eventos de calor extremo, a intensidade da ICU muitas vezes se intensifica. Isso se deve a mudanças no balanço de energia urbano: menor umidade do solo, menor fluxo latente (evapotranspiração) e maior radiação líquida contribuem para aquecimento extra nas cidades.

Joshi et al. (2024) também destacam que o ambiente construído urbano (edifícios, materiais, geometria) modula fortemente os impactos das ondas de calor e pode tanto agravar o estresse térmico humano como fornecer oportunidades de mitigação (por exemplo, telhados claros, vegetação, ventilação passiva).

A complexidade espacial das cidades requer abordagens de modelagem refinadas para capturar como a ICU se comporta durante ondas de calor. Por exemplo, Tasan, Dąbrowska & Michałowska (2025) mostraram, em recente estudo, que padrões sinóticos como sistemas de alta pressão prolongados amplificam as ilhas de calor, prolongando o aquecimento urbano. Além disso, a revisão sistemática de Cheval et al. (2024) documenta que o uso de sensoriamento remoto, medidas in situ e modelagem numérica cresceu muito nas últimas décadas, permitindo uma melhor compreensão da sinergia entre ICU e ondas de calor.

No contexto brasileiro, há cada vez mais estudos sobre ondas de calor e ICU. Porangaba, Galvani & Amorim (2024) analisaram ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas (MS), enfatizando riscos socioambientais e a vulnerabilidade da população, enquanto Mendes, Armond & Silva (2022) estudaram ilhas de calor de superfície e ondas de calor/frio no município do Rio de Janeiro entre 2015-2019, encontrando correlações entre eventos extremos de temperatura e percentis climatológicos bem definidos (percentil 95 para calor).

No âmbito nacional mais amplo, Silva et al. (2022) investigaram a ocorrência de ondas de calor em diferentes regiões brasileiras (Nordeste, Amazônia, Centro-Sudeste) usando dados de reanálise para o período 1991-2020. Eles observaram um aumento no número de dias favoráveis a episódios prolongados de calor especialmente após os anos 2000, evidenciando tendências de aquecimento ligada aos extremos.

Além disso, documentos de síntese divulgados por agências brasileiras (como o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações/Governo Federal) têm começado a sistematizar evidências acadêmicas e sugerir políticas de adaptação, embora haja um

reconhecimento de lacunas nos estudos de longo prazo e na infraestrutura de monitoramento. (MCTI, 2025)

Internacionalmente, as ondas de calor têm sido amplamente estudadas em regiões temperadas e tropicais. Por exemplo, Al-Yaari et al. (2023) avaliaram como os modelos climáticos (CMIP6) reproduzem características de ondas de calor em diferentes cenários de aquecimento, encontrando que a intensidade, frequência e duração tendem a aumentar com níveis mais altos de aquecimento global.

Estudos em circulação atmosférica também são fortes fora do Brasil: Chan et al. (2022) demonstraram que a relação entre bloqueio e ondas de calor pode mudar sob o aquecimento climático, sugerindo que, mesmo que a frequência de bloqueios diminua, a associação de bloqueio com ondas de calor pode se tornar mais dominante.

A revisão de Joshi et al. (2024) ressalta boas práticas internacionais de mitigação para cidades, combinando planejamento urbano, materiais de construção, vegetação e participação comunitária, e aponta que políticas equitativas são essenciais para lidar com vulnerabilidades sociais ao calor.

Além disso, estudos hemisféricos de regime climático, como de Chapman et al., evidenciam que certos padrões de circulação (como altas de bloqueio ligadas a trens de ondas de Rossby) são recorrentes nas ondas de calor mais severas na Europa, na América do Norte e na Ásia, o que oferece pistas para previsão de longo prazo, alerta antecipado e modelagem climática.

Portanto, é essencial compreender as condições térmicas da atmosfera, desde o nível local até o global, considerando seus impactos na saúde humana, no meio ambiente e nas atividades que possam ser desenvolvidas. O presente estudo tem como objetivo analisar as características das ondas de calor na cidade de São Paulo, incluindo sua frequência, duração e intensidade, ao longo das últimas décadas. Busca-se identificar tendências e padrões desses eventos extremos e avaliar os impactos das ondas de calor na saúde pública e na infraestrutura urbana, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar as ondas de calor registradas na cidade de São Paulo (SP), considerando sua frequência, duração, intensidade e tendências temporais, com base em dados meteorológicos diários de temperatura máxima. Para isso, adotou-se uma abordagem baseada em análise de dados climáticos históricos, por meio da linguagem de programação Python e suas bibliotecas especializadas.

A primeira etapa consistiu na coleta de dados meteorológicos provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especificamente da estação convencional do Mirante de Santana (código A701), localizada em São Paulo, com coordenadas geográficas -23,496289 de latitude S, -46,620067 de longitude W e 785,64 m de altitude. A série histórica abrange o período de julho de 2006 a dezembro de 2024, contendo registros diários da temperatura máxima do ar (T_{max}).

Em seguida, foi realizado o pré-processamento dos dados utilizando a biblioteca Pandas. As colunas foram padronizadas e a coluna de datas foi convertida para o formato datetime, permitindo a extração do ano, mês e da estação do ano correspondente a cada registro, com base nas datas astronômicas de início das estações (outono, inverno, primavera e verão).

Para a definição de onda de calor, foi adotado o critério de ocorrência de, no mínimo, cinco dias consecutivos com temperatura máxima superior à média climatológica do respectivo mês acrescida de 5 °C (World Meteorological Organization, 2023). As médias mensais foram extraídas com base nas normais climatológicas do INMET para o período de 1991 a 2020. Essa definição visa representar eventos extremos de calor, alinhando-se com a literatura científica sobre o tema.

A identificação das ondas de calor foi realizada por meio de um algoritmo que detecta grupos de dias consecutivos que atendem ao critério estabelecido. Apenas os grupos com cinco ou mais dias consecutivos foram considerados válidos. A lógica envolveu o uso de operações de agrupamento com base em alterações na condição de onda de calor e a contagem dos dias por grupo.

Posteriormente, foram conduzidas diversas análises estatísticas. Dentre elas: o número total de ondas de calor no período estudado; a duração média das ondas; a intensidade média (calculada como a diferença entre a T_{max} e a média climatológica do mês); a tendência da frequência anual, determinada via regressão linear simples;

a contagem de dias com ocorrência de onda de calor por estação do ano; e a análise sazonal mais precisa, considerando apenas os dias que de fato pertencem a ondas de calor.

Além disso, foi construída uma visualização do Boxplot das intensidades das OCs, com o objetivo de examinar a distribuição e variabilidade dessas intensidades. Essa visualização ajudou a identificar valores atípicos e padrões concentrados, contribuindo para a caracterização dos eventos mais extremos. Também foi feita a identificação das ondas mais longas e mais intensas do período, permitindo destacar os eventos com maior impacto potencial.

A fim de aprofundar a avaliação da evolução térmica, foi realizada uma outra análise da tendência das temperaturas máximas diárias ao longo de todo o período estudado, por meio de regressão linear, em conjunto com um Boxplot para a variável temperatura máxima diária.

Por fim, a etapa de visualização dos dados foi essencial para a interpretação dos resultados. Foram gerados gráficos utilizando as bibliotecas Matplotlib e Seaborn, incluindo a tendência anual da frequência de ondas de calor, o Boxplot das intensidades, a tendência da temperatura máxima diária ao longo do tempo e a distribuição geral das temperaturas máximas por meio de Boxplot.

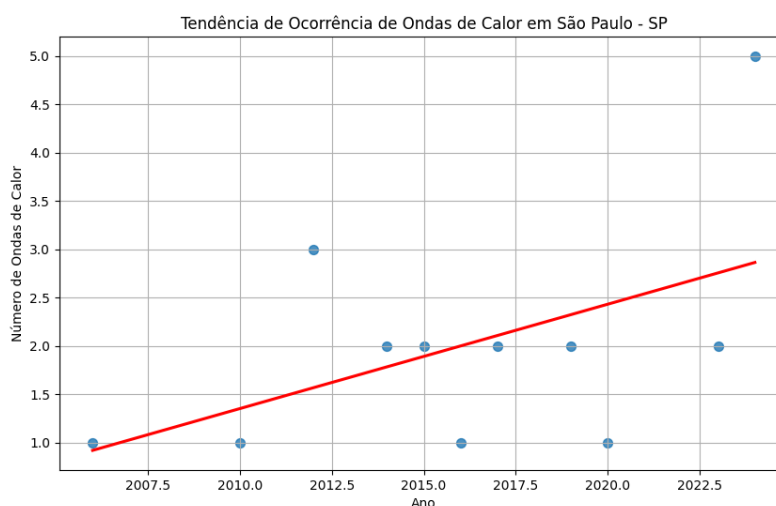
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados meteorológicos da estação Mirante de Santana, abrangendo o período de julho de 2006 a dezembro de 2024, identificou 22 eventos de onda de calor na cidade de São Paulo. Esses eventos apresentaram uma duração média de 6,82 dias e uma intensidade média de 7,5 °C acima da climatologia mensal de referência.

5.1 Análise das tendências temporais

Uma das análises centrais deste estudo foi a avaliação da tendência de ocorrência de ondas de calor (OCs), representada na Figura 1. A regressão linear aplicada à frequência anual de eventos revelou uma inclinação positiva (0,1081 eventos por ano). Contudo, é crucial notar que este resultado não apresentou significância estatística (valor-p = 0,1198). Isso indica que, com base no critério metodológico adotado (OMM) e no período analisado, não se pode afirmar estatisticamente que o número de eventos de onda de calor esteja aumentando.

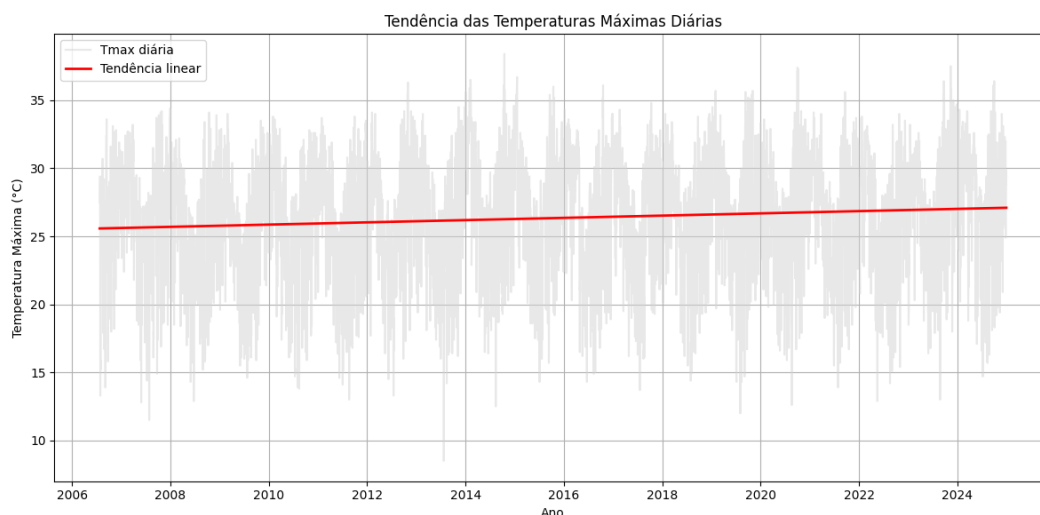
Figura 1 - Linha de tendência de ondas de calor em São Paulo - SP



Fonte: autoria própria

No entanto, essa aparente estabilidade na frequência de eventos discretos contrasta fortemente com a análise da tendência das temperaturas máximas diárias (Figura 2). Neste caso, a regressão linear sobre a série temporal completa revelou um aumento contínuo de 0,000226 °C por dia, o que equivale a um acréscimo de 0,082 °C por ano. Diferentemente da frequência, essa tendência de aquecimento é altamente significativa ($p < 0,0001$).

Figura 2 - Tendência das temperaturas máximas diárias



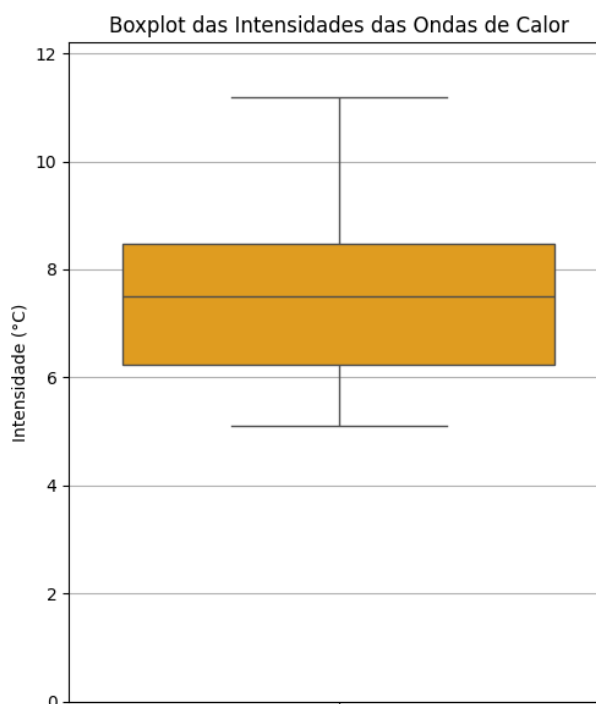
Fonte: autoria própria

A interpretação conjunta desses dois resultados é o achado mais relevante do estudo: embora o número de eventos (blocos de 5 dias) não tenha aumentado estatisticamente, o clima de fundo da cidade está esquentando de forma inequívoca. Esse aquecimento progressivo das máximas diárias corrobora estudos que apontam para a intensificação do aquecimento em São Paulo, como o de Mello et al. (2023), que identificou um aumento de 1,14 °C na temperatura média anual entre 1969 e 2020. Esse cenário de "aquecimento de base" favorece a ocorrência de eventos extremos e se alinha às tendências globais de intensificação dos extremos térmicos (PERKINS-KIRKPATRICK; LEWIS, 2020; MORA et al., 2017).

5.2 Caracterização dos eventos

O Boxplot das intensidades (Figura 3) detalha a severidade dos 22 eventos identificados. A mediana da intensidade situou-se próxima de 7,5 °C acima da climatologia, com a maioria dos eventos (o intervalo interquartil) concentrada entre 6,2 °C e 8,5 °C de anomalia. A amplitude total variou de 5,1 °C a 11,2 °C, sem a presença de outliers. Isso demonstra que, quando as ondas de calor ocorrem, elas representam um desvio térmico substancial e consistente.

Figura 3 – Boxplot das intensidades das ondas de calor em São Paulo - SP

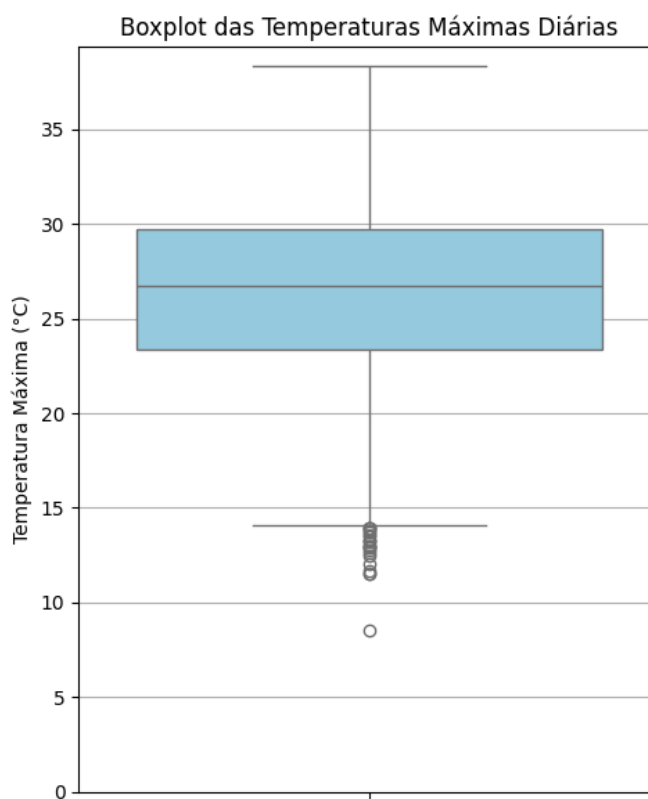


Fonte: autoria própria

Essa intensidade média de 7,5 °C é particularmente preocupante quando articulada com a literatura de saúde pública. Estudos para São Paulo (MORAES et al., 2022) já associaram ondas de calor de longa duração (superiores a cinco dias) a aumentos significativos na mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias. Globalmente, Lüthi et al. (2023) demonstraram que o risco de mortalidade por calor aumentou rapidamente em centros urbanos, alinhando-se ao intervalo de risco identificado.

A análise da distribuição geral das temperaturas máximas diárias (Figura 4) complementa essa visão. O gráfico mostra uma mediana de 26,7 °C e uma concentração de dados entre 23,4 °C e 29,7 °C. A observação mais notável é a presença de outliers inferiores (dias frios), abaixo de 15 °C, mas a ausência de outliers superiores. Isso sugere que dias extremamente quentes (próximos de 36 °C) já estão sendo incorporados à "nova normalidade" da distribuição climática da cidade, não sendo mais considerados anomalias estatísticas, ao contrário dos eventos de frio intenso.

Figura 2 - Boxplot das temperaturas máximas diárias



Fonte: autoria própria

5.3 Análise sazonal

A Tabela 1 revela uma forte sazonalidade na ocorrência das ondas de calor. A primavera foi, de longe, a estação com maior número de dias sob o fenômeno (102 dias), seguida por verão (19), outono (18) e inverno (11). Essa predominância primaveril é explicada pela climatologia local: um período que combina a crescente radiação solar (próxima ao solstício de verão) com a baixa nebulosidade e umidade, características do final da estação seca.

Tabela 1 –Total de dias de onda de calor por estação

Estação	Quantidade de dias com OC
Primavera	102
Verão	19
Outono	18
Inverno	11

Fonte: autoria própria

Essa descoberta é consistente com a literatura regional e global. Wang et al. (2023) apontaram o período de setembro a novembro como o de maior incidência para megacidades subtropicais. Em nível estadual, Valverde e Rosa (2023) também identificaram outubro e setembro como os meses de maior frequência.

A articulação mais forte, no entanto, é com os estudos de microclima urbano. O presente trabalho foca na escala sinótica (ondas de calor), mas os resultados dialogam diretamente com o fenômeno da Ilha de Calor Urbana (ICU). Almeida e Ribeiro (2024), ao analisarem a Região Metropolitana de São Paulo, encontraram a correlação positiva mais forte ($r = 0,97$) entre a temperatura e as ilhas de calor urbanas justamente na primavera.

Portanto, os resultados deste trabalho indicam que a primavera não é apenas a estação com maior ocorrência de ondas de calor (fenômeno macro), mas também a estação em que o efeito da urbanização (ICU) mais intensifica o calor. Essa sinergia entre a mudança climática global e a expansão urbana desordenada, conforme também observado no Rio de Janeiro (MENDES; ARMOND; SILVA, 2022), amplifica os extremos térmicos e os riscos associados.

5.4 Síntese da discussão

Os resultados obtidos confirmam que, embora a frequência de ondas de calor (conforme o critério OMM) não tenha tido um aumento estatisticamente significativo no período, a cidade de São Paulo está comprovadamente mais quente, com um aumento significativo nas temperaturas máximas diárias. Os eventos de onda de calor, quando ocorrem, são intensos (mediana de 7,5 °C acima do normal) e se concentram na primavera. Essa sazonalidade coincide com o período de maior intensificação das ilhas de calor urbanas, criando uma sinergia que eleva a vulnerabilidade da população aos extremos térmicos.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou as tendências e características das ondas de calor na cidade de São Paulo, utilizando dados da estação Mirante de Santana (2006-2024), com o objetivo de compreender a evolução desses eventos extremos no contexto das mudanças climáticas e da urbanização.

A metodologia permitiu identificar 22 eventos de onda de calor, que apresentaram uma duração média de 6,82 dias e uma intensidade média de 7,5 °C acima da climatologia mensal de referência.

O principal achado deste estudo reside na aparente dicotomia das tendências temporais. Verificou-se que, embora a frequência de eventos discretos de onda de calor (conforme critério OMM) não apresente um aumento estatisticamente significativo no período analisado ($p = 0,1198$), a temperatura máxima diária de fundo da cidade demonstra um aquecimento inequívoco e estatisticamente robusto. A tendência de aumento das máximas diárias foi de +0,082 °C por ano ($p < 0,0001$).

Este resultado sugere que a métrica de "frequência" de eventos pode não ser o indicador mais sensível para capturar a intensificação do calor extremo em São Paulo. O aquecimento de base contínuo é um indicativo mais claro do impacto das mudanças climáticas na climatologia local, corroborando estudos prévios sobre o aquecimento da cidade (MELLO et al., 2023).

A análise sazonal revelou uma concentração expressiva dos eventos na primavera (102 dias), período que combina alta radiação solar com a baixa umidade característica do final da estação seca. Esta descoberta é particularmente crítica ao ser articulada com a literatura sobre microclimas urbanos. Estudos como o de Almeida e Ribeiro (2024) apontam a primavera como a estação de maior sinergia entre as temperaturas elevadas e a intensificação das Ilhas de Calor Urbanas (ICU).

Conclui-se, portanto, que São Paulo enfrenta um cenário de vulnerabilidade climática crescente. A sinergia entre o aquecimento de fundo (mudança climática global) e a exacerbação microclimática (ICU), especialmente na primavera, potencializa os riscos à saúde pública associados aos extremos de calor, conforme documentado por Moraes et al. (2022). O estudo cumpre, assim, seu objetivo de caracterizar os eventos e demonstrar que, independentemente da frequência de eventos definidos, a cidade está comprovadamente mais quente.

Para trabalhos futuros, sugere-se a replicação do estudo utilizando diferentes limiares e métricas para definição de ondas de calor, como as baseadas em percentis

(ex. P90), que podem ser mais sensíveis a mudanças na cauda da distribuição de temperaturas. Recomenda-se, ainda, a incorporação de dados de outras estações meteorológicas para avaliar a variabilidade espacial do fenômeno na Região Metropolitana e aprofundar a correlação direta com os indicadores de Ilha de Calor.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. L. B.; RIBEIRO, F. N. D. Multivariate analysis of the urban heat island of the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 39, p. e39240045, 2024.
- AL-YAARI, A. et al. Heatwave characteristics in the recent climate and at different global warming levels: A multimodel analysis at the global scale. *Earth's Future*, v. 11, n. 9, p. e2022EF003301, 2023.
- BARRIOPEDRO, D. et al. Heat waves: Physical understanding and scientific challenges. *Reviews of Geophysics*, v. 61, n. 2, p. e2022RG000780, 2023.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Clima em Síntese: Estudos sobre saúde e ondas de calor no Brasil (2015-2025)*. Brasília, DF: MCTI, 2025. 58 p.
- CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Anticiclone subtropical do Atlântico Sul associado ao modo anular sul e impactos climáticos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 4, p. 605–613, 2020.
- CHAN, P. W.; CATTO, J. L.; COLLINS, M. Heatwave–blocking relation change likely dominates over decrease in blocking frequency under global warming. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, v. 5, n. 1, p. 68, 2022.
- CHAPMAN, C. C. et al. The Typicality of Regimes Associated with Northern Hemisphere Heatwaves. *Journal of Climate*, 2025.
- CHEVAL, S. et al. A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022). *Climate Risk Management*, v. 44, p. 100603, 2024.
- COSTA, J. et al. Mudanças ambientais, climáticas e os serviços de saúde: caminhos para mitigação. *Revista Enfermagem UERJ*, v. 32, p. e82230, 2024.
- FANTE, K. P. Eventos meteorológicos extremos de temperatura: a incidência de ondas de calor em Rio Claro – SP, com base em diferentes metodologias analíticas. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2024.
- GERSHUNOV, A.; DOUVILLE, H. Extensive summer hot and cold extremes under current and possible future climatic conditions: Europe and North America. In: DIAZ,

H. F.; MURNANE, R. J. (org.). *Climate extremes and society*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p. 74–98.

GOUVEIA, N.; HAJAT, S.; ARMSTRONG, B. Socioeconomic differentials in the temperature–mortality relationship in São Paulo, Brazil. *International Journal of Epidemiology*, v. 32, n. 3, p. 390–397, 2003.

HAO, X. et al. Mechanisms behind the rapid rise of extreme heat discomfort days in South China. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, v. 8, n. 1, p. 347, 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

JOSHI, K. 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.

KONG, J. et al. Urban heat island and its interaction with heatwaves: A review of studies on mesoscale. *Sustainability*, v. 13, n. 19, p. 10923, 2021.

LUCENA, A. J.; ROTTUNO FILHO, O. C.; FRANÇA, J. R.; PERES, L.; XAVIER, L. N. R. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 111, p. 497–511, 2013.

LÜTHI, S. et al. Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature Communications*, v. 14, p. 4381, 2023.

MELLO, G. S. L. et al. Análise da tendência de aumento da temperatura do ar nas cidades de Santa Isabel e São Paulo, estado de São Paulo, a partir de diferentes bases de dados, e levantamento de impactos. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2023.

MENDES, J. V.; ARMOND, N. B.; SILVA, L. C. B. Ilhas de calor urbanas de superfície, ondas de calor e de frio no município do Rio de Janeiro – RJ (2015–2019). *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 30, p. 133–155, 2022.

MORA, C. et al. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, v. 7, p. 501–506, 2017.

MORAES, S. L. et al. Impact of heat waves and cold spells on cause-specific mortality in São Paulo. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 241, p. 113949, 2022.

OLIVEIRA, D. S. et al. Ondas de calor mais quentes, duradouras e frequentes: Um estudo observacional para a cidade brasileira de Campinas, São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, p. 305-316, 2021.

PERES, L. F. et al. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, v. 64, p. 104-116, 2018.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, v. 11, p. 3357, 2020.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E. et al. Extreme terrestrial heat in 2023. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 5, p. 705–707, 2024.

PORANGABA, G. F. O.; GALVANI, E.; AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas, MS. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 35, p. 275–296, 2024.

QIAN, Z. et al. Understanding changes in heat waves, droughts, and compound events in Yangtze River Valley and the corresponding atmospheric circulation patterns. *Climate Dynamics*, v. 62, n. 1, p. 539-553, 2024.

REIS, N. S. C.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T. Characterization and spatial coverage of heat waves in subtropical Brazil. *Atmosphere*, v. 10, n. 5, p. 284, 2019.

SILVA, N. S. 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, 2022.

SILVA, P. Impactos das mudanças climáticas na saúde mental infantil: uma perspectiva sobre estresse e ansiedade em crianças com transtornos do neurodesenvolvimento. *IOSR Journal of Business and Management*, v. 26, n. 12, p. 56-65, 2024.

SILVEIRA, R. B. et al. A DPOC na área metropolitana do Porto e o efeito das ondas de calor e de frio. *Physis Terrae*, 2019.

SON, J. Y. et al. The impact of temperature on mortality in a subtropical city. *International Journal of Biometeorology*, v. 60, n. 1, p. 113–121, 2016.

TASAN, M.; DĄBROWSKA, J.; MICHAŁOWSKA, K. Surface urban heat islands during heatwaves: Thermal impacts on the built environment in selected polish cities. *Building and Environment*, p. 113603, 2025.

VALENTE, F.; LAURINI, M. Urban climate change: a statistical analysis for São Paulo. *Urban Climate*, v. 41, p. 101077, 2022.

VALVERDE, M. C. Efeito das ondas de calor na intensidade das ilhas de calor: estudo de caso para a Região Metropolitana de São Paulo, setembro de 2020. *XIV Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica*, 2021.

VALVERDE, M. C.; ROSA, M. B. Heat waves in São Paulo State, Brazil: Intensity, duration, spatial scope, and atmospheric characteristics. *International Journal of Climatology*, v. 43, n. 8, p. 3782-3798, 2023.

VUJOVIC, S. et al. Urban heat island: Causes, consequences, and mitigation. *CivilEng*, v. 2, n. 2, p. 459–484, 2021.

WANG, Y. et al. Future population exposure to heatwaves in 83 global megacities. *Science of the Total Environment*, v. 896, p. 165267, 2023.

WOOLLINGS, T. et al. Blocking and its response to climate change. *Current Climate Change Reports*, v. 4, n. 3, p. 287–300, 2018.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. *Heatwave*. 2023. Disponível em: <https://wmo.int/topics/heatwave>. Acesso em: 5 mai. 2025.