



Transformação Urbana e Aquecimento da Superfície Terrestre em Cubatão e na Baixada Santista: Evolução Ambiental ao longo de várias décadas e seu Diálogo com a Literatura sobre Saúde Humana

Urban Transformation and Land Surface Warming in Cubatão and the Baixada Santista Region: Environmental Change over Several Decades and Its Dialogue with the Human Health Literature

Tiana Carla Lopes Moreira¹, Evaldo Stanislau Affonso de Araújo²

¹ Universidade São Judas Tadeu Faculdade de Medicina campus Cubatão – São Paulo, Brasil. Universidade de São Paulo: Departamento de Patologia e Departamento de Nefrologia, Faculdade de Medicina, São Paulo – São Paulo, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9710-7725>.

² Universidade São Judas Tadeu Faculdade de Medicina campus Cubatão – São Paulo, Brasil; Inspirali Educação. DMIP Hospital das Clínicas da FMUSP. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3642-5476>

Autor Correspondente:

Evaldo Stanislau Affonso de Araújo

Endereço: Av. Martins Fontes 100, Vila Nova, Cubatão, SP CEP: 11525-090, Brasil.

E-mail: evaldo.araujo@inspirali.com

RESUMO

Introdução: A urbanização acelerada tem sido associada ao aumento da temperatura da superfície terrestre (LST) e à redução da cobertura vegetal em áreas costeiras, com potenciais implicações para a saúde humana. Cubatão (SP), historicamente reconhecida por sua poluição industrial e por um programa de recuperação ambiental iniciado em 1983, carece de estudos que comparem formalmente sua trajetória ambiental à dos demais municípios da Baixada Santista. **Objetivo:** Investigar a evolução, de 1985 a 2024, de variáveis ambientais, temperatura da superfície terrestre, área urbanizada, área verde e variáveis climáticas em Cubatão, comparando com um grupo regional (Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente), para discutir os padrões observados com base na literatura sobre poluição, aquecimento urbano e saúde humana. **Referencial Teórico:** O estudo fundamenta-se na literatura sobre ilhas de calor urbanas e na temperatura de superfície como indicador de transformação ambiental, na trajetória histórica de industrialização e de recuperação ambiental de Cubatão, e nas evidências epidemiológicas que associam o aquecimento e a poluição a desfechos cardiovasculares, respiratórios e ocupacionais, bem como à transmissão da dengue. **Método:** Estudo ecológico espaço-temporal, com unidade de análise espacial em grade de 500 × 500 m (3.406 células válidas), integrando dados de temperatura de superfície (Landsat/USGS), uso e cobertura da terra (MapBiomas) e variáveis climáticas (ERA5-Land). A tendência temporal foi avaliada pelo teste de Mann-Kendall (inclinação de Sen); Cubatão foi comparado ao grupo comparador por meio dos testes de Mann-Whitney e de modelos de regressão com interação ano×grupo, ao nível de significância de 5%. **Resultados e Discussão:** Todos os municípios apresentaram aquecimento de superfície estatisticamente significativo (+1,21 a +1,78°C/década), com Cubatão em posição intermediária (+1,28°C/década) e sem diferença estatística em relação ao comparador quanto ao nível (p=0,23) ou à velocidade de aquecimento (p=0,63). Cubatão diferiu significativamente apenas quanto à menor proporção de área urbanizada (p<0,001) e apresentou o maior ganho de área verde da região (+0,88 p.p./década). Esses achados, ao serem analisados juntamente com a literatura sobre saúde ambiental, indicam que o risco do aquecimento é fenômeno regional, não

HISTÓRIA DO ARTIGO

Received 17 Jul 2026

Accepted 12 Ago 2026

PALAVRAS-CHAVE

Urbanização; Aquecimento Global; Tecnologia de Sensoriamento Remoto; Monitoramento Ambiental; Saúde Ambiental.

ficando restrito a Cubatão. Além disso, a recuperação ambiental parcial do município pode atuar como uma espécie de proteção térmica extra, oferecendo uma esperança de melhora na situação. Conclusão: A Baixada Santista apresenta aquecimento de superfície generalizado associado à urbanização regional. Cubatão não se destacou como o município mais afetado, o que sugere uma recuperação ambiental parcial e mensurável. Recomenda-se a integração futura de dados primários de morbimortalidade para testar diretamente as hipóteses de associação entre o ambiente e a saúde aqui formuladas.

ABSTRACT

Introduction: Accelerated urbanization has been associated with increases in land surface temperature (LST) and reductions in vegetation cover in coastal areas, with potential implications for human health. Cubatão (São Paulo, Brazil), historically known for industrial pollution and an environmental recovery program initiated in 1983, lacks studies that formally compare its environmental trajectory with those of other municipalities in the Baixada Santista region. **Objective:** To examine the evolution of environmental variables like land surface temperature, urbanized area, green space, and climate factors in Cubatão from 1985 to 2024, and compare these with a regional group comprising Guarujá, Praia Grande, Santos, and São Vicente. This analysis aims to discuss the observed patterns within the context of existing research on pollution, urban warming, and human health. **Theoretical Framework:** The study draws on the literature on urban heat islands and land surface temperature as an indicator of environmental change; the historical trajectory of industrialization and environmental recovery in Cubatão; and epidemiological evidence linking warming and pollution to cardiovascular, respiratory, and occupational outcomes, as well as dengue transmission. **Method:** Ecological space-time study, with a spatial unit of analysis based on a 500 × 500 m grid (3,406 valid cells), integrating land surface temperature data (Landsat/USGS), land use and land cover data (MapBiomass), and climate variables (ERA5-Land). Temporal trends were assessed using the Mann-Kendall test (Sen's slope); Cubatão was compared to the comparator group using Mann-Whitney tests and regression models with a year×group interaction term, at a 5% significance level. **Results and Discussion:** All municipalities showed statistically significant surface warming (+1.21 to +1.78°C/decade), with Cubatão in an intermediate position (+1.28°C/decade) and no statistical difference from the comparator group in either level ($p=0.23$) or rate of warming ($p=0.63$). Cubatão differed significantly only in having a lower proportion of urbanized area ($p<0.001$) and showed the largest gain in green area in the region (+0.88 percentage points/decade). These findings, considered within the environmental health literature, indicate that the warming risk is more regional in nature rather than unique to Cubatão. Additionally, the municipality's partial environmental recovery might serve as an extra thermal protective factor. **Conclusion:** The Baixada Santista region is experiencing widespread surface warming associated with regional urbanization. Cubatão did not stand out as the most affected municipality, suggesting a measurable partial environmental recovery. Future integration of primary morbidity and mortality data is recommended to directly test the hypotheses about the environment-health association formulated here.

KEYWORDS

Urbanization; Global Warming; Remote Sensing Technology; Environmental Monitoring; Environmental Health.

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada das últimas décadas tem promovido a substituição de superfícies naturais por materiais impermeáveis, como asfalto, concreto e telhados, reduzindo a capacidade de infiltração e de evapotranspiração do solo e favorecendo alterações no balanço energético da superfície e no microclima urbano¹. Em regiões costeiras urbanizadas, essas transformações adquirem características adicionais, associadas à proximidade de corpos d'água e à presença de atividades portuárias e industriais, o que torna tais áreas especialmente relevantes para o estudo da relação entre a transformação ambiental e as condições térmicas de superfície².

Um dos indicadores mais utilizados para caracterizar esse processo é a temperatura da superfície terrestre (LST), obtida por sensoriamento remoto na faixa do infravermelho termal e amplamente empregada para caracterizar o efeito de ilha de calor em áreas urbanas³. A disponibilidade de séries históricas de imagens de satélite, como as do programa Landsat, permite reconstruir séries temporais de LST ao longo das décadas e identificar padrões heterogêneos de aquecimento em uma mesma região metropolitana, como os cinco municípios que compõem a Baixada Santista.

Cubatão constitui um dos casos mais emblemáticos dessa problemática. Reconhecido internacionalmente como um dos episódios mais graves de poluição urbano-industrial, com declínio da Mata Atlântica associado à instalação do polo industrial ao longo do século XX^{4,5,6}, o município passou, a partir de 1983, pelo Programa de Controle da Poluição, frequentemente citado como um ponto de virada na melhoria da qualidade do ar, da água e do solo^{7,8,9}. Ainda assim, a mesma literatura descreve uma recuperação apenas parcial, com persistência de passivos tóxicos e de déficits sociais em comunidades próximas ao polo industrial^{10,11}, agravados pela topografia local, que retém poluentes e intensifica o dano florestal nas encostas da Serra do Mar^{12,6}.

A literatura internacional é consistente ao associar o aquecimento urbano e a poluição atmosférica a piores desfechos de saúde humana, principalmente desfechos cardiovasculares, respiratórios, ocupacionais e infecciosos^{13,14,15,16}. Porém, ainda são escassos os estudos que descrevem, ao longo das décadas e com explícita espacialidade, a evolução conjunta da temperatura de superfície, da urbanização e da área verde em Cubatão, em comparação com os demais municípios da Baixada Santista, o que constitui uma lacuna que o presente estudo busca preencher.

Este estudo tem como objetivo descrever a evolução de variáveis ambientais, temperatura da superfície terrestre, urbanização, área verde e variáveis climáticas, em Cubatão ao longo de quatro décadas, comparando-a à dos demais municípios da Baixada Santista (Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente), e discutir os padrões observados na literatura científica sobre os impactos da poluição e do aquecimento na saúde humana.

MÉTODOS

Delineamento do Estudo

Este estudo ecológico espaço-temporal, observacional e quantitativo possui componentes descritivos e analíticos. O descritivo acompanha a evolução, ao longo das décadas (1985–2024), de variáveis ambientais, como temperatura da superfície terrestre (LST), área urbanizada, área verde e variáveis climáticas, em Cubatão e em outros municípios da Baixada Santista. O analítico compara estatisticamente essa evolução entre os municípios, utilizando testes de tendência temporal e de associação entre variáveis. Não houve intervenção; os dados secundários foram obtidos por sensoria-mento remoto e por reanálise climática, sem coleta direta de dados de humanos ou animais.

Local do Estudo

O estudo foi realizado na Baixada Santista, região metropolitana costeira do estado de São Paulo, Brasil, composta por cinco municípios: Cubatão, Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente (Figura 1). A região combina áreas densamente urbanizadas, zonas industriais e portuárias, remanes-centes de Mata Atlântica e diferentes padrões históricos de ocupação do território, o que a torna ade-quada para uma análise comparativa da evolução ambiental intermunicipal.

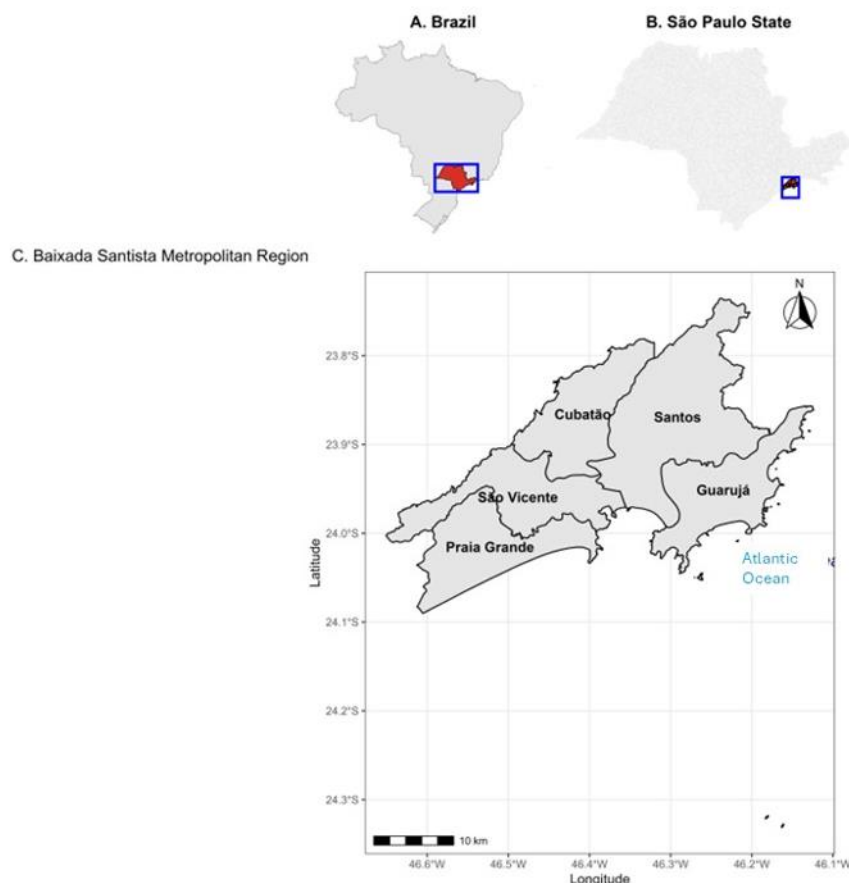


Figura 1 – Área de estudo – Baixada Santista, SP, Brasil.

Coleta de Dados

Seis variáveis ambientais quantitativas foram coletadas: temperatura da superfície terrestre (LST), proporção de área urbanizada, proporção de área verde, temperatura do ar, precipitação e umidade relativa, todas em séries anuais. Os dados de LST provenientes dos satélites Landsat 5, 8 e 9 foram validados pelo USGS. A proporção de áreas urbanizadas e verdes foi obtida do MapBiomas, com classificação supervisionada validada anualmente. As variáveis climáticas foram obtidas da reanálise ERA5-Land, produzida pelo ECMWF. Nenhuma coleta direta foi realizada; todos os dados são secundários e públicos. O processamento foi feito no *Google Earth Engine*; a integração, o controle de qualidade e as análises, no R.

Intervenção

Não se aplica. Trata-se de um estudo observacional, sem intervenção sobre a população ou o território.

Elegibilidade, Critérios de Inclusão e Exclusão, e Unidade de Análise

A análise foi espacial, não individual, utilizando uma grade de 3.438 células de 500×500 m que cobriu toda a Região Metropolitana da Baixada Santista. Todos os municípios (censo completo) foram incluídos; não houve amostragem. Para o critério temporal, consideraram-se anos com pelo menos uma imagem de satélite válida, excluindo 2012 devido a problemas nos sensores do Landsat. Dados ausentes foram tratados como *missing*, sem interpolação. Como estudo censitário, não houve cálculo amostral prévio.

Grupo Comparador

Cubatão foi definido a priori como o município de interesse principal, em razão de seu histórico documentado de intensa poluição industrial e de recuperação ambiental parcial. Os demais quatro municípios da Baixada Santista (Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente) foram utilizados como grupo comparador regional. A seleção do comparador não envolveu pareamento individual, mas sim a inclusão da totalidade dos municípios que compartilham a mesma região metropolitana, o mesmo contexto climático regional e características costeiras semelhantes, diferindo principalmente quanto ao histórico de industrialização, o que permite atribuir as diferenças observadas entre Cubatão e os comparadores ao seu legado industrial específico, e não a fatores climáticos regionais mais amplos.

Análise de Dados

O processamento de dados geoespaciais foi realizado no *Google Earth Engine*, enquanto a integração das bases de dados, o controle de qualidade e as análises estatísticas foram realizados no

software R, utilizando os pacotes *dplyr* e *tidyr*. A qualidade do banco foi avaliada por meio de verificações de consistência espacial e temporal, bem como da identificação de valores ausentes e de observações duplicadas, em cada unidade espacial e por ano. Foram aplicadas estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mediana, percentis 25 e 75, mínimo e máximo) a todas as variáveis ambientais, por município e na região como um todo. A tendência temporal de cada variável, por município, foi analisada pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall, com a magnitude estimada pelo estimador de inclinação de Sen, expressa em décadas. A diferença no nível médio de LST entre os cinco municípios foi avaliada pelo teste de Kruskal-Wallis. A velocidade de aquecimento diferencial entre os municípios foi analisada por meio de um modelo de regressão linear com termo de interação entre ano e município. A relação entre urbanização/área verde e LST foi avaliada por meio de correlação de Spearman e de um modelo de regressão linear múltipla, com verificação da multicolinearidade por meio do VIF. Foi adotado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) para rejeitar a hipótese nula em todos os testes.

Visualização dos Dados

Os gráficos de tendência temporal e os mapas de distribuição espacial das variáveis ambientais foram gerados em *Python* (biblioteca *matplotlib*), a partir da mesma base de dados utilizada nas análises estatísticas. O painel de tendências (Figura 2) apresenta, para cada variável, a série anual suavizada por município, com paleta de cores consistente entre os painéis e destaque visual para Cubatão. Os mapas de distribuição espacial (Figura 3) foram construídos a partir de uma grade de 500×500 m, comparando os valores de cada célula em 1985 e em 2024, além de um terceiro mapa de diferença ($2024 - 1985$) em escala de cores divergente, o que permite identificar visualmente as áreas de maior mudança ao longo do período.

Considerações Éticas

O presente estudo utilizou exclusivamente dados ambientais secundários, agregados, de acesso público e sem qualquer identificação individual de pessoas, provenientes do United States Geological Survey (USGS), do MapBiomas e do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF/ERA5-Land). Não houve coleta de dados humanos ou animais nesta etapa do estudo, razão pela qual não se aplica a submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) neste protocolo. Etapas futuras deste projeto que venham a integrar dados primários de morbimortalidade da população da Baixada Santista serão submetidas ao CEP antes de sua execução, em conformidade com a Resolução CNS nº 466/2012 e com a legislação vigente sobre pesquisa envolvendo seres humanos no Brasil.

Resultados

Composição da Área de Estudo e Completude dos Dados

Foi incluída toda a área da Região Metropolitana da Baixada Santista, composta por Cubatão, Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente, que corresponde exatamente à área inicialmente prevista. Nenhum município foi excluído ao longo do período, nem houve amostragem. A grade espacial, formada por 3.438 células de 500×500 m, resultou em 3.406 células (99,1%) com pelo menos um registro ambiental válido entre 1985 e 2024; as 32 células restantes (0,9%) não apresentaram dados em nenhum ano, provavelmente por serem corpos d'água ou áreas fora do limite terrestre coberto pelos satélites, e foram descartadas da análise. De um total de 39 anos considerados (de 1985 a 2024, excluindo 2012 devido à lacuna entre os sensores Landsat, foram geradas 132.834 unidades de célula-ano (3.406 células multiplicadas por 39 anos). Destas, 131.901 (99,3%) apresentaram valores válidos de temperatura de superfície (LST); as 933 unidades restantes (0,7%) foram consideradas dados ausentes, sem tentativa de imputação, principalmente devido à cobertura residual de nuvens ou sombras nas imagens Landsat. As demais variáveis (área urbanizada, área verde, temperatura do ar, precipitação e umidade relativa) apresentaram dados completos em todas as unidades de célula-ano.

Estatística Descritiva das Variáveis Ambientais

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva das seis variáveis ambientais da região. A temperatura média da superfície foi de $25,7^{\circ}\text{C}$ (DP de $4,3^{\circ}\text{C}$), com mediana de $25,3^{\circ}\text{C}$. As variáveis que representam a proporção de cobertura do solo (área urbana e área verde) apresentaram distribuição bimodal, indicando predominância de células completamente urbanizadas ou totalmente naturais. Essa característica explica o alto desvio padrão em relação à média nessas variáveis, o que é esperado para esse tipo de dado e não indica erro. Quando os dados foram estratificados por município, a temperatura média da superfície variou de $24,5^{\circ}\text{C}$ (Santos) a $26,5^{\circ}\text{C}$ (Guarujá), com Cubatão apresentando média intermediária de $26,3^{\circ}\text{C}$.

Tabela 1. Estatística descritiva das variáveis ambientais (células $\times$ ano, Baixada Santista, 1985–2024).

Variável	N válido (%)	Média $\pm$ DP	Mediana [P25-P75]	Mín - Máx
Temperatura de superfície — LST ($^{\circ}\text{C}$)	131.901 (99%)	$25,7 \pm 4,3$	25,3 [22,9–27,9]	1,6 – 47,7
Área urbanizada (%)	132.834 (100%)	$18,1 \pm 33,7$	0,0 [0,0–16,3]	0,0 – 100,0
Área verde (%)	132.834 (100%)	$45,7 \pm 46,2$	25,0 [0,0–100,0]	0,0 – 100,0
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	132.834 (100%)	$21,41 \pm 0,56$	21,42 [21,02–21,80]	20,13 – 22,69
Precipitação (mm/ano)	132.834 (100%)	2215 ± 225	2227 [2069–2358]	1667 – 2674
Umidade relativa (%)	132.834 (100%)	$84,1 \pm 0,9$	84,1 [83,5–84,7]	82,0 – 86,2

Abreviações: DP, desvio padrão; P25/P75, percentis 25 e 75.

Tendência Temporal por Município

A análise de tendência (teste de Mann-Kendall, com magnitude estimada pela inclinação de Sen; Tabela 2) mostrou aquecimento de superfície estatisticamente significativo ($p < 0,001$) nos cinco municípios, variando de $+1,21^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Santos) a $+1,71^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Praia Grande); Cubatão apresentou $+1,28^{\circ}\text{C}/\text{década}$. A área urbanizada aumentou de forma significativa em todos os municípios ($p < 0,001$), com ritmo mais acelerado em Praia Grande ($+1,86 \text{ p.p.}/\text{década}$) e mais lento em Santos ($+0,53 \text{ p.p.}/\text{década}$). A área verde aumentou significativamente em quatro dos cinco municípios, com maior magnitude em Cubatão ($+0,88 \text{ p.p.}/\text{década}$); Santos foi o único município com tendência de queda ($-0,11 \text{ p.p.}/\text{década}$). A temperatura do ar aumentou de forma discreta, porém significativa, em todos os municípios ($+0,14$ a $+0,15^{\circ}\text{C}/\text{década}$); a precipitação não apresentou tendência significativa em nenhum município, e a umidade relativa apresentou queda significativa na maioria deles.

A Figura 2 ilustra as tendências descritas acima, apresentando a série suavizada de cada variável por município ao longo do período de estudo; observa-se que as curvas de temperatura de superfície dos cinco municípios seguem um padrão ascendente semelhante, com Cubatão (vermelho) situando-se em posição intermediária durante praticamente toda a série. A Figura 3 apresenta a distribuição espacial da temperatura de superfície e da área urbanizada em 1985 e em 2024, evidenciando que o aumento de temperatura se concentra sobretudo nas áreas já urbanizadas em 1985, especialmente ao longo do eixo Cubatão–Santos–Guarujá; o mapa de diferença (2024–1985) mostra que as maiores variações absolutas de temperatura ocorreram nas franjas de expansão urbana mais recente, coerente com os achados de tendência por município apresentados na Tabela 2.

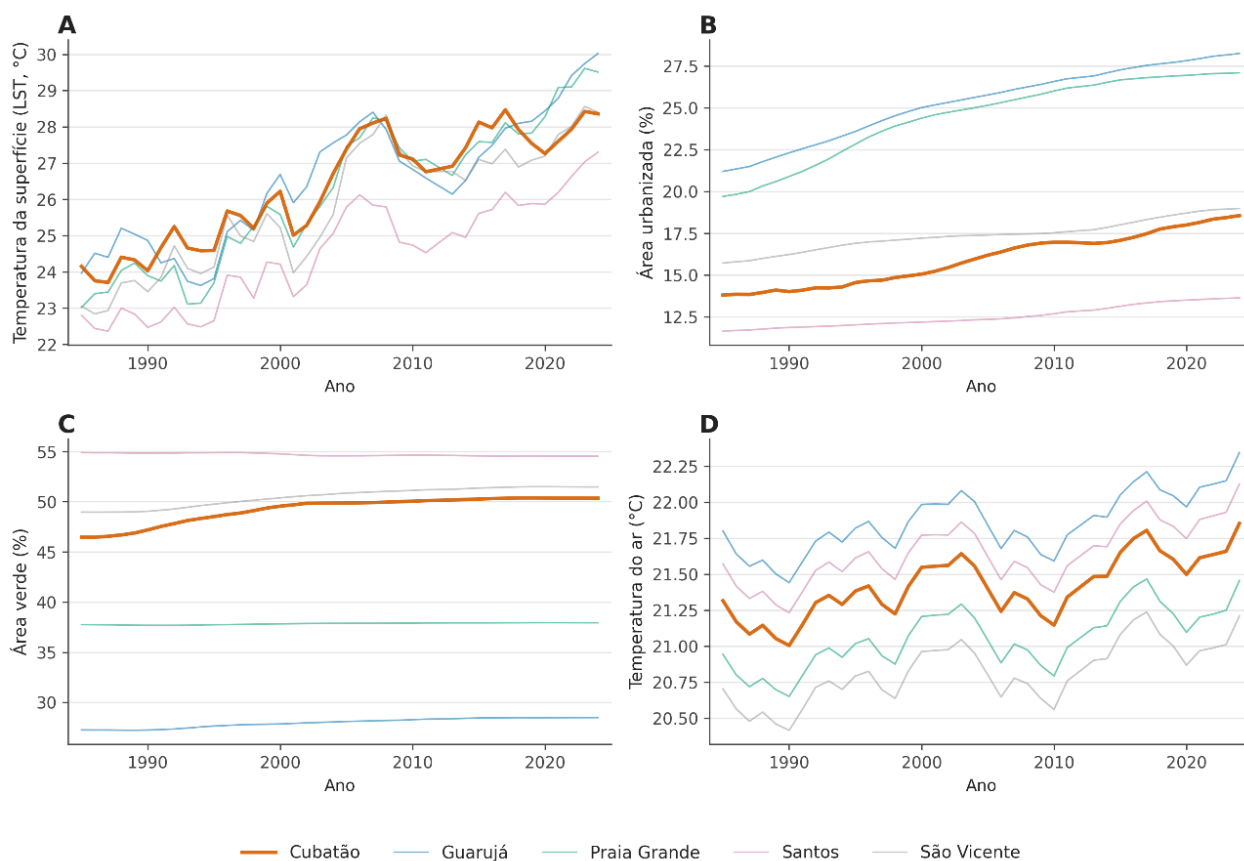


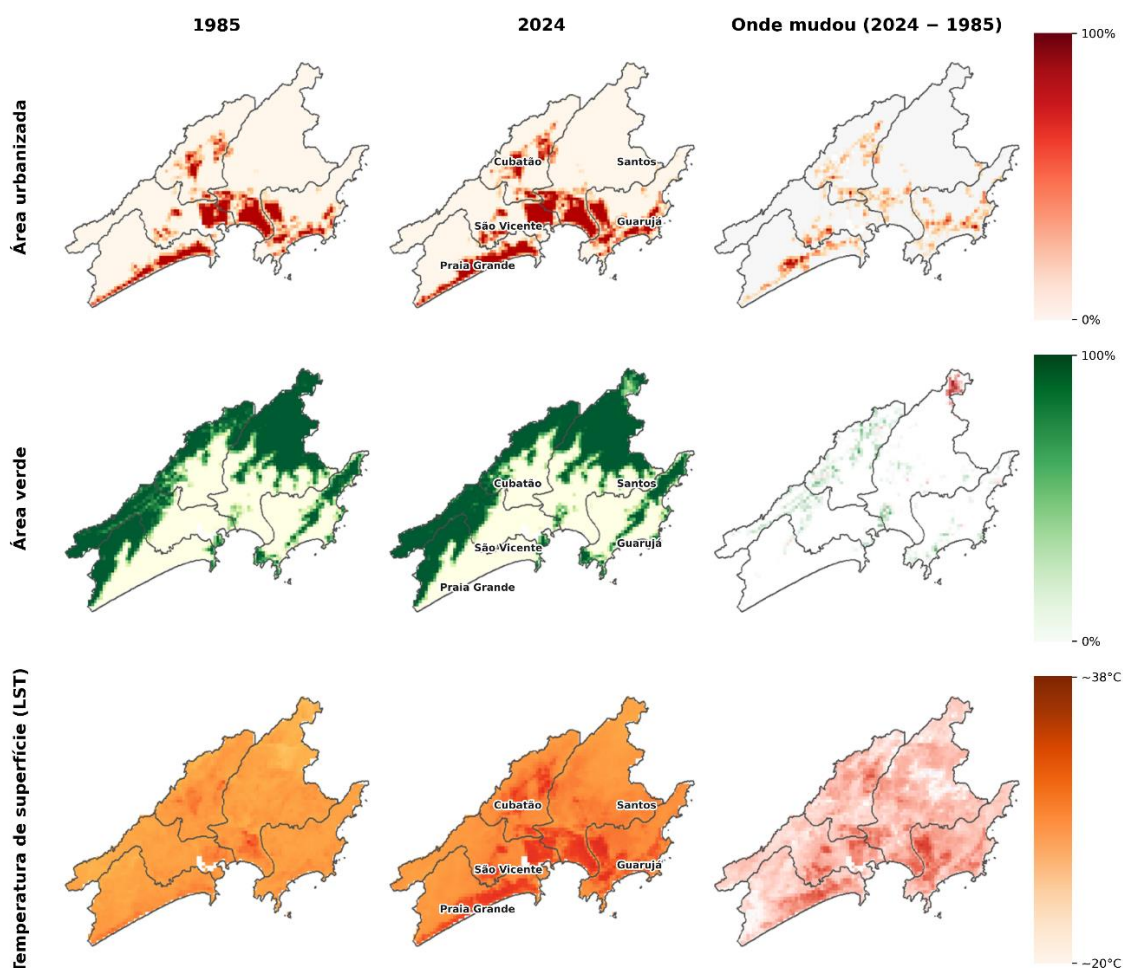
Figura 2 – Evolução das variáveis ambientais na baixada santista (1985-2024)

Tabela 2. Tendência ao longo das décadas (1985–2024) das variáveis ambientais por município, estimada pelo teste de Mann-Kendall (inclinação de Sen por década).

	LST (°C/década)	Área urbanizada (p.p./década)	Área verde (p.p./década)	Temperatura do ar (°C/década)	Precipitação (mm/década)	Umidade relativa (p.p./década)
Cubatão	+1.28***	+1.34***	+0.88***	+0.15*	-51.75	-0.36**
Guarujá	+1.45***	+1.81***	+0.38***	+0.15*	-25.07	-0.28*
Praia Grande	+1.71***	+1.86***	+0.07***	+0.14*	-27.00	-0.28
Santos	+1.21***	+0.53***	-0.11***	+0.15*	-35.36	-0.31*
São Vicente	+1.49***	+0.77***	+0.75***	+0.15*	-39.26	-0.33*

Abreviações: p.p., pontos percentuais; LST, temperatura da superfície terrestre.

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ *** $p < 0,001$ (teste de Mann-Kendall).



Mapas em grade de 500 m. Coluna 3: diferença 2024–1985 (tons mais escuros/avermelhados indicam maior aumento).
Rótulos de município posicionados sobre o mapa de 2024, com base nos limites municipais da Baixada Santista.

Figura 3 – Evolução da urbanização, área verde e temperatura de superfície na baixada santista (1985 – 2024)

Comparação entre Municípios e Associação entre Variáveis

A Tabela 3 resume os testes de comparação e de associação realizados. O nível médio de LST diferiu significativamente entre os cinco municípios (Kruskal-Wallis, $H=14,35$; $p=0,006$); entretanto, a velocidade de aquecimento não diferiu significativamente entre eles (nenhum termo de interação ano×município com $p<0,05$), indicando ritmos de aquecimento estatisticamente semelhantes a partir de níveis basais distintos. A correlação entre área urbanizada e LST foi moderada e significativa ($\rho=0,41$; $p<0,001$); a correlação entre área verde e LST não foi significativa ($\rho=-0,11$; $p=0,15$). Em modelo multivariado ($LST \sim \text{urbanização} + \text{área verde} + \text{ano}$; $R^2=0,41$), apenas o efeito do ano permaneceu significativo, resultado compatível com a colinearidade entre as três variáveis (VIF urbanização=8,76; VIF área verde=8,05)

Tabela 3. Comparação entre Cubatão e o grupo comparador (Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente), quanto ao nível médio e à velocidade de mudança das variáveis ambientais (1985–2024)

Variável	Cubatão (média)	Comparador ¹ (média)	Nível ² (valor de p)	Velocidade ³ (valor de p)
Temperatura de superfície — LST (°C)	26.3	25.8	0.2323 (ns)	0.6260 (ns)
Área urbanizada (%)	15.9	19.9	0.0002 (***)	0.9662 (ns)
Área verde (%)	49.2	42.8	0.2944 (ns)	0.6130 (ns)
Temperatura do ar (°C)	21.4	21.4	0.5393 (ns)	0.9741 (ns)
Precipitação (mm/ano)	2192	2214	0.5605 (ns)	0.7101 (ns)
Umidade relativa (%)	84.0	84.1	0.3908 (ns)	0.7380 (ns)

Abreviações: ns, não significativo.

¹ Comparador = média conjunta dos quatro municípios comparadores (Guarujá, Praia Grande, Santos, São Vicente).

² Diferença no nível médio entre Cubatão e o comparador, avaliada pelo teste de Mann-Whitney (Wilcoxon rank-sum).

³ Diferença na velocidade de mudança (inclinação temporal) entre Cubatão e o comparador, testada por meio de um termo de interação ano × grupo em um modelo de regressão linear. *** p<0,001 ** p<0,01 * p<0,05.

DISCUSSÃO

Os achados deste estudo sugerem que o aquecimento de superfície na Baixada Santista é um fenômeno regional, e não um traço específico de Cubatão. Essa constatação vai de encontro à hipótese inicial deste trabalho, formulada a partir do histórico amplamente documentado de poluição industrial do município^{7,8,9}, segundo a qual Cubatão apresentaria o padrão de aquecimento mais acentuado da região. Ao contrário, tanto o nível médio de temperatura de superfície quanto a velocidade de aquecimento de Cubatão não diferiram estatisticamente do grupo comparador ($p=0,23$ e $p=0,63$, respectivamente); a única variável em que o município se destacou de forma estatisticamente significativa foi a menor proporção de área urbanizada ($p<0,001$). Interpretamos esses resultados como evidência de que a trajetória ambiental de Cubatão nos últimos 40 anos tende mais a uma recuperação parcial do que a manter o quadro crítico histórico, leitura que já havíamos sugerido e que agora é confirmada com maior rigor pelos testes formais.

Esse padrão relaciona-se de forma interessante à literatura sobre ilhas de calor na Região Metropolitana de São Paulo. Valverde et al. (2020)¹⁷ descreveram diferenças de até 3,7°C entre áreas urbanizadas e não urbanizadas na Região do ABC Paulista, atribuindo esse padrão principalmente à expansão urbana local. Nossos dados mostram uma correlação moderada entre a área urbanizada e o LST ($\rho = 0,41$). Apesar das divergências sobre o papel da urbanização local, os cinco municípios da Baixada Santista apresentam aquecimento semelhante, independentemente do nível de urbanização, o que indica que fatores climáticos regionais, como a retenção de calor e de poluentes pela Serra do Mar, influenciam o fenômeno. Isso sugere que sinais de aquecimento de mesoescala podem estar se sobrepondo aos sinais locais de cada município. Esta é uma descoberta que a literatura revisada, especialmente a focada nos efeitos intraurbanos, ainda não tinha explorado nesta região específica, e achamos que é uma das contribuições mais valiosas deste estudo. Também é importante refletirmos

sobre os resultados das áreas verdes. Esperávamos, com base em estudos sobre o papel da vegetação urbana na redução de temperaturas^{18,19}, encontrar uma correlação negativa e significativa entre as áreas verdes e a temperatura superficial (LST). No entanto, essa relação não ficou clara na análise preliminar ($p=-0,11$; $p=0,15$). Gostaríamos de ressaltar que a ausência de significância estatística não deve ser interpretada como uma rejeição do papel da vegetação na mitigação do calor. Os estudos mencionados utilizam desenhos que conseguem isolar melhor esse efeito, enquanto o nosso método, com uma grade de 500 m, provavelmente não tem resolução suficiente para captar o resfriamento local nas zonas de transição entre áreas urbanas e florestais. Além disso, a colinearidade entre a área verde, a urbanização e o ano (com VIF de 8,05 e 8,76) pode dificultar a distinção dos efeitos de cada variável. Vale destacar também que grande parte da vegetação remanescente na região está concentrada nas partes mais elevadas da Serra do Mar, onde a temperatura já é naturalmente mais baixa devido à altitude, um fator que nosso desenho de estudo não consegue isolar facilmente. Essas diferenças nos convidam a explorar mais a fundo esse tema em futuros estudos, com uma resolução espacial mais detalhada, sem que isso implique concluir que "vegetação não esfria" em Cubatão.

Quanto às implicações para a saúde humana, que não foram testadas diretamente neste estudo, apenas confrontadas hipoteticamente com os padrões ambientais observados, a literatura internacional oferece um quadro robusto para a interpretação. Estudos brasileiros associam ondas de calor ao aumento da mortalidade cardiovascular e cerebrovascular, sobretudo entre idosos e mulheres, com maiores taxas de internação nas regiões Sul e Sudeste do país por cardiopatia isquêmica e doença pulmonar obstrutiva crônica^{13,20,14,21}, e projeções indicam aumento da mortalidade cardiovascular relacionada à temperatura em São Paulo nas próximas décadas²². A literatura epidemiológica associa ainda a temperatura, a umidade e a urbanização à exacerbação de doenças respiratórias, por vias que incluem a intensificação de processos inflamatórios das vias aéreas e a maior sobrevivência de agentes infecciosos respiratórios em áreas mais urbanizadas e poluídas^{23,24}. Trabalhadores ao ar livre constituem um grupo particularmente vulnerável ao estresse térmico ocupacional, com projeções de agravamento dessas condições no Brasil^{15,25,26}. A dengue, por sua vez, tem potencial epidêmico crescente à medida que a temperatura média se aproxima do ponto ótimo de transmissão do vírus, próximo de 31°C, e a urbanização amplia esse risco ao formar ilhas de calor favoráveis à proliferação do *Aedes aegypti*^{16,27,28}. A mudança climática está relacionada a efeitos na saúde mental, incluindo ecoansiedade, luto ecológico e traumas decorrentes de eventos extremos²⁹, com populações já vulneráveis tendendo a sofrer, de forma desproporcional, os efeitos combinados da poluição e do aquecimento, em razão de desigualdades sociais e econômicas preexistentes^{30,31,32}.

Com base nesse conjunto de evidências, o aquecimento de superfície observado em toda a Baixada Santista, e não apenas em Cubatão, indica riscos aumentados de problemas cardiovasculares e respiratórios na região, especialmente em Guarujá e Praia Grande, onde a urbanização e o

aquecimento foram mais intensos. O crescimento da área verde em Cubatão, embora não apresente relação estatisticamente significativa com a temperatura superficial neste estudo, apoia a hipótese de que a vegetação urbana pode atuar como fator de proteção térmica e melhorar a qualidade do ar para os moradores^{24,25}. Essa hipótese ganha ainda mais importância devido à história de exposição à poluição industrial na cidade. Embora o aumento da temperatura do ar na região seja pequeno, ele é consistente com estudos que relacionam o aquecimento urbano a um maior risco de dengue. Isso ressalta a importância da vigilância entomológica em cidades que urbanizam rapidamente.

A heterogeneidade espacial indica dois padrões de transformação ambiental. Guarujá e Praia Grande têm urbanização rápida e maiores aumentos de temperatura, o que reflete a expansão urbana recente e a escassa cobertura vegetal. Cubatão mostra menor urbanização, aquecimento abaixo da média e maior ganho de área verde, alinhados à recuperação ambiental parcial mencionada na literatura^{7,9}, embora ainda haja passivos ambientais não analisados.

Este estudo reconhece algumas limitações em sua interpretação, mas também aponta direções promissoras para futuras pesquisas. O desenho ecológico, por exemplo, não permite estabelecer relações causais em nível individual e pode levar à chamada falácia ecológica quando associações observadas em nível populacional são indevidamente interpretadas como relações individuais. No entanto, essa limitação pode ser superada por meio de estudos que combinem dados de saúde individuais ou de microáreas, prioridade já identificada. A diferença de escala entre os dados de sensoriamento remoto (500 m) e as variáveis climáticas do ERA5-Land (~11 km) limita a resolução da análise intraurbana; resoluções mais altas poderão atenuar essa limitação no futuro. A colinearidade entre urbanização, área verde e ano, evidenciada por VIFs elevados, limita a isolação do efeito de cada variável sobre a LST; futuros estudos poderiam usar séries mais longas, maior variação ou modelos com defasagem temporal. A ausência de dados primários de morbimortalidade confere caráter hipotético às implicações para a saúde, direcionando a próxima etapa de integração com os dados do DATASUS. A lacuna de 2012 na série de LST, devido à transição entre sensores Landsat, é uma limitação técnica, mas não compromete a tendência geral. Planejamos integrar dados de mortalidade e de internação hospitalar da Baixada Santista para testar as conexões entre o ambiente e a saúde.

Apesar dessas limitações, este estudo apresenta pontos fortes que o diferenciam da literatura ambiental existente na região: uma cobertura temporal que abrange várias décadas (1985–2024), uma metodologia padronizada e replicável entre os cinco municípios, além da integração de múltiplas fontes de sensoriamento remoto e reanálise climática em uma única base de dados. A abordagem aqui empregada, comparação estatística formal entre um município de interesse histórico e um grupo comparador regional, é diretamente aplicável a outros contextos urbano-industriais brasileiros com trajetórias de recuperação ambiental similares, e os indicadores utilizados (LST, proporção de área urbanizada e de área verde por sensoriamento remoto) são generalizáveis e replicáveis em qualquer região

metropolitana costeira do país, subsidiando o monitoramento ambiental contínuo necessário à vigilância em saúde pública.

CONCLUSÃO

Este estudo analisou a evolução das variáveis ambientais em Cubatão e em outros municípios da Baixada Santista, comparando-as e discutindo os efeitos do aumento da temperatura sobre a saúde humana. Os resultados confirmam que o aquecimento de superfície é um fenômeno regional, diferindo estatisticamente quanto à proporção de área urbanizada. Apesar da fama de Cubatão como símbolo da poluição, sua recuperação ambiental recente, com aumento de áreas verdes, é perceptível. Os resultados indicam que as estratégias para reduzir o calor devem abranger toda a Baixada, destacando a recuperação de Cubatão como exemplo. Recomenda-se integrar dados de morbimortalidade, incluir variáveis de poluição do ar e realizar análises espaciais para compreender o papel da vegetação. A região enfrenta aquecimento decorrente da urbanização, o que exige ações coordenadas entre os municípios, com Cubatão apresentando sinais de recuperação ambiental.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores deste artigo declaram que não possuem conflito de interesse de ordem financeiro, pessoal, político, acadêmico ou comercial.

REFERÊNCIAS

1. Vujović, S., Haddad, B., Karaky, H., Sebaibi, N., & Boutouil, M. (2021). Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng*. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>
2. Naserikia, M., Hart, M., Nazarian, N., Bechtel, B., Lipson, M. J., & Nice, K. (2023). Land surface and air temperature dynamics: The role of urban form and seasonality.. *The Science of the total environment*, 167306 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167306>
3. Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. A. (2018). Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote. Sens.*, 11, 48. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
4. Goldenstein L, Carvalhaes SG. Industry and the human and ecological tragedy of Cubatão (São Paulo, Brazil). 2017;266-82. doi:10.4324/9781315103266-13.
5. Nakazato R, Esposito MP, Cardoso-Gustavson P, et al. Efficiency of biomonitoring methods applying tropical bioindicator plants for assessing the phytotoxicity of the air pollutants in SE, Brazil. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;25:19323-37. doi:10.1007/s11356-018-2294-6.
6. Klumpp A, Domingos M, Moraes RM, Klumpp G. Effects of complex air pollution on tree species of the Atlantic Rain Forest near Cubatão, Brazil. *Chemosphere*. 1998;36:989-94. doi:10.1016/s0045-6535(97)10160-6.
7. Lemos M. The politics of pollution control in Brazil: state actors and social movements cleaning up Cubatão. *World Dev*. 1998;26:75-87. doi:10.1016/s0305-750x(97)00123-x.

8. De Mello Lemos MC. The Cubatão pollution control project: popular participation and public accountability. *J Environ Dev*. 1998;7:60-76. doi:10.1177/107049659800700105.
9. Ferreira LG. A gestão ambiental do pólo industrial de Cubatão a partir do programa de controle da poluição iniciado em 1983: atores, instrumentos e indicadores [tese]. 2007. doi:10.11606/d.6.2007.tde-20032008-110106.
10. Braga E, Bonetti C, Burone L, Bonetti Filho J. Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the Baixada Santista estuarine system, Brazil. *Mar Pollut Bull*. 2000;40:165-73. doi:10.1016/s0025-326x(99)00199-x.
11. Gillam C, Charles A. Community wellbeing: the impacts of inequality, racism and environment on a Brazilian coastal slum. *World Dev Perspect*. 2019. doi:10.1016/j.wdp.2019.02.006.
12. Vieira-Filho M, Lehmann C, Fornaro A. Influence of local sources and topography on air quality and rainwater composition in Cubatão and São Paulo, Brazil. *Atmos Environ*. 2014;101:200-8. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.11.025.
13. Silveira IH, Oliveira BFA, Cortes TR, Junger WL. The effect of ambient temperature on cardiovascular mortality in 27 Brazilian cities. *Sci Total Environ*. 2019;691:996-1004. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.493.
14. Zhao Q, Li S, Coelho MSZS, Saldiva PHN, Hu K, Abramson MJ, et al. Geographic, demographic, and temporal variations in the association between heat exposure and hospitalization in Brazil. *Environ Health Perspect*. 2019;127. doi:10.1289/EHP3889.
15. Ioannou LG, Foster J, Morris NB, Piil JF, Havenith G, Mekjavic IB, et al. Occupational heat strain in outdoor workers: a comprehensive review and meta-analysis. *Temperature*. 2022;9:67-102. doi:10.1080/23328940.2022.2030634.
16. Van Wyk HA, Eisenberg JNS, Brouwer AF. Long-term projections of the impacts of warming temperatures on Zika and dengue risk in four Brazilian cities using a temperature-dependent basic reproduction number. *PLoS Negl Trop Dis*. 2023;17. doi:10.1371/journal.pntd.0010839.
17. Valverde MC, Coelho LH, Cardoso ADO, Paiva HH, Brambila R, Boian C, et al. Urban climate assessment in the ABC Paulista Region of São Paulo, Brazil. *Sci Total Environ*. 2020;735:139303. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139303.
18. Wong NH, Tan CL, Kolokotsa DD, Takebayashi H. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nat Rev Earth Environ*. 2021;2:166-81. doi:10.1038/s43017-020-00129-5.
19. Oliveira MCQD, De Miranda RM, De Fátima Andrade M, Kumar P. Impact of urban green areas on air quality: an integrated analysis in the metropolitan area of São Paulo. *Environ Pollut*. 2025;126082. doi:10.1016/j.envpol.2025.126082.
20. Son JY, Gouveia N, Bravo MA, De Freitas CU, Bell ML. The impact of temperature on mortality in a subtropical city: effects of cold, heat, and heat waves in São Paulo, Brazil. *Int J Biometeorol*. 2015;60:113-21. doi:10.1007/s00484-015-1009-7.
21. Geirinhas JL, Russo A, Libonati R, Trigo RM, Castro LC, Peres LF, et al. Heat-related mortality at the beginning of the twenty-first century in Rio de Janeiro, Brazil. *Int J Biometeorol*. 2020. doi:10.1007/s00484-020-01908-x.
22. Silveira IH, Cortes TR, De Oliveira BFA, Junger WL. Projections of excess cardiovascular mortality related to temperature under different climate change scenarios and regionalized climate model simulations in Brazilian cities. *Environ Res*. 2021;110995. doi:10.1016/j.envres.2021.110995.
23. Ebi KL, Vanos J, Baldwin JW, Bell JE, Hondula DM, Errett NA, et al. Extreme weather and climate change: population health and health system implications. *Annu Rev Public Health*. 2021. doi:10.1146/annurev-publhealth-012420-105026.
24. Rocque RJ, Beaudoin C, Ndjaboue R, Cameron L, Poirier-Bergeron L, Poulin-Rheault RA, et al. Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. *BMJ Open*. 2021;11. doi:10.1136/bmjopen-2020-046333.
25. Habibi P, Moradi G, Dehghan H, Moradi A, Heydari A. The impacts of climate change on occupational heat strain in outdoor workers: a systematic review. *Urban Clim*. 2021;36:100770. doi:10.1016/j.uclim.2021.100770.

26. Bitencourt DP, Alves LP, Shibuya EK, Da Cunha ID, De Souza JC. Climate change impacts on heat stress in Brazil: past, present, and future implications for occupational heat exposure. *Int J Climatol*. 2020;41:E2741-56. doi:10.1002/joc.6877.
27. Araujo RV, Albertini MR, Costa-Da-Silva AL, et al. São Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. *Braz J Infect Dis*. 2014;19:146-55. doi:10.1016/j.bjid.2014.10.004.
28. Misslin R, Telle O, Daudé É, Vaguet A, Paul RE. Urban climate versus global climate change: what makes the difference for dengue? *Ann N Y Acad Sci*. 2016;1382. doi:10.1111/nyas.13084.
29. Cianconi P, Betrò S, Janiri L. The impact of climate change on mental health: a systematic descriptive review. *Front Psychiatry*. 2020;11. doi:10.3389/fpsy.2020.00074.
30. Ilić N. Climate change and human health. *Science*. 1996;279:963. doi:10.1126/science.279.5353.963g.
31. Patz JA, Campbell-Lendrum D, Holloway T, Foley JA. Impact of regional climate change on human health. *Nature*. 2005;438:310-7. doi:10.1038/nature04188.
32. Chersich MF, Wright CY, Venter F, Rees H, Scorgie F, Erasmus B. Impacts of climate change on health and wellbeing in South Africa. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15. doi:10.3390/ijerph15091884.