ReGeo ISSN: 2177-3246

INFRAESTRUTURA VERDE, AMEAÇA CLIMÁTICA E DESIGUALDADE SOCIOAMBIENTAL: EVIDÊNCIAS TERRITORIAIS NA REGIÃO DO GRANDE ABC, SÃO PAULO

GREEN INFRASTRUCTURE, CLIMATE HAZARDS, AND SOCIOENVIRONMENTAL INEQUALITY: TERRITORIAL EVIDENCE FROM THE GRANDE ABC REGION, SÃO PAULO

INFRAESTRUCTURA VERDE, AMENAZA CLIMÁTICA Y DESIGUALDAD SOCIOAMBIENTAL: EVIDENCIAS TERRITORIALES EN LA REGIÓN DEL GRANDE ABC, SÃO PAULO

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-074

Data de submissão: 23/06/2026 **Data de publicação:** 07/08/2026

Luís Gustavo Bet
Doutorando em Arquitetura e Urbanismo
Instituição: Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: luis.bet@usp.br

Marina Pannunzio Ribeiro
Pós-doutoranda em Arquitetura e Urbanismo
Instituição: Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: marinapannunzio@gmail.com

Breno Malheiros de Melo
Msc. em Engenharia Urbana
Instituição: Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR)
E-mail: marinapannunzio@gmail.com

Marcela Fernandes da Costa
Mestranda em Arquitetura e Urbanismo
Instituição: Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: marcelacosta@usp.br

Marcel Fantin
Docente de Arquitetura e Urbanismo
Instituição: Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: mfantin@sc.usp.br

RESUMO
O estudo caracteriza tipologias territoriais de infraestrutura verde e ameaça climática na Região do Grande ABC, São Paulo, e examina sua associação com condições socioeconômicas. A partir de indicadores geoespaciais de percentual de cobertura vegetal, disponibilidade per capita de praças e parques, temperatura máxima de superfície e suscetibilidade à inundação, aplicou-se o algoritmo Partitioning Around Medoids (PAM) com distância de Gower as variáveis integradas por setores censitários urbanos do Censo Demográfico 2022. A solução com três agrupamentos identificou tipologias com perfis ambientais qualitativamente distintos, variando de acordo com a ameaça climática e infraestrutura verde. A primeira tipologia (T1) apresenta maior cobertura vegetal e menor ameaça climática, enquanto a T2 dispõe de uma maior disponibilidade per capita de praças e parques

com um grau de ameaça climática intermediária. A terceira tipologia territorial (T3) apresentou as condições mais críticas, tendo um déficit combinado de infraestrutura verde e maior ameaça climática. A caracterização socioeconômica das tipologias indicou que a disponibilidade per capita de praças e parques é indicador ambiental mais estratificado por renda e raça, enquanto a cobertura vegetal apresenta associação fraca com esses marcadores devido a sobreposição com áreas periféricas na região. Os resultados sustentam que a desigualdade socioambiental na região opera, sobretudo, pela dimensão social das infraestrutura verde e não pela cobertura vegetal isoladamente, oferecendo subsídios metodológicos replicáveis para políticas de requalificação urbana voltadas à adaptação climática.

Palavras-chave: Infraestrutura Verde. Ameaça Climática. Desigualdade Socioambiental.

ABSTRACT
This study characterizes territorial typologies of green infrastructure and climate threat in the Grande ABC Region, São Paulo, and examines their association with socioeconomic conditions. Based on geospatial indicators of vegetation cover percentage, per capita availability of public squares and parks, maximum surface temperature, and flood susceptibility, the Partitioning Around Medoids (PAM) algorithm with Gower distance was applied to the variables integrated by urban census sectors from the 2022 Demographic Census. The three-cluster solution identified typologies with qualitatively distinct profiles, varying according to climate threat and green infrastructure. The first typology (T1) presents greater vegetation cover and lower climate threat, while T2 has greater per capita availability of public squares and parks with an intermediate degree of climate threat. The third territorial typology (T3) presented the most critical conditions, with a combined deficit of green infrastructure and higher climate threat. The socioeconomic characterization of the typologies indicated that per capita availability of public squares and parks is the environmental indicator most stratified by income and race, while vegetation cover shows a weak association with these markers due to its overlap with peripheral areas in the region. The findings support that socioenvironmental inequality in the region operates mainly through the social dimension of green infrastructure rather than through vegetation cover alone, offering replicable methodological evidence for urban requalification policies aimed at climate adaptation.

Keywords: Green Infrastructure. Climate Threat. Socioenvironmental Inequality.

RESUMEN
Este estudio caracteriza tipologías territoriales de infraestructura verde y amenaza climática en la Región del Grande ABC, São Paulo, y examina su asociación con las condiciones socioeconómicas. A partir de indicadores geoespaciales de porcentaje de cobertura vegetal, disponibilidad per cápita de plazas y parques, temperatura máxima de superficie y susceptibilidad a inundaciones, se aplicó el algoritmo Partitioning Around Medoids (PAM) con distancia de Gower a las variables integradas por sectores censales urbanos del Censo Demográfico 2022. La solución de tres agrupamientos identificó tipologías con perfiles cualitativamente distintos, que varían según la amenaza climática y la infraestructura verde. La primera tipología (T1) presenta mayor cobertura vegetal y menor amenaza climática, mientras que la T2 dispone de una mayor disponibilidad per cápita de plazas y parques, con un grado de amenaza climática intermedio. La tercera tipología territorial (T3) presentó las condiciones más críticas, con un déficit combinado de infraestructura verde y mayor amenaza climática. La caracterización socioeconómica de las tipologías indicó que la disponibilidad per cápita de plazas y parques es el indicador ambiental más estratificado por ingreso y raza, mientras que la cobertura vegetal presenta una asociación débil con estos marcadores debido a su superposición con áreas periféricas de la región. Los resultados sostienen que la desigualdad socioambiental en la región opera, sobre todo, por la dimensión social de la infraestructura verde y no por la cobertura vegetal

aisladamente, ofreciendo evidencias metodológicas replicables para políticas de recualificación urbana orientadas a la adaptación climática.

Palabras clave: Infraestructura Verde. Amenaza Climática. Desigualdad Socioambiental.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas amplia os problemas estruturais enfrentados pelos centros urbanos, especialmente em razão de eventos como ondas de calor, chuvas torrenciais e tempestades tropicais, que comprometem elementos essenciais da infraestrutura urbana e afetam a qualidade de vida e a produtividade do trabalho nas cidades brasileiras (Lyra *et al.*, 2018). Os impactos desses processos, contudo, não se distribuem de maneira homogênea no território. Eles são mediados pelas condições materiais de cada porção da cidade — disponibilidade de infraestrutura urbana, características ambientais e padrões de ocupação —, que produzem diferentes graus de exposição, vulnerabilidade e capacidade adaptativa (Parsons *et al.*, 2025). Nas metrópoles brasileiras, essas condições resultam de um processo histórico de produção do espaço urbano marcado pela precariedade e pela informalidade, no qual o acesso à infraestrutura e à qualidade ambiental se distribui de modo desigual entre grupos sociais (Maricato, 1996; Nucci, 2008). A desigualdade socioambiental não constitui, portanto, um efeito colateral das mudanças climáticas, mas uma condição preexistente que elas agravam (Acserald *et al*., 2012).

Adotam-se neste trabalho os conceitos de ameaça, exposição, vulnerabilidade e adaptação conforme o relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). O risco climático emerge da interação entre a ameaça, na qual se resume como o potencial de ocorrer um evento climático, e a exposição, entendida como a presença de pessoas e bens em locais que podem ser afetados (IPCC, 2022, p. 5). Igualmente, a vulnerabilidade é definida como a propensão a ser adversamente afetada, o que abrange a sensibilidade ao dano e a falta de capacidade para enfrentá-lo (IPCC, 2022, p. 5). A adaptação, por sua vez, consiste no processo de ajuste de atividades, técnicas e estruturas voltado a moderar danos e aproveitar oportunidades benéficas (IPCC, 2022, p.5). Este estudo opera sobre dois desses componentes, as condições associadas à ameaça térmica e hidrológica, e os elementos territoriais que constituem capacidade adaptativa, caracterizando-os em sua distribuição intraurbana.

As soluções estruturais de adaptação climática estão condicionadas pelas características materiais do território, como a cobertura vegetal e a arborização urbana, a disponibilidade e a distribuição de espaços livres públicos, as condições do relevo, o grau de impermeabilização do solo e as formas de ocupação e adensamento construtivo. A infraestrutura verde urbana e Soluções baseadas na Natureza (SbN) são elementos e soluções ecossistêmicas visto como alternativa a infraestrutura cinza para melhorar resiliência climática das cidades (UNEP, 2021). Nesse sentido, a infraestrutura verde é definida como uma rede interconectada de áreas naturais e espaços livres que conservam funções ecossistêmicas e provê ampla gama de benefícios à sociedade (Benedict; McMahon, 2006, Pellegrino; Cormier, 2008). Essa rede compreende elementos urbanos distintos, como o sistema de

parques e corredores verdes até jardins, quintais e coberturas vegetadas em lotes privados, e sua efetividade na adaptação climática depende tanto da presença de vegetação quanto da acessibilidade pública dos espaços que a compõem. Neste estudo, essas duas condições são integradas, a dimensão ambiental expressa pelo percentual de cobertura vegetal independentemente do regime de propriedade e a dimensão social expressa pela disponibilidade per capita de praças e parques acessíveis, sendo os principais espaços livres públicos multifuncionais nas cidades contemporâneas (Macedo *et al.*, 2012).

No Brasil, foram investidos cerca de R$421 bilhões no enfrentamento das mudanças climáticas entre 2010 e 2023, com aumento expressivo da participação dos gastos voltados à adaptação, de 23,6% para 67,7% do valor total (Brasil, 2025). Paralelamente, tem crescido o número de Planos de Ação Climática implantados em escala local, regional e nacional, considerados ferramentas para o direcionamento de visões, metas e ações de mitigação e adaptação (Aylett, 2015). Independentemente da metodologia adotada em sua construção, o diagnóstico territorial constitui elemento fundamental desses planos e, em conjunto com o inventário de emissões de gases de efeito estufa, compõe a base material do planejamento climático (Aboagye; Sharifi, 2024). O monitoramento da efetividade das ações demanda indicadores territoriais capazes de acompanhar as transformações ao longo do tempo e de identificar as áreas prioritárias de intervenção.

Nesse aspecto, dados de sensoriamento remoto e de censos oficiais, tratados por técnicas de geoprocessamento, são ferramentas fundamentais para subsidiar políticas públicas baseadas em evidências materiais do território (Fantin *et al.*, 2022). As imagens de satélite de acesso público permitem construir indicadores de cobertura vegetal, temperatura de superfície e mudanças de uso do solo. Ademais, a integração de dados georreferenciados de órgãos governamentais e de bases colaborativas, como o OpenStreetMap e dados censitários, possibilita incorporar dimensões socioeconômicas e de uso do solo à análise (Justiniano *et al.*, 2022). Combinadas a técnicas de aprendizado de máquina, essas bases permitem sintetizar padrões territoriais capazes de orientar ações de requalificação pautadas pela distribuição equitativa da infraestrutura urbana (Guo *et al.*, 2023). Esse diagnóstico integrado e seu monitoramento contínuo, entretanto, permanecem entre os principais desafios do planejamento climático nos municípios brasileiros, dada a ausência de dados primários e de equipe técnica multidisciplinar nas prefeituras.

A Região do Grande ABC constitui recorte privilegiado para essa investigação. Conurbada e composta por sete municípios, ela reúne, em um mesmo território, a mancha urbana industrial consolidada do século XX, ocupações periféricas em áreas de proteção de mananciais da Represa Billings e fundos de vale intensamente ocupados e impermeabilizados (Yamauchi *et al.*, 2023). A região dispõe de plano climático regional próprio (Consórcio Intermunicipal Grande ABC, 2016) e de

estudos anteriores que identificaram diferenças de vulnerabilidade climática entre seus municípios (Valverde, 2017; Valverde *et al.*, 2020), o que oferece base comparativa para uma análise em escala intraurbana.

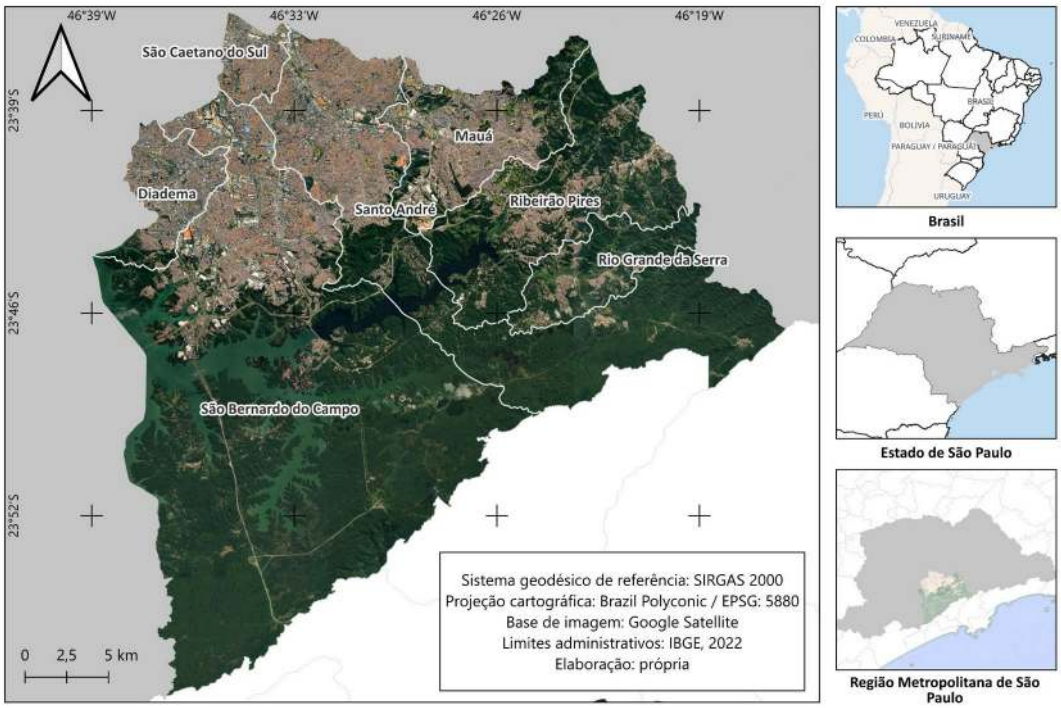
Diante desse contexto, o estudo parte da seguinte questão: como se distribuem, na escala do setor censitário, as combinações entre infraestrutura verde e ameaça climática na Região do Grande ABC e, em que medida essa distribuição se associa às condições socioeconômicas da população residente? O objetivo é caracterizar tipologias territoriais de infraestrutura verde e ameaça climática por meio de técnicas de aprendizado de máquina, a partir de indicadores geoespaciais de cobertura vegetal, disponibilidade de espaços livres públicos, temperatura de superfície e suscetibilidade à inundação, e examinar sua correspondência com o rendimento e a composição racial da população. Espera-se, com isso, consolidar técnicas e evidências territoriais para subsidiar políticas de adaptação climática em escala intraurbana, com potencial de replicação metodológica em outros centros urbanos brasileiros.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é a Região do Grande ABC, localizado a sudeste da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A região é composta por sete municípios, sendo eles: Diadema, Mauá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul (Figura1). O bioma local predominante é a Mata Atlântica e o clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente (Cwa) (Alvares *et al.*, 2013).

Figura 1. Mapa de localização da Região do Grande ABC.



Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados do IBGE (2022).

As áreas com vegetação nativa remanescente estão concentradas na porção sul e extremo leste da Região do Grande ABC, sobrepondo às Áreas de Preservação e Recuperação de Mananciais da Represa Billings (APREM) (Figura 1). Além do mais, as infraestruturas ambientais mais relevantes para a dinâmica climática da região são a proximidade com a Serra do Mar e APREM da Represa Billings. O histórico de ocupação urbana na região ocorre a partir da segunda metade do século XX, durante um processo de industrialização nacional com base na indústria automotiva (Kowarick, 1979; Yamauchi *et al.*, 2023).

A malha urbana se desenvolveu totalmente voltada ao escoamento de mercadoria e o deslocamento da mão de obra em um movimento casa-trabalho, tudo isso a partir de um processo de espoliação urbana minuciosamente detalhado na obra "A Espoliação Urbana" de Kowarick (1979). Recentemente, a partir da estagnação do processo de industrialização na região, ela vem passando por transformações socioeconômicas e no desenho urbano, com oportunidades e necessidades de processos de requalificação urbana para reaproveitar as áreas industriais desativadas. Apesar disso, a herança do processo histórico de desenvolvimento urbano permanece sendo um desafio a ser superado, como alta taxa de favelização das cidades e novas ocupações em áreas de proteção ambiental, dinâmicas territoriais fragmentadas e com grande adensamento populacional e construtivo (Maricato, 1996; Denaldi *et al.*, 2016; Denaldi; Ferrara, 2017).

Não obstante, de acordo com os dados do Censo 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Região do Grande ABC detém uma população em torno de 2,7 milhões de pessoas, distribuídas em suas sete cidades vizinhas, o que representa cerca de 12% da população da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Tabela 1). As cidades mais populosas da região são São Bernardo do Campo e Santo André, porém o município de Diadema detém a maior densidade demográfica da região, cerca de 12.795 hab./km², a segunda maior densidade demográfica do país. Ademais, as realidades socioeconômicas e ambientais variam drasticamente entre os municípios da região, demonstrando a segregação socioespacial bastante marcada no território (Valverde, 2017).

Tabela 1. Caracterização demográfica dos municípios da Região do Grande ABC.

Município	Área (km²)	População (hab.)	Densidade demográfica (hab./km²)
São Bernardo do Campo	**409,53**	**810.729**	**1.979,65**
Santo André	**175,78**	**748.919**	**4.260,50**
Mauá	**61,94**	**418.261**	**6.753,01**
Diadema	**30,73**	**393.237**	**12.795,69**
São Caetano do Sul	**15,33**	**165.655**	**10.805,23**
Ribeirão Pires	**98,97**	**115.559**	**1.167,59**
Rio Grande da Serra	**36,34**	**44.170**	**1.215,43**
Região do Grande ABC	**828,92**	**2.696.530**	**3.253,06**

Fonte: IBGE, Censo Demográfico 2022.

Diante de uma integração regional existente no sistema viário e área construída entre municípios com diferentes regras de uso e ocupação do solo e em diferentes níveis de governança, há uma reconhecida necessidade de ampliar as ferramentas de planejamento regional existentes de enfrentamento às mudanças climáticas. Um exemplo disso é o trabalho do Consórcio Intermunicipal do Grande ABC (2016), o qual desenvolveu o Plano Diretor Regional e o Plano de Ação de Enfrentamento às Mudanças Climáticas. Dentro desse cenário, a construção de evidências territoriais a partir de dados de sensoriamento remoto se demonstra valiosa, visto que a disponibilidade de sistemas de monitoramento e o nível de informação georreferenciada disponível para os municípios da região ainda não dispõe de uniformidade informacional e cobertura espacial suficiente para subsidiar o planejamento regional integrado.

2.2 BASE DE DADOS

A base de dados é composta por diferentes fontes de informação e geradas a partir de métodos de levantamento distintos, os quais têm como ano base de referência o ano de 2021 e estão disponíveis

publicamente para download na plataforma UrbVerde. As metodologias e técnicas aplicadas são amplamente utilizadas na literatura científica e indicadas para desenvolver indicadores territoriais e ambientais em diversas escalas de análise, principalmente na escala intraurbana e regional (Small; Milesi, 2013; Ermida *et al*., 2020, Justiniano *et al.*, 2022; Gárcia-Alvarez; Hinojosa; Pérez, 2022; Fantin *et al.*, 2022). Os parágrafos a seguir trazem uma breve descrição metodológica e observações que contribuem para a interpretação das variáveis utilizadas na análise de agrupamento multivariado.

Percentual de Cobertura Vegetal (PCV): O cálculo do Percentual de Cobertura Vegetal (PCV) foi feito a partir da aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (Shimabokuro; Smith, 1991; Small; Milesi, 2013). No presente trabalho optou-se pelo uso do sensor Sentinel-2, que apresenta maior resolução espacial de 10 m nas bandas visíveis e NIR com maior frequência temporal de aquisição, características vantajosas especialmente para o monitoramento de ambientes urbanos heterogêneos e sujeitos à rápida transformação. Essa substituição permitiu uma estimativa mais refinada das frações de cobertura vegetal superficial. A coleta dos *endmembers* do modelo foi realizada visualmente a partir de imagens compostas RGB e diagramas de componentes principais (PCs), seguindo o procedimento descrito por Kawakubo *et al.* (2019).

A geração dos rasters de MLME viabilizou o cálculo de diversos indicadores em escala intraurbana, diretamente no ambiente do Google Earth Engine (GEE). A partir da integração entre dados matriciais e dados vetoriais censitários da área de estudo foi possível elaborar o indicador do Percentual de Cobertura Vegetal dos setores censitários. Esse indicador corresponde à média da densidade de cobertura vegetal urbana contida no interior de cada setor censitário urbano, ou seja, basicamente quanto maior o número de pixels com alta densidade vegetal representam um valor mais elevado de PCV médio do setor censitário.

Suscetibilidade à inundação: O indicador de suscetibilidade à inundação para a Região do Grande ABC foi produzido por meio de um modelo geoespacial integrado, fundamentado em Avaliação Multicritério e em técnicas de normalização fuzzy, no qual foram incorporados os seguintes critérios: modelo HAND, proximidade à rede de drenagem, altimetria e declividade derivadas do Modelo Digital de Elevação (MDE – FABDEM), além do índice Normalized Difference Built-up Index (NDBI) (Nobre *et al.*, 2011, 2016). A abordagem combina dados essencialmente topográficos e o NDBI por meio de um método de ponderação objetiva, a Entropia Fuzzy (Boroushaki, 2017).

Os critérios de elevação e declividade foram produzidos a partir do modelo proposto por Hawker *et al*. (2022). As áreas com menor altitude e declividade tendem a concentrar o acúmulo de água no território, tornando esses critérios especialmente relevantes para a modelagem proposta por Oluwadare *et al*. (2025). Além disso, o critério de proximidade de rios e lagos foi calculado por meio de

distâncias euclidianas em relação às linhas de drenagem e corpos d'água, obtidos na plataforma GeoDiadema. No cálculo do NDBI foi utilizada a coleção de imagens de reflectância de superfície do satélite Landsat 8, sendo empregadas as bandas respectivas aos comprimentos de onda do infravermelho próximo e infravermelho de onda curta.

Adicionalmente, para os fins deste estudo, adota-se a distinção conceitual entre alagamento e inundação. O termo alagamento refere-se ao acúmulo temporário de água nas vias urbanas, geralmente associado à insuficiência, sobrecarga ou falha do sistema de drenagem pluvial, sem ocorrência de extravasamento de corpos hídricos ou invasão de edificações. Por sua vez, a inundação corresponde ao transbordamento de córregos ou rios, resultando na invasão de imóveis e edificações situadas em áreas adjacentes aos cursos d'água.

Temperatura de Superfície Terrestre (TST): A Temperatura de Superfície Terrestre (TST) foi utilizada como indicador das condições térmicas intraurbanas, permitindo identificar diferenças espaciais de aquecimento superficial associadas à forma urbana. O indicador foi obtido por sensoriamento remoto a partir das bandas termais do satélite Landsat 8, processadas em ambiente Google Earth Engine. As imagens térmicas, originalmente disponibilizadas em valores radiométricos, foram convertidas em temperatura de superfície por meio de procedimentos de calibração radiométrica, estimativa de temperatura de brilho e correção por emissividade da superfície, baseada no algoritmo proposto por Ermida *et al.* (2020).

Após o processamento das imagens orbitais, foi construído um mosaico temporal para representar as condições térmicas do período analisado, reduzindo interferências pontuais associadas à cobertura de nuvens, ruídos atmosféricos e variações específicas de uma única cena. Os valores raster de TST foram posteriormente agregados aos setores censitários urbanos por meio de estatísticas zonais, permitindo associar a cada setor um valor representativo da temperatura de superfície. Neste estudo, a temperatura máxima por setor foi utilizada como indicador de exposição térmica, por expressar situações de maior criticidade climática no espaço intraurbano e permitir sua integração aos demais indicadores ambientais empregados na análise multivariada.

Disponibilidade per capita de praças e parques: Para estimar a disponibilidade per capita de praças e parques nos setores censitários urbanos, adotou-se um procedimento espacial baseado na relação entre a localização dos espaços livres públicos e a área de abrangência de seu entorno imediato. A análise foi realizada a partir dos polígonos de praças e parques extraídos do *OpenStreetMap* a partir do arquivo *landuse*, filtrando as classes *park* e *recreation_ground*. Estas classes selecionadas representam em grande parte espaços públicos de lazer e convivência da população, sendo aportadas no OSM por colaboradores e usuários da plataforma. (Patriarca *et al.*, 2019; Ludwig *et al.*, 2021 Schultz *et*

al., 2025). Resumidamente, os dados do OSM utilizados para a Região do Grande ABC representam significativamente os principais elementos do sistema de espaços livres públicos, sendo adequado para uma análise regional.

Inicialmente, as geometrias das camadas vetoriais foram corrigidas com as ferramentas disponíveis no QGIS, a fim de evitar erros topológicos e sobreposições entre áreas de diferentes polígonos, prevenindo o superdimensionamento da disponibilidade per capita . Em seguida, os polígonos de praças e parques foram utilizados para gerar o raio de vizinhança (*buffers*) fixo de 400 metros acompanhando o formato da praça ou parque, representando a área urbana atendida por esses espaços (ONU-HABITAT, 2020). A disponibilidade per capita (m²/hab) foi calculada através do somatório ponderado de praças e parques em cada setor censitário. Em vista disso, a ponderação no cálculo das áreas de praças e parques somadas em cada setor foi feita a partir da proporção da área do setor censitário sobreposta pelos *buffers*. Essa abordagem reduz a distorções na territorialização do indicador, pois incorpora a influência de espaços livres localizados em setores vizinhos e mais próximos da população analisada.

Variáveis socioeconômicas: As variáveis socioeconômicas foram extraídas do Censo Demográfico 2022 do IBGE (2022), na divulgação Agregados por Setores Censitários. A adoção dessa fonte garante que a caracterização socioeconômica compartilhe a mesma unidade espacial de análise dos indicadores ambientais. O rendimento mediano do responsável pelo domicílio constitui a medida de renda disponível na escala do setor censitário. Optou-se pela mediana em lugar da média por sua menor sensibilidade a domicílios de rendimento elevado no interior de cada setor. O número de pessoas por setor censitário é a principal variável demográfica, com as variáveis que representam a classificação racial do IBGE (2022). No estudo, a razão entre população total e população preta e parda dos setores censitários incorpora a dimensão racial da desigualdade socioambiental urbana.

2.3 ANÁLISE E PROCESSAMENTO DA BASE DE DADOS

A identificação dos padrões territoriais foi realizada por meio da combinação entre a distância de Gower e o algoritmo *Partitioning Around Medoids* (PAM) (Kaufman; Rousseeuw, 1990; Van der Laan; Pollard; Bryan, 2003; Kaur; Kaur; Singh, 2014), tendo como unidade de análise os setores censitários do Censo Demográfico 2022 (IBGE, 2022). O PAM é um algoritmo de agrupamento particional que, diferentemente dos populares algoritmos de aprendizagem de máquina k-means, adota como centro de cada grupo (*cluster*) uma observação real do conjunto de dados, o medoide, conferindo maior robustez a valores extremos e permite operar sobre qualquer matriz de distâncias. Após a compatibilização das bases pelo código dos setores censitários, filtrando os setores com

disponibilidade de dados para os quatro indicadores: PCV, disponibilidade per capita de praças e parques, temperatura máxima de superfície e suscetibilidade à inundação.

No processamento prévio da base de dados, os indicadores foram tratados para permitir a comparação entre variáveis expressas em unidades distintas. As variáveis de temperatura máxima de superfície, PCV e a suscetibilidade à inundação foram normalizadas pelo método Min–Max, resultando em valores entre 0 e 1. Em razão da elevada assimetria, a disponibilidade per capita de praças e parques teve os valores superiores limitados no percentil 99 e aplicação da transformação logarítmica, sendo normalizada posteriormente pelo mesmo método das demais variáveis. Após a normalização os indicadores foram uniformizados, gerando os valores de criticidade analisados no agrupamento. Sendo assim, regiões com criticidade mais elevada de PCV e disponibilidade de praças e parques representam regiões com menor cobertura vegetal e disponibilidade de áreas, enquanto os valores de criticidade da temperatura máxima de superfície e suscetibilidade à inundação mantiveram o sentido real das variáveis.

A ponderação dos indicadores na clusterização foi definida a partir das dimensões analíticas, sendo que o PCV e a disponibilidade per capita de praças e parques compreendem a componentes complementares do sistema de infraestrutura verde, representando a dimensão ambiental e social desses espaços públicos multifuncionais. Portanto, eles recebem peso 0,5 cada, acumulando o peso igual a um para a dimensão de infraestrutura verde. Paralelamente, a temperatura de superfície e a suscetibilidade à inundação receberam peso 1 cada, correspondendo às variáveis da condição do território que representam as ameaças climáticas. Essa ponderação evitou que a infraestrutura verde exercesse uma maior influência do que as demais dimensões na análise de agrupamento.

A distância de Gower foi utilizada para mensurar a dissimilaridade entre os setores censitários considerando simultaneamente os quatro indicadores e seus respectivos pesos (Pollard; Bryan, 2003). No estudo de caso, a distância de Gower correspondeu à média ponderada das diferenças absolutas entre os valores de cada par de setores. Valores próximos de zero indicaram perfis territoriais semelhantes, enquanto valores mais elevados representaram maior dissimilaridade multivariada. Sobre a matriz de dissimilaridades foi aplicado o algoritmo PAM, selecionando um conjunto de indicadores reais como elementos centrais do agrupamento. Isto é, cada conjunto de medianas correspondeu a informações de um setor censitário existente e representativo de sua tipologia, favorecendo a interpretação territorial e reduzindo a sensibilidade do agrupamento a valores extremos da amostra.

A qualidade interna das classificações foi examinada pela largura média da silhouette, medida que compara a proximidade de cada observação com os elementos do próprio grupo e com os elementos dos grupos vizinhos. A definição de três *clusters* considerou conjuntamente a qualidade

estatística, o tamanho dos grupos e a capacidade de distinguir combinações territoriais relevantes para o planejamento climático, ressaltando que o modelo foi testado utilizando de 2 à 6 *clusters*. A solução adotada resultou em tipologias formadas por 1.128 a 2.134 setores censitários, permitindo diferenciar padrões territoriais específicos sem produzir fragmentação excessiva da amostra. Os agrupamentos foram interpretados como tipologias territoriais inseridas em gradientes contínuos e não como classes rígidas. Os rótulos e as denominações foram atribuídos posteriormente à formação dos grupos, com base nas medianas, distribuições amostrais, medóides e padrões espaciais dos indicadores. Essa etapa permitiu reconhecer combinações distintas entre as dimensões da infraestrutura verde, temperatura de superfície e a suscetibilidade à inundação.

As variáveis socioeconômicas não integraram o procedimento de agrupamento, restrito aos indicadores ambientais, sendo empregadas na caracterização posterior das tipologias obtidas. A comparação entre os três grupos adotou o teste de Kruskal-Wallis, seguido do pós-teste de Dunn com correção de Holm para comparações múltiplas (Holm, 1979). A opção por procedimentos não paramétricos decorre da assimetria das distribuições e dos tamanhos desiguais dos agrupamentos. Considerando que, em amostras da ordem de cinco mil observações, valores de p tendem a indicar significância estatística mesmo para diferenças de pequena magnitude. Complementarmente, a associação entre as dimensões socioeconômica e ambiental foi verificada por correlação de Spearman entre os indicadores socioeconômicos e os quatro indicadores ambientais, tomados em suas unidades originais (Hollander; Wolfe; Chicken, 2015). Esse procedimento permite avaliar a associação entre as dimensões independentemente da solução de agrupamento adotada, além de possibilitar a identificação de qual indicador ambiental concentra a estratificação socioeconômica, informação que a comparação entre agrupamentos, por sintetizar os quatro indicadores simultaneamente, não permite isolar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA E ESPACIAL DOS INDICADORES

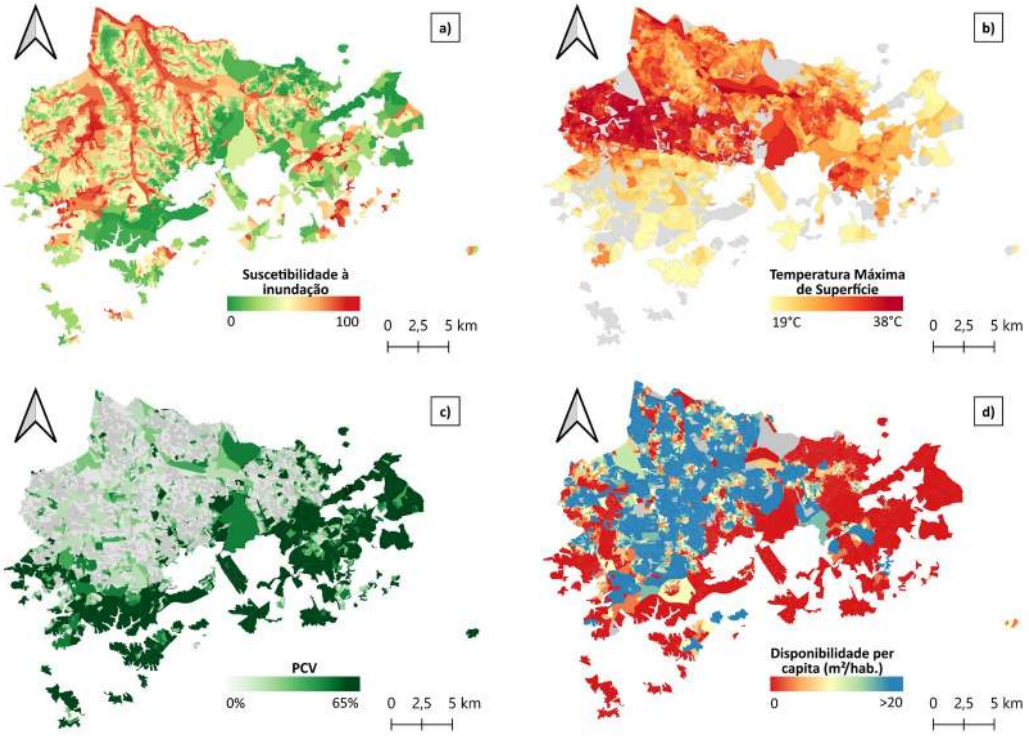
A análise integrou, na escala do setor censitário urbano, os indicadores de percentual de cobertura vegetal, disponibilidade per capita de praças e parques, temperatura máxima de superfície e suscetibilidade à inundação. A integração inicial resultou em 6.158 registros, dos quais 5.091 apresentaram informação completa para os quatro indicadores e compuseram a análise multivariada. Foram, portanto, excluídos 1.067 setores censitários pela ausência de ao menos uma das variáveis e de limitações de cobertura das imagens de satélite. O PCV apresentou média de 9,14% e mediana de 6,22%, configurando distribuição fortemente assimétrica à direita . Apenas 5% dos setores superaram 28% de cobertura, e somente 4,30% alcançaram o patamar de 30% indicado na literatura como

necessário à qualidade ambiental urbana e ao bem-estar da população residente (Nieuwenhuijsen *et al*., 2022; Lopez *et al.*, 2025). A concentração dos setores nos intervalos inferiores indica que a baixa cobertura vegetal constitui condição amplamente disseminada na região, ainda que subsistam setores com presença expressiva de vegetação.

A disponibilidade per capita de praças e parques registrou a maior assimetria entre os indicadores. A média de 66,4 m²/hab. contrasta com a mediana de 11,6 m²/hab., portanto, mais de 50% dos setores censitários detém valores situado abaixo dos 15 m²/hab. recomendado pela Sociedade Brasileiras de Arborização Urbana (SBAU) (Nucci, 2008, p. 112). A discrepância entre as duas medidas decorre de um conjunto reduzido de setores com valores extremos: o máximo observado alcançou 37.396,8 m²/hab., e a exclusão do 1% superior da distribuição reduz a média a 38,4 m²/hab. Essa assimetria motivou a transformação logarítmica do indicador previamente à clusterização. Na outra extremidade da distribuição, 15,24% dos setores apresentaram disponibilidade igual a zero. Como o cálculo considera o *buffer* de 400 metros de raio (ONU-HABITAT, 2020), os casos com disponibilidade próximo a zero correspondem a setores sem quaisquer espaços livres públicos de lazer próximos, bem como regiões de elevada densidade demográfica e poucas praças. A temperatura máxima de superfície apresentou distribuição aproximadamente simétrica, com média de 29,66 °C e mediana de 29,78 °C e coeficiente de assimetria de −0,13. O intervalo interquartil situou-se entre 28,02 °C e 31,26 °C. A amplitude total alcançou 19,34 °C, com 95 setores acima de 35 °C e 223 setores abaixo de 25 °C, evidenciando contrastes térmicos intraurbanos expressivos.

Distintamente, a suscetibilidade à inundação apresentou valores elevados na maior parte da Região do Grande ABC, com média de 74,44 e mediana de 75,11. Em suma, 75% dos setores censitários da região registraram valores superiores a 70,63, o que indica tratar-se não de condição restrita a pontos isolados da malha urbana, mas de componente recorrente do território regional, ainda que sua intensidade varie entre setores. Essa característica é relevante para a interpretação dos resultados subsequentes, uma vez que reduz o poder de diferenciação do indicador entre agrupamentos. Quanto à distribuição espacial, os valores mais elevados de suscetibilidade à inundação concentraram-se nos fundos de vale dos principais corpos hídricos da região, representados em vermelho e laranja na Figura 2(a). Além das condições de relevo e da proximidade aos cursos d'água, esses fundos de vale encontram-se ocupados e impermeabilizados em grande parte de sua extensão (Yamauchi *et al.*, 2023).

Figura 2. Distribuição espacial dos indicadores ambientais na Região do Grande ABC: (a) suscetibilidade à inundação; (b) temperatura máxima de superfície; (c) percentual de cobertura vegetal (PCV); (d) disponibilidade per capita de praças e parques públicos.



Fonte: Elaborado pelos autores

A temperatura máxima de superfície apresentou os valores mais altos em Diadema, São Caetano do Sul e nas áreas centrais de São Bernardo do Campo e Santo André, indicadas em vermelho na Figura 2(b). As áreas mais aquecidas correspondem a porções de elevada densidade construtiva e a zonas industriais caracterizadas por galpões e coberturas de grande superfície, com setores ultrapassando 35 °C. Em contraposição, às regiões periféricas e com características periurbanas registraram valores inferiores a 25 °C.

Esse padrão de variação térmica, também identificado por Valverde *et al.* (2020), guarda forte correlação inversamente proporcional com o PCV, conforme se observa na comparação entre as Figuras 2(b) e 2(c). Neste caso, os setores de maior cobertura vegetal em média correspondem, em geral, aos com as menores temperaturas de superfície. As porções mais afastadas do núcleo conurbado e próximas à Serra do Mar, incluíndo os municípios de Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, concentraram os setores de maior cobertura vegetal, cerca de 90% dos setores censitário com o PCV igual ou maior que os 30% indicado (Nucci, 2008; Nieuwenhuijsen, 2022). A conservação dos fragmentos florestais remanescentes nessa área decorre das restrições de uso e ocupação do solo nas Áreas de Preservação e Recuperação de Mananciais (APREM) da Represa Billings, ainda que a pressão do mercado imobiliário e a demanda por moradia permaneçam como desafios regionais

(Yamauchi *et al.*, 2023). Nas áreas densamente construídas, por sua vez, o sistema de espaços livres públicos também contribui para elevar o PCV de setores específicos.

A malha urbana conurbada do ABC apresenta distribuição espacial ampla de praças e parques. A disponibilidade per capita, contudo, é significativamente maior nas áreas centrais, indicadas em azul na Figura 2(d), com maior incidência em Santo André e São Bernardo do Campo. Nesses setores, a sobreposição de diferentes praças e parques dentro do raio de 400 metros produz valores superiores a 40 m²/hab. As áreas periféricas, representadas em vermelho, apresentam oferta reduzida, com número expressivo de setores sem qualquer disponibilidade, sobretudo em Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra. A cidade de Diadema constitui exceção nesse padrão, onde registra disponibilidade mediana de 4,09 m²/hab., resultado da combinação entre escassez de área disponível e elevada densidade demográfica.

A leitura municipal dos indicadores evidencia gradientes internos à região (Tabela 2). Os municípios de Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra destacam-se pela cobertura vegetal de 28,01% e 18,42%, respectivamente, porém a disponibilidade de praças e parques é extremamente escassa, cerca de 0,01 e 0,04 m²/hab. Diadema apresenta a situação inversa quanto à vegetação, com a menor mediana de PCV e a maior temperatura de superfície, respectivamente 3,57% e 31,60 °C. Os municípios de Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul concentram as maiores medianas de disponibilidade per capita, entre 17,39 e 25,97 m²/hab., valores compatíveis com a consolidação histórica de seus sistemas de espaços livres públicos.

Tabela 2. Valores medianos dos indicadores ambientais por município da Região do Grande ABC.

Município	PCV (%)	Disponib. per capita (m²/hab.)	Temperatura máx. (°C)	Suscet. à inundação (%)
Santo André	**5,86**	**22,58**	**30,04**	**75,25**
São Bernardo do Campo	**7,10**	**17,39**	**27,41**	**76,11**
São Caetano do Sul	**4,87**	**25,97**	**29,78**	**74,63**
Diadema	**3,57**	**4,09**	**31,60**	**75,49**
Mauá	**6,69**	**1,40**	**29,85**	**71,33**
Ribeirão Pires	**28,01**	**0,01**	**29,10**	**75,39**
Rio Grande da Serra	**18,42**	**0,04**	**28,90**	**82,16**
Região do Grande ABC	**6,22**	**11,62**	**29,78**	**75,11**

Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 TIPOLOGIAS TERRITORIAIS DE INFRAESTRUTURA VERDE E AMEAÇA CLIMÁTICA

A aplicação do algoritmo PAM com três agrupamentos produziu silhouette média de 0,2246, valor que indica separação limitada entre as tipologias e existência de zonas de sobreposição. A leitura

desagregada, entretanto, revela comportamento distinto entre os grupos: a T3 apresentou a maior coesão interna com silhouette média de 0,257, com apenas 2,62% dos setores em valores negativos, seguida pela T2 com 0,211 e 7,59%. A menor consistência da T1 com silhouette média de 0,199 e 16,93% é coerente com sua natureza heterogênea, uma vez que reúne situações periféricas diversas quanto ao grau de urbanização. Os agrupamentos não devem ser compreendidos como classes naturais rigidamente delimitadas, mas como tipologias territoriais sintéticas inseridas em gradientes contínuos de condições ambientais e climáticas. A robustez da solução foi verificada por comparação com o algoritmo K-means aplicado às mesmas variáveis e à mesma distância. As duas partições apresentaram índice Rand ajustado de 0,639, informação mútua normalizada de 0,592 e concordância direta de classificação em 85,7% dos setores.

A T1 reúne os setores censitários com os percentuais de cobertura vegetal mais elevados, associados às menores temperaturas de superfície e suscetibilidade à inundação. A mediana de PCV alcançou 12,55%, aproximadamente o dobro do observado na T2 e o triplo do registrado na T3, enquanto a temperatura máxima de superfície mediana foi de 27,41 °C, a menor entre os grupos (Tabela 3). Apesar dessas condições ambientais relativamente mais favoráveis, a disponibilidade mediana de praças e parques foi igual a zero, e 53,63% dos setores desta tipologia não apresentaram qualquer disponibilidade per capita de espaços livres públicos no raio de 400 metros.

Tabela 3. Perfil mediano das tipologias territoriais identificadas.

Tipologia	Setores (unid.)	PCV (%)	Disponib. per capita (m²/hab.)	Temperatura máx. (°C)	Suscet. à inundação (%)
T1 — Maior cobertura vegetal e baixa ameaça climática	**1.128**	**12,55**	**0,00**	**27,41**	**70,79**
T2 — Maior disponibilidade de espaços livres públicos e ameaça climática média	**2.134**	**6,77**	**49,96**	**29,51**	**76,52**
T3 — Déficit de infraestrutura verde e alta ameaça climática	**1.829**	**4,12**	**5,57**	**31,11**	**75,08**

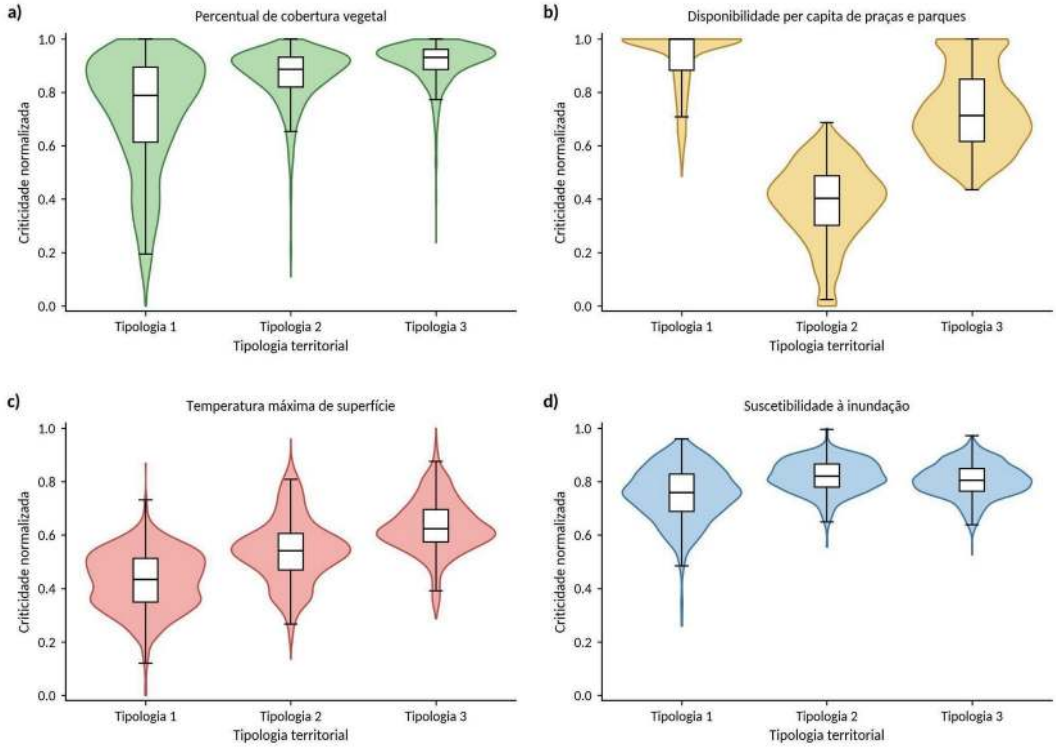
Fonte: Elaborado pelos autores

O descompasso entre disponibilidade per capita e cobertura vegetal sugere que a presença quantitativa de espaços públicos não garante a funcionalidade ecológica desses elementos. Parte desses espaços pode apresentar baixa arborização, elevada impermeabilização, pequena conectividade com outros elementos verdes. Conjuntamente, em alguns casos, a disponibilidade per capita de alguns setores da região é elevada em razão da proximidade de grandes parques ou conjunto de parques e praças dentro do raio de 400 metros de vizinhança, enquanto a cobertura vegetal do restante do setor

permaneça reduzida. Essa tipologia evidencia a necessidade de não limitar as políticas de infraestrutura verde à criação ou contabilização de áreas públicas. Os resultados apontam para a importância de qualificar ecologicamente os espaços existentes, ampliando arborização, permeabilidade, retenção hídrica e conexão com redes de infraestrutura verde no âmbito regional.

A T3 apresenta o perfil cumulativamente mais desfavorável. Reúne 35,93% dos setores e combina a menor cobertura vegetal, baixa disponibilidade de praças e parques, a maior temperatura máxima de superfície e suscetibilidade à inundação elevada. O PCV mediano foi de apenas 4,12% e a disponibilidade de praças e parques, de 5,57 m²/hab. A temperatura máxima de superfície mediana alcançou 31,11 °C, valor 3,70 °C superior ao da T1. A suscetibilidade à inundação apresentou mediana de 75,08, próxima à da T2, conforme evidenciado pela sobreposição das distribuições de criticidade normalizada na Figura 3(d). Diferentemente das duas primeiras tipologias, nas quais vantagens e desvantagens específicas coexistem, a Tipologia 3 reúne déficits tanto na dimensão biofísica quanto na dimensão pública da infraestrutura verde.

Figura 3. Distribuição dos indicadores ambientais normalizados por tipologia territorial (T1, T2 e T3): (a) Percentual de Cobertura Vegetal; (b) disponibilidade per capita de praças e parques; (c) temperatura máxima de superfície; (d) suscetibilidade à inundação.



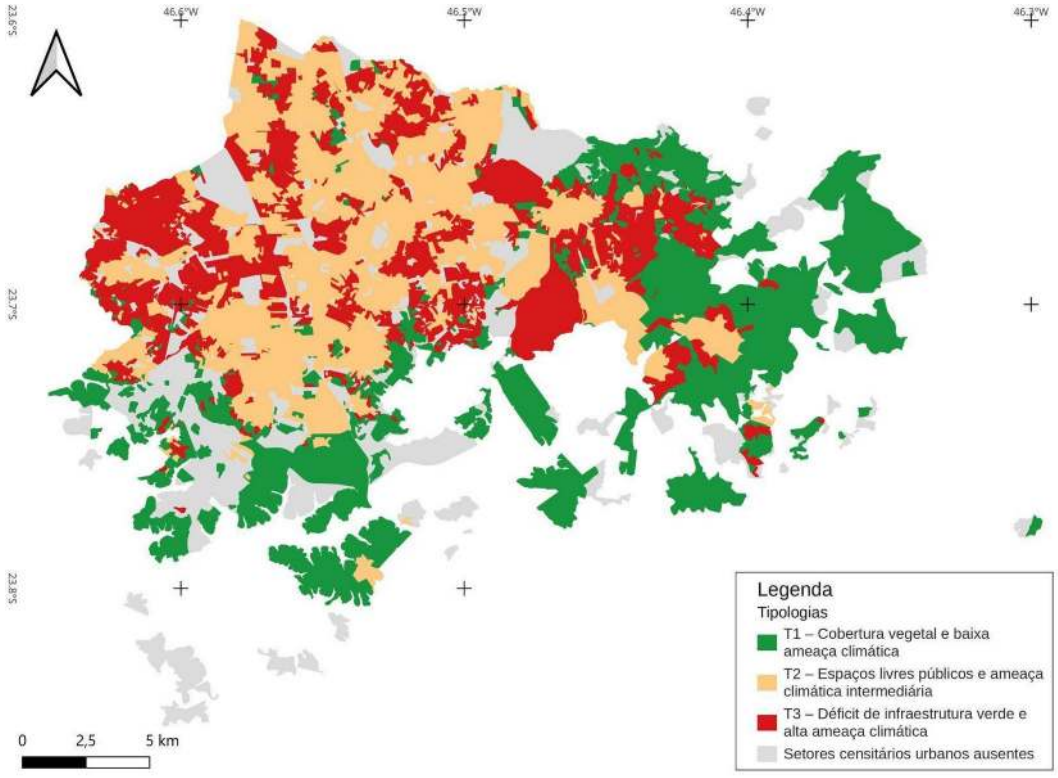
Fonte: Elaborado pelos autores

A baixa presença de vegetação e de espaços livres públicos coincide com maior aquecimento superficial, configurando a situação mais acentuada de exposição e vulnerabilidade climática. Esses

setores representam áreas prioritárias para políticas integradas de adaptação climática, incluindo arborização urbana, criação e qualificação de espaços livres públicos, desimpermeabilização, ampliação de áreas sombreadas, renaturalização cursos d'água e reforço dos sistemas de drenagem.

A distribuição espacial dos agrupamentos revela padrões regionais e intermunicipais nitidamente diferenciados (Figura 4). A T1 concentra-se nas porções orientais e meridionais da região, com forte presença em Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, onde responde por 70,06% e 70,18% dos setores censitários urbanos, e nas áreas mais periféricas de Mauá e São Bernardo do Campo. Esses territórios apresentam maior sobreposição com a Área de Preservação e Recuperação de Mananciais da Billings (APREM), além de remanescentes vegetais e menor intensidade de urbanização, o que é compatível com a interpretação de uma infraestrutura verde predominantemente biofísica, pouco representada por um sistema de espaços livres públicos distribuído.

Figura 4. Distribuição espacial das tipologias territoriais de infraestrutura verde e ameaça climática na Região do Grande ABC.



Fonte: Elaborado pelos autores

Cabe registrar que a participação da T1 é substancialmente maior quando mensurada em área do que em número de setores: ela reúne 22,16% dos setores, mas 36,23% da área urbana classificada. Em Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, a T1 abrange mais de 70% dos setores, além de 79,47% e 83,59% da área urbana municipal. A T3, inversamente, perde participação na passagem de setores para área,

35,93% e 28,15%, respectivamente. Isto é, o déficit combinado de infraestrutura verde incide sobre porções territorialmente menores, porém mais densamente ocupadas (Tabela 4).

A T2 apresenta forte concentração nas áreas urbanas consolidadas de Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul, onde alcança 57,46%, 49,52% e 60,05% dos setores, respectivamente (Tabela 4). A distribuição dos setores dessa tipologia é compatível com territórios de maior oferta formal de espaços e serviços públicos, nos quais a malha urbana consolidada com alta densidade construtiva, impermeabilização e a dinâmica hidrológica dos fundos de vale podem limitar a efetividade climática das infraestruturas verdes atuais. A associação entre elevada oferta pública e maior suscetibilidade à inundação, aparentemente contraditória, reflete a formação histórica da região, pois a consolidação urbana dos fundos de vale de Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul concentrou simultaneamente o sistema de espaços livres públicos, o sistema viário predominante e as áreas de maior fragilidade hidrológica.

Tabela 4. Distribuição dos setores censitários e proporção por tipologia territorial e município.

Município	T1 (unid.)	T1 (%)	T2 (unid.)	T2 (%)	T3 (unid.)	T3 (%)	Total (unid.)
Santo André	**123**	**8,69**	**813**	**57,46**	**479**	**33,85**	**1.415**
São Bernardo do Campo	**431**	**27,58**	**774**	**49,52**	**358**	**22,90**	**1.563**
São Caetano do Sul	**24**	**5,67**	**254**	**60,05**	**145**	**34,28**	**423**
Diadema	**67**	**9,82**	**140**	**20,53**	**475**	**69,65**	**682**
Mauá	**319**	**41,21**	**131**	**16,93**	**324**	**41,86**	**774**
Ribeirão Pires	**124**	**70,06**	**20**	**11,30**	**33**	**18,64**	**177**
Rio Grande da Serra	**40**	**70,18**	**2**	**3,51**	**15**	**26,32**	**57**
Região do Grande ABC	**1.128**	**22,16**	**2.134**	**41,92**	**1.829**	**35,93**	**5.091**

Fonte: Elaborado pelos autores

A T3 é observada de maneira significativamente mais expressiva em Diadema e Mauá, onde corresponde a 69,65% e 41,86% dos setores censitários urbanos. Além disso, ela apresenta participação relevante em Santo André (33,85%) e São Caetano do Sul (34,28%), e sua presença em áreas intensamente urbanizadas evidencia a sobreposição territorial entre baixa cobertura vegetal, elevada temperatura de superfície, reduzida disponibilidade de espaços livres públicos e suscetibilidade à inundação elevada.

3.3 PERFIL SOCIOECONÔMICO DAS TIPOLOGIAS TERRITORIAIS

As variáveis socioeconômicas não integraram o procedimento de agrupamento, restrito aos indicadores ambientais. Sua função é caracterizar as tipologias obtidas, de modo que o perfil descrito a

seguir constitui resultado da análise, e não critério de sua definição. O resultado mais expressivo inverte a leitura ambiental das tipologias. A T1, que reúne a maior cobertura vegetal, a menor temperatura de superfície e a menor suscetibilidade à inundação, apresenta simultaneamente o pior perfil socioeconômico do conjunto: rendimento mediano do responsável pelo domicílio de R$1.900, contra R$3.100 na T2.

Essa inversão é coerente com a distribuição territorial da tipologia. A vegetação que caracteriza a T1 concentra-se nas Áreas de Preservação e Recuperação de Mananciais da Billings, onde a restrição legal ao uso do solo preservou remanescentes florestais sem que isso correspondesse a investimento público em qualidade ambiental urbana. O que se observa não é um território ambientalmente privilegiado, mas a coincidência entre cobertura vegetal remanescente e ocupação periférica precária, padrão amplamente documentado na produção do espaço urbano metropolitano de São Paulo (Kowarick, 1979; Maricato, 1996; Denaldi; Ferrara, 2017).

A análise por correlação de Spearman precisa em qual dimensão a desigualdade se manifesta. A disponibilidade per capita de praças e parques é o único indicador ambiental fortemente estratificado, apresentando $\rho = +0{,}456$ com o rendimento e $\rho = -0{,}488$ com a proporção de população preta e parda. A desigualdade socioambiental na Região do Grande ABC opera sobretudo pelo acesso ao sistema de espaços livres públicos e não pela cobertura vegetal ou pela ameaça térmica isoladamente. Esse achado tem implicação direta para o planejamento urbano regional, pois a cobertura vegetal quando assumida isoladamente como indicador de qualidade ambiental mostra-se incompleta para entendermos a desigualdade socioambiental.

O gradiente socioeconômico entre as tipologias não reproduz o gradiente ambiental. Enquanto as condições ambientais se ordenam da T1 para a T3, as condições socioeconômicas ordenam-se da T2 para a T1, posicionando a T3 em situação intermediária. A partir disso, decorre que a T3 é a única tipologia em que o déficit ambiental e a desvantagem socioeconômica coincidem. Em contrapartida, a T1 combina vantagem ambiental com desvantagem social, e a T2, ambivalência ambiental com vantagem social. Nesse sentido, a T2 apresenta o perfil socioeconômico mais favorável no conjunto de indicadores da análise. O intervalo interquartil de rendimento situa-se entre R$2.410 e R$5.000, amplitude mais de três vezes superior à da T1, cujos setores se concentram entre R$1.500 e R$2.300. A T1 é, portanto, homogêneamente precária quanto aos indicadores socioeconômicos, enquanto a T2 reúne situações socioeconômicas diversas sob a mesma configuração de infraestrutura verde.

Essa heterogeneidade decorre em grande parte da variação intramunicipal e sua observação qualifica a leitura das tipologias. No caso dos setores da tipologia T3, o rendimento mediano varia de R$3.500 em São Caetano do Sul a R$1.800 em Diadema, e a proporção de população preta e parda, de

20,30% a 55,10%. Um mesmo déficit de infraestrutura verde e uma ameaça climática similar incide sobre populações em condições socioeconômicas radicalmente distintas, demonstrando uma desigualdade socioambiental regional. Além disso, o padrão equivalente foi observado na tipologia T2, cujo rendimento mediano varia de R$4.000 em São Caetano do Sul a R$2.000 em Diadema dentro da mesma tipologia.

Esse resultado tem consequência para o desenho das políticas de adaptação. Nos setores da T3 situados em Diadema e Mauá, o déficit de infraestrutura verde combina-se a rendimentos que restringem a provisão privada de conforto ambiental, como: climatização, arborização e áreas permeáveis a nível do lote. Nos setores da mesma tipologia localizados em São Caetano do Sul e São Bernardo do Campo, a ameaça climática chega a ser similar às encontradas em Diadema e Mauá em determinados casos, mas coexiste com maior capacidade de resposta individual.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo caracterizou tipologias territoriais de infraestrutura verde e ameaça climática nos setores censitários urbanos da Região do Grande ABC, a partir da integração de indicadores geoespaciais. Os resultados evidenciam que as condições ambientais urbanas da região distribuem-se em gradientes contínuos, e não em classes rigidamente delimitadas. A convergência entre os algoritmos PAM e K-means, com índice Rand ajustado de 0,639 e concordância direta em 85,7% dos setores, sustenta que essa estrutura não decorre da escolha do procedimento de agrupamento, ou seja, independentemente da análise de agrupamento multivariado utilizada, as tipologias permanecem consistentes com as obtidas no estudo, demonstrando uma estrutura metodológica capaz de ser replicada em outras regiões. O uso de técnicas de *machine learning* se demonstrou um método eficiente para identificar áreas urbanas com diferentes níveis de ameaças climáticas, integrando a análise de desigualdade socioambiental na escala regional. Em vista disso, as contribuições dos resultados se expandem para a aplicação dos algoritmos PAM e K-means para auxiliar o planejamento urbano e ambiental e construção de políticas públicas de adaptação climática, permitindo integrar a análise de múltiplas camadas de informações territoriais de forma sistêmica.

A conclusão central do estudo consiste na dissociação entre as duas dimensões da infraestrutura verde e na constatação de que a desigualdade socioambiental opera prioritariamente pela dimensão pública. Esse resultado traz reflexões importantes sobre a leitura da cobertura vegetal como indicador de qualidade ambiental urbana. Nas regiões periféricas do Grande ABC paulista, a vegetação remanescente decorre da restrição legal ao uso do solo pela presença APREM da Represa Billings e não de investimento público em qualificação ambiental, coincidindo com os territórios com piores

condições socioeconômicas, infraestrutura e serviços urbanos precários. A vegetação, nesse contexto, não expressa uma melhor condição ecológica, mas a permanência de um padrão historicamente documentado de produção do espaço metropolitano brasileiro. Assim sendo, a decisão de mensurar separadamente as dimensões biofísica e pública, revelou-se um componente significativo para identificar padrões de desigualdade socioambiental.

As três tipologias configuram situações qualitativamente distintas, e não posições em uma escala única. A T1 reúne 22,16% dos setores mas 36,23% da área urbana classificada, diferença que decorre da maior extensão de seus setores e a caracteriza como padrão periférico de baixa densidade, concentrado em Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, onde responde por 70,06% e 70,18% dos setores. A T2, grupo mais frequente com 41,92% dos setores, apresenta a maior oferta de espaços livres públicos da região associada, no entanto, a cobertura vegetal reduzida (6,77%) e à maior suscetibilidade à inundação (76,52), o que evidencia que a presença quantitativa de espaços públicos não assegura funcionalidades ecológicas e serviços ecossistêmicos para reduzir a ameaça climática. A T3, com 35,93% dos setores, é a única em que déficit ambiental e desvantagem socioeconômica apontam na mesma direção: combina a menor cobertura vegetal (4,12%), a maior temperatura de superfície (31,11 °C, valor 3,70 °C superior ao da T1) e rendimento mediano de R$ 2.200,00, concentrando-se em Diadema, onde alcança 69,65% dos setores, e em Mauá, com 41,86%.

Do ponto de vista aplicado, a tipologia territorial constitui um instrumento de diagnóstico capaz de orientar, de forma mais eficiente, a ampliação e a requalificação do sistema de espaços livres públicos, direcionando investimentos conforme a carência predominante em cada território. A criação de novas áreas de uso público onde a cobertura vegetal remanescente não corresponde a espaços acessíveis à população. Além disso, a implantação de programas de requalificação urbana ecológica, como parques lineares, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, entre outras SbN, nas regiões onde se tem alta disponibilidade de espaços livres públicos, melhorando as ofertas de serviços ecossistêmicos. Essa leitura territorializada dialoga diretamente com a agenda de adaptação climática do Grande ABC, complementando o Plano Regional de Enfrentamento às Mudanças Climáticas (2016). Nesse sentido, a metodologia aqui desenvolvida pode subsidiar diretamente a elaboração e a atualização de planos de ação climática municipais e intermunicipais, oferecendo diagnósticos territoriais objetivos para a priorização espacial de investimentos em infraestrutura verde e adaptação climática.

A leitura conjunta das dimensões ambiental e socioeconômica indica que a prioridade de intervenção não decorre da tipologia ambiental isoladamente, mas de sua interseção com a condição socioeconômica da população. Dentro de uma mesma tipologia, o rendimento mediano varia de

R$3.500,00 em São Caetano do Sul a R$1.800,00 em Diadema, e a proporção de população preta e parda, de 20,30% a 55,10%. Onde o déficit de infraestrutura verde coincide com rendimentos reduzidos, a provisão privada de conforto ambiental não constitui alternativa disponível, e a qualificação do sistema público de espaços livres torna-se a única via efetiva de adaptação. As tipologias sugerem, ainda, lógicas distintas de intervenção: criação de espaços livres públicos nos territórios de cobertura vegetal sem contrapartida pública; qualificação ecológica dos espaços existentes onde a oferta pública é ampla mas a cobertura vegetal é reduzida; e atuação simultânea sobre ambas as dimensões, associada a desimpermeabilização e reforço da drenagem, nos setores de déficit combinado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação da Universidade de São Paulo (FUSP), bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABOAGYE, P. D.; SHARIFI, A.. Urban climate adaptation and mitigation action plans: a critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 189, parte A, 113886, jan. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113886. Acesso em: 01 jul. 2026.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507. Acesso em: 18 jul. 2026.

AYLETT, A. Institutionalizing the urban governance of climate change adaptation: results of an international survey. Urban Climate, v. 14, parte 1, p. 4-16, dez. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.06.005. Acesso em: 01 jul. 2026.

BOROUSHAKI, S. Entropy-Based Weights for MultiCriteria Spatial Decision-Making. Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers, v. 79, p. 168–187, 2017.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento. Relatório final do projeto classificadores do gasto público em mudança climática, biodiversidade e gestão de riscos e desastres. Brasília, DF: SOF/MPO, 2025. 84 p. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/orcamento/arquivos/relatorio_gastos_climaticos_final_18-11-25-1554.pdf/@@display-file/file. Acesso em: 10 jul. 2026.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL GRANDE ABC. Plano de ação de enfrentamento às mudanças climáticas do Grande ABC. Santo André: Consórcio Intermunicipal Grande ABC, 2016. 62 p. Disponível em: https://www.consorcioabc.sp.gov.br/pagina/91/acervo/sub-pagina/54/. Acesso em: 01 jul. 2026.

DENALDI, R. *et al.* Urbanização de favelas na Região do ABC no âmbito do Programa de Aceleração do Crescimento-Urbanização de Assentamentos Precários. Cadernos Metrópole, São Paulo, v. 18, n. 35, p. 101-118, abr. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2236-9996.2016-3505. Acesso em: 08 jul. 2026.

DENALDI, R.; FERRARA, L. N. Urbanização de favelas na região do ABC paulista, Brasil: um balanço das intervenções recentes e seus desafios. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA HABITAÇÃO NO ESPAÇO LUSÓFONO, 4., 2017, Porto; Covilhã. Atas ...: a cidade habitada. Porto: Câmara Municipal do Porto; Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2017. ISBN 978-989-654-363-1.

ERMIDA, S. L. *et al.* Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series. Remote Sensing, v. 12, n. 9, 1471, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs12091471. Acesso em: 07 jul. 2026.

FANTIN, M. *et al.* Inteligência geográfica na construção de políticas públicas: rumo à plataforma de monitoramento de áreas verdes urbanas do Estado de São Paulo. Interações, Campo Grande, MS, v. 23, n. 3, p. 907-922, jul./set. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.20435/inter.v23i3.3533. Acesso em: 11 jul. 2026.

GARCÍA-ÁLVAREZ, David; LARA HINOJOSA, Javier; JURADO PÉREZ, Francisco José. Global thematic land use cover datasets characterizing artificial covers. In: GARCÍA-ÁLVAREZ, D.;

OLMEDO, M. T. C.; PAÉGELOW, M.; MAS, J. (org.). Land use cover datasets and validation tools. Cham: Springer, 2022. p. 419-442.

GUO, J. *et al.* Nationwide urban tree canopy mapping and coverage assessment in Brazil from high-resolution remote sensing images using deep learning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 198, p. 1-15, 2023. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.02.007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.02.007. Acesso em: 11 jul. 2026.

HAWKER, L. *et al.* A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental Research Letters, v. 17, n. 2, p. 024016, 1 Feb. 2022.

HOLLANDER, M.; WOLFE, D. A.; CHICKEN, E. Nonparametric statistical methods. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. E-book. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119196037. Acesso em: 18 jul. 2026.

HOLM, S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. Scandinavian Journal of Statistics, v. 6, n. 2, p. 65-70, 1979. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/4615733. Acesso em: 18 jul. 2026.

IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2022: agregados por setores censitários. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=39499&t=resultados. Acesso em: 28 jul. 2026.

IPCC — INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. Disponível em: https://doi.org/10.1017/9781009325844. Acesso em: 02 jul. 2026.

JUSTINIANO, E. F. *et al.* Proposal for an index of roads and structures for the mapping of non-vegetated urban surfaces using OSM and Sentinel-2 data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 109, 102791, maio 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102791. Acesso em: 12 jul. 2026.

KAUFMAN, L; ROUSSEEUW, P. J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. New York: John Wiley & Sons, 1990. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics).

KAUR, N. K.; KAUR, U.; SINGH, D. K-Medoid clustering algorithm: a review. International Journal of Computer Application and Technology (IJCAT), v. 1, n. 1, p. 42, abr. 2014. ISSN 2349-1841.

KAWAKUBO, F. S. *et al.* Quantification and Analysis of Impervious Surface Area in the Metropolitan Region of São Paulo, Brazil. Remote Sens., 11, 944, 2019.

KOWARICK, Lúcio. A espoliação urbana. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1979.

LOPEZ, M. A. *et al.* The 3-30-300 rule compliance: a geospatial tool for urban planning. Landscape and Urban Planning, v. 261, 105396, set. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105396. Acesso em: 05 jul. 2026.

LUDWIG, C. *et al.* Mapping public urban green spaces based on OpenStreetMap and Sentinel-2 imagery using belief functions. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 10, n. 4, 251, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijgi10040251. Acesso em: 28 jul. 2026.

LYRA, A. *et al.* Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. Theoretical and Applied Climatology, v. 132, p. 663-682, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z. Acesso em: 28 jul. 2026.

MACEDO, S. S. *et al.* Os sistemas de espaços livres na constituição da forma urbana contemporânea no Brasil: produção e apropriação (QUAPÁ-SEL II). Paisagem Ambiente: Ensaios, São Paulo, n. 30, p. 137-172, 2012. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/paam/article/view/78112. Acesso em: 30 jun. 2026.

MARICATO, Ermínia. Metrópole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência. São Paulo: Hucitec, 1996.

NIEUWENHUIJSEN, M. J. *et al.* The evaluation of the 3-30-300 green space rule and mental health. Environmental Research, v. 215, parte 2, 114387, dez. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114387. Acesso em: 18 jul. 2026.

NOBRE, A. D. *et al.* HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. Hydrological processes, v. 30, n. 2, p. 320–333, 15 Jan. 2016.

NOBRE, A. D. *et al.* Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. Journal of hydrology, v. 404, n. 1–2, p. 13–29, Jun. 2011.

NUCCI, João Carlos. Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília (MSP). 2. ed. Curitiba: O Autor, 2008. 150 p. ISBN 978-85-908251-0-4.

OLUWADARE, T. S. *et al.* Applying Machine Learning Algorithms for Spatial Modeling of Flood Susceptibility Prediction over São Paulo Sub-Region. Land, May 2025.

ONU-HABITAT. City-wide public space strategy: a guidebook for city leaders. Nairobi: UN-Habitat, 2020. Disponível em: https://unhabitat.org/city-wide-public-space-strategies-a-guidebook-for-city-leaders. Acesso em: 28 jul. 2026.

PARSONS, E. S. *et al.* Climate change and inequality. Pediatric Research, v. 98, n. 4, p. 1238-1245, 2025. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41390-024-03153-z. Acesso em: 01 jul. 2026.

PATRIARCA, J. *et al.* Automatic conversion of OSM data into LULC maps: comparing FOSS4G based approaches towards an enhanced performance. Open Geospatial Data, Software and Standards, v. 4, n. 1, artigo 11, p. 1-19, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40965-019-0070-2. Acesso em: 28 jul. 2026.

SCHULTZ, M. *et al* . OSMlanduse a dataset of European Union land use at 10 m resolution derived from OpenStreetMap and Sentinel-2. Scientific Data, v. 12, 750, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41597-025-04703-8. Acesso em: 28 jul. 2026.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 29, n. 1, p. 16 – 20, 1991.

SMALL, C.; MILESI, C. Multi-scale standardized spectral mixture models. Remote Sensing of Environment, v. 136, p. 442-454, set. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.024. Acesso em: 03 jul. 2026.

UNEP — UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Nature-based solutions for climate change mitigation. Nairobi: UNEP, 2021. Disponível em: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/37318. Acesso em: 28 mai. 2026.

VALVERDE, M. C. *et al.* Urban climate assessment in the ABC Paulista Region of São Paulo, Brazil. Science of the Total Environment, v. 735, 139303, set. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139303. Acesso em: 28 jun. 2026.

VALVERDE, M. C.. A interdependência entre vulnerabilidade climática e socioeconômica na Região do ABC paulista. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 39-60, jul./set. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc66r2v2032017. Acesso em: 13 jul. 2026.

VAN DER LAAN, M. J.; POLLARD, K. S.; BRYAN, J. A new partitioning around medoids algorithm. Journal of Statistical Computation and Simulation, v. 73, n. 8, p. 575-584, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0094965031000136012. Acesso em: 18 jul. 2026.

YAMAUCHI, G. *et al.* O. Dinâmicas urbanas sob a tríade indústria, habitação e mobilidade no Grande ABC, 1950-2022. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 20., 2023, Belém. Anais .... Belo Horizonte: ANPUR, 2023. Disponível em: https://anpur.org.br/wp-content/uploads/2023/05/st01-10.pdf. Acesso em: 28 jun. 2026.