

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social associados às  
infraestruturas verdes urbanas: Revisão sistemática, análise espacial e modelo  
para gestão**

Ana Cláudia Nogueira da Silva  
*Doctor Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**ANA CLÁUDIA NOGUEIRA DA SILVA**

**Serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social associados às  
infraestruturas verdes urbanas: Revisão sistemática, análise espacial e modelo  
para gestão**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Angeline Martini

Coorientador: Diogo Nepomuceno  
Cosenza

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586s  
2025

Silva, Ana Cláudia Nogueira da, 1993-  
Serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social associados  
às infraestruturas verdes urbanas : revisão sistemática, análise  
espacial e modelo para gestão / Ana Cláudia Nogueira da Silva.  
– Viçosa, MG, 2025.

1 tese eletrônica (126 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Angeline Martini.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.812>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Belo Horizonte. 2. correlação espacial. 3. justiça  
ambiental. 4. planejamento urbano. 5. soluções baseadas na  
natureza. I. Martini, Angeline, 1988-. II. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

CDD 22. ed. 307.76098151

**ANA CLÁUDIA NOGUEIRA DA SILVA**

**Serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social associados às  
infraestruturas verdes urbanas: Revisão sistemática, análise espacial e modelo  
para gestão**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de agosto de 2025.

Assentimento:

---

Ana Cláudia Nogueira da Silva  
Autora

---

Angeline Martini  
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 15/12/2025 às 09:13:57 e pela orientadora em 16/12/2025 às 09:31:33. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **DT1J.2MKD.D7EC** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

A minha família.

Esta tese é fruto dos incontáveis esforços dos meus pais, Deusérgia e José Valmir, a quem devo tudo o que tenho: a vida, a valorização da educação e a força para vencer todos os obstáculos. Eles sempre estiveram ao meu lado, e por isso serei eternamente grata.

Agradeço também aos meus irmãos, Ju e Rafa, por todo o apoio. Amo a nossa família!

Agradeço a todos os meus familiares (tios, primos e agregados) que sempre torceram por mim, em especial aos meus padrinhos Valquíria e Branco e minha tia Isa.

Aos mestres.

À professora Angeline Martini, minha profunda gratidão pela excelente orientação no mestrado e no doutorado. Agradeço por sua paciência, apoio e confiança. Com toda a certeza, meu amor pela pesquisa não seria o mesmo se não a tivesse tido como orientadora.

Ao professor Diogo Cosenza, que foi um incrível coorientador, estendo meus agradecimentos a todos os docentes do Departamento de Engenharia Florestal.

Aos amigos, como sou grata por eles!

Ao longo de toda a minha trajetória, criei laços de amizade que me acompanham e me fortalecem.

Agradeço o apoio da Andrezza, Bárbara, Isabela e Paula, as irmãs que eu escolhi para todo o sempre. Agradeço à Ana Cláudia Teodoro, minha amiga querida, com quem posso sempre compartilhar as vivências acadêmicas e da vida; e à Letícia Maciel, minha amiga talentosa.

Na pessoa de Carlinha, Nila e Aurora, agradeço a todas as "Filhas da Pauta", minha família ouropretana.

Na pessoa de Lydiane, Fábiana, Danúcia e Mayra, agradeço a todas as amigas de Viçosa, a terra do doce de leite.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

SILVA, Ana Cláudia Nogueira da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social associados às infraestruturas verdes urbanas: Revisão sistemática, análise espacial e modelo para gestão.** Orientadora: Angeline Martini. Coorientador: Diogo Nepomuceno Cosenza.

A infraestrutura verde é uma solução baseada na natureza com potencial para mitigar desafios urbanos contemporâneos, quando adequadamente planejada. Cidades com diferentes capacidades de governança apresentam distintos níveis de acesso a instrumentos que apoiem a tomada de decisão sobre a gestão da infraestrutura verde e seus elementos. Este estudo desenvolveu um modelo espacial de gestão da infraestrutura verde em cidades brasileiras. A partir de uma revisão sistemática da literatura científica nacional, foram selecionados cinco serviços ecossistêmicos e um indicador de vulnerabilidade social para compor o modelo: promoção à saúde, recreação e lazer; suporte à biodiversidade; regulação da temperatura e umidade; regulação da poluição atmosférica; regulação do fluxo d'água; e vulnerabilidade social. O modelo foi aplicado na cidade de Belo Horizonte. Os indicadores foram quantificados, espacializados e combinados por meio de ponderação linear. Foram simulados diferentes cenários de governança para investigar como esses cenários influenciam o peso dos componentes e o resultado do modelo. A revisão da literatura revelou a predominância de estudos focados em serviços de regulação e a escassez de abordagens multifuncionais. A simulação de cenários de governança demonstrou que a consulta a especialistas tende a gerar resultados próximos à equidade entre os múltiplos serviços, indicando a viabilidade de aplicação do modelo mesmo em contextos de governança limitada. Os resultados também evidenciam desigualdades no acesso aos serviços ecossistêmicos, especialmente os culturais, reforçando a necessidade de um planejamento estratégico que considere as interações entre os componentes da infraestrutura verde e as dinâmicas territoriais. Os elementos de infraestrutura verde identificados na área urbana analisada demonstram potencial para ampliar a provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos, desde que sua adaptação considere as interações entre os diferentes serviços. O modelo se mostra replicável, acessível e ajustado à realidade brasileira, contribuindo para estratégias urbanas de resiliência, sustentabilidade e justiça ambiental.

Palavras-chave: Belo Horizonte; correlação espacial; justiça ambiental; planejamento urbano; soluções baseadas na natureza

## ABSTRACT

SILVA, Ana Cláudia Nogueira da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025. **Ecosystem services and social vulnerability associated with urban green infrastructure: Systematic review, spatial analysis, and management model.** Adviser: Angeline Martini. Co-adviser: Diogo Nepomuceno Cosenza.

Green infrastructure is a nature-based solution with the potential to mitigate contemporary urban challenges when adequately planned. Cities with different governance capacities present distinct levels of access to instruments that support decision-making regarding the management of green infrastructure and its elements. This study developed a spatial model for green infrastructure management in Brazilian cities. Based on a systematic review of the national scientific literature, five ecosystem services and one social vulnerability indicator were selected to compose the model: health promotion, recreation and leisure; biodiversity support; temperature and humidity regulation; air pollution regulation; water flow regulation; and social vulnerability. The model was applied to the city of Belo Horizonte. The indicators were quantified, spatialized, and combined through linear weighting. Different governance scenarios were simulated to investigate how these scenarios influence the weight of the components and the model output. The literature review revealed the predominance of studies focused on regulating services and the scarcity of multifunctional approaches. The simulation of governance scenarios demonstrated that consulting experts tends to generate results close to equity among multiple services, indicating the feasibility of applying the model even in contexts with limited governance capacity. The results also highlight inequalities in access to ecosystem services, especially cultural ones, reinforcing the need for strategic planning that considers the interactions between green infrastructure components and territorial dynamics. The green infrastructure elements identified in the analyzed urban area show potential to expand the provision of multiple ecosystem services, provided that their adaptation considers the interactions among different services. The model proves to be replicable, accessible, and suited to the Brazilian context, contributing to urban strategies for resilience, sustainability, and environmental justice.

Keywords: Belo Horizonte; spatial correlation; environmental justice; urban planning; nature-based solutions

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais etapas para construção do modelo de gestão da infraestrutura verde de cidades brasileiras.....	16
Figura 2: A) Distribuição das classes de serviços ecossistêmicos mais estudadas, categorizadas pelas seções da CICES; B) Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de ligação completa), mostrando a similaridade entre classes com base na coocorrência nos artigos analisados. ....	29
Figura 3: A) Tendência temporal das publicações sobre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde em áreas urbanas no Brasil. Os dados de 2024 correspondem apenas ao primeiro semestre; B) Distribuição geográfica das áreas de estudos dos artigos. *O número de artigo por estado não inclui artigos de escala geográfica nacional; **O número de artigos por cidade não inclui artigos de escala nacional, bioma, macrorregional e estadual.....	31
Figura 4: Nuvem de palavras representando as tipologias de infraestrutura verde com frequência $\geq 2$ , o tamanho de cada palavra é proporcional a sua frequência .....	36
Figura 5: Mapa de localização de Belo Horizonte, Brasil.....	50
Figura 6: a) Composição RGB (falsa-cor) da imagem Sentinel-2 L2A utilizada no processo de classificação do uso e ocupação do solo.; b) Mapa de uso e ocupação do solo de Belo Horizonte, Brasil e a acurácia do usuário (em parêntesis) .....	53
Figura 7: Mapas coropléticos das características socioambientais: a) Promoção de saúde, recreação e lazer, b) Manutenção e suporte a biodiversidade; c) Regulação da temperatura e umidade; d) Regulação de poluentes atmosféricos; e) Regulação do fluxo de água; f) Vulnerabilidade social. Áreas em laranja representam locais com menores disponibilidade do indicador do serviço ecossistêmico, enquanto áreas em azul representam locais com maiores disponibilidade .....	60
Figura 8: I de Moran Bivariado Global em diferentes escalas. Regulação do fluxo de água (Agua); Regulação de poluentes atmosféricos (Atm); Manutenção e suporte a biodiversidade (Bio); Promoção à saúde, recreação e lazer (Cult); Regulação da temperatura e umidade (Temp); Vulnerabilidade social (Vuln) .....	62
Figura 9: I de Moran Local das interações entre os serviços ecossistêmicos. Promoção de saúde, recreação e lazer (Cult); Manutenção e suporte a biodiversidade (Bio); Regulação da temperatura e umidade (Temp); Regulação de poluentes atmosféricos (Atm); Regulação do fluxo de água (Agua); Vulnerabilidade social (Vuln); Alto-Alto (AA); Alto-Baixo (AB); Baixo-Alto (BA); Baixo-Baixo (BB); não significativo (ns) .....	63



Figura 10: Etapas metodológicas da modelagem espacial da gestão da infraestrutura verde ..	80
Figura 11: Mapas de prioridade de infraestrutura verde por componentes do modelo espacial de gestão da infraestrutura verde: a) Promoção de saúde, recreação e lazer, b) Manutenção e suporte a biodiversidade; c) Regulação da temperatura e umidade; d) Regulação de poluentes atmosféricos; e) Regulação do fluxo de água; f) Vulnerabilidade social .....	82
Figura 12: Pesos e desvios-padrão dos critérios obtidos a partir do agrupamento dos especialistas por: A) Local de atuação profissional; B) Setor de atuação profissional .....	91
Figura 13: Mapas de prioridade de infraestrutura verde organizado em cinco classes de prioridades: Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa .....	93
Figura 14: Mapa de diferença entre os cenários analisados no modelo espacial de gestão da infraestrutura verde.....	94
Apêndice Figura 1: Bandas a) do vermelho (B4); b) do infravermelho próximo (B5) e; c) termal (B10) do Landsat-8 utilizadas para a recuperação da Temperatura da Superfície Terrestre (LST); d) LST, em graus Celsius .....	124
Apêndice Figura 2: Método do cotovelo aplicado à análise de k-médias .....	124
Apêndice Figura 3: Distribuição da temperatura da superfície terrestre (LST) por classes de uso e cobertura do solo.....	125
Apêndice Figura 4: Agrupamento das bacias hidrográficas com áreas de risco de inundação baseado nos valores das métricas AI e PLAND .....	126

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1-1: Exemplos de algumas definições para os termos áreas verdes urbanas e espaços verdes urbanos identificados durante a revisão sistemática de literatura .....	35
Apêndice Quadro 1: Artigos selecionados na revisão sistemática de literatura. Id. – Idioma; E – Inglês; P – Português; S – Espanhol; Mult – aborda a multifuncionalidade?; VulnE – aborda vulnerabilidade socioeconômica? .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1: Classificação do serviço ecossistêmico de polinização segundo a estrutura CICES .....	22
Tabela 1-2: Frequência (Freq.) de artigos por seção e combinações de seções da CICES .....	24
Tabela 1-3: Classes de serviços ecossistêmicos, segundo a CICES, não identificados na revisão sistemática da literatura .....	27
Tabela 1-4: Periódicos com os maiores quantitativo de publicações, intervalo das publicações e fator de impacto (FI) para o ano de 2024.....	33
Tabela 2-1: Classificação das áreas verdes públicas conforme o tamanho e acessibilidade para a população .....	54
Tabela 3-1: Componentes, indicadores, fonte de dados e métodos utilizados no modelo de gestão da infraestrutura verde.....	80
Tabela 3-2: Escala Fundamental de Saaty .....	83
Tabela 3-3: Quantitativo de especialistas nos critérios de seleção (2 e 3) .....	85
Tabela 3-4: Peso $\pm$ desvios-padrão dos critérios do modelo considerando julgamentos com CR $\leq 0,10$ .....	89
Tabela 3-5: Pesos atribuídos aos componentes do modelo nos três cenários.....	92

## LISTA DE SIGLAS

AA	Alto-Alto
AB	Alto-Baixo
Agua	Serviço de regulação do fluxo d'água
AHP	Processo de Hierarquia Analítica
AI	Índice de agregação
Atm	Regulação de poluentes atmosféricos
AVP	Área Verde Pública
BA	Baixo-Alto
BB	Baixo-Baixo
Bio	Serviço de manutenção e suporte da biodiversidade
C1	Cenário 1: Igualdade entre os componentes
C2	Cenário 2: Consulta a especialistas
C3	Cenário 3: Resiliência e adaptabilidade urbana às mudanças do clima
CARG	Taxa de Crescimento Anual Composta
Cemaden	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CI	Índice de Consistência
CICES	Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos
COHESION	Índice de Coesão de Manchas
CR	Razão de Consistência
Cult	Serviço de promoção à saúde, recreação e lazer
CV	Coeficiente de Variação
Cwa	Clima tropical de altitude
E	Inglês
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
G1	Agrupamento 1
G2	Agrupamento 2
G3	Agrupamento 3
$I_B$	Índice de Moran Bivariado Global
$I_i^B$	Índice de Moran Bivariado Local
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Id.	Idioma

IDE-Sisema    Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares
IVS	Índice de Vulnerabilidade Social
LecoS	Landscape Ecology Statistics
LST	Temperatura da Superfície Terrestre
LULC	Uso e ocupação do solo
MAUP	Problema de Unidade de Área Modificável
MCDA	Análise de Decisão Multicritério
MEA	Avaliação Ecossistêmica do Milênio
MP	Material Particulado
Mult	Aborda sobre a multifuncionalidade?
NCP	Contribuições da Natureza para as Pessoas
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
ns	não significativo
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONG	Organização não governamental
P	Português
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
PLAND	Porcentagem da paisagem
PRISMA	Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises
RI	Índice Aleatório
S	Espanhol
S*	Índice de Consenso
TEEB	A Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade
Temp	Serviço de regulação da temperatura e da umidade
TIR	Infravermelho termal
UDH	Unidade de Desenvolvimento Humano
UN-Habitat	Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos
UNINOVE	Universidade Nove de Julho
USP	Universidade de São Paulo
Vuln	Vulnerabilidade Social
VulnE	Aborda sobre a vulnerabilidade socioeconômica?

## SUMÁRIO

Introdução .....	14
Capítulo 1. Serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde em áreas urbanas do Brasil: uma revisão sistemática sobre lacunas, desafios e direções futuras .....	17
Introdução .....	18
Material e métodos .....	20
Resultados e discussão .....	23
Considerações finais .....	37
Referências .....	38
Capítulo 2. Interações entre serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social na infraestrutura verde urbana do Sul Global: estudo de caso em Belo Horizonte, Brasil .....	46
Introdução .....	47
Material e métodos .....	49
Resultados .....	58
Discussão .....	64
Considerações finais .....	67
Referências .....	67
Capítulo 3. Diferentes cenários de governança aplicados à modelagem espacial de infraestrutura verde: uma perspectiva de estudo em Belo Horizonte, Brasil .....	75
Introdução .....	76
Material e Métodos .....	78
Resultados .....	89
Discussão .....	95
Considerações finais .....	99
Referências .....	100
Considerações finais .....	105
Referências .....	107

Apêndice .....	109
----------------	-----

## Introdução

A rápida urbanização e as mudanças do clima impõem desafios sem precedentes às cidades, comprometendo a resiliência de suas funções e infraestruturas (Martini; Biondi, 2022; UN-Habitat, 2022). A resiliência urbana refere-se à capacidade das cidades de manter ou recuperar suas funções diante de perturbações, de adaptar às mudanças e de transformar rapidamente os sistemas que limitam a capacidade adaptativa atual ou futura (Meerow et al., 2016). Neste contexto, a infraestrutura verde tem recebido destaque como uma solução baseada na natureza<sup>1</sup> para o enfrentamento dos desafios urbanos (Herath; Bai, 2024).

A compreensão dos benefícios da infraestrutura verde para as cidades já é globalmente difundida entre pesquisadores, administradores públicos e outros atores interessados (Ordóñez et al., 2019; Sekulova et al., 2021; Herath; Bai, 2024). Contudo, estudos ressaltam a ausência de ferramentas de planejamento que integrem, desde sua concepção, dimensões da vulnerabilidade social às análises ecológicas (Korkou et al., 2023). As teorias e estratégias de planejamento da infraestrutura verde foram desenvolvidas em contextos urbanos do Norte Global e a aplicação direta dessas abordagens para as cidades do Sul Global pode resultar em ações problemática e inadequada (Dobbs et al. 2019; Alizadeh; Prasad, 2023). Muitas cidades do Sul Global, como as cidades brasileiras, enfrentam um conjunto complexo de desafios, caracterizados por grandes desigualdades socioeconômicas, urbanização acelerada, muitas vezes informal, e estruturas de governança com recursos limitados (Derdouri et al., 2025).

Nessas cidades, a distribuição dos espaços verdes é historicamente desigual, refletindo e perpetuando padrões de injustiça ambiental<sup>2</sup> (Silva et al., 2018; Matias; Jereissati, 2022). A distribuição equitativa dos elementos da infraestrutura verde reduz os abismos sociais existentes ao oferecer espaços públicos para lazer, recreação, atividades físicas e contato com a natureza, melhorar a qualidade de vida e o bem-estar da população, além de atenuar os impactos dos eventos climáticos extremos, promovendo uma maior capacidade resposta de populações vulneráveis no enfrentamento destes impactos (Silva et al., 2018). É importante ressaltar que apenas a disponibilidade geográfica não assegura

---

<sup>1</sup> Soluções que são inspiradas e apoiadas pela natureza, que são custo-efetivas e simultaneamente fornecem benefícios ambientais, sociais e econômicos (European Commission, 2015).

<sup>2</sup> Justiça ambiental refere-se ao tratamento justo e o envolvimento significativo de todas as pessoas, independentemente de raça, cor, origem nacional ou renda, com relação ao desenvolvimento, implementação e aplicação de leis, regulamentos e políticas ambientais (EPA, 2023).



a equidade na oferta de serviços ecossistêmicos (Wolch et al, 2014). Os elementos da infraestrutura verde precisam possuir as características e recursos necessários para promover os serviços desejados e requerem uma gestão adequada ao longo do tempo (Knobel et al., 2019; Martini; Biondi, 2022).

Modelos de planejamento da infraestrutura verde precisam otimizar a oferta de serviços ecossistêmicos considerando os contextos socioeconômicos e ambientais de cada território (Korkou et al., 2023). Em cidades onde os recursos financeiro, humanos e ecológicos são limitados, muitas vezes o planejamento estratégico é negligenciado pela escassez de metodologias, acessíveis que utilizem dados e ferramentas confiáveis, que não dependam de grandes investimentos tecnológicos ou financeiros (Devisscher et al.; 2022).

Este estudo aborda diretamente essa lacuna ao desenvolver um modelo espacial para gestão da infraestrutura verde calibrado ao contexto das cidades brasileiras, com potencial de aplicação em outras cidades com características urbanas semelhantes. Parte-se da hipótese de que a integração de serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social em um modelo espacial resulta em uma identificação mais eficaz e socialmente justa de áreas prioritárias para a alocação de infraestrutura verde do que abordagens que não consideram as dimensões ecológicas e sociais. Assim, o estudo tem como objetivo modelar os ecossistemas urbanos para identificar áreas prioritárias para alocação ou adaptação de elementos da infraestrutura verde. Especificamente, o estudo busca-se: (1) analisar as interações entre os serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde e a vulnerabilidade social; (2) criar um modelo de gestão da infraestrutura verde usando dados e ferramentas de acesso livre; (3) avaliar o impacto da governança nos resultados do modelo de gestão da infraestrutura verde. A cidade selecionada para o estudo de caso foi Belo Horizonte, Brasil.

A Figura 1 ilustra as principais etapas para construção do modelo de gestão da infraestrutura verdes de cidades brasileiras.

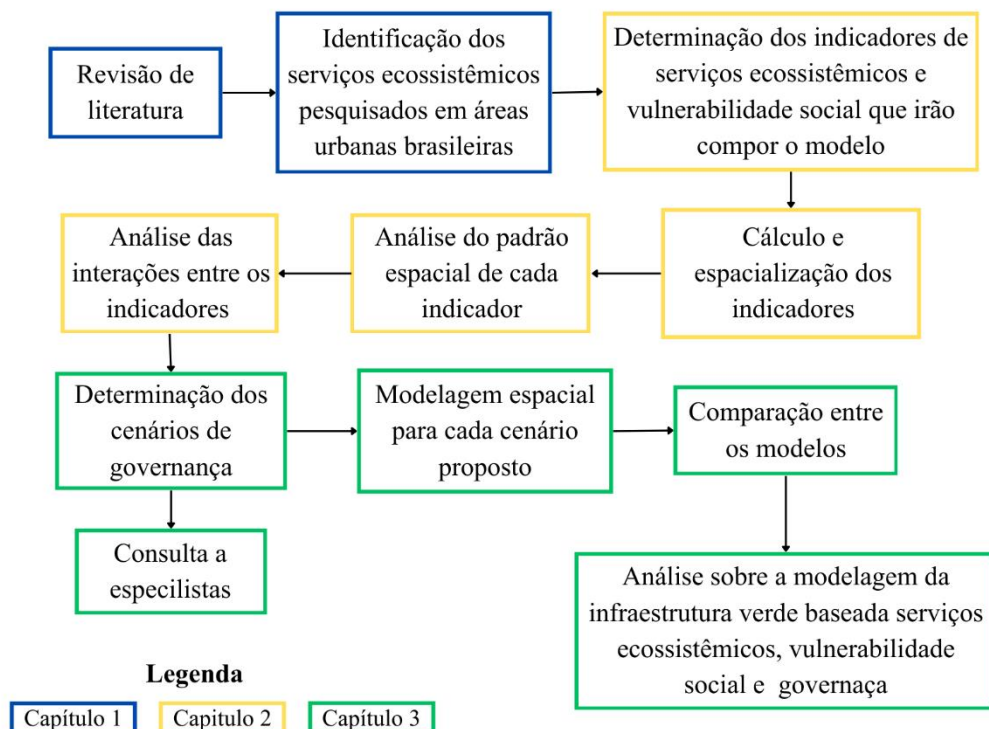


Figura 1 - Principais etapas para construção do modelo de gestão da infraestrutura verde de cidades brasileiras.

Este documento está dividido em três capítulos. O primeiro, traz uma revisão de literatura sobre os sobre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde urbana no Brasil. O segundo capítulo propõe um método para mapear e avaliar a interação entre os indicadores de serviços ecossistêmicos e o indicador de vulnerabilidade visando a gestão de infraestruturas verdes urbanas. O terceiro capítulo compara diferentes cenários de governança social e avalia a suas influências no modelo de gestão da infraestrutura verde.

## **Capítulo 1. Serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde em áreas urbanas do Brasil: uma revisão sistemática sobre lacunas, desafios e direções futuras**

**Resumo:** A infraestrutura verde tem sido considerada uma importante estratégia para a provisão de serviços ecossistêmicos em áreas urbanas. No entanto, a produção científica sobre o tema permanece concentrada em países do Norte Global, o que dificulta a compreensão de seus efeitos em contextos de alta urbanização e desigualdades sociais, como o de muitos países do Sul Global. Este estudo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre os serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde em cidades do Brasil, com o objetivo de identificar tendências, lacunas e desafios da pesquisa nacional. Foram analisados 224 artigos publicados até junho de 2024, considerando os serviços abordados, sua distribuição no tempo e no espaço, os tipos de infraestrutura estudados e os conceitos utilizados. Os resultados indicam a predominância de serviços de regulação e manutenção, principalmente relacionados à conservação de habitats, regulação do clima e do ciclo hidrológico. A maioria dos estudos investigam áreas urbanas da região Sudeste, enquanto as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste apresentam menor representação. O número de publicações cresceu, em média, 17,39% ao ano. As análises de concorrência identificaram três linhas de pesquisa: 1) articulações entre infraestrutura verde, saúde, bem-estar e justiça socioambiental; 2) interações ecológicas; e 3) adaptação climática. Apesar do avanço quantitativo, ainda existem lacunas importantes, principalmente no que diz respeito às abordagens multifuncionais da infraestrutura verde e às interações entre os diferentes serviços ecossistêmicos.

**Palavras-chave:** Serviços ecossistêmicos; Infraestrutura verde; Áreas urbanas; Revisão sistemática; Sul Global.

**Abstract:** Green infrastructure has been recognized as an important strategy for the provision of ecosystem services in urban areas. However, scientific research on this topic remains concentrated in countries of the Global North, which limits the understanding of its role in contexts of high urbanization and social inequalities, as found in many countries of the Global South. This study presents a systematic literature review on the ecosystem services associated with green infrastructure in Brazilian cities, aiming to identify national research trends, gaps, and challenges. A total of 224 articles published until June 2024 were analyzed, considering the types of ecosystem services addressed, their spatial and temporal distribution, the types of green infrastructure studied, and the conceptual

frameworks employed. The results indicate a predominance of studies focused on regulation and maintenance services, mainly those related to habitat conservation, and climate and hydrological cycles regulation. Most studies are concentrated in urban areas in the Southeast region, while the North, Northeast, and Central-West regions remain underrepresented. The number of scientific publications increased, on average, by 17.39% per year. Co-occurrence analysis revealed three main research themes: 1) connections between green infrastructure, health, well-being, and socio-environmental justice; 2) ecological interactions; and 3) climate adaptation. Despite the quantitative advances, significant gaps remain, particularly regarding multifunctional approaches to green infrastructure and the interactions among different ecosystem services.

**Keywords:** Ecosystem services; Green infrastructure; Urban areas; Systematic review; Global South.

## Introdução

Infraestrutura verde é uma rede estrategicamente planejada de áreas naturais e seminaturais, estabelecidas e/ou gerenciadas para fornecer uma ampla gama de serviços ecossistêmicos (European Commission, 2019). Dentre estes serviços estão a regulação do microclima, provisão de alimentos, regulação da qualidade do ar, redução de desigualdades e promoção da saúde e recreação (Alchapar et al., 2016, Brito; Rizzo, 2022; Evans et al., 2022; Camelo, 2023; Barbosa et al., 2024). No ambiente urbano, a implementação e manutenção da infraestrutura verde tem então a função de proteger e valorizar a natureza, incorporar conscientemente os processos naturais no ordenamento territorial, e atenuar efeitos das mudanças climáticas sobre as populações (Arthur; Hack, 2022).

Seja no ambiente urbano ou rural, qualquer tentativa de medir, mapear ou valorizar os serviços ecossistêmicos começa com a descrição e categorização dos mesmos (Czúcz et al., 2018). Diversos métodos de categorização destes serviços foram descritos e aplicados na literatura científica, sendo a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES) um dos mais utilizados nos estudos contemporâneos (Czúcz et al. 2018; Haines-Young; Potschin-Young, 2018). A CICES é baseada em uma estrutura hierárquica de quatro níveis hierarquização: Seção, Divisão, Grupo e Classe (Haines-Young; Potschin-Young, 2018). No nível mais abrangente, os serviços ecossistêmicos são classificados em três seções: Serviços ecossistêmicos

culturais, englobam as características não materiais dos ecossistemas que impactam positivamente na saúde e bem-estar de uma população; Serviços de provisão, são os insumos materiais e energéticos obtidos dos ecossistemas dos quais bens e produtos são derivados; Serviços de regulação e manutenção, incluem todas as formas pelas quais os ecossistemas podem mediar o ambiente no qual as pessoas vivem (Haines-Young; Potschin-Young, 2018). Além da CICES, outros sistemas de categorização são amplamente difundidos, como a Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005), a Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade (TEEB, Sukhdev et al., 2010) e o sistema de Contribuições da Natureza para as Pessoas (NCP, Pascual et al., 2017).

Nos últimos 20 anos, houve um aumento significativo de pesquisas sobre os serviços ecossistêmicos fornecidos pela infraestrutura verde (Herath; Bai, 2024). Essa literatura científica é predominantemente composta por estudos realizados na Europa, Estados Unidos e China (Bakhtsiyarava et al., 2024; Herath; Bai, 2024). Embora essa predominância geográfica esteja mudando, a escassez de pesquisas em países do Sul Global, principalmente de baixa renda, ainda é relatada em diversos estudos (Arthur; Hack, 2022; Bakhtsiyarava et al., 2024). Em países do Sul Global, a provisão de serviços ecossistêmicos exibe particularidades relacionadas com as características climáticas e ambientais das regiões de baixa latitude, altas taxas de crescimento e densidade populacional, políticas públicas incipientes e grandes desigualdades sociais (Guo et al., 2023; Li et al., 2024; World Bank, 2024).

Baseado nas informações supracitadas, este trabalho busca fazer uma revisão sistemática sobre pesquisas envolvendo os serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verdes urbanas em um país do Sul Global com o objetivo de responder as seguintes questões: 1) Quais serviços ecossistêmicos predominam na literatura científica? 2) A dinâmica das publicações no espaço-tempo acompanha a tendência global? 3) Quais são as principais tipologias de infraestrutura verde investigadas? 4) Quais lacunas, desafios e direções podem nortear as pesquisas futuras? Neste estudo define-se como serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde as funções, recursos e benefícios de natureza social, ecológica, ambiental e econômica fornecidos ou otimizados pela infraestrutura verde e seus elementos, incluindo os componentes vegetais e aquáticos.

O Brasil, maior país do hemisfério Sul e um dos mais populosos do mundo, foi selecionado como área-alvo deste estudo devido as suas características socioeconômicas e urbanísticas. Até a década de 1960, a população brasileira era predominantemente rural

e a partir da expansão dos setores agrícola e industrial, iniciou-se o período "Desenvolvimentista" (Ahmed et al., 2022). Este período foi marcado pela migração da população rural para as cidades que impulsionou o crescimento econômico do país, a industrialização e a urbanização dos territórios (Ahmed et al., 2022). Atualmente, o legado dessa transição é um cenário contemporâneo de desafios complexos. O país não apenas concentra mais de 85% de sua população em cidades, mas o faz sob um dos mais elevados índices de desigualdade social do mundo (Flores et al., 2022; World Bank, 2024). De acordo com as projeções do Relatório Mundial das Cidades de 2024, a alta densidade urbana do Brasil se intensificará nos próximos anos podendo atingir 89% até 2030 (UN-Habitat, 2024).

No contexto ecológico, o Brasil se destaca por ser um dos países mais ricos em termos de recursos naturais, representando 14% da biocapacidade global (capacidade da biosfera de gerar recursos e sequestrar resíduos; Ahmed et al., 2022). Apesar dessa abundância de recursos naturais, poucos estudos revisaram o fornecimento de serviços ecossistêmicos (Parron et al., 2019; Flores et al., 2022; Barbosa et al., 2024) e não foram encontradas pesquisas sobre as tendências científicas dos serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde nas áreas urbanas brasileiras.

## **Material e métodos**

### *Coleta de dados*

Foi realizada uma busca sistemática de trabalhos nos sistemas para selecionar artigos completos, de periódicos revisados por pares, que investigaram serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde em áreas urbanas brasileiras. Com base no protocolo dos Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA, <http://www.prisma-statement.org/>) foram adotadas medidas para minimizar o viés durante a identificação, seleção e síntese dos artigos.

A seguinte sequência de busca booleana foi aplicada aos campos de título, resumo e palavras-chave dos artigos:

- "Serviço\* ecossistêmico\*" OR "Serviço\* ambiental\*" OR "Problema\* urbano\*" OR Sustentabilidade\* AND
- Cidade\* OR Comunidade\* OR Urbano\* OR "Planejamento urbano" OR Gestão OR ODS11 AND

- *Vegetação\** OR *"Floresta\* urbana\*"* OR *"Silvicultura urbana"* OR *Arborização* OR *"Árvore\*"* OR *"Infraestrutura\* verde\*"* OR *"Infraestrutura verde-azul"* OR *"Infraestrutura azul-verde"* OR *"Infraestrutura azul"* OR *"Área\* verde\*"* OR *"Espaço\* verde\*"* AND
- *Brasil*

A estrutura da busca exigia a presença de, no mínimo, um termo de cada um dos quatro grupos de termos. A diversidade de termos utilizados na busca sistemática foi planejada para abranger o maior número possível de estudos sobre o tema. Considerando que o conceito de infraestrutura verde começou a ser utilizado na literatura científica brasileira na primeira década do século XXI, limitar a busca a artigos que utilizam exclusivamente esse termo poderia resultar na subnotificação de pesquisas. Os termos foram pesquisados em inglês e português. O inglês é o principal idioma das publicações científicas (Alavipanah et al., 2017) e o português foi incluído pelo contexto geográfico. As opções de busca incluíram título, resumo e palavras-chave. O corte temporal englobou todos os documentos publicados até 30 de junho de 2024, resultando em 1449 artigos.

A triagem inicial foi realizada com a leitura do título e resumo. Como foram utilizados alguns termos abrangentes, por exemplo *Sustentabilidade*, *Gestão* e *Vegetação*, dois critérios foram aplicados para a triagem dos artigos: 1) abordar explicitamente uma área urbana brasileira; 2) investigar um ou mais serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde. Após a triagem inicial, 249 artigos foram selecionados. Posteriormente, ocorreu a leitura completa dos documentos para averiguação do escopo conforme os critérios aplicados e a extração dos dados. Artigos de revisão não foram considerados.

Os dados extraídos dos artigos foram: título, idioma, ano da publicação, nível geográfico do estudo (país, bioma, macrorregião, estado, região metropolitana, cidade, bacia hidrográfica, bairro/setor, área verde ou experimento), área de estudo, serviços ecossistêmicos investigados, classificação dos serviços ecossistêmicos (se mencionada), tipologia de infraestrutura verde investigada/recomendada, se menciona o termo 'infraestrutura verde', se aborda a multifuncionalidade da infraestrutura verde; se aborda a vulnerabilidade socioeconômica.

#### *Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos*

A metodologia utilizada para categorizar os serviços ecossistêmicos foi a versão 5.1 da CICES. A primeira versão da CICES foi publicada em 2013 e desde então é

amplamente empregada no mapeamento, avaliação e valoração dos serviços ecossistêmicos (Haines-Young; Potschin-Young, 2018). A versão 5.1 foi publicada em janeiro de 2018 e sua principal evolução foi estrutural, facilitando a agregação das categorias dos serviços (Haines-Young; Potschin-Young, 2018). A CICES foi selecionada por oferecer um grande nível de detalhamento dos serviços ecossistêmicos em uma estrutura hierárquica, com cada nível sendo progressivamente mais específico (Czucz et al. 2018; Haines-Young; Potschin-Young, 2018). O nível mais abrangente da CICES é denominado “Seção”. Os níveis subsequentes são “Divisão”, “Grupo” e “Classe”. Para exemplificar, a classificação do serviço ecossistêmico de polinização é exibida na Tabela 1-1.

Tabela 1-1: Classificação do serviço ecossistêmico de polinização segundo a estrutura CICES

<b>Nível hierárquico</b>	<b>Código</b>	<b>Descrição</b>
Seção	2	Regulação e manutenção (biótica)
Divisão	2.2	Regulação das condições físicas, químicas e biológicas
Grupo	2.2.2	Manutenção do ciclo de vida, proteção do habitat e do pool genético
Classe	2.2.2.1	Polinização (ou dispersão de “gametas” em um contexto marinho)

### *Análise dos dados*

Os serviços ecossistêmicos foram analisados a nível de Seção e Classe da CICES. Quando esses níveis não eram explicitamente mencionados, a classificação foi baseada na descrição do serviço ecossistêmico apresentada na seção de métodos da pesquisa. Foram quantificados os artigos que investigaram serviços ecossistêmicos de cada Seção e Classe.

A similaridade entre os artigos com base na co-ocorrência de Classe ou grupo de Classes foi analisada a fim de identificar tendências científicas e de inter-relações entre os serviços ecossistêmicos. O valor de similaridade reflete o grau que artigos analisam um mesmo serviço ou grupo de serviços ecossistêmicos. A presença ou ausência de cada Classe CICES nos artigos foi registrada. Seguindo a metodologia de Czucz et al. (2018), foram incluídas na análise Classes presentes em pelo menos cinco artigos, totalizando 19 classes. No agrupamento hierárquico adotou-se a distância de Jaccard, utilizada para conjuntos de dados binários (presença ou ausência). A validação dos agrupamentos foi realizada por meio da correlação cofenética, que mede a associação entre a matriz original de dissimilaridades e as distâncias representadas pelo dendrograma. Esse coeficiente,



calculado com base na correlação de Pearson (r), expressa o quanto a estrutura gerada pelo método de agrupamento preserva os padrões de dissimilaridade dos dados (Sokol & Rohlf, 1962). O ambiente R Core Team (2024) foi utilizado para processamento, incluindo as funções: *proxy::dist* para o cálculo da matriz de distância de Jaccard, *cluster::hclust* para o agrupamento por ligação completa e *stats::cophenetic* para cálculo do coeficiente de correlação cofenética.

Ano da publicação, área de estudo e nível geográfico embasaram as análises espaço-temporal. Informações acerca de áreas de estudo localizadas em outros países também foram coletadas. A taxa de crescimento anual composta (*Compound Annual Growth Rate*, CARG) das publicações foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$CARG = \left( \frac{V_f}{V_i} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Onde  $V_i$  = valor publicações no primeiro ano;  $V_f$  = valor de publicações no último ano;  $n$  = período em anos.

Nome e número de autores, afiliação dos autores e fonte das publicações (periódicos), bem como suas respectivas áreas de conhecimento foram extraídas dos artigos selecionados para caracterizar as fontes de informação científica

Informações sobre as tipologias de infraestrutura verde investigadas ou recomendadas e se o artigo menciona explicitamente o termo “infraestrutura verde” fundamentaram as análises sobre termos e conceitos empregados na literatura científica. As tipologias de infraestrutura verdes mais estudadas foram avaliadas usando nuvem de palavras. A nuvem de palavras foi gerada utilizando a função *wordcloud::wordcloud* no ambiente R Core Team (2024), com parâmetros ajustados para uma frequência mínima de duas ocorrências.

## Resultados e discussão

A análise dos 224 artigos originais selecionados após a triagem (Apêndice Quadro 1) revelou padrões distintos nas dimensões geográfica, temporal e temática da literatura científica sobre infraestrutura verde no Brasil.

### *Serviços ecossistêmicos – CICES nível Seção*

A análise temática da literatura científica revelou a predominância de pesquisas sobre os serviços de regulação e manutenção. Esta seção da CICES foi o objeto de estudo

em 178 dos 224 artigos analisados, um volume superior ao observado para os serviços de provisão (41 artigos) e culturais (32 artigos) (Tabela 1-2). Esse predomínio não se restringe aos estudos sobre infraestrutura verde urbana no Brasil. Em uma revisão mais ampla sobre serviços ecossistêmicos no país, Parron et al. (2019) também identificaram maior concentração de pesquisas dedicadas a essa mesma seção da CICES. Resultados semelhantes foram relatados por Ma e Yang (2025) ao revisarem a literatura científica em escala global.

A convergência entre esses estudos sugere um padrão consistente na literatura científica, embora não permita atribuir tal predominância a um fator isolado. Em áreas urbanas, muitos dos serviços associadas ao enfrentamento dos principais desafios ambientais, como regulação da temperatura, fluxo de água e melhoria da qualidade do ar, estão agrupados justamente na categoria de regulação e manutenção, o que pode contribuir para sua maior ênfase nas pesquisas. Além disso, Ma e Yang (2025) destacam limitações metodológicas na quantificação de serviços ecossistêmicos culturais, aspecto que possivelmente influencia na sua menor representatividade nos estudos analisados.

Tabela 1-2: Frequência (Freq.) de artigos por seção e combinações de seções da CICES

<b>Número de seções</b>	<b>Seções abordadas</b>	<b>Freq. de artigos n (%)</b>
1	Cultural	22 (10,95 %)
	Provisão	23 (11,44%)
	Regulação e manutenção	156 (77,61%)
	<b>Subtotal (1 seção)</b>	<b>201 (100 %)</b>
2	Cultural + Provisão	1 (5,26%)
	Cultural + Regulação e manutenção	5 (26,32%)
	Provisão + Regulação e manutenção	13 (68,44%)
	<b>Subtotal (2 seções)</b>	<b>19 (100%)</b>
3	Cultural + Provisão + Regulação e manutenção	4 (100%)
<b>Total</b>		<b>224</b>

A maioria das pesquisas investigou serviços ecossistêmicos de uma única seção (89,73%), enquanto 23 artigos (10,27%) investigaram explicitamente serviços pertencentes a duas ou mais seções. Apenas quatro estudos (Ferreira et al., 2019; Juntti et al., 2021; Barbosa et al., 2024; Cuchi et al., 2024) abordaram simultaneamente serviços ecossistêmicos de todas as seções, destacando o quão emergente e escassas são as abordagens empíricas sobre a multifuncionalidade da infraestrutura verde no Brasil.

### *Serviços ecossistêmicos – CICES nível classes*

A versão 5.1 da CICES categoriza os serviços ecossistêmicos em 90 classes, das quais 54 foram identificadas nos artigos analisados. As classes mais investigadas e seus respectivos códigos (mostrados em parênteses) foram: manutenção de populações e habitats (2.2.2.3); regulação da temperatura e da umidade (2.2.6.2); ciclo hidrológico e regulação do fluxo de água (2.2.1.3); filtragem/sequestro/armazenamento/acumulação por microrganismos, algas, plantas e animais (2.1.1.2). Todas essas pertencem a seção de Regulação e Manutenção (Figura 2 A). Estes resultados indicam que tais serviços ecossistêmicos apresentam menor ambiguidade para avaliações empíricas (Czúcz et al., 2018) e refletem os desafios das áreas urbanas brasileiras.

Neste estudo, a classe de código 1.3 foi atribuída ao serviço de provisão de vegetação em áreas urbanas, uma vez que a CICES versão 5.1 não possui uma classe específica para a provisão de vegetação urbana. A quantidade e a distribuição da vegetação em áreas urbanas foi objeto de estudo de 23 artigos, que analisaram o fornecimento equitativo de serviços ecossistêmicos. Assim, a classe "1.3: Outros", da seção de Provisão, foi utilizada para classificar esses estudos. A classe de plantas terrestres cultivadas (incluindo fungos e algas) para fins nutricionais (1.1.1.1), também da seção de Provisão, foi analisada em 13 artigos (Figura 2 A). Dentro da seção cultural, as classes mais investigadas foram: características dos sistemas vivos que permitem a investigação científica ou a criação de conhecimento ecológico tradicional (3.1.2.1); características dos sistemas vivos que permitem atividades que promovem a saúde, a recuperação ou o prazer por meio de interações ativas ou imersivas (3.1.1.1); e características dos sistemas vivos que permitem atividades que promovem a saúde, a recuperação ou o prazer por meio de interações passivas ou de observação (3.1.1.2) (Figura 2 A).

A

Tabela 1-3 exibe as classes de serviços ecossistêmicos, conforme a estrutura CICES, que não foram abordadas em nenhum dos artigos analisados. A ausência de algumas dessas classes, como por exemplo proteção contra incêndios e ventos, detalha as lacunas na literatura científica sobre os benefícios das infraestruturas verdes urbanas para as cidades brasileiras.

Tabela 1-3: Classes de serviços ecossistêmicos, segundo a CICES, não identificados na revisão sistemática da literatura

<b>Seção</b>	<b>Classes (Bióticas)</b>	<b>Classes (Abióticas)</b>
Provisão	1.1.2.1; 1.1.2.2; 1.1.2.3; 1.1.3.2; 1.1.3.3; 1.1.4.1; 1.1.4.2; 1.1.4.3; 1.1.6.2; 1.1.6.3; 1.2.1.3; 1.2.2.2; 1.2.2.3	4.2.1.4; 4.2.2.3; 4.3.1.1; 4.3.1.3; 4.3.2.1; 4.3.2.2; 4.3.2.3; 4.3.2.5
Regulação e Manutenção <sup>e</sup>	2.1.2.1; 2.2.1.4; 2.2.1.5; 2.2.5.2	5.1.1.1; 5.1.1.2; 5.1.2.1; 5.2.1.1; 5.2.1.3

Código CICES: 1.1.2.1 – Plantas cultivadas por aquicultura *in situ* para fins nutricionais; 1.1.2.2 – Fibras e outros materiais provenientes da aquicultura *in situ* para utilização direta ou transformação; 1.1.2.3 – Plantas cultivadas por aquicultura *in situ* como fonte de energia; 1.1.3.2 – Fibras e outros materiais provenientes de animais criados para uso direto ou processamento; 1.1.3.3 – Animais criados para fornecer energia; 1.1.4.1 – Animais criados em aquicultura *in situ* para fins nutricionais; 1.1.4.2 – Fibras e outros materiais provenientes de animais criados em aquicultura *in situ* para uso direto ou processamento; 1.1.4.3 – Animais criados por aquicultura *in situ* como fonte de energia; 1.1.6.2 – Fibras e outros materiais provenientes de animais selvagens para uso direto ou processamento; 1.1.6.3 – Animais selvagens (terrestres e aquáticos) usados como fonte de energia; 1.2.1.3 – Genes individuais extraídos de plantas superiores e inferiores para o projeto e a construção de novas entidades biológicas; 1.2.2.2 – Animais selvagens (organismos inteiros) usados para criar novas raças ou variedades; 1.2.2.3 – Genes individuais extraídos de organismos para o projeto e a construção de novas entidades biológicas; 2.1.2.1 – Redução do odor; 2.2.1.4 – Proteção contra o vento; 2.2.1.5 – Proteção contra incêndios; 2.2.5.2 – Regulação das condições químicas das águas salgadas por processos vivos; 4.2.1.4 – Água costeira e marinha utilizada como fonte de energia; 4.2.2.3 – Água subterrânea (e subsuperficial) utilizada como fonte de energia; 4.3.1.1 – Substâncias minerais utilizadas para fins nutricionais; 4.3.1.3 – Substâncias minerais utilizadas como fonte de energia; 4.3.2.1 – Substâncias não minerais ou propriedades do ecossistema utilizadas para fins nutricionais; 4.3.2.2 – Substâncias não minerais utilizadas em materiais; 4.3.2.3 – Energia eólica; 4.3.2.5 – Geotérmica; 5.1.1.1 – Diluição por ecossistemas de água doce e marinhos; 5.1.1.2 – Diluição pela atmosfera; 5.1.2.1 – Mediação de incômodos por estruturas ou processos abióticos; 5.2.1.1 – Fluxos de massa; 5.2.1.3 – Fluxos gasosos

A Figura 2 B apresenta o dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico baseada na co-ocorrência das classes de serviços ecossistêmicos entre os artigos analisados. A qualidade do ajuste do dendrograma foi avaliada por meio da correlação cofenética, que apresentou valor de  $r = 0,936$ , indicando que o agrupamento hierárquico representou de forma consistente os padrões de similaridade entre as classes analisadas. Foram identificados três agrupamentos (G1, G2 e G3), que representam padrões comuns de investigação.

O agrupamento G1 inclui pesquisas que tratam da provisão de vegetação e regulação de doenças, serviços culturais que promovem saúde e lazer (tanto bióticos quanto abióticos), além pesquisas orientadas ao serviço de produção de conhecimento científico. Esse agrupamento destaca a, recente e rápida, expansão da abordagem socioeconômica nos estudos sobre infraestrutura verde no Brasil. Entre os artigos analisados, os primeiros a integrar explicitamente dimensões socioeconômicas e ecossistêmicas foram publicados em 2016 (Macedo; Haddad, 2016; Gurgatz et al., 2016). No período de 2018 a 2023, o número de trabalhos que adotam essa mesma perspectiva apresentou um crescimento anual de 41,42%. Esse conjunto de resultados sinaliza o

fortalecimento das evidências que relacionam os benefícios dos ecossistemas à saúde e ao bem-estar das populações, ao mesmo tempo em que amplia o debate sobre a distribuição desses benefícios nas cidades. Estudos recentes têm chamado atenção para desigualdades na qualidade e na disponibilidade de serviços ecossistêmicos entre diferentes grupos sociais, especialmente aqueles em situação de maior vulnerabilidade (Cuchi et al., 2024; Pena et al., 2024).

O agrupamento G2 abrange pesquisas sobre o suporte e a manutenção da biodiversidade, provisão de plantas cultivadas e não cultivadas para fins nutricionais, polinização e dispersão de sementes. Esse agrupamento destaca as interações ecológicas nas áreas urbanas, como a riqueza e a adaptabilidade da biodiversidade, a conectividade entre os elementos da infraestrutura verde e a produção de alimentos. Esta revisão identificou 13 artigos que investigaram a produção de alimentos em elementos da infraestrutura verde, englobando tanto a subsistência humana quanto a de outras espécies. Exemplos incluem hortas comunitárias e quintais urbanos voltados à segurança alimentar (Medeiros et al., 2019; Camelo et al., 2023), habitats que sustentam pássaros (Lima-Passos et al., 2023; Silva et al., 2023), morcegos (Sazima; Sazima, 2022) e macacos (Andrade et al., 2022). Evans et al. (2022) mencionam que a produção de alimentos tem sido frequentemente negligenciada dentro da literatura global sobre infraestruturas verdes. No entanto, essa tendência não foi tão expressiva na literatura brasileira.

Embora este estudo não tenha o objetivo de investigar as interações entre os serviços ecossistêmicos, os resultados do agrupamento hierárquico corroboram com os achados de Lee e Lautenbach (2016). Esses pesquisadores identificaram fortes relações sinérgicas entre os serviços de proteção de habitat e pool genético com serviços reguladores associados a processos e funções do ecossistema, o que é consistente com o padrão do agrupamento G2. Além disso, eles observaram sinergias entre serviços culturais e estéticos que favorecem atividades recreativas, similar ao padrão identificado no agrupamento G1.

O agrupamento G3 é composto exclusivamente por serviços ecossistêmicos de regulação e manutenção bióticos e de provisão abióticos, incluindo as classes de fluxo, provisão e qualidade da água e serviços de regulação da temperatura, poluentes e erosão. De forma geral, este agrupamento destaca pesquisas que analisam serviços ecossistêmicos diretamente associados à adaptabilidade, habitabilidade e resiliência das cidades frente aos impactos do clima e dos extremos climáticos.

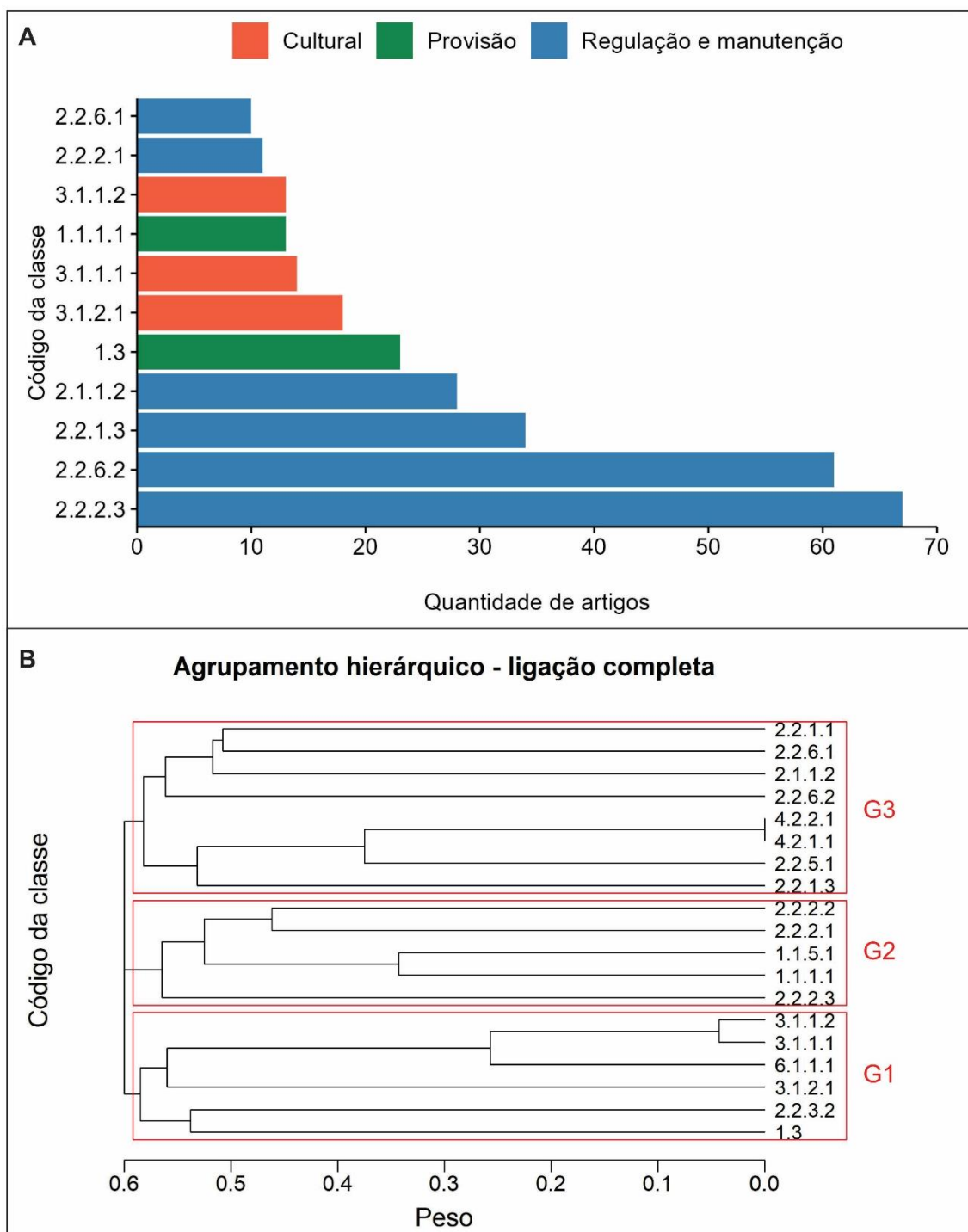


Figura 2: A) Distribuição das classes de serviços ecossistêmicos mais estudadas, categorizadas pelas seções da CICES; B) Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de ligação completa), mostrando a similaridade entre classes com base na coocorrência nos artigos analisados.

Códigos CICES: 1.1.1.1 – Plantas terrestres cultivadas (incluindo fungos e algas) para fins nutricionais; 1.1.5.1 – Plantas silvestres (terrestres e aquáticas, incluindo fungos e algas) usadas para nutrição; 1.3 – Provisão de vegetação urbana (apenas neste estudo); 2.1.1.2 – Filtragem/sequestro/armazenamento/acumulação por microrganismos, algas, plantas e animais; 2.2.1.1 – Controle das taxas de erosão; 2.2.1.3 – Ciclo hidrológico e regulação do fluxo de água (incluindo controle de enchentes e proteção costeira); 2.2.2.1 – Polinização (ou dispersão de “gametas” em um contexto marinho); 2.2.2.2 – Dispersão de sementes; 2.2.2.3 – Manutenção de populações em viveiros e habitats (incluindo a proteção do pool genético); 2.2.3.2 – Controle de doenças; 2.2.5.1 – Regulação da condição química de águas doces por processos vivos; 2.2.6.1 – Regulação da composição química da atmosfera e dos oceanos; 2.2.6.2 – Regulação da temperatura e da umidade, incluindo ventilação e transpiração; 3.1.1.1 – Características dos sistemas vivos

que permitem atividades que promovem a saúde, a recuperação ou o prazer por meio de interações ativas ou imersivas; 3.1.1.2 – Características dos sistemas vivos que permitem atividades que promovem a saúde, a recuperação ou o prazer por meio de interações passivas ou de observação; 3.1.2.1 – Características dos sistemas vivos que permitem a investigação científica ou a criação de conhecimento ecológico tradicional; 4.2.1.1 – Água de superfície para consumo; 4.2.2.1 – Água subterrânea (e subsuperficial) para consumo; 6.1.1.1 – Características naturais e abióticas da natureza que permitem interações físicas e experimentais ativas ou passivas.

### *Análise espaço-temporal*

Os 224 artigos foram publicados entre o período de 2002 e 2024 (Figura 3 A). Ressalta-se que os dados de 2024 foram excluídos das análises estatísticas por abrangerem apenas o primeiro semestre do ano. A taxa de crescimento anual das publicações foi de 17,39%, indicando o aumento significativo de interesse no tema, especialmente a partir de 2015 (Figura 3 A). Esse crescimento destaca o reconhecimento dos benefícios da infraestrutura verde para áreas urbanas. Diferente da tendência global, que apresenta um crescimento contínuo entre 2012 e 2018 (Escobedo et al., 2019; Herath; Bai, 2024), a produção científica brasileira sobre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde urbana apresentou oscilações no volume de publicações nesse mesmo período (Figura 3 A).

Os artigos revisados possuem diferentes escalas geográficas: quatro documentos investigam a escala nacional (Kasecker et al., 2017; Rocha; Nucci, 2019; Guo et al., 2023; Barbosa et al., 2024); dois em escala de bioma – Amazônia e Mata Atlântica (Silva; Prasad, 2019; Viezzer; Biondi, 2021); um da macrorregião do Sudeste (Abreu et al., 2022); seis em escala de estado; sete de regiões metropolitanas; 131 de cidades; 16 de bacias hidrográficas urbanas; um em escala de setor (d'Acampora et al., 2023); 13 de bairros; 33 de áreas verdes; e 10 de experimentos.

A Figura 3 B apresenta os estados e cidades que foram objeto de estudo. O estado de São Paulo foi o mais pesquisado, com 73 artigos, seguido por Minas Gerais (28), Paraná (26), Rio de Janeiro (23), Rio Grande do Sul (18), Pernambuco (13) e Paraíba (11). As cidades mais pesquisadas foram: São Paulo (35 artigos), Rio de Janeiro (18), Curitiba (15), Belo Horizonte (12) e Recife (10).



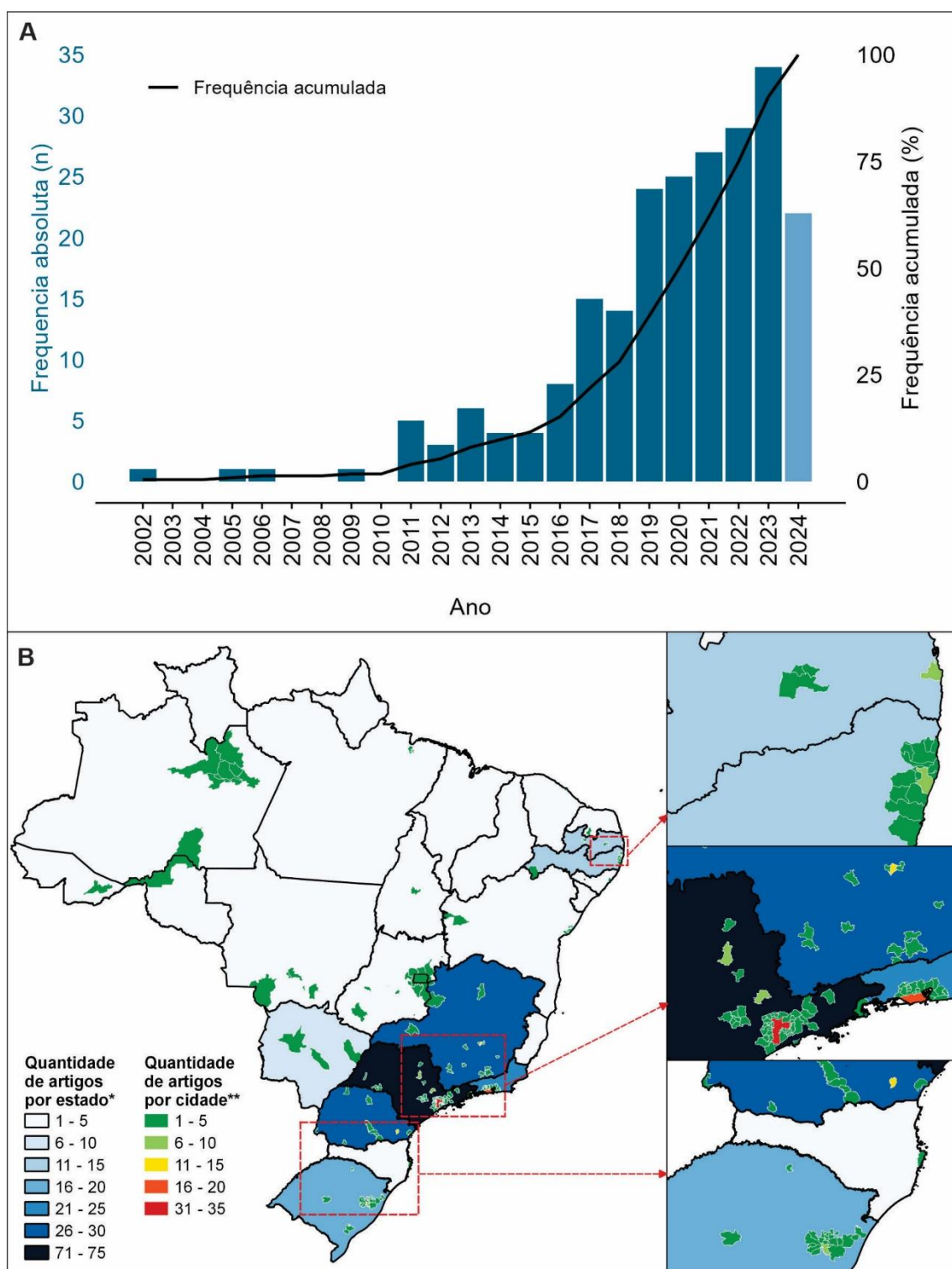


Figura 3: A) Tendência temporal das publicações sobre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde em áreas urbanas no Brasil. Os dados de 2024 correspondem apenas ao primeiro semestre; B) Distribuição geográfica das áreas de estudos dos artigos. \*O número de artigo por estado não inclui artigos de escala geográfica nacional; \*\*O número de artigos por cidade não inclui artigos de escala nacional, bioma, macrorregional e estadual.

Três estudos realizaram comparações entre cidades brasileiras e internacionais. Dois desses estudos investigaram a regulação de temperatura e umidade, comparando cidades brasileiras com Mendoza, Argentina (Alchapar et al., 2016) e com Munique,

Alemanha (Jochner et al., 2013). Suas conclusões sugerem vantagens para as cidades brasileiras: a anatomia e fisiologia da vegetação parece otimizar a regulação térmica, e espécies como a *Tipuana tipu* (tipuana), comumente encontradas nas florestas urbanas brasileiras, demonstraram ser indicadores eficazes das variações de temperatura (Alchapar et al., 2016; Jochner et al., 2013).

Um dos fatores que explicam a predominância de pesquisas nos estados e cidades da Macrorregião Sudeste do Brasil é a concentração de instituições de ciência, tecnologia e inovação, o que resulta em um maior direcionamento de recursos de fomento para essa região. De acordo com o Painel de Fomento em Ciência, Tecnologia e Inovação do CNPq, em 2025, 43,60% dos recursos destinados ao apoio à pesquisa foram alocados para a Macrorregião Sudeste, enquanto o Nordeste recebeu 16,65%, o Sul 16,51%, o Norte 9,57% e o Centro-Oeste 7,47%. Essa desigualdade regional impacta diretamente a capacidade de desenvolvimento científico e tecnológico das regiões menos favorecidas, perpetuando assimetrias na infraestrutura de pesquisa, na formação de recursos humanos e na produção de conhecimento.

#### *Periódicos, autores e instituições*

Os artigos foram publicados em 161 periódicos de diferentes escopos. Urban Ecosystems (15 artigos), Urban Forestry & Urban Greening (13) e Sustainability (11) foram as principais fontes (Tabela 1-4). A variedade de periódicos ressalta a natureza multidisciplinar da pesquisa em infraestrutura verde, com escopos que abrangem da ecologia ao planejamento urbano e à saúde pública. As publicações nos periódicos mais relevantes (5 ou mais artigos publicados) iniciaram em 2012 (Tabela 1-4), coincidindo com o ano em que a literatura global registrou um aumento significativo sobre o tema (Escobedo et al., 2019; Herath e Bai, 2024). A maioria dos documentos foi publicado na língua inglesa ( $n = 193$ , 86,1%), enquanto 26 foram na língua portuguesa (11,61%), três são bilíngues (inglês e português, 1,34%) e dois em espanhol (0,89%).

Dentre os 877 autores identificados nesta revisão, apenas 12,20% têm autoria em dois ou mais artigos analisados. Os autores com o maior número de publicações foram Biondi, D. (10 artigos), Ferreira, M.L. (7 artigos) e Saldiva, P.H.N. (7 artigos). A Universidade de São Paulo (USP) foi a instituição afiliada ao maior número de artigos (38). Com exceção do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e da Universidade Nove de Julho (UNINOVE), as instituições com afiliação nos artigos analisados são universidades públicas brasileiras. Isso demonstra a relevância das

instituições públicas de ensino superior na promoção de conhecimento científico e no desenvolvimento de estratégias para melhorias ambientais, sociais e habitacionais das áreas urbanas brasileiras.

Tabela 1-4: Periódicos com os maiores quantitativo de publicações, intervalo das publicações e fator de impacto (FI) para o ano de 2024

<b>Periódicos</b>	<b>Nº de artigos publicados</b>	<b>Intervalo temporal das publicações</b>	<b>FI (2024)</b>
Urban Ecosystems	15	2016 – 2024	2,4
Urban Forestry & Urban Greening	13	2014; 2016 – 2024	6,7
Sustainability	11	2015; 2017 – 2024	3,3
Science of the Total Environment	6	2017; 2019; 2022 – 2023	8,0
Biota Neotropica	5	2012 – 2013; 2022 – 2023	1,0
Building and Environment	5	2018 – 2019; 2022; 2024	7,6
Ecological Indicators	5	2016, 2019, 2024	7,4

#### *Infraestrutura verde: termos e conceitos*

Na literatura científica, não há consenso quanto ao termo “infraestrutura verde” nem uniformidade em seu uso (Sekulova et al., 2021). As definições variam conforme o campo científico, o contexto socioecológico e as especificidades espaço-temporais (McMahon; Benedict, 2000; Wang; Banzhaf, 2018). Diferentes áreas do conhecimento, como ciências ambientais, florestais, urbanismo, geografia, botânica, arquitetura e economia, possuem fundamentos teóricos distintos, que resultam em diferentes conceitos e, conseqüentemente, diferentes definições de infraestrutura verde

Entre os artigos analisados, o termo infraestrutura verde aparece pela primeira vez em Ribeiro e Ribeiro (2016). Contudo, embora o termo seja utilizado, seus autores não formulam explicitamente um conceito, limitando-se a mencionar o papel das áreas protegidas nas cidades. A primeira definição identificada é apresentada por Machado et al. (2019) para o termo infraestruturas ecológicas (ou verdes), entendidas como “*ecossistemas que operam espontaneamente [...] formando uma rede de elementos estruturais interligados dentro da paisagem*”. Essa definição expressa um conceito específico: o de que determinadas estruturas naturais funcionam de modo análogo às infraestruturas construídas, fornecendo múltiplos benefícios urbanos.

Embora o termo seja recente, o conceito subjacente à infraestrutura verde remonta a mais de 150 anos e é frequentemente associado ao projetista Frederick Law Olmsted, que defendia a integração de parques como um sistema contínuo de benefícios ambientais

e sociais (McMahon; Benedict, 2000). Em escala global, o termo infraestrutura verde começa a aparecer na literatura científica a partir de 1995 (Ying et al., 2022). Entre 1995 e 2008, menos de dez estudos utilizaram esse termo; a partir de 2009, contudo, seu uso expandiu-se rapidamente, acompanhando o crescimento de debates sobre ecossistemas urbanos (Escobedo et al., 2019).

Nesta revisão sistemática da literatura, o termo infraestrutura verde aparece em 13,84% (n = 31) dos documentos. Foram identificadas variações no adjetivo associado ao termo, como “verde-azul” (1,78%), “azul-verde” (1,34%), “adaptativa” (0,45%), “de soluções baseadas na natureza” (0,45%) e “ecológica” (0,45%). Em alguns estudos, esses adjetivos são apresentados como termos equivalentes ao adjetivo “verde”, sugerindo sinonímia, como por exemplo em Machado et al. (2019), ao usar infraestruturas ecológicas (ou verdes). Em outros casos, entretanto, a ausência de uma definição clara impede distinguir se o adjetivo diferente representa um sinônimo, um subtipo ou uma variação conceitual de infraestrutura verde, gerando ambiguidade interpretativa.

Além disso, outros termos têm sido empregados para designar conceitos relacionados, tais como áreas verdes, espaços verdes, floresta urbana, sistemas de drenagem sustentável, soluções baseadas na natureza, espaços abertos multifuncionais, rede ecológica urbana e sistema verde-azul. Como argumentam Wang e Banzhaf (2018), alguns desses termos contribuem para o desenvolvimento do conceito de infraestrutura verde, mas apresentam definições distintas. O caráter relativamente emergente da infraestrutura verde na literatura contribuiu para que diferentes termos fossem utilizados, até a primeira década deste século, para se referir à ideia de uma rede planejada de áreas naturais e seminaturais que fornece múltiplos serviços ecossistêmicos. Contudo, a ausência de definições conceituais consistentes pode comprometer a comparabilidade e a disseminação das descobertas científicas.

Os primeiros debates e pesquisas sobre as funções e benefícios da natureza para o bem-estar humano ocorreram na América do Norte e na Europa (McMahon; Benedict, 2000; Arthur; Hack, 2022). Foi a partir desses processos científicos que os conceitos e definições começaram a ser estabelecidos (Wang; Banzhaf, 2018). Como discutido na seção anterior, a tendência temporal das publicações no Brasil não seguiu o padrão da tendência global. Tudo isso corroborou para a tradução literal e adaptação de termos e conceitos estabelecidos no Norte Global, resultando na diversidade terminológica observada neste estudo.

Os termos “áreas verdes” e “espaços verdes” exemplificam essa heterogeneidade terminológica. A revisão sistemática identificou estudos que trataram ambos os termos como conceitos intercambiáveis e, em alguns casos, atribuíram a eles definições semelhantes às de infraestrutura verde. Também foram encontrados casos em que “áreas verdes” foi empregado como um subconjunto conceitual de “espaços verdes”. O Quadro 1-1 apresenta algumas definições de “áreas verdes” e “espaços verdes” identificadas na revisão da literatura.

Quadro 1-1: Exemplos de algumas definições para os termos áreas verdes urbanas e espaços verdes urbanos identificados durante a revisão sistemática de literatura

<b>Áreas verdes urbanas</b>	<b>Espaços verdes urbanos</b>
[...] considerada como toda área de cobertura arbórea formada por agrupamentos de árvores implantadas com paisagismo (adaptado Martini et al., 2018)	[...] abrangem áreas com vegetação, livres de desenvolvimento estrutural, mas podem incluir infraestrutura e instalações para lazer e recreação (Bressane et al., 2024)
Áreas verdes urbanas (praças e parques) (Oliveira et al., 2020).	[...] são áreas naturais ou artificiais, públicas ou privadas, com atividade biológica e mecanismos regenerativos em ambientes urbanos (Sant’Anna Neto et al., 2023)
Áreas verdes públicas dentro da paisagem urbana (por exemplo, parques e reservas ambientais, campos esportivos, regiões ribeirinhas, vias verdes, jardins comunitários, árvores de rua e cemitérios), [...] áreas verdes privadas (por exemplo, jardins, reservas verdes em condomínios ou floresta privada) (adaptado Orlandin e Carneiro, 2021)	[...] são frequentemente compostos por locais preservados, parques, praças e outras terras verdes públicas e privadas (Melo; Piratelli, 2023) [...] são áreas urbanas nas quais ecossistemas naturais ou seminaturais são convertidos em espaços urbanos (Silva et al., 2023)

Na literatura científica internacional, percebe-se um maior uso do termo espaço verde urbano (*urban green space*) do que área verde urbana (*urban green area*) (Taylor; Hochuli, 2017). No contexto brasileiro, o termo mais empregado é área verde urbana, sendo definido no Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012) como: *espaços, públicos ou privados, com predomínio de vegetação, preferencialmente nativa, natural ou recuperada, previstos no Plano Diretor, nas Leis de Zoneamento Urbano e Uso do Solo do Município, indisponíveis para construção de moradias, destinados aos propósitos de recreação, lazer, melhoria da qualidade ambiental urbana, proteção dos recursos hídricos, manutenção ou melhoria paisagística, proteção de bens e manifestações culturais*. Todos os artigos que utilizaram o termo espaço verde urbano foram publicados em língua inglesa, o que fortalece a hipótese de que o uso do termo espaço verde surgiu de uma tradução literal das pesquisas publicadas em outros idiomas.

### *Tipologia de infraestruturas verdes*

A Figura 4 exibe as tipologias de infraestrutura verde usada duas ou mais vezes. A tipologia mais frequente foi árvores urbanas ( $n = 31$ ). Essa tipologia é encontrada em pesquisas específicas sobre espécies arbóreas que abordam principalmente o fornecimento de alimentos e insumos, distribuição da vegetação urbana, atenuação microclimática e sequestro de poluentes (Brito; Rizzo, 2022; Guo et al., 2023; Ribeiro et al., 2023; Silveira et al., 2024). Árvores de rua foi a tipologia investigada em 13 artigos, esse termo foi adotado em pesquisas que analisam os serviços ecossistêmicos fornecidos pela arborização viária e as desigualdades no provimento destes serviços (Freitas et al., 2020; Martini et al., 2020; Pena et al. 2024).

Parque foi a segunda tipologia mais pesquisada ( $n = 27$ ). Alguns estudos analisaram parques com características específicas, como parques lineares (Maropo et al., 2019; Rolo et al., 2022; Battemarco et al., 2023; Castro; Alvim, 2024) e parques inundáveis (Miguez et al., 2019). As praças foram analisadas em 8 artigos. Essa tipologia da infraestrutura verde é uma das mais comuns nos municípios brasileiros (Gomes, 2007).

A vegetação urbana ( $n = 18$ ) e cobertura vegetal ( $n = 16$ ) foram as tipologias predominantes em pesquisas com análises geoespaciais. Ambos os termos foram utilizados para definir todas as unidades espaciais classificadas como vegetação. Em alguns estudos, essas tipologias foram subdivididas em arbórea e não arbórea.



Figura 4: Nuvem de palavras representando as tipologias de infraestrutura verde com frequência  $\geq 2$ , o tamanho de cada palavra é proporcional a sua frequência

Os fragmentos florestais ( $n = 22$ ) e remanescentes florestais ( $n = 3$ ) foram analisados em 22 e 3 (três) trabalhos, respectivamente. Na maioria dos trabalhos, essas

tipologias foram usadas de maneira semelhante, referindo-se à área verde com um predomínio de árvores interconectadas, caracterizando tipicamente uma floresta densa, com pouco mobiliário urbano. Já em alguns trabalhos, o florestal foi entendido como uma grande área verde, com mobiliário urbano, que possuía uma área menor com remanescente florestal (área verde com pouco mobiliário urbano).

### **Considerações finais**

Esta revisão analisou a literatura científica sobre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde em áreas urbanas brasileiras e identificou lacunas, tendências e desafios sobre o tema. As principais considerações foram:

Os serviços ecossistêmicos de regulação e manutenção predominam nas pesquisas sobre áreas urbanas brasileiras, enquanto os serviços culturais são menos explorados. Essa é uma tendência identificada mundialmente e já relatada no Brasil em outros contextos de uso e ocupação do solo. A classe de serviços ecossistêmicos mais investigada foi a de manutenção de populações em viveiros e habitats (incluindo a proteção do pool genético). Outros serviços de regulação e manutenção frequentemente pesquisados estão relacionados aos principais desafios socioambientais das cidades brasileiras, como enchentes, ilhas de calor e poluição, indicando o reconhecimento da infraestrutura verde como estratégia para mitigação de determinados desafios das áreas urbanas.

A distribuição geográfica da pesquisa revelou uma escassez de pesquisas em áreas urbanas das macrorregiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, além da ausência de investigações em escalas mais abrangentes. Dada a vasta extensão territorial e a diversidade socioeconômica, climática e ecológica do Brasil, é fundamental que estudos em nível nacional ou regional sejam ancorados em informações locais/regionais, assegurando que as especificidades regionais sejam adequadamente consideradas. Para isso, é essencial ampliar a infraestrutura dedicada à pesquisa e direcionar investimentos que fortaleçam a produção científica nessas macrorregiões, pois a atual ausência de estudos em determinadas partes do território pode ocultar problemas urbanos e levar à subnotificação de funções ecossistêmicas importantes.

As tipologias de infraestrutura verde mais investigadas foram árvores urbanas, parques e fragmentos florestais. Não foram encontradas pesquisas que abordassem explicitamente a relação das tipologias e seus componentes com o fornecimento de

múltiplos serviços ecossistêmicos. Essa lacuna na literatura representa uma oportunidade para futuras investigações, que poderiam contribuir para a gestão estratégica da infraestrutura verde.

Esta revisão identificou outras lacunas na literatura científica. Embora alguns estudos reconheçam a multifuncionalidade da infraestrutura verde e sua contribuição para o bem-estar humano, as interações entre os serviços ecossistêmicos e suas associações com as particularidades do ambiente urbano são pouco exploradas. Essa lacuna se opõe a Avaliação Ecossistêmica do Milênio, que destaca como a provisão de determinados serviços pode melhorar ou comprometer outros. A gestão estratégica da infraestrutura verde, com foco na otimização de suas múltiplas funções, deve considerar as consequências dessas interações, especialmente no contexto de alta urbanização e vulnerabilidade socioambiental observados no Brasil. Assim, há uma demanda por pesquisas que investiguem a dinâmica dos múltiplos serviços da infraestrutura verde em áreas urbanas brasileiras e como as especificidades socioeconômicas das cidades influenciam na provisão desses serviços.

Ambiguidades e inconsistências de conceitos podem comprometer a interpretação de contextos e resultados por pesquisadores e tomadores de decisão, prejudicando o intercâmbio de ideias, práticas e soluções eficazes. As diferenças socioambientais, ecológicas e linguísticas das diferentes regiões do mundo, somado à natureza multidisciplinar da infraestrutura verde, tornam impraticável uma padronização global dos termos. Contudo, a nível nacional, a criação de regulamentações e a formulação de políticas públicas podem facilitar essa padronização. No campo científico, a elucidação da definição de cada conceito, incluindo das diferentes tipologias da infraestrutura verde, pode mitigar os desafios impostos por essa diversidade terminológica e fomentar avanços no campo científico.

A principal limitação desta revisão está na utilização de apenas duas bases de dados (Web of Science e Scopus), o que pode resultar na sub-representação de estudos publicados em português ou em periódicos não indexados nessas plataformas.

## Referências

Abreu, R. C., Hallak, R., & da Rocha, H. R. (2022). Effects of local vegetation and regional controls in near-surface air temperature for Southeastern Brazil. *Atmosphere*, 13(11), 1758.



- Ahmed, Z., Le, H. P., & Shahzad, S. J. H. (2022). Toward environmental sustainability: how do urbanization, economic growth, and industrialization affect biocapacity in Brazil?. *Environment, Development and Sustainability*, 24(10), 11676-11696.
- Alavipanah, S., Haase, D., Lakes, T., & Qureshi, S. (2017). Integrating the third dimension into the concept of urban ecosystem services: A review. *Ecological indicators*, 72, 374-398.
- Alchapar, N. L., Pezzuto, C. C., Correa, E. N., & Chebel Labaki, L. (2016). The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, 130, 35-50.
- Andrade, A. C. (2022). Density of marmosets in highly urbanised areas and the positive effect of arboreous vegetation. *Urban Ecosystems*, 25(1), 101-109.
- Arthur, N., & Hack, J. (2022). A multiple scale, function, and type approach to determine and improve Green Infrastructure of urban watersheds. *Urban Forestry & Urban Greening*, 68, 127459.
- Bakhtsiyarava, M., Moran, M., Ju, Y., Zhou, Y., Rodriguez, D. A., Dronova, I., ... & Skaba, D. A. (2024). Potential drivers of urban green space availability in Latin American cities. *Nature Cities*, 1-11.
- Barbosa, V. R. F., Damasceno, R. M., Dias, M. A., Castelhana, F. J., Roig, H. L., & Requia, W. J. (2024). Ecosystem services provided by green areas and their implications for human health in Brazil. *Ecological Indicators*, 161, 111975.
- Battemarco, B. P., Veról, A. P., & Miguez, M. G. (2023). Methodological framework for quantitative assessment of urban development projects considering flood risks and city responses. *Urban Water Journal*, 20(10), 1695-1712.
- Brasil. (2012). *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012: Código Florestal*. Diário Oficial da União. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm)
- Bressane, A., dos Santos Galvão, A. L., Loureiro, A. I. S., Ferreira, M. E. G., Monstans, M. C., & de Castro Medeiros, L. C. (2024). Valuing Urban Green Spaces for Enhanced Public Health and Sustainability: A Study on Public Willingness-to-Pay in an Emerging Economy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 128386.
- Brito, C. N., & Rizzo, L. V. (2022). PM<sub>2.5</sub> removal by urban trees in areas with different forestry conditions in São Paulo using a big-leaf modeling approach. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)*, 57(4), 606-617.

- Camelo, R. S. D. S., Hüther, C. M., Pereira, C. R., Oliveira, E. D., & Machado, T. D. B. (2023). Effects and productive performance of urban agriculture on collective and environmental health in the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Ciência & Saúde Coletiva*, 28, 2015-2024.
- Castro, A. C. V., & Alvim, A. T. B. (2024). Sustainable Urbanization in Valley-Bottom Areas in Urban Settings: The Case of the Jaguaré Stream Basin, São Paulo, Brazil. *Sustainability*, 16(7), 3018.
- Cuchi, T., Bobrowski, R., Wężyk, P., Breunig, F. M., & Pesck, V. A. (2024). Contributions to a global understanding of socioenvironmental justice related to urban forest: Trends from Brazilian cities in the southeastern Paraná State. *Urban Forestry & Urban Greening*, 95, 128322.
- Czúcz, B., Arany, I., Potschin-Young, M., Bereczki, K., Kertész, M., Kiss, M., ... & Haines-Young, R. (2018). Where concepts meet the real world: A systematic review of ecosystem service indicators and their classification using CICES. *Ecosystem Services*, 29, 145-157.
- d'Acampora, B. H. A., Maraschin, C., & Taufemback, C. G. (2023). Landscape ecology and urban spatial configuration: Exploring a methodological relationship. Application in Pelotas, Brazil. *Ecological Modelling*, 486, 110530.
- Escobedo FJ, Giannico V, Jim CY, Sanesi G, Laforteza R (2019) Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: nexus or evolving metaphors? *Urban for Urban Green*, 37:3–12.
- European Commission. (2019). *Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Union.* URL (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0236&qid=1562053537296>)
- Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Mead, B. R., & Davies, J. A. C. (2022). Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure—a systematic review. *Ecosystem Services*, 54, 101405.
- Ferreira, L. M. R., Esteves, L. S., de Souza, E. P., & dos Santos, C. A. C. (2019). Impact of the urbanisation process in the availability of ecosystem services in a tropical ecotone area. *Ecosystems*, 22, 266-282.
- Flores, S., Van Mechelen, C., Vallejo, J. P., & Van Meerbeek, K. (2022). Trends and status of urban green and urban green research in Latin America. *Landscape and Urban Planning*, 227, 104536.

- Freitas, S. R., Tambosi, L. R., Ghilardi-Lopes, N. P., & de Souza Werneck, M. (2020). Spatial and temporal variation of potential resource availability provided by street trees in southeastern Brazil. *Urban Ecosystems*, 23(5), 1051-1062.
- Gomes, M. A. S. (2007). De largo a jardim: praças públicas no Brasil—algumas aproximações. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, 5(1), 101-120.
- Guo, J., Xu, Q., Zeng, Y., Liu, Z., & Zhu, X. X. (2023). 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*, 198, 1-15.
- Gurgatz, B. M., Carvalho-Oliveira, R., de Oliveira, D. C., Jucoski, E., Antoniaconi, G., do Nascimento Saldiva, P. H., & Reis, R. A. (2016). Atmospheric metal pollutants and environmental injustice: A methodological approach to environmental risk analysis using fuzzy logic and tree bark. *Ecological indicators*, 71, 428-437.
- Haines-Young, R., & Potschin-Young, M. (2018). Revision of the common international classification for ecosystem services (CICES V5. 1): a policy brief. *One Ecosystem*, 3, e27108.
- Herath, P., & Bai, X. (2024). Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: six current and emerging themes. *Sustainability Science*, 1-25.
- Jochner, S., Alves-Eigenheer, M., Menzel, A., & Morellato, L. P. C. (2013). Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions. *International journal of climatology*, 33(15).
- Juntti, M., Costa, H., & Nascimento, N. (2021). Urban environmental quality and wellbeing in the context of incomplete urbanisation in Brazil: Integrating directly experienced ecosystem services into planning. *Progress in Planning*, 143, 100433.
- Kasecker, T. P., Ramos-Neto, M. B., da Silva, J. M. C., & Scarano, F. R. (2017). Ecosystem-based adaptation to climate change: defining hotspot municipalities for policy design and implementation in Brazil. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 23, 981-993.
- Lee, H., & Lautenbach, S. (2016). A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 66, 340-351.

- Li, Y., Svenning, J. C., Zhou, W., Zhu, K., Abrams, J. F., Lenton, T. M., ... & Xu, C. (2024). Green spaces provide substantial but unequal urban cooling globally. *Nature Communications*, 15(1), 7108.
- Lima-Passos, J., Araujo, A. C., & Machado, C. G. (2024). Plant–hummingbird interaction networks in an urban area: a generalist species as the protagonist in mutualistic and agonistic interactions. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 1-11.
- Ma, Y., Yang, J. (2025). A review of methods for quantifying urban ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*. 253, 105215.
- Macedo, J., & Haddad, M. A. (2016). Equitable distribution of open space: Using spatial analysis to evaluate urban parks in Curitiba, Brazil. *Environment and planning B: planning and design*, 43(6), 1096-1117.
- Machado, R. A., Oliveira, A. G., & Lois-González, R. C. (2019). Urban ecological infrastructure: The importance of vegetation cover in the control of floods and landslides in Salvador/Bahia, Brazil. *Land use policy*, 89, 104180.
- Maropo, V. L. B., Morais, E. E., Nunes, A. C., & Silveira, J. A. R. D. (2019). Planejamento urbano sustentável: um estudo para implantação de infraestrutura verde no Bairro Bancários, João Pessoa-PB, Brasil. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11, e20180005.
- Martini, A., & Biondi, D. (2022). Planejamento da arborização urbana. In M. M. Souza (Coord.), *Arborização urbana: Considerações sobre planejamento, implementação, manejo e gestão* (pp. 101–160). Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)
- Martini, A., Biondi, D., & Batista, A. C. (2018). A influência das diferentes tipologias de floresta urbana no microclima do entorno imediato. *Ciência Florestal*, 28, 997-1007.
- Martini, A., Biondi, D., & Carlos Batista, A. (2020). The influence of street trees on urban microclimate. *Floresta*, 50(3).
- McMahon, E. T., & Benedict, M. A. (2000). Green infrastructure. *Planning Commissioners Journal*, 37(4), 4-7.
- MEA – Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press. Retrieved from <http://www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.html>
- Medeiros, N. S. A., do Carmo, D. L., Priore, S. E., Santos, R. H. S., & Pinto, C. A. (2019). Food security and edible plant cultivation in the urban gardens of socially

- disadvantaged families in the municipality of Viçosa, Minas Gerais, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 1171-1184.
- Miguez, M. G., Raupp, I. P., & Veról, A. P. (2019). *An integrated quantitative framework to support design of resilient alternatives to manage urban flood risks. J. Flood Risk Manag.* 12.
- Oliveira, M. T., Silva, J. L., Cruz-Neto, O., Borges, L. A., Girao, L. C., Tabarelli, M., & Lopes, A. V. (2020). Urban green areas retain just a small fraction of tree reproductive diversity of the Atlantic forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 54, 126779.
- Orlandin, E., & Carneiro, E. (2021). Classes of protection in urban forest fragments are ineffective in structuring butterfly assemblages: landscape and forest structure are far better predictors. *Urban Ecosystems*, 24(5), 873-884.
- Parron, L. M., Fidalgo, E. C. C., Luz, A. P., Campanha, M. M., Turetta, A. P. D., Pedreira, B. C. C. G., & Prado, R. B. (2019). Pesquisa sobre serviços ecossistêmicos no Brasil: uma revisão sistemática. *Revista Ambiente & Água*, 14, e2263.
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., ... & Yagi, N. (2017). Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current opinion in environmental sustainability*, 26, 7-16.
- Pena, J. C., da Costa, N. R., Martello, F., & Ribeiro, M. C. (2024). The street tree distribution across a streetscape reflects the social inequality of Latin American cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128156.
- R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ribeiro, A. P., Bollmann, H. A., De Oliveira, A., Rakauskas, F., Cortese, T. T. P., Rodrigues, M. S. C., ... & Ferreira, M. L. (2023). The role of tree landscape to reduce effects of urban heat islands: A study in two Brazilian cities. *Trees*, 37(1), 17-30.
- Ribeiro, F. P., & Ribeiro, K. T. (2016). Participative mapping of cultural ecosystem services in Pedra Branca State Park, Brazil. *Natureza & Conservação*, 14(2), 120-127.
- Rocha, M.F, Nucci, J.C. (2019). Cobertura vegetal na região central das capitais brasileiras. *GEOgraphia*, 21(45), 70-85.

- Rolo, D. A. D. M., Gallardo, A. L. C. F., Ribeiro, A. P., & Siqueira-Gay, J. (2022). Local society perception on ecosystem services as an adaptation strategy in urban stream recovery programs in the city of São Paulo, Brazil. *Environmental Management*, 69(4), 684-698.
- Sant'Anna Neto, A., Lana, A. Q., Lucas, F. M. F., Ucella-Filho, J. G. M., Polizel, J. L., da Silva Filho, D. F., ... & Dias Júnior, A. F. (2023). Using a novel green index to support ecosystem services in a megacity. *Forests*, 14(9), 1705.
- Sazima, I., & Sazima, M. (2022). Two in one: the little bat that pollinates and disperses plants at an urban site in Southeastern Brazil. *Biota Neotropica*, 22, e20211290.
- Sekulova, F., Anguelovski, I., Kiss, B., Kotsila, P., Baró, F., Palgan, Y. V., & Connolly, J. (2021). The governance of nature-based solutions in the city at the intersection of justice and equity. *Cities*, 112, 103136.
- Silva, J. M. C., & Prasad, S. (2019). Green and socioeconomic infrastructures in the Brazilian Amazon: implications for a changing climate. *Climate and Development*, 11(2), 153-166.
- Silva, P. A., Cherutte, A. G., Gomes, A. C. S., Silva, L. L., Brito, L., Rodrigues, B. M., & Maruyama, P. K. (2023). The ecological role and potential impact of an alien tree highly attractive to native nectar-feeding birds in urban areas. *Urban Ecosystems*, 26(4), 1029-1040.
- Silveira, M. C., Silveira, M., Medeiros, L. S., & Aguiar, L. M. (2024). The role of feeding roosts in seed dispersal service bats provide in urban areas. *Biotropica*, 56(2), e13291.
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1962). The comparison of dendrograms by objective methods. *Taxon*, 33-40.
- Sukhdev, P., Wittmer, H., Schröter-Schlaack, C., Nesshöver, C., Bishop, J., ten Brink, P., ... & Simmons, B. (2010). *The economics of ecosystems and biodiversity: mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. UNEP, Geneva Switzerland.
- Taylor, L., & Hochuli, D. F. (2017). Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines. *Landscape and urban planning*, 158, 25-38.
- UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme. (2024). *World cities report 2024: Cities and climate action*. UN-Habitat. [https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024\\_-\\_full\\_report.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024_-_full_report.pdf)

- Viezzer, J., & Biondi, D. (2021). The influence of urban, socio-economic, and environmental aspects on COVID-19 cases, deaths and mortality: A multi-city case in the Atlantic Forest, Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102859.
- Wang, J., & Banzhaf, E. (2018). Towards a better understanding of Green Infrastructure: A critical review. *Ecological Indicators*, 85, 758-772.
- Wilkinson, S., & Feitosa, R. C. (2015). Retrofitting housing with lightweight green roof technology in Sydney, Australia, and Rio de Janeiro, Brazil. *Sustainability*, 7(1), 1081-1098.
- World Bank. (2024). *Poverty & Equity Brief - Latin America & the Caribbean: Brazil*. Disponível em < <https://pip.worldbank.org/country-profiles/BRA>>. Acesso em: 09 set. 2024.
- Ying, J., Zhang, X., Zhang, Y., & Bilan, S. (2022). Green infrastructure: Systematic literature review. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 35(1), 343-366.
- Zari, MP. (2019). Devising urban biodiversity habitat provision goals: Ecosystem services analysis. *Forests*, 10(5), 391.

## **Capítulo 2. Interações entre serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social na infraestrutura verde urbana do Sul Global: estudo de caso em Belo Horizonte, Brasil**

**Resumo:** As interações entre serviços ecossistêmicos fornecidos pela infraestrutura verde e a vulnerabilidade social em cidades do Sul Global ainda são pouco exploradas. Este estudo analisa padrões espaciais e interações entre cinco serviços ecossistêmicos (promoção da saúde e lazer, suporte à biodiversidade, regulação da temperatura, de poluentes atmosféricos e do fluxo de água) e um indicador de vulnerabilidade social em Belo Horizonte, Brasil. A metodologia combinou o mapeamento de indicadores socioambientais e a aplicação do Índice de Moran Bivariado (global e local) para identificar correlações espaciais. A análise multiescalar (100 m a 2 km) indicou 250 m como a resolução mais adequada para as análises de correlação espacial. Os resultados não indicaram correlação espacial em escala global, mas a análise local revelou padrões de sinergias e compensações significativos. Identificou-se um padrão centro-periferia: as áreas centrais, menos vulneráveis, apresentaram sinergias de baixa vulnerabilidade e baixo provimento de serviços de regulação e suporte, enquanto as áreas periféricas, mais vulneráveis, forneceram mais serviços de suporte à biodiversidade em detrimento dos serviços culturais. Foram observadas sinergias Alto-Alto entre a vulnerabilidade social e a demanda por serviços de lazer, apontando para uma distribuição desigual dos serviços e reforçando padrões de injustiça ambiental. Esta pesquisa apresenta a primeira análise de correlação espacial local entre múltiplos serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social para uma cidade brasileira. Os resultados destacam especificidades de uma cidade do Sul Global e oferecem subsídios para o planejamento de infraestruturas verdes multifuncionais para a promoção da resiliência urbana e a equidade socioambiental.

**Palavras-chave:** Justiça ambiental; Correlação espacial; Soluções baseadas na natureza; Planejamento urbano; Belo Horizonte.

**Abstract:** Interactions between ecosystem services provided by green infrastructure and social vulnerability in cities of the Global South remain understudied. This study analyzes spatial patterns and interactions between five ecosystem services — health and recreation, biodiversity support, temperature regulation, air pollution control, and water flow regulation — and a social vulnerability indicator in Belo Horizonte, Brazil. The methodology combined the mapping of socio-environmental indicators with the application of Bivariate Moran's I (global and local) to identify spatial correlations. A



multiscale analysis (100 m to 2 km) indicated 250 m as the most appropriate resolution for spatial correlation assessments. While no significant global correlations were found, the local analysis revealed significant patterns of synergies and trade-offs. A center–periphery pattern was identified: central areas, with lower vulnerability, showed synergies of low vulnerability and low provision of regulating and supporting services, whereas peripheral areas, with higher vulnerability, provided greater biodiversity support services at the expense of cultural services. High–High synergies were observed between social vulnerability and the demand for recreational services, highlighting an unequal distribution of ecosystem services and reinforcing environmental injustice. This research presents the first local spatial correlation analysis between multiple ecosystem services and social vulnerability in a Brazilian city. The findings highlight the specific dynamics of a Global South metropolis and provide spatial evidence to inform the planning of multifunctional green infrastructure to promote urban resilience and socio-environmental equity.

**Keywords:** Environmental justice; Spatial correlation; Nature-based solutions; Urban planning; Belo Horizonte.

## Introdução

A rápida urbanização dos ecossistemas e as emergências climáticas têm desencadeado uma busca por medidas adaptativas que reduzam seus impactos sobre os sistemas urbanos (Herath; Bai, 2024). Nesse cenário, a infraestrutura verde tem ganhado destaque pelo seu potencial de ofertar múltiplos serviços ecossistêmicos, fortalecendo a resiliência e a capacidade adaptativa das cidades frente aos desafios contemporâneos (Herath; Bai, 2024). O reconhecimento desse potencial tem contribuído para o crescimento significativo das publicações científicas na área (Escobedo et al., 2019; Herath; Bai, 2024).

A infraestrutura verde é definida pela European Commission (2015) como uma rede de áreas naturais e seminaturais projetadas e/ou manejadas para fornecer uma diversidade de serviços ecossistêmicos. Ela engloba elementos como parques, praças, corredores ecológicos, remanescentes florestais, jardins, quintais, árvores de rua, telhados verdes, vegetação ripária, zonas úmidas e ecossistemas aquáticos. Os serviços ecossistêmicos associados a esses elementos são categorizados conforme suas funções ecológicas e as formas pelas quais são apreciados, consumidos e mensurados (Escobedo

et al., 2019; Zhang; MacKenzie, 2024). Diante da complexidade em quantificar, mapear e valorar esses serviços, diversas metodologias foram desenvolvidas para organizá-los, entre as quais a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES) se destaca pelo detalhamento e pela estrutura hierárquica que oferece (Czucz et al., 2018; Haines-Young; Potschin, 2018).

Nos últimos anos, as pesquisas voltadas à otimização dos benefícios da infraestrutura verde têm ressaltado a importância de compreender as interações entre diferentes serviços ecossistêmicos, bem como suas relações com indicadores de vulnerabilidade social (Lee; Lautenbach, 2016; Berrouet et al., 2019; Zheng et al., 2020; Karimi et al., 2021; Chen et al., 2022; Yuan et al., 2023). Essas interações podem ocorrer de forma sinérgica ou antagônica, influenciando a provisão simultânea de múltiplos serviços ou a resposta conjunta a fenômenos socioambientais (Chen et al., 2021; Zhang; MacKenzie, 2024). Ferramentas estatísticas, especialmente medidas de correlação espacial, têm sido frequentemente empregadas para identificar e classificar essas relações (Raudsepp-Hearne et al., 2010; Zhang et al., 2020; Yuan et al., 2023).

Apesar do avanço do campo, a literatura evidencia que pesquisas sobre serviços ecossistêmicos urbanos ainda são predominantemente produzidas no Norte Global, mesmo diante do crescente interesse em cidades do Sul Global (Dobbs et al., 2019; Alizadeh; Prasad, 2023). Essas cidades apresentam contextos políticos, ecológicos e socioambientais distintos, frequentemente marcados por altos níveis de biodiversidade, ocorrência de hotspots de conservação, expansão urbana acelerada, assentamentos informais, desigualdades socioeconômicas e múltiplas expressões de injustiça ambiental (Barau et al., 2015; Dobbs et al., 2019; Escobedo et al., 2019; Pena et al., 2024). Zhang e MacKenzie (2024) destacam que, embora o Sul Global apresente grande potencial para a implementação de infraestrutura verde e enfrente desafios significativos relacionados à urbanização, os estudos que investigam interações entre serviços ecossistêmicos nessas regiões ainda são limitados.

Diante dessas lacunas, este estudo investiga o padrão espacial e as interações entre cinco serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde e a vulnerabilidade social na cidade de Belo Horizonte, Brasil. Capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte enfrenta, assim como outras cidades brasileiras, graves desastres climáticos e socioambientais. A ocupação desordenada, aliada ao relevo acidentado, às políticas urbanas conservadoras e ao elevado grau de impermeabilização do solo, favorece a ocorrência recorrente de inundações (Sousa; Gonçalves, 2018). Em 2023, a cidade foi a

capital brasileira mais impactada pelo aumento das temperaturas (Cemaden, 2024). Nesse contexto, os objetivos desta pesquisa foram: (1) mapear e identificar o padrão espacial dos serviços ecossistêmicos e da vulnerabilidade social em uma cidade do Sul Global; (2) analisar as interações entre os serviços ecossistêmicos e a vulnerabilidade social, considerando as particularidades do contexto urbano; e (3) demonstrar como esses resultados podem subsidiar o desenvolvimento de estratégias de planejamento ambiental adaptadas à realidade local.

## **Material e métodos**

### *Estudo de caso*

A área de estudo é a cidade de Belo Horizonte, Brasil (19°55'9" S; 43°56'19" O), localizada no estado de Minas Gerais, na região sudeste do país (Figura 5). Com extensão territorial de 331,54 km<sup>2</sup> e 2,32 milhões de habitantes, é a sexta cidade mais populosa do Brasil (IBGE, 2022). Belo Horizonte é dividida em nove regiões administrativa, com diferentes características socioeconômicas e ambientais (Figura 5). O clima é o subtropical úmido (Cwa, de acordo com a classificação de Köppen), com média de temperatura de 22,1 °C e precipitação de 1600 mm ao longo do ano (INMET, 2022). A vegetação é típica de zonas de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, dois *hotspots* de biodiversidade (IBGE, 2019). A cidade está inserida em um contexto geomorfológico regional com altitudes elevadas, variando entre 684 e 1504 m (Figura 5, IDE-Sisema, 2023). A morfologia apresenta as mais variadas feições, tais como planícies aluviais, vales encaixados, morros, serras e colinas com diversas orientações (Assis, 2010). A hidrografia é composta por cursos d'água pertencentes a quatro bacias hidrográficas (Ribeirão do Arrudas, Ribeirão do Isidoro, Ribeirão da Onça e Rio das Velhas) (Figura 5, PBH, 2022).

A cidade apresenta uma estrutura sócio-ocupacional com características típicas de uma metrópole brasileira (Andrade et al., 2015). O crescimento urbano do município seguiu o padrão monocêntrico, com intensa concentração de serviços e infraestrutura na região central (Cerqueira; Diniz, 2022). O rápido crescimento populacional nas primeiras décadas do século XX levou à urbanização desordenada das zonas suburbanas e periféricas (Costa; Arguelhes, 2008).

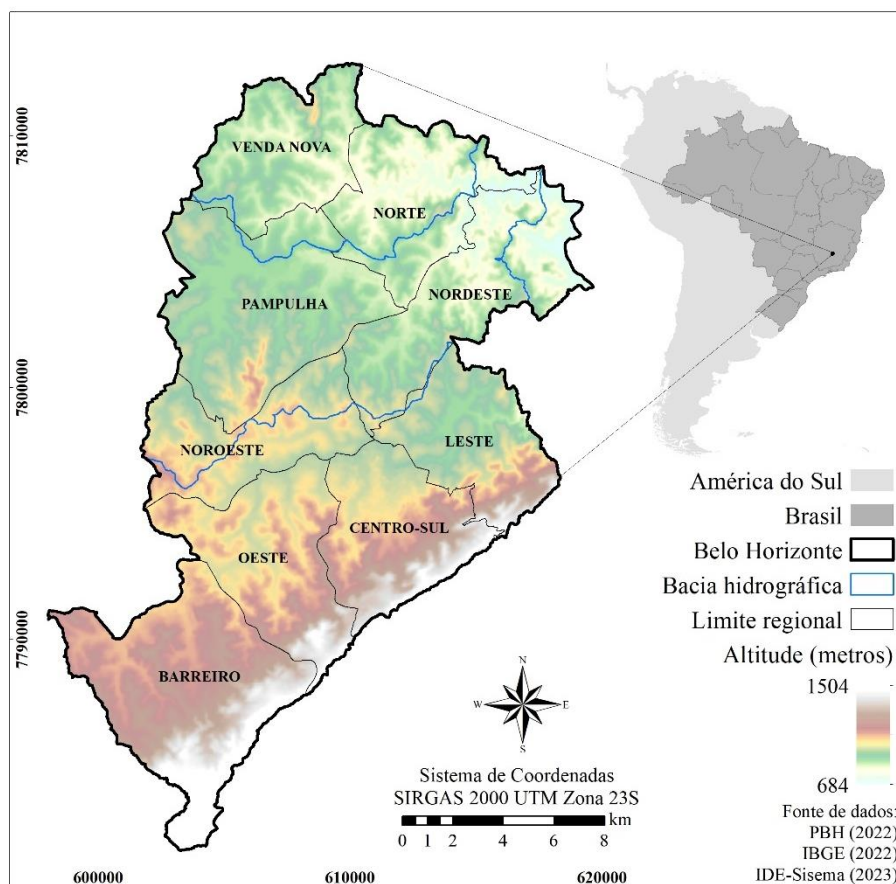


Figura 5: Mapa de localização de Belo Horizonte, Brasil

### *Características socioambientais*

Foram consideradas como características socioambientais cinco serviços ecossistêmicos relacionados às infraestruturas verdes e a vulnerabilidade social, e para cada característica foi escolhido um indicador para análise. As características, respectivos indicadores e justificativa de escolha são descritos abaixo. Já o cálculo de cada indicador é dado na próxima seção.

- i) **Característica:** serviço de promoção à saúde, recreação e lazer (Cult).

**Indicador:** acessibilidade as áreas verdes públicas (AVPs).

**Justificativa:** as AVPs contribuem para a integridade ecológica das cidades e desempenham um papel importante na proteção da saúde, na recreação e coesão social das populações urbanas (Wolch et al., 2014; Kronenberg et al., 2020).

- ii) **Característica:** serviço de manutenção e suporte da biodiversidade (Bio).

**Indicador:** conectividade ecológica.

**Justificativa:** a conectividade é essencial para a manutenção das funções ecológicas de uma paisagem, influenciando o grau de movimentação dos organismos, ao mesmo tempo em que potencializa funções de outros serviços ecossistêmicos. (Casalegno et al., 2017; Shi et al., 2021). Nas cidades, a perda de biodiversidade e a fragmentação das manchas de vegetação afetam as estruturas e funções da infraestrutura verde (Wang et al., 2018; Zhang et al., 2019).

- iii) **Característica:** serviço de regulação da temperatura e da umidade (Temp).

**Indicador:** Temperatura da Superfície Terrestre (*Land Surface Temperature* – LST).

**Justificativa:** a infraestrutura verde é uma estratégia eficaz para mitigar o desconforto térmico, regulando o microclima por meio de sombreamento e evapotranspiração (Balany et al., 2021). Para proporcionar este serviço, são necessárias estratégias de melhoria, da qualidade e da distribuição de áreas vegetadas, principalmente em locais com alta densidade populacional e/ou concentração pessoas em situação de vulnerabilidade (Ribeiro et al., 2021).

- iv) **Característica:** serviço de regulação de poluentes atmosféricos(Atm).

**Indicador:** material particulado com diâmetro menor que 2,5  $\mu\text{m}$  (MP).

**Justificativa:** A poluição do ar representa um grande desafio global, agravando problemas ambientais e de saúde pública (Ferreira et al., 2024). A má qualidade do ar associada a níveis elevados de partículas inaláveis finas (diâmetro menor que 2,5  $\mu\text{m}$ ) é um dos cinco maiores riscos para a saúde em todo o mundo (Daellenbach et al., 2020; Chen et al., 2022; CONAMA, 2024). Se bem planejada, a vegetação urbana atenua a poluição do ar, promovendo ambientes com maior qualidade habitacional e ambiental (Ferreira et al., 2024).

- v) **Característica:** serviço de regulação do fluxo d'água (Água).

**Indicador:** associação entre manchas de inundação e arranjo da vegetação para bacias hidrográficas

**Justificativa:** As inundações são um desafio contínuo para muitos municípios, sendo os desastres socioambientais mais frequentes no Brasil

(Santos et al., 2023). Estudos mostram que diferentes configurações de áreas vegetadas, em uma bacia hidrográfica, influenciam na magnitude e no impacto das inundações (Fry e Maxwell, 2017; Yang e Lee, 2021). Yang e Lee (2021) demonstraram que arranjos dispersos de manchas de vegetação são mais eficazes na redução do escoamento de águas pluviais.

vi) **Característica:** vulnerabilidade social (Vuln).

**Indicador:** Índice de Vulnerabilidade Social (IVS)

**Justificativa:** Os grupos sociais mais pobres e marginalizados são os mais susceptíveis aos extremos climáticos e desastres socioambientais. Esta realidade é mais evidente nos países em desenvolvimento, onde a infraestrutura e os recursos financeiros para apoiar pessoas em situação de vulnerabilidade são, em muitos casos, insuficientes (Otto et al., 2017). O desenvolvimento da infraestrutura verde em áreas socialmente vulneráveis aumenta a resiliência das populações frente a esses problemas, ao mesmo tempo em que promove a equidade no acesso aos serviços ecossistêmicos. A vulnerabilidade social é uma medida tanto da sensibilidade de uma população aos desastres como da sua capacidade de responder e recuperar dos seus impactos (Cutter; Finch, 2008).

#### *Fonte e processamento de dados*

1) Mapa de uso e ocupação do solo (LULC, do inglês *Land Use and Land Cover*), de resolução espacial de 10 m e com distinção entre os compartimentos corpos de água, vegetação arbórea, vegetação não arbórea, área construída, solo exposto e área sombreada (Figura 6b). Este mapa foi produzido usando o classificador Random Forest, com 500 árvores de decisão (Breiman, 2001) e dados do Sentinel-2 L2A obtidos em 23 de setembro de 2023. Todo processamento foi realizado no sistema de informação geográfica QGIS 3.22.3 (QGIS Development Team, 2022). As bandas utilizadas na classificação foram a azul (B2), verde (B3), vermelho (B4), borda vermelha (B5, B6, B7, B8A), infravermelho próximo (B8) e infravermelho de ondas curtas (B11 e B12), além do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) dado por  $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$ . Todas as bandas possuem correção para efeitos atmosféricos e foram reamostradas para 10 m pelo método do vizinho mais próximo. Para o treinamento do algoritmo de classificação foram selecionadas entre 40 e 60 polígonos de amostra de cada compartimento da cena usando

fotointerpretação das imagens de alta resolução do Google Earth e composições falsa cor da imagem do Sentinel-2. O mapa teve uma acurácia global de 94,0% calculadas usando 2.671 pontos distribuídos aleatoriamente sobre a área de estudo.

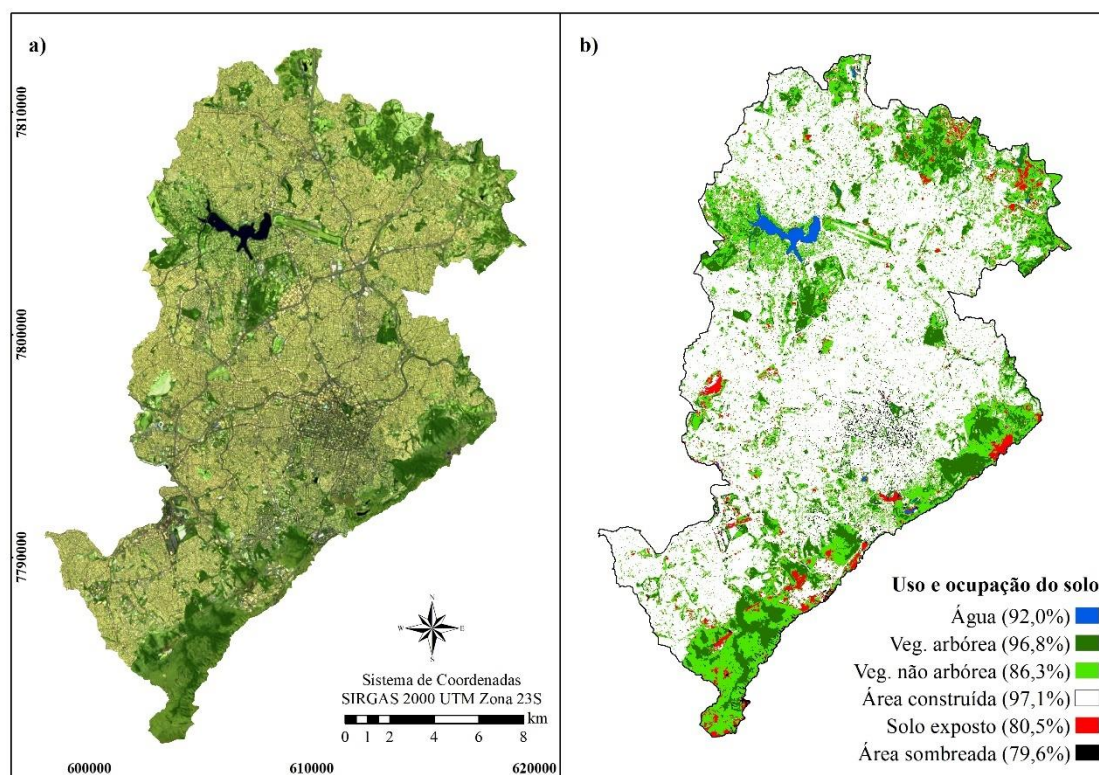


Figura 6: a) Composição RGB (falsa-cor) da imagem Sentinel-2 L2A utilizada no processo de classificação do uso e ocupação do solo.; b) Mapa de uso e ocupação do solo de Belo Horizonte, Brasil e a acurácia do usuário (em parêntesis)

2) Mapa do serviço de promoção à saúde, recreação e lazer tendo como indicador acessibilidade a AVPs foi produzido pela combinação das camadas vetoriais do sistema viário, praças, parques, unidades de conservação e outras áreas verdes de Belo Horizonte. Estes dados vetoriais foram obtidos do repositório oficial da Prefeitura de Belo Horizonte (<https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo>). Considerou-se como AVPs os espaços públicos com área  $\geq 400 \text{ m}^2$ , com presença de vegetação e mobiliário urbano. A Portaria nº 0023/2013 define regras para o acesso de algumas AVPs em Belo Horizonte (PBH, 2013). Todas as AVPs que não possuem acesso ao público foram excluídas. A acessibilidade a AVPs empregou o método de distância de caminhada (*walkability distance*). Este método considera que a proximidade entre as pessoas e as áreas verdes, em uma distância de caminhada predefinida, influencia diretamente na utilização dessas áreas pelos indivíduos (UN-Habitat, 2018). A distância de caminhada é determinada pelo tamanho da AVP (Tabela 2-1, Monteiro; 2015, UN-Habitat; 2018). As zonas com acessibilidade foram

delimitadas utilizando análise de rede e agrupadas para identificar os locais onde a população possui ou não acesso as AVP. As zonas de acessibilidade foram convertidas para formato raster com resolução espacial de 10 m.

Tabela 2-1: Classificação das áreas verdes públicas conforme o tamanho e acessibilidade para a população

<b>Porte AVP</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Distância de caminhada (m)</b>	<b>Nº de AVP</b>
Pequeno	$400 \leq \text{AVP} < 4.000$	400 <sup>a</sup>	402
Médio	$4.000 \leq \text{AVP} < 100.000$	800 <sup>a</sup>	107
Grande	$\text{AVP} \geq 100.000$	1.000 <sup>b</sup>	16

<sup>a</sup> UN-Habitat (2018); <sup>b</sup> Monteiro (2015); AVP: Área verde pública

(3) Mapa do serviço de manutenção e suporte da biodiversidade espacializa o indicador de conectividade ecológica. A conectividade ecológica foi mensurada a partir da camada de vegetação arbórea, extraída do mapa de LULC (Figura 6b). Como não existe uma espécie alvo neste estudo, foi pressuposto que a vegetação arbórea em áreas urbanas abriga uma variedade de espécies, e a conectividade entre essa classe promove a conectividade ecológica. A representação em hexágonos é mais eficiente que a quadricular na construção e representação da vizinhança mais próxima, movimento ou conectividade (Birch et al., 2017). Assim, a área de estudo foi dividida em células hexagonais com lados de 500 metros (Rusche et al., 2019). Para mitigar o impacto do efeito de borda, foi aplicado um buffer de 20 metros em cada hexágono (Zhang et al., 2019). O índice de coesão de manchas (COHESION) foi calculado para cada célula utilizando o plugin LecoS - Landscape Ecology Statistics do QGis. O COHESION é uma métrica que avalia a conectividade física e a coesão (aproximação) das manchas de uma classe LULC específica, sendo também um indicador de sua conectividade funcional. A efetividade do COHESION como indicador de conectividade funcional foi estudada por Zhang et al. (2019).

(4) Mapa do serviço de regulação da temperatura e da umidade foi produzido a partir da recuperação da LST (Apêndice Figura 1d). O algoritmo de canal único, proposto por Jiménez-Muñoz e Sobrino (2003) foi o método de recuperação empregado. Este método utiliza uma única banda do infravermelho termal (TIR) para recuperar a LST. Baseando-se em informações atmosféricas e de uso/cobertura do solo, o método estabelece uma relação entre a radiação detectada na TIR e a temperatura de superfície (Cristóbal et al., 2018). Para essa análise, as bandas do vermelho (B4, Apêndice Figura 1a), infravermelho próximo (B5, Apêndice Figura 1b) e termal (B10, Apêndice Figura 1c) de imagens do Landsat-8, capturadas em 22 de setembro de 2023 (data próxima a um dos dias mais quentes registrados na história de Belo Horizonte), com 0,81% de cobertura



de nuvens foram selecionadas. Os dados climáticos da superfície terrestre (temperatura e umidade relativa do ar) referentes ao dia e horário de obtenção da cena do Landsat-8 foram extraídos da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

(5) O mapa de MP foi derivado do inventário de emissões veiculares de Belo Horizonte (FEAM, 2023; Pinto et al., 2021). Neste inventário foram distribuídos 248 pontos amostrais pelo município para estimar a emissão de MP (g/km/dia). As médias das emissões obtidas por Pinto et al. (2021) foram interpoladas usando o inverso da distância ao quadrado para gerar o mapa de regulação de poluentes atmosféricos. Não foram detectadas evidências de isotropia na distribuição espacial das emissões.

(6) O risco de inundação foi derivado de dados do repositório oficial da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2016; 2022), além das camadas de vegetação arbórea e não arbórea, extraídas do mapa de LULC (Figura 5). As bacias hidrográficas elementares foram classificadas quanto à presença ou ausência de áreas de risco de inundação. As bacias hidrográficas com áreas com risco de inundação foram agrupadas conforme a similaridade de sua configuração vegetal, partindo-se do pressuposto de que essa estrutura espacial modula a magnitude e o impacto das inundações. As métricas utilizadas foram a porcentagem da paisagem com vegetação (PLAND) e o índice de agregação da vegetação (AI). O método k-médias foi empregado para identificar os agrupamentos das bacias com relação a essas duas métricas. O número de agrupamentos, foi determinado pelo utilizando o método do cotovelo, Apêndice Figura 2 (Bholowalia; Kumar, 2014).

(7) O mapa de IVS é calculado a partir de dezesseis indicadores analíticos estruturados em três dimensões: infraestrutura urbana, capital humano e renda e trabalho (Costa; Marguti, 2015), e reflete a capacidade de uma população de responder e recuperar de desastres socioambientais (Cutter; Finch, 2008). O IVS, é um índice calculado pelo IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, e neste estudo foi especializado para as 277 Unidades de Desenvolvimento Humano (UDHs) de Belo Horizonte. As UDHs são zonas mais homogêneas, do ponto de vista das condições socioeconômicas (Costa; Marguti, 2015). O IVS varia de 0 a 1, onde valores mais próximos de 1 indicam maior vulnerabilidade social.

### *Análise de dados*

#### Padrão espacial dos serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social

Os padrões espaciais dos indicadores dos serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde e da vulnerabilidade social foram analisados no software ArcGIS

(www.esri.com). Para cada indicador foi gerado um mapa coroplético com resolução espacial de 10 metros. Para os indicadores quantitativos (Bio, Temp, Atm), foram calculadas estatísticas descritivas, enquanto os indicadores categóricos (Cult, Agua, Vuln) foram analisados por meio de uma descrição espacial detalhada. Além disso, a relação entre os padrões espaciais dos indicadores e as classes de uso e ocupação do solo foi avaliada para identificar possíveis tendências espaciais.

### Interações entre os serviços ecossistêmicos e a vulnerabilidade social

A autocorrelação espacial é um fenômeno que descreve o grau de dependência espacial de uma variável, ou seja, a relação entre os valores observados em diferentes locais geográficos. Esse conceito implica que elementos situados próximos tendem a apresentar características mais similares entre si do que aqueles mais distantes, refletindo padrões espaciais na distribuição dos dados (Shi et al., 2022). Assim, a posição geográfica influencia fortemente a dinâmica e magnitude de diversos fenômenos. Os índices I de Moran e c de Geary são as estatísticas comumente utilizadas para medir e testar a autocorrelação espacial (Lin, 2022). Como extensão desses índices, a correlação espacial bivariada foi desenvolvida para quantificar a relação espacial entre duas variáveis distintas. Essa estatística avalia em que medida os valores de uma variável em uma determinada localização estão correlacionados com os valores de outra variável em locais vizinhos (Anselin, 2019).

Conforme destacado por Lee e Lautenbach (2016), os testes de correlação espacial são ferramentas valiosas na investigação sobre interações entre serviços ecossistêmicos. Neste estudo, utilizou-se o I de Moran Bivariado como teste para examinar a correlação espacial entre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde e vulnerabilidade social em Belo Horizonte. O I de Moran Bivariado pode ser decomposto em duas abordagens: Global (Equação 1) e Local (Equação 2).

$$I_B = \frac{\sum_i (x_i \sum_j w_{ij} y_j)}{\sum_i x_i^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$I_i^B = x_i \sum_j w_{ij} y_j \quad \text{Equação 2}$$

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{k_i}, & \text{se } j \text{ é vizinho de } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{Equação 3}$$

A estatística Global ( $I_B$ ) quantifica a correlação espacial entre duas variáveis em um mesmo local do espaço. Na Equação 1,  $x_i$  representa a variável de referência observada no local  $i$ ;  $y_j$  representa a variável associada observada nos locais vizinhos  $j$ ; e  $w_{ij}$  é o peso espacial que define a influência do local  $j$  sobre o local  $i$  (Equação 3), onde  $k_i$  é o número de vizinhos de  $i$  (Bivand et al., 2013; Bivand, 2022). Quanto maior o valor de  $I_B$ , mais forte é a correlação espacial. Valores próximos de zero indicam ausência de padrão espacial evidente na relação entre as variáveis (He et al., 2022).

Como a correlação espacial pode variar ao longo da área de estudo, exibindo valores positivas em determinadas regiões e negativos em outras, a variabilidade espacial foi capturada pela estatística Local. Na Equação 2, o índice  $I_i^B$  mede a correlação espacial entre o valor da variável  $x_i$  no local  $i$  e a soma ponderada dos valores da variável  $y_j$  nos locais vizinhos  $j$ , conforme definido pelos pesos espaciais  $w_{ij}$  (He et al., 2022). O I de Moran Local classifica os padrões espaciais em cinco categorias:

**Alto-Alto (AA):** ocorre quando um local  $i$  apresenta um valor elevado da variável  $x$ , e seus vizinhos  $j$  também possuem valores altos da variável  $y$ , sugerindo uma sinergia entre as variáveis.

**Alto-Baixo (AB):** caracteriza um local  $i$  com um valor alto da variável  $x$ , cercado por vizinhos  $j$  com valores baixos da variável  $y$ , indicando compensações entre as variáveis.

**Baixo-Alto (BA):** representa um local  $i$  com um valor baixo da variável  $x$ , rodeado por vizinhos  $j$  com valores elevados da variável  $y$ , sugerindo uma interação de compensação.

**Baixo-Baixo (BB):** ocorre quando um local  $i$  apresenta um valor baixo da variável  $x$ , e seus vizinhos  $j$  também possuem valores baixos da variável  $y$ , evidenciando sinergia.

**Não Significativo (ns):** refere-se a locais  $i$  em que a relação entre a variável  $x$  e seus vizinhos  $j$  para a variável  $y$  não é estatisticamente significativa, indicando ausência de padrões espaciais consistentes.

O  $I_B$  e o  $I_i^B$  foram calculados com um nível de confiança de 95%. O ambiente R Core Team (2024) foi utilizado para o processamento dos dados. O pacote *spdep – Spatial Dependence: Weighting Schemes, Statistics* (Bivand et al., 2013; Bivand, 2022) foi utilizado para calcular ambos os índices. Adotou-se a matriz de pesos espaciais do tipo rainha (*queen*), que considera como vizinhança, todas as áreas (células) que fazem

fronteira como a célula em análise, incluindo os vértices. A significância estatística foi calculada com 500 simulações de permutação aleatória.

#### Problema de unidade de área modificável

Estudos que analisaram interações entre serviços ecossistêmicos socioambientais e outros indicadores socioambientais, empregando análises espaciais, adotaram resoluções de 250 m × 250 m (He et al., 2022), 500 m x 500 m (Li et al., 2022), 1 km x 1 km (Zheng et al., 2020), 10 km x 10 km (Chen et al., 2022), além de escalas baseadas em sub-bacias hidrográficas (Yuan et al., 2023) e escalas geográficas mais amplas, como bairros e cidades (Raudsepp-Hearne et al., 2010; Zheng et al., 2020). Zheng et al. (2020) compararam a escala de 1 km x 1 km com a escala a nível de distrito e observaram que os serviços ecossistêmicos apresentavam diferentes níveis de sinergia para cada escala, enquanto as compensações eram mais evidentes em escalas menores. Deng et al. (2024) avaliou o impacto do problema de unidade de área modificável (modified area unit problem, MAUP) em diferentes escalas utilizando indicadores urbano-ambientais e encontrou que o grau de correlação espacial diminuiu conforme aumentava o nível de agregação dos dados.

Na etapa anterior, a resolução dos indicadores foi definida como 10 m x 10 m, o que possibilitou uma análise detalhada dos padrões espaciais de cada indicador, bem como do uso e ocupação do solo. No entanto, essa resolução não foi viável devido à elevada demanda computacional necessária para o processamento dos dados. Assim, baseado resolução utilizada em outros estudos, o  $I_B$  foi calculado para diferentes resoluções (100 m x 100 m, 250 m x 250 m, 500 m x 500 m, 1 km x 1 km e 2 km x 2 km), a fim de compreender os impactos de diferentes resoluções no valor do índice e determinar a escala mais adequada para análise das interações entre os serviços ecossistêmicos e a vulnerabilidade social.

## **Resultados**

### *Padrão espacial dos serviços ecossistêmicos e da vulnerabilidade social*

A análise do padrão espacial do serviço ecossistêmico de promoção à saúde, recreação e lazer evidencia que Belo Horizonte possui 525 AVP acessíveis à população, totalizando 24,10 km<sup>2</sup> (7,28% do território), além de uma lagoa com 2,69 km<sup>2</sup> (0,81%), cuja orla é utilizada para atividades recreativas (Figura 7 a). Essas áreas geram uma zona

de acessibilidade de 175,28 km<sup>2</sup> (52,92%), indicando que esse serviço ecossistêmico está disponível em aproximadamente metade da área municipal. Nessa zona, a população residente encontra pelo menos uma AVP dentro das distâncias de caminhada estabelecidas na Tabela 2-1. As regionais Centro-Sul e Pampulha, com 96 e 84 AVPs, respectivamente (Figura 7a, Figura 5), apresentam as maiores proporções de área acessível. Em contraste, as zonas sem cobertura desse serviço somam 129,12 km<sup>2</sup> (38,99%) e, embora dispersas pelo território, concentram-se sobretudo na regional Norte (Figura 7a, Figura 5), onde a oferta de oportunidades para saúde, recreação e lazer é mais restrita.

O padrão espacial do serviço ecossistêmico de manutenção e suporte à biodiversidade revela que Belo Horizonte possui 36,30 km<sup>2</sup> de cobertura arbórea distribuídos em 8979 manchas (Figura 7 b). O COHESION municipal foi de 9,66, enquanto os hexágonos que compõem a área de estudo apresentaram valores variando de 3,39 a 9,77, com média de  $8,35 \pm 1,12$ . Esses resultados indicam que a vegetação arbórea mantém boa conectividade em diferentes regiões da cidade, favorecendo o serviço de manutenção e suporte da biodiversidade. A conectividade ecológica exibe um padrão periférico-central, caracterizado por maior continuidade arbórea nas bordas do município e menor conectividade na região central.

O serviço ecossistêmico de regulação da temperatura e umidade, representado pela LST, apresentou ampla variação espacial, com média de  $33,04 \pm 2,80$  °C (Figura 7 c). As áreas construídas e com solo exposto exibiram as temperaturas mais elevadas apresentando temperaturas de até 12,05 °C acima da média (Apêndice Figura 3). Em contraste, áreas classificadas como vegetação e corpos de água registraram temperaturas até 10,77 °C inferiores à média (Apêndice Figura 3), demonstrando sua contribuição efetiva para a regulação microclimática.

O indicador do serviço ecossistêmico de regulação de poluentes atmosféricos, estimado por meio das emissões de MP, apresentou média municipal de  $514,15 \pm 187,80$  g/km/dia (Figura 7 d). As emissões variaram consideravelmente entre as regionais administrativas, com Barreiro, Nordeste e Norte constituindo as áreas mais impactadas, todas com médias superiores a 650 g/km/dia (Figura 7d, Figura 5). Os valores extremos ( $\geq 1500$  g/km/dia) foram registrados nas zonas mais urbanizadas, próximo as principais vias do município e do aeroporto.

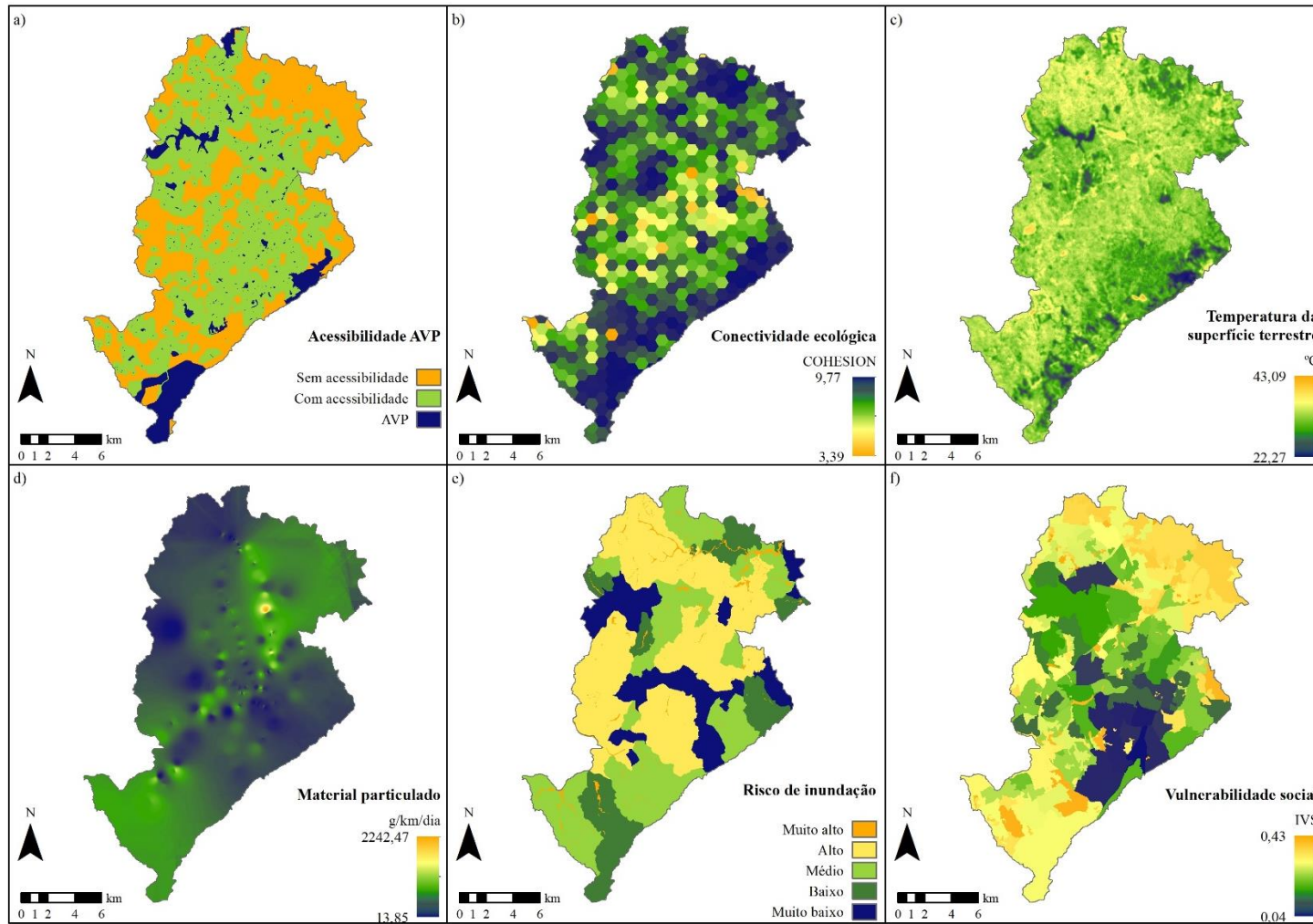


Figura 7: Mapas coropléticos das características socioambientais: a) Promoção de saúde, recreação e lazer; b) Manutenção e suporte a biodiversidade; c) Regulação da temperatura e umidade; d) Regulação de poluentes atmosféricos; e) Regulação do fluxo de água; f) Vulnerabilidade social. Áreas em laranja representam locais com menores disponibilidade do indicador do serviço ecossistêmico, enquanto áreas em azul representam locais com maiores disponibilidade

O padrão espacial do serviço de regulação do fluxo de água indica que Belo Horizonte possui 99 bacias hidrográficas elementares, com PLAND médio de  $31,68 \pm 24,30$  e AI médio de  $83,68 \pm 9,54$  (Figura 7 e). Dentre essas, 67 apresentam áreas classificadas como de risco de inundação. A análise da variação dos dados demonstrou que a redução na soma dos quadrados das distâncias estabiliza a partir da definição de três agrupamentos (Apêndice Figura 2), razão pela qual as bacias hidrográficas com áreas de risco foram categorizadas em três grupos (Apêndice Figura 4). A partir desses agrupamentos, o risco de inundação foi organizado em cinco classes: (1) Muito alto: áreas diretamente classificadas como de risco de inundação; (2) Alto: bacias do agrupamento 1, com PLAND médio de  $12,23 \pm 5,60$  e AI médio de  $75,37 \pm 6,84$ ; (3) Médio: bacias do agrupamento 2, com PLAND médio de  $38,22 \pm 8,86$  e AI médio de  $89,11 \pm 2,98$ ; (4) Baixo: bacias do agrupamento 3, caracterizadas por PLAND médio de  $68,11 \pm 10,17$  e AI médio de  $94,99 \pm 1,95$ ; e (5) Muito baixo: bacias hidrográficas que não apresentam áreas de risco de inundação.

O indicador de vulnerabilidade social (IVS) apresentou valor médio de  $0,27 \pm 0,10$  para Belo Horizonte (Figura 7f). Em escala regional, Barreiro registrou o maior IVS (0,32), sendo classificada como área de vulnerabilidade social média, enquanto a regional Centro-Sul apresentou o menor valor (0,16), configurando-se como a única com vulnerabilidade muito baixa (Figura 7f, Figura 5). As UDHs com vulnerabilidade social alta ( $IVS > 0,40$ ) distribuíram-se por diversas regiões do município, com maior concentração em Venda Nova, Nordeste, Oeste e Barreiro (Figura 7f, Figura 5). Em contraste, as UDHs de vulnerabilidade muito baixa ( $IVS < 0,20$ ) localizaram-se predominantemente na área central, principalmente nas regionais Centro-Sul e Pampulha (Figura 7f, Figura 5).

#### *Sinergias e compensações entre os serviços ecossistêmicos e a vulnerabilidade social*

O  $I_B$  variou para as diferentes combinações de características e resoluções espaciais e (Figura 8). Em geral, os valores foram baixos em magnitude, variando entre -0.13 e 0.3, aproximadamente, indicando ausência de padrão espacial (p-valor  $< 0.05$  para todos os índices calculados). Até a resolução de 250 m houve pouca variação dos índices, e a partir dessa resolução, o índice de correlação espacial se tornou errático indicando efeito da agregação dos dados (MAUP). A resolução de 250 m foi selecionada como ideal para o cálculo do índice de correlação local.

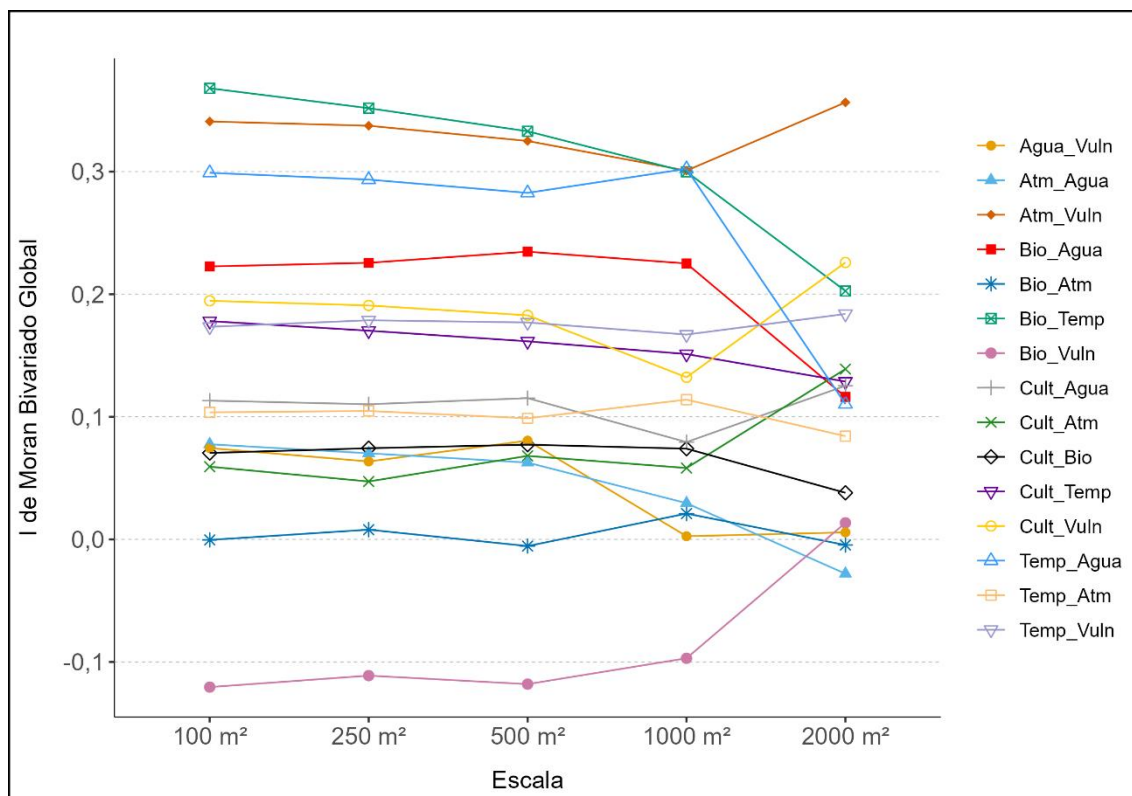


Figura 8: I de Moran Bivariado Global em diferentes escalas. Regulação do fluxo de água (Agua); Regulação de poluentes atmosféricos (Atm); Manutenção e suporte a biodiversidade (Bio); Promoção à saúde, recreação e lazer (Cult); Regulação da temperatura e umidade (Temp); Vulnerabilidade social (Vuln)

Os resultados do  $I_B$ , com resolução de 250 m x 250 m, indicaram ausência de correlação espacial significativa. Ou seja, a nível de cidade não foi identificado uma interação clara entre os indicadores de serviços ecossistêmicos.

O  $I_l^B$  revelou sinergias e compensações entre os serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social em Belo Horizonte. A Figura 9 apresenta os mapas dos índices destacando a distribuição espacial dessas interações. Daqui em diante será utilizado o sistema de siglas para indicar as interações entre as características, p.ex., Cult\_Bio indica a interação de promoção à saúde, recreação e lazer com manutenção e suporte a biodiversidade.

As interações Cult\_Bio, Cult\_Temp e Bio\_Temp mostraram diversos agrupamentos do tipo AA e BB indicando sinergia entre os valores. Para essas três interações são agrupamentos do tipo BB se concentram em áreas periféricas no extremo sul, sudeste e leste. A interação Cult\_Bio teve agrupamentos AA principalmente na região central do município, enquanto grandes áreas com agrupamentos AB ocorreram no extremo norte, nordeste e leste. Bio\_Temp apresentaram sinergias do tipo AA na direção noroeste do município.





Figura 9: I de Moran Local das interações entre os serviços ecossistêmicos. Promoção de saúde, recreação e lazer (Cult); Manutenção e suporte a biodiversidade (Bio); Regulação da temperatura e umidade (Temp); Regulação de poluentes atmosféricos (Atm); Regulação do fluxo de água (Agua); Vulnerabilidade social (Vuln); Alto-Alto (AA); Alto-Baixo (AB); Baixo-Alto (BA); Baixo-Baixo (BB); não significativo (ns)

Cult\_Atm, Bio\_Atm, Temp\_Atm destacam-se por apresentarem interações significativas nas mesmas áreas do município. Essas interações se caracterizam pela proximidade entre grandes agrupamentos de sinergia e compensação. A formação desses agrupamentos auxilia na identificação dos fatores que influencia a variação das interações nesses locais. Para as características Bio, Cult, e Temp os agrupamentos ocorrem predominantemente em áreas onde o indicador Atm apresenta valores homogêneos, sugerindo que a variação nas interações é influenciada principalmente pela distribuição espacial dos serviços Cult, Bio e Temp.

Todas as interações que incluíram a variável Vulnerabilidade Social (Vuln) teve grandes agrupamentos sinérgicos do tipo BB na região central do município, indicando maior oferta e/ou menor demanda de serviços ecossistêmicos nas áreas menos vulneráveis. Cult\_Vuln e Atm\_Vuln exibiram um grande agrupamento do tipo AA no extremo norte e agrupamentos menores da mesma categoria ao sul, refletindo a desigualdades socioambientais no provimento destes serviços ecossistêmicos (Cult e Atm).

## **Discussão**

### *Padrões espaciais dos serviços ecossistêmicos*

A análise do padrão espacial evidenciou que áreas com maior disponibilidade de serviços ecossistêmicos que promovem saúde, recreação e lazer estão mais concentradas em regiões mais urbanizadas e com menor vulnerabilidade social. Além disso, a quantidade e configuração da vegetação nas áreas centrais comprometem os serviços de manutenção e suporte a biodiversidade.

As áreas centrais exibem os melhores indicadores de vulnerabilidade social, enquanto os indicadores são piores nas áreas periféricas, onde concentram as maiores manchas de vegetação e escassez de infraestrutura urbana. Como inúmeras cidades do Sul Global, Belo Horizonte teve o crescimento urbano condicionado a fatores “desenvolvimentistas”, como consumo excessivo de recursos, industrialização, produção massiva de resíduos e poluentes (Costa; Arguelhes, 2008; Andrade et al., 2015; Barau et al., 2015; Rigolon et al., 2018). Somado a esse histórico, desafios relacionados ao “subdesenvolvimento”, como pobreza, carência de infraestrutura e planejamento adequado, resultam em impactos negativos, principalmente, para as populações em maior vulnerabilidade social (Veron, 2010; Rigolon et al., 2018; Hernández et al., 2024).

*Sinergias e compensações entre os serviços ecossistêmicos e a vulnerabilidade social*

A resolução espacial de 250 m foi identificada como a mais eficiente para representar a correlação espacial por preservar os padrões estruturais identificados em resoluções mais finas (100 m). He et al. (2022) adotou a mesma resolução em suas análises de correlação espacial. Além disso, essa resolução facilita a integração com dados provenientes de outros sensores remotos populares, como o MODIS, minimizando perdas associadas à reamostragem dos dados.

A análise de autocorrelação espacial local identificou quatro tipos de agrupamentos entre serviços ecossistêmicos e a vulnerabilidade social em Belo Horizonte, que são: Alto-Alto, Alto-Baixo, Baixo-Alto e Baixo-Baixo. A identificação desses padrões é fundamental, pois evidencia como a oferta de serviços ecossistêmicos e as condições sociais se distribuem no território, permitindo orientar intervenções em infraestrutura verde de forma mais precisa e contextualizada. Estudos têm demonstrado que a espacialização das interações socioambientais é um instrumento eficaz para revelar desigualdades urbanas e direcionar políticas de justiça ambiental, principalmente em cidades brasileiras, onde a distribuição de áreas verdes e os níveis de vulnerabilidade tendem a ser desiguais (Silva et al., 2023).

Em Belo Horizonte, na regional Venda Nova, ocorrem grandes agrupamentos de sinergias do tipo Alto-Alto entre os serviços ecossistêmicos de regulação (temperatura, fluxo de água e manutenção e suporte a biodiversidade) e vulnerabilidade social. Esse padrão indica que existe uma demanda ambiental-ecológica em uma região em que uma parcela significativa da população possui capacidade reduzida de enfrentar ou recuperar-se de impactos relacionados a eventos climáticos extremos ou a problemas urbanos recorrentes. Dessa forma, intervenções nessas áreas podem gerar benefícios ambientais e sociais simultaneamente, reforçando a multifuncionalidade da infraestrutura verde.

Em contrapartida, a regional Centro-Sul concentra os menores índices de vulnerabilidade social e apresenta predominantemente agrupamentos do tipo Baixo-Baixo, com exceção do serviço ecossistêmico de manutenção e suporte à biodiversidade. Esse padrão indica que, embora existam elementos da infraestrutura verde nessa área, sua funcionalidade ecológica pode ser aprimorada. Dessa forma, as estratégias de gestão devem priorizar o fortalecimento da conectividade entre os fragmentos vegetados e a melhoria do desempenho ecológico desses elementos, de modo a potencializar os serviços ecossistêmicos ofertados.

As regionais Norte, Nordeste e Barreiro apresentam agrupamentos do tipo Alto-Baixo entre os serviços ecossistêmicos de promoção da saúde, recreação e lazer e o serviço de manutenção e suporte à biodiversidade (Cult\_Bio), além de agrupamentos do tipo Baixo-Alto entre manutenção e suporte à biodiversidade e vulnerabilidade social (Bio\_Vuln). Esse padrão indica que, embora os elementos da infraestrutura verde nessas áreas estejam relativamente conectados e desempenhem funções importantes de regulação e suporte ecológico, eles não oferecem, na mesma proporção, espaços destinados ao lazer, recreação e fortalecimento da coesão social, principalmente para as populações mais vulneráveis. Outros estudos também relatam injustiças ambientais, principalmente na oferta de serviços culturais para populações vulneráveis, conforme observado por Kekana et al. (2023) em Joanesburgo e Hernández et al. (2024) em Bogotá. Bahrini et al. (2017), ao analisar a distribuição de áreas verdes em Teerã (Irã), apontam que indicadores globais de vegetação podem distorcer a percepção de equidade no acesso a áreas verdes, pois muitas dessas áreas não são acessíveis para uso recreativo.

O padrão das intarações ente manutenção e suporte à biodiversidade e vulnerabilidade social (Bio\_Vuln) contrasta com padrões observados em cidades do Norte Global, particularmente nos Estados Unidos, onde grupos socialmente vulneráveis tendem a se concentrar nas áreas centrais, enquanto populações de maior renda ocupam regiões com maior extensão de vegetação e maior conectividade ecológica (Rigolon et al.; 2018).

A análise autocorrelação espacial local revelou uma heterogeneidade intraurbana, capturando padrões locais de associação espacial que não foram identificados pela estatística global. Essa heterogeneidade já foi observada em estudos realizados em outras cidades (Zhang et al., 2018, Shie et al., 2022, Yuan et al., 2023), nos quais a autocorrelação espacial local permitiu identificar *hotspots* socioambientais e orientar ações de planejamento urbano voltadas ao aumento da resiliência, à promoção da sustentabilidade e à redução de desigualdades territoriais. De forma semelhante, os resultados encontrados neste estudo podem subsidiar políticas públicas voltadas à sustentabilidade em Belo Horizonte, como o Plano Municipal de Arborização Urbana, além de apoiar estratégias para tornar o município mais resiliente e inclusivo, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

As interações não significativas entre os serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social a nível global pode estar relacionado ao problema da unidade de área modificável, ocasionada pela escala espacial adotada. A dependência espacial entre variáveis

socioambientais pode ser mascarada por diferenças nas unidades espaciais utilizadas nas análises (Deng et al., 2024). Embora tenha sido realizado testes para selecionar a melhor unidade espacial, este estudo não aprofundou a relação entre a escala espacial e as interações analisadas. Recomenda-se a realização de novos estudos que explorem essa relação, a fim de capturar fenômenos e nuances que podem não ter sido identificados nesta pesquisa. He et al. (2022) alertam que as estatísticas globais podem indicar erroneamente que não existe relação entre os dados, embora possa haver uma forte correlação em diferentes partes da área de estudo. Esse fenômeno foi observado no presente trabalho, no qual o Índice de Moran Bivariado Local revelou padrões espaciais significativos de agrupamento.

### **Considerações finais**

Este estudo possivelmente representa uma das primeiras análises das interações entre características ecossistêmicas e vulnerabilidade social no contexto da infraestrutura verde em uma cidade brasileira, revelando padrões de morfologia urbana bem definidos. As regiões com alta densidade de construção têm pouca vegetação; as áreas centrais fornecem os maiores serviços culturais, fruto de planejamento; e as zonas periféricas, embora socialmente vulneráveis, são as maiores fornecedoras de serviços de suporte à biodiversidade.

A análise de correlação espacial local mostra-se um método eficiente para capturar as dinâmicas entre as características ecossistêmicas e de vulnerabilidade social. Para complementar estes achados, pesquisas futuras precisam investigar as interações entre outros serviços ecossistêmicos, principalmente serviços de provisão e culturais. Compreender a dinâmica multifuncional da infraestrutura é fundamental para transformá-la em um instrumento eficaz de adaptação e resiliência, principalmente em cidades de profunda desigualdade como as do Brasil.

### **Referências**

Alizadeh, T., & Prasad, D. (2023). The right to the smart city in the Global South: A research agenda. *Urban Studies*, 61(3), 426-444.

- Andrade, L. T., Mendonça, J. G., & Diniz, A. M. A. (2015). *Belo Horizonte: Transformações na ordem urbana*. Letra Capital/Observatório das Metrópoles/Belo Horizonte, PUC-Minas.
- Anselin, L. (2019). *Global Spatial Autocorrelation: Bivariate, Differential and EB Rate Moran Scatter Plot*. GeoDa - An Introduction to Spatial Data Science. Disponível em: [https://geodacenter.github.io/workbook/5b\\_global\\_adv/lab5b.html](https://geodacenter.github.io/workbook/5b_global_adv/lab5b.html)
- Assis, W. L. (2010). *O Sistema Clima Urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espaço* (Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais). Belo Horizonte.
- Bahrini, F., Bell, S., & Mokhtarzadeh, S. (2017). The relationship between the distribution and use patterns of parks and their spatial accessibility at the city level: A case study from Tehran, Iran. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 332-342.
- Balany, F., Ng, A. W. M., Muttill, N., Muthukumaran, S., & Wong, M. S. (2020). Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. *Water*, 12(12), 3577.
- Barau, A. S., Maconachie, R., Ludin, A. N. M., & Abdulhamid, A. (2015). Urban morphology dynamics and environmental change in Kano, Nigeria. *Land Use Policy*, 42, 307-317.
- Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Botero, V. (2019). A social vulnerability index to changes in ecosystem services provision at local scale: A methodological approach. *Environmental Science & Policy*, 93, 158-171.
- Bholowalia, P., & Kumar, A. (2014). EBK-means: A clustering technique based on elbow method and k-means in WSN. *International Journal of Computer Applications*, 105(9).
- Birch, C. P., Oom, S. P., & Beecham, J. A. (2007). Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological Modelling*, 206(3-4), 347-359.
- Bivand R., Pebesma E., Gómez-Rubio V. (2013). *Applied spatial data analysis with R*, Second edition. Springer, NY. <https://asdar-book.org/>
- Bivand, R. (2022). *R Packages for Analyzing Spatial Data: A Comparative Case Study with Areal Data*. *Geographical Analysis*, 54(3), 488-518. doi:10.1111/gean.12319.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.

- Casalegno, S., Anderson, K., Cox, D. T., Hancock, S., & Gaston, K. J. (2017). Ecological connectivity in the three-dimensional urban green volume using waveform airborne lidar. *Scientific Reports*, 7(1), 45571.
- Cemaden - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2024). Avaliação de temperaturas extremas combinadas com a seca no Brasil no ano de 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/o-ano-de-2023-foi-marcado-por-temperaturas-e-secas-extremas-aponta-estudo-do-cemaden-1>
- Cerqueira, E. D. V., & Diniz, A. M. A. (2022). Identifying centers and subcenters in the metropolitan region of Belo Horizonte through Google Places of interest. *Mercator (Fortaleza)*, 21, e21012.
- Chen, S., Li, G., Zhuo, Y., Xu, Z., Ye, Y., Thorn, J. P., & Marchant, R. (2022). Trade-offs and synergies of ecosystem services in the Yangtze River Delta, China: Response to urbanizing variation. *Urban Ecosystems*, 25(1), 313-328.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2024). *Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024: Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação*. Diário Oficial da União, 130(1), 133.
- Costa, A. C. S., & Arguelhes, D. O. (2008). A higienização social através do planejamento urbano de Belo Horizonte nos primeiros anos do século XX. *Universitas Humanas*, 5(1).
- Costa, M. A., & Marguti, B. (Orgs.). (2015). *Atlas da vulnerabilidade social nas regiões metropolitanas brasileiras*. Ipea.
- Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D., & Sobrino, J. A. (2018). An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band. *Remote Sensing*, 10(3), 431.
- Cutter, S. L., & Finch, C. (2008). Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(7), 2301-2306.
- Czúcz, B., Arany, I., Potschin-Young, M., Bereczki, K., Kertész, M., Kiss, M., Aszalós, R., Haines-Young, R. (2018). Where concepts meet the real world: A systematic review of ecosystem service indicators and their classification using CICES. *Ecosystem Services*, 29, 145-157.

- Daellenbach, K. R., Uzu, G., Jiang, J., Cassagnes, L. E., Leni, Z., Vlachou, A., ... & Prévôt, A. S. (2020). Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature*, 587(7834), 414-419.
- Deng, H., Liu, K., & Feng, J. (2024). Understanding the impact of modifiable areal unit problem on urban vitality and its built environment factors. *Geo-Spatial Information Science*, 1-17.
- Dobbs, C., Escobedo, F. J., Clerici, N., de la Barrera, F., Eleuterio, A. A., MacGregor-Fors, I., ... Hernández, H. J. (2019). Urban ecosystem services in Latin America: Mismatch between global concepts and regional realities?. *Urban Ecosystems*, 22, 173-187.
- Escobedo, F. J., Giannico, V., Jim, C. Y., Sanesi, G., & Laforteza, R. (2019). Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors?. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 3-12.
- European Commission. (2015). *Nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the Horizon 2020 Expert Group on nature-based solutions & re-naturing cities*.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. (2023). *Emissões pontuais e por área de Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Material Particulado (MP) em Belo Horizonte (ano-base 2019)*. 57 p. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/cac0a154-76c9-479d-acb1-304832d609d0>
- Ferreira, M. L., Ribeiro, A. P., Rakauskas, F., Bollamann, H. A., Theophilo, C. Y. S., Moreira, E. G., ... & Laforteza, R. (2024). Spatiotemporal monitoring of subtropical urban forests in mitigating air pollution: Policy implications for nature-based solutions. *Ecological Indicators*, 158, 111386.
- Fry, T. J., & Maxwell, R. M. (2017). Evaluation of distributed BMPs in an urban watershed—High resolution modeling for stormwater management. *Hydrological Processes*, 31(15), 2700-2712.
- Guo, J., Xu, Q., Zeng, Y., Liu, Z., & Zhu, X. X. (2023). 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*, 198, 1-15.
- Haines-Young, R., & Potschin, M. B. (2018). *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure*.



- He, B., Hu, J., Liu, K., Xue, J., Ning, L., & Fan, J. (2022). Exploring park visit variability using cell phone data in Shenzhen, China. *Remote Sensing*, 14(3), 499.
- Herath, P., & Bai, X. (2024). Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: Six current and emerging themes. *Sustainability Science*, 1-25.
- Hernández, J. R. E., Moghadam, S. T., & Lombardi, P. (2024). Urban sustainability in social housing environments: A spatial impact assessment in Bogotá, Colombia. *Cities*, 154, 105392.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019). *Bioma: Belo Horizonte*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Cidades: Belo Horizonte*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>
- IDE-Sisema. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. (2023). *Altimetria (Modelo Digital de Elevação - MDE)*. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/e2544c02-65f3-4380-b78e-76606f08653b>
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). *Banco de Dados Meteorológicos*. <https://bdmep.inmet.gov.br/>
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
- Joly, C. A., Scarano, F. R., Seixas, C. S., Metzger, J. P., Ometto, J. P., Bustamante, M. M. C., Padgurschi, M. C. G., Pires, A. P. F., Castro, P. F. D., Gadda, T., Toledo, P. (Orgs.). (2019). *1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade & Serviços Ecossistêmicos*. Editora Cubo.
- Karimi, J. D., Corstanje, R., & Harris, J. A. (2021). Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: Trade-offs and synergies in urban landscapes. *Landscape Ecology*, 36(6), 1817-1835.
- Kekana, H. N., Ruhiiga, T. M., Ndou, N. N., & Palamuleni, L. G. (2023). Environmental justice in South Africa: the dilemma of informal settlement residents. *GeoJournal*, 88(4), 3709-3725.
- Kronenberg, J., Haase, A., Łaszkiwicz, E., Antal, A., Baravikova, A., Biernacka, M., ... & Onose, D. A. (2020). Environmental justice in the context of urban green space

- availability, accessibility, and attractiveness in postsocialist cities. *Cities*, 106, 102862.
- Lee, H., & Lautenbach, S. (2016). A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 66, 340-351.
- Li, L., Tang, H., Lei, J., & Song, X. (2022). Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park. *Ecological Indicators*, 137, 108727.
- Lin, J. (2022). Comparison of Moran's I and Geary's C in multivariate spatial pattern analysis. *Geographical Analysis*, 55(4), 685-702.
- Otto, I. M., Reckien, D., Reyer, C. P., Marcus, R., Le Masson, V., Jones, L., ... & Serdeczny, O. (2017). Social vulnerability to climate change: A review of concepts and evidence. *Regional Environmental Change*, 17, 1651-1662.
- PBH – Prefeitura de Belo Horizonte. (2013). *Portaria nº 0023/2013: Dispõe sobre normas de conduta e regras de utilização pública dos parques administrados pela Fundação de Parques Municipais*.
- PBH – Prefeitura de Belo Horizonte. (2016). *BHGeo: Área de Risco de Inundação Belo Horizonte*. Disponível em: <https://geonetwork.pbh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search>
- PBH – Prefeitura de Belo Horizonte. (2022). *BHGeo: Bacias Hidrográficas de Belo Horizonte*. Disponível em: <https://geonetwork.pbh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search>
- Pena, J. C., Costa, N. R., Martello, F., & Ribeiro, M. C. (2024). The street tree distribution across a streetscape reflects the social inequality of Latin American cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128156.
- Pinto, J. A., Kumar, P., Alonso, M. F., Andreão, W. L., Pedruzzi, R., Ibarra-Espinosa, S., ... & de Almeida Albuquerque, T. T. (2021). Coupled models using radar network database to assess vehicular emissions in current and future scenarios. *Science of the Total Environment*, 761, 143207.
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.R-project.org/>
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G. D., & Bennett, E. M. (2010). Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(11), 5242-5247.

- Ribeiro, A. P., Bollmann, H. A., De Oliveira, A., Rakauskas, F., Cortese, T. T. P., Rodrigues, M. S. C., ... & Ferreira, M. L. (2021). The role of tree landscape to reduce effects of urban heat islands: A study in two Brazilian cities. *Trees*, 1-14.
- Rigolon, A., Browning, M. H., Lee, K., & Shin, S. (2018). Access to urban green space in cities of the Global South: A systematic literature review. *Urban Science*, 2(3), 67.
- Rusche, K., Reimer, M., & Stichmann, R. (2019). Mapping and assessing green infrastructure connectivity in European city regions. *Landscape and Urban Planning*, 184, 34-49.
- Santos, T. G., Ventorini, S. E., & Zacharias, A. A. (2023). Cartografia de síntese e as escalas horizontais e verticais da paisagem: Estudo sobre suscetibilidade às inundações e alagamentos em Lavras-MG. *Revista do Departamento de Geografia*, 43, e198663.
- Shi, F., Zhou, B., Zhou, H., Zhang, H., Li, H., Li, R., ... & Gao, X. (2022). Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in the Huangshui River basin at the grid scale. *Plants*, 11(17), 2294.
- Shi, X., Qin, M., Li, B., Zhang, D. (2021). A framework for optimizing green infrastructure networks based on landscape connectivity and ecosystem services. *Sustainability*, 13(18), 10053.
- Silva, R. G. P., Lima, C. L., & Saito, C. H. (2023). Urban green spaces and social vulnerability in Brazilian metropolitan regions: Towards environmental justice. *Land use policy*, 129, 106638.
- Sousa, R. E. S., & Gonçalves, G. F. G. (2018). Um estudo sobre os impactos decorrentes de inundações no município de Belo Horizonte. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 7(3), 591-605.
- UN-Habitat. (2018). *SDG Indicator 11.7.1 Training Module: Public Space*. United Nations Human Settlements Programme. Disponível em: [https://unhabitat.org/sites/default/files/2019/02/Indicator-11.7.1-Training-Module\\_Public-spaces\\_Jan\\_2019.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2019/02/Indicator-11.7.1-Training-Module_Public-spaces_Jan_2019.pdf)
- UN-Habitat. (2024). *World Cities Report 2024: Cities and Climate Action*. United Nations Human Settlements Programme. Disponível em: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789211065602/read>

- Wang, Y. C., Shen, J. K., Xiang, W. N. (2018). Ecosystem service of green infrastructure for adaptation to urban growth: function and configuration. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(5), 132-143.
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning*, 125, 234-244.
- Wong, W. S. D., & Lee, J. (2005). *Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ArcGIS*. Wiley.
- World Bank. (2024). *Poverty & Equity Brief - Latin America & the Caribbean: Brazil*. Disponível em: <https://pip.worldbank.org/country-profiles/BRA>. Acesso em: 09 set. 2024.
- Yang, B., & Lee, D. (2021). Urban green space arrangement for an optimal landscape planning strategy for runoff reduction. *Land*, 10(9), 897.
- Yuan, Y., Bai, Z., Zhang, J., & Huang, Y. (2023). Investigating the trade-offs between the supply and demand for ecosystem services for regional spatial management. *Journal of Environmental Management*, 325, 116591.
- Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, G., & Chen, Y. (2018). On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China. *Science of the total environment*, 637, 780-790.
- Zhang, B., & MacKenzie, A. (2024). Trade-offs and synergies in urban green infrastructure: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 128262.
- Zhang, Z., Liu, Y., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2020). What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective?. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120454.
- Zhang, Z., Meerow, S., Newell, J. P., & Lindquist, M. (2019). Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 305-317.
- Zheng, D., Wang, Y., Hao, S., Xu, W., Lv, L., & Yu, S. (2020). Spatial-temporal variation and tradeoffs/synergies analysis on multiple ecosystem services: A case study in the Three-River Headwaters region of China. *Ecological Indicators*, 116, 106494.

### Capítulo 3. Diferentes cenários de governança aplicados à modelagem espacial de infraestrutura verde: uma perspectiva de estudo em Belo Horizonte, Brasil

**Resumo:** The management of green infrastructure in urban areas faces limitations related to governance and data availability, requiring decision-support tools that are reliable, adaptable, and evidence-based. This study develops a spatial model to guide green infrastructure management in Brazilian cities and examines how different governance scenarios influence the definition of territorial priorities. Applied to the city of Belo Horizonte, the model integrates five ecosystem services (health promotion, biodiversity support, temperature regulation, air pollution mitigation, and water flow regulation) with a social vulnerability indicator. Component weights were defined according to three governance scenarios: C1) equal importance among components; C2) expert judgment from Brazilian specialists, based on the Analytic Hierarchy Process (AHP); and C3) a focus on climate resilience. The AHP results show that specialists collectively prioritized social vulnerability and water-flow regulation, reflecting urgent socio-environmental challenges in the country. However, the high variability in individual judgments ( $CV > 60\%$ ) produced a balanced and weakly hierarchical final weighting, not supporting the hypothesis that specialists with different profiles would generate distinct prioritizations. The equal-weights scenario (C1) produced a spatial prioritization nearly identical to the expert-based scenario (C2) ( $R^2 = 0.995$ ), contradicting the hypothesis of convergence between C2 and the climate-resilience scenario (C3). The strong correlation between C1 and C2 indicates that the model is robust and applicable in contexts with limited resources for expert consultation. Overall, the findings suggest that approaches balancing the provision of ecosystem services and social justice should be prioritized to guide public policies for adaptation and resilience in Brazilian cities. **Palavras-chave:** Infraestrutura verde; Serviços ecossistêmicos; Governança urbana; Análise multicritério; Sul Global.

**Abstract:** Green infrastructure planning in Global South cities faces constraints related to governance structures and data availability, highlighting the need for adaptable, evidence-based decision-support tools. This study develops a spatial model to guide green infrastructure planning in Brazilian cities and examines how different governance scenarios influence spatial prioritization. The model, applied to the city of Belo Horizonte, integrates five ecosystem services—health promotion, biodiversity support, temperature regulation, air pollution mitigation, and water flow regulation—with a social

vulnerability indicator. Component weights were defined according to three governance scenarios: C1) equal weighting of components; C2) expert judgment from Brazilian specialists, using the Analytic Hierarchy Process (AHP); and C3) a focus on climate resilience. AHP results show that experts collectively prioritized social vulnerability and water flow regulation, reflecting pressing socio-environmental challenges in the country. However, high variability among individual judgments ( $CV > 60\%$ ) led to a balanced and weakly hierarchical final weighting, contradicting the hypothesis that expert profiles would result in divergent priorities. The equal-weight scenario (C1) produced spatial priorities nearly identical to those of the expert-based scenario (C2) ( $R^2 = 0.995$ ), countering the expectation that C2 would align more closely with the climate resilience scenario (C3). The strong correlation between C1 and C2 indicates that the model is robust and suitable for contexts with limited resources for expert consultation. Findings suggest that approaches balancing ecosystem service provision and social equity should be prioritized in urban adaptation and resilience policymaking in Brazilian cities.

**Keywords:** Green infrastructure; Ecosystem services; Urban governance; Multicriteria analysis; Global South.

## Introdução

A crise climática global e seus impactos têm impulsionado a incorporação de pautas de resiliência e adaptação nas agendas de políticas públicas (Herath; Bai, 2024). Nesse contexto, a infraestrutura verde tem sido reconhecida como uma solução baseada na natureza capaz de minimizar os efeitos da degradação dos ecossistemas e das transformações nos padrões demográficos e climáticos (Sekulova et al., 2021). Diversas pesquisas demonstram que, quando estrategicamente implementada, a infraestrutura verde pode fortalecer a resiliência e a capacidade adaptativa das cidades (Wolch et al., 2014; Ribeiro et al., 2021; Ferreira et al., 2024; Ribeiro et al., 2024).

Apesar desse reconhecimento, a consolidação da infraestrutura verde como um importante mecanismo de ação do planejamento urbano enfrenta grandes desafios. Parte desses desafios decorre das ambiguidades conceituais associadas ao termo, bem como da complexidade inerente à operacionalização de suas práticas de gestão nos sistemas urbanos (Sekulova et al., 2021; Korkou et al., 2023). Essas barreiras dificultam a transição da teoria para intervenções práticas que sejam replicáveis, escaláveis e sustentáveis (Daily; Matson, 2008).

A adoção e implementação da infraestrutura verde variam amplamente entre as cidades, influenciadas por suas características geográficas, níveis de desenvolvimento socioeconômico, escala territorial e demais fatores contextuais (Hale, 2016; Boulton et al., 2018; Boulton; Dedekorkut-Howes, 2024). Entre esses fatores, a governança exerce papel central, uma vez que envolve o conjunto de políticas, instrumentos de planejamento e regulamentações que orientam os objetivos e metas estabelecidos pelos agentes institucionais e demais partes interessadas (Lemos; Agrawal, 2006). A pesquisa de Ordóñez et al. (2019) evidencia uma lacuna relevante: a limitada compreensão e capacidade de tomada de decisão dos agentes institucionais sobre a floresta urbana, reforçando a necessidade global de fortalecer mecanismos de capacitação, conscientização e colaboração entre os atores envolvidos.

No contexto da infraestrutura verde, uma governança eficaz deve ser sustentada pelos princípios da conectividade, multifuncionalidade, inclusão social e integração com as infraestruturas urbanas tradicionais, garantindo tomadas de decisão fundamentadas nos sistemas ecológicos e nos contextos sociais locais (Bennett; Satterfield, 2018; Boulton et al., 2024). Elementos como disponibilidade de recursos financeiros, naturais e humanos, engajamento comunitário e dinâmicas de mercado influenciam diretamente essa capacidade. Como destacado por Boulton et al. (2024), cidades de pequeno e médio porte frequentemente enfrentam os desafios do planejamento urbano sustentável de forma mais aguda, dada a limitação de recursos institucionais e técnicos

A tendência global de redução das áreas verdes urbanas (Derdouri et al., 2025), reforça a importância de considerar fatores contextuais na formulação de estratégias de infraestrutura verde. No Brasil, essa necessidade é evidente. O país é composto majoritariamente por cidades pequenas: 94,27% das 5.570 cidades têm menos de 100.000 habitantes (IBGE, 2022a). Entretanto, a produção científica brasileira sobre infraestrutura verde concentra-se nos grandes centros urbanos. Essa disparidade de pesquisa gera uma lacuna sobre estratégias na gestão da infraestrutura verde para diferentes contextos urbanos, que se acentua pela inacessibilidade de dados confiáveis e atualizados para cidades de pequeno e médio porte, dificultando a formulação de políticas públicas baseadas em evidências pelo decisores (Devisscher et al., 2022).

Diante desses desafios e da urgência em promover a sustentabilidade e resiliência urbana, torna-se necessário o desenvolvimento de abordagens flexíveis e adaptáveis às diferentes realidades territoriais. Assim, este estudo propõe um modelo espacial para a gestão da infraestrutura verde em cidades brasileiras, com potencial de aplicação em

cidades de diferentes contextos. O modelo integra a dinâmica espacial de cinco indicadores de serviços ecossistêmicos associados à infraestrutura verde e um indicador de vulnerabilidade social.

Como a alocação estratégica da infraestrutura verde envolve múltiplas partes interessadas, incluindo proprietários privados, gestores públicos e organizações da sociedade civil (Sekulova et al., 2021; Devisscher et al., 2022), torna-se fundamental reconhecer o papel central dos administradores públicos na governança da vegetação urbana. A capacidade de decisão desses agentes influencia diretamente a estrutura e a diversidade da vegetação urbana e, consequentemente, os benefícios ecológicos, sociais e paisagísticos oferecidos à população (Hansen; Pauleit, 2014; Herzog; Rozado, 2019).

Para incorporar diferentes perspectivas e experiências profissionais, especialistas de diferentes regiões brasileiras foram consultados para definir os pesos dos componentes do modelo. Essa consulta permitiu comparar como diferentes perfis atribuem importância aos serviços ecossistêmicos e à vulnerabilidade social. Complementarmente, três cenários foram elaborados para avaliar como distintas abordagens de governança influenciam na gestão da infraestrutura verde: (1) cenário em que todos os componentes têm igual peso; (2) cenário baseado nos pesos definidos por especialistas por meio do Processo de Hierarquia Analítica (AHP); e (3) cenário que prioriza componentes diretamente relacionados à resiliência e adaptabilidade urbana diante das mudanças climáticas.

As hipóteses desta pesquisa são: (1) especialistas com diferentes realidades geográficas e formações apresentarão perspectivas distintas que influenciarão a ponderação dos componentes do modelo; (2) diferentes cenários de governança resultarão em diferentes configurações espaciais de áreas prioritárias para infraestrutura verde; e (3) considerando a urgência em promover a resiliência e adaptação às mudanças climáticas, os cenários baseados na consulta a especialistas e na priorização da resiliência tenderão a convergir, diferindo do cenário em que todos os componentes têm igual importância.

## **Material e Métodos**

### *Estudo de caso*

Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, Brasil, localiza-se na macrorregião Sudeste, abrangendo área de 331,54 km<sup>2</sup> e população estimada em 2.315.560 habitantes (IBGE, 2023b). A cidade é caracterizada por um clima tropical de altitude (Cwa, de acordo com a classificação de Köppen), com invernos frios e secos e



verões quentes e úmidos, registrando temperatura média anual de 22,1 °C e precipitação de 1600 mm, respectivamente (INMET, <https://bdmep.inmet.gov.br/>).

#### *Modelo espacial de gestão da infraestrutura verde*

O modelo espacial de gestão da infraestrutura verde proposto neste estudo foi inspirado no modelo desenvolvido por Merrow e Newell (2017), aplicado em na cidade de Detroit, EUA. Nesta pesquisa, o modelo espacial proposto considera as especificidades socioambientais, institucionais e territoriais que caracterizam grande parte das cidades brasileiras, englobando os desafios da gestão da infraestrutura verde em contextos urbanos marcados por grandes desigualdades socioespaciais, pressões ambientais e limitações institucionais.

A definição dos métodos, ferramentas e fonte de dados empregados neste modelo foi orientada pela necessidade de construir um instrumento metodológico abrangente, flexível e replicável a diferentes contextos urbanos. O modelo foi delineado para subsidiar o planejamento estratégico e técnico-operacional da infraestrutura verde, além de incentivar a integração de soluções baseadas na natureza como estratégia para promoção da resiliência, sustentabilidade e justiça ambiental nas cidades brasileiras.

O modelo espacial de gestão de infraestrutura verde fundamenta-se na dinâmica espacial da provisão dos serviços ecossistêmicos, e da vulnerabilidade social que configuram as áreas urbanas. A Figura 10 exibe todas as etapas metodológicas para a modelagem espacial da gestão da infraestrutura verde.

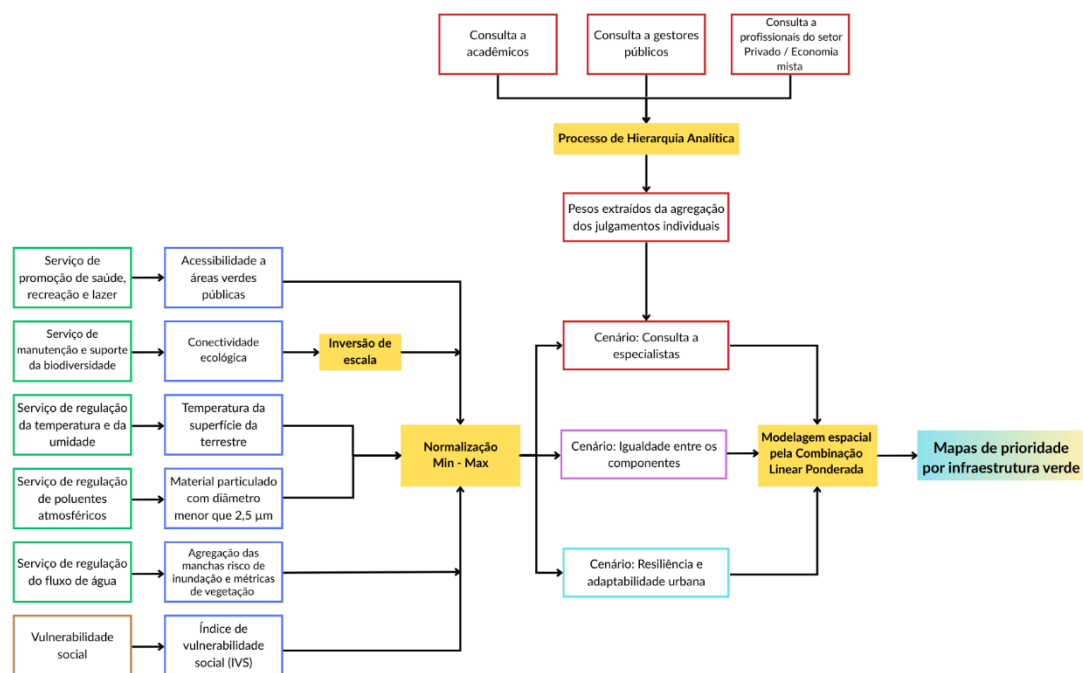


Figura 10: Etapas metodológicas da modelagem espacial da gestão da infraestrutura verde

### Componentes do modelo

Baseado nos dados da revisão sistemática da literatura científica sobre serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde nas cidades brasileiras foram selecionados cinco indicadores de serviços ecossistêmicos e um indicador de vulnerabilidade social, denominados neste estudo como componentes do modelo. A Tabela 3-1 apresenta a descrição dos componentes do modelo, bem como os métodos e fonte de dados utilizados para o mapeamento e espacialização dos respectivos indicadores.

Tabela 3-1: Componentes, indicadores, fonte de dados e métodos utilizados no modelo de gestão da infraestrutura verde

Componente	Indicador	Fonte de dados	Método
Serviço ecossistêmico de promoção de saúde, recreação e lazer	Acessibilidade a áreas verdes públicas	Camadas vetoriais do sistema viário, praças, parques, unidades de conservação e outras áreas verdes públicas ( <a href="https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo">https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo</a> )	Distância de caminhada (walkability distance)

Serviço ecossistêmico de manutenção e suporte da biodiversidade	Conectividade ecológica	Mapa de uso e ocupação do solo produzido com dados do Sentinel-2 L2A	Classificador do mapa de uso e ocupação do solo: Random Forest; Unidade de análise da conectividade: células hexagonais com lados de 500 m; métrica de conectividade: índice de coesão de manchas
Serviço ecossistêmico de regulação da temperatura e da umidade	Temperatura da superfície da terrestre	Bandas do vermelho (B4), infravermelho próximo (B5) e termal (B10) de imagens do Landsat-8; Base de dados do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia ( <a href="https://bdmep.inmet.gov.br/">https://bdmep.inmet.gov.br/</a> )	Algoritmo de canal único
Serviço ecossistêmico de regulação de poluentes atmosféricos	Material particulado com diâmetro menor que 2,5 µm	Inventário de emissões veiculares de Belo Horizonte (FEAM, 2023)	Interpolação de 248 pontos amostrais usando o inverso da distância ao quadrado.
Serviço ecossistêmico de regulação do fluxo de água	Agregação das áreas com risco de inundação e métricas das manchas de vegetação nas bacias hidrográficas elementares	Áreas com risco de inundação, limites das bacias hidrográficas elementares ( <a href="https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo">https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo</a> ). Mapa de uso e ocupação do solo produzido com dados do Sentinel-2 L2A.	Agrupamento pelo método k-médias das bacias hidrográficas considerando presença e ausência de áreas com risco de inundação e nas métricas: porcentagem da paisagem com vegetação (PLAND) e índice de agregação da vegetação (AI)
Vulnerabilidade social	Índice de vulnerabilidade social (IVS)	Base de dados do IPEA -Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ( <a href="https://ivs.ipea.gov.br">https://ivs.ipea.gov.br</a> )	Espacialização dos IVS para cada Unidade de Desenvolvimento Humano (UDHs)

Com base na espacialização dos indicadores de serviço ecossistêmico (Figura 7), foi mapeada a prioridade de infraestrutura verde considerando cada componente de forma isolada (Figura 11). Em cada mapa, a prioridade é representada por um gradiente que varia do cinza claro ao verde escuro. Os tons mais claros de cinza indicam as áreas com os maiores valores dos indicadores dos componentes (maior prioridade), enquanto os tons de verde mais escuro correspondem às áreas com os menores valores (menor prioridade).

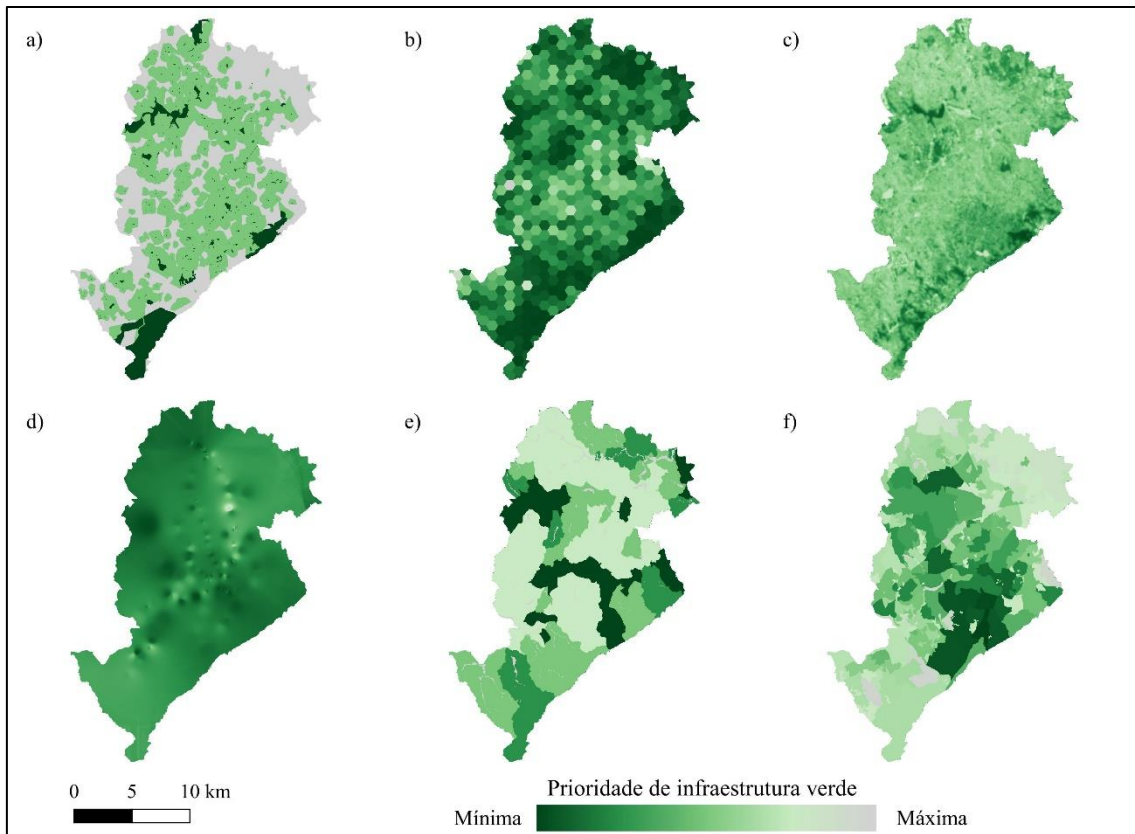


Figura 11: Mapas de prioridade de infraestrutura verde por componentes do modelo espacial de gestão da infraestrutura verde: a) Promoção de saúde, recreação e lazer, b) Manutenção e suporte a biodiversidade; c) Regulação da temperatura e umidade; d) Regulação de poluentes atmosféricos; e) Regulação do fluxo de água; f) Vulnerabilidade social

Os componentes do modelo foram padronizados para uma escala variando de 0 a 1, onde 0 (zero) representa menor prioridade; e 1 (um) maior prioridade. A padronização foi baseada na Equação 1.

$$x_i = \left( \frac{r_i - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde,  $r_i$  é o valor original do indicador,  $r_{\min}$  o menor valor observado no conjunto de dados,  $r_{\max}$  o maior valor observado no conjunto de dados e  $x_i$  o valor do indicador após padronização.

Os componentes do modelo foram integrados aplicando o método de Combinação Linear Ponderada (Equação 2).

$$S = \sum x_i w_i \quad \text{Equação 2}$$

Onde,  $w_i$  é o peso atribuído ao componente  $i$ ; e  $S$  o valor agregado do critério.

O processo de agregação resulta em um mapa de prioridades com escala de 0 (zero) a 1 (um) (Ribeiro et al., 2024). Neste mapa, o valor 1 (um) indica a maior importância, delimitando áreas de alta prioridade de infraestrutura verde. Enquanto, áreas

com valor 0 (zero) representam áreas com menor necessidade ou prioridade de intervenção.

### *Processo de Hierarquia Analítica*

A Análise de Decisão Multicritério (MCDA) é um campo da pesquisa operacional que aplica métodos formais para estruturar decisões em problemas complexos e bem definidos (Bodin; Gass, 2003; Lourdes et al., 2022). Sua principal vantagem é integrar critérios multifacetados, como dimensões biofísicas e socioeconômicas. Essa característica tem impulsionado o emprego da MDCA em contextos socioambientais complexos (Kremer et al., 2016; Lourdes et al., 2022; Fan; Ma, 2024; Srdjevic et al., 2019).

Dentre os métodos que constituem MCDA, o Processo de Hierarquia Analítica (AHP), proposto por Thomas L. Saaty (1977), é amplamente reconhecido como o mais difundido na literatura científica (Darko et al., 2019). Esse método fundamenta-se em comparações pareadas entre critérios, baseadas na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 3-2**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Essa abordagem atribui valores numéricos a julgamentos verbais, quantificando as percepções dos tomadores de decisão, possibilitando assim, a estruturação sistemática e hierárquica do processo decisório (Saaty, 2008, Santos et al., 2019).

Tabela 3-2: Escala Fundamental de Saaty

<b>Intensidade da importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
<b>1</b>	Igual importância	Dois critérios contribuem igualmente para o objetivo.
<b>3</b>	Importância moderada de um critério sobre o outro	A experiência e julgamento favorecem um critério em detrimento do outro.
<b>5</b>	Importância forte ou essencial	A experiência e julgamento fortemente favorecem um critério em detrimento do outro.
<b>7</b>	Importância muito forte	Um critério é fortemente favorecido e sua dominância é demonstrada na prática.
<b>9</b>	Importância extrema	As evidências que favorecem um critério em detrimento do outro são da mais alta ordem possível de afirmação.
<b>2, 4, 6, 8</b>	Valores intermediários entre os dois julgamentos adjacentes	Quando for necessário fazer ajustes.

---

<b>Recíprocos</b>	Quando o critério $i$ tem um dos números acima atribuídos a ele quando comparada com ao critério $j$ , ele $j$ tem o valor recíproco quando comparado com $i$
-------------------	---

---

Adaptado de Saaty (1987)

Os valores atribuídos pelos tomadores de decisão são inseridos em uma matriz de comparações pareadas entre os critérios, a partir da qual os pesos relativos são calculados por técnicas de derivação matemática. O procedimento originalmente proposto por Saaty (1987) baseia-se no cálculo do autovalor principal da matriz, cujo próprio vetor fornece os pesos normalizados. Uma descrição mais detalhada sobre o método é apresentada na pesquisa de Saaty (1987).

#### *Coleta de dados*

A comparação pareada entre os componentes do modelo foi obtida por meio de aplicação de formulário online (<https://forms.gle/1jWhPNTe2yqxVkem9>). Na primeira seção do formulário foi detalhado os indicadores dos componentes do modelo, seguida da apresentação do método do AHP e a Escala Fundamental de Saaty.

Posteriormente, os participantes realizaram comparações pareadas entre os seis componentes. Para facilitar o entendimento da metodologia e reduzir possíveis erros, foi solicitado aos decisores que indicassem se o componente “A” era mais, menos ou igualmente importante ao componente “B” para a gestão da infraestrutura verde de cidades brasileiras, selecionando em seguida o valor dessa importância, conforme a Escala Fundamental de Saaty.

Além disso, foram coletadas informações sobre a região geográfica, nível de escolaridade, setor de atuação profissional e área de especialização de cada ator consultado. Não foram coletadas informações que permitissem identificação dos participantes.

A seleção dos especialistas consultados nesta pesquisa baseou-se em uma metodologia que incluiu a análise de publicações científicas, a participação em eventos técnico-científicos e a consulta a órgãos governamentais de diferentes esferas. A seleção considerou como especialistas profissionais com formação superior nas áreas relacionadas a gestão da infraestrutura verde. Foram incluídos profissionais de nível superior e com pós-graduação *lato sensu*, com experiência prática na gestão da

infraestrutura verde em cidades brasileiras, bem como profissionais com pós-graduação *stricto sensu*.

Tais profissionais, ligados a diferentes setores de atuação profissional (acadêmico, administração pública, setor privado e economia mista) também representam todas as macrorregiões do Brasil, incluindo especialistas que atuam diretamente com a área de estudo (Tabela 3-3).

Tabela 3-3: Quantitativo de especialistas nos critérios de seleção (2 e 3)

<b>Categoria</b>	<b>Quantitativo (n = 54)</b>
<b>Setor de atuação profissional</b>	
Acadêmico	28 (51,85%)
Administração pública	21 (38,89%)
Setor Privado/Economia mista	5 (9,26%)
<b>Região geográfica</b>	
Sudeste	31 (57,41%)
Sul	8 (14,81%)
Centro-Oeste	6 (11,11%)
Nordeste	6 (11,11%)
Norte	3 (5,56%)
<b>Local de atuação profissional</b>	
Estudo de caso	9 (16,67%)
Demais regiões	45 (83,33%)

Os especialistas relacionados, foram os profissionais das seguintes áreas: administração pública, agronomia, arborização urbana, arquitetura e urbanismo, biodiversidade, ciência ambiental, ciência florestal, ecologia, engenharia ambiental, engenharia florestal, entomologia, geociências, gestão de cidades inteligentes, gestão de recursos hídricos, meio ambiente e sustentabilidade, planejamento urbano, serviços ecossistêmicos e zoologia.

#### *Processamento dos dados*

As comparações pareada dos componentes do modelo foram processadas e analisados no *software* R, utilizando principalmente o pacote *ahpsurvey* (Cho, 2019). Especializado no método AHP, este pacote facilita a reformatação dos dados, a execução das etapas do AHP e a agregação de preferências individuais (Cho, 2019). Os pesos dos componentes, considerando os julgamentos individuais, foram determinados utilizando o autovalor principal da matriz. A agregação do peso final foi obtida utilizando a média geométrica para manter a propriedade recíproca da matriz (Guillén-Mena et al., 2023).

### *Avaliação da consistência dos julgamentos dos especialistas*

Em contextos reais, a complexidade de sistemas e a subjetividade inerente às percepções individuais pode provocar inconsistências nas comparações pareadas entre  $n$  componentes. Para assegurar um nível aceitável de coerência nos julgamentos, em termos de proporcionalidade e transitividade das comparações, Saaty (1980) propôs uma razão de consistência (CR) calculada conforme a Equação 2.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Equação 2}$$

Onde, CI representa o índice de consistência, derivado do autovalor principal ( $\lambda_{max}$ ) e no número de componentes ( $n$ ), sendo calculado pela Equação 2.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Equação 2}$$

RI representa o índice aleatório, que corresponde ao valor médio do CI obtido de matrizes de comparação preenchidas aleatoriamente. Cho (2019) obteve RI = 1,250 para matriz com seis componentes. Nesta pesquisa, uma simulação com 500.000 matrizes aleatórias com seis componentes, o valor de RI foi de 1,248.

No contexto do AHP, a premissa estabelecida por Saaty (2013) determina que um  $CR > 0,10$  indica a presença de inconsistências nas comparações pareadas, sendo necessária a revisão e correção das comparações. Devido a impossibilidade de identificar o julgamento individual dos especialistas, todas as matrizes de comparação que apresentaram  $CR > 0,10$  foram excluídas da agregação dos pesos.

### *Consenso entre grupo de especialistas*

A consistência da ponderação obtida pelo julgamento individual de especialistas diversos, foi avaliada através da análise de consenso. Esta análise permite comparar variações na percepção de diferentes perfis de especialistas, como Acadêmicos ou Administradores Públicos ou profissionais do Setor Privado/Economia Mista, bem como as variações entre os julgamentos dos especialistas com experiência direta na área investigada com os julgamentos dos demais especialistas. A avaliação do consenso foi baseada na metodologia descrita por Goepel (2013), que utiliza a entropia de Shannon para mensurar a variação das prioridades entre diferentes grupos de especialistas. O índice de consenso ( $S^*$ ) é classificado como: muito baixo ( $\leq 50\%$ ), baixo (51%–65%), moderado (66%–75%), alto (76%–85%) e muito alto ( $\geq 86\%$ ).



A média geométrica e o desvio-padrão dos pesos agregados, para cada grupo de especialistas, foram calculados e representados graficamente para comparar a variabilidade e o valor de tendência central dos componentes do modelo.

### *Cenários de governança*

O modelo espacial de gestão da infraestrutura verde de cidades brasileiras foi aplicado em cenários que reproduzem diferentes contextos de governança. O propósito desta etapa é compreender, por meio da mensuração e do mapeamento, de que maneira diferentes arranjos de governança influenciam o modelo proposto, considerando que a governança deve apoiar a manutenção da integridade e do funcionamento dos sistemas ecossistêmicos em áreas urbanas (Bennett; Satterfield, 2018). Desta forma, três cenários de governança foram simulados, visando representar contextos desafiadores, participativos e focado nos desafios climáticos contemporâneos.

#### Cenário 1: Igualdade entre os componentes

O Cenário 1 (C1) tem como pressuposto que todos os serviços ecossistêmicos possuem a mesma relevância para a gestão da infraestrutura verde, atribuindo pesos iguais (1/6) para todos os componentes do modelo. Este cenário visa representar o contexto mais desafiador, no qual não é possível a consulta a especialistas para definir a importância relativa dos componentes do modelo. Entende-se que essa possa ser a realidade vivenciada por cidades, onde a escassez de recursos humanos qualificados e a limitada disponibilidade de instrumentos técnicos, normativos impossibilitam um planejamento urbano eficaz.

#### Cenário 2: Consulta a especialistas

O Cenário 2 (C2), é o cenário mais participativo, onde os pesos de cada componente do modelo são derivados do conhecimento e estudos empíricos de especialistas em gestão da infraestrutura verde. Este cenário contextualiza cidades que dispõem de um mínimo de recursos para subsidiar os processos decisórios relacionados à gestão da sua infraestrutura verde. Nesses contextos, a tomada de decisão é respaldada pelo conhecimento de atores envolvidos com a temática e pelo entendimento das especificidades ecológicas, socioambientais e territoriais local.

### Cenário 3: Resiliência e adaptabilidade urbana às mudanças do clima

O Cenário 3 (C3) tem como foco o uso da infraestrutura verde como estratégia para adaptação de eventos climáticos extremos, associados tanto às mudanças nos padrões climáticos quanto aos impactos decorrentes dos processos de urbanização dos ecossistemas naturais. O objetivo deste cenário não é planejar a infraestrutura verde para minimizar um problema específico, e sim, priorizar os serviços ecossistêmicos que contribuem para a adaptação climática. Assim, os componentes do modelo diretamente relacionados à regulação desses eventos, como regulação de temperatura e inundações, recebem o dobro do peso atribuído aos demais componentes. Este cenário contextualiza cidades cuja governança está orientada por princípios de resiliência e adaptabilidade urbana, frente a crescente frequência e severidade dos desastres socioambientais.

#### *Análise de dados*

O modelo espacial de gestão da infraestrutura verde tem como saída o mapeamento da prioridade de infraestrutura verde baseada na dinâmica espacial dos serviços ecossistêmicos e da vulnerabilidade social da área investigada. Como resultado, foram gerados três mapas referentes a cada cenário de governança. A comparação entre esses mapas ocorreu através da análise da diferença entre imagens; da correlação linear e da quantificação de área das classes de prioridade os entre os cenários.

A comparação entre os cenários, a nível de células do mapa (com resolução de 10 m), empregou o método de diferença de imagens, que consiste na subtração dos valores de célula entre duas imagens raster que compartilham a mesma área de estudo, projeção cartográfica, extensão e resolução espacial. Para complementar as análises de comparação, a dispersão dos valores entre os mapas foi examinada por meio de gráficos de dispersão, e foram calculados a regressão linear e o coeficiente de determinação para avaliar o grau de correspondência entre os cenários.

Para apoiar a comparação visual e quantitativa dos diferentes graus de prioridade, as áreas foram classificadas em cinco classes de prioridade. O intervalo das classes foi baseado na distribuição estatística dos valores, utilizando o desvio-padrão ( $\sigma$ ) em relação à média ( $\mu$ ).

Prioridade muito baixa:  $\leq \mu - 1,5\sigma$

Prioridade baixa:  $> \mu - 1,5\sigma$  e  $\leq \mu - 0,5\sigma$

Prioridade média:  $> \mu - 0,5\sigma$  e  $\leq \mu + 0,5\sigma$

Prioridade alta:  $> \mu + 0,5\sigma$  e  $\leq \mu + 1,5\sigma$

Prioridade muito alta:  $> \mu + 1,5\sigma$

Os dados foram processados no ambiente R Core Team (2024) e os mapas foram estilizados no sistema de informação geográfica QGIS 3.22.3 (QGIS Development Team, 2022).

## Resultados

### *Processo de Hierarquia Analítica*

A Tabela 3-4 exibe o peso dos componentes do modelo espacial, obtido através da agregação do julgamento individuais de todos os especialistas consultados cuja comparações tiveram razão de consistência  $\leq 0,10$ .

Tabela 3-4: Peso  $\pm$  desvios-padrão dos critérios do modelo considerando julgamentos com  $CR \leq 0,10$

<b>Cult</b>	<b>Bio</b>	<b>Temp</b>	<b>Atm</b>	<b>Agua</b>	<b>Vuln</b>
0,143 $\pm$ 0,127	0,123 $\pm$ 0,093	0,120 $\pm$ 0,087	0,112 $\pm$ 0,069	0,158 $\pm$ 0,121	0,158 $\pm$ 0,108

Promoção de saúde, recreação e lazer (Cult); Manutenção e suporte a biodiversidade (Bio); Regulação da temperatura e umidade (Temp); Regulação de poluentes atmosféricos (Atm); Regulação do fluxo de água (Agua); Vulnerabilidade social (Vuln)

Vuln e Agua foram os componentes considerados mais importantes para a gestão da infraestrutura verde de cidades brasileiras, enquanto Atm recebeu a menor importância. A amplitude observada entre esses componentes é de 0,046. O desvio-padrão dos julgamentos individuais dos especialistas indica uma grande variabilidade no grau de importância atribuído aos componentes. Todos os componentes exibiram Coeficiente de Variação (CV) maiores que 60%. A maior variabilidade foi identificada no componente Cult (CV = 88, 81%).

Os julgamentos dos especialistas com diferentes perfis foram comparados para avaliar a variabilidade na ponderação dos componentes do modelo. Na primeira comparação, os especialistas foram agrupados conforme sua experiência direta com a área de estudo, distinguindo-se entre aqueles que atuam diretamente em Belo Horizonte e aqueles que exercem suas atividades em outras cidades brasileiras. Os pesos e o desvio-padrão de cada critério dos diferentes grupos são apresentados na Figura 12 A. Observa-se que o componente Cult recebeu menor peso dos especialistas com atuação direta na área investigada ( $0,094 \pm 0,128$ ), o coeficiente de variação (CV) para esse componente foi de 137,94%, indicando grande dispersão nas opiniões quanto a sua importância. Em contrapartida, o componente Vuln obteve o maior peso entre os especialistas que atuam

em Belo Horizonte ( $0,183 \pm 0,089$ ), com  $CV = 49,07\%$ . O componente Temp apresentou contraste entre os grupos, com peso de  $0,174 \pm 0,061$  ( $CV = 34,90\%$ ) para especialistas que atuam em Belo Horizonte e peso  $0,101 \pm 0,096$  ( $CV = 94,38\%$ ) para especialista que atuam em outras cidades do Brasil. O desvio-padrão, e consequentemente o CV, indicam que os especialistas que atuam na área investigada são mais consistentes em relação ao grau de importância da componente para a gestão da infraestrutura verde. Embora seja identificado divergência no grau de importância de alguns componentes, os pesos e as variabilidades observada entre os grupos indicam uma consistência nas ponderações. Esse resultado é validado pelo índice de consenso ( $S^* = 0,968$ ), classificado como consenso muito alto (Goepel et al., 2018).

Na segunda comparação, os especialistas foram agrupados conforme o setor de atuação profissional, sendo categorizados como Acadêmicos, Administradores Públicos ou profissionais do setor privado/economia mista. Os pesos e desvios-padrão correspondentes a cada grupo são apresentados na Figura 12 B. Entre os especialistas consultados, apenas um profissional do setor privado/economia mista apresentou julgamento com  $CR \leq 0,10$ , sendo assim, os pesos para este grupo devem ser entendidos como observações pontuais, e não como uma medida de tendência central de uma distribuição, limitando a comparação deste grupo com os demais. Similar ao observado na Figura 12 A, Temp foi o componente que apresentou maior contraste entre os grupos, com peso de  $0,077 \pm 0,129$  ( $CV = 167,52\%$ ) para o grupo de acadêmicos; peso de  $0,154 \pm 0,054$  ( $CV = 35,14\%$ ) para funcionários públicos; e peso de  $0,187$  determinado por um profissional do setor privado/economia mista. O grau de importância deste componente para o modelo foi muito inconsistente entre o grupo de acadêmicos. Também foram observadas grandes inconsistências nos julgamentos intragrupos para o componente Cult, com peso de  $0,162 \pm 0,142$  ( $CV = 87,65\%$ ) para o grupo de acadêmicos; e peso de  $0,129 \pm 0,136$  ( $CV = 105,53\%$ ) para o grupo de funcionários públicos. Os demais componentes também apresentaram alta variabilidade intragrupos com  $CV > 60\%$ . O índice de consenso para esse conjunto de grupos, desconsiderando setor privado/economia mista, foi classificado como muito alto ( $S^* = 0,964$ ).

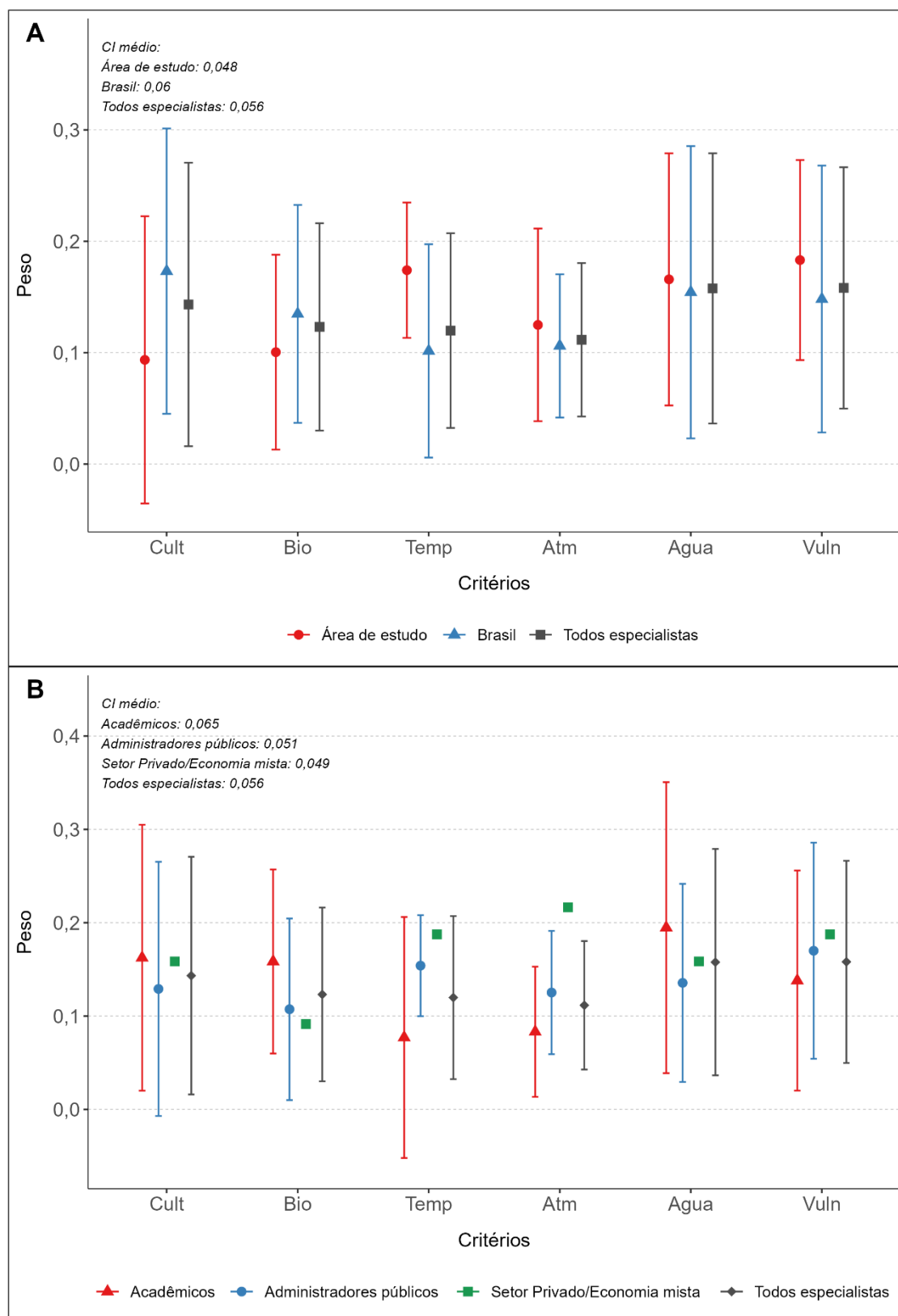


Figura 12: Pesos e desvios-padrão dos critérios obtidos a partir do agrupamento dos especialistas por: A) Local de atuação profissional; B) Setor de atuação profissional

### *Modelagem e comparação dos cenários de governança*

Os pesos que foram atribuídos para os componentes nos cenários de governança são exibidos na Tabela 3-5. No C1, foram atribuídos pesos iguais aos componentes. No C2, os pesos foram extraídos dos julgamentos dos especialistas consultados, normalizados de modo que soma totalizasse 1 (um). Já no C3, os componentes que representam serviços ecossistêmicos que contribuem diretamente para a adaptação climática receberam o dobro de importância dos demais componentes.

**Tabela 3-5: Pesos atribuídos aos componentes do modelo nos três cenários**

<b>Componente</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
Promoção de saúde, recreação e lazer	0,167	0,176	0,125
Manutenção e suporte a biodiversidade	0,167	0,151	0,125
Regulação da temperatura e umidade	0,167	0,147	0,250
Regulação de poluentes atmosféricos	0,167	0,137	0,125
Regulação do fluxo de água	0,167	0,194	0,250
Vulnerabilidade social	0,167	0,194	0,125

Os mapas de saída da modelagem são apresentados na Figura 14. Os mapas, interpretados como mapas de prioridade de infraestrutura verde, foram categorizados em cinco classes de prioridade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

A comparação visual dos mapas mostra os efeitos dos diferentes cenários de governança na gestão da infraestrutura verde. No geral, foram observadas pequenas mudanças na espacialização das classes de prioridade entre cenários. As áreas com prioridade muito alta e alta por infraestruturas verdes se concentram na região Norte e Sudoeste de Belo Horizonte, enquanto as áreas com prioridade muito baixa se concentram a sudeste, leste e noroeste. O C3 apresentou a maior proporção de áreas com prioridade muito baixa (9,45%) e a maior proporção de área de prioridade alta e muito alta (36,88%). Os cenários C1 e C2 exibiram as menores diferenças nas proporções das classes de prioridade, com a maior diferença identificada na classe de prioridade média (0,30%).

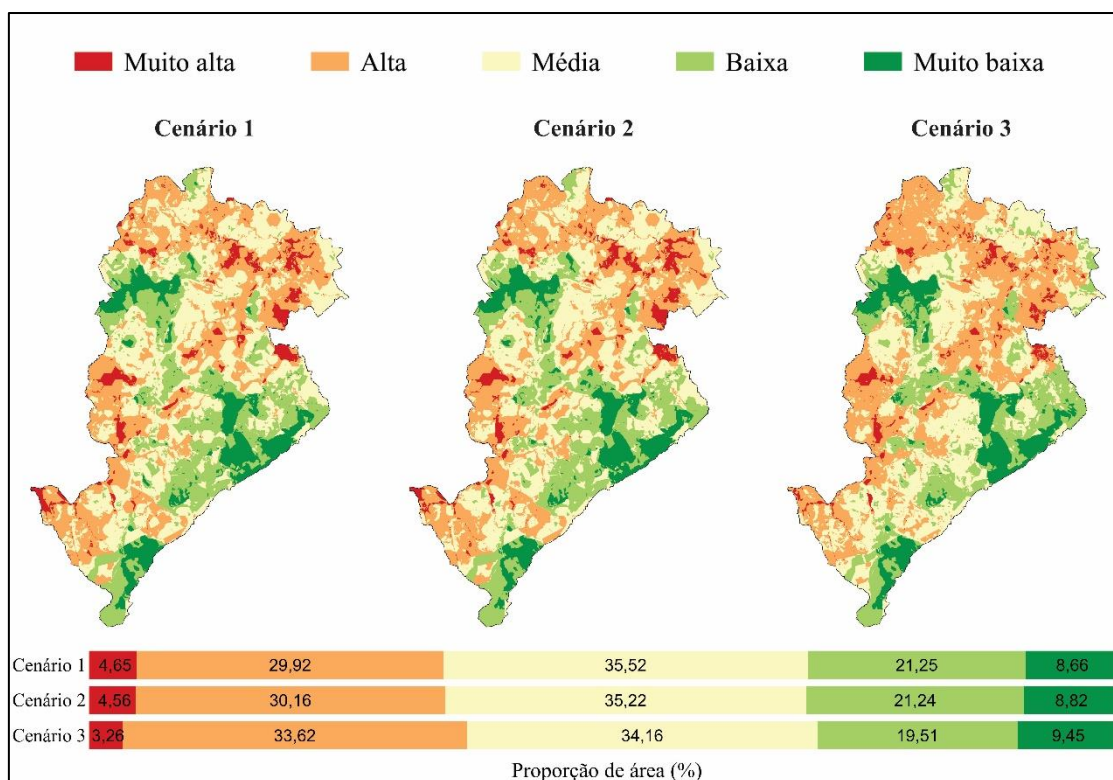


Figura 13: Mapas de prioridade de infraestrutura verde organizado em cinco classes de prioridades: Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa

O mapa de diferença espacial entre o C1 e C2 revela que a maioria das células apresentam valores próximo de zero, resultado observado pela predominância de tons claros. A amplitude da diferença entre esses cenários variou de -0,054 a 0,022. As regiões em tons de azul mostram áreas onde o C2 possui valores superiores ao C1, ou seja, regiões onde a prioridade de infraestrutura verde no C2 é maior que em C1. Na região central, algumas manchas de tons verdes são observadas destacando a relação oposta, regiões onde o C1 possui valores maiores que C2. A análise da regressão linear corrobora com a análise espacial. O gráfico de dispersão exhibe a nuvem de pontos bem alinhada com a linha  $y = x$  (pontilhada) e o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,995$ ) reforça a correlação muito forte e positiva entre os dois cenários. A equação de regressão linear ajustada corrobora quantitativamente com o observado no mapa de diferença espacial, o valor do intercepto próximo a zero, porém negativo (-0,012) e o valor do coeficiente angular (1,06), reforçam a semelhança entre os dois cenários, com o C2 possuindo, em média, valores ligeiramente maiores que C1 (coeficiente angular  $> 1$ ).

No mapa de diferença espacial entre C1 e C3, observa-se maior variabilidade e intensidade de cores em comparação à análise C1 x C2, revelando uma divergência mais pronunciada entre esses cenários. A amplitude da diferença entre C1 e C3 variou de -0,114

a 0,081. Visualmente, as áreas onde C3 possuem valores maiores que C1 (tons de azul) são mais extensas do que as áreas onde C1 possui valores superiores (tons verde-amarelos). O mapa de diferença exibe manchas de valores negativos ( $C3 > C1$ ) próximas a manchas de valores positivos ( $C1 > C3$ ). São observadas pequenas manchas de tons próximos de branco ( $C1 \approx C3$ ) ao longo de toda área investigada. A análise de regressão linear revela alta correlação positiva entre os dois cenários ( $R^2 = 0,938$ ), porém levemente mais fraca que a correlação entre C1 x C2. Isso pode ser observado pela menor densidade e maior dispersão da nuvem de pontos ao redor da linha de regressão (linha vermelha). A equação da regressão linear reforça o que foi inferido na análise espacial, o valor do intercepto  $\approx 0,008$  e o coeficiente angular  $= 1,01$  indicam similaridade dos valores entre os dois cenários, com o C3, possuindo, em média, valores levemente superiores.

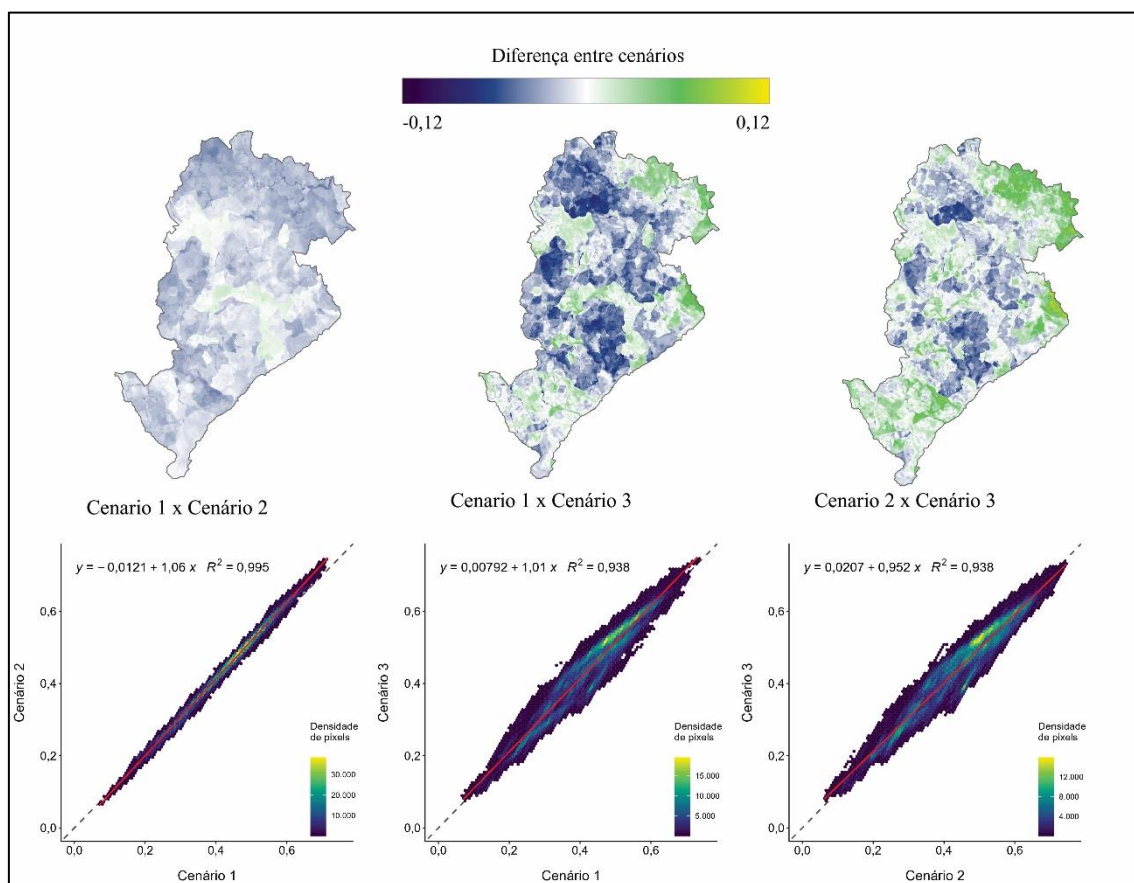


Figura 14: Mapa de diferença entre os cenários analisados no modelo espacial de gestão da infraestrutura verde

A comparação entre C2 e C3 resultou em uma diferença espacial com amplitude variando de  $-0,106$  a  $0,101$ . Observam-se manchas em maior área e quantidade nos tons verde-amarelos, principalmente nas áreas limítrofes a leste e ao sul, representando as



regiões onde o C2 possui valores superiores ao C3. Manchas em tons de azul, indicando que C3 possui valores superiores a C2, se concentram na região central e a noroeste. A nuvem de pontos do gráfico de dispersão para C2 x C3 exibe um padrão de dispersão e densidade similar ao observado entre C1 x C3. A similaridade da nuvem de pontos e do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,938$ ) reforça a proximidade entre C1 e C2, e como esses cenários se destoam de C3. A equação de regressão linear ajustada ( $y = 0,0207 + 0,952 x$ ) indica que, nas áreas com menores valores, C3 possui valores médios superiores a C2. Contudo, à medida que os valores aumentam, os valores médios do C2 passam a ser superiores aos do C3.

A comparação entre os cenários de governança mostrou que o cenário onde os componentes têm igual importância para o modelo (C1) e o cenário com a consulta ao especialista (C2) representaram abordagens muito similares para a gestão da infraestrutura verde, resultando em um arranjo espacial quase idêntico. O cenário focado na resiliência e adaptabilidade (C3), embora fortemente correlacionado com C1 e C2, apresentou um arranjo espacial de gestão da infraestrutura verde distinto dos demais cenários.

## Discussão

Este estudo propôs um modelo espacial de gestão da infraestrutura verde em cidades brasileiras, baseado em cinco serviços ecossistêmicos e na vulnerabilidade social. O modelo resultante expressa a distribuição espacial da agregação desses componentes considerando seus pesos relativos e, aplicado a Belo Horizonte, permitiu identificar áreas prioritárias para a alocação e/ou adaptação de elementos da infraestrutura verde. A metodologia empregada apresenta potencial de replicação em outras cidades brasileiras, principalmente diante da necessidade de incorporar múltiplos critérios socioambientais no planejamento urbano.

É importante destacar, contudo, que a simples presença física da infraestrutura verde não garante a provisão efetiva dos serviços ecossistêmicos associados (Wolch et al., 2014). Para que esses serviços se concretizem, os elementos da infraestrutura verde devem apresentar características ecológicas adequadas, como diversidade estrutural, conectividade e capacidade de suporte, e ser manejados de maneira contínua e apropriada ao longo do tempo (Knobel et al., 2019; Martini; Biondi, 2022). Assim, os resultados deste estudo reforçam a necessidade de integrar o planejamento espacial com estratégias

de gestão capazes de assegurar a funcionalidade ecológica e a efetividade social da infraestrutura verde.

### *Consenso e julgamento de especialistas*

A hipótese de que especialistas de perfis geográficos e profissionais diferentes apresentariam perspectivas distintas, refletindo na ponderação dos componentes do modelo, não foi confirmada. A análise dos julgamentos individuais de todos os grupos de especialistas revelou uma alta variabilidade ( $CV > 60\%$ ) nas prioridades atribuídas aos componentes do modelo. O consenso muito alto indicado pelo índice de consenso ( $S^*$ ), é atribuído a grande variabilidade nos julgamentos individuais que atuou como elemento de consenso entre os grupos.

Ao comparar os julgamentos de especialistas que atuam diretamente na área de estudo com os demais, identificou-se que desafios vivenciados localmente foram priorizados. Belo Horizonte foi a capital brasileira mais afetada pelo aumento da temperatura em 2023 e, em 2024, a cidade registrou ondas de calor com temperaturas até  $7^\circ\text{C}$  acima da média (Cemadem, 2024; Marengo et al., 2025). Esse contexto se refletiu nos resultados: os especialistas locais atribuíram maior peso ao serviço ecossistêmico de regulação da temperatura e umidade em comparação aos especialistas de outras regiões do país.

Na comparação entre especialistas de diferentes setores de atuação profissional, a maior variabilidade foi observada no grupo de acadêmicos em contraste com o grupo de funcionários públicos. Esse resultado é atribuído a natureza multidisciplinar da consulta, que incluiu acadêmicos de diversas disciplinas envolvidas no planejamento da infraestrutura verde.

No julgamento de todos os especialistas, os componentes regulação do fluxo de água e vulnerabilidade social foram considerados os mais importantes para a gestão da infraestrutura verde de cidades brasileiras. Esse resultado está alinhado com a realidade socioambiental e os desafios enfrentados pelas áreas urbanas do Brasil. As enchentes e inundações são, de fato, os desastres que mais impactam as cidades brasileiras, com graves consequências humanitárias e socioeconômicas (Aguilar-Muñoz; Calderón-Pacheco, 2023; Pillar; Overbeck, 2024). Em 2024, o Brasil enfrentou uma das maiores catástrofes socioambientais de sua história. A macrorregião Sul do Brasil foi afetada por inundações catastróficas, resultando em 213 mortes e/ou desaparecimentos, 600.000

pessoas deslocadas e perdas significativas na infraestrutura urbana e rural (Pillar; Overbeck, 2024).

A priorização da vulnerabilidade social frente aos demais componentes é corroborada por estudos que demonstram a intersecção entre desastres ambientais e desigualdades sociais e a importância do fortalecimento de estratégias de justiça socioambiental. Wink Júnior et al. (2023) investigaram o impacto das inundações na pobreza da população brasileira e seus resultados sugerem a existência de maior severidade dos efeitos para a população mais vulnerável, uma vez que esse perfil de indivíduos está diretamente associado às piores condições financeiras e de saúde, e moradias desprotegidas localizadas em locais com baixa infraestrutura. Cuchi et al. (2024) analisaram a distribuição e acessibilidade dos serviços ecossistêmicos em um estado brasileiro e encontraram discrepâncias significativas entre diferentes condições socioeconômicas e a disponibilidade de serviços ecossistêmicos.

Os pesos agregados dos componentes, obtidos pelo julgamento de todos os especialistas, exibiram uma pequena amplitude, com variação de 13,52%. O equilíbrio observado no grau de importância entre os componentes do modelo, conforme o julgamento dos especialistas brasileiros, reflete a urgência e a complexidade dos desafios contemporâneos enfrentados nas cidades brasileiras. Considerando a expertise dos especialistas e a razão de consistência dos julgamentos, acredita-se ser uma tarefa desafiadora priorizar componentes em uma realidade onde todas as estratégias são consideradas urgentes para a resiliência, adaptação e sustentabilidade das cidades.

A grande variabilidade observada nos julgamentos individuais, gerou um equilíbrio no peso final dos componentes. Esse equilíbrio não foi observado em outros estudos. Por exemplo, Fan e Ma (2024), ao consultarem oito especialistas para priorizar oito serviços ecossistêmicos em uma metrópole chinesa, obtiveram pesos com variação de 48,83%. Srdjevic et al. (2019) consultaram doze especialistas priorizar quatro categorias de serviços ecossistêmicos em Voivodina (Sérvia) e os pesos tiveram variação de 74,10%. Estes estudos, que também empregaram o método AHP, demonstram uma maior hierarquização dos critérios.

#### *Impacto dos cenários de governança na gestão da infraestrutura verde*

O cenário C2 é considerado o mais adequado, por representar uma governança fortalecida e de caráter mais participativo. No entanto, reconhece-se que muitas cidades não dispõem de recursos institucionais, técnicos ou financeiros para subsidiar processos

decisórios complexos, sobretudo aqueles relacionados a questões socioambientais e ecológicas. Por esse motivo, o modelo foi comparado a cenários adicionais que representam formas de governança menos estruturadas, permitindo avaliar sua aplicabilidade mesmo em contextos com capacidades limitadas.

Inicialmente, esperava-se que os cenários que priorizavam a consulta a especialistas (C2) e a adaptação climática (C3) apresentassem maior similaridade, dadas as urgências de resiliência e adaptação climática, em comparação ao cenário de igual importância dos componentes (C1). Contudo, essa hipótese foi refutada.

A análise comparativa entre C1, C2 e C3, utilizando métodos de diferença espacial e correlação, demonstrou que C1 e C2 exibiram diferenças mínimas, tanto quantitativamente quanto no arranjo espacial. Essa forte correlação entre C1 e C2, apesar de divergir da hipótese inicial, é interpretada como um resultado positivo para o propósito da pesquisa. O fato de C1 e C2 apresentarem resultados fortemente correlacionados indica que o modelo desenvolvido é um instrumento confiável para cidades que, devido à escassez de recursos ou conflitos de governança, enfrentam dificuldade na consulta de especialistas em gestão da infraestrutura verde.

A hierarquia dos critérios do modelo atribuídas no cenário de resiliência e adaptabilidade urbana quando comparado com a hierarquia dos critérios obtidos pelos especialistas que atuam diretamente na área de estudo diferiram, principalmente, por não considerar vulnerabilidade social com importância similar aos serviços ecossistêmicos que contribuem para a adaptação climática. Esse resultado juntamente com o peso da vulnerabilidade social atribuída pela consulta a todos os especialistas são um indicativo de que a justiça ambiental é uma prioridade para as partes interessadas na gestão da infraestrutura verde no Brasil.

#### *Limitações da pesquisa*

A principal limitação desta pesquisa refere-se à combinação de dados com diferentes resoluções espaciais, uma vez que, redimensionar e criar composições com camadas espaciais oriundas de fontes com diferentes resoluções espaciais inevitavelmente introduz imprecisão, refletindo em uma precisão do conjunto de dados com resolução mais grosseira (Kremer et al., 2016).

A não identificação dos especialistas consultados foi o método selecionado para evitar qualquer viés nas análises dos julgamentos individuais e no consenso entre os grupos. Contudo, após cálculo do CR, percebeu-se que este método impossibilitou a

reconsulta para correção de inconsistências. Essa limitação também impossibilitou uma comparação entre especialistas que atuam em diferentes macrorregiões brasileiras, análise almejada no delineamento da pesquisa.

Os componentes selecionados para o modelo foram os serviços ecossistêmicos mais investigados em áreas urbanas brasileiras, incluindo um componente de vulnerabilidade social. Outros componentes, como segurança alimentar, sequestro de carbono, qualidade dos espaços verdes existentes, foram identificadas como questões relevantes, contudo, não foram consideradas como componentes devido à falta de dados escalonáveis e a complexidade na aplicação do AHP à medida que o número de critérios aumenta (Bodin; Gass, 2003).

O objetivo deste modelo é subsidiar um instrumento de apoio a decisão baseado em evidências que possa ser replicado em áreas urbanas de diferentes contextos, contribuindo para a gestão da infraestrutura verde principalmente em cidades com limitações de recursos humanos. Contudo, o estudo de caso foi direcionado a uma cidade de grande porte do Brasil pela confiabilidade dos dados disponíveis. Essa limitação de informações básicas para o diagnóstico ecológico-ambiental de cidades, principalmente de pequeno porte, é o principal limitante para a replicabilidade do modelo. Felizmente, iniciativas que disponibilizam, de forma aberta e gratuita, como as plataformas MapBiomass (<https://brasil.mapbiomas.org/>) e GeoReDUS (<https://www.redus.org.br/georedus>) e o artigo científico de Guo et al. (2023), possibilitam a aplicação do modelo para muitas cidades brasileiras.

### **Considerações finais**

Os resultados deste estudo evidenciam que a integração de múltiplos serviços ecossistêmicos e da vulnerabilidade social em um modelo espacial constitui uma estratégia promissora para aprimorar a gestão da infraestrutura verde em cidades brasileiras. A aplicação do modelo em Belo Horizonte demonstrou sua capacidade de identificar áreas prioritárias em diferentes contextos de governança, revelando um instrumento flexível e aplicável tanto a cenários com maior robustez institucional quanto àqueles marcados por limitações técnicas e de recursos. Além disso, a análise dos julgamentos dos especialistas destacou a influência dos desafios locais na definição de prioridades e reforçou a centralidade da justiça socioambiental no processo decisório,

principalmente em um país caracterizado por desigualdades profundas e crescente exposição a eventos climáticos extremos.

## Referências

- Aguilar-Muñoz, V., & Calderón-Pacheco, L. (2023). Flash Floods: The Big Impact of Local and Frequent Disasters in Brazil. Available at SSRN 4378342.
- Bennett, N. J., & Satterfield, T. (2018). Environmental governance: A practical framework to guide design, evaluation, and analysis. *Conservation Letters*, 11(6), e12600.
- Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Botero, V. (2019). A social vulnerability index to changes in ecosystem services provision at local scale: A methodological approach. *Environmental Science & Policy*, 93, 158-171.
- Bodin, L., & Gass, S. I. (2003). On teaching the analytic hierarchy process. *Computers & operations research*, 30(10), 1487-1497.
- Boulton, C., & Dedekorkut-Howes, A. (2024). How funding scarcity and ineffective governance tools inhibit urban greenspace provision: An exploration of municipal greenspace managers' insights. *Landscape and urban planning*, 251, 105172.
- Boulton, C., Dedekorkut-Howes, A., & Byrne, J. (2018). Factors shaping urban greenspace provision: A systematic review of the literature. *Landscape and urban planning*, 178, 82-101.
- Cemaden - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2024). Avaliação de temperaturas extremas combinadas com a seca no Brasil no ano de 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/o-ano-de-2023-foi-marcado-por-temperaturas-e-secas-extremas-aponta-estudo-do-cemaden-1>
- Cho, F. (2019). *\_ahpsurvey: Analytic Hierarchy Process for Survey Data\_*. R package version 0.4.1, <<https://CRAN.R-project.org/package=ahpsurvey>>.
- Cuchi, T., Bobrowski, R., Wężyk, P., Breunig, F. M., & Pesck, V. A. (2024). Contributions to a global understanding of socioenvironmental justice related to urban forest: Trends from Brazilian cities in the southeastern Paraná State. *Urban Forestry & Urban Greening*, 95, 128322.

- Daily, G. C., & Matson, P. A. (2008). Ecosystem services: From theory to implementation. *Proceedings of the national academy of sciences*, 105(28), 9455-9456.
- Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Pärn, E., & Edwards, D. J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International journal of construction management*, 19(5), 436-452.
- Derdouri, A., Murayama, Y., Morimoto, T., Wang, R., & Aghasi, N. H. M. (2025). Urban green space in transition: A cross-continental perspective from eight Global North and South cities. *Landscape and Urban Planning*, 253, 105220.
- Devisscher, T., Ordóñez-Barona, C., Dobbs, C., Baptista, M. D., Navarro, N. M., Aguilar, L. A. O., ... & Escobedo, F. J. (2022). Urban forest management and governance in Latin America and the Caribbean: A baseline study of stakeholder views. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127441.
- Fan, Y., & Ma, S. (2024). Integrating fuzzy analytic hierarchy process into ecosystem service-based spatial planning: A case study of the Shenyang metropolitan area, China. *Ecological Informatics*, 81, 102625.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. (2023). *Emissões pontuais e por área de Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Material Particulado (MP) em Belo Horizonte (ano-base 2019)*. 57 p. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/cac0a154-76c9-479d-acb1-304832d609d0>
- Ferreira, M. L., Ribeiro, A. P., Rakauskas, F., Bollamann, H. A., Theophilo, C. Y. S., Moreira, E. G., ... & Laforteza, R. (2024). Spatiotemporal monitoring of subtropical urban forests in mitigating air pollution: Policy implications for nature-based solutions. *Ecological Indicators*, 158, 111386.
- Goepel, K. D. (2013). Implementing the analytic hierarchy process as a standard method for multi-criteria decision making in corporate enterprises—a new AHP excel template with multiple inputs. In *Proceedings of the international symposium on the analytic hierarchy process* (Vol. 2, No. 10, pp. 1-10). Kuala Lumpur, Malaysia: Creative Decisions Foundation Kuala Lumpur.
- Guillén-Mena, V., Quesada-Molina, F., Astudillo-Cordero, S., Lema, M., & Ortiz-Fernández, J. (2023). Lessons learned from a study based on the AHP method for the assessment of sustainability in neighborhoods. *MethodsX*, 11, 102440.

- Guo, J., Xu, Q., Zeng, Y., Liu, Z., & Zhu, X. X. (2023). 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*, 198, 1-15.
- Hale, R. L. (2016). Spatial and temporal variation in local stormwater infrastructure use and stormwater management paradigms over the 20th century. *Water*, 8(7), 310.
- Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *Ambio*, 43, 516-529.
- Herath, P., & Bai, X. (2024). Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: Six current and emerging themes. *Sustainability Science*, 1-25.
- Herzog, C. P., & Rozado, C. A. (2019). The EU–Brazil Sector Dialogue on nature-based solutions. *Innovation*.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023a). Cidades: Brasil. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023b). Cidades: Belo Horizonte. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>
- Knobel, P., Dadvand, P., & Maneja-Zaragoza, R. (2019). A systematic review of multi-dimensional quality assessment tools for urban green spaces. *Health & place*, 59, 102198.
- Korkou, M., Tarigan, A. K., & Hanslin, H. M. (2023). The multifunctionality concept in urban green infrastructure planning: A systematic literature review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 85, 127975.
- Kremer, P., Hamstead, Z. A., & McPhearson, T. (2016). The value of urban ecosystem services in New York City: A spatially explicit multicriteria analysis of landscape scale valuation scenarios. *Environmental Science & Policy*, 62, 57-68.
- Lemos, M. C., & Agrawal, A. (2006). Environmental governance. *Annual review of environment and resources*, 31(2006), 297-325.
- Lourdes, K. T., Hamel, P., Gibbins, C. N., Sanusi, R., Azhar, B., & Lechner, A. M. (2022). Planning for green infrastructure using multiple urban ecosystem service models and multicriteria analysis. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104500.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Luiz, R., Cuartas, A., Pimentel, A., Alvalá, R. C; S., Seluchi, M. E., Broedel, E., Muñoz, V. (2025). Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2024. Nota Técnica. Disponível em:



[https://inctmc2.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2025/03/Relatorio\\_NT-Clima\\_Extremos\\_Desastres-2024-Brasil-digital.pdf](https://inctmc2.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2025/03/Relatorio_NT-Clima_Extremos_Desastres-2024-Brasil-digital.pdf)

- Martini, A., & Biondi, D. (2022). Planejamento da arborização urbana. In M. M. Souza (Coord.), *Arborização urbana: Considerações sobre planejamento, implementação, manejo e gestão* (pp. 101–160). Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)
- Meerow, S., & Newell, J. P. (2017). Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and urban planning*, 159, 62-75.
- Ordóñez, C., Threlfall, C. G., Kendal, D., Hochuli, D. F., Davern, M., Fuller, R. A., ... & Livesley, S. J. (2019). Urban forest governance and decision-making: A systematic review and synthesis of the perspectives of municipal managers. *Landscape and Urban Planning*, 189, 166-180.
- Pillar, V. D., & Overbeck, G. E. (2024). Learning from a climate disaster: The catastrophic floods in southern Brazil. *Science*, 385(6713), eadr8356.
- QGIS Development Team. (2022). *QGIS Geographic Information System* (Version 3.22.3) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://www.qgis.org>
- Ribeiro, A. P., Bollmann, H. A., De Oliveira, A., Rakauskas, F., Cortese, T. T. P., Rodrigues, M. S. C., ... & Ferreira, M. L. (2021). The role of tree landscape to reduce effects of urban heat islands: A study in two Brazilian cities. *Trees*, 1-14.
- Ribeiro, M. P., De Melo, K., Chen, D., & Valente, R. A. (2024). Prioritization of New Green Infrastructures Aimed at Protecting Urban Biodiversity. In *IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 5447-5452). IEEE.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- Saaty, T. L. (2013). The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach. *Operations research*, 61(5), 1101-1118.

- Santos, P. H., Neves, S. M., Sant'Anna, D. O., De Oliveira, C. H., & Carvalho, H. D. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. *Journal of cleaner production*, 212, 119-138.
- Sekulova, F., Anguelovski, I., Kiss, B., Kotsila, P., Baró, F., Palgan, Y. V., & Connolly, J. (2021). The governance of nature-based solutions in the city at the intersection of justice and equity. *Cities*, 112, 103136.
- Srdjevic, B., Srdjevic, Z., & Lakicevic, M. (2019). Urban greening and provisioning of ecosystem services within hesitant decision making framework. *Urban Forestry & Urban Greening*, 43, 126371.
- Wink Junior, M. V., dos Santos, L. G., Ribeiro, F. G., & da Trindade, C. S. (2024). Natural disasters and poverty: evidence from a flash flood in Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 26(9), 23795-23816.
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and urban planning*, 125, 234-244.

## Considerações finais

Este estudo propôs um modelo de gestão da infraestrutura verde urbana calibrado para a realidade socioecológica de cidades brasileiras. Este integra os serviços ecossistêmicos mais relevantes no contexto nacional com aspectos da vulnerabilidade social. A abordagem desenvolvida é robusta e reprodutível em outros municípios do Sul Global, sendo útil para assistir à tomada de decisão sobre a gestão da infraestrutura verde.

A revisão sistemática da literatura sobre os serviços ecossistêmicos associados a infraestrutura verde nas cidades do Brasil revela um viés predominando a investigação dos serviços de regulação e uma escassez de abordagens multifuncionais. Ao selecionar os indicadores de serviços ecossistêmicos e vulnerabilidade social com base nas produções científicas brasileiras e ponderá-los através da consulta a especialistas, garantimos a relevância e a aplicabilidade do instrumento. A concepção do método, fundamentada em dados geoespaciais, ferramentas e métodos acessíveis, visa democratizar sua aplicação em cidades com diferentes capacidades de governança da infraestrutura verde.

Os diferentes cenários de governança não afetaram o método de priorização da infraestrutura verde proposto. Isto demonstra a reprodutibilidade do método de gestão, mesmo em cenários de governança enfraquecida. Este resultado refutou a hipótese inicial de que a consulta a especialista produziria resultados similares ao cenário de priorização dos serviços ecossistêmicos diretamente relacionados aos extremos climáticos.

A inclusão da vulnerabilidade social como um componente do modelo alinha esta pesquisa à tendência global sobre justiça ambiental e permite a investigação de características ecossistêmicas e sociais baseadas na realidade do Brasil. Os resultados demonstram que, diferentemente de padrões observados em algumas cidades do Norte Global, as populações mais vulneráveis no Brasil tendem a se concentrar em áreas periféricas com maior cobertura vegetal. Contudo, esta proximidade não se traduz em acesso equitativo a todos os serviços ecossistêmicos, principalmente os culturais e de recreação, que se concentram em áreas de menor vulnerabilidade. Essa análise das interações entre os componentes do modelo é uma contribuição original, destacando que a simples presença de elementos da infraestrutura verde não garante a provisão de múltiplos benefícios socioambientais, o que demanda um planejamento estratégico e fundamentado no contexto local. A alocação de novos elementos da infraestrutura verde e a adaptação dos existentes precisam considerar a dinâmica das interações entre os

múltiplos serviços fornecidos pela infraestrutura verde no território, otimizando a provisão dos mesmos.

Futuros estudos devem aprofundar a compreensão sobre a multifuncionalidade das infraestruturas verdes em cidades brasileiras, principalmente no que se refere às interações entre diferentes serviços ecossistêmicos. É igualmente importante avançar na investigação dos efeitos do MAUP, com o objetivo de aprimorar as análises de correlação espacial e na incorporação de outros serviços ecossistêmicos, como segurança alimentar e sequestro de carbono. Outra demanda identificada é o potencial de diferentes tipologias e componentes de infraestrutura verde em ofertar simultaneamente determinados serviços ecossistêmicos. Além disso, a agenda de pesquisa científicas deve ampliar a abrangência geográfica incluindo as cidades de pequeno e médio porte e as macrorregiões menos representadas nos estudos, como o Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

## Referências

- Alizadeh, T., & Prasad, D. (2023). The right to the smart city in the Global South: A research agenda. *Urban Studies*, 61(3), 426-444.
- Derdouri, A., Murayama, Y., Morimoto, T., Wang, R., & Aghasi, N. H. M. (2025). Urban green space in transition: A cross-continental perspective from eight Global North and South cities. *Landscape and Urban Planning*, 253, 105220.
- Devisscher, T., Ordóñez-Barona, C., Dobbs, C., Baptista, M. D., Navarro, N. M., Aguilar, L. A. O., ... & Escobedo, F. J. (2022). Urban forest management and governance in Latin America and the Caribbean: A baseline study of stakeholder views. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127441.
- Dobbs, C., Escobedo, F. J., Clerici, N., de la Barrera, F., Eleuterio, A. A., MacGregor-Fors, I., ... Hernández, H. J. (2019). Urban ecosystem services in Latin America: Mismatch between global concepts and regional realities?. *Urban Ecosystems*, 22, 173-187.
- EPA – United States Environmental Protection Agency. *Environmental Justice*. 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/environmentaljustice>
- European Commission. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the Horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities*. Brussels: European Commission.
- Herath, P., & Bai, X. (2024). Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: Six current and emerging themes. *Sustainability Science*, 1-25.
- Knobel, P., Dadvand, P., & Maneja-Zaragoza, R. (2019). A systematic review of multi-dimensional quality assessment tools for urban green spaces. *Health & place*, 59, 102198.
- Korkou, M., Tarigan, A. K., & Hanslin, H. M. (2023). The multifunctionality concept in urban green infrastructure planning: A systematic literature review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 85, 127975.
- Martini, A., & Biondi, D. (2022). Planejamento da arborização urbana. In M. M. Souza (Coord.), *Arborização urbana: Considerações sobre planejamento, implementação, manejo e gestão* (pp. 101–160). Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)

- Matias, J. L. N., & Jereissati, L. C. (2022). O direito a cidades sustentáveis na ordem jurídica brasileira e o caminho para a urbanização racional. *Revista de Direito da Cidade*, 14(1), 643–672.
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and urban planning*, 147, 38-49.
- Ordóñez, C., Threlfall, C. G., Kendal, D., Hochuli, D. F., Davern, M., Fuller, R. A., ... & Livesley, S. J. (2019). Urban forest governance and decision-making: A systematic review and synthesis of the perspectives of municipal managers. *Landscape and Urban Planning*, 189, 166-180.
- Sekulova, F., Anguelovski, I., Kiss, B., Kotsila, P., Baró, F., Palgan, Y. V., & Connolly, J. (2021). The governance of nature-based solutions in the city at the intersection of justice and equity. *Cities*, 112, 103136.
- Silva, C. S., Viegas, I., Panagopoulos, T., & Bell, S. (2018). Environmental justice in accessibility to green infrastructure in two European cities. *Land*, 7(4), 134.
- UN-Habitat. (2022). *Envisaging the future of cities*. In *World Cities Report 2022* (p. 42). United Nations Human Settlements Programme.  
[https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr\\_2022.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf)
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’. *Landscape and urban planning*, 125, 234-244.

## Apêndice

Apêndice Quadro 1: Artigos selecionados na revisão sistemática de literatura. Id. – Idioma; E – Inglês; P – Português; S – Espanhol; Mult – aborda a multifuncionalidade?; VulnE – aborda vulnerabilidade socioeconômica?

Artigo	Id.	Ano	Nível geográfico	Mult	Vuln	Seção CICES	Classe CICES
Butterfly Communities of Urban Forest Fragments in Campinas, São Paulo, Brazil: Structure, Instability, Environmental Correlates, and Conservation	E	2002	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Sleeping sites of common marmosets ( <i>Callithrix jacchus</i> ) in defaunated urban forest fragments: a strategy to maximize food intake	E	2005	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Pollen and nectar harvesting by the stingless bee <i>Melipona quadrifasciata anthidioides</i> (Apidae: Meliponini) in an urban forest fragment in Southeastern Brazil	E	2007	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Do wooded streets provide connectivity for bats in an urban landscape?	E	2009	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Relationship between land use/cover and surface temperatures in the urban agglomeration of Cuiabá-Várzea Grande, Central Brazil	E	2011	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Florística e padrões estruturais de um fragmento florestal urbano, região metropolitana de Porto Alegre, RS, Brasil	P	2011	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Recursos ecológicos utilizados por las especies de <i>Xylocopa</i> (Apidae: Xylocopini) en el área urbana	S	2011	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Cultivo de Espécies Alimentares em Quintais Urbanos de Rio Branco, Acre, Brasil	P	2011	Cidade	Não	Não	Provisão	1.1.1.1
The potential of the soil seed bank for the regeneration of a tropical urban forest dominated by bamboo	E	2011	Área verde	Não	Não	Provisão	1.2.1.1
Borboletas (Lepidoptera: Papilionoidea e Hesperioidea) de um parque urbano em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil	P	2012	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Use of passive biomonitoring to evaluate the environmental impact of emissions from cement industries in Sergipe State, northeast Brazil	E	2012	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Changes in bird species richness through different levels of urbanization: Implications for biodiversity conservation and garden design in Central Brazil	E	2012	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Ethnobotany, Availability, and Use of Lianas by the Kaingang People in Suburban Forests in Southern Brazil	E	2013	Área verde	Não	Não	Provisão	1.1.5.2
Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions	E	2013	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2

Ecologia da paisagem de remanescentes florestais na bacia hidrográfica do Ribeirão das Pedras - Campinas-SP	P	2013	Bacia hidrográfica	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Disponibilidade de frutos de <i>Michelia champaca</i> L. (Magnoliaceae) e seu consumo por aves na área urbana de Uberlândia, MG	P	2013	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Orchid Bees of forest fragments in Southwestern Amazonia	E	2013	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Contributions of the old urban homegardens for food production and consumption in Rio Claro, Southeastern Brazil	E	2013	Cidade	Não	Não	Provisão	1.1.1.1
New insights on the rarity of the vulnerable Cinereous Warbling-finch (Aves, Emberizidae) based on density, home range, and habitat selection	E	2014	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Morphometric differences of <i>Microgramma squamulosa</i> (Kaulf.) de la Sota (Polypodiaceae) leaves in environments with distinct atmospheric air quality	E	2014	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Spatiotemporal distribution of floral resources in a Brazilian city: Implications for the maintenance of pollinators, especially bees	E	2014	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Storage measures as compensatory techniques for urban lowlands flood control	E	2014	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Effects of Forest Fragmentation on Genetic Diversity of the Critically Endangered Primate, the Pied Tamarin ( <i>Saguinus bicolor</i> ): Implications for Conservation	E	2015	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Multi-Temporal Patterns of Urban Heat Island as Response to Economic Growth Management	E	2015	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Retrofitting Housing with Lightweight Green Roof Technology in Sydney, Australia, and Rio de Janeiro, Brazil	E	2015	Experimento	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Good neighbours: distribution of black-tufted marmoset ( <i>Callithrix penicillata</i> ) in an urban environment	E	2015	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Flowering Phenology and Floral Visitors in Distylous Populations of <i>Psychotria carthagenensis</i> (Rubiaceae) in Brazilian Cerrado	E	2016	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Participative mapping of cultural ecosystem services in Pedra Branca State Park, Brazil	E	2016	Área verde	Sim	Não	Cultural	3.1.1.1; 3.1.1.2; 3.1.2.1; 3.1.2.2; 3.1.2.3; 3.1.2.4; 3.2.1.1; 3.2.1.2; 6.1.1.1; 6.2.2.1
Daily periodic temperature variation in the city of Curitiba, Paraná	E	2016	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2



Biogeochemical coefficients as indicators of nutrient element sorption in jerivá ( <i>Syagrus romanzoffiana</i> (Chamisso) Glassman), a palm tree species from Brazil	E	2016	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Green remnants are hotspots for bat activity in a large Brazilian urban area	E	2016	Região metropolitana	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Atmospheric metal pollutants and environmental injustice: A methodological approach to environmental risk analysis using fuzzy logic and tree bark	E	2016	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Equitable distribution of open space: Using spatial analysis to evaluate urban parks in Curitiba, Brazil	E	2016	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.3
The influence of atmospheric particles on the elemental content of vegetables in urban gardens of Sao Paulo, Brazil	E	2016	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Spatial and temporal distribution of urban heat islands	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
The Relationship Between Humans and Capuchins ( <i>Sapajus</i> sp.) in an Urban Green Area in Brazil	E	2017	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção; Cultural	2.2.2.3; 3.1.1.1; 3.1.1.2
Diagnóstico da poluição atmosférica em regiões sem redes convencionais de monitoramento da qualidade do ar: estudo em uma pequena cidade do Paraná, Brasil	P	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Urban parks can maintain minimal resilience for Neotropical bird communities	E	2017	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Richness, coverage and concentration of heavy metals in vascular epiphytes along an urbanization gradient	E	2017	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
The Urban Heat Island Effect and the Role of Vegetation to Address the Negative Impacts of Local Climate Changes in a Small Brazilian City	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Quantifying the effect of waterways and green areas on the surface temperature	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Variações espaciais das temperaturas noturnas em Presidente Prudente-SP em episódios de verão	P	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície urbana do município de Humaitá -Sul do Amazonas	P	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Thermal Comfort Level Assessment in Urban Area of Petrolina-PE County, Brazil	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Structure and floristic composition as indicators of restoration success in an urban riparian forest along the Das Velhas river in Southeastern Brazil	E	2017	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.1
Acúmulo de particulados atmosféricos e sua influência nos pigmentos	P	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2

fotossintéticos de duas espécies arbóreas na cidade de Patos-PB, Brasil							
Urban forest components influencing microclimate and cooling potential	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Effectiveness of traffic-related elements in tree bark and pollen abortion rates for assessing air pollution exposure on respiratory mortality rates	E	2017	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Functional connectivity in urban landscapes promoted by Ramphastos toco (Toco Toucan) and its implications for policy making	E	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.2; 2.2.2.3
Bird-flower interactions in an urban area: Ceiba pubiflora provides nectar and promotes biodiversity in the city	E	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil	E	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.2
Exploring the potential of urban park size for the provision of ecosystem services to urban centres: A case study in São Paulo, Brazil	E	2018	Cidade	Sim	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3; 2.2.6.1; 2.2.6.2
How does landscape anthropization affect the myrmecofauna of urban forest fragments?	E	2018	Cidade	Sim	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Effects of fragments and landscape characteristics on the orchid bee richness (Apidae: Euglossini) in an urban matrix, southwestern Amazonia	E	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Surviving in the urban-rural interface: Feeding and ranging behavior of brown howlers (Alouatta guariba clamitans) in an urban fragment in southern Brazil	E	2018	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil	E	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Green roof: simulation of energy balance components in Recife, Pernambuco state, Brazil	E	2018	Experimento	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Comparing costs and supply of supporting and regulating services provided by urban parks at different spatial scales	E	2018	Cidade	Sim	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.1; 2.2.6.2; 2.2.1.3
Soil Biodiversity in Urban Forests as a Consequence of Litterfall Management: Implications for São Paulo's Ecosystem Services	E	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Activity patterns of frugivorous phyllostomid bats in an urban fragment in southwest Amazonia, Brazil	E	2018	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Ecosystem-based adaptation to climate change: defining hotspot municipalities for policy design and implementation in Brazil	E	2018	País	Não	Sim	Provisão	1.3
A influência das diferentes tipologias de floresta urbana no microclima do entorno imediato	P	2018	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Urban ecological infrastructure: The importance of vegetation cover in the	E	2019	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.1.2; 2.2.1.3

control of floods and landslides in Salvador / Bahia, Brazil							
Polycyclic aromatic hydrocarbons in tree barks, gaseous and particulate phase samples collected near an industrial complex in São Paulo (Brazil)	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
An integrated quantitative framework to support design of resilient alternatives to manage urban flood risks	E	2019	Bacia hidrográfica	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Impact of urban decadal advance on land use and land cover and surface temperature in the city of Maceió, Brazil	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Assessment of the regional fossil fuel CO <sub>2</sub> distribution through $\Delta^{14}\text{C}$ patterns in ipê leaves: The case of Rio de Janeiro state, Brazil	E	2019	Estado	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.1
Urbanization effects on dung beetle assemblages in a tropical city	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Food security and edible plant cultivation in the urban gardens of socially disadvantaged families in the municipality of Viçosa, Minas Gerais, Brazil	E	2019	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.1.1.1
Spatial modeling of an urban Brazilian heat island in a tropical continental climate	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Green areas and quality of life: use and environment perception of an urban park in São Paulo city, Brazil	P; E	2019	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.1.1; 3.1.1.2; 6.1.1.1
Devising Urban Biodiversity Habitat Provision Goals: Ecosystem Services Analysis	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Analysis of the environmental thermal comfort conditions in public squares in the semiarid region of northeastern Brazil	E	2019	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Identifying solar access effects on visitors' behavior in outdoor resting areas in a subtropical location: a case study in Japan Square in Curitiba, Brazil	E	2019	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Impact of the Urbanisation Process in the Availability of Ecosystem Services in a Tropical Ecotone Area	E	2019	Bacia hidrográfica	Sim	Não	Regulação e manutenção; Cultural; Provisão	1.1.1.1; 1.1.1.2; 1.1.3.1; 1.1.5.1; 1.1.5.2; 1.1.6.1; 1.2.1.1; 1.2.1.2; 1.2.2.1; 2.1.1.1; 2.1.1.2; 2.2.1.1; 2.1.2.2; 2.2.1.3; 2.2.2.1; 2.2.2.3; 2.2.3.1; 2.2.4.1; 2.2.4.2; 2.2.6.2;

							3.1.1.1; 3.1.1.2; 3.1.2.4
Green and socioeconomic infrastructures in the Brazilian Amazon: implications for a changing climate	E	2019	Bioma	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Dendrochronology and dendroclimatology of <i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) exposed to urban pollution in Rio de Janeiro city, Brazil	E	2019	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Plant-hummingbird interaction networks in urban areas: Generalization and the importance of trees with specialized flowers as a nectar resource for pollinator conservation	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Planejamento urbano sustentável: um estudo para implantação de infraestrutura verde no Bairro Bancários, João Pessoa-PB, Brasil	P	2019	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção; Provisão	1.3; 2.2.2.3
Cobertura Vegetal Na Região Central Das Capitais Brasileiras	P	2019	País	Não	Não	Provisão	1.3
Balanço de carbono em cidades da Amazônia: estudo de caso em Belém, Brasil	P	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.1
Soil fertility and litterfall assessment in a peri-urban forest of São Paulo, SP: understanding for urban green areas management	E	2019	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Percepção da população sobre espécies herbáceas, suas interações ecológicas e serviços ecossistêmicos em sistemas seminaturais de João Pessoa (Brasil)	P	2019	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.2
Green or blue spaces? Assessment of the effectiveness and costs to mitigate the urban heat island in a Latin American city	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Selecting lichen functional traits as ecological indicators of the effects of urban environment	E	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2; 2.1.1.2
Geotecnologias Aplicadas à Análise de Ilhas de Calor de Superfície em Cidades do Interior do Estado de São Paulo	P	2019	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Land as a sustainable resource in city planning: The use of open spaces and drainage systems to structure environmental and urban needs	E	2020	Bacia hidrográfica	Sim	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3; 2.2.2.3
Multicriteria GIS-Based Approach in Priority Areas Analysis for Sustainable Urban Drainage Practices: A Case Study of Pato Branco, Brazil	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Towards urban resilience through Sustainable Drainage Systems: A multi-objective optimisation problem	E	2020	Bacia hidrográfica	Sim	Não	Regulação e manutenção; Provisão	4.2.1.1; 4.2.2.1; 2.2.5.1; 2.2.6.2; 2.2.2.3; 2.2.1.3
Urban gardening and neglected and underutilized species in Salvador, Bahia, Brazil	E	2020	Cidade	Não	Não	Provisão; Regulação e manutenção	1.1.1.1; 1.1.5.1; 2.2.2.3

Urban green areas retain just a small fraction of tree reproductive diversity of the Atlantic forest	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Spatial-temporal variability of metal pollution across an industrial district, evidencing the environmental inequality in São Paulo	E	2020	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Proposal for Implementation of Green Roof Project Using the Wetland Technique	E	2020	Experimento	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3; 2.2.5.1
How Does Habitat Anthropization Influence Lizard Diets? An Analysis Comparing Two Populations of <i>Tropidurus torquatus</i> (Iguania)	E	2020	Área verde	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Impacto de características urbanas e industriais na temperatura da superfície terrestre: evidências de índices térmicos de satélite	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
City sloths and marmosets in Atlantic forest fragments with contrasting levels of anthropogenic disturbance	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Spatial and temporal variation of potential resource availability provided by street trees in southeastern Brazil	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.2; 2.2.2.3
Drivers of fish assemblage structures in a Neotropical urban watershed	E	2020	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
The analysis of green roof's runoff volumes and its water quality in an experimental study in Porto Alegre, Southern Brazil	E	2020	Experimento	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
ESDA (Exploratory Spatial Data Analysis) of Vegetation Cover in Urban Areas—Recognition of Vulnerabilities for the Management of Resources in Urban Green Infrastructure	E	2020	Bairro	Não	Sim	Provisão	1.3
Assessment of the hydrological response of an urban watershed to rainfall-runoff events in different land use scenarios – Belo Horizonte, MG, Brazil	E	2020	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Land-Use and Legislation-Based Methodology for the Implementation of Sustainable Drainage Systems in the Semi-Arid Region of Brazil	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Modelagem espaço-temporal de ilhas de calor urbana e correlação com variáveis-Montes Claros, MG, Brasil	P	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
A importância das árvores na cidade de LAVRAS, Minas Gerais, Brasil. Perspectivas de conforto térmico-visual e pertencimento afetivo urbano	P	2020	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Reforest or perish: ecosystem services provided by riparian vegetation to improve water quality in an urban reservoir (São Paulo, Brazil)	E	2020	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.5.1
Land use history drives differences in functional composition and losses in functional diversity and stability of Neotropical urban forests	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
The influence of street trees on urban microclimate	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2

Índices de (des) conforto humano em um município de clima semiárido	P	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Thermal comfort provided by street trees in cities	E	2020	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Índice de áreas verdes como estratégia ao desenvolvimento urbano sustentável das Regiões Norte, Noroeste e Meia Ponte de Goiânia-GO, Brasil	P	2020	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.3
Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area	E	2020	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Disentangling associations between vegetation greenness and dengue in a Latin American city: Findings and challenges	E	2021	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.3.2
Green and Compact: A Spatial Planning Model for Knowledge-Based Urban Development in Peri-Urban Areas	E	2021	Experimento	Sim	Não	Provisão	1.3
Vulnerability to biological invasion of <i>Hovenia dulcis</i> Thunb. in green areas of Curitiba, Paraná, Brazil	E	2021	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Analysis of environmental degradation in Maceió-Alagoas, Brazil via orbital sensors: A proposal for landscape intervention based on urban afforestation	E	2021	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2; 2.2.6.1
Ecological determinants of interactions as key when planning pollinator-friendly urban greening: A plant-hummingbird network example	E	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: Life cycle assessment of low impact development practices	E	2021	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Urban Gardens and Soil Compaction: a Land Use Alternative for Runoff Decrease	E	2021	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Urban adaptation index: assessing cities readiness to deal with climate change	E	2021	Estado	Sim	Sim	Provisão; Regulação e manutenção	1.1.1.1; 1.3; 2.1.1.2; 2.2.3.2; 2.2.1.3; 2.2.2.3
Modeling the urban heat island at a winter event in Três Lagoas, Brazil	E	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations	E	2021	Experimento	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.6.2
The influence of urban, socio-economic, and eco-environmental aspects on COVID-19 cases, deaths and mortality: A multi-city case in the Atlantic Forest, Brazil	E	2021	Bioma	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.3.2
Characteristics of residential backyards that contribute to conservation and diversity of urban birds: A case study in a Southeastern Brazilian city	E	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3

Urban forest and per capita income in the mega-city of Sao Paulo, Brazil: A spatial pattern analysis	E	2021	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.3
Greenspace sites conserve taxonomic and functional diversity of dung beetles in an urbanized landscape in the Brazilian Cerrado	E	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Environmental injustices on green and blue infrastructure: Urban nexus in a macrometropolitan territory	E	2021	Estado	Sim	Sim	Provisão	1.3; 1.1.1.1; 1.1.1.3; 1.1.3.1; 1.1.5.1; 4.2.1.1; 4.2.1.3; 4.2.2.1
Classes of protection in urban forest fragments are ineffective in structuring butterfly assemblages: landscape and forest structure are far better predictors	E	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Green space configuration and its impact on human behavior and URBAN environments	E	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Diversity and microhabitat use of benthic invertebrates in an urban forest stream (Southeastern Brazil)	E	2021	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Urban environmental quality and wellbeing in the context of incomplete urbanisation in Brazil: Integrating directly experienced ecosystem services into planning	E	2021	Bairro	Sim	Sim	Regulação e manutenção; Provisão; Cultural	1.1.1.1; 1.1.1.2; 1.1.1.3; 1.1.3.1; 1.1.5.1; 1.1.5.2; 1.1.5.3; 1.1.6.1; 2.1.1.2; 2.1.2.2; 2.1.2.3; 2.2.1.1; 2.2.1.3; 2.2.2.3; 2.2.4.1; 2.2.4.2; 2.2.5.1; 2.2.6.2; 2.2.6.1; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 3.1.2.2; 4.2.1.1; 4.2.2.1; 4.3.1.2; 4.3.2.4
O desenvolvimento sócio-espacial da agricultura urbana e periurbana (AUP) na cidade de Fortaleza, Ceará: análise das ações institucionais locais	P	2021	Cidade	Não	Não	Provisão	1.1.1.1
Plant-bird mutualistic interactions can contribute to the regeneration of forest and non-forest urban patches in the Brazilian Cerrado	E	2021	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção; Provisão	2.2.2.3; 1.1.5.1

Planejamento Ambiental Urbano: a Relação entre a Cobertura Vegetal e Temperatura Superficial na Cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil	P	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Análise Temporal de Ilhas de Calor Através da Temperatura de Superfície e do Índice de Vegetação em Recife-PE, Brasil	P	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Influence of Urban Landscape on Ants and Spiders Richness and Composition in Forests	E	2021	Região metropolitana	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Macroinvertebrates responses based on chemical and physical variables in urban streams	E	2021	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Infraestrutura verde para monitorar e minimizar os impactos da poluição atmosférica	P	2021	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Manejo de Bacias Hidrográficas e sua influência sobre os Recursos Hídricos: Estudo de Caso na Bacia Hidrográfica do Rio Benfica, Região Metropolitana de Belém/PA	P	2021	Região metropolitana	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
PM2.5 removal by urban trees in areas with different forestry conditions in São Paulo using a big-leaf modeling approach	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Social inequality deeply affects people's perception of ecosystem services and disservices provided by street trees	E	2022	Cidade	Sim	Sim	Provisão	1.3
A planning framework to guide the creation of urban green spaces using existing forest fragments in the urban territory: A case study from Foz do Iguaçu, Brazil	E	2022	Cidade	Não	Não	Provisão	1.3
Effects of Local Vegetation and Regional Controls in Near-Surface Air Temperature for Southeastern Brazil	E	2022	Macrorregião	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Methodological framework for quantitative assessment of urban development projects considering flood risks and city responses	E	2022	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
A year-assessment of the suitability of a green façade to improve thermal performance of an affordable housing	E	2022	Experimento	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Valuation of cultural ecosystem services in urban parks with different social contexts in the city of Recife (PE), Brazil	E	2022	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.1.1; 3.1.1.2; 6.1.1.1
How can forest fragments support protected areas connectivity in an urban landscape in Brazil?	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Modular Design of Bioretention Systems for Sustainable Stormwater Management under Drivers of Urbanization and Climate Change	E	2022	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Balanced spatial distribution of green areas creates healthier urban landscapes	E	2022	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.3.2
The impact of urban environmental exposures on health: An assessment of	E	2022	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.3.2



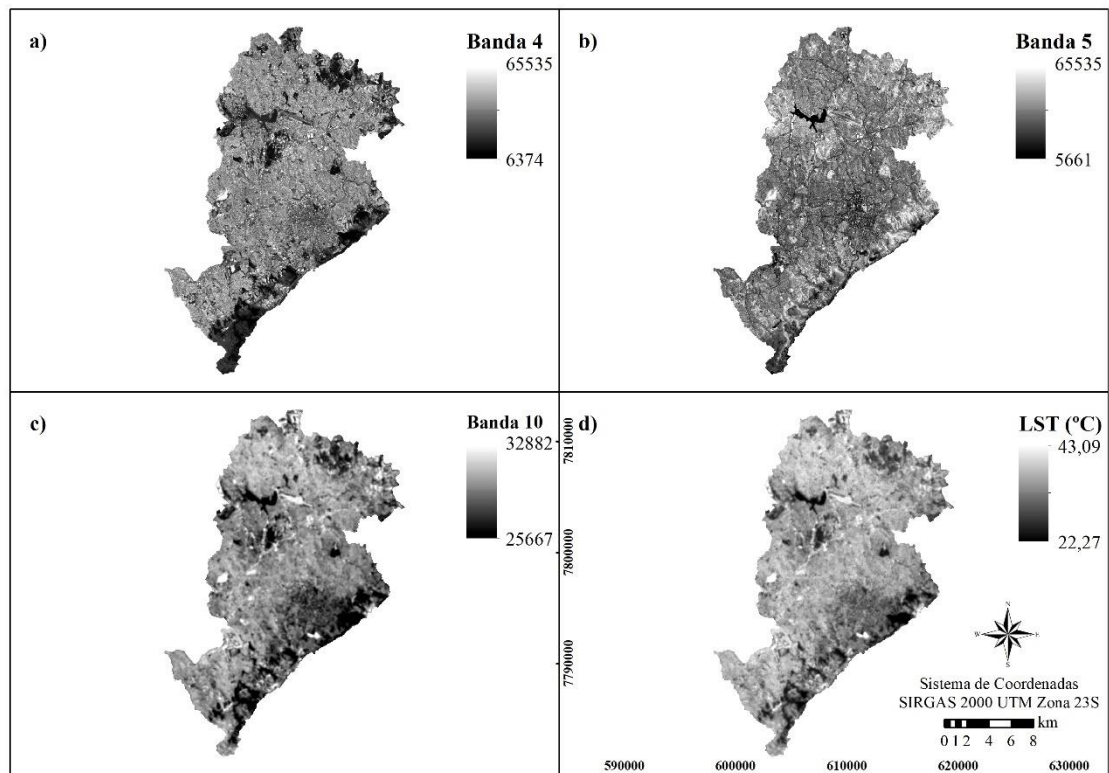
the attributable mortality burden in Sao Paulo city, Brazil							
Multicriteria Spatial Modeling: Methodological Contribution to the Analysis of Atmospheric and Surface Heat Islands in Presidente Prudente, Brazil	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Urbanization-induced impacts on heat-energy fluxes in tropical South America from 1984 to 2020: The Metropolitan Area of Rio de Janeiro/Brazil	E	2022	Região metropolitana	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Evaluating the effectiveness of the Water Resources Master Plan in Campinas, Brazil	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção; Provisão	2.2.5.1; 4.2.1.1; 4.2.1.2; 4.2.2.1; 4.2.2.2; 2.2.1.3
Urban Gardens' Potential to Improve Stormwater Management: A Comparative Analysis among Urban Soils in Sorocaba, São Paulo, Brazil	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Soluções baseadas na natureza na formação de corredor ecológico em Pindamonhangaba, São Paulo, Brasil	P	2022	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Isoprene in urban Atlantic forests: Variability, origin, and implications on the air quality of a subtropical megacity	E	2022	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Ecosystems Services and Green Infrastructure for Respiratory Health Protection: A Data Science Approach for Paraná, Brazil	E	2022	Estado	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.3.2
Water dynamics and blue-green infrastructure (BGI): Towards risk management and strategic spatial planning guidelines	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Two in one: the little bat that pollinates and disperses plants at an urban site in Southeastern Brazil	E	2022	Bairro	Sim	Não	Regulação e manutenção; Provisão	1.1.1.1; 1.1.5.1; 2.2.2.1; 2.2.2.2; 2.2.2.3
Wealth and Education Influences on Spatial Pattern of Tree Planting in a Tropical Metropolis in Brazil	E	2022	Cidade	Sim	Sim	Provisão; Regulação e manutenção	1.3; 2.2.3.2
Adapting the Olgyay bioclimatic chart to assess local thermal comfort levels in urban regions	E	2022	Bairro	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Density of marmosets in highly urbanised areas and the positive effect of arboreous vegetation	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Local Society Perception on Ecosystem Services as an Adaptation Strategy in Urban Stream Recovery Programs in the City of São Paulo, Brazil	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Estoque de carbono e diagnóstico físico e químico do solo de praças urbanas no município de Tatuí (São Paulo)	P	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2; 2.2.4.2; 2.2.6.1
The Effect of Urban Green Spaces on Reduction of Particulate Matter Concentration	E	2022	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2

PlasME model of plant selection for green infrastructure	E	2022	Experimento	Sim	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2; 2.2.1.1; 2.2.1.3; 2.2.6.2
Blue-green infrastructure distribution in Piauí, Brazil	E	2022	Estado	Não	Sim	Provisão	1.3
Medium- and large-sized mammals from Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica, Rio de Janeiro, south-eastern Brazil	E	2022	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Green roof infrastructure outperforms grey technology in flood mitigation in São Paulo's urbanized region	E	2023	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Landscape ecology and urban spatial configuration: Exploring a methodological relationship. Application in Pelotas, Brazil	E	2023	Setor	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Using a Novel Green Index to Support Ecosystem Services in a Megacity	E	2023	Cidade	Não	Não	Provisão	1.3
A methodological framework to create an urban greenway network promoting avian connectivity: A case study of Curitiba City	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
The impact of green spaces on the perception and well-being of the academic population in face of the COVID-19 pandemic in the Amazon and Southeast Brazil	E	2023	Cidade	Sim	Não	Regulação e manutenção; Cultural	2.2.6.2; 3.1.1.1; 3.1.1.2
Associations between the perception of ecosystem services and well-being in urban parks	E	2023	Cidade	Sim	Não	Cultural; Regulação e manutenção	2.2.6.2; 2.1.2.2; 2.2.1.3; 2.1.1.2; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 6.1.1.1
Surrounded by concrete: genetic isolation of <i>Tillandsia recurvata</i> L. in an urban landscape in southeastern Brazil	E	2023	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Effects and productive performance of urban agriculture on collective and environmental health in the city of Rio de Janeiro, Brazil	P; E	2023	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.1.1.1
Public garden squares and mean monthly per capita income in Curitiba, PR, Brazil: inequalities in the distribution and access of benefits generated by nature	E	2023	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.3
The ecological role and potential impact of an alien tree highly attractive to native nectar-feeding birds in urban areas	E	2023	Cidade	Não	Não	Provisão; Regulação e manutenção	2.2.2.3; 1.1.1.1
Spatio-temporal distribution of benthic fauna in mangrove areas in the Bay of Vitória estuary, Brazil	E	2023	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Nationwide urban tree canopy mapping and coverage assessment in Brazil from high-resolution remote sensing images using deep learning	E	2023	País	Não	Sim	Provisão	1.3
Green roofs are effective in cooling and mitigating urban heat islands to improve human thermal comfort	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2

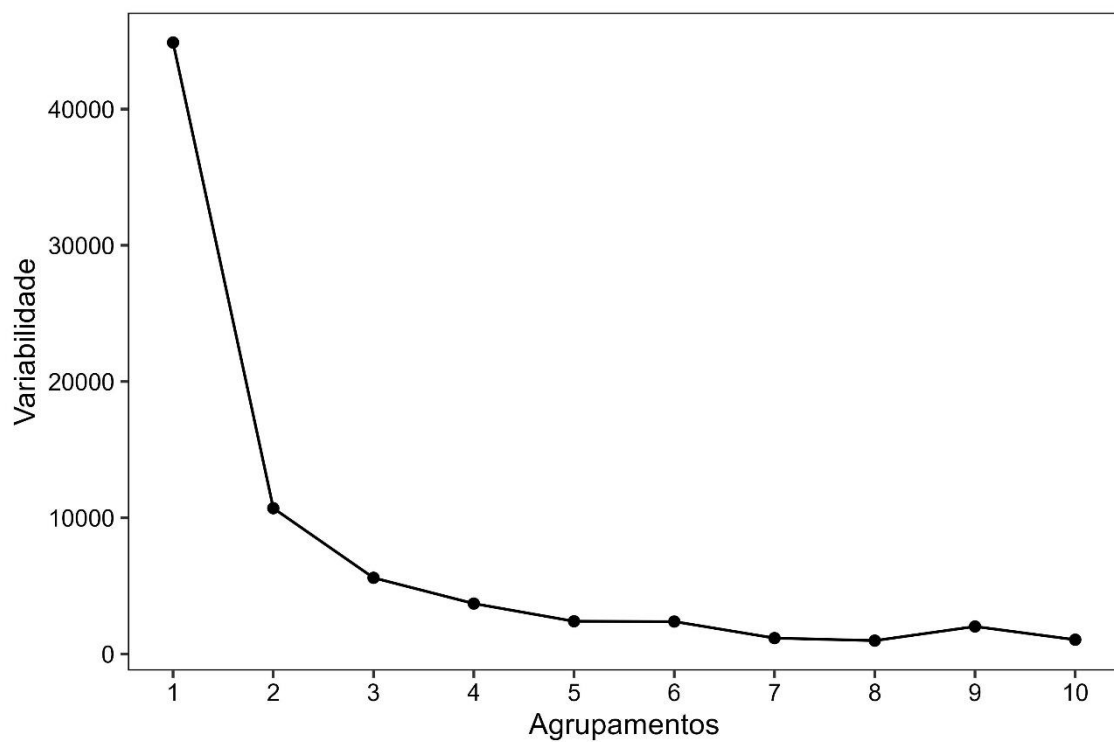
Urban greening dynamics in a Brazil Central city as a subsidy for public policies	E	2023	Cidade	Sim	Não	Provisão; Regulação e manutenção	1.1.1.1; 1.1.5.1; 2.2.2.1; 2.2.2.2
Leishmania infantum infecting the carnivore Nasua nasua from urban forest fragments in an endemic area of visceral leishmaniasis in Brazilian Midwest	E	2023	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.1
Increase in size and shrub cover improves bird functional diversity in Neotropical urban green spaces	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
An estimation of ecosystem services provided by urban and peri-urban forests: a case study in Juiz de Fora, Brazil	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2; 2.2.6.1
Concrete survivors: the herpetofauna of an urban green area over 100 years of increasing urbanization	E	2023	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Medium to large-sized mammals of an urban protected area and its ecological corridor in Rio de Janeiro City, Brazil	E	2023	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Antecedents of urban trees to walkability: an exploratory study in Brazil	E	2023	Bairro	Não	Sim	Cultural	3.1.1.1
(In)Visible factors affecting people in the spatial appropriation process of urban green spaces in Brazil	E	2023	Cidade	Não	Não	Cultural	3.1.2.3
Assessment of four urban forest as environmental indicator of air quality: a study in a Brazilian megacity	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Spatiotemporal assessment of land surface temperature and vegetation in tropical urban areas	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
The role of tree landscape to reduce effects of urban heat islands: a study in two Brazilian cities	E	2023	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.6.2
A probabilistic approach to stormwater runoff control through permeable pavements beneath urban trees	E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
Green Infrastructure as a solution to mitigate the effects of climate change in a coastal area of social vulnerability in Fortaleza (Brazil)	E	2023	Bairro	Sim	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3; 2.2.6.2
Tijuca forest contribution to the improvement of air quality and wellbeing of citizens in the city of Rio de Janeiro, Brazil	E	2023	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Non-native plants and illegitimate interactions are highly relevant for supporting hummingbird pollinators in the urban environment	E	2023	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.1; 2.2.2.3
Backyards Are a Way to Promote Environmental Justice and Biodiversity Conservation in Brazilian Cities	E	2023	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção; Provisão	1.3; 2.2.2.3
Urban Forests, Territorial Planning and Political Stability: Key Factors to Face Climate Change in a Megacity	E	2023	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção; Provisão	1.3; 2.2.6.2
Urban green spaces and social vulnerability in Brazilian metropolitan regions: Towards environmental justice	E	2023	Região metropolitana	Não	Sim	Provisão	1.3

Urban Green Spaces in Brazil: Challenges and Opportunities in the Context of the COVID-19 Pandemic	E	2023	Região metropolitana	Não	Não	Provisão; Cultural	1.3; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 6.1.1.1
Natural regeneration and conservation status of the tree community of forest remnants in urban parks in southern Brazil	P; E	2023	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Size, density, ecological groups, and dispersal syndromes of the seed rain in urban atlantic forest fragments in northeastern Brazil	E	2023	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Site selection for nature-based solutions for stormwater management in urban areas: An approach combining GIS and multi-criteria analysis	E	2024	Bacia hidrográfica	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.1.3; 5.2.1.2
Contributions to a global understanding of socioenvironmental justice related to urban forest: Trends from Brazilian cities in the southeastern Paraná State	E	2024	Estado	Sim	Sim	Provisão; Regulação e manutenção; Cultural	1.1.1.3; 1.1.5.3; 2.1.1.2; 2.2.6.1; 2.2.6.2; 2.2.2.3; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 6.1.1.1
Plant–hummingbird interaction networks in an urban area: a generalist species as the protagonist in mutualistic and agonistic interactions	E	2024	Área verde	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Ecosystem services provided by green areas and their implications for human health in Brazil	E	2024	País	Sim	Não	Provisão; Regulação e manutenção; Cultural	1.3; 2.1.1.1; 2.2.6.2; 2.2.3.2; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 3.1.2.1; 3.1.2.2; 3.1.2.3; 3.1.2.4; 3.2.1.1; 3.2.1.2; 3.2.1.3; 3.2.2.1; 3.2.2.2; 6.1.1.1; 6.1.2.1; 6.2.1.1; 6.2.2.1
Sustainable Urbanization in Valley-Bottom Areas in Urban Settings: The Case of the Jaguaré Stream Basin, São Paulo, Brazil	E	2024	Bacia hidrográfica	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3; 2.2.5.1; 5.2.1.2
Land Cover Patterns of Urban Lots and Their Contribution to Ecological Functions	E	2024	Cidade	Sim	Não	Provisão; Regulação e manutenção	4.2.1.1; 4.2.2.1; 2.2.1.3; 2.2.6.2; 2.1.1.2; 2.2.6.1; 2.2.1.1; 2.2.4.1;

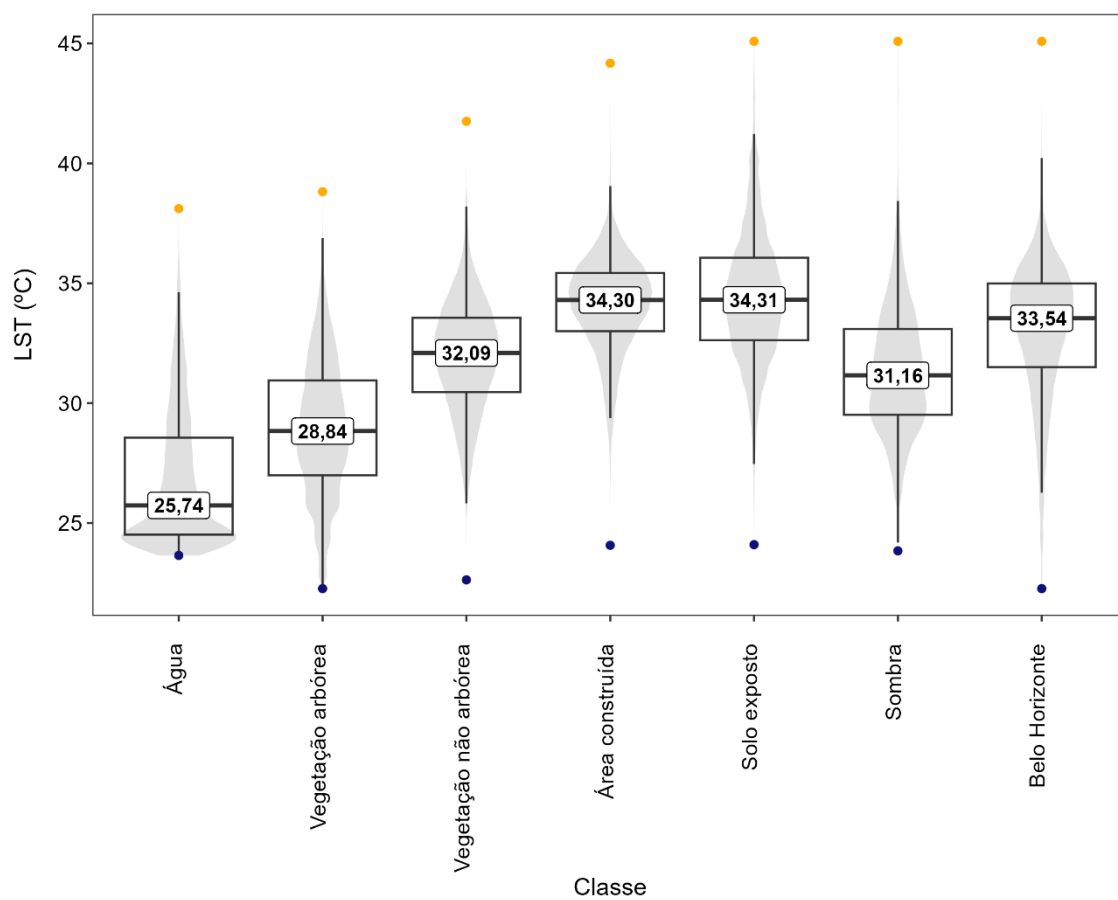
							2.2.2.3
Carbon and nitrogen stock in soils of subtropical urban forests: Isotopic $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ indicators for nature-based solutions in a megacity	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	5.1.1.3; 5.2.2.1; 2.2.4.2
Bird Richness and Ecosystems Services across an Urban to Natural Gradient in South-Eastern Brazil: Implications for Landscape Planning and Future Scenarios	E	2024	Bacia hidrográfica	Sim	Não	Regulação e manutenção; Cultural	2.2.2.3; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 2.2.6.2; 2.1.1.2
Impacts of urban landscape pattern changes on land surface temperature in Southeast Brazil	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Improving indoor environmental quality in an affordable house by using a vegetated wall: A case study in subtropical Brazil	E	2024	Experimento	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Mangrove preservation and urban air pollution in Aracaju, Northeast Brazil	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.1.1.2
Richness of Native and Exotic Plants in Parks in São Paulo is Determined by Urban Park Size and Age	E	2024	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Relación espacio-temporal de la temperatura superficial con el tipo de cobertura y uso del suelo, en los barrios del municipio de Paracatu, Mina Gerais, Brasil	S	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.6.2
Spatiotemporal monitoring of subtropical urban forests in mitigating air pollution: Policy implications for nature-based solutions	E	2024	Cidade	Não	Sim	Regulação e manutenção	2.1.1.2
The street tree distribution across a streetscape reflects the social inequality of Latin American cities	E	2024	Cidade	Não	Sim	Provisão	1.3
Urban biodiversity suitability index: decoding the relationships between cities and birds	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
A methodological framework for prioritizing habitat patches in urban ecosystems based on landscape functional connectivity	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Valuing urban green spaces for enhanced public health and sustainability: A study on public willingness-to-pay in an emerging economy	E	2024	Região metropolitana	Não	Não	Regulação e manutenção; Cultural	2.2.3.2; 3.1.1.1; 3.1.1.2; 6.1.1.1
Methodological proposal for an ecological corridor and financial cost estimate: a way to help conserve biodiversity	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.3
Identifying potential uses for green roof discharge based on its physical–chemical-microbiological quality	E	2024	Experimento	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.1.3
The role of feeding roosts in seed dispersal service bats provide in urban areas	E	2024	Cidade	Não	Não	Regulação e manutenção	2.2.2.2; 2.2.2.3
Safety in Public Open Green Spaces in Fortaleza, Brazil: A Data Analysis	E	2024	Cidade	Não	Sim	Cultural	3.1.2.1; 3.1.2.3; 3.2.2.2;



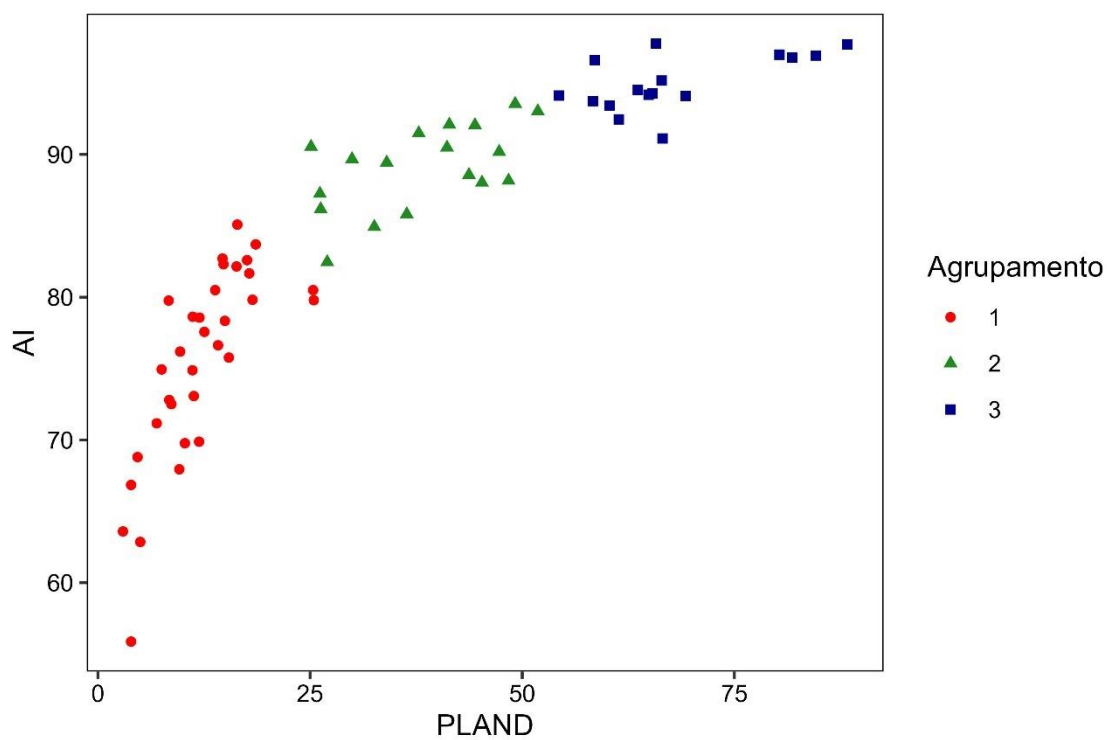
Apêndice Figura 1: Bandas a) do vermelho (B4); b) do infravermelho próximo (B5) e; c) termal (B10) do Landsat-8 utilizadas para a recuperação da Temperatura da Superfície Terrestre (LST); d) LST, em graus Celsius



Apêndice Figura 2: Método do cotovelo aplicado à análise de k-médias



Apêndice Figura 3: Distribuição da temperatura da superfície terrestre (LST) por classes de uso e cobertura do solo



Apêndice Figura 4: Agrupamento das bacias hidrográficas com áreas de risco de inundação baseado nos valores das métricas AI e PLAND