



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Tecnologia

**Ana Laura Fragoso Favoreti**

**Avaliação dos serviços ecossistêmicos de regulação  
providos por infraestruturas verdes: um estudo de caso  
em Campinas/SP**

Limeira  
2025

**Ana Laura Fragoso Favoreti**

**Avaliação dos serviços ecossistêmicos de regulação providos por  
infraestruturas verdes: um estudo de caso em Campinas/SP**

Dissertação apresentada à Faculdade de Tecnologia  
da Universidade Estadual de Campinas como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de Mestra  
em Tecnologia, na área de Ambiente.

**Orientador: Prof. Dr. Vitor Eduardo Molina Júnior**  
**Coorientador: Prof. Dr. Felipe Benavente Canteras**

Este trabalho corresponde à versão final da  
Dissertação defendida por Ana Laura Fragoso  
Favoreti e orientada pelo Prof. Dr. Vitor  
Eduardo Molina Júnior.

Limeira  
2025



Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

F279a Favoreti, Ana Laura Fragoso, 1998-  
Avaliação dos serviços ecossistêmicos de regulação providos por  
infraestruturas verdes : um estudo de caso em Campinas/SP / Ana Laura  
Fragoso Favoreti. – Limeira, SP : [s.n.], 2025.

Orientador: Vitor Eduardo Molina Júnior.  
Coorientador: Felipe Benavente Canteras.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas  
(UNICAMP), Faculdade de Tecnologia.

1. Planejamento urbano. 2. Redes neurais (Computação). 3. Sensoriamento  
remoto. 4. Serviços ambientais. I. Molina Júnior, Vitor Eduardo, 1975-. II.  
Canteras, Felipe Benavente, 1987-. III. Universidade Estadual de Campinas  
(UNICAMP). Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações complementares

**Título em outro idioma:** Evaluation of regulating ecosystem services provided by green  
infrastructure : a case study in Campinas/SP

**Palavras-chave em inglês:**

City planning

Neural networks (Computer science)

Remote sensing

Ecosystem services

**Área de concentração:** Ambiente

**Titulação:** Mestra em Tecnologia

**Banca examinadora:**

Vitor Eduardo Molina Júnior [Orientador]

Ana Isabel Coelho Borges

Luiz Eduardo Moschini

**Data de defesa:** 31-07-2025

**Programa de Pós-Graduação:** Tecnologia

**Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**

ODS: 11. Cidades e comunidades sustentáveis

ODS: 13. Ação contra a mudança global do clima

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0002-1869-6299>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7704132989148348>

**Vitor Eduardo Molina Junior**

**Ana Isabel Coelho Borges**

**Luiz Eduardo Moschini**

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-graduação da Faculdade de Tecnologia.

*"This is not the end, this is not the  
beginning..."*  
— *Linkin Park, Waiting for the End*  
(2010)

# Agradecimentos

A realização desta pesquisa só foi possível graças ao apoio e à colaboração de diversas pessoas ao longo desta jornada, às quais expresso minha mais sincera gratidão pelo incentivo, parceria e confiança.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Marineide, ao meu pai, Célio, à minha irmã, Flávia, e ao meu namorado, Lucas, por sempre estarem ao meu lado, oferecendo amor, força e apoio.

Agradeço meu orientador, Prof. Dr. Vitor Eduardo Molina Junior, e meu coorientador, Prof. Dr. Felipe Benavente Canteras, pelas valiosas orientações e pelo acompanhamento constante. Suas contribuições foram base para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e colegas do Núcleo de Pesquisa em Infraestruturas Verdes (NUPEIN) e da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) agradeço pelas trocas de conhecimento, pela parceria nos desafios e pelos momentos de convivência que tornaram essa trajetória mais leve e significativa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

# Resumo

A intensificação da urbanização nas últimas décadas, especialmente em países em transição, tem promovido transformações nos ecossistemas urbanos, comprometendo a qualidade ambiental e a resiliência climática das cidades. Diante disso, cresce o interesse por soluções baseadas na natureza, como as infraestruturas verdes, que são estratégias do planejamento urbano voltadas à provisão de serviços ecossistêmicos, especialmente os de regulação climática e da qualidade do ar. No entanto, a quantificação desses serviços ainda representa um desafio, em razão da escassez de dados padronizados, da complexidade dos processos ecológicos e da dependência de avaliações por especialistas. Esta dissertação tem como objetivo quantificar os serviços ecossistêmicos de regulação fornecidos por infraestruturas verdes no município de Campinas/SP, na região Sudeste do Brasil, por meio de sensoriamento remoto, análises espaciais e técnicas de aprendizado de máquina. O método foi estruturado em três etapas principais: (i) revisão sistemática da literatura, baseada no PRISMA 2020, para identificar métodos de quantificação de serviços ecossistêmicos; (ii) seleção das áreas de estudo e dos períodos sazonais representativos; e (iii) avaliação dos serviços ecossistêmicos a partir de dados secundários (imagens orbitais e dados ambientais), associada ao desenvolvimento de um modelo de regressão com Redes Neurais Convolucionais (arquitetura U-Net) para estimar a temperatura da superfície terrestre. Com base em análises estatísticas, foram definidos dois períodos sazonais representativos entre 2019 e 2024: frio (abril a setembro) e quente (outubro a março), que orientaram todas as etapas posteriores do estudo. Essa divisão permitiu identificar padrões temporais consistentes, evidenciando a influência da variação climática sobre a regulação ambiental promovida pela vegetação urbana. Observou-se correlação moderada negativa entre NDVI e poluentes atmosféricos, especialmente para o MP10, que apresentou coeficientes de até -0,62 no entorno do Parque Portugal, indicando maior potencial de remoção de material particulado em áreas mais vegetadas. A análise espacial reforçou essa tendência também para a temperatura da superfície terrestre: áreas com maior cobertura vegetal, como a Mata de Santa Genebra e a Fazenda Argentina, registraram NDVI médio entre 0,52 e 0,62 e LST média de 29 °C a 38 °C, enquanto regiões densamente urbanizadas e o próprio Parque Portugal apresentaram NDVI médio entre 0,33 e 0,39 e LST de até 41 °C. Nessas áreas, a variação sazonal atingiu 11 °C, revelando maior amplitude térmica e confirmando a função reguladora das infraestruturas verdes. Em relação ao modelo preditivo, foi alcançado um erro quadrático médio de 4,18 °C na estimativa da LST, demonstrando aplicabilidade na simulação de cenários de infraestrutura verde. Os métodos empregados mostraram-se replicáveis ao integrar dados de sensoriamento remoto e técnicas avançadas de modelagem. Essa abordagem reduz a subjetividade na quantificação dos serviços ecossistêmicos e fornece subsídios relevantes para o planejamento urbano sustentável e o monitoramento ambiental.

**Palavras-chave:** Planejamento Urbano, Rede Neural, Sensoriamento Remoto, Serviços Ecossistêmicos.

# Abstract

The intensification of urbanization in recent decades, especially in countries in transition, has driven profound transformations in urban ecosystems, compromising both environmental quality and the climate resilience of cities. In this context, interest has grown in nature-based solutions, such as Green Infrastructure, which serve as urban planning strategies aimed at providing Ecosystem Services, particularly those related to climate regulation and air quality. However, the spatial quantification of these services remains a challenge due to the scarcity of standardized data, the complexity of ecological processes, and the reliance on expert-based assessments. This dissertation aims to quantify the regulating ecosystem services provided by green infrastructure in the municipality of Campinas, São Paulo State, Brazil, through remote sensing, spatial analyses, and machine learning techniques. The methodology was structured in three main stages: (i) a systematic literature review, following the PRISMA 2020 protocol, to identify methods for quantifying ecosystem services; (ii) selection of study areas and representative seasonal periods; and (iii) assessment of ecosystem services using secondary data (satellite imagery and environmental data on temperature and air quality), combined with the development of a regression model based on Convolutional Neural Networks (U-Net architecture) to estimate Land Surface Temperature. Based on statistical analyses, two representative seasonal periods between 2019 and 2024 were defined: cool (April to September) and hot (October to March), which guided all subsequent steps of the study. This division enabled the identification of consistent temporal patterns, highlighting the direct influence of climatic variation on the environmental regulation provided by urban vegetation. A significant negative relation was observed between NDVI and air pollutants, particularly PM<sub>10</sub>, which presented coefficients of up to -0.80 around Parque Portugal (Lagoa do Taquaral), indicating a higher potential for particulate matter removal in more vegetated areas. Spatial analysis reinforced this trend for land surface temperature as well: areas with higher vegetation cover, such as the Santa Genebra Forest and the Fazenda Argentina, recorded mean NDVI values between 0.52 and 0.62 and mean LST ranging from 29 °C to 38 °C, while densely urbanized regions and Parque Portugal itself showed mean NDVI values between 0.33 and 0.39 and LST reaching up to 41 °C. In these areas, seasonal variation reached 11 °C, revealing greater annual thermal amplitude and confirming the regulating role of green infrastructure. Regarding the predictive model, a mean square error of 4.18 °C was obtained for LST estimation, demonstrating applicability in simulating green infrastructure scenarios. The methods employed proved to be replicable by integrating remote sensing data with advanced modeling techniques. This approach reduces subjectivity in the quantification of ecosystem services and provides relevant support for sustainable urban planning and environmental monitoring.

**Keywords:** Neural Network, Ecosystem Services, Remote Sensing, Urban Planning.

# Lista de Figuras<sup>1</sup>

|      |                                                                                                                                                                                  |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1  | ODS . . . . .                                                                                                                                                                    | 28 |
| 3.2  | Arquitetura Genérica das RNC . . . . .                                                                                                                                           | 32 |
| 3.3  | Fluxograma do Protocolo PRISMA 2020 adaptado. . . . .                                                                                                                            | 36 |
| 3.4  | Distribuição geográfica dos estudos incluídos na RSL . . . . .                                                                                                                   | 37 |
| 4.1  | Métodos . . . . .                                                                                                                                                                | 43 |
| 4.2  | Área de estudo . . . . .                                                                                                                                                         | 44 |
| 4.3  | Arquitetura da U-Net . . . . .                                                                                                                                                   | 53 |
| 5.1  | Boxplot Temperatura do Ar . . . . .                                                                                                                                              | 58 |
| 5.2  | Mapa de calor . . . . .                                                                                                                                                          | 59 |
| 5.3  | Concentração de poluentes . . . . .                                                                                                                                              | 60 |
| 5.4  | Correlação de Spearman entre o índice de vegetação NDVI e poluentes atmosféricos . . . . .                                                                                       | 62 |
| 5.5  | Gráficos da distribuição temporal do NDVI e dos poluentes atmosféricos para o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) nos raios de observação de 500m, 1000m, 1500m e 2000m. . . . . | 63 |
| 5.6  | Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para a Mata de Santa Genebra (raio de 2000m) . . . . .                                                                                     | 67 |
| 5.7  | Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para a Mata de Santa Genebra (raio de 2000m) . . . . .                                                                | 68 |
| 5.8  | Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para a Fazenda Argentina (raio de 2000m) . . . . .                                                                                         | 70 |
| 5.9  | Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para a Fazenda Argentina (raio de 2000m) . . . . .                                                                    | 71 |
| 5.10 | Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) (raio de 2000m) . . . . .                                                                       | 73 |
| 5.11 | Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) (raio de 2000m) . . . . .                                                  | 74 |
| 5.12 | Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para a área urbana adensada (raio de 2000m) . . . . .                                                                                      | 76 |
| 5.13 | Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para a área urbana adensada (raio de 2000m) . . . . .                                                                 | 77 |
| 5.14 | Gráfico de perda do modelo de RNC . . . . .                                                                                                                                      | 80 |
| 5.15 | Análise visual do modelo de RCN . . . . .                                                                                                                                        | 81 |

---

<sup>1</sup>Todas as figuras desta dissertação estão disponíveis no Zenodo em tamanho original.

# Lista de Tabelas

|     |                                                                                                                    |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 | Períodos para análise temporal . . . . .                                                                           | 61  |
| 5.2 | Valores médios de NDVI, LST, percentual de áreas vegetadas e área construída por área de estudo e período. . . . . | 78  |
| 5.3 | Métricas de desempenho do modelo . . . . .                                                                         | 81  |
| A.1 | Classificação dos serviços ecossistêmicos (MEA, 2005). . . . .                                                     | 108 |
| B.2 | Lista de referências . . . . .                                                                                     | 122 |
| C.1 | Estatísticas descritivas de NDVI e LST por período e área de estudo (2019–2024). . . . .                           | 124 |



# Lista de Siglas

**AHP-CV** Processo Analítico Hierárquico com Validação Cruzada. 39

**CETESB** Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 45, 49

**CIIAGRO** Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. 45

**DIDC** Departamento de Informação, Documentação e Cadastro. 47

**ESDA** Análise Exploratória de Dados Espaciais. 39, 40

**GEE** Google Earth Engine. 29–31, 42, 46, 48, 50, 84

**GISI** Green Infrastructure Suitability Index. 38

**ICU** Efeito de Ilha de Calor Urbano. 30

**IV** Infraestruturas Verdes. 16–18, 20, 24–26, 28, 33–35, 37, 38, 41, 42, 47, 81–83

**LST** Land Surface Temperature. 15, 20, 30, 43, 49–55, 65, 66, 69, 72, 75, 78–83, 123

**LSTM** Long Short-Term Memory. 81, 82, 84

**LULC** Land Use and Land Cover. 15, 17, 20, 23, 29, 30, 37, 39, 40, 42, 44, 48, 52, 57, 65, 66, 79, 82, 83

**MAE** Erro Médio Absoluto. 55

**MDE** Modelo Digital de Elevação. 39

**MEA** Millennium Ecosystem Assessment. 22

**MSE** Erro Quadrático Médio. 55, 81

**NDVI** Índice de Vegetação da Diferença Normalizada. 9, 20, 30, 37, 39, 42, 47, 49–51, 61–63, 65, 66, 69, 72, 75, 78, 79, 82, 123

**OD** oferta e demanda. 24

**ODM** Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. 27

**ODS** Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. 17, 26–29

**ONU** Organização das Nações Unidas. 22, 27

**PCA** Análise de Componentes Principais. 38–40

**RMSE** Raiz do Erro Quadrático Médio. 55

**RNA** Redes Neurais Artificiais. 31

**RNC** Redes Neurais Convolucionais. 20, 31, 43, 52, 54, 55, 79

**SBN** Soluções Baseadas na Natureza. 16, 27

**SE** Serviços Ecossistêmicos. 16–29, 33–42, 49, 57, 64, 83, 84

**SIG** Sistemas de Informação Geográfica. 29–31, 37–39

# Sumário

|          |                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                        | <b>15</b> |
| 1.1      | Problema de pesquisa . . . . .                                           | 18        |
| 1.2      | Hipótese . . . . .                                                       | 18        |
| 1.3      | Estrutura do documento . . . . .                                         | 19        |
| <b>2</b> | <b>Objetivos</b>                                                         | <b>20</b> |
| <b>3</b> | <b>Referencial teórico</b>                                               | <b>21</b> |
| 3.1      | Fundamentação Teórica . . . . .                                          | 22        |
| 3.1.1    | As bases teóricas relacionadas aos serviços ecossistêmicos . . . . .     | 22        |
| 3.1.2    | Infraestruturas Verdes: conceitos e fundamentos . . . . .                | 25        |
| 3.1.3    | Participação dos ODS na integração dos Serviços Ecossistêmicos . . . . . | 26        |
| 3.1.4    | Tecnologias Aplicadas na Coleta e Análise de Dados Espaciais . . . . .   | 29        |
| 3.1.5    | Redes Neurais Convolucionais . . . . .                                   | 31        |
| 3.2      | Revisão Sistemática . . . . .                                            | 33        |
| 3.2.1    | Seleção e avaliação de estudos . . . . .                                 | 33        |
| 3.2.2    | Análise dos métodos . . . . .                                            | 36        |
| <b>4</b> | <b>Métodos</b>                                                           | <b>42</b> |
| 4.1      | Área de estudo . . . . .                                                 | 44        |
| 4.1.1    | Avaliação dos padrões microclimáticos . . . . .                          | 45        |
| 4.1.2    | Aquisição e pré-processamento de imagens . . . . .                       | 46        |
| 4.1.3    | Mapeamento das Infraestruturas Verdes . . . . .                          | 47        |
| 4.1.4    | Classificação do uso e cobertura da terra . . . . .                      | 48        |
| 4.2      | Avaliação da regulação ecossistêmica . . . . .                           | 49        |
| 4.2.1    | Modelo de Previsão de Cenários . . . . .                                 | 52        |
| <b>5</b> | <b>Resultados e discussão</b>                                            | <b>57</b> |
| 5.1      | Avaliação dos padrões térmicos e atmosféricos . . . . .                  | 57        |
| 5.2      | Avaliação da regulação da qualidade do ar . . . . .                      | 61        |
| 5.3      | Avaliação da regulação microclimática . . . . .                          | 65        |
| 5.3.1    | Mata de Santa Genebra . . . . .                                          | 65        |
| 5.3.2    | Fazenda Argentina . . . . .                                              | 69        |
| 5.3.3    | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) . . . . .                            | 72        |
| 5.3.4    | Área urbana adensada . . . . .                                           | 75        |
| 5.3.5    | Comparação geral entre os diferentes contextos . . . . .                 | 78        |
| 5.3.6    | Previsão de cenários de infraestruturas verdes . . . . .                 | 79        |
| <b>6</b> | <b>Considerações finais</b>                                              | <b>83</b> |

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b> | <b>Outras informações</b>                                               | <b>85</b>  |
| 7.1      | Requisitos do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia . . . . .         | 85         |
| 7.2      | Produções científicas . . . . .                                         | 85         |
|          | <b>Referências</b>                                                      | <b>89</b>  |
| <b>A</b> | <b>Classificação dos Serviços Ecossistêmicos</b>                        | <b>107</b> |
| <b>B</b> | <b>Métodos de Oferta e Demanda de Serviços Ecossistêmicos</b>           | <b>109</b> |
| <b>C</b> | <b>Estatísticas descritivas temporais para regulação microclimática</b> | <b>123</b> |
| <b>D</b> | <b>Etapas de processamento e análise de dados espaciais</b>             | <b>125</b> |
| <b>E</b> | <b>Plano de Gestão de Dados</b>                                         | <b>128</b> |

# Capítulo 1

## Introdução

Desde a década de 1970, é observada uma tendência global crescente de expansão urbana intensiva, impulsionada por transformações nos hábitos culturais e de consumo. Esse processo, caracterizado pela ocupação de áreas rurais adjacentes, constitui um fenômeno multifacetado, frequentemente observado em regiões com baixa densidade populacional e infraestrutura limitada (SUDHIRA; RAMACHANDRA; JAGADISH, 2004; HOSSAIN, 2019; ORGANIZATION, 2023).

Quando não acompanhada de um planejamento territorial adequado, essa expansão tende a sobrecarregar os sistemas ambientais, resultando em impactos significativos, como poluição, erosão, impermeabilização do solo, riscos hídricos e ameaças à segurança alimentar. Esses efeitos são agravados pelas mudanças no uso e ocupação da terra - do inglês, *Land Use and Land Cover (LULC)*, que alteram processos ecológicos naturais e comprometem a resiliência dos ecossistemas urbanos e periurbanos (HASSE; LATHROP, 2003; CIEŚLAK; BIŁOZOR; SZUNIEWICZ, 2020; KAYITESI; GUZHA; MARIETHOZ, 2022; MARIANNO DE OLIVERA et al., 2023; RIBEIRO et al., 2024).

Uma preocupação global está no crescimento da frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos, cuja ocorrência vem sendo documentada com maior precisão desde a década de 1950. Fenômenos como chuvas intensas, enchentes, ondas de calor, queimadas e estiagens tem se tornado mais recorrentes, embora variem em sua manifestação regional. De forma geral, a *Land Surface Temperature (LST)* aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos nos últimos dois milênios, sendo as atividades antrópicas o principal fator propulsor dessas transformações (IPCC, 2021).

No contexto brasileiro, os efeitos dessas mudanças já são evidentes. Entre 2022 e 2023, por exemplo, a Amazônia enfrentou a maior seca já registrada, com o Rio Negro, em Manaus, atingindo seu nível mais baixo desde 1902 (12,70 m). Em contrapartida, o centro e o nordeste do país registraram aumento no armazenamento de águas subterrâneas devido às chuvas intensas, revertendo uma tendência de queda (IPCC, 2021).

Diante desse cenário, as Infraestruturas Verdes (IV) emergem como elementos estratégicos nos ecossistemas urbanos, atuando tanto de forma visual quanto funcional nas cidades. Compostas por diferentes tipologias e distribuídas em múltiplas escalas (regional, local, por quadra ou individual), as IV representam Soluções Baseadas na Natureza (SBN) capazes de mitigar os impactos negativos da urbanização acelerada. Entre seus múltiplos benefícios, é destacada a regulação do microclima urbano, com a mitigação do aquecimento local e das ilhas de calor, a gestão sustentável das águas pluviais, a redução da emissão de gases de efeito estufa e a promoção da biodiversidade. As IV também exercem um papel social relevante ao proporcionar espaços de convívio, lazer e bem-estar, contribuindo diretamente para a melhoria da qualidade de vida da população.

O incentivo ao uso das IV, especialmente por meio da ampliação de áreas verdes, é fundamental para enfrentar de forma eficaz os desafios impostos pela urbanização e pelas mudanças climáticas, favorecendo o equilíbrio ecossistêmico (BENDOR et al., 2015). Nesse sentido, as IV assumem um papel central no planejamento urbano por integrarem elementos multifuncionais capazes de equilibrar a oferta e a demanda dos Serviços Ecossistêmicos (SE) (ELMQVIST; SETÄLÄ et al., 2015). O conceito de IV refere-se à articulação entre sistemas urbanos e áreas naturais ou semi-naturais, promovendo a continuidade e a acessibilidade dos espaços verdes (BENEDICT et al., 2006). Além disso, busca-se garantir a conectividade e a multifuncionalidade dessas áreas, favorecendo a conservação da biodiversidade e o fluxo de SE entre diferentes paisagens (HANSEN; PAULEIT, 2014).

Destaca-se que a busca por alternativas sustentáveis tem se intensificado, consolidando o planejamento urbano baseado em IV como uma estratégia eficaz para mitigar os impactos dos modelos convencionais de crescimento urbano (GARCÍA et al., 2020; HAN et al., 2024; ZENG et al., 2022). Torna-se, portanto, essencial a adoção de medidas voltadas à regulamentação, controle e mitigação da poluição urbana.

Adicionalmente, as IV oferecem importantes benefícios ecológicos, como a conservação da biodiversidade por meio da criação de habitats e corredores ecológicos que garantem a

sobrevivência e o deslocamento das espécies (TZOULAS et al., 2007; HANSEN; PAULEIT, 2014). Esses aspectos contribuem para uma qualidade ambiental alinhada aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo cidades mais sustentáveis e resilientes (UN, 2015).

Estudos já vem sendo conduzidos utilizando a abordagem da quantificação da oferta e demanda para avaliar a eficiência das IV quanto a regulação microclimática, resfriamento, purificação do ar e da água, sequestro de carbono, controle de erosão, controle de enchentes, gestão de áreas de proteção, entre outros (BURKHARD; KROLL; NEDKOV et al., 2012; MAES et al., 2012; CROSSMAN et al., 2013; KANDZIORA; BURKHARD; MÜLLER, 2013; LI, J. et al., 2016; MANUEL et al., 2021; GARCÍA et al., 2020; LUIZA PETRONI; SIQUEIRA-GAY; LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO, 2022).

Apesar dos avanços, persistem lacunas significativas, incluindo a falta de padronização metodológica, a limitada participação das partes interessadas e a carência de dados adequados para uma quantificação precisa dos SE em diferentes contextos regionais (HANNA et al., 2018; MENGIST; SOROMESSA; LEGESE, 2020; MERAJ et al., 2022; DEEKSHA; SHUKLA, 2022).

Burkhard, Kroll, Müller et al. (2009) desenvolveram uma metodologia para o mapeamento de SE, destacando a importância de considerar não apenas a oferta e a demanda, mas também os balanços desses serviços. Essa matriz atribui atributos e pesos a cada SE, levando em conta o LULC.

Diversos estudos subsequentes utilizaram essa metodologia (BURKHARD; KROLL; NEDKOV et al., 2012; KANDZIORA; BURKHARD; MÜLLER, 2013; KOSCHKE et al., 2013; STOLL et al., 2015; WOLFF; SCHULP; VERBURG, 2015; LUIZA PETRONI; SIQUEIRA-GAY; LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO, 2022). No entanto, essa abordagem está relacionada a dependência da opinião de especialistas na construção da matriz que define os indicadores, o que pode introduzir subjetividade, dependendo das percepções individuais, podendo comprometer a precisão e a aplicabilidade dos resultados em diferentes escalas ou regiões, particularmente em áreas onde o conhecimento especializado é limitado ou onde os SE são altamente dinâmicos.

Esta pesquisa propõe um avanço metodológico na quantificação dos SE de regulação, utilizando dados espaciais, sensoriamento remoto e técnicas computacionais para o processamento de imagens baseados em aprendizado de máquina. Com isso, espera-se que essa abordagem tenha o potencial de melhorar a precisão dos mapas de SE. Além disso, ao

reduzir a dependência da avaliação subjetiva de especialistas, a abordagem desenvolvida amplia seu potencial de aplicação em diferentes contextos geográficos, contribuindo para a construção de ferramentas escaláveis e replicáveis para o planejamento ambiental e territorial.

## 1.1 Problema de pesquisa

A crescente demanda por soluções baseadas na natureza tem impulsionado o interesse em mensurar os SE providos pelas paisagens urbanas. Contudo, um dos principais desafios enfrentados por pesquisadores e tomadores de decisão é a escassez de dados e métodos consistentes que permitam quantificar esses serviços de forma espacialmente explícita (MAES et al., 2012; BURKHARD; KROLL; NEDKOV et al., 2012; CROSSMAN et al., 2013).

Diante desse cenário, surge a necessidade de explorar novas abordagens metodológicas, como o uso de dados de sensoriamento remoto e técnicas de aprendizado de máquina, que possam contribuir para preencher essas lacunas.

Dessa forma, o problema central desta pesquisa é: como quantificar os SE em escala de local e identificar seus padrões espaço-temporais em diferentes contextos urbanos — considerando, especialmente, a presença de IV — por meio de técnicas de geoprocessamento e modelagem ambiental?

## 1.2 Hipótese

A hipótese desta pesquisa é de que os métodos de quantificação de SE de regulação, baseados em sensoriamento remoto e dados espaciais, podem ser aplicados com eficácia para avaliar e quantificar as potencialidades e fragilidades das IV, fornecendo informações significativas para a tomada de decisão entre diferentes abordagens de avaliação.

Assim, ao propor métodos mais escaláveis para a quantificação dos SE de regulação, este estudo visa contribuir com o planejamento urbano sustentável, oferecendo subsídios a indicadores de desempenho das IV.



## 1.3 Estrutura do documento

A estrutura da dissertação foi organizada em capítulos que seguem uma sequência descrita a seguir:

**Capítulo 2:** apresenta os **Objetivos** da pesquisa (geral e específicos).

**Capítulo 3:** aborda o **Referencial teórico**, contemplando os subtópicos de fundamentação teórica e de revisão da literatura relevante para o tema da dissertação. Este capítulo visa situar a pesquisa dentro do contexto acadêmico existente. Portanto, serão explorados conceitos principais que a pesquisa pretende abordar.

**Capítulo 4:** descreve os **Métodos** utilizados na condução da pesquisa. Este capítulo foi dividido em seções que detalham a classificação da pesquisa, a área de estudo, a avaliação dos SE, a comparação e validação dos métodos, e a simulação de cenários.

**Capítulo 5:** apresenta os **Resultados e discussão**, detalhando os principais achados da pesquisa com base nas análises espaciais, estatísticas descritivas e modelagens realizadas.

**Capítulo 6:** este capítulo apresenta as **Considerações finais** obtidas a partir do desenvolvimento da pesquisa, à luz dos objetivos propostos e dos resultados alcançados.

**Capítulo 7:** o item **Outras informações** inclui informações relevantes à pesquisa, como o cumprimento dos requisitos para a obtenção do título de mestrado e as produções científicas.

**Referências:** reúne as obras citadas ao longo da dissertação, incluindo artigos científicos, livros e manuais.

**Apêndices:** ao final da dissertação, são apresentados quatro apêndices que complementam os capítulos principais, oferecendo informações adicionais sobre a classificação dos SE (Classificação dos Serviços Ecossistêmicos), os métodos encontrados na revisão sistemática da literatura (Métodos de Oferta e Demanda de Serviços Ecossistêmicos), as estatísticas descritivas relacionadas à regulação microclimática (Estatísticas descritivas temporais para regulação microclimática), as Etapas de processamento e análise de dados espaciais e o Plano de Gestão de Dados adotado na pesquisa.

# Capítulo 2

## Objetivos

Este estudo tem como objetivo quantificar a oferta dos SE de regulação no município de Campinas/SP, avaliando de que forma as alterações no LULC e as características da vizinhança afetam a provisão desses serviços em áreas com diferentes usos e ocupações.

Os objetivos específicos incluem:

1. Identificar os principais métodos para quantificar os SE de regulação fornecidos por IV, por meio da revisão da literatura;
2. Avaliar a aplicabilidade dos métodos no contexto do município de Campinas/SP, considerando a disponibilidade e qualidade dos dados locais;
3. Analisar a relação entre diferentes classes de LULC, Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e a LST na provisão dos SE, utilizando dados secundários de qualidade do ar e imagens orbitais;
4. Propor um modelo baseado em Redes Neurais Convolucionais (RNC) para previsão da LST, incorporando características de vizinhança e cobertura do solo;
5. Validar o modelo proposto por meio da comparação entre as previsões e dados observados de LST para diferentes cenários de uso do solo.

## Capítulo 3

### Referencial teórico

Os artigos de revisão são usados para condensar informações de várias fontes bibliográficas, e visam fornecer uma base teórica para estudo de um tema específico. Os dois tipos principais são: revisão narrativa e revisão sistemática (ROTHER, 2007).

A revisão narrativa é mais ampla, já que visa discutir o estado da arte sob uma perspectiva teórica ou conceitual. Por sua vez, não segue uma metodologia rigorosa de busca ou avaliação dos estudos. A análise depende principalmente da interpretação crítica e pessoal do autor sobre a literatura disponível, sendo, portanto, qualitativa (CORDEIRO et al., 2007).

Por outro lado, a revisão sistemática adota uma metodologia estruturada e com rigor técnico, visando responder uma pergunta de pesquisa. Ela utiliza métodos explícitos para localizar, selecionar e avaliar criticamente os estudos relevantes, além de coletar e analisar os dados desses estudos. Considerada um trabalho original, a revisão sistemática garante a validade e a confiabilidade dos resultados ao evitar vieses, sendo qualiquantitativa (PAGE et al., 2021).

Neste capítulo, serão utilizadas duas abordagens de revisão necessárias para o embasamento deste estudo. A **Fundamentação Teórica** (revisão narrativa) explora os principais conceitos que sustentam o tema de pesquisa, sintetizando estudos anteriores e oferecendo uma visão crítica e contextualizada sobre o estado da arte do assunto. Já a **Revisão Sistemática**, tem o objetivo de responder a questões específicas de pesquisa, com foco na identificação dos métodos mais utilizados para a quantificação da oferta e demanda de SE de regulação.

## 3.1 Fundamentação Teórica

### 3.1.1 As bases teóricas relacionadas aos serviços ecossistêmicos

O estudo dos SE teve início na década de 1990, no contexto da economia e contabilidade, principalmente impulsionado por debates sobre a valoração do capital natural (COSTANZA; DALY, 1992; TOMAN, 1998; MCAFEE, 1999).

Gradualmente, reconheceu-se que os sistemas sociais, ambientais e econômicos estão interligados e que sua análise isolada não captura a complexidade de suas interações (COSTANZA; D'ARGE et al., 1997; ELMQVIST; FOLKE et al., 2003; MEA, 2005; FOLKE et al., 2005; CHAZDON et al., 2009). Consequentemente, os estudos sobre SE evoluíram para uma abordagem interdisciplinar, integrando conhecimentos de ecologia, geografia, agroecologia, agronomia, economia, sociologia e outras áreas, visando uma compreensão holística dos problemas e desafios ambientais (MÜLLER; BURKHARD, 2007; ZHANG, W. et al., 2007; NAIDOO et al., 2008; TERMORSHUIZEN; OPDAM, 2009; MACE; NORRIS; FITTER, 2012; GUERRY et al., 2015).

Dessa forma, foram desenvolvidos modelos teóricos para entender os SE, principalmente sob as perspectivas econômica e ecológica, facilitando a análise dos benefícios oferecidos pelos ecossistemas em cada um desses contextos (LA NOTTE; RHODES, 2020).

Nos modelos econômicos, os SE são vistos como dividendos que a sociedade obtém do capital natural. Assim, a manutenção e a valorização dos estoques de capital natural garantem a provisão desses serviços no futuro, contribuindo para o bem-estar humano a longo prazo (TEEB, 2010). Já para os modelos ecológicos, são definidos como os benefícios que os seres humanos obtêm da natureza, caracterizando as dinâmicas interações entre sistemas ecológicos e sociais, com ênfase em uma abordagem que pode ser predominantemente antropocêntrica (AFFEK et al., 2020). Esses serviços descrevem como os ecossistemas fornecem recursos e funções essenciais para o bem-estar humano, ao mesmo tempo que destacam a importância da resiliência ecológica (MEA, 2005).

Uma das iniciativas mais importantes para integrar os SE com outras áreas do conhecimento foi o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA), realizado entre 2001 e 2005 em parceria com a Organização das Nações Unidas (ONU). Este esforço colaborativo reuniu especialistas de várias disciplinas para avaliar as consequências das mudanças ambientais

nos ecossistemas globais, resultando em relatórios que orientam ações para o uso sustentável e a conservação dos ecossistemas (MEA, 2005).

Entre as diversas classificações de SE propostas na literatura, a do MEA (2005) tornou-se a mais amplamente reconhecida e aceita na academia, sendo uma referência consolidada nessa área. Nesta classificação, são incluídos os SE de:

- **Provisão:** descreve a produção de materiais pelos ecossistemas, incluindo matérias-primas, alimentos, recursos hídricos e medicinais;
- **Regulação:** engloba a capacidade dos ecossistemas em regular o clima, os ciclos hidrológicos, os ciclos biogeoquímicos, entre outros processos biológicos essenciais;
- **Cultural:** descreve os benefícios não materiais fornecidos pelos ecossistemas, tais como recreação, bem-estar espiritual, inspiração estética e oportunidades educacionais; e
- **Suporte:** inclui processos ecológicos fundamentais que sustentam o funcionamento dos ecossistemas, como a formação de solo, o transporte de partículas e a produção primária.

O fornecimento dos serviços é fortemente influenciado por condições biofísicas e por mudanças no LULC, decorrentes de atividades antrópicas, como a urbanização, a agricultura intensiva, a desmatamento e a industrialização (COSTANZA; D'ARGE et al., 1997; DAILY, 1997; MEA, 2005; GROOT et al., 2010). Essas atividades alteram a estrutura e a função dos ecossistemas e afetam diretamente a capacidade dos ambientes naturais de fornecer serviços essenciais de regulação (FOLEY et al., 2005).

A mensuração dos SE contribui para a compreensão e gestão dos benefícios que os ecossistemas oferecem às sociedades humanas. Além disso, auxilia na análise de como as demandas crescentes de produção e as mudanças no uso do solo podem afetar a capacidade de suporte dos ecossistemas. Diante disso, existem métodos que propõem-se a realizar a mensuração destes serviços, baseados em princípios monetários, ecológicos, híbridos entre outros.

Os métodos monetários, como análises de custo-benefício e avaliações contingentes, mostram-se limitados, pois tendem a focar excessivamente nos aspectos econômicos e carecem de ferramentas adequadas para avaliar os impactos ambientais (MÜLLER; BURKHARD, 2007). Assim, os modelos ecológicos surgem como uma abordagem mais

adequada para entender como esses fatores afetam a provisão de SE sob uma perspectiva ambiental (GROOT et al., 2010).

Entre os modelos ecológicos, destaca-se a abordagem de oferta e demanda (OD), que enfatiza o equilíbrio entre as necessidades humanas e a disponibilidade de recursos naturais (BURKHARD; KROLL; MÜLLER et al., 2009; BURKHARD; KROLL; NEDKOV et al., 2012; LUIZA PETRONI; SIQUEIRA-GAY; LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO, 2022; OSEI OWUSU; MARTINEZ; SCHWARZ, 2024). Essa estrutura permite entender e gerenciar os SE, e também ressalta a importância de desenvolver estratégias adaptativas para enfrentar as crescentes pressões sobre esses recursos (SCHRÖTER et al., 2014; BARÓ et al., 2015).

A abordagem OD relacionada aos SE providos pelas IV pode ser uma ferramenta para o planejamento e a sustentabilidade urbana, pois auxilia na compreensão de como as IV podem atender às necessidades das populações urbanas, enquanto preservam os sistemas ecológicos (LAI; ZOPPI, 2024).

Além disso, a integração espacial dessa abordagem contribui para a identificação de desajustes entre as áreas que fornecem e as que necessitam desses serviços. No entanto, a principal limitação reside na mensuração precisa tanto da oferta quanto da demanda, o que dificulta a implementação de estratégias eficazes de gestão (BURKHARD; KROLL; NEDKOV et al., 2012).

À luz do cenário de desenvolvimento urbano contemporâneo, várias cidades exibem um potencial restrito de crescimento integrativo e, como consequência, uma oferta relativamente mais estável. Por outro lado, a demanda demonstra variabilidade temporal e regional, devido ao cenário mais acelerado de crescimento urbano (GÓMEZ-BAGGETHUN; BARTON, 2013).

A revisão sistemática suporta o estudo para aprimorar as metodologias de mensuração de OD, considerando que os métodos existentes são diversos. Para identificar o método mais adequado, é necessário analisar o contexto de aplicação e comparar as abordagens em termos de requisitos de dados, capacidade de processamento, resolução espacial e temporal e outros fatores relevantes. Dessa forma, a revisão permitirá identificar as melhores práticas, possibilitando uma escolha mais informada e alinhada às especificidades do estudo.

Para esta dissertação, a ênfase estará na base conceitual associada a **modelos ecológicos de oferta**, explorando como estes podem ser aplicados para quantificar e mapear os **SE de regulação**.

### 3.1.2 Infraestruturas Verdes: conceitos e fundamentos

As IV têm se destacado como uma das principais estratégias para promover a sustentabilidade urbana, devido à sua capacidade de proporcionar benefícios significativos à população (BENEDICT et al., 2006; TZOULAS et al., 2007; COMMISSION, 2013; HANSEN; PAULEIT, 2014). Globalmente, o termo IV tem se destacado nas discussões sobre conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável (BENEDICT et al., 2006; NAUMANN et al., 2011; COMMISSION, 2013; FAIVRE et al., 2017; NGUYEN et al., 2019).

Com base em uma análise exploratória, observou-se que o termo é flexível e frequentemente utilizado em diversos contextos, como planejamento urbano (HANSEN; PAULEIT, 2014), gestão de águas pluviais (MARAGNO et al., 2018; CAO et al., 2023), conservação da biodiversidade ((XIAO et al., 2022), adaptação as mudanças climáticas (RODRIGUES; MOLINA JUNIOR; CANTERAS, 2023) entre outros.

De acordo com Benedict et al. (2006), as IV compreendem uma "rede interconectada de áreas naturais e outros espaços abertos que conservam os valores e funções do ecossistema natural, sustentam o ar e a água limpos e fornecem uma ampla gama de benefícios para as pessoas e a vida selvagem".

Por outro lado, Naumann et al. (2011) expandem esse conceito ao incluir tanto áreas naturais quanto seminaturais em áreas urbanas e rurais, e ao destacar a contribuição das IV para a conservação da biodiversidade e para a provisão de SE.

A definição dada pela European Commission (2013) segue nessa linha, mas adiciona a importância de um planejamento estratégico para garantir que essa rede ambiental forneça múltiplos SE, além de aumentar a resiliência ecológica. Portanto, é definida como "uma rede estrategicamente planejada de áreas naturais e semi-naturais com outras características ambientais, projetada e gerida para fornecer uma ampla gama de SE, além de promover a biodiversidade".

Já a EPA (2024) foca em soluções de IV para a gestão de águas pluviais, utilizando sistemas naturais para reduzir o impacto da urbanização no ciclo hidrológico. Exemplos como jardins de chuva, biovaletas e pavimentos permeáveis demonstram uma ênfase mais técnica e orientada para soluções urbanas sustentáveis, com foco na gestão hídrica e na redução de inundações nas áreas urbanas.

No Brasil, o IPT (2020) oferece uma definição que se aproxima da visão de IV como um conjunto de soluções que buscam imitar processos ecológicos naturais, com o objetivo de

prover SE e promover a sustentabilidade urbana. A tipologia sugerida pelo IPT inclui desde ruas verdes e jardins de chuva até soluções como pavimentos permeáveis e cisternas, destacando uma abordagem multifuncional que visa tanto à escala da paisagem quanto a intervenções locais.

Em suma, as IV podem ser vistas como uma interseção de conceitos e práticas que variam conforme o contexto geográfico, o foco ecológico ou o problema específico a ser resolvido (BENEDICT et al., 2006). Enquanto algumas definições privilegiam a manutenção de ecossistemas naturais e a biodiversidade, outras estão mais orientadas para soluções urbanas específicas, evidenciando a flexibilidade do conceito em atender a diferentes desafios ambientais (BENEDICT et al., 2006; HANSEN; PAULEIT, 2014; MEEROW, 2019).

Esta dissertação baseia-se no conceito de IV proposto por Commission (2013), com foco nas IV de grande escala espacial, como corredores ecológicos, parques urbanos e reservas ambientais, devido a limitação resolução espacial dos produtos de sensoriamento remoto (entre 10m a 30m).

Alguns autores, como Burkhard, Kroll, Müller et al. (2009), Naumann et al. (2011), Tzoulas et al. (2007), Hansen e Pauleit (2014) e Jingxia Wang e Banzhaf (2018), recomendam o uso de ferramentas espaciais para avaliação e monitoramento dos benefícios das IV, com o objetivo de aprimorar a compreensão desses benefícios nos âmbitos político, social, ambiental e econômico. Isso assegura que tais vantagens sejam devidamente reconhecidas e valorizadas. Nesse contexto, a integração do conhecimento sobre os SE torna-se integrativo em relação a avaliação do desempenho das IV.

### **3.1.3 Participação dos ODS na integração dos Serviços Ecossistêmicos**

O cenário global anterior aos ODS foi marcado por uma complexidade que envolveu múltiplos esforços internacionais para enfrentar desafios globais. Diversos eventos e iniciativas ao longo do tempo tiveram sua importância para criação de uma base sólida para o estabelecimento das metas (BAK, 2024).

Um dos marcos históricos para o início dessas discussões foi o surgimento do conceito de "sustentabilidade" em um contexto de ciência sobre a iminente crise ecológica enfrentada globalmente (MICHELSEN et al., 2016). Esse conceito foi impulsionado, em particular, pelo Relatório Brundtland, "Nosso Futuro Comum" de 1987, que introduziu a ideia de



desenvolvimento sustentável como a capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras (MICHELSEN et al., 2016).

Outros marcos como as conferências e declarações da ONU sobre o Meio Ambiente Humano de 1972 que marcaram um passo significativo na política ambiental internacional. Isto foi seguido pela Cúpula da Terra de 1992, que solidificou ainda mais a integração de objetivos ambientais e de desenvolvimento (MICHELSEN et al., 2016).

No ano 2000, foram adotados os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), precursores dos ODS, com foco na redução da pobreza extrema e outros problemas globais até 2015. Apesar do progresso, os desafios permaneceram, devido à má gestão de recursos e instabilidade política (OLERIBE; TAYLOR-ROBINSON, 2016).

Em 2015, a Agenda Pós-2015 marcou a transição dos ODM para os ODS, envolvendo um amplo diálogo e documentação internacional, culminando na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (UN, 2015).

Os ODS são um conjunto de 17 metas globais estabelecidas em 2015 pela ONU como parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, através da Resolução 70/1 da Assembleia Geral da ONU, intitulada "Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável"(UN, 2015). Essas metas têm o propósito de enfrentar uma ampla gama de desafios globais, como pobreza, desigualdade, mudanças climáticas, degradação ambiental entre outros (MICHELSEN et al., 2016; UN, 2015).

Os ODS foram pensados para serem interconectados, reconhecendo que o progresso em uma área pode influenciar nas outras, portanto tendo uma visão holística da conectividade entre os pilares social, ambiental e econômico. Além disso, requerendo que os esforços sejam coordenados por parte dos governos, empresas e sociedade civil (BAK, 2024).

Trazendo para o contexto deste estudo, pode-se destacar quatro principais ações relacionadas à integração dos SE, sendo:

1. Proteção e restauração de ecossistemas naturais para conservar florestas e outros ecossistemas que oferecem serviços como purificação do ar, água e regulação climática;
2. Promoção de práticas agrícolas e de uso da terra sustentáveis para garantir a continuidade dos SE e restaurar áreas degradadas;
3. Adoção de SBN para mitigar impactos climáticos, melhorar a qualidade de vida urbana e proteger a biodiversidade; e

4. Monitoramento dos impactos humanos nos ecossistemas para acompanhar a perda de biodiversidade, degradação dos recursos e poluição, implementando medidas corretivas.

Além disso, muitos dos benefícios proporcionados pelos ecossistemas estão ligados diretamente às metas globais. A seguir, serão exploradas as interações entre os ODS, e as IV e os SE providos por elas (Figura 3.1 <sup>1</sup>).



Figura 3.1: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável com destaque as metas 6, 11, 13, 14 e 15 relacionadas aos Serviços Ecossistêmicos de regulação.

Fonte: UN (2015).

**ODS 6 - Água Potável e Saneamento:** as florestas e zonas úmidas auxiliam na purificação da água e na regulação do ciclo hidrológico. Ao fornecer esses serviços, eles garantem a disponibilidade de água potável e segura;

**ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis:** as IV em áreas urbanas, como parques e corredores ecológicos, melhora a qualidade do ar, regula a temperatura e reduz os impactos das ilhas de calor urbanas, tornando as cidades mais habitáveis e resilientes às mudanças climáticas;

**ODS 13 - Ação Climática:** os serviços de sequestro de carbono por florestas e ecossistemas costeiros auxiliam na mitigação e adaptação das mudanças climáticas;

**ODS 14 - Vida na Água:** ecossistemas marinhos e costeiros oferecem proteção natural contra desastres, como tempestades e inundações, além de fornecerem serviços de regulação do clima e a produção de alimentos;

<sup>1</sup>Todas as figuras desta dissertação estão disponíveis no Zenodo em tamanho original.

**ODS 15 - Vida Terrestre:** a proteção e a restauração de ecossistemas terrestres são essenciais para a preservação da biodiversidade e a continuidade dos SE, como a manutenção da fertilidade do solo, o controle biológico de pragas e a polinização, que são importantes para a agricultura e a segurança alimentar.

A integração dos SE nos ODS incentiva o desenvolvimento de soluções baseadas na natureza. Isso reforça a necessidade de políticas públicas que considerem o valor econômico e ecológico dos ecossistemas, contribuindo para um desenvolvimento inclusivo e resiliente (UN, 2015).

Portanto, a mensuração dos serviços pode indicar o quanto as políticas e ações realizadas estão alinhadas com a preservação dos SE e a sustentabilidade ambiental.

### 3.1.4 Tecnologias Aplicadas na Coleta e Análise de Dados Espaciais

Esta subseção apresenta as principais tecnologias computacionais utilizadas na coleta, no processamento e na análise dos dados espaciais. São descritas algumas das plataformas adotadas para o tratamento de imagens de sensoriamento remoto, análise de LULC, execução de geoprocessamento e modelagem ambiental. O uso combinado dessas ferramentas pode assegurar o processamento em larga escala, com precisão, escalabilidade e reprodutibilidade. Entre as tecnologias mais utilizadas destacam-se o *Google Earth Engine (GEE)*, que possibilita análises avançadas e integradas por meio de sua API no Google Colab com programação em Python, e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), empregados no armazenamento, visualização e análise dos dados geoespaciais.

O GEE é uma plataforma de computação em nuvem que facilita a análise e visualização de grandes volumes de dados geoespaciais, tornando o processamento de imagens de sensoriamento remoto e a execução de análises espaciais complexas mais acessíveis e eficientes (GORELICK et al., 2017).

Uma de suas principais aplicações é o mapeamento do LULC. A introdução de plataformas como o GEE revolucionou esse tipo de mapeamento ao fornecer acesso a uma vasta quantidade de dados de satélite, como os programas Landsat, Sentinel e MODIS. Isso permite que pesquisadores acompanhem as mudanças no LULC ao longo do tempo utilizando séries temporais extensas, algo que seria inviável com métodos tradicionais devido às limitações de armazenamento e processamento local (AMANI et al., 2020).

O GEE oferece acesso a algoritmos avançados que podem ser utilizados para pré-processamento, filtragem e manipulação das imagens com facilidade. Outra vantagem significativa é a possibilidade de realizar essas análises sem a necessidade de infraestrutura de hardware própria, já que os dados são processados diretamente na nuvem. Pesquisadores podem programar diretamente no ambiente do GEE ou utilizar a API no Google Colab, integrando a análise com Python, o que facilita a codificação e acelera o desenvolvimento de projetos (GORELICK et al., 2017).

No entanto, é importante citar as limitações da ferramenta e identificar fatores que possam impactar nas análises. O GEE é uma plataforma baseada em nuvem e de uso contínuo, ou seja, depende de conexões estáveis e de alta velocidade para operar de forma eficiente (KUMAR; MUTANGA, 2018).

Outra limitação está relacionada ao controle sobre os processos de exportação de dados. O GEE realiza exportações em segundo plano, dificultando o monitoramento contínuo e detalhado das exportações em andamento. Deve-se tomar cuidado ao exportar grandes quantidades de dados e estabelecer um protocolo adequado para salvamento (GORELICK et al., 2017). Além disso, funções mais avançadas, como a customização de algoritmos complexos, podem ser impactadas pelas limitações de processamento em nuvem ou gerar cobranças (AMANI et al., 2020). Vale destacar ainda que, apesar de gratuito para uso acadêmico em muitos casos, o GEE pode passar a cobrar pelo uso após determinado volume de armazenamento ou processamento ser atingido, o que requer atenção em projetos de longa duração ou com grandes volumes de dados.

As pesquisas de Farhan et al. (2024), Pande et al. (2024) e Selka et al. (2024) utilizaram o GEE para avaliar o LULC e sua relação com a LST e o Efeito de Ilha de Calor Urbano (ICU), utilizando dados de satélite e aprendizado de máquina. Farhan et al. (2024) recomenda o uso de dados de alta resolução, variáveis ambientais adicionais e aprendizado de máquina para avaliar melhor os impactos da urbanização através de dados de sensoriamento remoto. Pande et al. (2024) e Selka et al. (2024) sugeriram o uso de índices de sensoriamento remoto (como NDVI, NWI, SVI) para melhorar a classificação dos mapas. Ambos destacam a viabilidade de suas metodologias para uso em larga escala e recomendam o aumento de amostras de treinamento e resolução dos produtos para melhorar as análises.

Além do GEE, ferramentas de SIG são amplamente utilizadas no geoprocessamento para gerenciar, analisar e visualizar dados geográficos, aplicadas em áreas como monitoramento

ambiental, avaliação de riscos e suporte à tomada de decisões. Esses sistemas não apenas permitem a análise espacial, mas também a criação de bancos de dados relacionais, associando atributos que enriquecem ainda mais as análises realizadas (LONGLEY et al., 2015).

A combinação de plataformas como GEE e SIG potencializa a capacidade de análise espacial, permitindo uma gestão e planejamento territorial mais eficazes e baseados em dados quali-quantitativos. Entretanto, para identificar e extrair padrões complexos e relações não lineares em dados ambientais, especialmente em imagens, é recomendada a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina, capazes de lidar com a alta dimensionalidade e heterogeneidade desses dados. Optou-se pelo uso de Redes Neurais Convolucionais (RNC) devido ao seu desempenho superior em análises espaciais, com a capacidade de extrair automaticamente características em múltiplas escalas. Diferentemente de modelos tradicionais, que exigem a definição manual de atributos, as RNC reduzem vieses metodológicos, ampliam a generalização e se mostram particularmente adequadas aos objetivos desta pesquisa.

### 3.1.5 Redes Neurais Convolucionais

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são uma classe de modelos computacionais inspirados na estruturas cerebrais humanas, baseando-se na ideia de reproduzir a maneira com que os neurônios biológicos processam informações. Esses modelos são desenvolvidos para reconhecer padrões, aprender a partir de dados e realizar tarefas complexas, como classificação, regressão e reconhecimento de imagens.

As RNC são um tipo especializado de RNA, projetadas especificamente para lidar com dados que possuem uma estrutura de grade, como imagens. A principal diferença entre as RNC e redes neurais tradicionais está na maneira como processam os dados, especialmente em relação à análise de imagens e dados espaciais (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017). A arquitetura genérica da RNC está representada na Figura 3.2.

A camada convolucional utiliza pequenos filtros, que são matrizes de pesos comumente de 3x3 ou 5x5. Esses filtros percorrem a imagem de entrada, aplicando a operação de convolução em diferentes regiões (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017).

A convolução ocorre calculando o produto escalar entre os valores do filtro e os valores da imagem, somando os resultados. Esse valor representa uma característica específica em uma

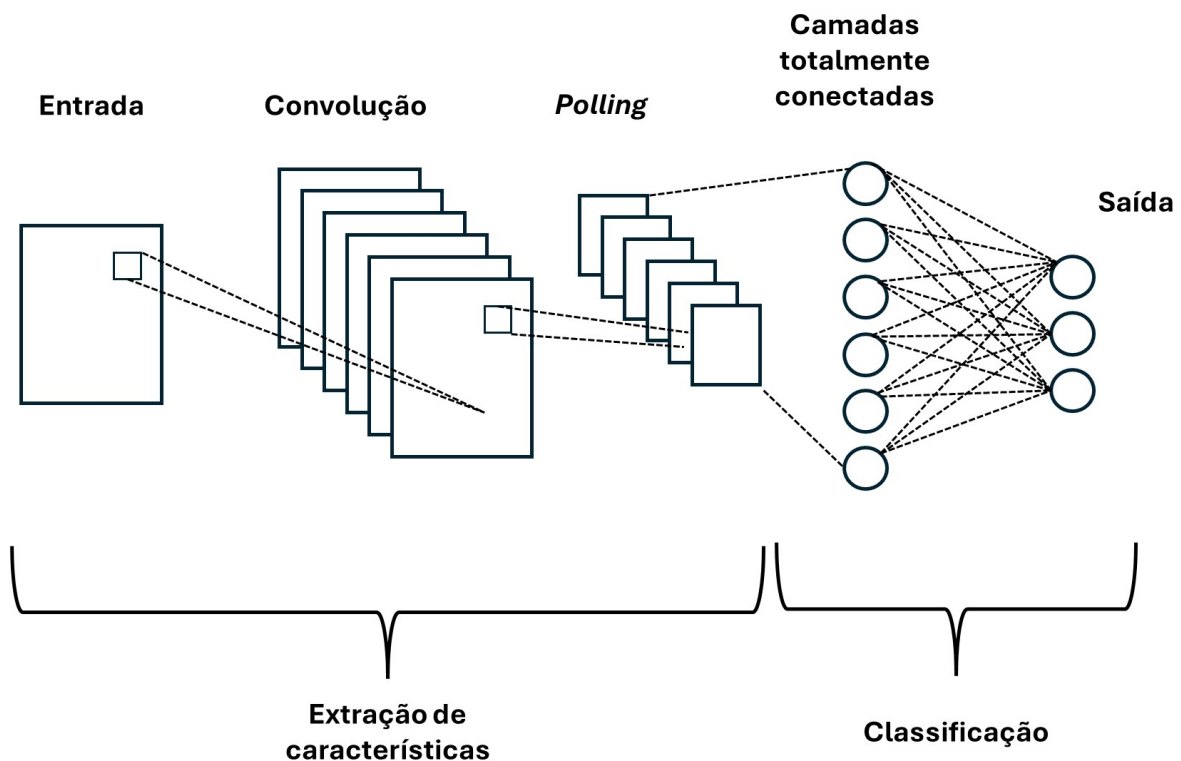


Figura 3.2: Arquitetura Genérica das Redes Neurais Convolucionais.

Fonte: Adaptado de Yanni et al. (2021).

área da imagem. O filtro, então, se desloca para a próxima região e repete o processo até cobrir toda a entrada (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017).

O resultado de cada filtro é chamado de mapa de características, que destaca a presença de padrões como bordas ou curvas em diferentes partes da imagem. Se a camada convolucional utilizar múltiplos filtros, serão gerados vários mapas de características, cada um evidenciando diferentes padrões da imagem (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017).

As convoluções podem ser ajustadas com o uso de técnicas como *stride* e *padding*, que ajudam a extrair características com maior precisão e ajustar as dimensões para a próxima camada. O *stride* define o número de pixels que o filtro se desloca após cada convolução – um passo maior resulta em mapas de características menores (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017).

O *padding*, por sua vez, adiciona bordas de valor 0 à imagem, permitindo que os pixels das extremidades sejam considerados com mais peso (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017).

A camada de *pooling*, sem parâmetros treináveis, tem a função de reduzir o tamanho dos mapas de características, diminuindo o número de parâmetros e a carga computacional nas

camadas subsequentes, ao mesmo tempo em que mantém as características mais relevantes da imagem e elimina informações redundantes (HABIBI AGHDAM; JAHANI HERAVI, 2017).

## 3.2 Revisão Sistemática

A revisão sistemática é um método que emprega abordagens explícitas e organizadas para coletar e resumir os resultados de estudos que investigam uma pergunta ou um conjunto de perguntas de pesquisa (PAGE et al., 2021). A escolha desta abordagem destaca-se devido a importância na identificação, avaliação e síntese de estudos relevantes para contextualizar o estado da arte desta pesquisa.

A revisão de literatura desta pesquisa seguiu o protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), na versão revisada de 2020 (PAGE et al., 2021), com adaptações para o escopo deste estudo. Esse método foi utilizado para identificar as referências mais relevantes na área. A motivação para realizar a revisão sistemática está associada à lacuna existente quanto aos métodos de quantificação dos SE fornecidos por IV.

### 3.2.1 Seleção e avaliação de estudos

Para o desenvolvimento desta revisão, foram utilizados um conjunto de perguntas de pesquisa:

1. Quais são os métodos utilizados com maior frequência para quantificação de oferta e demanda de SE?
2. Quais são as potencialidades e fragilidades de cada método?
3. Como esta análise pode oferecer subsídio para proposição de métodos de implementação de IV?

#### Termo de busca

O termo de busca foi definido de acordo com as perguntas de pesquisa e leitura preliminar de artigos relevantes ao tema, recomendados pelos orientadores e especialistas. Para garantir a relevância e abrangência dos artigos selecionados, os termos de busca definidos foram submetidos a uma etapa de teste. Essa etapa consistiu em executar a busca na base de dados Scopus, avaliando a quantidade e a qualidade dos artigos retornados.

Os resultados foram analisados quanto à relevância e à quantidade. Foi verificado se os artigos retornados estavam alinhados com o tema de interesse e se a quantidade de artigos era adequada para uma revisão abrangente. Nos casos em que os resultados iniciais não foram satisfatórios em termos de quantidade ou qualidade, foram feitos ajustes nos termos de busca, incluindo ou removendo palavras-chave, sinônimos ou modificando os operadores booleanos. Após os ajustes, a busca foi repetida para garantir que as modificações aumentaram a relevância e mantiveram uma quantidade adequada de artigos.

A estratégia de busca foi estruturada em quatro grandes categorias, visando capturar estudos relevantes para o tema:

1. IV, sinônimos ou tipologias próximas: englobam termos que representam espaços e soluções naturais ou semi-naturais em ambientes urbanos, como "green infrastructure", "green space", "urban environment", e "urban parks";
2. SE e termos relacionados: inclui expressões que abordam a provisão de benefícios naturais, como "ecosystem services", "environmental services", e "ecosystem function";
3. Quantificação e balanço dos SE: contempla palavras que remetem à oferta e demanda, bem como ao equilíbrio e trade-offs entre esses serviços, tais como "supply", "demand", "benefit", "trade-off", e "balance";
4. Sistemas e técnica de coleta de dados: foca em abordagens que utilizam ferramentas geoespaciais para avaliação, como "GIS", "geographic information system", e "remote sensing".

Por fim, foram selecionados apenas artigos indexados na base de dados **Scopus**, publicados em inglês nos últimos 10 anos, cujo termo de busca foi filtrado por título, resumo e palavras-chave.

A seguir, apresenta-se o termo de busca utilizado:

Termo de busca (Scopus): TITLE-ABS-KEY ( ( "GREEN INFRASTRUCTURE"OR "GREEN SPACE"OR "URBAN ENVIRONMENT"OR "URBAN PARKS") AND ( "ECOSYSTEM SERVICES"OR "ENVIRONMENTAL SERVICES"OR "ECOSYSTEM FUNCTION") AND ( "SUPPLY"OR "DEMAND"OR "BENEFIT"OR "TRADE-OFF"OR "BALANCE") AND ( "GIS"OR "GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM"OR "REMOTE SENSING") ) AND PUBYEAR >



2014 AND PUBYEAR < 2025 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )

### **Filtragem e inclusão**

Após recuperação, os registros foram exportados em formato .ris para a plataforma Rayyan, que é uma ferramenta estruturada para auxiliar em revisões sistemáticas, aplicando-se a ferramenta de remoção de duplicatas (OUZZANI et al., 2016).

Os registros foram triados e submetidos posteriormente a uma filtragem inicial por título, resumo e palavras-chave. Nesta etapa, foram utilizados como critérios de inclusão: apenas estudos primários; aderência ao tema (IV relacionadas à abordagem de SE); citação de pelo menos um método de avaliação de oferta ou demanda; métodos baseados em sensoriamento remoto ou geoprocessamento; estudos aplicados. Por fim, foi feita a leitura completa dos artigos.

Os critérios de exclusão utilizados foram: avaliação de outros SE que não regulação; falta de clareza quanto a metodologia; tipologias de IV não classificadas na literatura; utilização estrita de dados empíricos; opinião de especialistas; pesquisa de campo.

Para os registros incluídos, foram utilizados os critérios de elegibilidade: registros com acesso ao texto completo em inglês; serviços de regulação classificados conforme MEA (2005) (provisão, regulação, suporte e cultural e suas respectivas subclasses disponíveis no Apêndice A - Tabela A.1); estudos que abordam pelo menos um serviço de regulação associado a alguma tipologia de IV; e áreas de estudo localizadas em ambientes urbanos e/ou periurbanos.

Em resumo, foram inicialmente recuperados 132 registros. Após a leitura de resumos, títulos e palavras-chave, 77 registros foram selecionados para uma avaliação mais detalhada. Três artigos foram excluídos por estarem publicados em idiomas diferentes do inglês. Na fase de avaliação, foram analisados 74 artigos, dos quais 39 foram excluídos por não atenderem aos critérios estabelecidos. Assim, 35 artigos foram finalmente incluídos na análise (Figura 3.3). Todos os registros incluídos estão dispostos na Tabela B.1.

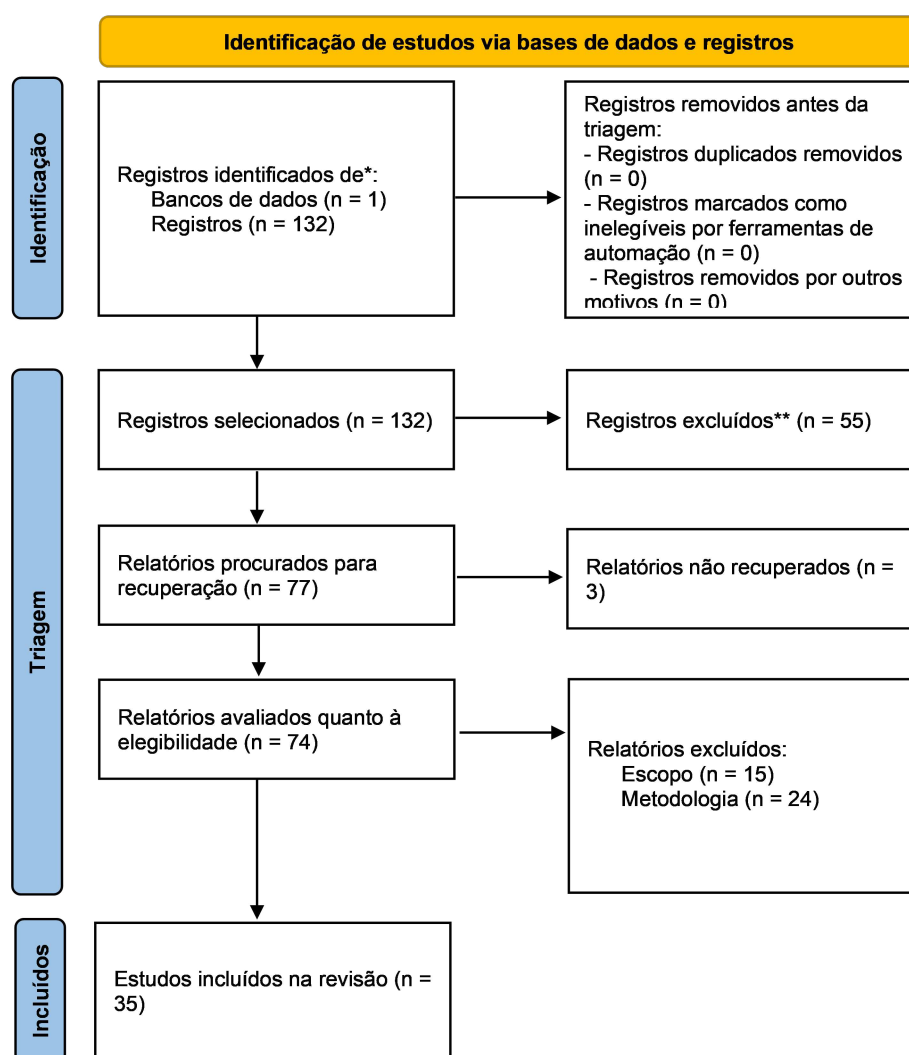


Figura 3.3: Fluxograma do Protocolo PRISMA 2020 aplicado nesta pesquisa.

Fonte: Page et al. (2021)

### 3.2.2 Análise dos métodos

No geral, os artigos variam bastante em termos de enfoque metodológico, com alguns adotando uma abordagem mais quantitativa e baseada em dados espaciais, enquanto outros incorporam aspectos qualiquantitativos ou participativos. Isso reflete a diversidade metodológica no campo de SE. Além disso, a grande maioria trata dos benefícios relacionados à regulação climática e à regulação da qualidade do ar, não sendo encontrados registros relacionados à regulação de doenças, polinização e regulação de perigos naturais. A Figura 3.4 representa publicações por país incluídas neste estudo.

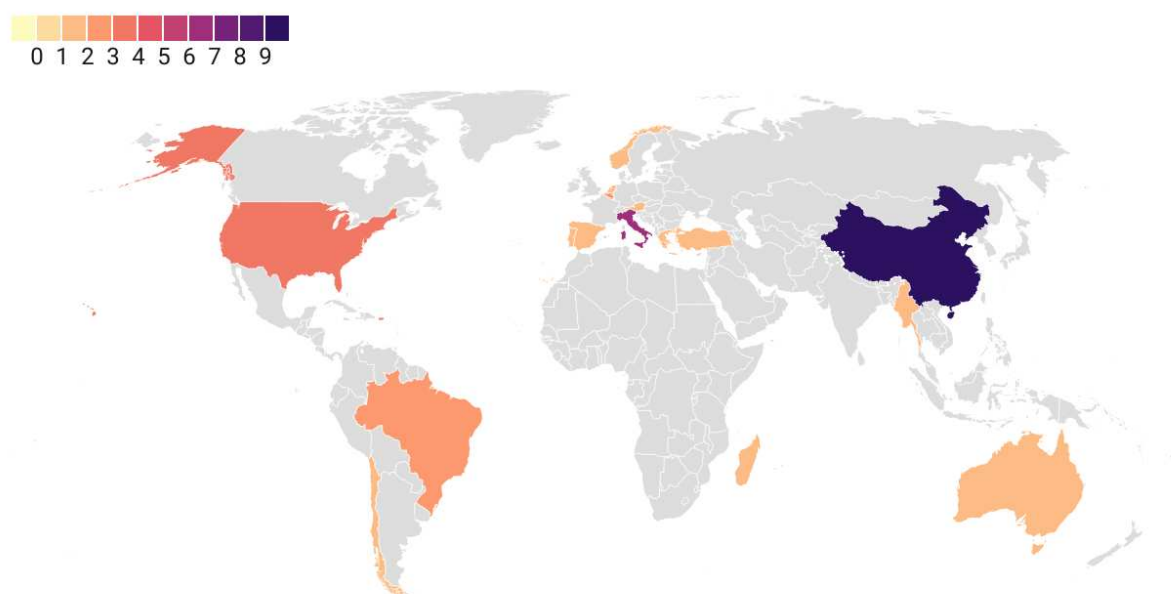


Figura 3.4: Distribuição geográfica dos estudos incluídos na revisão sistemática da literatura.

Os estudos comparados convergem na utilização de métodos baseados em SIG e sensoriamento remoto, como previsto no escopo do termo de busca. No entanto, cada estudo traz contribuições específicas: alguns se concentram mais na otimização do uso do solo em áreas urbanas, enquanto outros exploram métodos para integrar áreas urbanas e rurais ou verificar a viabilidade de IV nos padrões espaciais da área de estudo.

Para facilitar a análise e compreensão, os artigos mais relevantes foram discutidos por ano de publicação.

Em **2016** há uma publicação de De La Barrera, Rubio e Banzhaf (2016), que aborda os impactos da urbanização nos SE. O artigo faz a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e análise espaço-temporal para analisar mudanças na cobertura vegetal NDVI nos padrões de LULC, destacando a importância de adaptações baseadas na natureza em projetos urbanos para melhorar os SE. Para estimar a provisão potencial de SE, o estudo emprega coeficientes extraídos da literatura, o que permite uma quantificação dos serviços oferecidos pelos ecossistemas presentes na área de estudo. No entanto, o uso de coeficientes baseados em literatura pode limitar a precisão, dependendo da adequação ao contexto local.

Para o ano de **2017**, foram incluídos quatro trabalhos. Fusaro et al. (2017) conduziram o mapeamento de ecossistemas utilizando análise espacial baseada no LULC e dados empíricos, com o objetivo de identificar áreas críticas para a oferta de SE. Os autores utilizaram o sistema de modelagem AMS-MINNI para simular concentrações de  $MP_{10}$  e  $O_3$  em 2010, com base em

inventários de emissões e dados meteorológicos. A falta de dados *in loco* para validação é uma limitação, uma vez que as simulações dependem de medições diretas para confirmar a precisão. Por fim, a escalabilidade espacial e temporal do modelo pode restringir a análise em áreas menores ou eventos específicos.

Meerow e Newell (2017) utilizaram o *Green Infrastructure Suitability Index (GISI)* para identificar áreas adequadas para a implementação de IV em ambientes urbanos. A metodologia envolve análises espaciais para planejar intervenções que promovam SE. No entanto, o índice aplicado pode ser mais adequado para contextos urbanos, com limitações em sua aplicabilidade para áreas rurais ou periurbanas, onde a dinâmica dos SE é diferente. Este estudo também é dependente de dados empíricos, como coeficiente de escoamento e medições atmosféricas de  $MP_{2,5}$ .

Yujia Zhang, Murray e Turner (2017) utilizaram técnicas de otimização e análises espaciais para maximizar a eficiência de resfriamento das intervenções em áreas urbanas e periurbanas, com o objetivo de promover SE. A principal limitação dessa abordagem reside nas simplificações inerentes aos modelos de otimização, que podem não captar a complexidade dos fatores ecológicos em diferentes escalas. Em contrapartida, os dados de entrada utilizados também estão disponíveis para o município de Campinas, permitindo a reprodução.

Grunwald, Heusinger e Weber (2017) adotaram uma abordagem baseada em SIG para avaliar o impacto da IV na regulação de recursos hídricos e qualidade do ar. Ao conectar os benefícios oferecidos pelos ecossistemas naturais com a demanda humana, o estudo apresenta uma visão mais integrada dos SE. Contudo, a qualidade e a escala dos dados espaciais utilizados podem não ser suficientes para capturar todas as complexidades locais de regulação ambiental.

Os estudos apresentaram diferenças nas abordagens utilizadas. Fusaro et al. (2017) e Grunwald, Heusinger e Weber (2017) focaram no mapeamento e caracterização espacial da oferta, enquanto Yujia Zhang, Murray e Turner (2017) e Meerow e Newell (2017) adotam uma perspectiva mais aplicada, orientada para a otimização e planejamento de intervenções. As limitações geralmente estão relacionadas à dependência de dados espaciais de alta qualidade e à dificuldade de capturar a complexidade das interações ecológicas.

Em 2018, foram incluídos sete estudos. Marsboom et al. (2018) utiliza a Análise de Componentes Principais (PCA) para investigar os SE, com foco na qualidade do ar, biomassa

de carbono e retenção de nutrientes. Eles utilizam mapas de LULC e mapas de SE como principais entradas. O método permite reduzir a dimensionalidade dos dados, facilitando a análise de grandes conjuntos de variáveis inter-relacionadas. A principal limitação é que a PCA depende fortemente da qualidade e representatividade dos dados usados, podendo perder nuances importantes. O ganho está na capacidade de sintetizar informações complexas em componentes mais interpretáveis, relacionados à oferta e demanda.

Hoerbinger et al. (2018) utiliza a Análise Exploratória de Dados Espaciais (ESDA) para avaliar a vegetação ao longo de redes ferroviárias. A abordagem é baseada em dados geoespaciais de alta resolução e base de dados geográfica, combinando LULC e o ArcGIS como ferramentas. A limitação do estudo reside na dependência de dados de alta resolução e na complexidade da modelagem espacial para áreas urbanas, enquanto o ganho se reflete na precisão com que o método lida com padrões espaciais locais de oferta e demanda de serviços de vegetação.

Almeter et al. (2018) utiliza a abordagem multiobjetivo aplicada a árvores urbanas e visa reduzir o escoamento de águas pluviais e mitigar efeitos de ilhas de calor. Utilizando inventários municipais e ArcGIS, as entradas consistem em dados detalhados de vegetação urbana. A limitação principal está na falta de generalização desse modelo para outras áreas fora do escopo urbano específico. Contudo, os ganhos estão em sua alta precisão na avaliação da demanda local de SE relacionados à vegetação urbana.

Zhiming Li, Fan e Shen (2018) utilizou o método combinado Processo Analítico Hierárquico com Validação Cruzada (AHP-CV) para mapear a adequação de espaços verdes em áreas urbanas. Os principais inputs incluem dados de elevação, NDVI e fontes de poluição, derivados de imagens Landsat e Modelo Digital de Elevação (MDE). A metodologia oferece uma abordagem robusta para comparar a adequação de áreas verdes para fornecer SE. A limitação reside na dependência de pesos subjetivos no AHP, mas o ganho principal é a capacidade de integrar múltiplos critérios quantitativos e qualitativos de oferta de SE.

Haas e Ban (2018) foca em serviços de purificação do ar e regulação da temperatura, usando dados LULC de Sentinel e Landsat. No entanto, o artigo não apresenta uma abordagem clara sobre oferta ou demanda de SE, o que pode limitar sua aplicabilidade em análises comparativas.

De modo geral, todos os estudos se utilizam de dados espaciais e metodologias que integram sensoriamento remoto com ferramentas de SIG, como o ArcGIS. A principal diferença entre eles está no foco entre oferta e demanda de SE. O artigo de Liyun et al. (2018), por exemplo,

destaca a oferta de serviços, enquanto os artigos de Hoerbinger et al. (2018) e Almeter et al. (2018) se concentram na demanda.

Em 2018, Marsboom et al. (2018) utiliza a PCA, a metodologia envolve a combinação de dados de LULC com mapas de SE, permitindo a avaliação da qualidade do ar, biomassa de carbono e retenção de sedimentos. O uso da PCA é adequado para identificar padrões entre as variáveis ambientais. Hoerbinger et al. (2018) faz uso da ESDA, uma técnica que facilita a identificação de padrões espaciais. Esse estudo utilizou uma base de dados geográfica com dados de alta resolução de LULC para avaliar a vegetação próxima a redes ferroviárias. Almeter et al. (2018) utilizou uma abordagem multiobjetivo foi aplicada para estudar a redução do escoamento de águas pluviais e a mitigação de ilhas de calor em áreas urbanas, combinando dados de inventários de árvores urbanas com dados espaciais.

### **Limitações e desafios**

A quantificação da oferta e demanda enfrenta desafios significativos devido à qualidade e disponibilidade de dados, impactando a precisão dos modelos. Muitos estudos foram excluídos por utilizarem informações disponíveis apenas em nível nacional, o que limita sua aplicação em contextos diferentes. A dependência de dados nacionais restringe a replicação dos estudos e a generalização dos resultados em outras regiões.

Na oferta de SE, as principais limitações estão na resolução e cobertura dos dados biofísicos. As imagens de sensoriamento remoto, dependendo da resolução espacial, frequentemente não capturam a dinâmica local, especialmente em áreas urbanas. A falta de monitoramento contínuo e a desatualização dos dados, particularmente em países em desenvolvimento, aumentam as incertezas nas modelagens temporais.

Outro obstáculo é a integração de diferentes fontes de dados, que muitas vezes são coletados de forma desigual, comprometendo uma análise abrangente. Sem padronização, os modelos apresentam inconsistências, dificultando sua aplicabilidade em diferentes escalas geográficas.

A avaliação da demanda por SE é ainda mais complexa e subjetiva, influenciada por fatores socioeconômicos e culturais. A falta de dados socioeconômicos dificulta a modelagem precisa. Além disso, a demanda é dinâmica e pode mudar rapidamente com eventos extremos, urbanização e políticas públicas. Embora os modelos de oferta se baseiem em dados relativamente consistentes, como o uso do solo, os modelos de demanda dependem de variáveis humanas menos previsíveis.

A ausência de padronização nas metodologias para quantificar a demanda também é um desafio, e poucos modelos capturam adequadamente sua complexidade, especialmente em áreas urbanas. A interação entre oferta e demanda requer uma abordagem interdisciplinar, aumentando a complexidade dos modelos e limitando sua aplicabilidade em diferentes regiões.

O sensoriamento remoto, embora útil para grandes áreas, é inadequado para IV de pequeno porte, como telhados verdes e jardins verticais, devido à resolução limitada das imagens de satélite.

# Capítulo 4

## Métodos

Este capítulo apresenta a classificação e os métodos adotados para a pesquisa, delimitados conforme os critérios de Gil (2002) e Gerhardt e Silveira (2022). A dissertação é caracterizada como: (a) quali-quantitativa quanto à abordagem, pois integra métodos qualitativos e quantitativos para uma análise abrangente dos dados; (b) aplicada quanto à natureza, uma vez que busca gerar conhecimento com aplicação prática na solução de problemas ambientais; (c) exploratória quanto aos objetivos, por aprofundar o entendimento sobre a quantificação de SE, identificando padrões e metodologias relevantes; e (d) um estudo de caso quanto aos procedimentos, delimitando uma região de interesse.

O fluxograma metodológico foi estruturado em três etapas principais, apresentadas na Figura 4.1. Na primeira etapa, foi realizada a revisão sistemática da literatura, com o objetivo de investigar as perguntas de pesquisa, selecionar e avaliar os estudos mais relevantes, além de analisar criticamente os métodos utilizados para quantificar os benefícios ecossistêmicos associados às IV urbanas.

Na segunda etapa, foi definida a área de estudo com base na presença de IV urbanas. Foram analisados os padrões microclimáticos da região por meio de séries temporais de dados de qualidade do ar, térmicos e de precipitação. Posteriormente, foi realizada a aquisição e o pré-processamento das imagens orbitais dos sensores utilizando a plataforma GEE. Com base nos dados multiespectrais, foi feito o mapeamento das IV e o cálculo do NDVI. Também foi obtida a classificação do LULC, baseada nas imagens do Sentinel-2 e na coleção Dynamic World V1.

Na terceira etapa, foi feita a avaliação dos SE, considerando dois principais aspectos de regulação: a qualidade do ar, analisada por meio de testes estatísticos relacionando a presença de vegetação com a concentração de poluentes atmosféricos; e a regulação climática, analisada



por meio de testes estatísticos relacionando a presença de vegetação com indicadores de LST. As análises buscaram identificar padrões espaciais e temporais que evidenciem a influência da vegetação urbana sobre esses serviços. Além disso, foi desenvolvido um modelo preditivo de cenários por meio de uma RNC, cuja arquitetura da rede foi treinada com dados espectrais derivados das imagens orbitais RGB e LST. A preparação dos dados incluiu o empilhamento das bandas relevantes e a geração de dados de entrada e saída para o modelo.

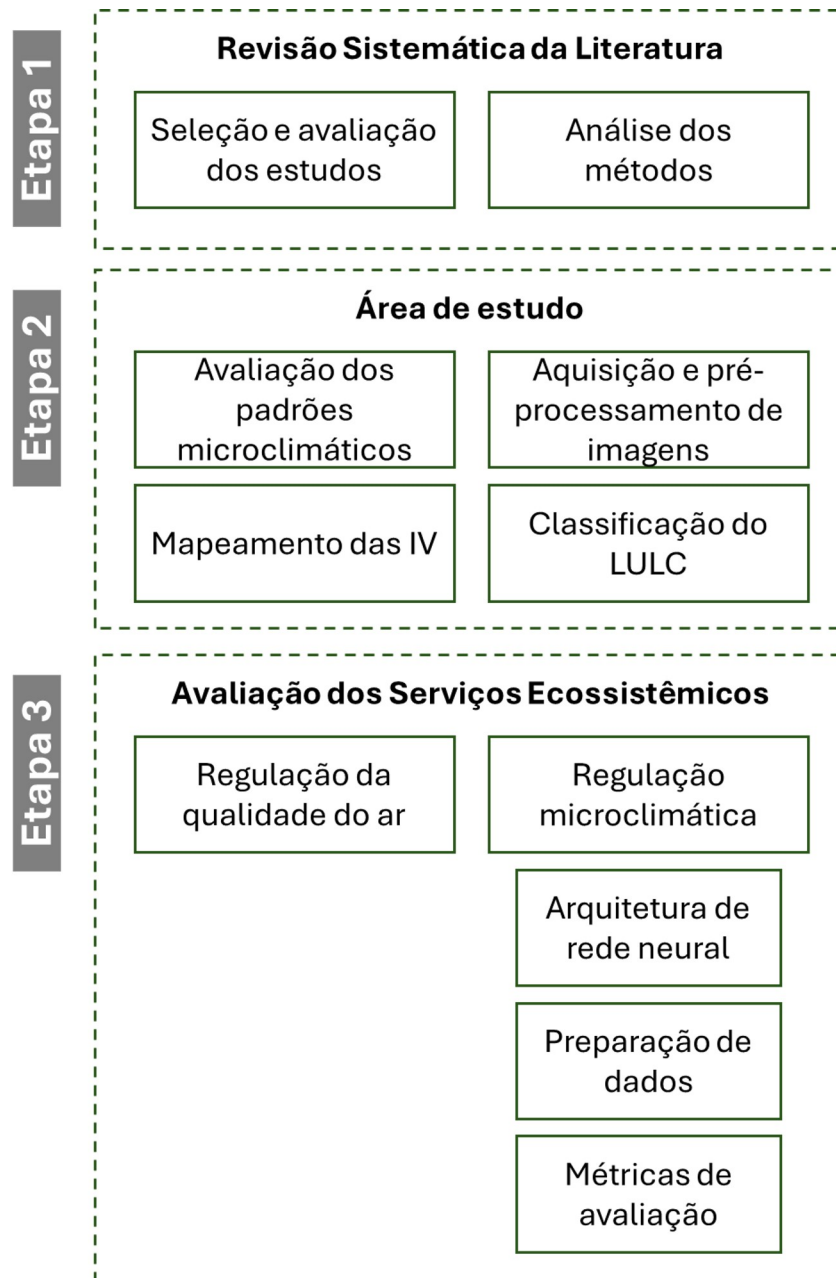


Figura 4.1: Fluxograma dos métodos de pesquisa.

## 4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Campinas, a sudeste do Brasil, com altitude média de 670 metros. O município ocupa uma área de 794,571 km<sup>2</sup> e possui uma população de aproximadamente 1.139.047 habitantes (IBGE, 2019). O clima da região é tropical, com temperaturas anuais médias variando entre 15°C e 22°C nas épocas mais frias e entre 25°C e 35°C nas mais quentes (CETESB, 2024). Com relação ao bioma, Campinas localiza-se numa zona de transição entre o cerrado e a mata atlântica (SMA-SP, 2017).

Foram analisadas quatro áreas do município: a Mata de Santa Genebra, a Fazenda Argentina, o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) e um perímetro da zona urbana adensada (Figura 4.2). Essas áreas foram escolhidas devido à heterogeneidade em relação ao LULC, oferecendo um panorama abrangente das dinâmicas de conservação ambiental, uso institucional, lazer urbano e urbanização densa, respectivamente. Essa diversidade torna-as propícias para investigar os impactos e interações entre o desenvolvimento urbano e o LULC em quatro diferentes cenários.

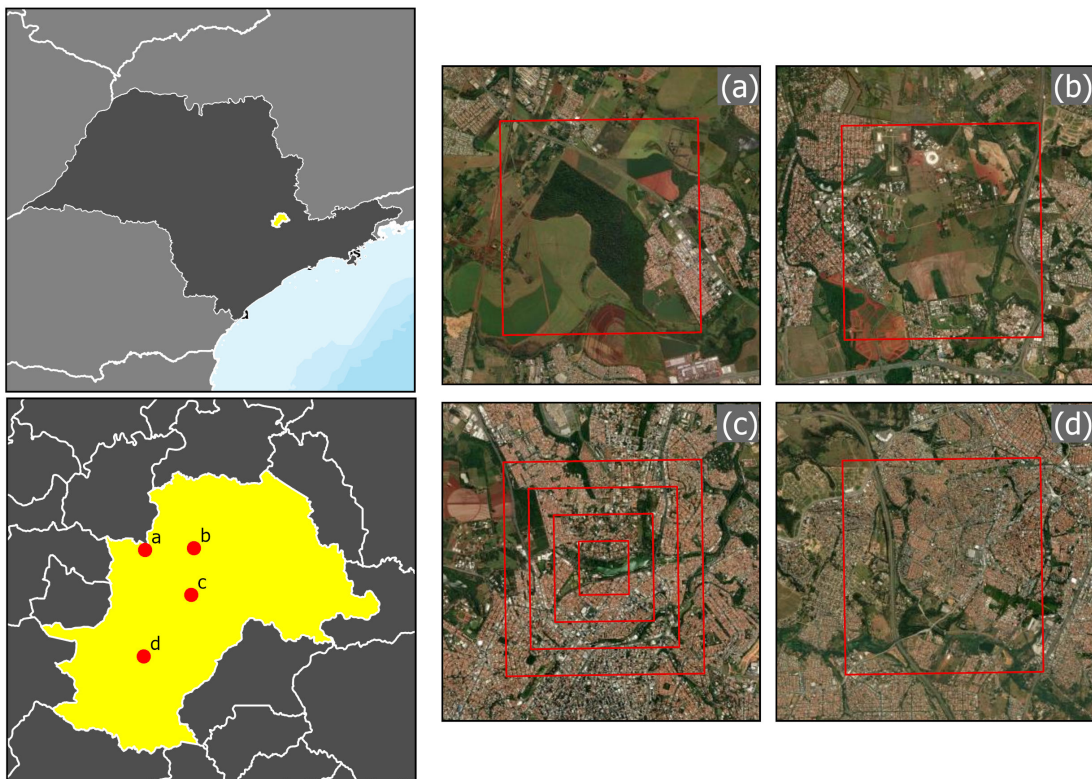


Figura 4.2: Localização da área de estudo. A esquerda, a delimitação do município de Campinas, São Paulo, Brasil. A direita, um destaque as áreas de estudo com o raio de observação de 2000 m: (a) Mata de Santa Genebra; (b) Fazenda Argentina; (c) Parque Portugal; e (d) área urbana adensada.

Quanto às suas características, a Mata de Santa Genebra é uma das maiores áreas remanescentes de Mata Atlântica em zona urbana no estado de São Paulo, cobrindo cerca de 251 hectares na região noroeste de Campinas. A Fazenda Argentina, por sua vez, destaca-se pelo uso institucional e pela preservação ambiental; é administrada pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e utilizada para atividades acadêmicas e de pesquisa. O Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) é uma área consolidada de lazer urbano, que combina espaços de recreação, esporte e cultura. E por fim, a zona urbana adensada é marcada por uma mistura de áreas residenciais, comerciais e industriais, apresentando elevado adensamento populacional e intensa ocupação do solo.

#### 4.1.1 Avaliação dos padrões microclimáticos

Para a caracterização dos padrões microclimáticos, foram utilizadas análises da variação anual de temperatura do ar e da concentração de poluentes atmosféricos (SHAHRESTANI et al., 2015; JAAFAR; LAKKIS; YERETZIAN, 2022; ROY; MIDDEY; KRUPADAM, 2025), utilizando dados secundários de temperatura do ar e poluentes atmosféricos do QUALAR e de pluviosidade da Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) opera uma rede automática de monitoramento composta por estações fixas distribuídas pela Região Metropolitana de São Paulo, áreas do interior, zonas costeiras, além de unidades móveis para avaliações temporárias. A rede mede continuamente as concentrações de poluentes regulamentados, utilizando sistemas telemétricos que transmitem dados em tempo real para um banco de dados central. Todas as medições seguem protocolos padronizados, em conformidade com as regulamentações brasileiras de qualidade do ar, com atualizações horárias disponibilizadas por meio da plataforma QUALAR (CETESB, 2024).

O conjunto de dados diários, horários e históricos foi obtido como formato .csv, de 2019 a 2024, e foi extraído das estações da rede automática de Campinas-Taquaral (UTM SIRGAS 2000 23K 288767 7468884), Campinas-Centro (UTM SIRGAS 2000 23K 288991 7465796) e Campinas-Vila União (UTM SIRGAS 2000 23K 282693 7460810). O processamento dos dados foi realizado em Python (bibliotecas pandas, matplotlib, seaborn e numpy) no ambiente Google Colab. Os dados foram transformados e organizados cronologicamente para facilitar a análise temporal. Além disso, valores iguais a zero, frequentemente indicativos de erros de medição ou falha de registros, foram tratados como nulos e excluídos. Foi aplicada a média

nos períodos da temperatura do ar e nos principais indicadores da qualidade do ar, incluindo material particulado ( $MP_{2,5}$  e  $MP_{10}$ ), ozônio ( $O_3$ ), monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), óxidos de nitrogênio totais ( $NO_x$ ) e monóxido de carbono (CO).

As médias mensais da temperatura do ar foram representadas graficamente para evidenciar as variações anuais ao longo do período de estudo, sendo organizadas em pares para facilitar a identificação das diferenças (SMALHEISER, 2017).

Já os parâmetros de qualidade do ar, foram utilizadas as concentrações médias mensais para identificar tendências e variações anuais, como também os dados médios de pluviosidade para o mesmo período.

#### **4.1.2 Aquisição e pré-processamento de imagens**

A aquisição e o pré-processamento de imagens de satélite foram feitas no GEE (GORELICK et al., 2017), utilizando séries temporais do Sentinel-2P e do Landsat 8 OLI/TIRS. Essas imagens são geralmente usadas em estudos ambientais, devido à sua resolução espacial e capacidades multiespectrais (GORELICK et al., 2017; AMANI et al., 2020).

No GEE, as coleções de dados importadas foram aquelas com níveis de correção mais avançados, já pré-processadas e que incluem correções atmosféricas e de qualidade (AMANI et al., 2020).

A coleção Sentinel-2P possui uma resolução espacial de 10 metros para as bandas do visível e infravermelho próximo, 20 metros para as bandas do infravermelho de ondas curtas e borda do vermelho, e 60 metros para as bandas usadas em correções atmosféricas (ESA, 2024). Com uma resolução temporal de 6 dias quando se combinam os satélites Sentinel-2A e 2B, essas imagens são importantes para o monitoramento da vegetação e estudos urbanos. A coleção também fornece dados de refletância de superfície corrigidos, disponíveis a partir de 2015 (GORELICK et al., 2017).

Já as coleções do Landsat 8 OLI/TIRS têm uma resolução espacial de 30 metros para a maioria das bandas e 15 metros para a banda pancromática, com uma granularidade temporal de 16 dias para cada satélite. As coleções de reflectância de superfície já contam com correções atmosféricas aplicadas, o que melhora a consistência dos dados para análise de séries temporais (GORELICK et al., 2017; ESA, 2024; USGS, 2024).

O Sentinel-2P utiliza a banda de avaliação de qualidade (QA60) e a coleção de probabilidade de nuvens para identificar e mascarar pixels cobertos por nuvens (ESA, 2024). Já o Landsat 8

OLI/TIRS oferece a informação de qualidade (pixel\_qa), que permite identificar e mascarar nuvens e sombras de nuvens (USGS, 2024).

Além dessas correções, foi aplicado também o filtro de nuvens de até 15% de cobertura de nuvem, valor ligeiramente maior do que o recomendado pela literatura (10%), para minimizar os ruídos decorrentes do número reduzido de imagens no conjunto de dados (RICHARDS, 2022; USGS, 2024).

### 4.1.3 Mapeamento das Infraestruturas Verdes

Para caracterizar as IV de Campinas, foram utilizados os arquivos espaciais (formato .shp) no banco de dados do Departamento de Informação, Documentação e Cadastro (DIDC) do município. Esses arquivos vetorizam os corredores ecológicos, áreas verdes, florestas urbanas, parques e a vegetação natural. Os dados foram atualizados, pelo menos nos últimos 10 anos, de acordo com o plano urbanístico municipal e as regulamentações locais, podendo servir como referência básica para a identificação da IV urbana. Além dos dados espaciais vetoriais, foi utilizado o NDVI para avaliar a qualidade e a saúde da vegetação nas áreas de IV.

O NDVI é um índice de sensoriamento remoto comumente utilizado que mede a diferença entre a luz do infravermelho próximo (fortemente refletida pela vegetação) e a luz vermelha (absorvida pela vegetação). O NDVI é calculado utilizando a normalização entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho (Equação 4.1), portanto, resultando em valores que variam de -1 a 1. Valores de NDVI mais próximos de 1 indicam vegetação mais saudável e densa, enquanto valores mais próximos de 0 sugerem áreas com pouca ou nenhuma vegetação (como solo exposto, áreas urbanas ou desmatadas). Valores negativos são geralmente associados a corpos d'água, nuvens ou neve. Essa análise proporciona uma avaliação mais abrangente da qualidade ecológica dos espaços verdes, enriquecendo a caracterização espacial com informações sobre a condição e funcionalidade da vegetação em diferentes áreas.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (4.1)$$

Onde: NIR representa a refletância na banda do infravermelho próximo do sensor, e Red representa a refletância na banda vermelha do sensor.

#### 4.1.4 Classificação do uso e cobertura da terra

Para a caracterização espaço-temporal do LULC, foi utilizada a coleção Dynamic World V1 (GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1), baseada em imagens Sentinel-2, disponível na plataforma GEE. A coleção possui classificações com resolução espacial de 10 metros e a classificação de LULC baseada na taxonomia do *IPCC Good Practice Guidance* e definidas como: água, árvores, grama, cultivos, arbustos e área construída. As classes foram definidas a partir de uma revisão das principais bases globais de mapeamento LULC, incluindo o sistema de classificação de ANDERSON et al. (1976), o *ESA Land Cover*, o *Land Use and Coverage Area Frame Survey*, além das tipologias adotadas pelo MapBiomas e pelo GlobeLand30 (BROWN et al., 2022).

As etapas de avaliação foram divididas em três: (I) obtenção das imagens e classificação do LULC por período; (II) identificação da classe dominante por pixel em cada período; e (III) quantificação da área percentual ocupada por cada classe ao longo dos períodos (BROWN et al., 2022).

Na etapa I, para cada um dos períodos sazonais definidos, foi extraída uma subcoleção da Dynamic World (versão 1), filtrada por data e pela área de interesse (AOI). A coleção foi então reduzida por moda ao longo do tempo, resultando em um rótulo de classe dominante por pixel para cada período (BROWN et al., 2022).

Na etapa II, a imagem de classes dominantes foi utilizada para calcular a distribuição espacial das classes de LULC. Para isso, aplicou-se o redutor `ee.Reducer.frequencyHistogram()` sobre a imagem de classificação, o que permitiu contar o número de pixels atribuídos a cada classe dentro da AOI em cada período.

Por fim, na etapa III, a área ocupada por cada classe foi estimada multiplicando-se o número de pixels por classe pela área correspondente de cada pixel (100 m<sup>2</sup>). Os valores foram convertidos para hectares (ha) e expressos como porcentagem do total da AOI, permitindo avaliar a variação da ocupação das diferentes classes de LULC ao longo dos períodos analisados (BROWN et al., 2022).

O resultado dessas etapas foi resumido em visualização de mapa de LULC por classe, gráficos de probabilidade média por classe e tabela com percentual por classe. Além disso, ressalta-se que, neste estudo, os dados foram processados na plataforma Google Colab, por meio da integração com a API do GEE, que permitiu a automação das etapas de filtragem temporal, composição de imagens e extração de estatísticas espaciais. A série temporal

considerada abrange o período de 2019 a 2024, com foco em recortes sazonais representativos das variações microclimáticas locais (BROWN et al., 2022).

## 4.2 Avaliação da regulação ecossistêmica

A avaliação da regulação dos SE foi analisada sob a perspectiva de regulação da qualidade do ar e de regulação microclimática. Em suma, a regulação da qualidade do ar foi analisada a partir de dados secundários obtidos conforme descrito no item 4.1.2. Já a regulação microclimática foi investigada com base na LST. Essa abordagem permitiu examinar o efeito da cobertura vegetal sobre o controle térmico nas áreas urbanas.

### Regulação da qualidade do ar

A avaliação da qualidade do ar foi realizada com base em dados secundários fornecidos pela CETESB, abrangendo períodos bianuais (estações quente e fria) entre 2019 e 2024 – coletados no item 4.1.1. A investigação da influência da vegetação sobre a qualidade do ar foi possível somente em um ponto de Campinas, neste caso a Lagoa Portugal (Parque do Taquaral), devido à presença de sensores de coleta e monitoramento. Desta forma, foram estabelecidas máscaras ao redor da área de estudo, e posteriormente os dados foram comparados com o NDVI médio de cada área. As máscaras foram obtidas a partir das coordenadas geográficas do ponto central, delimitado com base na camada vetorial da área de estudo aplicando a ferramenta *Feature To Point* do ArcGIS PRO, foram feitos *buffers* quadrados com raios de 500, 1000, 1500 e 2000 metros, definindo as Áreas de Interesse (AOIs) (Figura 4.2 c).

O conjunto de dados foi processado em Python, utilizando as bibliotecas *pandas*, *numpy*, *matplotlib* e *seaborn*, em ambiente Google Colab. Os dados foram extraídos, transformados e organizados cronologicamente para possibilitar a análise temporal por período. Para assegurar a qualidade dos dados, valores nulos ou iguais a zero — frequentemente indicativos de falhas de medição — foram tratados como ausentes e excluídos das análises. A investigação focou nos indicadores de material particulado ( $MP_{10}$ ), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), óxidos totais de nitrogênio ( $NO_x$ ) e ozônio ( $O_3$ ).

As imagens de satélite foram obtidas a partir da coleção harmonizada do Sentinel-2 (COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED), aplicando a Equação 4.1. Esta coleção foi

harmonizada entre os dois satélites (S2A e S2B) para garantir consistência espectral e radiométrica, especialmente após atualizações nos sensores.

O processamento das imagens também foi conduzido na plataforma no Google Colab através da API do GEE. As imagens foram filtradas nos períodos temporais de representatividade e espacialmente recortadas conforme os raios de observação da AOI. Foram aplicadas as funções de mascaramento de nuvens e cirros para minimizar interferências atmosféricas, além de um filtro que selecionou apenas imagens com menos de 15% de cobertura de nuvens. Fatores de escala foram utilizados para normalizar as bandas ópticas (vermelho, verde, azul e infravermelho próximo), convertendo os valores de reflectância do topo da atmosfera para uma escala entre 0 e 1, garantindo maior precisão nos cálculos de índices espectrais.

Foi criado um banco de dados com os valores médios do NDVI para cada período de análise, organizados em um *DataFrame* contendo duas colunas: o identificador do período e o valor médio de NDVI correspondente. Paralelamente, foram calculadas as estatísticas descritivas dos poluentes atmosféricos selecionados, incluindo média, mediana, desvio padrão, valor mínimo e máximo para cada poluente em cada período.

Em seguida, os dados de NDVI e de poluentes foram integrados em um único *DataFrame*, por meio da correspondência entre os períodos analisados. O conjunto resultante passou a conter, para cada período, os valores médios de NDVI e de cada poluente atmosférico. A base unificada foi utilizada para análises gráficas posteriores.

### **Regulação microclimática**

A regulação microclimática utiliza a recuperação da LST, que foi obtida utilizando o Algoritmo de Canal Único, baseado na equação invertida de Planck. Este método foi implementado no ambiente Google Colab através da API com o GEE. Avdan e Jovanovska (2016) desenvolveram uma abordagem automatizada especificamente para o cálculo da LST a partir de imagens da coleção do Landsat 8 OLI/TIRS (LANDSAT/LC08/C02/T1\_L2), a qual serviu como base para este método. O processo de cálculo segue etapas que incluem a derivação do NDVI, a proporção de vegetação ( $P_v$ ), a emissividade da superfície terrestre ( $\epsilon$ ) e, finalmente, a LST.

O NDVI foi calculado conforme a Equação 4.1. Esse índice é particularmente importante porque serve como base para o cálculo do  $P_v$ .



O Pv é calculado para representar a proporção de vegetação em relação à área total. Os valores de NDVI podem variar significativamente entre diferentes áreas de estudo, dificultando o estabelecimento de padrões universais (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2009; AVDAN; JOVANOVSKA, 2016). Portanto, é essencial considerar os valores mínimos ( $NDVI_{min}$ ) e máximos ( $NDVI_{max}$ ) observados dentro da área de estudo. Essa abordagem normaliza o NDVI, permitindo comparações consistentes entre diferentes regiões e períodos.

$$Pv = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Onde: Pv representa a proporção de vegetação;  $NDVI_{min}$  é o menor valor de NDVI dentro da área de estudo; e  $NDVI_{max}$  é o maior valor de NDVI dentro da área de estudo.

Para determinar a LST, é necessário conhecer a  $\varepsilon$ , que atua como um fator de proporcionalidade que ajusta a radiância de um corpo negro, de acordo com a Lei de Planck, para prever a radiância emitida por superfícies reais (SOBRINO; JIMÉNEZ-MUÑOZ; PAOLINI, 2004; AVDAN; JOVANOVSKA, 2016). Quando a região de estudo contém uma combinação de solo exposto e vegetação, a emissividade é determinada utilizando a Equação 4.3, conforme sugerido por Sobrino, Jiménez-Muñoz e Paolini (2004).

$$\varepsilon = 0.004 \times Pv + 0.986 \quad (4.3)$$

A etapa final na obtenção da LST corrigida pela emissividade envolve o ajuste da temperatura de brilho utilizando a emissividade, conforme mostrado na Equação 4.4 (AVDAN; JOVANOVSKA, 2016; WALEED et al., 2023).

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left( \frac{\lambda \cdot T_B}{\rho} \right) \ln(\varepsilon)} - 273.15 \quad (4.4)$$

Onde: LST representa a temperatura da superfície terrestre em graus Celsius ( $^{\circ}C$ );  $T_B$  representa a temperatura de brilho derivada da banda térmica do sensor, medida em kelvin (K);  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiância emitida específica da banda térmica do sensor, definido aqui como 0.0000115 metros (m) (imagens Landsat-8 cortesia do U.S. Geological Survey);  $\rho$  é o fator de escala que incorpora constantes físicas para ajustar os efeitos atmosféricos, com valor de  $1.438 \times 10^{-2}$  metros-kelvin (m.K) (SOBRINO; JIMÉNEZ-MUÑOZ; PAOLINI, 2004; AVDAN; JOVANOVSKA, 2016; WALEED et al., 2023); e  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície, calculada pela Equação 4.3.

Após recuperado o LST, foram extraídas as estatísticas descritivas da LST (mediana, média, mínimo, máximo e desvio padrão), organizando essas informações por período para análises gráficas posteriores.

### 4.2.1 Modelo de Previsão de Cenários

Modelos preditivos por meio de técnicas de aprendizado de máquina têm se mostrado uma abordagem promissora para apoiar o planejamento urbano sustentável e a tomada de decisão baseada em evidências (ZHU et al., 2017; MA et al., 2019). Dentre essas técnicas, as redes neurais profundas vêm sendo amplamente utilizadas para modelar variáveis ambientais complexas, como a LST, devido à sua capacidade de capturar padrões espaciais e não lineares presentes nos dados de sensoriamento remoto (ZHU et al., 2017; MA et al., 2019; BISCHKE et al., 2019).

Neste contexto, este item apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo preditivo baseado em RNC, com foco na estimativa da LST a partir de imagens multiespectrais RGB do satélite Sentinel-2. Para essa finalidade, foi adotada a arquitetura U-Net adaptada para regressão, reconhecida por sua eficácia em tarefas de predição espacial e segmentação semântica (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2015; BISCHKE et al., 2019).

A seguir, são descritas a estrutura da rede, os procedimentos de pré-processamento dos dados, o processo de treinamento e validação do modelo, bem como a avaliação de seu desempenho. A utilização deste modelo visa contribuir para o entendimento dos impactos térmicos relacionados ao LULC, especialmente em áreas urbanas e periurbanas.

#### Arquitetura da rede neural

A arquitetura de rede neural escolhida foi a U-Net, que consiste em um caminho de contração (*encoder*) e um caminho de expansão (*decoder*) (Figura 4.3). O caminho de contração assemelha-se à arquitetura de uma rede convolucional, que consiste na repetida aplicação de duas convoluções 3x3 (convoluções sem preenchimento), cada qual seguida por uma unidade linear retificada (ReLU) e uma operação de *max pooling* 2x2 com passo 2 para reduzir a dimensionalidade da imagem (*downsampling*). A cada etapa de *downsampling*, é dobrado o número de canais de características (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2015).

Já no caminho de expansão, a rede faz o processo inverso. Em cada etapa, a imagem é ampliada (*upsampling*) e, em seguida, passa por uma convolução 2x2 (*up-convolution*), que

reduz o número de canais de características pela metade. Posteriormente, o mapa resultante é concatenado com o mapa de características correspondente do caminho de contração (que é cortado para se ajustar ao tamanho). Em seguida, são aplicadas duas convoluções 3x3, cada uma acompanhada de uma ReLU. O corte (*cropping*) é necessário porque as convoluções anteriores causam a perda de pixels nas bordas (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2015).

Neste estudo, a U-Net foi adaptada para regressão pixel a pixel aplicada a imagem RGB, onde a saída não é uma máscara de segmentação, mas um valor contínuo de LST em cada pixel. A convolução final 1x1 foi ajustada para produzir um único valor contínuo por pixel, em vez de múltiplas classes. Essa arquitetura é particularmente eficaz para tarefas que exigem a combinação de informações contextuais capturadas no *encoder* com detalhes espaciais de alta resolução preservados pelas conexões de salto (*skip connections*), tornando-a ideal para o mapeamento de regressão a partir de imagens (YAO et al., 2018; RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2015).

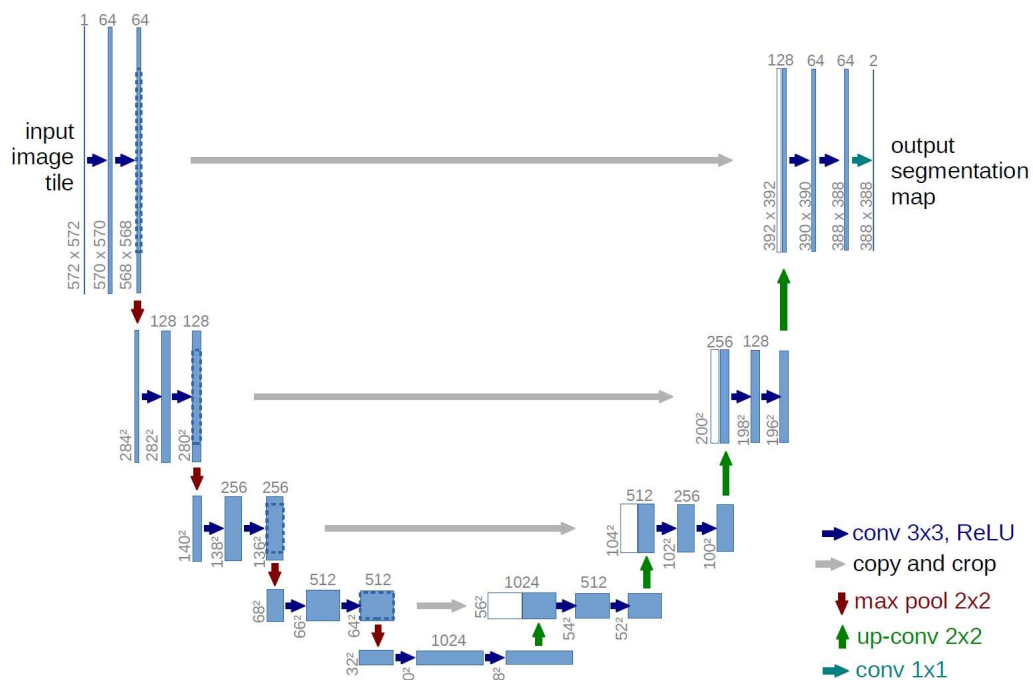


Figura 4.3: Modelo de arquitetura da U-Net.

Fonte: Ronneberger, Fischer e Brox (2015).

De forma simplificada, a U-Net é uma rede de inteligência artificial desenvolvida para analisar imagens. Ela funciona como um "funil duplo": primeiro, a imagem é comprimida para extrair informações importantes (como cores, formas e padrões), e depois essas informações são ampliadas novamente para gerar um resultado detalhado, como um mapa.

No caso deste estudo, a rede foi adaptada para prever a LST em cada ponto da imagem a partir de um conjunto de imagens RGB adquiridas no mesmo período.

### **Preparação dos dados**

Os dados utilizados foram pré-processados por meio de técnicas de processamento digital de imagens, incluindo a normalização dos valores de pixel e o redimensionamento das imagens para dimensões compatíveis com a arquitetura da RNC (GONZALEZ; WOODS, 2018). Essas etapas são fundamentais para garantir a padronização dos dados e a estabilidade durante o treinamento dos modelos.

A base de dados foi composta por duas coleções principais: uma de imagens RGB e outra de LST. Essas imagens foram divididas em blocos menores e em diferentes escalas, conforme as necessidades de processamento e a aplicabilidade dos modelos (ZHU et al., 2017). A fragmentação foi essencial para permitir a análise espacial detalhada e o uso eficiente de recursos computacionais.

Posteriormente, cada bloco de imagem foi rotulado com base na média do LST da área correspondente. A base de dados foi então separada em dois subconjuntos: 80% para treinamento e validação e 20% para teste, conforme as boas práticas em modelagem preditiva (GOODFELLOW; COURVILLE; BENGIO, 2015).

A normalização dos dados envolve ajustar os valores dos pixels das imagens para uma escala comum, entre 0 e 1, o que facilita o treinamento do modelo ao evitar discrepâncias de magnitude entre as características. O redimensionamento das imagens é o processo de ajustar todas as imagens para um tamanho uniforme, necessário para garantir compatibilidade com a arquitetura da RNC (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2015).

Devido à resolução espacial e à área de cobertura das imagens, foi necessário decompor os dados em blocos menores para viabilizar o processamento RNC para garantir que a análise seja feita de forma eficiente, considerando as limitações de armazenamento e poder computacional da RNC, além de preservar a precisão dos resultados.

Os modelos de RNC são os mais indicados para a classificação a partir de dados em duas dimensões. Nestes modelos, as imagens são utilizadas como parâmetro de entrada da rede neural e os índices de temperatura servirão como parâmetros de saída. Uma vez que os modelos forem treinados e testados, será possível prever a variação de temperatura em determinada

região utilizando o RGB atual e a LST, o que gerou um LST sintético (ZHANG, Y.; WANG, Y.; DING, 2022).

As RNC também se destacam por serem modelos não-lineares tendo capacidade de extrair informações mais complexas, como a possível influência da infraestrutura ao redor e a presença de *hot spots* em determinadas áreas. Além disso, a rede também foi utilizada para cenários inversos, onde há a implementação de áreas urbanas em locais de áreas verdes.

### Métricas de avaliação

Após a construção do modelo, foram aplicadas diferentes métricas para avaliar o desempenho durante o treinamento e a validação: o Erro Quadrático Médio (MSE), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Erro Médio Absoluto (MAE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O MSE quantifica a diferença média entre os valores previstos e os valores reais ao elevar essas diferenças ao quadrado, penalizando de forma mais intensa erros de maior magnitude. Essa métrica é amplamente utilizada em problemas de regressão por sua sensibilidade a grandes desvios (GOODFELLOW; COURVILLE; BENGIO, 2015). A Equação 4.5 apresenta o cálculo do MSE:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.5)$$

Em que  $y_i$  representa os valores reais,  $\hat{y}_i$  os valores previstos e  $n$  o número total de observações.

ORMSE corresponde à raiz quadrada do MSE (Equação 4.6), fornecendo uma interpretação na mesma unidade da variável de interesse.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.6)$$

O MAE mede a diferença média absoluta entre valores reais e previstos (4.7), sendo menos sensível a *outliers* em comparação ao MSE e ao RMSE.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.7)$$

Por fim, o  $R^2$  avalia a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo, variando entre 0 e 1, em que valores mais próximos de 1 indicam melhor ajuste (4.8).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.8)$$

Em que  $\bar{y}$  representa a média dos valores observados.

## Capítulo 5

### Resultados e discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados explorados no Capítulo 4, com o objetivo de identificar períodos sazonais representativos, quantificar os SE de regulação climática e de qualidade do ar no município de Campinas/SP, e de avaliar a influência das alterações no LULC e das características da vizinhança na provisão desses serviços.

#### 5.1 Avaliação dos padrões térmicos e atmosféricos

Os resultados estatísticos permitiram identificar os períodos com maior contraste entre os padrões térmicos e atmosféricos da região de estudo, possibilitando assim uma seleção temporal mais precisa dos conjuntos de dados orbitais que melhor representam as diversas condições microclimáticas observadas ao longo dos anos. Para isso, foram analisados os dados de temperatura do ar e concentração de poluentes atmosféricos.

A temperatura do ar (Figura 5.1) e a diferença entre os meses (Figura 5.2) evidenciam a dinâmica sazonal do município de Campinas. O Figura 5.1 traz o gráfico do tipo boxplot que indica as estatísticas de mediana, quartis 25% e 75%, valores máximos e mínimos, e outliers. Foi observado que os meses mais frios estão entre maio e agosto, enquanto os meses mais quentes estão entre dezembro e março, com medianas e máximas mais elevadas. Os meses de abril e setembro são meses de transição de sazonalidade.

A presença ou ausência de valores discrepantes (outliers) foi ajustada na visualização dos boxplots, permitindo uma análise focada na tendência. Assim, a comparação entre os meses evidencia as diferenças de regime térmico entre os meses. A variabilidade apresentada (medida

pelo desvio padrão) reforça a ideia de que certos meses apresentam condições climáticas mais dinâmicas, possivelmente por influência de fenômenos meteorológicos locais.

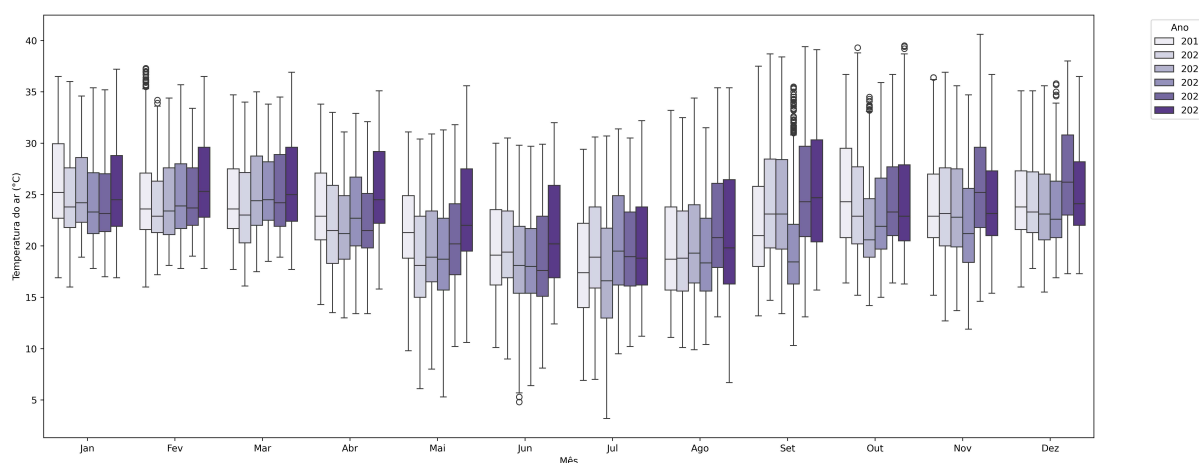


Figura 5.1: Comparação mensal da temperatura do ar durante 2019 a 2024.

Complementar à análise anterior, foi realizada a comparação entre os meses para identificar as diferenças nas temperaturas médias do ar, conforme ilustrado no mapa de calor da Figura 5.2. Os meses de verão, como dezembro e janeiro, apresentam os maiores valores médios de temperatura, enquanto os meses de inverno, especialmente junho e julho, registram os menores. Essa diferença sazonal é evidenciada por variações de até  $+5,9^{\circ}\text{C}$ , particularmente entre julho e janeiro.

No geral, foi observada uma maior diferença térmica entre os meses de maio, junho, julho e agosto em comparação aos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro. Essa tendência evidencia a transição acentuada entre estações térmicas, com os meses de abril e setembro funcionando como períodos de inflexão.



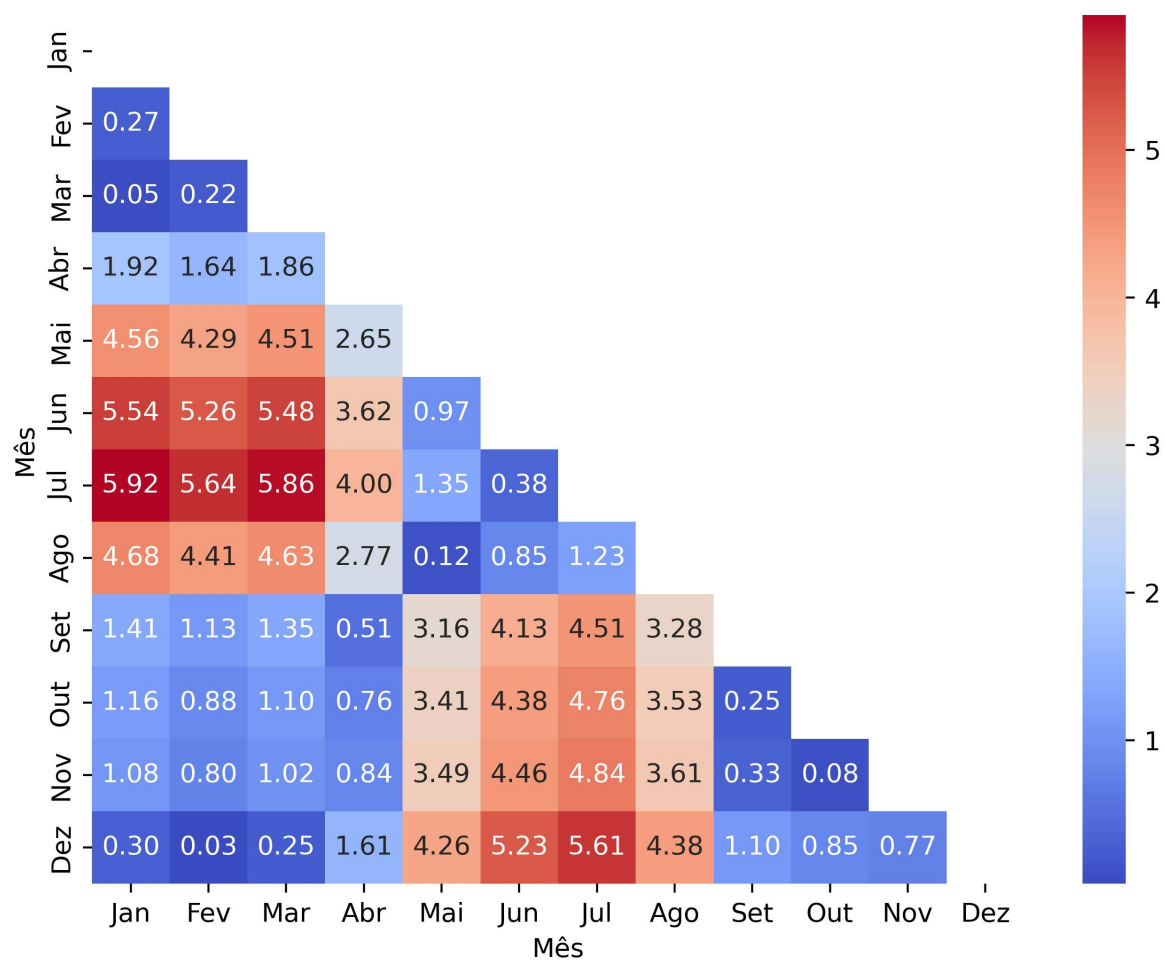


Figura 5.2: Diferenças médias mensais de temperatura entre 2019 e 2024 através da representação por mapa de calor.

Além disso, também foram analisadas as concentrações de poluentes atmosféricos (Figura 5.3). Durante o período de dezembro a março, os níveis de poluentes, especialmente os particulados ( $MP_{2,5}$ ,  $MP_{10}$ ) e os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ,  $NO_2$ ), são mais baixos devido à alta precipitação, que reduz a poluição atmosférica.

No período de abril a setembro, os níveis de poluentes aumentam consideravelmente, especialmente PM e  $NO_x$ , devido a menor precipitação. O ozônio tem uma sazonalidade única, com picos durante o período quente, quando as condições de maior radiação solar e temperatura favorecem sua formação, tendo picos entre setembro a março (CHEN et al., 2023).

Neste contexto, a sazonalidade microclimática de Campinas está claramente marcada por um ciclo anual em que os meses de inverno são mais críticos para a qualidade do ar, com concentrações mais elevadas de poluentes, enquanto o verão, com maior precipitação, melhora a dispersão e remoção desses poluentes.

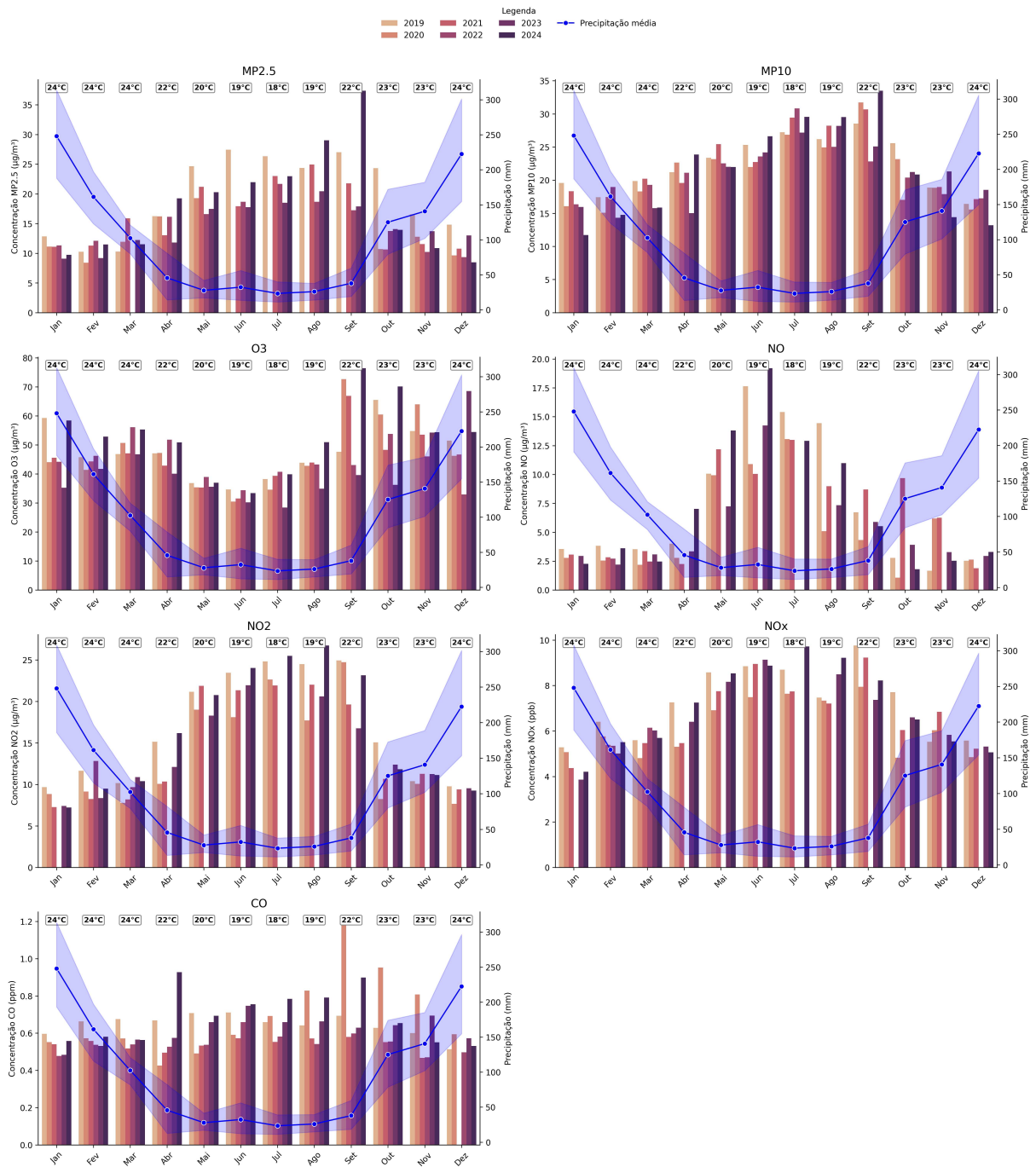


Figura 5.3: Concentração média mensal de poluentes atmosféricos entre os anos de 2019 a 2024.

A implementação desta abordagem para identificar padrões térmicos e atmosféricos foi importante para definir os períodos analíticos representativos para a coleta de dados de imagens orbitais. Essa análise permitiu compreender a dinâmica sazonal e os picos de concentração de poluentes, além de identificar as épocas mais críticas para o monitoramento ambiental. Com base nessas informações, foram adotadas as janelas temporais que representam as condições microclimáticas ao longo do ano e estão representadas na Tabela

5.1, onde foi possível agrupar os meses do ano em dois grupos distintos, com base nos padrões sazonais observados. O primeiro grupo abrange os meses de abril a setembro, que correspondem ao período mais frio do ano. Esses meses são caracterizados por variações negativas de temperatura, como evidenciado pelas tonalidades de azul no mapa de calor (Figura 5.2), refletindo a transição do outono até o fim do inverno e o início da primavera.

O segundo grupo, composto pelos meses de outubro a março, está associado ao período mais quente do ano. Esses meses apresentam variações positivas de temperatura, representadas pelas tonalidades de vermelho no mapa (Figura 5.2), indicando a primavera e o verão, quando as temperaturas aumentam significativamente. Portanto, a Tabela 5.1 reflete os períodos, ou seja, janelas de análise dos dados.

Tabela 5.1: Períodos para análise temporal

| <b>Período</b> | <b>Início</b> | <b>Fim</b> |
|----------------|---------------|------------|
| Frio           | 01/04/2019    | 30/09/2019 |
| Quente         | 01/10/2019    | 31/03/2020 |
| Frio           | 01/04/2020    | 30/09/2020 |
| Quente         | 01/10/2020    | 31/03/2021 |
| Frio           | 01/04/2021    | 30/09/2021 |
| Quente         | 01/10/2021    | 31/03/2022 |
| Frio           | 01/04/2022    | 30/09/2022 |
| Quente         | 01/10/2022    | 31/03/2023 |
| Frio           | 01/04/2023    | 30/09/2023 |
| Quente         | 01/10/2023    | 31/03/2024 |

## 5.2 Avaliação da regulação da qualidade do ar

Foram realizadas análises de correlação de Spearman entre o índice de vegetação NDVI e os poluentes atmosféricos ( $MP_{10}$ , NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e O<sub>3</sub>) no entorno do Parque Portugal (Lagoa do Taquaral), em Campinas/SP. Para isso, foram considerados diferentes raios de observação de NDVI de 500 m, 1000 m, 1500 m e 2000 m, como ilustra a Figura 4.2. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5.4 e 5.5.

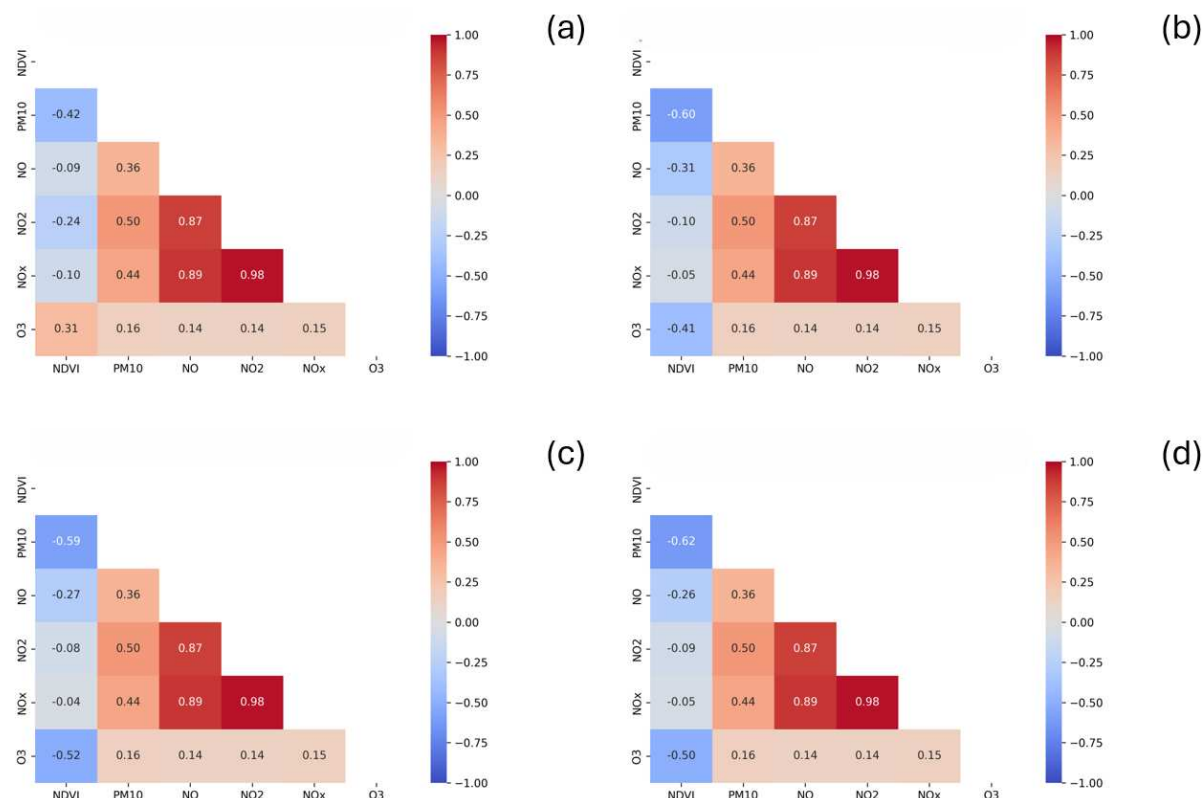


Figura 5.4: Correlação entre o índice de vegetação NDVI e poluentes atmosféricos no Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) em Campinas/SP para diferentes raios de observação: (a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m; e (d) 2000 m).

De modo geral, a interpretação da Figura 5.4 indica que a correlação negativa entre o NDVI e o  $MP_{10}$  se torna mais expressiva com o aumento do raio de análise (moderada). As correlações obtidas para os raios de 500 m, 1000 m, 1500 m e 2000 m foram, respectivamente, -0,42, -0,60, -0,59 e -0,62, indicando que a cobertura vegetal no entorno da estação exerce influência moderada e está associada à redução das concentrações de material particulado.

Esse comportamento corrobora os achados de estudos anteriores. Nowak, Crane e Stevens (2006) demonstraram que áreas urbanas com maior cobertura arbórea (árvores urbanas e arbustos) podem reduzir significativamente a concentração de material particulado ( $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ ) por meio de interceptação e deposição seca. Escobedo e Nowak (2009) identificaram a diminuição das concentrações de poluentes como  $MP_{10}$  em áreas florestais urbanas de Santiago no Chile, destacando a importância da vegetação na melhoria da qualidade do ar.

Os poluentes gasosos primários NO,  $NO_2$  e  $NO_x$  apresentam correlações fracas negativas com o NDVI. No raio de 1000 m, por exemplo, o NDVI se correlaciona com NO em -0,31. Resultados próximo ao de Jason G. Su et al. (2011), que mostraram parques urbanos, localizados

em Los Angeles nos Estados Unidos, podem apresentar menores concentrações de  $\text{NO}_2$  se comparados a áreas adjacentes, principalmente com alta densidade populacional.

Por outro lado, o comportamento do  $\text{O}_3$  de 500 m, observa-se uma correlação fraca positiva entre o NDVI e o  $\text{O}_3$  (+0,31). Entretanto, à medida que o raio aumenta para 1000, 1500 e 2000 m, a correlação se torna negativa, variando de -0,41 a -0,52. O ozônio troposférico é um poluente secundário formado por reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e compostos orgânicos voláteis, catalisadas pela radiação solar, conforme descrito por Finlayson-Pitts e Pitts (2000). Sicard et al. (2018) apontam que o efeito geral da vegetação sobre o ozônio é altamente dependente do contexto local, incluindo clima, tipo de vegetação e concentração de precursores.

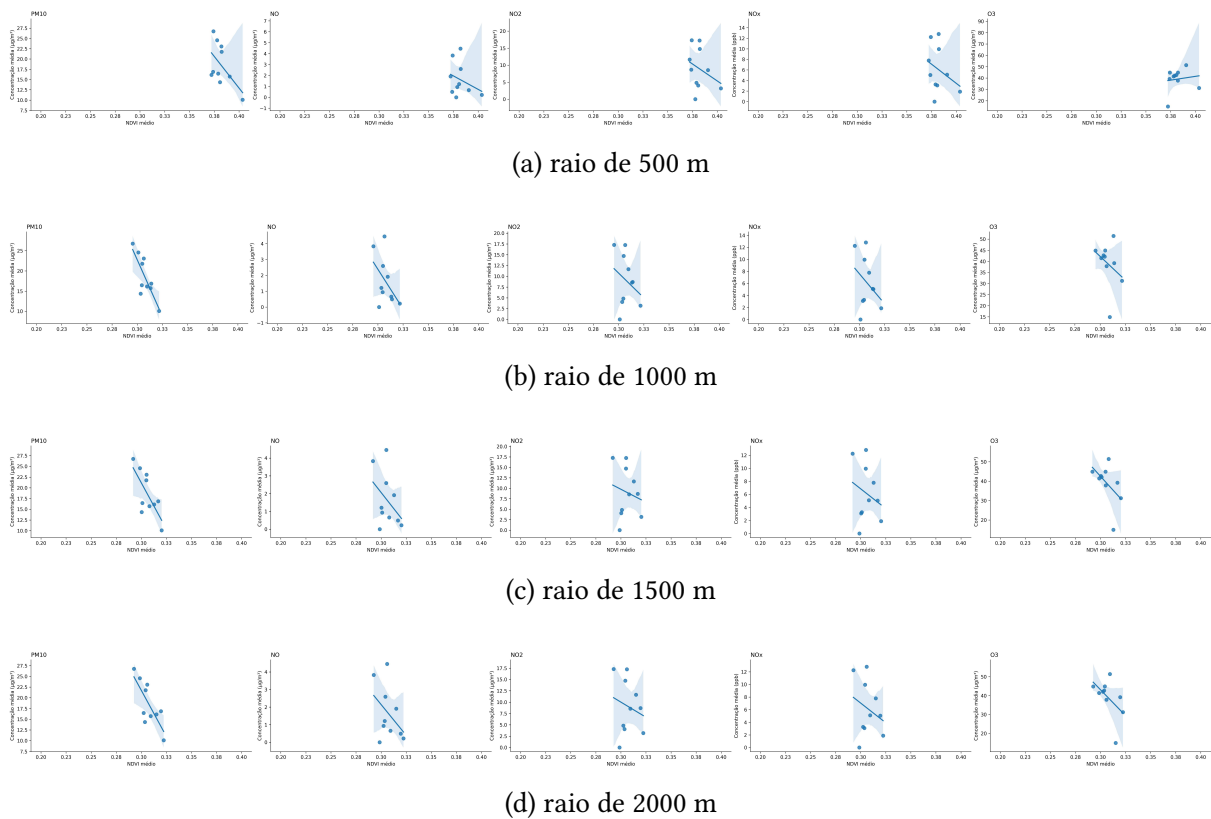


Figura 5.5: Gráficos da distribuição temporal do NDVI e dos poluentes atmosféricos para o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) nos raios de observação de 500m, 1000m, 1500m e 2000m.

A cobertura vegetal em áreas urbanas mostra-se como importante aliada na mitigação dos impactos da poluição atmosférica ao atuar na remoção de poluentes como  $\text{MP}_{10}$  e  $\text{O}_3$ . Alguns estudos, como o de Fusaro et al. (2017) e Şahin Körmeçli e Seçkin Gündoğan (2024) avaliaram como árvores e arbustos podem absorver e filtrar poluentes atmosféricos por meio dos sistemas foliares, ajudando na melhoria da saúde pública e na regulação da qualidade do ar nas cidades.

Fusaro et al. (2017) mapearam e quantificaram a remoção de  $MP_{10}$  e  $O_3$  por vegetação lenhosa na região do Lácio, na Itália, focado no município de Roma, e observaram que espécies perenes apresentaram maior eficiência na remoção de material particulado, enquanto as decíduas tiveram maior capacidade de absorção de ozônio. De acordo com os autores, a remoção total estimada foi de 5123 mg de  $MP_{10}$  e 19.074 mg de  $O_3$ , representando um benefício monetário relativo de 161 e 149 milhões de euros, respectivamente.

Resultados semelhantes foram encontrados por Şahin Körmeçli e Seçkin Gündoğan (2024) em um estudo realizado na Universidade de Çankırı, na Turquia, onde áreas com 32% de cobertura de vegetação (entre árvores, arbustos e grama) presentes no campus foram capazes de remover mais de 500 kg de gases e partículas poluentes do ar anualmente. Os autores estimaram que a substituição de áreas de solo exposto por vegetação arbórea aumentaria em cinco vezes os SE relacionados à qualidade do ar, sequestro e armazenamento de carbono.

No entanto, os efeitos da vegetação sobre a poluição atmosférica não são sempre positivos. Oosterbroek et al. (2023) ressaltam que a presença de espaços verdes pode, em certas configurações, reduzir a velocidade do vento e dificultar a dispersão de poluentes, criando bolsões de ar contaminado ao nível do pedestre. De acordo com os autores, a vegetação urbana pode bloquear ou redirecionar a poluição do ar, mas também pode reduzir a velocidade do vento e, assim, retardar a dispersão das emissões do tráfego.

Apesar dessas limitações, a maioria dos estudos aponta para benefícios positivos. Grunwald, Heusinger e Weber (2017) destacam o papel dos telhados verdes, que podem contribuir tanto para a regulação microclimática quanto para a melhoria da qualidade do ar em áreas densamente urbanizadas, onde o espaço para vegetação ao nível do solo é limitado.

Além disso, ferramentas de planejamento espacial, como os modelos de bundles de SE discutidos por Marsboom et al. (2018), reforçam a importância de considerar múltiplos serviços em conjunto, especialmente em áreas urbanas multifuncionais. Esses modelos permitem identificar zonas prioritárias para intervenção verde com base na coocorrência de benefícios como controle da poluição, mitigação de ilhas de calor e conectividade ecológica.

Os produtos encontrados corroboram com a hipótese de que a vegetação urbana é significativamente fundamental para a regulação da qualidade do ar, principalmente no que se refere à redução de partículas inaláveis e óxidos de nitrogênio. Assim, políticas públicas voltadas à expansão e conservação de áreas verdes urbanas podem ter um impacto direto na

mitigação dos efeitos da poluição atmosférica, contribuindo para a promoção da saúde pública e para a adaptação às mudanças climáticas nas cidades.

### 5.3 Avaliação da regulação microclimática

Esta seção mostra uma análise detalhada da regulação microclimática multitemporal nas quatro áreas selecionadas no município de Campinas (SP): Mata de Santa Genebra, Fazenda Argentina, Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) e uma parte da área urbana adensada. A abordagem adotada é baseada na utilização de dados orbitais provenientes do sensor Landsat 8 OLI/TIRS, onde foram gerados mosaicos temporais do índice NDVI e da recuperação da LST para períodos bianuais de 2019 a 2024 (Tabela 5.1).

As Figuras 5.6 a 5.13 sintetizam visualmente e quantitativamente os padrões espaciais da cobertura do solo (RGB), vegetação (NDVI) e a LST para cada uma das áreas de estudo, a partir de mosaicos sazonais e gráficos de distribuição. Tais representações permitiram observar variações significativas entre os períodos quentes e frios do ano, além de evidenciar o contraste entre áreas verdes urbanas e áreas construídas.

De forma complementar, a Tabela 5.2 apresenta a distribuição percentual das classes de LULC por período e por área de estudo, permitindo associar a composição paisagística aos padrões de vegetação e temperatura observados. Como suporte à análise quantitativa, as estatísticas descritivas de NDVI e LST, organizadas por período e por área, estão reunidas no Apêndice B (Tabela B.1) e serviram de base para a elaboração dos gráficos boxplot apresentados nas Figuras 5.7 (c), 5.9 (c), 5.11 (c) e 5.13 (c).

#### 5.3.1 Mata de Santa Genebra

O NDVI médio apresentou tendência atenuada a valores mais altos nos períodos quentes (0,62) em comparação a alguns períodos frios anteriores (0,57), sugerindo que a variação do NDVI pode seguir um padrão sazonal e também estar relacionada a outros fatores, como precipitação e uso do solo.

Como esperado, os valores médios de LST foram sistematicamente mais elevados nos períodos quentes, alcançando até 40 °C em 2019/2020. Por outro lado, nos períodos frios, a LST média variou entre 28 °C e 31 °C. Essa diferença reforça a relação entre sazonalidade

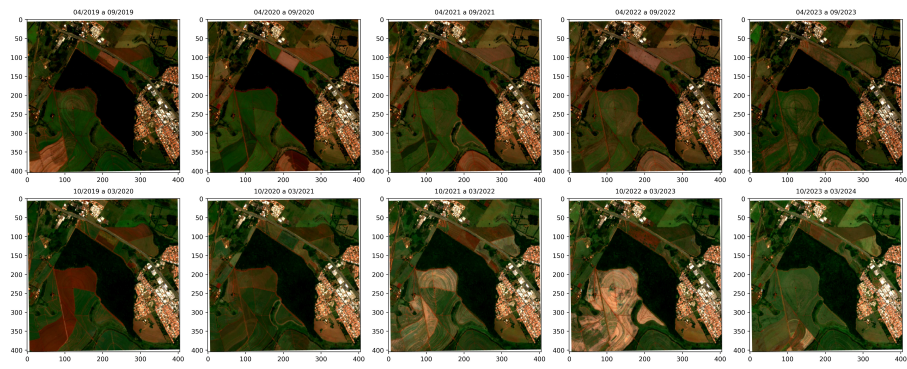
climática e LST, bem como o papel da cobertura vegetal na regulação térmica do ambiente urbano.

De maneira geral, observa-se uma correlação negativa entre o NDVI médio e a LST média: nos períodos em que o NDVI foi mais elevado, a LST tende a ser menor. Esse padrão é compatível com a literatura, que indica que áreas vegetadas apresentam menor temperatura de superfície devido ao sombreamento e à evapotranspiração (ZHOU et al., 2019; LIU; WU, 2022). Por exemplo, no período frio de 2023, com NDVI médio de 0,61, a LST média foi de 28 °C, enquanto no período quente imediatamente posterior, o NDVI manteve-se próximo (0,62), mas a LST aumentou para 37 °C, sugerindo a influência sazonal como fator adicional.

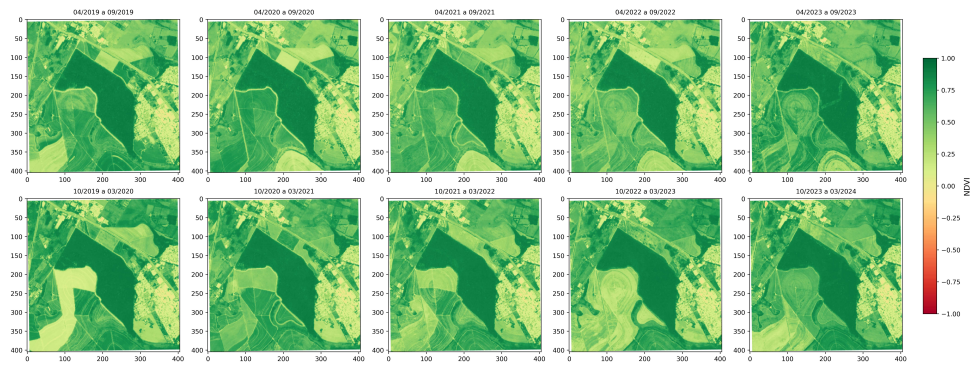
A distribuição das classes de LULC permaneceu relativamente estável ao longo dos anos, refletindo a proteção da unidade de conservação. As classes "Árvores" e "Cultivos" foram dominantes em todos os períodos, com variação de 28% a 39% e 25% a 44%, respectivamente. Os maiores percentuais de cobertura arbórea coincidem com os maiores valores de NDVI, como observado nos períodos frios de 2023 e 2019, ambos com 35% ou mais de cobertura por árvores e NDVI médio igual ou superior a 0,58.

Em contrapartida, os períodos quentes apresentaram aumento na proporção de cultivos (até 44%), o que pode estar associado a áreas agrícolas próximas ou variações temporárias no uso do solo. É interessante notar que a cobertura de áreas construídas não sofreu muitas modificações, permanecendo em 16%, não contribuindo significativamente para variações no NDVI, mas podendo ter influência local na temperatura de superfície.

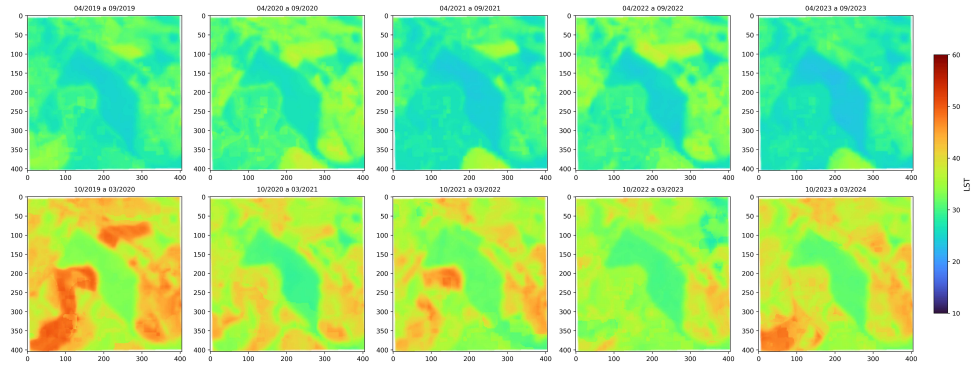




(a) RGB - Sentinel-2

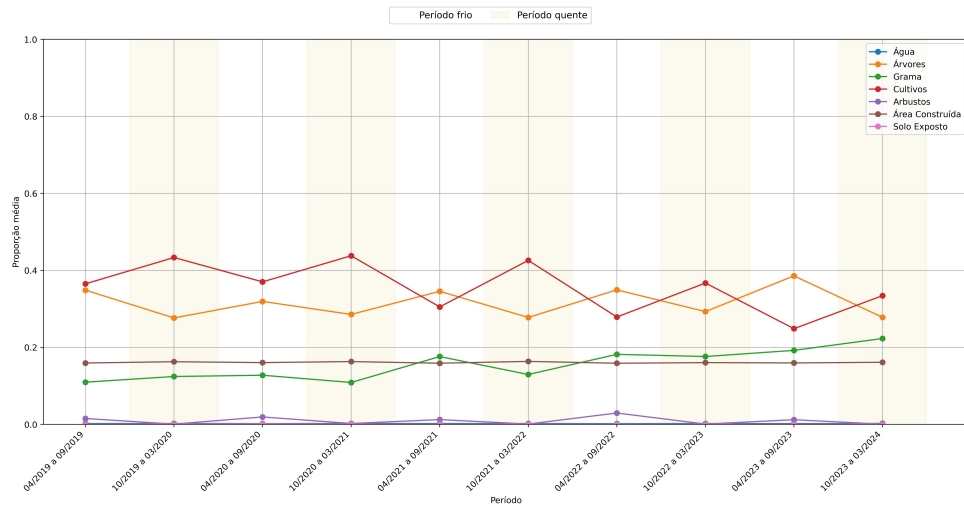


(b) NDVI - Sentinel-2

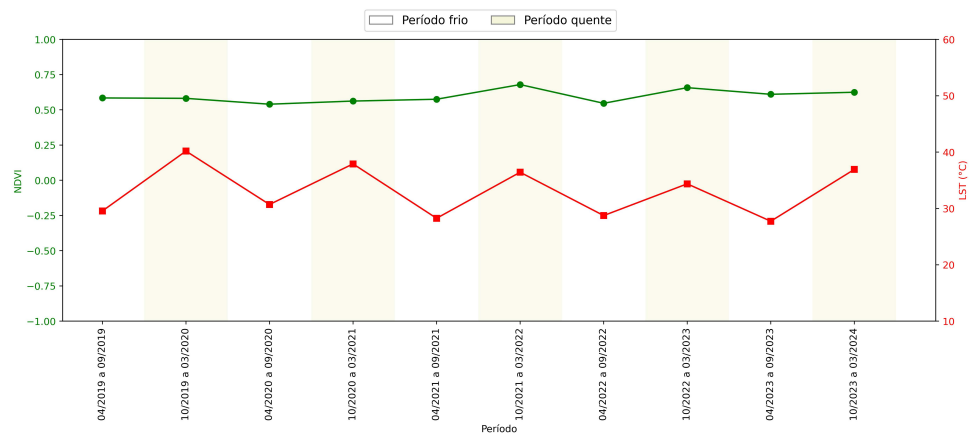


(c) LST - Landsat 8 OLI/TIRS

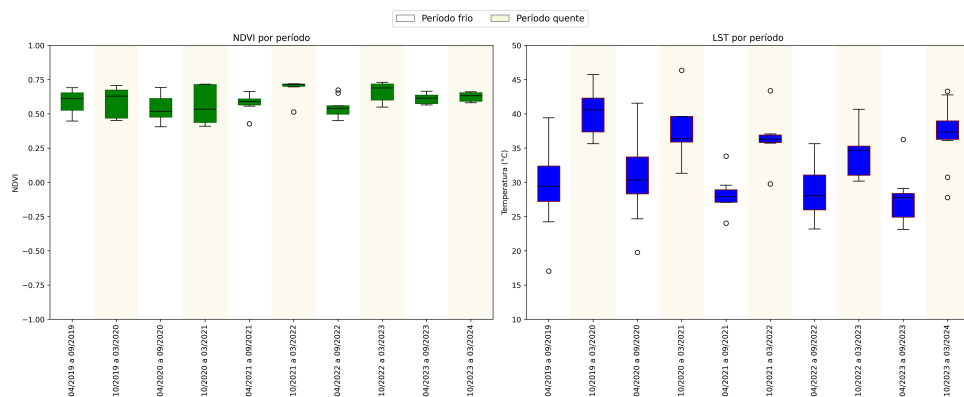
Figura 5.6: Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para a Mata de Santa Genebra (raio de 2000m)



(a) Probabilidade média de classes (raio de 2000m).



(b) Média temporal de NDVI e LST



(c) Boxplot de distribuição temporal de NDVI e LST para a Mata de Santa Genebra.

Figura 5.7: Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para a Mata de Santa Genebra (raio de 2000m)

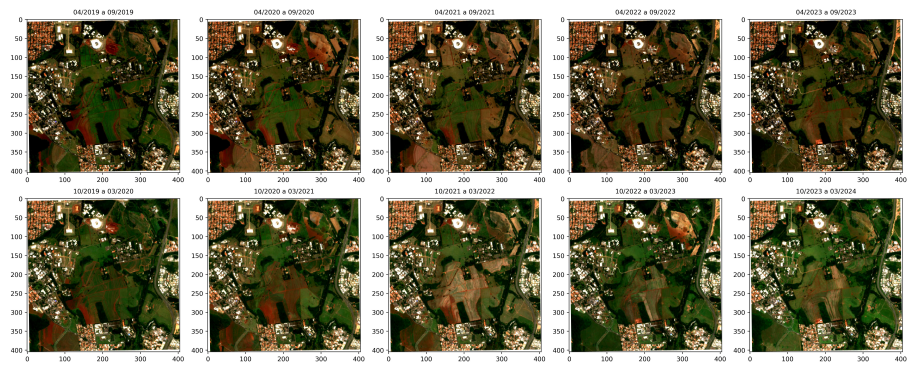
### 5.3.2 Fazenda Argentina

A análise da Fazenda Argentina revelou padrões distintos em relação à Mata de Santa Genebra, principalmente devido à maior urbanização da área, com cerca de 37% a 38% de área construída em todos os períodos. Essa característica limita os efeitos da vegetação sobre o microclima local.

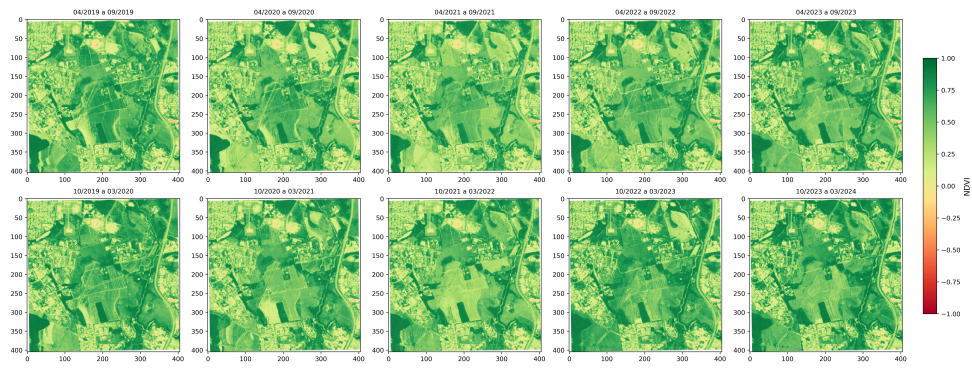
O NDVI médio variou entre 0,48 e 0,63, refletindo a menor cobertura arbórea. A LST foi consistentemente mais alta do que na Mata, com médias entre 30 °C e 32 °C no inverno e até 42 °C no verão. A menor amplitude térmica entre as estações indica baixa capacidade de regulação climática.

Embora a correlação entre NDVI e LST seja menos clara, em alguns verões com NDVI mais alto a LST foi mais baixa, sugerindo uma relação inversa moderada. Contudo, fatores como uso do solo e albedo também influenciam a temperatura na região.

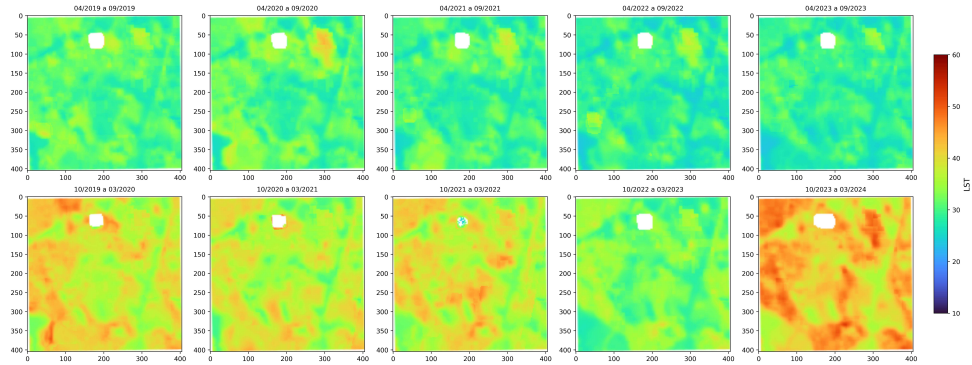
A ocupação do solo foi dominada por áreas construídas (37%), com cobertura arbórea reduzida (23% a 28%). Houve, porém, aumento recente de vegetação herbácea e grama (até 28% em 2023/2024), o que pode ter contribuído para o leve aumento do NDVI, mas sem neutralizar os efeitos de aquecimento das áreas urbanizadas.



(a) RGB - Sentinel-2

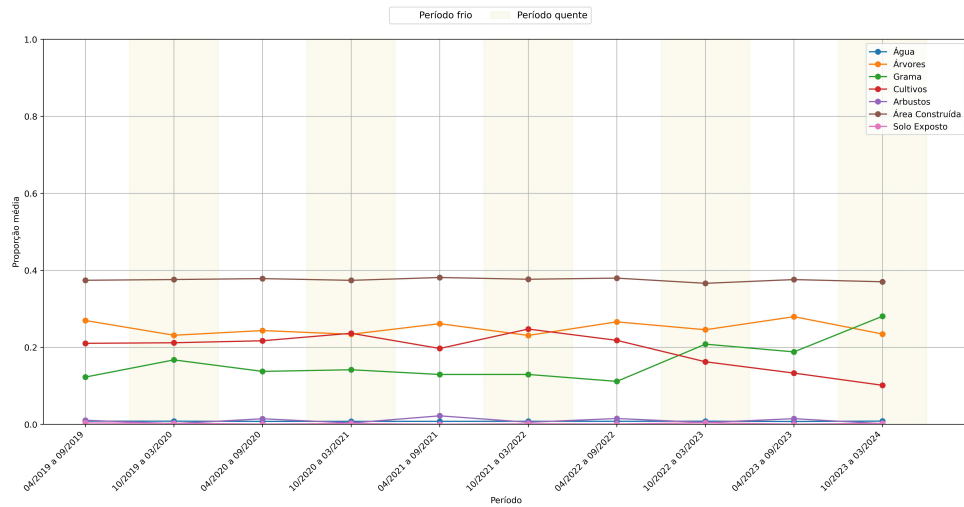


(b) NDVI - Sentinel-2

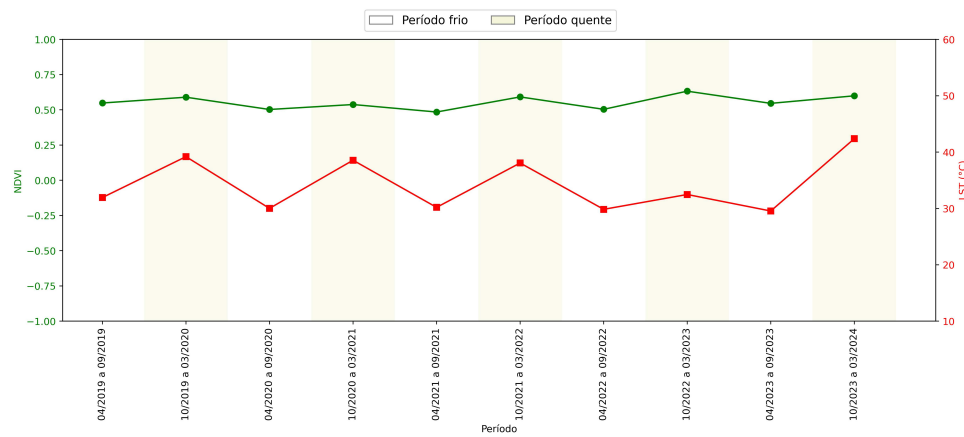


(c) LST - Landsat 8 OLI/TIRS

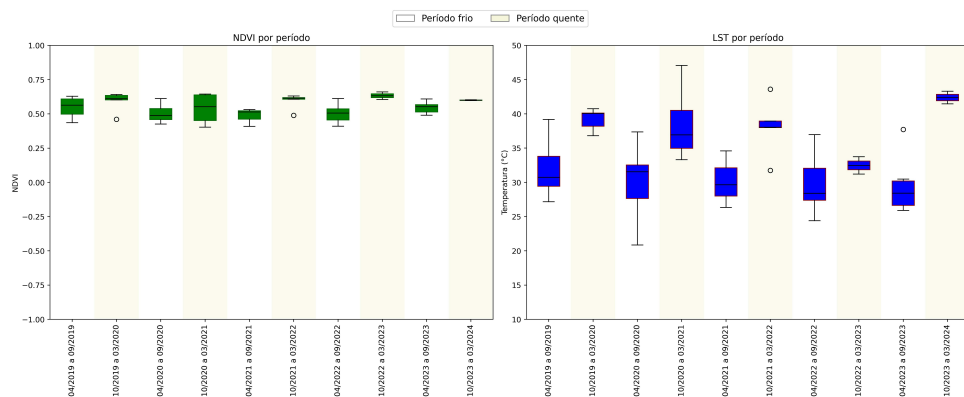
Figura 5.8: Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para a Fazenda Argentina (raio de 2000m)



(a) Probabilidade média de classes (raio de 2000m).



(b) Média temporal de NDVI e LST



(c) Boxplot de distribuição temporal de NDVI e LST.

Figura 5.9: Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para a Fazenda Argentina (raio de 2000m)

### 5.3.3 Parque Portugal (Lagoa do Taquaral)

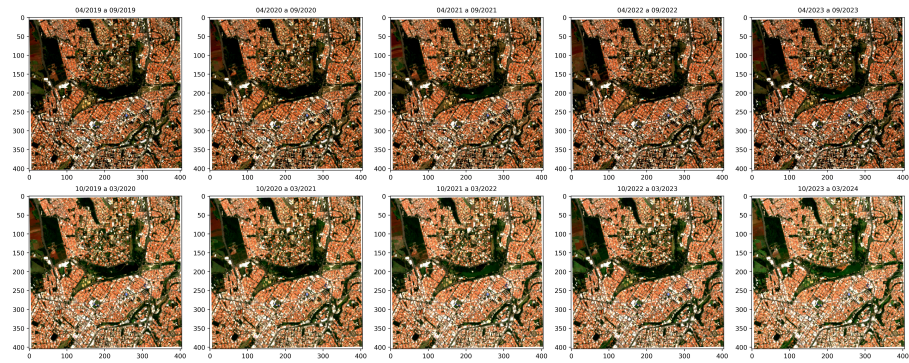
O Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) revela um cenário urbano com cobertura vegetal bastante limitada e grande predominância de áreas construídas (87% a 88%) ao longo de todos os períodos analisados. Esse padrão de ocupação influencia diretamente a regulação térmica da área.

O NDVI médio variou entre 0,32 e 0,39, indicando baixa densidade de vegetação. Embora haja pequenas flutuações ao longo do tempo, não se observa uma tendência clara de aumento na cobertura vegetal. A presença de árvores se manteve entre 7% e 8%, enquanto a cobertura por grama e cultivos foi residual, geralmente inferior a 3%.

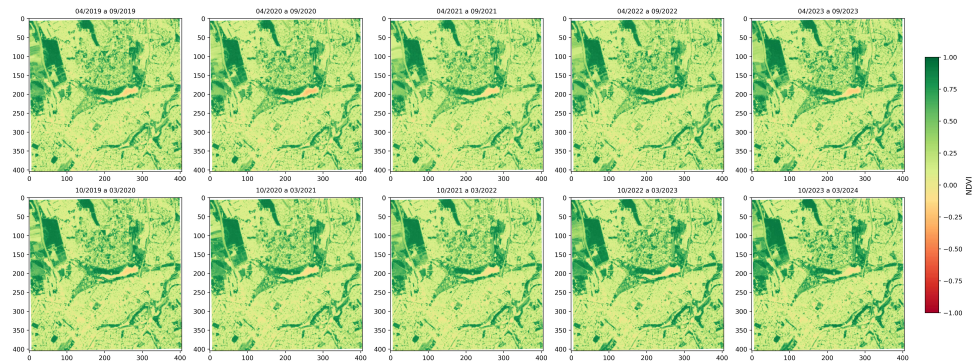
As médias de LST foram relativamente elevadas em todos os períodos. A LST média variou entre 30 °C e 43 °C, com os maiores valores registrados nos períodos quentes. Em particular, o valor mais alto (43 °C) coincide com o menor NDVI da série (0,33), evidenciando a relação inversa entre cobertura vegetal e LST.

Apesar de pequenas variações nos índices de vegetação, a influência da vegetação sobre o microclima local parece limitada, dada a baixa representatividade das classes vegetadas. A estabilidade das áreas construídas e a ausência de áreas arbustivas ou vegetação mais densa sustentam a hipótese de que o Parque Portugal apresenta baixa capacidade de mitigação do efeito térmico no raio de 2000m. Ainda assim, períodos com NDVI ligeiramente mais altos apresentaram, em alguns casos, temperaturas médias ligeiramente inferiores, indicando uma possível influência pontual da vegetação remanescente.

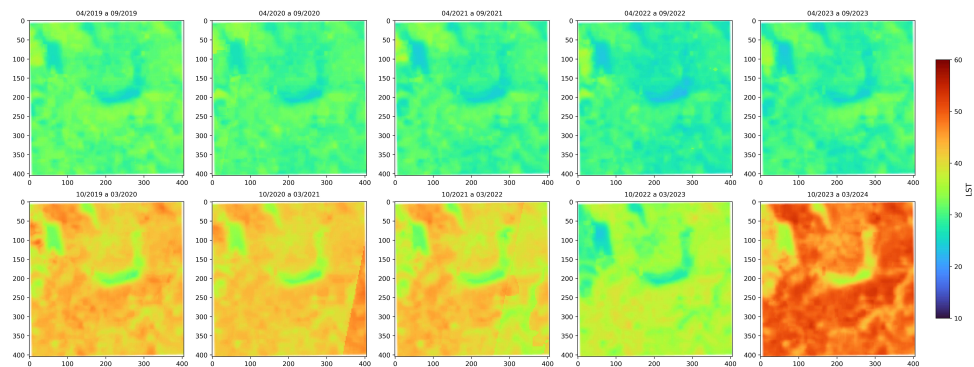




(a) RGB - Sentinel-2

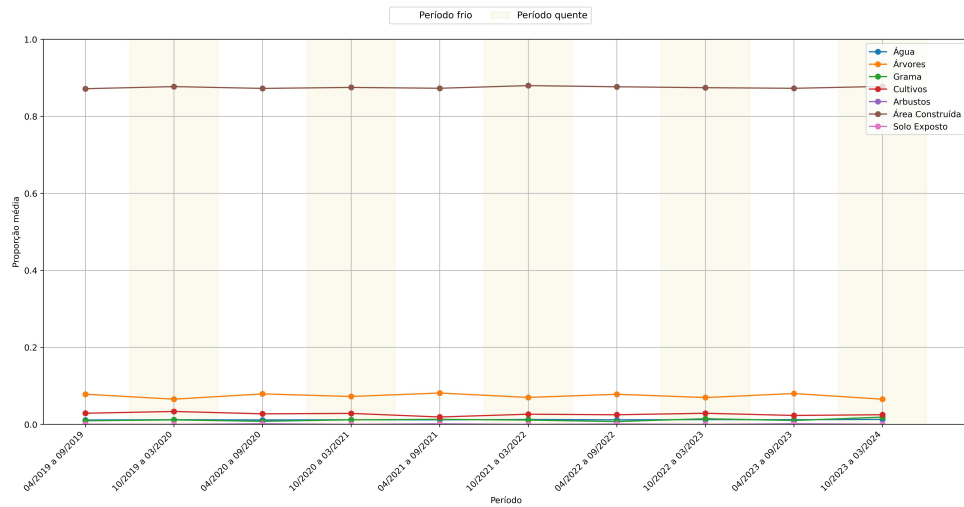


(b) NDVI - Sentinel-2

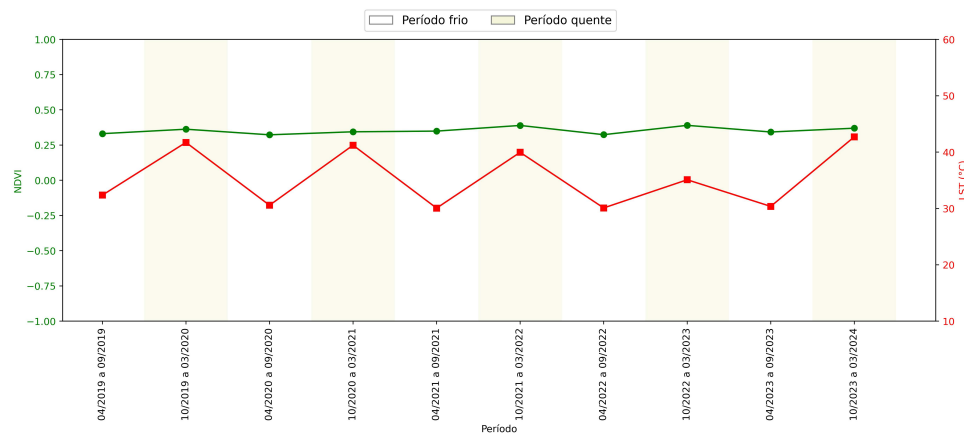


(c) LST - Landsat 8 OLI/TIRS

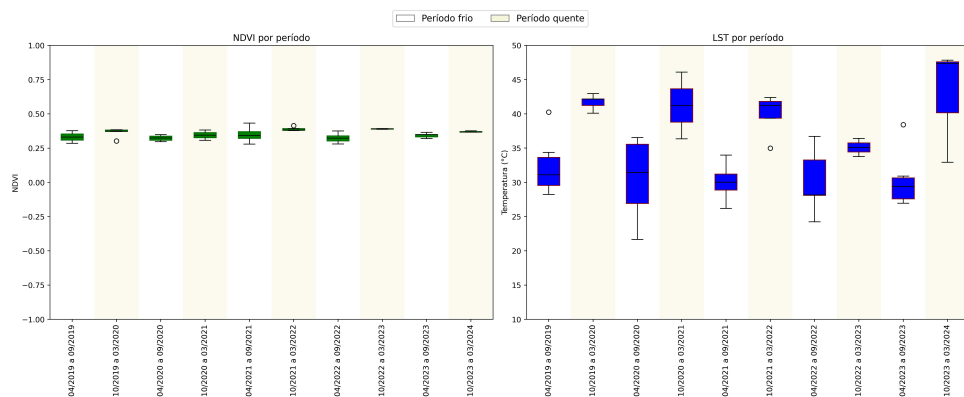
Figura 5.10: Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) (raio de 2000m)



(a) Probabilidade média de classes (raio de 2000m).



(b) Média temporal de NDVI e LST



(c) Boxplot de distribuição temporal de NDVI e LST.

Figura 5.11: Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para o Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) (raio de 2000m)



### 5.3.4 Área urbana adensada

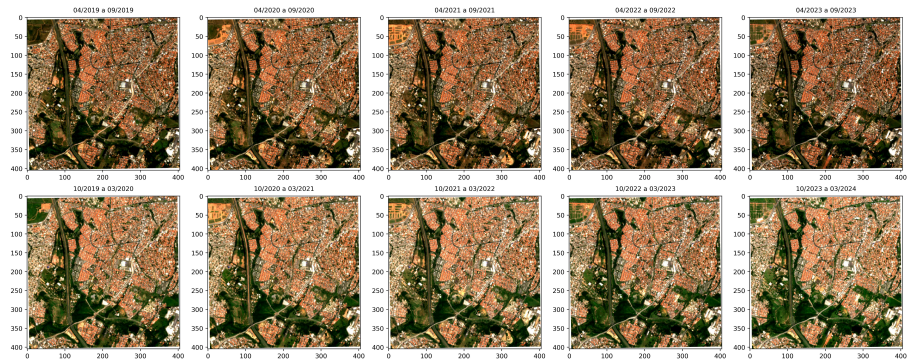
A análise da área urbana adensada revela um ambiente com forte presença de superfícies construídas (80% a 83%), baixa cobertura vegetal e alta exposição ao calor superficial. Essa configuração reforça os efeitos típicos de ilhas de calor urbano, especialmente em contextos com vegetação escassa e materiais urbanos com alta capacidade térmica.

O NDVI médio oscilou entre 0,33 e 0,41, com valores máximos ligeiramente superiores aos registrados no Parque Portugal, sugerindo certa heterogeneidade na cobertura vegetal entre os períodos. A classe “Árvores” variou de 10% a 14%, e o somatório das coberturas vegetadas (árvores, grama, cultivos e arbustos) se manteve entre 16% e 20%, ainda insuficiente para prover regulação térmica efetiva no raio de 2000m.

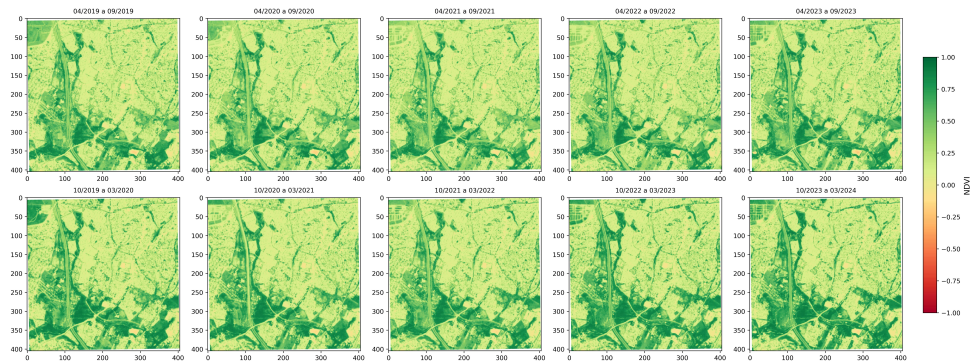
A LST média variou de 28 °C a 43 °C, com os maiores valores coincidentes com os períodos de NDVI mais baixo (como em 2022/2023, com NDVI médio de 0,33 e LST média de 43 °C). Isso reforça a tendência de relação inversa entre NDVI e LST, embora essa relação seja enfraquecida pela alta ocupação construída e pela fragmentação da vegetação.

Notavelmente, mesmo em períodos com NDVI subindo (como 0,41 em 2023/2024), a LST média se manteve alta (41 °C), o que sugere que a densidade e continuidade da vegetação urbana são mais determinantes do que sua simples presença pontual.

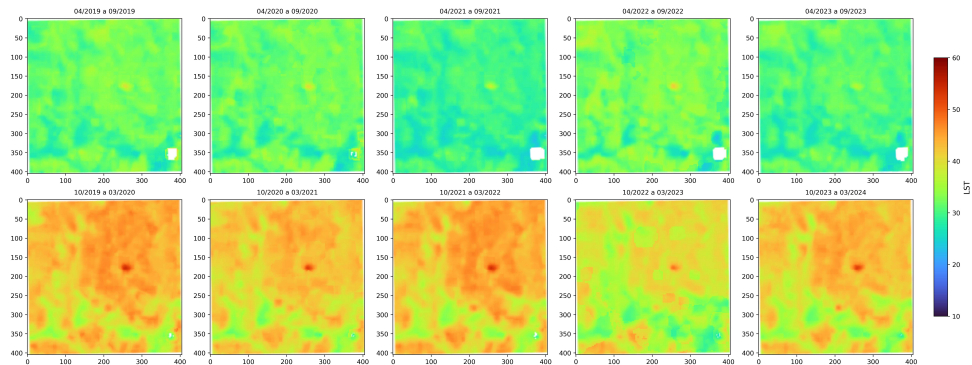
A constância da área construída e a baixa variação nas demais classes reforçam a rigidez do uso do solo nessa área, com poucas transformações relevantes ao longo do tempo. A ausência de corpos d’água também contribui para a baixa capacidade de amortecimento térmico local.



(a) RGB - Sentinel-2

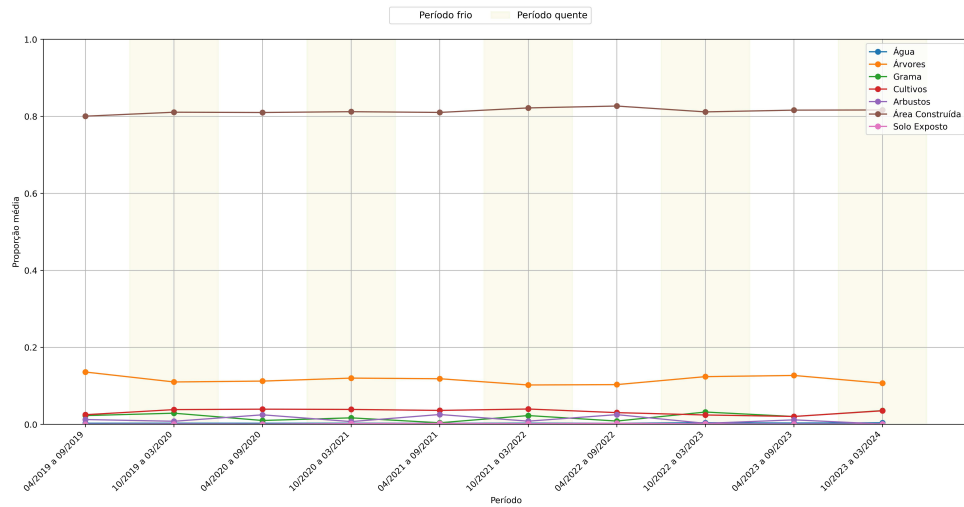


(b) NDVI - Sentinel-2

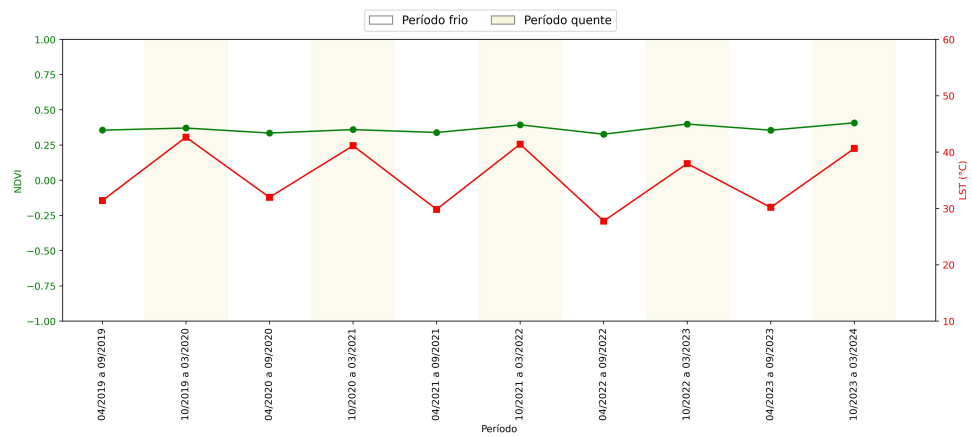


(c) LST - Landsat 8 OLI/TIRS

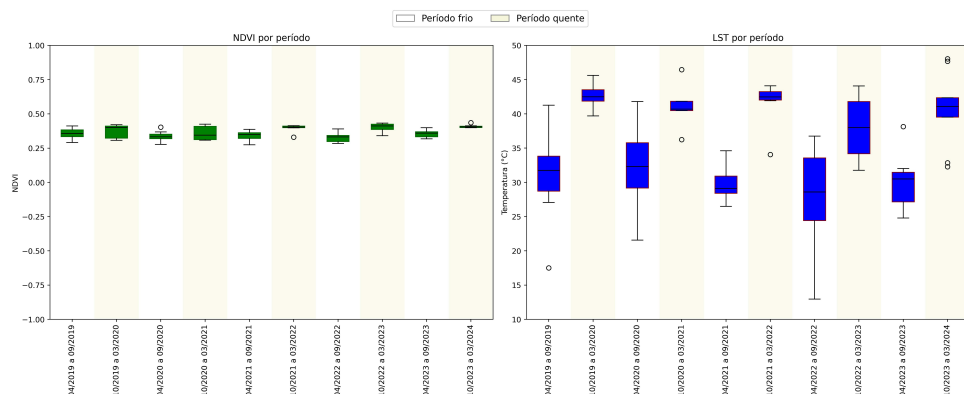
Figura 5.12: Mosaicos temporais de RGB, NDVI e LST para a área urbana adensada (raio de 2000m)



(a) Probabilidade média de classes (raio de 2000m).



(b) Média temporal de NDVI e LST



(c) Boxplot de distribuição temporal de NDVI e LST.

Figura 5.13: Gráficos temporais de classes e distribuição do NDVI e LST para a área urbana adensada (raio de 2000m)

### 5.3.5 Comparação geral entre os diferentes contextos

A Tabela 5.2 resume de forma geral a comparação média entre os períodos e áreas. Observa-se que o NDVI médio aumentou nos períodos quentes em todos os locais analisados. Esse comportamento pode estar relacionado ao ciclo vegetativo das plantas, com maior presença de pluviosidade e atividade, especialmente em áreas com cobertura vegetal mais densa, como a Mata de Santa Genebra e a Fazenda Argentina. Nessas duas áreas, os valores de NDVI variaram entre 0,52 e 0,62, indicando boa presença de vegetação. Em contrapartida, no Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) e na área urbana adensada, o NDVI permaneceu significativamente mais baixo, refletindo uma cobertura vegetal mais esparsa.

Tabela 5.2: Valores médios de NDVI, LST, percentual de áreas vegetadas e área construída por área de estudo e período.

| Local / Período                            | Med NDVI | Med LST (°C) | Áreas vegetadas | Área construída |
|--------------------------------------------|----------|--------------|-----------------|-----------------|
| <b>Mata de Santa Genebra</b>               |          |              |                 |                 |
| frio                                       | 0,57     | 29           | 82%             | 16%             |
| quente                                     | 0,62     | 37           | 83%             | 16%             |
| variação (quente/frio)                     | 0,05     | 8            | 1%              | 0%              |
| <b>Fazenda Argentina</b>                   |          |              |                 |                 |
| frio                                       | 0,52     | 30           | 60%             | 38%             |
| quente                                     | 0,59     | 38           | 61%             | 37%             |
| variação (quente/frio)                     | 0,07     | 8            | 2%              | -1%             |
| <b>Parque Portugal (Lagoa do Taquaral)</b> |          |              |                 |                 |
| frio                                       | 0,33     | 31           | 11%             | 87%             |
| quente                                     | 0,37     | 40           | 11%             | 88%             |
| variação (quente/frio)                     | 0,04     | 9            | 0%              | 0%              |
| <b>Área urbana adensada</b>                |          |              |                 |                 |
| frio                                       | 0,34     | 30           | 16%             | 81%             |
| quente                                     | 0,39     | 41           | 18%             | 81%             |
| variação (quente/frio)                     | 0,04     | 11           | 1%              | 0%              |

A LST também apresentou variação sazonal marcante, com elevação nos períodos quentes. A diferença entre os períodos chegou a 11 °C na área urbana adensada, onde a média da LST alcançou 41 °C. Esse padrão evidencia o efeito de retenção de calor, especialmente nas áreas com pouca vegetação e grande concentração de superfícies construídas. Já a Mata de Santa Genebra apresentou as menores temperaturas médias, o que reforça o papel da vegetação na regulação térmica, por meio do sombreamento e da evapotranspiração.

As áreas vegetadas permaneceram estáveis ao longo dos períodos, com leve aumento no verão, enquanto a área construída mostrou-se praticamente constante — como esperado, já que mudanças estruturais no uso do solo não ocorrem sazonalmente. A Mata de Santa

Genebra manteve os maiores percentuais de vegetação (acima de 82%), contrastando com o Parque Portugal e a área urbana adensada, que apresentaram valores inferiores a 18% de cobertura vegetal. Em suma, os dados mostram uma correlação negativa entre NDVI e LST. Esse padrão confirma a importância das áreas verdes urbanas na mitigação dos efeitos do calor, especialmente em regiões densamente urbanizadas.

### 5.3.6 Previsão de cenários de infraestruturas verdes

Esta subseção apresenta o modelo desenvolvido para apoiar a simulação de cenários de implementação de infraestruturas verdes urbanas. O modelo preditivo da LST foi construído e validado a partir de dados multiespectrais, mostrando potencial para aplicações em diferentes contextos urbanos.

Foi aplicado um modelo de RNC da arquitetura U-Net de regressão linear para previsão do LST com base em imagens multiespectrais (RGB). Um histórico de treinamento foi gerado, mostrando os valores de perda por época utilizando a métrica MSE não normalizada, possibilitando a análise da convergência do modelo (Figura 5.14). Para garantir uma avaliação mais consistente, foram calculadas as funções de perda médias para cada partição do processo de validação cruzada. Durante o treinamento, observou-se uma redução do erro no conjunto de treinamento, indicando que o modelo estava aprendendo a ajustar-se aos dados. No conjunto de validação, o erro inicialmente diminuiu, mas depois se estabilizou após certo número de épocas, sugerindo o possível início de *overfitting*. Para mitigar esse problema, aplicou-se o *early stopping* com uma tolerância de cinco épocas, interrompendo o treinamento quando não foram detectadas melhorias significativas no erro de validação.

As previsões geradas pelo modelo foram visualizadas por meio de mosaicos RGB e as IV para cada área de estudo, sendo comparadas com mapas coloridos para representar as diferenças entre os valores da LST calculados e previstos (Figura 5.15).

As imagens apresentadas permitem discutir a relação entre IV e LST, destacando padrões espaciais e a influência do LULC. No geral, foi observado que áreas com IV estão associadas a temperaturas superficiais mais baixas, conforme evidenciado nos mapas de LST. Esse padrão está de acordo com a literatura, que associa a vegetação à mitigação do efeito de Ilhas de Calor Urbano (ZHOU et al., 2019; SANTAMOURIS, 2020; LI, F. et al., 2020). Por outro lado, áreas urbanizadas ou desmatadas apresentam temperaturas mais elevadas, reforçando a importância da cobertura vegetal para a regulação térmica.

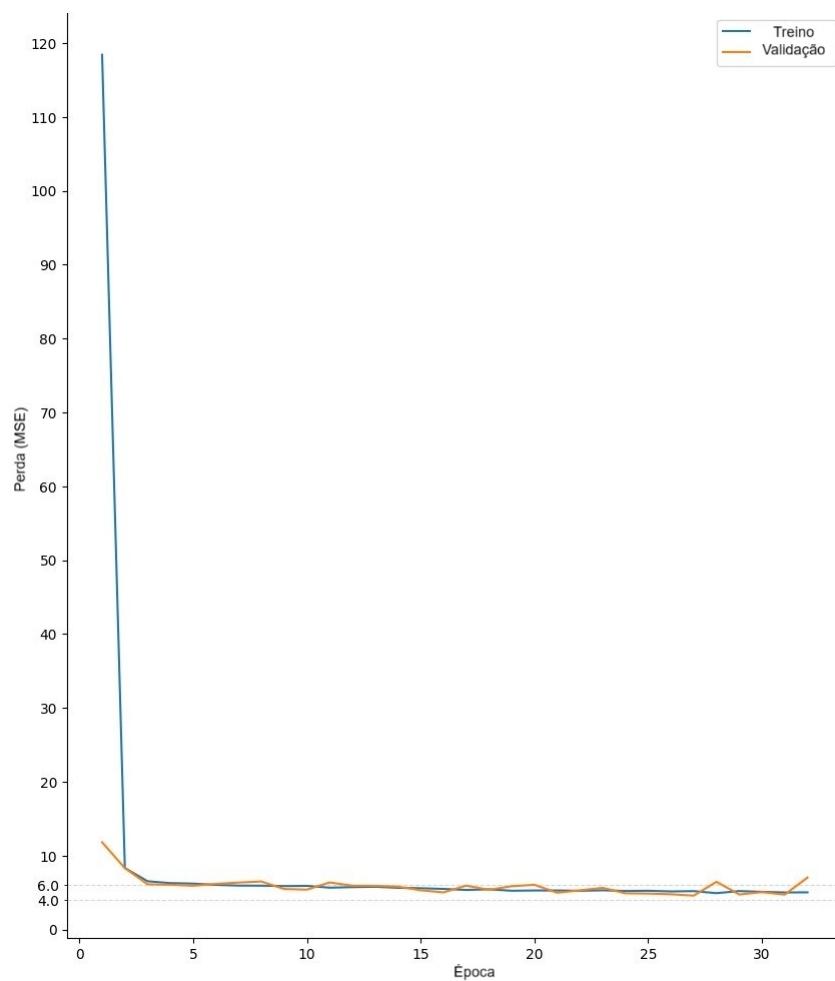


Figura 5.14: Gráfico de perda do modelo de RCN.

A comparação entre a LST calculada e a prevista permite avaliar a capacidade do modelo de aprendizado profundo em representar os padrões térmicos observados. Visualmente, identificou-se uma semelhança geral entre as distribuições de temperatura, sugerindo que o modelo reproduziu corretamente as variações associadas ao contexto. De modo geral, as áreas vegetadas apresentaram temperaturas mais baixas, enquanto as regiões urbanizadas registraram valores mais elevados, indicando que o modelo captou de forma eficaz essas relações espaciais.

No entanto, foram observadas algumas discrepâncias locais entre a LST calculada e a prevista, o que pode indicar limitações do modelo ou restrições nos dados de entrada. As imagens foram obtidas dentro de um mesmo período de tempo, restringindo a análise a um único momento e impedindo a avaliação de mudanças sazonais ou dos impactos de transformações na cobertura do solo, principalmente devido à capacidade de processamento e à falta de imagens com alta qualidade com banda termal. Ainda assim, os resultados



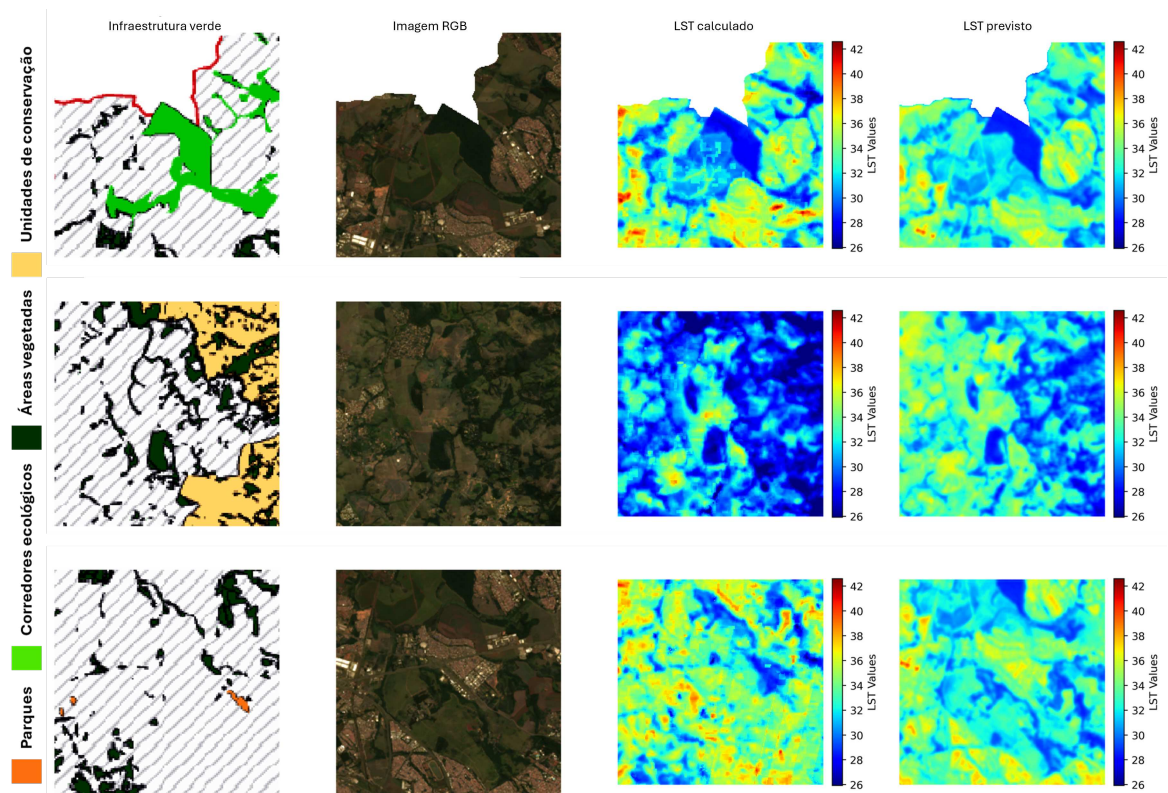


Figura 5.15: Análise visual do modelo de RCN.

reforçam a importância das IV na regulação térmica e sua relevância para o planejamento urbano e ambiental.

O modelo U-Net, treinado com mosaicos RGB e dados de LST para uma região do estado de São Paulo, apresentou um MSE de 4,18°C no conjunto de teste. A Tabela 5.3 apresenta as principais métricas de desempenho do modelo, incluindo o RMSE, MAE e  $R^2$ , que indicam um desempenho promissor, embora ainda haja espaço para melhorias.

Tabela 5.3: Métricas de desempenho do modelo

| Métrica | MSE  | RMSE | MAE  | $R^2$ |
|---------|------|------|------|-------|
| Valor   | 4,18 | 2,02 | 1,59 | 0,67  |

Estudos anteriores demonstram que redes neurais podem apresentar performances diferentes dependendo da arquitetura escolhida (LECUN; BENGIO; HINTON, 2015; RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2015; THAPA et al., 2023). Um estudo utilizando redes *Long Short-Term Memory (LSTM)* do tipo Bi-LSTM para previsão de anomalias de temperatura subsuperficial obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,691 (SU, H. et al., 2021). A métrica avaliada sugere desafios na modelagem da relação entre dados espectrais e

LST. Além disso, fatores potenciais que influenciam esse erro incluem a resolução espacial dos dados de entrada e a complexidade da paisagem urbana. A resolução de 30 metros do sensor Landsat 8 TIRS, embora adequada para análises em escala macro, pode não captar variações microclimáticas em escalas mais finas, em escala local. Além disso, a ausência de validação *in situ* para os dados de temperatura representa uma limitação significativa.

Estudos futuros podem explorar o impacto de diferentes tipos de LULC (por exemplo, solo exposto, áreas agrícolas, florestas densas, ecossistemas urbanos), além de incorporar dados adicionais, como índices de vegetação (NDVI), para aprimorar a acurácia do modelo. Recomenda-se também o teste de outras arquiteturas de redes neurais e a exploração de diferentes modelos de aprendizado de máquina, como redes convolucionais combinadas com LSTM, capazes de capturar dependências temporais e oferecer previsões mais precisas (JOHNSTONE; SULUNGU, 2021). Técnicas como *data augmentation*, que aumentam a diversidade do conjunto de treinamento por meio de rotações, translações e ajustes de brilho, bem como a integração de bandas multiespectrais ou séries temporais, podem enriquecer ainda mais o modelo, permitindo capturar padrões mais complexos. Embora nesta etapa o estudo tenha se concentrado no desenvolvimento e validação do modelo, sugere-se que trabalhos posteriores avancem para a aplicação em cenários simulados, com a inserção de novas áreas verdes e a análise dos possíveis impactos na LST. O conjunto dessas abordagens tem o potencial de oferecer subsídios ao planejamento urbano, reforçando a importância das IV na mitigação dos efeitos da urbanização e das mudanças climáticas.



## Capítulo 6

### Considerações finais

Este estudo teve o objetivo central cumprido, com a quantificação dos SE de regulação no município de Campinas/SP, focando na influência das IV sobre variáveis ambientais como a LST e a qualidade do ar. A abordagem metodológica empregada, baseada em sensoriamento remoto, geotecnologias e aprendizado de máquina, buscou superar limitações associadas a métodos tradicionais dependentes da subjetividade de especialistas, propondo ferramentas replicáveis, escaláveis e transparentes.

Na literatura estudada, foram identificados os principais SE, sendo de qualidade do ar e regulação climática. Porém, estes SE foram objeto de diferentes estratégias metodológicas, uma vez que apresentam considerável heterogeneidade em suas aplicações, geralmente ajustadas às especificidades ambientais, sociais e à disponibilidade de dados das áreas de estudo. Quanto à metodologia, são comumente utilizados dados secundários de sensores de qualidade do ar, além de índices de vegetação e mapas de LULC para representar a distribuição e densidade da vegetação. Quanto à avaliação térmica, o LST é amplamente aplicado, uma vez que permite ser recuperado através de imagens orbitais. A combinação desses indicadores é capaz de explorar as relações entre a vegetação urbana, a configuração do território e os serviços ecossistêmicos prestados.

Em relação aos resultados, foram identificados dois períodos distintos de sazonalidade que caracterizam os diferentes comportamentos térmicos ao longo do ano: o período frio, de abril a setembro, e o período quente, de outubro a março. Foi notado também a influência da pluviosidade, com os meses do período frio apresentando piores condições de qualidade do ar devido às menores taxas de precipitação, o que favoreceu o acúmulo de poluentes. No que tange à relação da qualidade do ar e vegetação, observou-se uma correlação negativa

significativa entre o NDVI e a concentração de poluentes atmosféricos, especialmente para o  $MP_{10}$ , cujos coeficientes variaram até -0,80 em diferentes raios de observação, indicando que áreas com maior cobertura vegetal tendem a apresentar menores concentrações desse poluente. Para  $NO$  e  $NO_x$ , as correlações também foram negativas, embora mais moderadas, enquanto o  $O_3$  apresentou comportamento distinto, com correlações praticamente nulas, refletindo a complexidade dos processos envolvidos na sua formação. Em relação à regulação microclimática, as áreas com maior cobertura vegetal, como a Mata de Santa Genebra e a Fazenda Argentina, registraram as menores médias de LST com valores em torno de 30 °C no período frio e até 38 °C no período quente, enquanto áreas mais urbanizadas, como o Parque Portugal e a área urbana adensada, apresentaram LST superior a 40 °C nos períodos mais quentes. O modelo de Rede Neural Convolucional desenvolvido, baseado na arquitetura U-Net, demonstrou capacidade para prever a LST a partir de imagens multiespectrais, com MSE de 4,18 °C, revelando potencial para simulação de cenários com a implementação de novas áreas verdes, embora ainda apresente limitações associadas à resolução espacial dos dados e à ausência de validação *in situ*.

O avanço metodológico proposto fundamenta-se na utilização de dados de sensoriamento remoto integrados a redes neurais convolucionais. Essa abordagem permite superar limitações associadas à dependência de matrizes baseadas exclusivamente na opinião de especialistas e se apoia em dados públicos e reproduzíveis. Além disso, o uso de plataformas em nuvem como o GEE viabiliza o processamento eficiente de grandes volumes de dados espaço-temporais, ampliando significativamente a capacidade de análise em escala urbana e regional.

Por fim, esta dissertação reconhece algumas limitações. Entre elas, destacam-se a ausência de validação *in loco* dos resultados, a resolução espacial restrita dos sensores orbitais utilizados e a complexidade inerente à modelagem da qualidade do ar em ambientes urbanos. Para pesquisas futuras, recomenda-se a incorporação de dados obtidos por sensores próximos à superfície, como drones equipados com câmeras multiespectrais e termais, capazes de fornecer imagens de alta resolução. A coleta de dados *in loco* para aumentar a confiabilidade das análises e validar os resultados. Além disso, sugere-se expandir a abordagem para contemplar outros SE, como o sequestro de carbono e a regulação hídrica. É também recomendada a comparação entre diferentes arquiteturas de redes neurais de aprendizado profundo, inclusive modelos baseados em LSTM para avaliar a acurácia e aplicabilidade na simulação de cenários urbanos e capturar dependências temporais em sequências.

# Capítulo 7

## Outras informações

### 7.1 Requisitos do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia

O Programa de Pós-Graduação em Tecnologia na área de concentração Ambiente exige o cumprimento de um total de 16 créditos, distribuídos entre 4 créditos de atividades obrigatórias e 12 créditos de atividades eletivas. As disciplinas foram selecionadas com base na contribuição científica para o desenvolvimento da pesquisa. Todas as disciplinas requisitantes para a obtenção do título de mestrado já foram cumpridas, obtendo aprovação com nota máxima (conceito A).

FT104 - Fotogrametria e SIG Aplicada a Ambientes Urbanos (eletiva | 4 créditos)

FT085 - Tecnologias Emergentes: Dilemas, Riscos e Desafios (eletiva | 4 créditos)

FT025 - Estudos Dirigidos I (eletiva | 2 créditos)

FT042 - Tópicos em Tecnologia para o Ambiente I (eletiva | 4 créditos)

FT054 - Pesquisa Científica: Concepção, Desenvolvimento e Publicação (obrigatória | 4 créditos)

FT045 - Tópicos em Tecnologia para Informação II (eletiva | 2 créditos)

### 7.2 Produções científicas

Este tópico apresenta as produções científicas resultantes da realização desta dissertação. Entre elas, o artigo intitulado *"The impact of land cover on surface temperature regulating service provided by green infrastructure: a case study in Campinas, Brazil"*, publicado nos anais da

*6th International Conference on Energy & Environment* e convidado para submissão em versão expandida ao periódico *Environment, Development and Sustainability* (ENVI).

Além dessa publicação, outros dois trabalhos integram os desdobramentos científicos da pesquisa: o manuscrito "*AI-Driven Simulation of Urban Green Infrastructures for Heat Island Mitigation in Campinas, Brazil*", publicado nos anais da *1st African Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)*, e o manuscrito "*Assessing Green Infrastructure on Air Quality Regulation in Two Metropolitan Regions of The State of São Paulo, Brazil*", aprovado para apresentação na *20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)*.

### **Artigos completos publicados em periódicos**

RODRIGUES, BRUNO NORONHA; FAVORETI, ANA LAURA FRAGOSO; BORGES, KAROLINE; GOMES, PEDRO HENRIQUE; DIONIZIO, RAFAEL FERNANDES; MENZORI, MAURO; JR MOLINA, VITOR EDUARDO; DEZEN-KEMPTER, ELOISA. Digital survey applied to the assessment of pathological manifestations in the architectural heritage of Monte Alegre in Piracicaba/SP. JOURNAL OF BUILDING PATHOLOGY AND REHABILITATION (PRINT), v. 8, p. 60, 2023.

### **Artigos em processo de submissão em periódicos**

RODRIGUES, B. N.; FAVORETI, A. L. F.; MOLINA JUNIOR, V. E.; SILVA, C. M.; CANTERAS, F. B.; Green Infrastructure for urban climate mitigation and adaptation: methods, strategies, and typology selection based on ecosystem services. International Journal of Environmental Science and Technology, 2025.

FAVORETI, A. L. F.; ALBUQUERQUE, J. W.; RODRIGUES, B. N.; CANTERAS, F. B. ; MOLINA JUNIOR, V. E. The impact of land cover on surface temperature regulating service provided by green infrastructure: a case study in Campinas, Brazil. Environment, Development and Sustainability, 2024.

### **Trabalhos completos publicados em anais de congressos**

FAVORETI, A. L. F.; ZIZA, L. N.; RODRIGUES, B. N.; MENDES, J.P.; CANTERAS, F. B.; MOLINA JUNIOR, V. E. AI-Driven Simulation of Urban Green Infrastructures for Heat Island

Mitigation in Campinas, Brazil. 1st African Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES). Saïdia, Marrocos: 2025.

MENDES, J. P.; FAVORETI, A. L. F.; RODRIGUES, B. N.; OLIVEIRA, R. H.; MOLINA JUNIOR, V. E.; CANTERAS, F. B. Transformation of Degraded Areas and Landfills into Urban Parks: The Case of Villa-Lobos Park, São Paulo, Brazil. 1st African Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES). Saïdia, Marrocos: 2025.

RODRIGUES, B. N.; FAVORETI, A. L. F.; MENDES, J. P.; MOLINA JUNIOR, V. E.; SILVA, C. M.; CANTERAS, F. B. Application of Team-Based Learning (TBL) in Green Infrastructure Education: An Active and Interdisciplinary Approach to Sustainable Engineering. 1st African Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES). Saïdia, Marrocos: 2025.

FAVORETI, A. L. F.; BARROS, M. P. L.; RODRIGUES, B. N.; SILVA, M. Y. O.; JR MOLINA, V. E.; CANTERAS, F. B. PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO INTEGRADOR NA DISCIPLINA DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. 52º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e o VII Simpósio Internacional de Educação em Engenharia. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2024.

RODRIGUES, B. N.; JR COSTA, V.; SANTOS, M. M. F.; FAVORETI, A. L. F.; CANTERAS, F. B.; JR MOLINA, V. E. COMPARATIVO DE PRODUTIVIDADE ENTRE AS ABORDAGENS CAD E BIM 3D EM PROJETOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO EM UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR. 52º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e o VII Simpósio Internacional de Educação em Engenharia. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2024.

FAVORETI, A. L. F.; ALBUQUERQUE, J. W.; RODRIGUES, BRUNO NORONHA; CANTERAS, F. B.; JR MOLINA, VITOR EDUARDO . The impact of land cover on surface temperature regulating service provided by green infrastructure: a case study in Campinas, Brazil. In: 6th International Conference on Energy and Environment, 2024, Guimarães. Proceedings of the 6th International Conference on Energy & Environment: Bringing together Engineering and

Economics. Guimarães: University of Minho. Escola de Engenharia-Centro ALGORIMI, 2024. p. 287-293.

MENDES, J. P.; PEREIRA, L. S.; RODRIGUES, B. N.; FAVORETI, A. L. F.; MOLINA JUNIOR, V. E.; CANTERAS, F. B. Green Infrastructures as mitigator of urbanization problems: a case study in the city of Sorocaba, São Paulo/Brazil. In: 6th International Conference on Energy and Environment, 2024, Guimarães. Proceedings of the 6th International Conference on Energy & Environment: Bringing together Engineering and Economics. Guimarães: University of Minho. Escola de Engenharia-Centro ALGORIMI, 2024. p. 253-258.

### **Trabalhos completos aprovados em anais de congressos**

FAVORETI, A. L. F.; RODRIGUES, B. N.; MENDES, J.P.; EMILIANO, W. M.; CANTERAS, F. B.; MOLINA JUNIOR, V. E. Assessing Green Infrastructure on Air Quality Regulation in Two Metropolitan Regions of The State of São Paulo, Brazil. 20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES). Dubrovnik, Croácia: 2025.

MENDES, J. P.; RODRIGUES, B. N.; FAVORETI, A. L. F.; MOLINA JUNIOR, V. E.; CANTERAS, F. B. Socio-Spatial Inequalities and Environmental Injustices: The Distribution of Green Infrastructure (GI) and Its Role in Gentrification. 20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES). Dubrovnik, Croácia: 2025.

MOLINA JUNIOR, V. E.; EMILIANO, W. M.; BARDINI, V.; SOUSA, M. N. P. O.; CRUZ, R. S.; RODRIGUES, B. N.; FAVORETI, A. L. F.; TELHADA, J.; CANTERAS, F. B. Travel Generation in knowledge-based urban development (KBUD) areas: A Case Study of the International Hub for Sustainable Development (HIDS) - UNICAMP/Campinas-Brazil. 20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES). Dubrovnik, Croácia: 2025.

## Referências

AFFEK, A. et al. Chapter 1 - Introduction. In: AFFEK, A. et al. (Ed.). **Ecosystem Service Potentials and Their Indicators in Postglacial Landscapes**. [S.l.]: Elsevier, jan. 2020. P. 1–47. ISBN 978-0-12-816134-0. DOI: 10 . 1016 / B978 - 0 - 12 - 816134 - 0 . 00001 - 8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128161340000018>>. Acesso em: 25 jul. 2024.

ALMETER, A. et al. A Needs-Driven, Multi-Objective Approach to Allocate Urban Ecosystem Services from 10,000 Trees. en. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4488, nov. 2018. ISSN 2071-1050. DOI: 10 . 3390 / su10124488. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/12/4488>>. Acesso em: 6 set. 2024.

AMANI, M. et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326–5350, 2020. Conference Name: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. ISSN 2151-1535. DOI: 10 . 1109 / JSTARS . 2020 . 3021052. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9184118>>. Acesso em: 8 out. 2024.

ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T.; WITMER, R. E. **A land use and land cover classification system for use with remote sensor data**. en. [S.l.], 1976. Series: Professional Paper.

AVDAN, U.; JOVANOVSKA, G. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. en. **Journal of Sensors**, v. 2016, n. 1, p. 1480307, 2016. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2016/1480307>. ISSN 1687-7268. DOI: 10 . 1155 / 2016 / 1480307. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2016/1480307>>. Acesso em: 25 out. 2024.

BAK, I. 2: Sustainable Development Goals (SDGs): Concept and measurement. In: [s.l.: s.n.], jun. 2024. Section: The Role of Financial Markets in Achieving the Sustainable Development Goals. ISBN 978-1-03-532326-5. Disponível em: <<https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781035323265/chapter2.xml>>. Acesso em: 9 out. 2024.

BARÓ, F.; HAASE, D.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; FRANTZESKAKI, N. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European cities. **Ecological Indicators**, v. 55, p. 146–158, ago. 2015. ISSN 1470-160X. DOI: 10 . 1016 / j . ecolind . 2015 . 03 . 013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X15001375>>. Acesso em: 29 set. 2024.

BARTESAGHI-KOC, C.; OSMOND, P.; PETERS, A. Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data. en. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 37, p. 154–167, jan. 2019. ISSN 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.11.008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866717304375>>. Acesso em: 6 set. 2024.

BENDOR, T. et al. Estimating the Size and Impact of the Ecological Restoration Economy. en. **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, e0128339, jun. 2015. Publisher: Public Library of Science. ISSN 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0128339. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0128339>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

BENEDICT, M.; MCMAHON, E.; FUND, T.; BERGEN, L. Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. **Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press**, v. 22, jan. 2006.

BISCHKE, B. et al. Multi-Task Learning for Segmentation of Building Footprints with Deep Neural Networks. In: 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). [S.l.: s.n.], set. 2019. P. 1480–1484. ISSN: 2381-8549. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803050. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8803050/>>. Acesso em: 23 jun. 2025.

BROWN, C. F. et al. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. en. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, p. 251, jun. 2022. Publisher: Nature Publishing Group. ISSN 2052-4463. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41597-022-01307-4>>. Acesso em: 26 nov. 2024.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; MÜLLER, F.; WINDHORST, W. Landscapes' Capacities to Provide Ecosystem Services - a Concept for Land-Cover Based Assessments. **Landscape Online**, v. 15, p. 1–22, 2009. DOI: 10.3097/LO.200915. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/386050374fd55580f1b662f322c92240e677032f>>.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; NEDKOV, S.; MÜLLER, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. **Ecological Indicators**, v. 21, p. 17–29, out. 2012. ISSN 1470-160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.06.019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X11001907>>. Acesso em: 2 ago. 2024.

CAO, Y. et al. Effects of landscape conservation on the ecohydrological and water quality functions and services and their driving factors. en. **Science of The Total Environment**, v. 861, p. 160695, fev. 2023. ISSN 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160695. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722077981>>. Acesso em: 6 set. 2024.

CETESB. QUALAR - Sistema de Informações da Qualidade do Ar, 2024.

CHAZDON, R. L. et al. Beyond Reserves: A Research Agenda for Conserving Biodiversity in Human-modified Tropical Landscapes. en. **Biotropica**, v. 41, n. 2, p. 142–153, 2009. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1744-7429.2008.00471.x>. ISSN 1744-7429. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2008.00471.x. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1744-7429.2008.00471.x>>.



//onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7429.2008.00471.x>. Acesso em: 31 jul. 2024.

CHEN, Z. et al. Distinct seasonality in vertical variations of tropospheric ozone over coastal regions of southern China. **Science of The Total Environment**, v. 874, p. 162423, mai. 2023. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162423. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723010392>>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CIEŚLAK, I.; BIŁOZOR, A.; SZUNIEWICZ, K. The Use of the CORINE Land Cover (CLC) Database for Analyzing Urban Sprawl. en. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, p. 282, jan. 2020. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs12020282. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/2/282>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

COMMISSION, E. **Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe’s Natural Capital. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.** English. [S.l.]: European Commission, 2013.

CORDEIRO, A. M.; OLIVEIRA, G. M. d.; RENTERÍA, J. M.; GUIMARÃES, C. A. Revisão sistemática: uma revisão narrativa. pt. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**, v. 34, p. 428–431, dez. 2007. Publisher: Colégio Brasileiro de Cirurgiões. ISSN 0100-6991, 1809-4546. DOI: 10.1590/S0100-69912007000600012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rcbc/a/CC6NRNtP3dKLgLPwcgmV6Gf/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

COSTANZA, R.; D’ARGE, R. et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. en. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253–260, mai. 1997. Publisher: Nature Publishing Group. ISSN 1476-4687. DOI: 10.1038/387253a0. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/387253a0>>. Acesso em: 25 jul. 2024.

COSTANZA, R.; DALY, H. E. Natural Capital and Sustainable Development. en. **Conservation Biology**, v. 6, n. 1, p. 37–46, 1992. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>. ISSN 1523-1739. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>>. Acesso em: 29 jul. 2024.

CROSSMAN, N. et al. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. **Ecosystem services**, v. 4, p. 4–14, 2013. DOI: 10.1016/J.ECOSER.2013.02.001. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/cfc29cb58e9efa62b5420a2865e6a0923d15e054>>.

DAILY, G. **Nature’s Services: societal dependence on natural ecosystems.** Washington D.C., Covelo, California: Island Press, 1997. ISBN 1-55963-475-8.

DE LA BARRERA, F.; RUBIO, P.; BANZHAF, E. The value of vegetation cover for ecosystem services in the suburban context. en. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 16, p. 110–122, 2016. ISSN 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.02.003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S161886671630003>>.

//linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866716000169>. Acesso em: 6 set. 2024.

DE LIMA, G. N.; FONSECA-SALAZAR, M. A.; CAMPO, J. Urban growth and loss of green spaces in the metropolitan areas of São Paulo and Mexico City: effects of land-cover changes on climate and water flow regulation. en. **Urban Ecosystems**, v. 26, n. 6, p. 1739–1752, dez. 2023. ISSN 1083-8155, 1573-1642. DOI: 10.1007/s11252-023-01394-0. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s11252-023-01394-0>>. Acesso em: 6 set. 2024.

DEEKSHA; SHUKLA, A. K. Ecosystem Services: A Systematic Literature Review and Future Dimension in Freshwater Ecosystems. en. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8518, jan. 2022. Number: 17 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app12178518. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8518>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

DEGERICKX, J.; HERMY, M.; SOMERS, B. Mapping Functional Urban Green Types Using High Resolution Remote Sensing Data. en. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 2144, mar. 2020. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su12052144. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2144>>. Acesso em: 6 set. 2024.

DO AMARAL, R.; DE LIMA BEZERRA, M. D. C.; DE MELLO BAPTISTA, G. M. Landscape planning and design by identifying areas for ecological restoration based on carbon fluxes. en. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 42, n. 2, p. 318–335, abr. 2024. ISSN 2398-4708. DOI: 10.1108/IJBPA-11-2021-0148. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJBPA-11-2021-0148/full/html>>. Acesso em: 6 set. 2024.

DU, M. et al. Daytime cooling efficiencies of urban trees derived from land surface temperature are much higher than those for air temperature. en. **Environmental Research Letters**, v. 19, n. 4, p. 044037, abr. 2024. ISSN 1748-9326. DOI: 10.1088/1748-9326/ad30a3. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad30a3>>. Acesso em: 6 set. 2024.

ELMQVIST, T.; SETÄLÄ, H. et al. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 14, p. 101–108, jun. 2015. ISSN 1877-3435. DOI: 10.1016/j.cosust.2015.05.001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343515000433>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ELMQVIST, T.; FOLKE, C. et al. Response diversity, ecosystem change, and resilience. en. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 1, n. 9, p. 488–494, 2003. \_eprint: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1890/1540-9295\(2003\)29001%5B0488%3ARDECAR%5D2.0.CO%3B2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1890/1540-9295(2003)29001%5B0488%3ARDECAR%5D2.0.CO%3B2). ISSN 1540-9309. DOI: 10.1890/1540-9295(2003)29001[0488:RDECAR]2.0.CO;2. Disponível em: <[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/1540-9295\(2003\)29001%5B0488%3ARDECAR%5D2.0.CO%3B2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/1540-9295(2003)29001%5B0488%3ARDECAR%5D2.0.CO%3B2)>. Acesso em: 30 ago. 2024.

EPA. **About Green Infrastructure**. English. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.epa.gov/green-infrastructure/about-green-infrastructure>>.

ESA. **Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A**. [S.l.]: European Space Agency. Copernicus Open Access Hub, 2024. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/>>.

ESCOBEDO, F. J.; NOWAK, D. J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. **Landscape and Urban Planning**, v. 90, n. 3, p. 102–110, abr. 2009. ISSN 0169-2046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2008.10.021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204608001801>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FAIVRE, N. et al. Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. **Environmental Research**, v. 159, p. 509–518, nov. 2017. ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2017.08.032. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117316080>>. Acesso em: 8 set. 2024.

FARHAN, M. et al. Monitoring and prediction of the LULC change dynamics using time series remote sensing data with Google Earth Engine. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 136, p. 103689, dez. 2024. ISSN 1474-7065. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103689. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706524001475>>. Acesso em: 13 out. 2024.

FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS, J. N. CHAPTER 16 - Applications of Atmospheric Chemistry: Air Pollution Control Strategies and Risk Assessments for Tropospheric Ozone and Associated Photochemical Oxidants, Acids, Particles, and Hazardous Air Pollutants. In: FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS, J. N. (Ed.). **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere**. San Diego: Academic Press, jan. 2000. P. 871–942. ISBN 978-0-12-257060-5. DOI: 10.1016/B978-012257060-5/50018-6. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122570605500186>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FOLEY, J. A. et al. Global Consequences of Land Use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, jul. 2005. Publisher: American Association for the Advancement of Science. DOI: 10.1126/science.1111772. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1111772>>. Acesso em: 1 set. 2024.

FOLKE, C.; HAHN, T.; OLSSON, P.; NORBERG, J. ADAPTIVE GOVERNANCE OF SOCIAL-ECOLOGICAL SYSTEMS. en. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 30, Volume 30, 2005, p. 441–473, nov. 2005. Publisher: Annual Reviews. ISSN 1543-5938, 1545-2050. DOI: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144511. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>>. Acesso em: 30 ago. 2024.

FUSARO, L. et al. Mapping and Assessment of PM10 and O3 Removal by Woody Vegetation at Urban and Regional Level. en. **Remote Sensing**, v. 9, n. 8, p. 791, ago. 2017. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs9080791. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/9/8/791>>. Acesso em: 6 set. 2024.

GARCÍA, A. M.; SANTÉ, I.; LOUREIRO, X.; MIRANDA, D. Green infrastructure spatial planning considering ecosystem services assessment and trade-off analysis. Application at landscape scale in Galicia region (NW Spain). **Ecosystem Services**, v. 43, p. 101115, 2020.

ISSN 2212-0416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101115>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041620300577>>.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. [S.l.]: Editora da UFRGS, abr. 2022. ISBN 978-85-386-0071-8.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002. v. 1.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; BARTON, D. N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. **Ecological Economics**, v. 86, p. 235–245, fev. 2013. ISSN 0921-8009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.08.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180091200362X>>. Acesso em: 2 jul. 2024.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. 4. ed. New York, NY: Pearson, 2018. ISBN 978-0-13-335672-4.

GOODFELLOW, I.; COURVILLE, A.; BENGIO, Y. **Deep Learning**. [S.l.]: The MIT Press, 2015. ISBN 0-262-03561-8.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017. ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>>. Acesso em: 2 jul. 2024.

GROOT, R. et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, v. 7, p. 260–272, 2010. DOI: 10.1016/J.ECOCOM.2009.10.006. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/3ca3136882e00ac83ea05259f1cc2d76f7517803>>.

GRUNWALD, L.; HEUSINGER, J.; WEBER, S. A GIS-based mapping methodology of urban green roof ecosystem services applied to a Central European city. en. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 22, p. 54–63, mar. 2017. ISSN 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.01.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866716302436>>. Acesso em: 6 set. 2024.

GUERRY, A. D. et al. Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 24, p. 7348–7355, jun. 2015. Publisher: Proceedings of the National Academy of Sciences. DOI: 10.1073/pnas.1503751112. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1503751112>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

HAAS, J.; BAN, Y. Urban Land Cover and Ecosystem Service Changes based on Sentinel-2A MSI and Landsat TM Data. en. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 485–497, fev. 2018. ISSN 1939-1404, 2151-1535. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2786468. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8253813/>>. Acesso em: 6 set. 2024.

HABIBI AGHDAM, H.; JAHANI HERAVI, E. **Guide to Convolutional Neural Networks**. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-57549-0. DOI: 10.1007/978-3-319-57550-6. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-57550-6>>. Acesso em: 12 out. 2024.

HAN, J. et al. A time-continuous land surface temperature (LST) data fusion approach based on deep learning with microwave remote sensing and high-density ground truth observations. **Science of The Total Environment**, v. 914, p. 169992, mar. 2024. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.169992. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724001268>>. Acesso em: 2 jul. 2024.

HANNA, D. E. L.; TOMSCHA, S. A.; OUELLET DALLAIRE, C.; BENNETT, E. M. A review of riverine ecosystem service quantification: Research gaps and recommendations. en. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 3, p. 1299–1311, 2018. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2664.13045>. ISSN 1365-2664. DOI: 10.1111/1365-2664.13045. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2664.13045>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

HANSEN, R.; PAULEIT, S. From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas. en. **AMBIO**, v. 43, n. 4, p. 516–529, mai. 2014. ISSN 1654-7209. DOI: 10.1007/s13280-014-0510-2. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2>>. Acesso em: 2 jul. 2024.

HASSE, J. E.; LATHROP, R. G. Land resource impact indicators of urban sprawl. **Applied Geography**, v. 23, n. 2, p. 159–175, abr. 2003. ISSN 0143-6228. DOI: 10.1016/j.apgeog.2003.08.002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622803000158>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

HELEN; JARZEBSKI, M. P.; GASPARATOS, A. Land use change, carbon stocks and tree species diversity in green spaces of a secondary city in Myanmar, Pyin Oo Lwin. en. Edição: Changshan Wu. **PLOS ONE**, v. 14, n. 11, e0225331, nov. 2019. ISSN 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0225331. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0225331>>. Acesso em: 6 set. 2024.

HOERBINGER, S.; IMMITZER, M.; OBRIJETAN, M.; RAUCH, H. P. GIS-based assessment of ecosystem service demand concerning green infrastructure line-side vegetation. en. **Ecological Engineering**, v. 121, p. 114–123, out. 2018. ISSN 09258574. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.030. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857417303609>>. Acesso em: 6 set. 2024.

HOSSAIN, M. F. Chapter 1 - Building a better urban system. In: HOSSAIN, M. F. (Ed.). **Sustainable Development for Mass Urbanization**. [S.l.]: Elsevier, 2019. P. 3–4. ISBN 978-0-12-817690-0. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817690-0.00001-4>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128176900000014>>.

HUANG, X. et al. Monitoring ecosystem service change in the City of Shenzhen by the use of high-resolution remotely sensed imagery and deep learning. en. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 12, p. 1490–1501, jul. 2019. ISSN 1085-3278, 1099-145X. DOI: 10.1002/ldr.3337. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.3337>>. Acesso em: 6 set. 2024.

IBGE. **Áreas Urbanizadas do Brasil**. pt. [S.l.], 2019. P. 32. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/apps/areas\\_urbanizadas/#/home](https://www.ibge.gov.br/apps/areas_urbanizadas/#/home)>. Acesso em: 27 mar. 2024.

IPCC. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2021. ISBN 978-1-00-915789-6. DOI: 10.1017/9781009157896. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

IPT. **Guia Metodológico para Implantação de Infraestrutura Verde**. pt. [S.l.]: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2020.

JAAFAR, H.; LAKKIS, I.; YERETZIAN, A. Impact of boundary conditions in a microclimate model on mitigation strategies affecting temperature, relative humidity, and wind speed in a Mediterranean city. **Building and Environment**, v. 210, p. 108712, fev. 2022. ISSN 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108712. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321011021>>. Acesso em: 23 abr. 2025.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Comparison Between Fractional Vegetation Cover Retrievals from Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis: Case Study of PROBA/CHRIS Data Over an Agricultural Area. en. **Sensors**, v. 9, n. 2, p. 768–793, fev. 2009. Number: 2 Publisher: Molecular Diversity Preservation International. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s90200768. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/9/2/768>>. Acesso em: 25 out. 2024.

JOHNSTONE, C.; SULUNGU, E. D. Application of neural network in prediction of temperature: a review. en. **Neural Computing and Applications**, v. 33, n. 18, p. 11487–11498, set. 2021. ISSN 1433-3058. DOI: 10.1007/s00521-020-05582-3. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00521-020-05582-3>>. Acesso em: 14 fev. 2025.

KANDZIORA, M.; BURKHARD, B.; MÜLLER, F. Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators—A theoretical matrix exercise. **Ecological Indicators**, v. 28, p. 54–78, 2013. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2012.09.006. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/b748038e0edca2a136d8ec8ddc1c24f084ba4468>>.

KAYITESI, N. M.; GUZHA, A. C.; MARIETHOZ, G. Impacts of land use land cover change and climate change on river hydro-morphology- a review of research studies in tropical regions. **Journal of Hydrology**, v. 615, p. 128702, dez. 2022. ISSN 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128702. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422012720>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

- KOSCHKE, L. et al. The integration of crop rotation and tillage practices in the assessment of ecosystem services provision at the regional scale. **Ecological Indicators**, v. 32, p. 157–171, 2013. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.03.008. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/69a1f7d5a1d4a51c26c4f20a3771f5cb9629bb9a>>.
- KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. en. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1509, out. 2018. Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs10101509. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1509>>. Acesso em: 13 out. 2024.
- LA NOTTE, A.; RHODES, C. The theoretical frameworks behind integrated environmental, ecosystem, and economic accounting systems and their classifications. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 80, p. 106317, jan. 2020. ISSN 0195-9255. DOI: 10.1016/j.eiar.2019.106317. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925519301143>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- LA ROSA, D.; LI, J. High-Resolution Greening Scenarios for Urban Climate Regulation Based on Physical and Socio-Economical Factors. en. **Sustainability**, v. 15, n. 9, p. 7678, mai. 2023. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su15097678. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7678>>. Acesso em: 6 set. 2024.
- LAI, S.; ZOPPI, C. Sustainable Spatial Planning Based on Ecosystem Services, Green Infrastructure and Nature-Based Solutions. en. **Sustainability**, v. 16, n. 6, p. 2591, jan. 2024. Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su16062591. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2591>>. Acesso em: 27 set. 2024.
- LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. en. **Nature**, v. 521, n. 7553, p. 436–444, mai. 2015. Publisher: Nature Publishing Group. ISSN 1476-4687. DOI: 10.1038/nature14539. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature14539>>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- LI, F. et al. A multi-criteria spatial approach for mapping urban ecosystem services demand. **Ecological Indicators**, v. 112, mai. 2020. Publisher: Elsevier B.V. ISSN 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106119.
- LI, J. et al. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: A case study of the Taihu River Basin, China. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 1008–1016, 2016. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.09.002. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/ee7b2539c70eec4e3f6ad1a2f7b8c9c05e690732>>.
- LI, Q. et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in karst multi-mountainous cities. en. **Ecological Indicators**, v. 159, p. 111637, fev. 2024. ISSN 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111637. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X24000943>>. Acesso em: 6 set. 2024.
- LI, Z.; FAN, Z.; SHEN, S. Urban Green Space Suitability Evaluation Based on the AHP-CV Combined Weight Method: A Case Study of Fuping County, China. en. **Sustainability**, v. 10,

n. 8, p. 2656, jul. 2018. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su10082656. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2656>>. Acesso em: 6 set. 2024.

LIU, L.; WU, J. Scenario analysis in urban ecosystem services research: Progress, prospects, and implications for urban planning and management. **Landscape and Urban Planning**, v. 224, p. 104433, ago. 2022. ISSN 0169-2046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104433. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204622000822>>. Acesso em: 24 out. 2024.

LIYUN, W. et al. Ecosystem health assessment of Dongshan Island based on its ability to provide ecological services that regulate heavy rainfall. en. **Ecological Indicators**, v. 84, p. 393–403, jan. 2018. ISSN 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.09.006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X17305678>>. Acesso em: 6 set. 2024.

LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. **Geographic Information Science and Systems**. [S.l.]: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-67695-0. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=C\\_EwBgAAQBAJ](https://books.google.com.br/books?id=C_EwBgAAQBAJ)>.

LUIZA PETRONI, M.; SIQUEIRA-GAY, J.; LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO, A. Understanding land use change impacts on ecosystem services within urban protected areas. **Landscape and Urban Planning**, v. 223, p. 104404, jul. 2022. ISSN 0169-2046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104404. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204622000536>>. Acesso em: 3 set. 2024.

MA, L. et al. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 152, p. 166–177, jun. 2019. ISSN 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271619301108>>. Acesso em: 23 jun. 2025.

MACE, G. M.; NORRIS, K.; FITTER, A. H. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 27, n. 1, p. 19–26, jan. 2012. ISSN 0169-5347. DOI: 10.1016/j.tree.2011.08.006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534711002424>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

MAES, J. et al. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. **Ecosystem services**, v. 1, p. 31–39, 2012. DOI: 10.1016/J.ECOSER.2012.06.004. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/f508f9f048291bd25ff305e867a8f3efac02a89b>>.

MANUEL, B. F. d.; MÉNDEZ-FERNÁNDEZ, L.; PEÑA, L.; AMETZAGA-ARREGI, I. A new indicator of the effectiveness of urban green infrastructure based on ecosystem services assessment. **Basic and Applied Ecology**, v. 53, p. 12–25, 2021. ISSN 1439-1791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.02.012>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1439179121000396>>.

MARAGNO, D. et al. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. en.



**Ecological Modelling**, v. 386, p. 1–10, out. 2018. ISSN 03043800. DOI: 10 . 1016 / j . ecolmodel . 2018 . 08 . 002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380018302643>>. Acesso em: 6 set. 2024.

MARIANNO DE OLIVERA, L. C. et al. Impacts of urban sprawl in the Administrative Region of Ribeirão Preto (Brazil) and measures to restore improved landscapes. **Land Use Policy**, v. 124, p. 106439, jan. 2023. ISSN 0264-8377. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106439. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837722004665>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

MARSBOOM, C.; VREBOS, D.; STAES, J.; MEIRE, P. Using dimension reduction PCA to identify ecosystem service bundles. en. **Ecological Indicators**, v. 87, p. 209–260, abr. 2018. ISSN 1470160X. DOI: 10 . 1016 / j . ecolind . 2017 . 10 . 049. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X17306866>>. Acesso em: 6 set. 2024.

MCAFEE, K. Selling Nature to save It? Biodiversity and Green Developmentalism. en. **Environment and Planning D: Society and Space**, v. 17, n. 2, p. 133–154, abr. 1999. Publisher: SAGE Publications Ltd STM. ISSN 0263-7758. DOI: 10 . 1068 / d170133. Disponível em: <<https://doi.org/10.1068/d170133>>. Acesso em: 29 jul. 2024.

MEA. **A Report of the Millennium Ecosystem Assessment**. Washington DC: [s.n.], 2005. ISBN 1-59726-040-1.

MEEROW, S. A green infrastructure spatial planning model for evaluating ecosystem service tradeoffs and synergies across three coastal megacities. en. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 12, p. 125011, dez. 2019. ISSN 1748-9326. DOI: 10 . 1088 / 1748 - 9326 / ab502c. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab502c>>. Acesso em: 6 set. 2024.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. en. **Landscape and Urban Planning**, v. 159, p. 62–75, mar. 2017. ISSN 01692046. DOI: 10 . 1016 / j . landurbplan . 2016 . 10 . 005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204616302250>>. Acesso em: 6 set. 2024.

MENCONI, M. E.; BONCIARELLI, L.; GROHMANN, D. Assessment of the Potential Contribution of the Urban Green System to the Carbon Balance of Cities. en. **Environments**, v. 11, n. 5, p. 98, mai. 2024. ISSN 2076-3298. DOI: 10 . 3390 / environments11050098. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3298/11/5/98>>. Acesso em: 6 set. 2024.

MENCONI, M.; ABBATE, R.; SIMONE, L.; GROHMANN, D. Urban Green System Planning Insights for a Spatialized Balance between PM10 Dust Retention Capacity of Trees and Urban Vehicular PM10 Emissions. en. **Sustainability**, v. 15, n. 7, p. 5888, mar. 2023. ISSN 2071-1050. DOI: 10 . 3390 / su15075888. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/7/5888>>. Acesso em: 6 set. 2024.

MENGIST, W.; SOROMESSA, T.; LEGESE, G. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps. **Science of The Total Environment**, v. 702, p. 134581, fev. 2020. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134581. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719345723>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

MERAJ, G.; SINGH, S. K.; KANGA, S.; ISLAM, M. N. Modeling on comparison of ecosystem services concepts, tools, methods and their ecological-economic implications: a review. en. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 1, p. 15–34, mar. 2022. ISSN 2363-6211. DOI: 10.1007/s40808-021-01131-6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40808-021-01131-6>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

MICHELSSEN, G.; ADOMSSSENT, M.; MARTENS, P.; HAUFF, M. von. Sustainable Development – Background and Context. In: HEINRICHS, H.; MARTENS, P.; MICHELSSEN, G.; WIEK, A. (Ed.). **Sustainability Science: An Introduction**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016. P. 5–29. ISBN 978-94-017-7242-6. DOI: 10.1007/978-94-017-7242-6\_2. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-94-017-7242-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7242-6_2)>. Acesso em: 9 out. 2024.

MÜLLER, F.; BURKHARD, B. An ecosystem based framework to link landscape structures, functions and services. In: MANDER, Ü.; WIGGERING, H.; HELMING, K. (Ed.). **Multifunctional Land Use: Meeting Future Demands for Landscape Goods and Services**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 37–63. ISBN 978-3-540-36763-5. DOI: 10.1007/978-3-540-36763-5\_3. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-540-36763-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-36763-5_3)>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MULLIGAN, M. et al. Mapping nature's contribution to SDG 6 and implications for other SDGs at policy relevant scales. en. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111671, mar. 2020. ISSN 00344257. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111671. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425720300407>>. Acesso em: 6 set. 2024.

NAIDOO, R. et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 28, p. 9495–9500, jul. 2008. Publisher: Proceedings of the National Academy of Sciences. DOI: 10.1073/pnas.0707823105. Disponível em: <<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0707823105>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NAUMANN, S. et al. **Design, implementation and cost elements of Green Infrastructure projects**. en. [S.l.], 2011.

NGUYEN, T. T. et al. Implementation of a specific urban water management - Sponge City. **Science of The Total Environment**, v. 652, p. 147–162, fev. 2019. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.168. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718340518>>. Acesso em: 8 set. 2024.

NOWAK, D. J.; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 4, n. 3, p. 115–123, abr. 2006. ISSN 1618-8667. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007. Disponível em: <<https://www.>>

sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866706000173>. Acesso em: 24 jun. 2025.

OLERIBE, O. O.; TAYLOR-ROBINSON, S. D. Before Sustainable Development Goals (SDG): why Nigeria failed to achieve the Millennium Development Goals (MDGs). eng. **The Pan African Medical Journal**, v. 24, p. 156, 2016. ISSN 1937-8688. DOI: 10.11604/pamj.2016.24.156.8447.

OOSTERBROEK, B. et al. Assessment of green space benefits and burdens for urban health with spatial modeling. en. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 86, p. 128023, ago. 2023. ISSN 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866723001942>>. Acesso em: 6 set. 2024.

ORGANIZATION, W. H. **Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment**. [S.l.], 2023. P. 269. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789240088061>>. Acesso em: 2 jul. 2024.

ORTA-ORTIZ, M. S.; GENELETTI, D. Prioritizing urban nature-based solutions to support scaling-out strategies: A case study in Las Palmas de Gran Canaria. en. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 102, p. 107158, set. 2023. ISSN 01959255. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107158. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925523001245>>. Acesso em: 6 set. 2024.

OSEI OWUSU, R.; MARTINEZ, J.; SCHWARZ, N. Supply and demand of ecosystem services of urban green spaces in deprived areas: Perceptions from Kumasi, Ghana. en. **Environmental Science & Policy**, v. 156, p. 103742, jun. 2024. ISSN 14629011. DOI: 10.1016/j.envsci.2024.103742. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1462901124000765>>. Acesso em: 6 set. 2024.

OUZZANI, M.; HAMMADY, H.; FEDOROWICZ, Z.; ELMAGARMID, A. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 5, n. 1, p. 210, 2016. ISSN 2046-4053. DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>>.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. en. **BMJ**, n71, mar. 2021. ISSN 1756-1833. DOI: 10.1136/bmj.n71. Disponível em: <<https://www.bmj.com/lookup/doi/10.1136/bmj.n71>>. Acesso em: 14 abr. 2024.

PAN, T. et al. Analyzing Changes in Urban Green Spaces and Their Effect on Land Temperature from the Perspective of Surface Radiation Energy Balance in Rizhao City, the Central Coast of China. en. **Remote Sensing**, v. 15, n. 19, p. 4785, set. 2023. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs15194785. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/15/19/4785>>. Acesso em: 6 set. 2024.

PANDE, C. B. et al. Characterizing land use/land cover change dynamics by an enhanced random forest machine learning model: a Google Earth Engine implementation. **Environmental Sciences Europe**, v. 36, n. 1, p. 84, abr. 2024. ISSN 2190-4715. DOI: 10.1186/s12302-024-00901-0. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s12302-024-00901-0>>. Acesso em: 13 out. 2024.

PIEDELLOBO, L. et al. Assessment of Green Infrastructure in Riparian Zones Using Copernicus Programme. en. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 2967, dez. 2019. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs11242967. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/24/2967>>. Acesso em: 6 set. 2024.

QUAGLIOLO, C. et al. Pluvial flood adaptation using nature-based solutions: An integrated biophysical-economic assessment. en. **Science of The Total Environment**, v. 902, p. 166202, dez. 2023. ISSN 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166202. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969723048271>>. Acesso em: 6 set. 2024.

RIBEIRO, M. P. et al. Impacts of urban landscape pattern changes on land surface temperature in Southeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 33, p. 101142, jan. 2024. ISSN 2352-9385. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101142. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938524000065>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Cham: Springer International Publishing, 2022. ISBN 978-3-030-82326-9. DOI: 10.1007/978-3-030-82327-6. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-82327-6>>. Acesso em: 8 out. 2024.

RODRIGUES, B. N.; MOLINA JUNIOR, V. E.; CANTERAS, F. B. Green Infrastructure as a solution to mitigate the effects of climate change in a coastal area of social vulnerability in Fortaleza (Brazil). en. **Environmental Advances**, v. 13, p. 100398, out. 2023. ISSN 26667657. DOI: 10.1016/j.envadv.2023.100398. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666765723000583>>. Acesso em: 6 set. 2024.

RONNEBERGER, O.; FISCHER, P.; BROX, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. en. In: NAVAB, N.; HORNEGGER, J.; WELLS, W. M.; FRANGI, A. F. (Ed.). **Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015**. Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 234–241. ISBN 978-3-319-24574-4. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. pt. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 20, p. v–vi, jun. 2007. Publisher: Escola Paulista de Enfermagem, Universidade Federal de São Paulo. ISSN 0103-2100, 1982-0194. DOI: 10.1590/S0103-21002007000200001. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ape/a/z7zZ4Z4GwYV6FR7S9FHTByr/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

ROY, T. B.; MIDDEY, A.; KRUPADAM, R. J. Unveiling the microclimate: A comprehensive review of tools, techniques, and future directions for sustainable cities. **Building and Environment**, v. 274, p. 112726, abr. 2025. ISSN 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.112726. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132325002082>>. Acesso em: 23 abr. 2025.

ŞAHİN KÖRMEÇLİ, P.; SEÇKİN GÜNDOĞAN, G. Assessment of vegetation change using NDVI, LST, and carbon analyses in Çankırı Karatekin University, Turkey. en.

**Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 3, p. 331, mar. 2024. ISSN 1573-2959. DOI: 10 . 1007 / s10661 - 024 - 12465 - w. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10661-024-12465-w>>. Acesso em: 6 set. 2024.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. **Energy and Buildings**, v. 207, p. 109482, jan. 2020. ISSN 0378-7788. DOI: 10 . 1016 / j . enbuild . 2019 . 109482. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819326696>>. Acesso em: 31 jan. 2025.

SCHRÖTER, M.; BARTON, D.; REMME, R.; HEIN, L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: A conceptual model and a case study for Telemark, Norway. **Ecological Indicators**, v. 36, p. 539–551, 2014. DOI: 10 . 1016 / J . ECOLIND . 2013 . 09 . 018. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/b5e8765af359ad7a73aa7db6977cc9b45081be05>>.

SELKA, I. et al. Assessing the Impact of Land Use and Land Cover Changes on Surface Temperature Dynamics Using Google Earth Engine: A Case Study of Tlemcen Municipality, Northwestern Algeria (1989–2019). en. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 13, n. 7, p. 237, jul. 2024. Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2220-9964. DOI: 10 . 3390 / ijgi13070237. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2220-9964/13/7/237>>. Acesso em: 13 out. 2024.

SHAHRESTANI, M. et al. A field study of urban microclimates in London. **Renewable Energy**, v. 73, p. 3–9, jan. 2015. ISSN 0960-1481. DOI: 10 . 1016 / j . renene . 2014 . 05 . 061. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811400336X>>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SICARD, P. et al. Should we see urban trees as effective solutions to reduce increasing ozone levels in cities? **Environmental Pollution**, v. 243, p. 163–176, dez. 2018. ISSN 0269-7491. DOI: 10 . 1016 / j . envpol . 2018 . 08 . 049. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974911831813X>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SMA-SP. **Resolução SMA-146, de 8 de novembro de 2017**. [S.l.]: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/legislacao/resolucoes-sma/sma146-2017/>>.

SMALHEISER, N. R. Chapter 11 - ANOVA. In: SMALHEISER, N. R. (Ed.). **Data Literacy**. [S.l.]: Academic Press, jan. 2017. P. 149–155. ISBN 978-0-12-811306-6. DOI: 10 . 1016 / B978 - 0 - 12 - 811306 - 6 . 00011 - 7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128113066000117>>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 434–440, 2004. ISSN 0034-4257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704000574>>.

STEFANIDIS, S.; ALEXANDRIDIS, V.; MALLINIS, G. A cloud-based mapping approach for assessing spatiotemporal changes in erosion dynamics due to biotic and abiotic disturbances in a Mediterranean Peri-Urban forest. en. **CATENA**, v. 218, p. 106564, nov. 2022. ISSN 03418162. DOI: 10 . 1016 / j . catena . 2022 . 106564. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816222005501>>. Acesso em: 6 set. 2024.

STOLL, t. et al. Assessment of ecosystem integrity and service gradients across Europe using the LTER Europe network. **Ecological Modelling**, v. 295, p. 75–87, 2015. DOI: 10.1016/J.ECOLMODEL.2014.06.019. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/268f5c1b239b291f81a6a104463d43d76e3a0647>>.

SU, H. et al. Predicting subsurface thermohaline structure from remote sensing data based on long short-term memory neural networks. **Remote Sensing of Environment**, v. 260, p. 112465, jul. 2021. ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112465. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425721001838>>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SU, J. G.; JERRETT, M.; NAZELLE, A. de; WOLCH, J. Does exposure to air pollution in urban parks have socioeconomic, racial or ethnic gradients? **Environmental Research**, v. 111, n. 3, p. 319–328, abr. 2011. ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2011.01.002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393511100003X>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SUDHIRA, H. S.; RAMACHANDRA, T. V.; JAGADISH, K. S. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 1, p. 29–39, fev. 2004. ISSN 1569-8432. DOI: 10 . 1016 / j . jag . 2003 . 08 . 002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243403000230>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

TEEB (Ed.). **The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB**. [S.l.: s.n.], 2010. (The economics of ecosystems & biodiversity). ISBN 978-3-9813410-3-4.

TERMORSHUIZEN, J. W.; OPDAM, P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. en. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 8, p. 1037–1052, out. 2009. ISSN 1572-9761. DOI: 10 . 1007 / s10980 - 008 - 9314 - 8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10980-008-9314-8>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

THAPA, A.; HORANONT, T.; NEUPANE, B.; ARYAL, J. Deep Learning for Remote Sensing Image Scene Classification: A Review and Meta-Analysis. en. **Remote Sensing**, v. 15, n. 19, p. 4804, jan. 2023. Number: 19 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2072-4292. DOI: 10 . 3390 / rs15194804. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/15/19/4804>>. Acesso em: 30 jun. 2025.

TOMAN, M. SPECIAL SECTION: FORUM ON VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES: Why not to calculate the value of the world's ecosystem services and natural capital. **Ecological Economics**, v. 25, n. 1, p. 57–60, abr. 1998. ISSN 0921-8009. DOI: 10.1016/S0921-8009(98)

00017-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800998000172>>. Acesso em: 29 jul. 2024.

TZOULAS, K. et al. Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas Using Green Infrastructure: A Literature Review. **Landscape and Urban Planning**, v. 81, p. 167–178, jun. 2007. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.001.

UN. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. English. [S.l.], 2015. P. 41. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>>. Acesso em: 22 jul. 2024.

USGS. **Landsat 8-9 Collection 2 Level 2**. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2024.

VENTER, Z. S. et al. Green Apartheid: Urban green infrastructure remains unequally distributed across income and race geographies in South Africa. **Landscape and Urban Planning**, v. 203, n. 0349, p. 103889, 2020. Publisher: Elsevier. ISSN 01692046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103889. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103889>>.

WALEED, M.; SAJJAD, M.; ACHEAMPONG, A. O.; ALAM, M. T. Towards Sustainable and Livable Cities: Leveraging Remote Sensing, Machine Learning, and Geo-Information Modelling to Explore and Predict Thermal Field Variance in Response to Urban Growth. en. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1416, jan. 2023. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su15021416. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1416>>. Acesso em: 25 out. 2024.

WANG, J.; BANZHAF, E. Towards a better understanding of Green Infrastructure: A critical review. **Ecological Indicators**, v. 85, p. 758–772, fev. 2018. ISSN 1470-160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.09.018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X17305861>>. Acesso em: 8 set. 2024.

WOLFF, S.; SCHULP, C.; VERBURG, P. Mapping ecosystem services demand: A review of current research and future perspectives. **Ecological Indicators**, v. 55, p. 159–171, 2015. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2015.03.016. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/83922b270b40b4f4724af46daba325dae0c37a71>>.

XIAO, S. et al. The dynamics of vegetation and implications for ecosystem services in the context of urbanisation: An example from Huangyan-Taizhou, China. en. **Ecological Engineering**, v. 179, p. 106614, jun. 2022. ISSN 09258574. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106614. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857422000751>>. Acesso em: 6 set. 2024.

XU, L.; FANG, K.; HUANG, Y.; XU, S. Demand Priority of Green Space from the Perspective of Carbon Emissions and Storage. en. **Sustainability**, v. 15, n. 14, p. 11199, jul. 2023. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su151411199. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/11199>>. Acesso em: 6 set. 2024.

YANNI, R. M. T. et al. A New Model for Image Segmentation Based on Deep Learning. en. **International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)**, v. 17, n. 07, p. 28–47, jul. 2021. Number: 07. ISSN 2626-8493. DOI: 10.3991/ijoe.v17i07.21241.

Disponível em: <https://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/21241>>. Acesso em: 12 out. 2024.

YAO, W.; ZENG, Z.; LIAN, C.; TANG, H. Pixel-wise regression using U-Net and its application on pansharpening. **Neurocomputing**, v. 312, p. 364–371, out. 2018. ISSN 0925-2312. DOI: 10.1016/j.neucom.2018.05.103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231218307008>>. Acesso em: 11 mar. 2025.

ZENG, X. et al. Urban Resilience for Urban Sustainability: Concepts, Dimensions, and Perspectives. en. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2481, jan. 2022. Number: 5 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su14052481. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2481>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

ZHANG, W. et al. Ecosystem services and dis-services to agriculture. **Ecological Economics**, v. 64, n. 2, p. 253–260, dez. 2007. ISSN 0921-8009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907001462>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

ZHANG, Y.; WANG, Y.; DING, N. Spatial Effects of Landscape Patterns of Urban Patches with Different Vegetation Fractions on Urban Thermal Environment. en. **Remote Sensing**, v. 14, n. 22, p. 5684, jan. 2022. Number: 22 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs14225684. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/22/5684>>. Acesso em: 30 nov. 2024.

ZHANG, Y.; MURRAY, A. T.; TURNER, B. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. en. **Landscape and Urban Planning**, v. 165, p. 162–171, set. 2017. ISSN 01692046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.04.009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204617300907>>. Acesso em: 6 set. 2024.

ZHOU, D. et al. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. en. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 48, jan. 2019. Number: 1 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2072-4292. DOI: 10.3390/rs11010048. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/1/48>>. Acesso em: 31 jan. 2025.

ZHU, X. X. et al. Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 5, n. 4, p. 8–36, dez. 2017. ISSN 2168-6831. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8113128>>. Acesso em: 23 jun. 2025.



## **Apêndice A**

# **Classificação dos Serviços Ecosistêmicos**

Este apêndice apresenta a classificação dos serviços ecossistêmicos segundo o MEA (2005), que organiza os serviços em quatro categorias principais: provisão, regulação, suporte e cultural. Essa estrutura é amplamente utilizada como referência para estudos ambientais e fundamenta as análises desenvolvidas nesta dissertação.

Tabela A.1: Classificação dos serviços ecossistêmicos (MEA, 2005).

| Classe    | Sub-classe                                         | Definição                                                                                                                                              |
|-----------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Provisão  | Alimento                                           | Fornecimento de produtos alimentícios provenientes de ecossistemas, como peixes, carne e vegetais.                                                     |
|           | Fibra                                              | Produção de materiais naturais como madeira, algodão e outros produtos usados na confecção de vestuário e construção.                                  |
|           | Recursos genéticos                                 | Fornecimento de recursos biológicos com potencial para reprodução, melhoramento genético e conservação de espécies.                                    |
|           | Bioquímicos, medicamentos naturais e farmacêuticos | Recursos naturais usados para a produção de medicamentos, compostos bioquímicos e produtos farmacêuticos.                                              |
|           | Água doce                                          | Disponibilidade de água potável proveniente de ecossistemas para consumo humano e atividades econômicas.                                               |
| Regulação | Regulação da qualidade do ar                       | Ecossistemas que contribuem para a filtragem e purificação do ar, removendo poluentes.                                                                 |
|           | Regulação do clima                                 | Influência dos ecossistemas na moderação do clima local e global, incluindo controle de temperatura e padrões de precipitação.                         |
|           | Regulação da água                                  | Controle da quantidade e qualidade da água em ecossistemas, afetando os ciclos hidrológicos e disponibilidade de água.                                 |
|           | Regulação da erosão                                | Capacidade dos ecossistemas de evitar a perda de solo por meio da cobertura vegetal e outros mecanismos naturais.                                      |
|           | Purificação da água e tratamento de resíduos       | Capacidade dos ecossistemas de purificar a água e decompor ou neutralizar resíduos, incluindo contaminantes.                                           |
|           | Regulação de doenças                               | Função dos ecossistemas na redução da incidência de doenças transmitidas por vetores e outras doenças infecciosas.                                     |
|           | Regulação de pragas                                | Controle natural de populações de pragas por meio de predadores naturais e outros mecanismos ecológicos.                                               |
|           | Polinização                                        | Processo realizado por espécies animais que transportam pólen entre plantas, fundamental para a reprodução de culturas agrícolas.                      |
|           | Regulação de perigos naturais                      | Redução dos impactos de desastres naturais, como inundações e deslizamentos, por meio de barreiras naturais e outras características dos ecossistemas. |
|           | Valores espirituais e religiosos                   | Significados culturais e espirituais associados a ecossistemas, incluindo práticas religiosas e tradições.                                             |
| Cultural  | Valores estéticos                                  | Importância dos ecossistemas na criação de paisagens cênicas e agradáveis, que promovem bem-estar e inspiração.                                        |
|           | Recreação e ecoturismo                             | Oportunidades oferecidas por ecossistemas para lazer, turismo e atividades recreativas ao ar livre.                                                    |
|           |                                                    |                                                                                                                                                        |
| Suporte   | Biodiversidade                                     | Diversidade de espécies, genes e ecossistemas que proporcionam resiliência ecológica e funcionalidade.                                                 |
|           | Conservação da biodiversidade                      | Função dos ecossistemas em proteger a diversidade de vida e manter populações viáveis de espécies.                                                     |
|           | Ciclo da água                                      | Papel dos ecossistemas no ciclo hidrológico, incluindo infiltração, evapotranspiração e armazenamento de água.                                         |
|           | Suporte ecológico                                  | Função dos ecossistemas em manter processos essenciais para a vida, como a ciclagem de nutrientes.                                                     |
|           | Conectividade ecológica                            | Fluxo de espécies, genes e energia entre diferentes ecossistemas, promovendo a funcionalidade e resiliência ecológica.                                 |
|           | Habitat para espécies selvagens                    | Fornecimento de áreas naturais que sustentam a vida selvagem, oferecendo abrigo e recursos para alimentação e reprodução.                              |

## **Apêndice B**

### **Métodos de Oferta e Demanda de Serviços Ecossistêmicos**

Este apêndice sintetiza os principais métodos de quantificação da oferta e demanda de serviços ecossistêmicos identificados na revisão sistemática da literatura. Foram incluídos apenas os estudos que atendiam aos critérios definidos no protocolo metodológico da RSL, com foco em serviços de regulação associados a infraestruturas verdes em contextos urbanos ou periurbanos. A sistematização permite comparar abordagens, identificar padrões metodológicos e destacar lacunas existentes na literatura.

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos

| Referência | Método                                     | Critério                                                                                                                                                          | Inputs (fonte)                                                                                                | Programa         | Tipologias                                               | Período de Análise/dado | Abordagem | SE associado    |
|------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-----------------|
| TV2U57FG   | Análise combinada                          | Infiltração e escoamento da água<br>Mitigação das forças de erosão<br>Mitgação de ilhas de calor<br>Controle de vento<br>Captura de poluentes<br>Captura de gases | Revisão da Literatura<br>NDVI (MODIS, Landsat)<br>LULC (Aster)<br>Coeficientes de provisão de SE (literatura) | Google Earth Pro | áreas verdes<br>áreas agrícolas                          | 1989-2009               | Oferta    | (a) (b) (c) (d) |
| BZDEB3RL   | LAI<br>Deposição de MP10<br>Absorção de O3 | Qualidade do ar                                                                                                                                                   | LULC (Sentinel)<br>LAI (MODIS)                                                                                | QGIS             | Bosques<br>Pinhais mediterrânicos<br>Maquis mediterrâneo | 2016                    | Oferta    | (a)             |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                   |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                  |                       |                                         |           |        |             |
|----------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|-----------|--------|-------------|
| C4RCVL8R | Modelo GISP       | Risco de águas pluviais<br>Temperatura da Superfície<br>Terrestre<br>Gravidade da poluição do ar | Coefficientes médios de<br>escoamento com base<br>no Método Racional<br>(dados municipais) +<br>Dados de localização de<br>emissários do CSO<br>(dados municipais)<br>LST (MODIS)<br>PM2,5 (dados<br>municipais) | GEE<br>ArcGIS         | espaços<br>verdes<br>árvores<br>urbanas | 2008-2015 | Oferta | (a) (b) (c) |
| H86XEEC6 | Análise combinada | Redução de lhas de calor                                                                         | LULC (National<br>Agricultural Imagery<br>Program)<br>LST (ASTER)<br>Temperatura do Ar<br>(dados empíricos)                                                                                                      | eConigition<br>ArcGIS | árvores<br>urbanas<br>grama             | 2010      | Oferta | (b)         |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                         |                                                                             |                                                                                                                                        |        |                                                                    |           |                  |         |
|----------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|---------|
| KFGJZG33 | GRPA                    | Clima termal<br>Qualidade do ar<br>Retenção urbana<br>Biodiversidade urbana | DEM (dados municipais)<br>LULC (dados municipais)<br>Mapa de tráfego (dados municipais)<br>Mapa de função climática (dados municipais) | ArcGIS | Telhado verde<br>pastagem<br>áreas agrícolas<br>floresta<br>jardim | 2010-2015 | Oferta           | (a) (b) |
| X6SZU4IU | PCA                     | Qualidade do ar<br>Biomassa de carbono<br>Retenção de água<br>Resfriamento  | LULC<br>Mapas de serviços ecossistêmicos (dados municipais)                                                                            | R      | áreas agrícolas<br>pastagem<br>reservas naturais                   | -         | Oferta e Demanda | (a) (b) |
| BT9E2IKA | ESDA                    | Avaliação de vegetação proximo a rede ferroviária                           | Geo-Database<br>LULC (alta resolução - dados municipais)                                                                               | ArcGIS | florestas<br>arbustos<br>áreas verdes                              | -         | Demanda          | (b) (c) |
| 2395JIK4 | Abordagem Multiobjetivo | Redução de escoamento de águas pluviais<br>Mitigação de emissões            | Inventário de árvores (dados municipais)                                                                                               | ArcGIS | árvores urbanas                                                    | -         | Demanda          | (b) (c) |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                                       |                                                                                                                         |                                                                                                                                      |        |                                                                                     |           |        |         |
|----------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|---------|
| 4V5KZU8A | Método de peso<br>combinado<br>AHP-CV | Fontes de poluição<br>Declividade<br>Elevação<br>Efeito das ilhas de calor<br>Desastres geológicos                      | LULC (Landsat)<br>NDVI (ENVI)<br>DEM (Geospatial Data<br>Cloud)<br>Plano Diretor (dados do<br>município)<br>Opinião de Especialistas | ArcGIS | florestas<br>espaços<br>verdes<br>áreas<br>agrícolas                                | 2017-2030 | Oferta | (b)     |
| 6N9UKF5T | Análise combinada                     | Regulação da temperatura<br>Purificação do ar<br>Moderação de eventos<br>climáticos extremos<br>Mitigação de escoamento | LULC (Sentinel e<br>Landsat)                                                                                                         | -      | áreas<br>agrícolas<br>florestas<br>áreas<br>verdes<br>urbanas<br>campos de<br>golfe | 2005-2015 | Oferta | (a) (b) |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                        |                         |                                                                                                                                                                  |        |                                          |           |                  |                            |
|----------|------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------|-----------|------------------|----------------------------|
| 9RKBVEUJ | Análise combinada      | Controle de chuva forte | LULC (SPOT)<br>Mapa topográfico (dados municipais)<br>Ferramenta ArcHydroTools (DEM)<br>Mapa de declividade (DEM)<br>Capacidade de retenção do solo (literatura) | ArcGIS | floresta<br>grama<br>áreas agrícolas     | 2011-2012 | Oferta           | (c)                        |
| SRFQW85B | Análise em escala fina | Redução de enchentes    | LULC (LiDAR)<br>DSM<br>DTM<br>Escoamento (Método SCS Curve Number (CN))<br>Calculo de vulnerabilidade por índices                                                | ArcGIS | áreas agrícolas<br>áreas vegetadas       | -         | Oferta e Demanda | (c)                        |
| 2XC4H48T | Matriz de Avaliação    | O\D de SE               | LULC<br>Valores de coeficientes de SE (literatura)<br>Opinião de especialistas                                                                                   | -      | pastagem<br>terras agrícolas<br>floresta | 2005-2017 | Oferta           | (a) (b) (c)<br>(d) (e) (h) |

Continued on next page



Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                     |                                                             |                                                                               |      |                                                                                                           |           |        |     |
|----------|---------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-----|
| 73DGQ7FI | IVI e IDS           | Depósito de carbono                                         | Equações alométricas                                                          | QGIS | florestas<br>urbanas<br>pastagem<br>terras<br>agrícolas<br>áreas<br>arborizadas                           | 1988-2018 | Oferta | (b) |
| 8IAVPIMA | NDVI<br>EVI<br>NDWI | Melhoria da qualidade da água<br>Redução do risco de cheias | LULC (Sentinel)<br>Índices Biogeofísicos<br>(Copernicus e dados<br>empíricos) | -    | terras<br>agrícolas<br>áreas<br>verdes<br>florestas<br>faixas<br>verdes<br>pastagem<br>margens de<br>rios | -         | Oferta | (c) |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                                               |                                                                             |                                                                                                                    |                                               |                                                                                        |           |        |         |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|---------|
| Y5GSTJDT | Análise combinada                             | Regulação climática                                                         | TIR (Landsat)<br>LiDAR (dados empíricos)<br>NDVI (Landsat)<br>LST (Landsat)<br>Dados cadastrais (dados municipais) | ArcGIS                                        | espaços verdes<br>áreas vegetadas<br>telhados verdes<br>sistemas de vegetação vertical | -         | Oferta | (b)     |
| BAIH927K | LST<br>Dados Empíricos<br>(temperatura do ar) | Resfriamento                                                                | Dados de Temperatura do ar<br>LULC<br>% copa de árvore<br>NDVI                                                     | GEE + dados<br>LiDAR                          | cobertura de árvore<br>grama/arbusto                                                   | 2018      | Oferta | (b) (c) |
| ALF9H6T3 | WaterWorld<br>Co\$tingNature                  | Acesso à água potável<br>Saneamento e restauração de ecossistemas aquáticos | LULC, clima, solo, população e agricultura (sensoriamento remoto e dados municipais)                               | Plataformas<br>WaterWorld e<br>Co\$tingNature | áreas protegidas                                                                       | 2008-2015 | Oferta | (b) (c) |
| GFAS5Z3F | Framework baseado em Sensoriamento Remoto     | Mitigação de ilhas de calor, da poluição do ar e de enchentes               | LULC<br>Pontuação de serviços ecossistêmicos (literatura)                                                          | eCognition<br>OPALS<br>R                      | florestas<br>pastagem<br>telhados verdes                                               | -         | Oferta | (b) (c) |

Continued on next page



Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |               |                                                                         |                                                                                               |                    |                                                                        |      |                     |         |
|----------|---------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------|------|---------------------|---------|
| 9KZXAKWG | Indicadores   | Mitigação de escoamento<br>Controle da erosão<br>Retenção de sedimentos | Mapas de declividade,<br>impermeabilidade de<br>solo,<br>LULC e erosão                        | -                  | parques<br>urbanos<br>florestas<br>jardins<br>lagoas de<br>infiltração | -    | Demanda             | (d)     |
| N246B4FB | Modelo InVEST | Análise de Hotspots                                                     | MDT<br>Imagens de Satélite RGB<br>Informações dos<br>edifícios (contorno e<br>altura)<br>LULC | -                  | espaços<br>verdes<br>grandes                                           | -    | Demanda             | (c)     |
|          |               | Eficiência da regulação climática<br>e qualidade do ar                  | LULC<br>Grupo Hidrológico do<br>Solo                                                          | -                  | parques<br>urbanos<br>florestas<br>jardins<br>lagoas de<br>infiltração | 2018 | Oferta              | (a) (b) |
| SB9NBX36 | Modelo InVEST | Geração de Escoamento<br>Retenção de Escoamento                         | Precipitação<br>LULC<br>Grupo Hidrológico do<br>Solo                                          | InVEST<br>Software | telhados<br>verdes<br>biovaletas                                       | -    | Oferta e<br>Demanda | (c)     |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                                        |                                                                                                                                             |                                                                                                                            |                              |                                                                          |           |                     |         |
|----------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------|---------|
| LJSD7WT5 | Modelo InVEST<br>Equação de<br>Demanda | Estoque e sequestro de carbono<br>Demanda por espaço verde                                                                                  | LULC + depósito de<br>carbono<br>GAP entre emissão e<br>depósito de carbono<br>densidade populacional<br>PIB               | InVEST<br>Software<br>ArcGIS | áreas<br>agrícolas<br>bosques<br>pastagem                                | 2000-2020 | Oferta e<br>Demanda | (a) (b) |
| QZ33C7GC | LST                                    | Temperatura da superfície                                                                                                                   | LULC<br>DEM<br>Google Earth Images                                                                                         | -                            | área<br>agrícola<br>floresta<br>pastagem                                 | 2022      | Oferta              | (b)     |
| D2JIVAZC | HRCS<br>UMEP<br>SOLWEIG                | Conforto termal<br>Consumo de energia urbana<br>Mitigação de mudanças<br>climáticas                                                         | LULC (dados<br>municipais)<br>LULC abaixo do dossel<br>Dados meteorológicos<br>Modelos Digitais da<br>Superfície Edificada | QGIS<br>ArcGIS               | espaços<br>verdes<br>urbanos<br>áreas<br>agrícolas<br>áreas<br>vegetadas | 1985-2022 | Oferta              | (b)     |
| 5VWIQELH | Modelo SWAT                            | avaliar a resposta hidrológica e<br>da qualidade da água às<br>mudanças no uso do solo na<br>bacia hidrográfica conforme<br>mudança no LULC | LULC<br>Condições<br>meteorológicos<br>Ferramentas de análise<br>espacial                                                  | -                            | terras<br>agrícolas<br>florestas<br>pastagens                            | 2018      | Oferta              | (c)     |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                                                                   |                                                                           |                                                                                                                                                                               |                                       |                                                       |           |                     |         |
|----------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|---------------------|---------|
| 7UBTYCZU | Análises espaciais                                                | Avaliação da rede rodoviária e<br>fluxo de tráfego<br>Cadastro de árvores | Modelo GIS<br>Dados municipais                                                                                                                                                | Quantum<br>GIS                        | parques<br>urbanos<br>áreas<br>arborizadas<br>jardins | -         | Oferta e<br>Demanda | (c)     |
| 5N5VAS5M | Fluxo de CO2<br>TWI                                               | Sequestro de Carbono<br>Escoamento Hídrico                                | Níveis de fluxo de<br>carbono (literatura)<br>Índice de umidade<br>topográfica (dados<br>municipais)<br>Indicadores de<br>integridade do<br>ecossistema (dados<br>municipais) | -                                     | áreas<br>arborizada                                   | 2015-2021 | Oferta              | (b) (c) |
| AKBEJ36V | LST<br>Dados Empíricos<br>(temperatura do ar)<br>Regressão Linear | Capacidade de resfriamento das<br>IV                                      | Imagens de satélite<br>Dados de temperatura<br>do ar                                                                                                                          | -                                     | árvores<br>urbanas                                    | 2019      | Oferta              | (a) (b) |
| LRBPTBK6 | Análise Combinada                                                 | análise da qualidade do ar                                                | NDVI<br>LST<br>depósito de carbono                                                                                                                                            | Autocad<br>ArcGIS<br>i-Tree<br>Canopy | árvores<br>urbanas<br>arbustos<br>grama               | 2000-2020 | Oferta              | (a) (b) |

Continued on next page

Tabela B.1: Descrição dos métodos de oferta e demanda de serviços ecossistêmicos (Continued)

|          |                                     |                                                                                            |                                                                                                                                                                                                           |        |                                                                         |           |                  |         |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|---------|
| WSAAUK38 | Ânalise de balanço de carbono       | Sequestro de Carbono                                                                       | Inventário de árvores (dados municipais)<br>Sequestro de carbono (i-Tree)<br>Inventário de Emissão de Carbono (pesquisa de campo)                                                                         | -      | áreas verdes urbanas<br>áreas agrícolas<br>pastagens<br>florestas       | 2021-2023 | Oferta e Demanda | (a) (b) |
| YHMQI2M5 | Modelo InVEST<br>Análises espaciais | Depósito de carbono<br>Qualidade da biodiversidade<br>Retenção do solo<br>Produção de água | LULC (Pleiades)<br>DEM (dados do país)<br>Declividade (dados do país)<br>Tipo de solo (dados do país)<br>Temperatura (dados do país)<br>Precipitação (dados do país)<br>Avapotranspiração (dados do país) | ArcGIS | masaico de montanhas urbanas<br>pastagem<br>áreas agrícolas<br>floresta | 2008-2018 | Oferta           | (a) (b) |

Legenda: (a) Regulação da qualidade do ar; (b) Regulação do clima; (c) Regulação da água; (d) Regulação da erosão

Tabela B.2: Lista de referências

| ID       | Referência                                            |
|----------|-------------------------------------------------------|
| TV2U57FG | De La Barrera, Rubio e Banzhaf (2016)                 |
| BZDEB3RL | Fusaro et al. (2017)                                  |
| C4RCVL8R | Meerow e Newell (2017)                                |
| H86XEEC6 | Yujia Zhang, Murray e Turner (2017)                   |
| KFGJZG33 | Grunwald, Heusinger e Weber (2017)                    |
| X6SZU4IU | Marsboom et al. (2018)                                |
| BT9E2IKA | Hoerbinger et al. (2018)                              |
| 2395JIK4 | Almeter et al. (2018)                                 |
| 4V5KZU8A | Zhiming Li, Fan e Shen (2018)                         |
| 6N9UKF5T | Haas e Ban (2018)                                     |
| 9RKBEUJ  | Liyun et al. (2018)                                   |
| SRFQW85B | Maragno et al. (2018)                                 |
| 2XC4H48T | Huang et al. (2019)                                   |
| Y5GSTJDT | Bartesaghi-Koc, Osmond e Peters (2019)                |
| 73DGQ7FI | Helen, Jarzebski e Gasparatos (2019)                  |
| 8IAVPIMA | Piedelobo et al. (2019)                               |
| BAIH927K | Venter et al. (2020)                                  |
| ALF9H6T3 | Mulligan et al. (2020)                                |
| GFAS5Z3F | Degerickx, Hermy e Somers (2020)                      |
| 2WYCLRRL | Stefanidis, Alexandridis e Mallinis (2022)            |
| 3XWR549X | Xiao et al. (2022)                                    |
| 5MNR9VRT | De Lima, Fonseca-Salazar e Campo (2023)               |
| 9KZXAKWG | Orta-Ortiz e Geneletti (2023)                         |
| N246B4FB | Oosterbroek et al. (2023)                             |
| SB9NBX36 | Quagliolo et al. (2023)                               |
| LJSD7WT5 | Xu et al. (2023)                                      |
| QZ33C7GC | Pan et al. (2023)                                     |
| D2JIVAZC | La Rosa e Junxiang Li (2023)                          |
| 5VWIQELH | Cao et al. (2023)                                     |
| 7UBTYCZU | MariaElena Menconi et al. (2023)                      |
| 5N5VAS5M | Do Amaral, De Lima Bezerra e De Mello Baptista (2024) |
| AKBEJ36V | Du et al. (2024)                                      |
| LRBPTBK6 | Şahin Körmeçli e Seçkin Gündoğan (2024)               |
| WSAAUK38 | Maria Elena Menconi, Bonciarelli e Grohmann (2024)    |
| YHMQI2M5 | Qin Li et al. (2024)                                  |



## **Apêndice C**

# **Estatísticas descritivas temporais para regulação microclimática**

Este apêndice apresenta as estatísticas descritivas do NDVI e da LST obtidas a partir de imagens do sensor Landsat 8 OLI/TIRS para as quatro áreas de estudo localizadas no município de Campinas/SP (Mata de Santa Genebra, Fazenda Argentina, Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) e área urbana adensada). Os valores mínimos, médias e máximos foram extraídos para cada período sazonal (frio: abril a setembro; quente: outubro a março), abrangendo o intervalo de 2019 a 2024.

Tabela C.1: Estatísticas descritivas de NDVI e LST por período e área de estudo (2019–2024).

| Período                 | classe período | área de estudo                      | NDVI     |          |          | LST     |         |         | LULC |         |        |          |          |                 |
|-------------------------|----------------|-------------------------------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|------|---------|--------|----------|----------|-----------------|
|                         |                |                                     | Min NDVI | Max NDVI | Med NDVI | Min LST | Max LST | Med LST | Água | Árvores | Gramma | Cultivos | Arbustos | Área Construída |
| 2019-04-01 a 2019-09-30 | frio           | Mata de Santa Genebra               | 0,45     | 0,69     | 0,58     | 17      | 39      | 30      | 0%   | 35%     | 11%    | 37%      | 2%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,44     | 0,63     | 0,55     | 27      | 39      | 32      | 1%   | 27%     | 12%    | 21%      | 1%       | 37%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,29     | 0,38     | 0,33     | 28      | 40      | 32      | 1%   | 8%      | 1%     | 3%       | 0%       | 87%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,29     | 0,41     | 0,36     | 18      | 41      | 31      | 0%   | 14%     | 2%     | 3%       | 1%       | 80%             |
| 2019-10-01 a 2020-03-31 | quente         | Mata de Santa Genebra               | 0,45     | 0,71     | 0,58     | 36      | 46      | 40      | 0%   | 28%     | 12%    | 43%      | 0%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,46     | 0,64     | 0,59     | 37      | 41      | 39      | 1%   | 23%     | 17%    | 21%      | 0%       | 38%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,30     | 0,38     | 0,36     | 40      | 43      | 42      | 1%   | 7%      | 1%     | 3%       | 0%       | 88%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,31     | 0,42     | 0,37     | 40      | 46      | 43      | 0%   | 11%     | 3%     | 4%       | 1%       | 81%             |
| 2020-04-01 a 2020-09-30 | frio           | Mata de Santa Genebra               | 0,41     | 0,69     | 0,54     | 20      | 42      | 31      | 0%   | 32%     | 13%    | 37%      | 2%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,43     | 0,61     | 0,50     | 21      | 37      | 30      | 1%   | 24%     | 14%    | 22%      | 1%       | 38%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,30     | 0,35     | 0,32     | 22      | 37      | 31      | 1%   | 8%      | 1%     | 3%       | 0%       | 87%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,28     | 0,40     | 0,34     | 22      | 42      | 32      | 0%   | 11%     | 1%     | 4%       | 2%       | 81%             |
| 2020-10-01 a 2021-03-31 | quente         | Mata de Santa Genebra               | 0,41     | 0,72     | 0,56     | 31      | 46      | 38      | 0%   | 29%     | 11%    | 44%      | 0%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,40     | 0,64     | 0,54     | 33      | 47      | 39      | 1%   | 23%     | 14%    | 24%      | 0%       | 37%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,31     | 0,38     | 0,34     | 36      | 46      | 41      | 1%   | 7%      | 1%     | 3%       | 0%       | 88%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,31     | 0,42     | 0,36     | 36      | 46      | 41      | 0%   | 12%     | 2%     | 4%       | 1%       | 81%             |
| 2021-04-01 a 2021-09-30 | frio           | Mata de Santa Genebra               | 0,43     | 0,66     | 0,58     | 24      | 34      | 28      | 0%   | 35%     | 18%    | 30%      | 1%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,41     | 0,53     | 0,48     | 26      | 35      | 30      | 1%   | 26%     | 13%    | 20%      | 2%       | 38%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,28     | 0,43     | 0,35     | 26      | 34      | 30      | 1%   | 8%      | 1%     | 2%       | 0%       | 87%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,27     | 0,39     | 0,34     | 26      | 35      | 30      | 0%   | 12%     | 0%     | 4%       | 3%       | 81%             |
| 2021-10-01 a 2022-03-31 | quente         | Mata de Santa Genebra               | 0,51     | 0,72     | 0,68     | 30      | 43      | 36      | 0%   | 28%     | 13%    | 43%      | 0%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,49     | 0,63     | 0,59     | 32      | 44      | 38      | 1%   | 23%     | 13%    | 25%      | 1%       | 38%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,38     | 0,41     | 0,39     | 35      | 42      | 40      | 1%   | 7%      | 1%     | 3%       | 0%       | 88%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,33     | 0,41     | 0,39     | 34      | 44      | 41      | 0%   | 10%     | 2%     | 4%       | 1%       | 82%             |
| 2022-04-01 a 2022-09-30 | frio           | Mata de Santa Genebra               | 0,45     | 0,67     | 0,55     | 23      | 36      | 29      | 0%   | 35%     | 18%    | 28%      | 3%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,41     | 0,61     | 0,50     | 24      | 37      | 30      | 1%   | 27%     | 11%    | 22%      | 2%       | 38%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,28     | 0,37     | 0,32     | 24      | 37      | 30      | 1%   | 8%      | 1%     | 2%       | 0%       | 88%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,28     | 0,39     | 0,33     | 13      | 37      | 28      | 0%   | 10%     | 1%     | 3%       | 3%       | 83%             |
| 2022-10-01 a 2023-03-31 | quente         | Mata de Santa Genebra               | 0,55     | 0,73     | 0,66     | 30      | 41      | 34      | 0%   | 29%     | 18%    | 37%      | 0%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,60     | 0,66     | 0,63     | 31      | 34      | 32      | 1%   | 25%     | 21%    | 16%      | 0%       | 37%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,39     | 0,39     | 0,39     | 34      | 36      | 35      | 1%   | 7%      | 1%     | 3%       | 0%       | 87%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,34     | 0,43     | 0,40     | 32      | 44      | 38      | 0%   | 12%     | 3%     | 2%       | 0%       | 81%             |
| 2023-04-01 a 2023-09-30 | frio           | Mata de Santa Genebra               | 0,57     | 0,67     | 0,61     | 23      | 36      | 28      | 0%   | 39%     | 19%    | 25%      | 1%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,49     | 0,61     | 0,55     | 26      | 38      | 30      | 1%   | 28%     | 19%    | 13%      | 1%       | 38%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,32     | 0,37     | 0,34     | 27      | 38      | 30      | 1%   | 8%      | 1%     | 2%       | 0%       | 87%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,32     | 0,40     | 0,36     | 25      | 38      | 30      | 0%   | 13%     | 2%     | 2%       | 1%       | 82%             |
| 2023-10-01 a 2024-03-31 | quente         | Mata de Santa Genebra               | 0,58     | 0,66     | 0,62     | 28      | 43      | 37      | 0%   | 28%     | 22%    | 33%      | 0%       | 16%             |
|                         |                | Fazenda Argentina                   | 0,60     | 0,60     | 0,60     | 41      | 43      | 42      | 1%   | 23%     | 28%    | 10%      | 0%       | 37%             |
|                         |                | Parque Portugal (Lagoa do Taquaral) | 0,37     | 0,38     | 0,37     | 33      | 48      | 43      | 1%   | 7%      | 2%     | 3%       | 0%       | 88%             |
|                         |                | área urbana adensada                | 0,40     | 0,44     | 0,41     | 32      | 48      | 41      | 0%   | 11%     | 4%     | 4%       | 0%       | 82%             |

## **Apêndice D**

# **Etapas de processamento e análise de dados espaciais**

Este apêndice apresenta de forma resumida as etapas realizadas no desenvolvimento da dissertação. A tabela resume as entradas, o pré-processamento, o processamento realizado (ferramentas e softwares), os resultados obtidos e a interpretação associada a cada etapa.

Tabela D.1: Resumo das etapas, entradas, pré-processamento, processamento, resultados e interpretação

| Etapa                                   | Entrada                                                                                                                         | Pré-processamento                                                                                      | Processamento<br>(ferramenta/software)                        | Resultados                                                            | Interpretação                                                                             |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Caracterização da área de estudo</b> |                                                                                                                                 |                                                                                                        |                                                               |                                                                       |                                                                                           |
| Avaliação dos padrões microclimáticos   | Série temporal dos dados térmicos e de qualidade do ar da CETESB (QUALAR);<br>Série temporal dos dados pluviométricos (CIIAGRO) | Remoção de valores ausentes;<br>Filtro por período; Média mensal; Agrupamento por mês                  | Exportação de arquivos CSV para processamento no Google Colab | Gráficos (barras, linhas, boxplots)                                   | Identifica tendências e variações sazonais de temperatura, precipitação e qualidade do ar |
| Aquisição de imagens                    | Imagens orbitais (Landsat 8 OLI/TIRS e Sentinel-2)                                                                              | Filtro de coleções; Máscara de nuvens; Filtro por área; Filtro de data; Mediana por período (mosaicos) | Implementação de algoritmo no Google Colab com API do GEE     | Base de dados georreferenciada e padronizada; Séries temporais limpas | Garante consistência e qualidade dos dados espaciais, reduzindo erros causados por nuvens |
| Mapeamento das IV                       | Coleção de imagens de séries temporais padronizadas                                                                             | Cálculo do NDVI por mosaico de imagem                                                                  | Implementação de algoritmo no Google Colab com API do GEE     | Coleção temporal e sazonal de NDVI                                    | Avalia presença e distribuição da vegetação ao longo do tempo                             |
| Classificação do LULC                   | Coleção Dynamic World V1 (Sentinel-2)                                                                                           | Filtro de coleções; Filtro por área e data                                                             | Implementação de algoritmo no Google Colab com API do GEE     | Coleção temporal de imagens classificadas;<br>Gráficos de classes     | Identifica distribuição espacial e temporal das classes de uso do solo                    |

Continued on next page

Tabela D.1: Resumo das etapas, entradas, pré-processamento, processamento, resultados e interpretação (Continued)

| Avaliação dos Serviços Ecossistêmicos |                                                                                 |                                                                                                                                                                                                  |                                                               |                                                                                 |                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Regulação da qualidade do ar          | Série temporal e sazonal de dados térmicos e de qualidade do ar (CETESB/QUALAR) | Remoção de valores ausentes; Seleção de poluentes; Filtro por período; Média mensal; Agrupamento por mês                                                                                         | Exportação de arquivos CSV para processamento no Google Colab | Gráficos de correlação entre poluentes e NDVI                                   | Identifica relações entre vegetação e poluentes atmosféricos                                                                             |
| Regulação microclimática              | Avaliação estatística entre vegetação e temperatura da superfície terrestre     | Cálculo do NDVI e LST                                                                                                                                                                            | Implementação de algoritmo no Google Colab com API do GEE     | Imagens e gráficos de NDVI, LST e LULC; Estatística descritiva                  | Quantifica influência da cobertura vegetal sobre temperatura de superfície                                                               |
| <b>Modelo de Previsão de Cenários</b> | Conjunto de imagens orbitais do Landsat 8 OLI/TIRS                              | Recorte da geometria no Estado de São Paulo; Cálculo do LST; Redimensionamento (256×256 px); Separação treino (80%), validação/teste (20%); Normalização (0 a 1); Aplicação da arquitetura U-Net | Implementação de algoritmo no Google Colab com API do GEE     | Métricas de avaliação (MSE, RMSE, MAE, R²); Imagens de LST calculado e previsto | Base estruturada para treinamento do modelo; Permite avaliar serviço ecossistêmico de regulação microclimática e apoiar decisões urbanas |

## Apêndice E

### Plano de Gestão de Dados

Um Plano de Gerenciamento de Dados criado usando a DMP Tool.

**Título:** Avaliação dos serviços ecossistêmicos de regulação providos por infraestruturas verdes: um estudo de caso em Campinas/SP

**Criadora:** Ana Laura Fragoso Favoreti

**Afiliação:** Universidade Estadual de Campinas (unicamp.br)

**Financiadora:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (capes.gov.br)

**Número da chamada:** 001

**Modelo utilizado:** UNICAMP-GENÉRICO (Aplicável a todas as áreas)

**Período de execução:** 01/08/2023 a 31/07/2025

**Última modificação:** 22/06/2025

**Resumo do projeto:** O crescimento urbano desordenado tem levado à redução da capacidade dos ecossistemas urbanos em fornecer serviços essenciais, como a regulação climática. As infraestruturas verdes emergem como estratégias sustentáveis para mitigar os efeitos negativos sobre os serviços ecossistêmicos. Este estudo explora a relação entre uso e cobertura do solo e a oferta/demanda de regulação em Campinas/SP, utilizando sensoriamento remoto e modelagem espacial em Sistemas de Informação Geográfica.

### Descrição dos Dados e Metadados

#### Quais serão os dados coletados?

Serão utilizados dados secundários orbitais e ambientais, incluindo:

- Imagens dos sensores Landsat 8 (OLI e TIRS) para NDVI e LST.
- Imagens Sentinel-2 e produtos do Dynamic World (resolução de 10m) para LULC.
- Dados atmosféricos e termais da CETESB ( $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$ ,  $O_3$ , NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$ , CO).
- Dados de precipitação do CILAGRO.
- Dados vetoriais: limites urbanos, APPs, rede hídrica e infraestrutura urbana (IBGE e DIDC-Campinas).

## Aspectos Legais e Acesso aos Dados

### Quais são as questões legais e éticas?

Os dados são públicos, de acesso aberto e com uso permitido para fins acadêmicos, respeitando as licenças originais. Não é necessária aprovação de comitês de ética.

### Política de compartilhamento de dados

- Dados serão compartilhados via Zenodo (mapas, séries temporais, estatísticas e scripts).

## Gestão e Armazenamento dos Dados

### Formatos dos arquivos e softwares compatíveis

- **GeoTIFF (.tif):** NDVI e LST — QGIS, ArcGIS Pro, rasterio, geopandas.
- **Shapefile (.shp):** dados vetoriais — QGIS, ArcGIS Pro, geopandas.
- **CSV (.csv):** séries temporais — Excel, LibreOffice, R, SPSS, pandas, numpy.
- **JSON/TXT:** metadados e configurações — VS Code, Notepad++, Python, JavaScript.
- **PDF/PNG:** arquivo da dissertação, gráficos e mapas.

## **Armazenamento e backup**

Os dados serão armazenados em:

- **Repositório científico:** Zenodo.
- **Nuvens institucionais:** OneDrive (Microsoft) e Google Drive.
- **Cópia física:** pendrive pessoal da autora e HD externo do orientador.

Os arquivos serão preservados por no mínimo 5 anos após o encerramento do estudo. A gestão será revisada anualmente para garantir integridade e atualização dos dados.