



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
FACULDADE DE ARTES VISUAIS (FAV)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E CIDADE

TOMÁS ANDRÉS BORGES BARRERA

**Arborização como estratégia de mitigação das ilhas de  
calor urbanas na cidade de Goiânia, Goiás, Brasil**

GOIÂNIA - GO

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
FACULDADE DE ARTES VISUAIS

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação      ☐ Tese      ☐ Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Tomás Andrés Borges Barrera

#### 3. Título do trabalho

Arborização como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbanas na cidade de Goiânia, Goiás, Brasil

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM      ☐ NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Tomás Andrés Borges Barrera, Discente**, em 22/06/2026, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luana Miranda Esper Kallas, Professora do Magistério Superior**, em 22/06/2026, às 14:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6277913** e o código CRC **15E1BD6F**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.027936/2026-05

SEI nº 6277913

TOMÁS ANDRÉS BORGES BARRERA

## **Arborização como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbanas na cidade de Goiânia, Goiás, Brasil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Cidade, da Faculdade de Artes Visuais (FAV) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Projeto e Cidade.

Área de concentração: O Projeto, a Teoria, a História e a Crítica

Orientador(a): Dra. Luana Miranda Esper Kallas

GOIÂNIA

2026



Borges Barrera, Tomás Andrés

Arborização como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbanas na cidade de Goiânia, Goiás, Brasil [manuscrito] / Tomás Andrés Borges Barrera. - 2026.

329 f.: 2026

Orientadora: Prof(a). Dra. Luana Miranda Esper Kallas

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais (FAV), Programa de Pós-graduação em Projeto e Cidade, Goiânia, 2026.

Apêndice.

Inclui: siglas, mapas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Ilhas de Calor Urbanas. 2. Arborização Urbana. 3. Cobertura Arbórea. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Índices de Vegetação.

I. Kallas, Luana Miranda Esper, orient. II. Título.

CDU 72



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

FACULDADE DE ARTES VISUAIS

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **005/2026** da sessão de Defesa de Dissertação de **Tomás Andrés Borges Barrera**, que confere o título de Mestre em **Projeto e Cidade**, na área de concentração em **O projeto, a teoria, a história e a crítica**.

Aos **vinte e cinco dias do mês de maio de dois mil e vinte e seis**, a partir das **catorze horas**, no **auditório da FAV e Videoconferência para a membro externa**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Arborização como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbanas na cidade de Goiânia- GO”**. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora **Luana Miranda Esper Kallas (PPG PROCIDADE/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Wilza Gomes Reis Lopes (PRODEMA/ UFPI)**, membro titular externo, **cuja participação ocorreu através de videoconferência**; Professora Doutora **Érika Cristine Kneib (PPG PROCIDADE/UFG)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho **conforme explicitado abaixo**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Luana Miranda Esper Kallas**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **seis dias do mês de junho de 2026**.

### TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

**Arborização como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbanas na cidade de Goiânia, Goiás, Brasil.**



Documento assinado eletronicamente por **Luana Miranda Esper Kallas, Professora do Magistério Superior**, em 06/06/2026, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Erika Cristine Kneib, Professora do Magistério Superior**, em 06/06/2026, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilza Gomes Reis Lopes, Usuário Externo**, em 12/06/2026, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6244659** e o código CRC **BFD0C031**.



## **Agradecimentos**

A realização deste mestrado representou um grande desafio, tanto no âmbito acadêmico quanto pessoal, exigindo a aquisição de novos conhecimentos e técnicas para atingir os objetivos propostos. Durante este percurso, a experiência e as orientações de diversas pessoas foram essenciais, às quais expresso minha sincera gratidão.

Ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras (GCUB), por me permitir participar do edital GCUB-MOB Nº 001/2023, bem como ao Programa de Pós-Graduação Projeto e Cidade da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás (UFG), por ter me selecionado como seu primeiro estudante internacional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo suporte financeiro que viabilizou a realização deste mestrado de forma presencial.

À minha orientadora, Profa. Dra. Luana Miranda Esper Kallas, pelas orientações e ferramentas que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Às professoras Dra. Erika Cristine Kneib e Dra. Wilza Gomes Reis Lopes, membros da banca examinadora de qualificação e defesa, que dedicaram seu tempo acompanhando a pesquisa e oferecendo valiosas contribuições.

À minha esposa, a doutoranda Dimaris Anaika Gomez Ramirez, pelo auxílio técnico em ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica, bem como por sua participação ativa no mapeamento das variáveis.

Aos professores do programa de Pós-Graduação Projeto e Cidade, que contribuíram para minha formação ao longo do mestrado, bem como ao corpo administrativo da secretaria, que sempre esteve disponível para prestar o apoio necessário.

À Secretaria de Relações Internacionais (SRI) da UFG, por todo o suporte e orientações oferecidos, inclusive antes da minha chegada ao país, fazendo com que eu me sentisse bem-vindo à universidade desde o primeiro momento.

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

## Resumo

A expansão dos assentamentos urbanos, caracterizada pela alteração drástica das propriedades da superfície e pela emissão de gases antropogênicos, intensificou o aquecimento das áreas urbanas em relação aos seus arredores rurais, fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU). A exacerbação desse fenômeno no contexto das mudanças climáticas impulsionou a arborização urbana como uma estratégia de mitigação eficaz e versátil. Esta pesquisa analisa a influência da arborização urbana sobre as ICU Superficiais (ICUS) nos bairros de Goiânia–GO, município que se destaca por seu arborizado. Por meio de sensoriamento remoto, foram elaborados índices *NDVI*, *SAVI* e mapas de Temperaturas Superficiais Terrestres entre 2006 e 2025, analisando o comportamento da vegetação e das ICUS por meio de técnicas de detecção de mudanças, tanto na escala do perímetro urbano quanto na do bairro. No perímetro urbano, foram identificados aumentos de 2,88% e 11,47% nos índices *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, juntamente com um aumento de 10% na intensidade das ICUS (0,26°C). Em relação aos bairros, 59% e 71% apresentaram aumentos nos índices *NDVI* e *SAVI*, enquanto 64% registraram um aumento na intensidade das ICUS. A análise de correlação de Pearson e a regressão dos mínimos quadrados ordinários revelaram uma forte relação entre os índices de vegetação e as ICUS dos bairros ( $r=-0,88$ ;  $R^2=0,78$ ), destacando a importância da vegetação como preditor das ICUS. Em 163 bairros nos quais foi estimada a cobertura arbórea, registrou-se um aumento total de 5,06 pontos percentuais (9,42% a 14,48%), com uma média por bairro de 5,3 pontos. Os condomínios fechados apresentaram as maiores proporções de cobertura e crescimento, resultando em menores intensidades das ICUS em comparação com os bairros residenciais tradicionais. A arborização em áreas protegidas (APA, APP, UC e parques) representou 35% da cobertura total; para 2025, os bairros associados a essas áreas apresentaram uma cobertura arbórea média significativamente superior à dos bairros não associados (15,06% vs. 7,03%), com intensidade média 0,75°C mais baixa. Bairros com ocupação urbana inferior a 40% registraram as menores coberturas arbóreas, mas as maiores quedas nas intensidades das ICUS, em função da transição de solos nus para vegetação em lotes vazios, evidenciando a importância dessas áreas no campo térmico da cidade, bem como a subordinação da cobertura arbórea à dinâmica de crescimento urbano. Por fim, outros fatores, como telhados refletivos, sombreamento projetado por edifícios de grande altura e mudanças na cobertura do solo em áreas adjacentes, mostraram influência sobre as intensidades das ICUS. Com base nos dados de 2025, determinou-se que, em bairros com ocupação urbana superior a 40%, cada aumento de 1% na cobertura arbórea reduz a intensidade das ICUS entre  $-0,061$  e  $-0,080^{\circ}\text{C}$ . Em bairros com ocupação inferior a 40%, as mudanças na cobertura do solo em lotes vazios prevalecem sobre a influência da cobertura arbórea.

**Palavras-chave:** ilhas de calor urbanas; ilhas de calor urbanas superficiais; arborização urbana; cobertura arbórea; sensoriamento remoto; índices de vegetação.

## Resumen

La expansión de los asentamientos urbanos, caracterizada por la alteración drástica de las propiedades de la superficie y la emisión de gases antropogénicos, ha intensificado el calentamiento de las áreas urbanas en relación a sus entornos rurales, fenómeno conocido como Isla de Calor Urbana (ICU). La exacerbación de este fenómeno en el contexto del cambio climático, ha impulsado la arborización urbana como una estrategia de mitigación eficaz y versátil. Esta investigación analiza la influencia de la arborización urbana sobre las ICU superficiales (ICUS) en los barrios de Goiânia–GO, municipio destacado por su arborización. Mediante teledetección, fueron elaborados índices *NDVI*, *SAVI* y mapas de Temperaturas Superficiales Terrestres entre 2006-2025, analizando el comportamiento de la vegetación y las ICUS por medio de técnicas de detección de mudanzas, tanto en la escala del perímetro urbano como en la del barrio. En el perímetro urbano, se identificaron incrementos del 2,88% y 11,47% en los índices *NDVI* y *SAVI*, respectivamente, junto a un aumento del 10% en la intensidad de las ICUS (0,26°C). En relación a los barrios, el 59% y 71% mostraron incrementos en *NDVI* y *SAVI*, mientras que el 64% registró un aumento en la intensidad de las ICUS. El análisis de correlación de Pearson y la regresión de mínimos cuadrados ordinarios revelaron una relación fuerte entre los índices de vegetación y las ICUS de los barrios ( $r=-0,88$ ;  $R^2=0,78$ ), destacando la importancia de la vegetación como predictor de las ICUS. En 163 barrios en los que fue estimada la cobertura arbórea, fue registrado un incremento total de 5,06 puntos porcentuales (9,42% a 14,48%), con un promedio por barrio de 5,3 puntos. Los condominios cerrados presentaron las mayores proporciones de cobertura y crecimiento, resultando en menores intensidades de ICUS en comparación con los barrios residenciales tradicionales. La arborización en áreas protegidas (APA, APP, UC y parques) representó el 35% de la cobertura total; para 2025, barrios asociados a estas áreas exhibieron una cobertura arbórea promedio significativamente superior a los barrios no asociados (15,06% vs. 7,03%), con intensidad promedio 0,75°C más baja. Barrios con ocupación urbana inferior al 40%, registraron las coberturas arbóreas más bajas, pero los mayores descensos en las ICUS, producto de la transición de suelos desnudos a vegetación en lotes vacíos, evidenciando la importancia de estas áreas en el campo térmico de la ciudad, así como la subordinación de la cobertura arbórea a la dinámica de crecimiento urbano. Finalmente, otros factores como techos reflectivos, sombreado proyectado por edificaciones de gran altura y cambios en la cobertura del suelo en áreas adyacentes mostraron influencia sobre las intensidades de las ICUS. Con base en los datos de 2025, se determinó que, en barrios con ocupación urbana superior al 40%, cada incremento del 1% en la cobertura arbórea reduce la intensidad de las ICUS entre -0,061 y -0,080°C. En barrios con ocupaciones inferiores al 40%, cambios en la cobertura del suelo de lotes vacíos prevalecen sobre la influencia de la cobertura arbórea.

**Palabras Llave:** islas de calor urbanas; islas de calor urbanas superficiales; arborización urbana, cobertura arbórea; teledetección, índices de vegetación.

## Abstract

The expansion of urban settlements, characterized by drastic changes in land cover and the emission of anthropogenic gases, has intensified the warming of urban areas relative to their rural surroundings, a phenomenon known as the Urban Heat Island (UHI). The exacerbation of this phenomenon in the context of climate change has promoted urban afforestation as an effective and versatile mitigation strategy. This research analyzes the influence of urban afforestation on Surface Urban Heat Islands (SUHI) in the neighborhoods of Goiânia–GO, a municipality known for its high level of urban afforestation. Using remote sensing, NDVI and SAVI indices and Land Surface Temperature maps were generated for the period 2006–2025, analyzing the behavior of vegetation and SUHI through change detection techniques, both at the urban perimeter scale and at the neighborhood scale. Within the urban perimeter, increases of 2.88% and 11.47% were observed in the NDVI and SAVI indices, respectively, along with a 10% increase in the intensity of SUHI (0.26°C). Regarding the neighborhoods, 59% and 71% showed increases in NDVI and SAVI, while 64% recorded an increase in SUHI intensity. Pearson's correlation analysis and ordinary least squares regression revealed a strong relationship between vegetation indices and SUHI in the neighborhoods ( $r = -0.88$ ;  $R^2 = 0.78$ ), highlighting the importance of vegetation as a predictor of SUHI. In 163 neighborhoods where tree cover was estimated, a total increase of 5.06 percentage points (9.42% to 14.48%) was recorded, with an average of 5.3 points per neighborhood. Gated communities had the highest proportions of tree cover and growth, resulting in lower SUHI values compared to traditional residential neighborhoods. Tree cover in protected areas (APA, APP, UC, and parks) accounted for 35% of total coverage; by 2025, neighborhoods associated with these areas exhibited significantly higher average tree cover than non-associated neighborhoods (15.06% vs. 7.03%), with an average SUHI intensity 0.75°C lower. Neighborhoods with urban occupancy below 40% recorded the lowest tree cover but the greatest decreases in SUHI, resulting from the transition from bare soil to vegetation on vacant lots, highlighting the importance of these areas in the city's thermal landscape, as well as the subordination of tree cover to the dynamics of urban growth. Finally, other factors such as reflective roofs, shade cast by high-rise buildings and changes in land cover in adjacent areas, were found to influence SUHI intensities. Based on 2025 data, it was determined that, in neighborhoods with urban occupancy exceeding 40%, each 1% increase in tree cover reduces SUHI intensity by between  $-0.061$  and  $-0.080^{\circ}\text{C}$ . In neighborhoods with urban coverage below 40%, changes in the land cover of vacant lots outweigh the influence of tree cover.

**Keywords:** urban heat island; surface urban heat islands; urban tree planting; urban afforestation; tree cover; remote sensing; vegetation indices.

## LISTA DE QUADROS

|           |                                                                                                                                                                           |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1  | Possíveis impactos da mudança climática devido a alterações em eventos climáticos e meteorológicos extremos, com base em projeções para meados e final do século XXI..... | 34  |
| Quadro 2  | Conceitos da ilha de calor urbana de diversos autores.....                                                                                                                | 43  |
| Quadro 3  | Conceitos da ilha de calor urbana de outras áreas de pesquisa...                                                                                                          | 44  |
| Quadro 4  | Relação entre as características da urbanização e o balanço energético.....                                                                                               | 47  |
| Quadro 5  | Classificação das ICU de acordo a sua intensidade ou magnitude.....                                                                                                       | 52  |
| Quadro 6  | Classificação dos tipos de ICU, escalas, processos subjacentes, comportamento e impactos prováveis.....                                                                   | 54  |
| Quadro 7  | Técnicas de medição e modelagem das ilhas de calor urbanas...                                                                                                             | 67  |
| Quadro 8  | Vantagens e desvantagens das técnicas de medição das ICU....                                                                                                              | 75  |
| Quadro 9  | Especificações das bandas dos satélites <i>Landsat</i> 5, 8 e 9.....                                                                                                      | 135 |
| Quadro 10 | Dados das imagens multiespectrais empregadas.....                                                                                                                         | 136 |
| Quadro 11 | Valores <i>NDVI</i> associados a diferentes estágios de crescimento e saúde das plantas.....                                                                              | 143 |
| Quadro 12 | Interpretação do coeficiente de correlação de Pearson ( <i>r</i> ).....                                                                                                   | 150 |
| Quadro 13 | Escala qualitativa atribuída à proporção de cobertura arbórea....                                                                                                         | 153 |
| Quadro 14 | Escala qualitativa atribuída ao crescimento da cobertura arbórea.....                                                                                                     | 154 |
| Quadro 15 | Definições adotadas para cada categoria de tipo de bairro.....                                                                                                            | 154 |
| Quadro 16 | Escala qualitativa atribuída à ocupação urbana.....                                                                                                                       | 156 |



## LISTA DE FIGURAS

|           |                                                                                                       |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1  | Efeito de “inversão térmica” na camada do dossel e camada limite urbana.....                          | 51  |
| Figura 2  | Classificação das ICU de acordo a sua área de ação.....                                               | 52  |
| Figura 3  | Camadas da atmosfera sobre a superfície urbana.....                                                   | 55  |
| Figura 4  | Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas.....                                              | 60  |
| Figura 5  | Influência das estratégias de mitigação das ICU sob o balanço de energia urbano.....                  | 66  |
| Figura 6  | Influência da arborização urbana.....                                                                 | 80  |
| Figura 7  | Distribuição geográfica dos principais biomas do Brasil.....                                          | 103 |
| Figura 8  | Esquema adaptado das principais fitofisionomias do bioma Cerrado.....                                 | 105 |
| Figura 9  | Evolução das legislações municipais que regulamentam a arborização urbana em Goiânia.....             | 125 |
| Figura 10 | Fluxograma de pré-processamento das imagens empregadas.....                                           | 138 |
| Figura 11 | Percentual de reflectância no <i>NIR</i> e no <i>RED</i> para as folhagens sadia e seca.....          | 143 |
| Figura 12 | Diagrama descritivo das três escalas de análise desenvolvidas na pesquisa.....                        | 146 |
| Figura 13 | Exemplo da estimativa de cobertura arbórea (Setor Santos Dumont - 2025).....                          | 153 |
| Figura 14 | Exemplo de estimativa de ocupação urbana (Res. Della Pena - 2025).....                                | 155 |
| Figura 15 | Interpretação de um Gráfico de Caixa Simples ( <i>Box Plot</i> ).....                                 | 157 |
| Figura 16 | Comportamento das TST no município de Goiânia-GO, 2006-2025                                           | 160 |
| Figura 17 | Comportamento das TST e ICUS no perímetro urbano e rural, 2006-2025.....                              | 161 |
| Figura 18 | Comparação da TST média entre o Perímetro Rural e o Parque Estadual João Leite, 2006-2025.....        | 164 |
| Figura 19 | Áreas de acordo a intensidades de ICUS no Perímetro Urbano.....                                       | 166 |
| Figura 20 | Quantidade de Bairros de acordo a intensidade média de ICUS.....                                      | 167 |
| Figura 21 | Valores médios dos índices <i>NDVI</i> , <i>SAVI</i> e <i>NDBI</i> no perímetro urbano 2006-2025..... | 175 |
| Figura 22 | Áreas de acordo a classes do índice <i>NDVI</i> no Perímetro Urbano.....                              | 176 |
| Figura 23 | Áreas de acordo a classes do índice <i>SAVI</i> no Perímetro Urbano.....                              | 177 |
| Figura 24 | Quantidade de bairros de acordo a média do <i>NDVI</i> por ano de estúdio.....                        | 184 |

|           |                                                                                                                                             |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 25 | Quantidade de bairros de acordo a média do SAVI por ano de estúdio.....                                                                     | 185 |
| Figura 26 | Proporção de bairros com aumentos e diminuições da média NDVI e SAVI.....                                                                   | 189 |
| Figura 27 | Principais transições de usos e coberturas do solo nos processos de urbanização.....                                                        | 192 |
| Figura 28 | Valores médios do índice NDBI no Perímetro Urbano e Barrios, 2006-2025.....                                                                 | 194 |
| Figura 29 | Áreas de acordo as classes de uso e cobertura do solo no Perímetro Urbano, 2006-2025.....                                                   | 195 |
| Figura 30 | Regressão linear dos valores médios de NDVI e intensidade das ICUS nos bairros.....                                                         | 201 |
| Figura 31 | Regressão linear dos valores médios de SAVI e intensidade das ICUS nos bairros.....                                                         | 202 |
| Figura 32 | Intensidades médias de ICUS nos bairros de acordo a categorias NDVI no período 2006-2025.....                                               | 204 |
| Figura 33 | Intensidades médias de ICUS nos bairros de acordo a categorias SAVI no período 2006-2025.....                                               | 204 |
| Figura 34 | Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de NDVI nos bairros, 2006-2025.....                                        | 205 |
| Figura 35 | Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de SAVI nos bairros, 2006-2025.....                                        | 205 |
| Figura 36 | Regressão linear dos valores médios de NDBI e intensidade das ICUS nos bairros.....                                                         | 208 |
| Figura 37 | Intensidades das ICUS de acordo a classes de uso e cobertura do solo.....                                                                   | 209 |
| Figura 38 | Comportamento geral do índice NDVI nos bairros com reduções de intensidades das ICUS 2006-2025.....                                         | 212 |
| Figura 39 | Comportamento geral do índice SAVI nos bairros com reduções de intensidades das ICUS 2006-2025.....                                         | 213 |
| Figura 40 | Comportamento geral das intensidades das ICUS nos bairros com reduções 2006-2025.....                                                       | 214 |
| Figura 41 | Crescimento da cobertura arbórea nos bairros com reduções de intensidades das ICUS (excluindo chácaras e uso não residencial)               | 215 |
| Figura 42 | Cobertura arbórea nos bairros com reduções das intensidades de ICUS (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025..... | 216 |
| Figura 43 | Exemplos de crescimento da cobertura arbórea, 2006-2025.....                                                                                | 218 |
| Figura 44 | Exemplos de categorias de cobertura arbórea identificada nos bairros.....                                                                   | 219 |

|           |                                                                                                                                                                              |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 45 | Reduções médias de intensidades das ICUS de acordo ao crescimento da cobertura arbórea nos bairros (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....     | 220 |
| Figura 46 | Comparação de intensidades médias das ICUS nos bairros, de acordo a cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025.....                | 221 |
| Figura 47 | Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em canteiros centrais – Setor Garavelo.....                                                                                      | 222 |
| Figura 48 | Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em praças – Res. Atalaia.....                                                                                                    | 223 |
| Figura 49 | Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em quadras de equipamento urbano – Bairro Parque Atheneu.....                                                                    | 224 |
| Figura 50 | Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em parques – Conjunto Baliza.....                                                                                                | 225 |
| Figura 51 | Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em APP e Parque – Setor Novo Horizonte.....                                                                                      | 226 |
| Figura 52 | Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em lotes – Res. Orlando Moraes.....                                                                                              | 227 |
| Figura 53 | Exemplo de implantação de arborização urbana de acordo ao tamanho do lote.....                                                                                               | 229 |
| Figura 54 | Exemplos das categorias de tipos de bairros.....                                                                                                                             | 232 |
| Figura 55 | Quantidade de bairros de acordo ao crescimento da cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                                    | 233 |
| Figura 56 | Cobertura arbórea total de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial). Estágio Inicial-2025.....                                                    | 234 |
| Figura 57 | Cobertura arbórea média de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                                                    | 235 |
| Figura 58 | Comparação de intensidades médias de ICUS de acordo ao tipo de bairro, Estágio Inicial – 2025.....                                                                           | 236 |
| Figura 59 | Ocupação urbana nos bairros com reduções das intensidades de ICUS (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025.....                                    | 240 |
| Figura 60 | Cobertura arbórea média de acordo a ocupação urbana por tipo de cobertura nos bairros (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                  | 241 |
| Figura 61 | Relação entre o crescimento da ocupação urbana e o da cobertura arbórea presente em lotes e quadras, Estágio Inicial – 2025.....                                             | 241 |
| Figura 62 | Comparação de Intensidade de ICUS, valores <i>NDVI</i> e cobertura arbórea de acordo a ocupação urbana (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025..... | 245 |

|           |                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 63 | Comparação de médias de Intensidade das ICUS, índice <i>NDVI</i> e cobertura, entre Bairros Residenciais e Cond. Fechados com ocupação urbana < 60%, Estágio Inicial.....                 | 246 |
| Figura 64 | Proporção de bairros com mudança de solo nu a cobertura vegetal de acordo ao tipo de bairro.....                                                                                          | 248 |
| Figura 65 | Proporção de bairros com mudança de solo nu a cobertura vegetal de acordo a ocupação urbana, 2025.....                                                                                    | 249 |
| Figura 66 | Proporção de bairros com mudança de solo nu a cobertura vegetal de acordo a cobertura arbórea, 2025.....                                                                                  | 249 |
| Figura 67 | Influência das mudanças de solo nu a vegetação no bairro Della Pena, 2006-2025.....                                                                                                       | 251 |
| Figura 68 | Média da cobertura arbórea e Intensidade das ICUS dos bairros de acordo a sua associação a APP, APA, UC e Parques (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025..... | 254 |
| Figura 69 | Proporção de bairros associados a APP, APA, UC e Parques por tipo de bairro.....                                                                                                          | 254 |
| Figura 70 | Médias de cobertura arbórea e intensidade das ICUS entre bairros associados e não associados, de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), 2025.....           | 256 |
| Figura 71 | Influência da APP no bairro Jardins Madri, 2006-2025.....                                                                                                                                 | 258 |
| Figura 72 | Comportamento das coberturas refletivas no Setor Campinas, 2006-2025.....                                                                                                                 | 260 |
| Figura 73 | Comportamento das áreas verticalizadas no Setor Bueno, 2006-2025.....                                                                                                                     | 262 |
| Figura 74 | Comportamento das áreas verticalizadas no Setor Marista, 2006-2025.....                                                                                                                   | 263 |
| Figura 75 | Influência da área agrícola contigua ao Bairro Center Ville, 2006-2025.....                                                                                                               | 265 |
| Figura 76 | Influência de crescimento de vegetação contigua ao Privê Ilhas do Caribe, 2006-2025.....                                                                                                  | 266 |
| Figura 77 | Intensidades médias das ICUS de acordo a cobertura arbórea e ocupação urbana nos bairros (Excluindo Chácaras e uso não residencial), 2025.....                                            | 269 |
| Figura 78 | Regressão linear da cobertura arbórea e intensidade das ICUS, de acordo a ocupação urbana (Excluindo Chácaras e uso não residencial), 2025.....                                           | 271 |

## LISTA DE TABELAS

|           |                                                                                                                                     |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1  | Condições meteorológicas no dia da captura das imagens empregadas.....                                                              | 137 |
| Tabela 2  | Condições meteorológicas as 12 horas no dia da captura das imagens empregadas.....                                                  | 137 |
| Tabela 3  | Comportamento das TST no município de Goiânia-GO, 2006-2025.....                                                                    | 160 |
| Tabela 4  | TST do perímetro urbano e rural e intensidades de ICUS no período 2006-2025.....                                                    | 160 |
| Tabela 5  | Comparação da TST média entre o Perímetro Rural e o Parque Estadual João Leite, 2006-2025.....                                      | 164 |
| Tabela 6  | Áreas de acordo a intensidades de ICUS no Perímetro Urbano.....                                                                     | 164 |
| Tabela 7  | Quantidade de Bairros de acordo a intensidade média de ICUS....                                                                     | 167 |
| Tabela 8  | Valores médios dos índices <i>NDVI</i> , <i>SAVI</i> e <i>NDBI</i> no perímetro urbano 2006-2025.....                               | 175 |
| Tabela 9  | Áreas de acordo a classes do índice <i>NDVI</i> no Perímetro Urbano...                                                              | 176 |
| Tabela 10 | Áreas de acordo a classes do índice <i>SAVI</i> no Perímetro Urbano...                                                              | 177 |
| Tabela 11 | Quantidade de bairros de acordo a média do <i>NDVI</i> por ano de estúdio.....                                                      | 184 |
| Tabela 12 | Quantidade de bairros de acordo a média do <i>SAVI</i> por ano de estúdio.....                                                      | 185 |
| Tabela 13 | Valores mínimos, máximos e médios do índice <i>NDBI</i> no Perímetro Urbano e Barrios, 2006-2025.....                               | 193 |
| Tabela 14 | Matriz de confusão de classificação de uso e cobertura do solo, 2006-2025.....                                                      | 194 |
| Tabela 15 | Áreas de acordo as classes de uso e cobertura do solo no Perímetro Urbano, 2006-2025.....                                           | 195 |
| Tabela 16 | Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre Intensidades de ICUS e índices <i>NDVI</i> e <i>SAVI</i> nos bairros, 2006-2025..... | 200 |
| Tabela 17 | Intensidades médias de ICUS nos bairros de acordo a categorias <i>NDVI</i> no período 2006-2025.....                                | 204 |
| Tabela 18 | Intensidades médias de ICUS nos bairros de acordo a categorias <i>SAVI</i> no período 2006-2025.....                                | 204 |
| Tabela 19 | Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de <i>NDVI</i> nos bairros, 2006-2025.....                         | 205 |
| Tabela 20 | Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de <i>SAVI</i> nos bairros, 2006-2025.....                         | 205 |

|           |                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 21 | Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre Intensidades de ICUS e índice <i>NDBI</i> nos bairros, 2006-2025.....                                                            | 207 |
| Tabela 22 | Intensidades das ICUS de acordo a classes de uso e cobertura do solo, 2006-2025.....                                                                                            | 209 |
| Tabela 23 | Reduções médias de intensidades das ICUS de acordo ao crescimento da cobertura arbórea nos bairros (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....        | 219 |
| Tabela 24 | Comparação de intensidades médias das ICUS nos bairros, de acordo a cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                     | 220 |
| Tabela 25 | Quantidade de bairros de acordo ao crescimento da cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                                       | 233 |
| Tabela 26 | Cobertura arbórea total de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                                                       | 234 |
| Tabela 27 | Cobertura arbórea média de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....                                                       | 235 |
| Tabela 28 | Comparação de intensidades e redução média as ICUS de acordo ao tipo de bairro, Estágio Inicial – 2025.....                                                                     | 236 |
| Tabela 29 | Relação entre o crescimento da ocupação urbana e o da cobertura arbórea presente em lotes e quadras, Estágio Inicial – 2025.....                                                | 242 |
| Tabela 30 | Comparação de Intensidade de ICUS, valores <i>NDVI</i> e cobertura arbórea de acordo a ocupação urbana (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.....    | 244 |
| Tabela 31 | Comparação de Intensidades das ICUS, índice <i>NDVI</i> e cobertura entre Bairros Residenciais e Cond. Fechados com ocupação urbana < 60%, Estágio Inicial.....                 | 246 |
| Tabela 32 | Cobertura arbórea total dos bairros por tipo de cobertura (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial - 2025                                                    | 253 |
| Tabela 33 | Cobertura arbórea média dos bairros de acordo a sua associação a APP, APA, UC e Parques (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025.....                 | 253 |
| Tabela 34 | Intensidades médias das ICUS dos bairros de acordo a sua associação a APP, APA, UC e Parques (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025.....            | 253 |
| Tabela 35 | Proporção de cobertura arbórea pertencente APP, APA, UC e Parques por tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025.....                    | 255 |
| Tabela 36 | Médias de cobertura arbórea e intensidade das ICUS entre bairros associados e não associados, de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), 2025..... | 255 |

|           |                                                                                                                                                             |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 37 | Intensidades médias das ICUS de acordo a cobertura arbórea e ocupação urbana nos bairros (excluindo Chácaras e uso não residencial), 2025.....              | 268 |
| Tabela 38 | Dados função regressão linear da cobertura arbórea e intensidade das ICUS de acordo a ocupação urbana (excluindo Chácaras e uso não residencial), 2025..... | 271 |

## LISTA DE MAPAS

|         |                                                                                                           |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Mapa 1  | Localização do Município de Goiânia – GO.....                                                             | 107 |
| Mapa 2  | Localização dos Parques e Bosques com acesso público e infraestrutura no Município de Goiânia – GO .....  | 111 |
| Mapa 3  | Estágio inicial dos bairros por ano de estudo.....                                                        | 147 |
| Mapa 4  | Evolução das ICUS no perímetro urbano de Goiânia - GO, 2006-2025.....                                     | 165 |
| Mapa 5  | Mudanças nas intensidades das ICUS no perímetro urbano e nos bairros de Goiânia - GO, 2006-2025.....      | 172 |
| Mapa 6  | Evolução do índice <i>NDVI</i> no perímetro urbano de Goiânia - GO, 2006-2025.....                        | 180 |
| Mapa 7  | Evolução do índice <i>SAVI</i> no perímetro urbano de Goiânia - GO, 2006-2025.....                        | 181 |
| Mapa 8  | Mudanças no índice <i>NDVI</i> no perímetro urbano e nos bairros de Goiânia - GO, 2006-2025.....          | 187 |
| Mapa 9  | Mudanças no índice <i>SAVI</i> no perímetro urbano e nos bairros de Goiânia - GO, 2006-2025.....          | 188 |
| Mapa 10 | Evolução do uso e cobertura do solo no perímetro urbano de Goiânia - GO, 2006-2025.....                   | 198 |
| Mapa 11 | Localização dos bairros utilizados como exemplo na seção “Cobertura arbórea e elementos relacionados..... | 231 |
| Mapa 12 | Localização dos bairros utilizados como exemplo na seção “Tipos de Bairros”.....                          | 239 |
| Mapa 13 | Localização do bairro Residencial Della Pena.....                                                         | 252 |
| Mapa 14 | Localização do bairro Jardins Madri.....                                                                  | 259 |
| Mapa 15 | Localização dos bairros utilizados como exemplo na seção “Outros fatores”.....                            | 267 |



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AMMA – Agência Municipal de Meio Ambiente

APA – Área de Proteção Ambiental

APP – Área de Preservação Permanente

COMURG – Companhia de Urbanização de Goiânia

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization*)

ICU – Ilha de Calor Urbana

ICUS – Ilha de Calor Urbana Superficial

LULC – Uso e cobertura do solo (*Land Use Land Cover*)

MDF - Mapa Digital Fácil de Goiânia

NDBI - Índice de Edificações de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Building Index*)

NDVI - Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*)

PD – Plano Diretor

PDAU – Plano Diretor de Arborização Urbana

PDIG - Plano de Desenvolvimento Integrado de Goiânia

PUAMA - Programa Urbano Ambiental Macambira Anicuns

SAVI - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index*)

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SR – Sensoriamento Remoto

TST – Temperatura Superficial Terrestre

UC – Unidade de Conservação

## SUMÁRIO

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| INTRODUÇÃO .....                                                         | 24  |
| 1. AMBIENTE URBANO .....                                                 | 27  |
| 1.1    Clima urbano .....                                                | 27  |
| 1.1.1    Impactos ambientais do desenvolvimento urbano .....             | 28  |
| 1.1.2    Cidades e mudanças climáticas .....                             | 31  |
| 1.1.3    Estudo do clima urbano no Brasil .....                          | 38  |
| 1.2    Ilha de calor urbana (ICU) .....                                  | 42  |
| 1.2.1    Elementos que contribuem a sua formação .....                   | 45  |
| 1.2.2    Características das ilhas de calor urbana .....                 | 49  |
| 1.2.3    Classificação das ilhas de calor urbanas .....                  | 51  |
| 1.2.4    Principais consequências das Ilhas de Calor Urbanas .....       | 56  |
| 1.2.5    Estratégias de mitigação das Ilhas de Calor Urbanas .....       | 59  |
| 1.2.6    Técnicas de medição das Ilhas de Calor Urbanas.....             | 67  |
| 1.3    Arborização urbana .....                                          | 77  |
| 1.3.1    Fatores que determinam a influência das árvores .....           | 77  |
| 1.3.2    Influência da arborização urbana.....                           | 79  |
| 1.3.3    Planos de arborização urbana como estratégia de mitigação ..... | 92  |
| 1.3.4    Técnicas de medição da cobertura arbórea. ....                  | 98  |
| 1.3.5    Estudo da influência da arborização nas ICU no Brasil .....     | 99  |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS.....                                              | 102 |
| 2.1    Caracterização da área de estudo .....                            | 102 |
| 2.1.1    O Cerrado .....                                                 | 102 |
| 2.1.2    Goiânia .....                                                   | 106 |
| 2.2    Procedimentos metodológicos .....                                 | 134 |
| 2.2.1    Dados de Sensoriamento Remoto .....                             | 134 |
| 2.2.2    Pré-processamento das imagens .....                             | 137 |
| 2.2.3    Variáveis de estudo .....                                       | 138 |
| 2.2.4    Análise .....                                                   | 145 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                          | 159 |
| 3.1    Macroescala .....                                                 | 159 |
| 3.1.1    Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUS).....                 | 159 |

|                                                        |                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.2                                                  | Índices de vegetação .....                                           | 175 |
| 3.1.3                                                  | Variáveis de apoio .....                                             | 193 |
| 3.1.4                                                  | Relação entre as variáveis .....                                     | 200 |
| 3.2                                                    | Mesoescala .....                                                     | 211 |
| 3.2.1                                                  | Comportamento geral das variáveis de estudo.....                     | 212 |
| 3.2.2                                                  | Cobertura arbórea e elementos relacionados.....                      | 215 |
| 3.2.3                                                  | Influência da cobertura arbórea sobre as intensidades das ICUS ..... | 268 |
| CONCLUSÕES .....                                       |                                                                      | 273 |
| REFERÊNCIAS.....                                       |                                                                      | 283 |
| APÊNDICE A – SITUAÇÃO 2025.....                        |                                                                      | 317 |
| Distribuição das intensidades das ICUS - 2025 .....    |                                                                      | 317 |
| Distribuição dos Índices de Vegetação - 2025 .....     |                                                                      | 320 |
| Relação entre Índices de Vegetação e ICUS - 2025 ..... |                                                                      | 326 |

## INTRODUÇÃO

As cidades contribuem para a mudança do clima e da composição atmosférica em escala local, regional e global (Oke *et al.*, 2017). Ao concentrar mais de 55% da população mundial, os espaços urbanos tornaram-se responsáveis por 67 a 72% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) que alimentam o aquecimento global, consumindo entre 67 e 76% da energia produzida no mundo (IPCC, 2014; Pathak *et al.*, 2022; UN, 2019). Nesse contexto, as cidades assumem um papel central na implementação de políticas de mitigação e adaptação climática, tanto para reduzir seu impacto global, quanto para garantir que possam lidar com as consequências das alterações no clima (Oke *et al.*, 2017).

O acelerado processo de urbanização modifica profundamente as propriedades das superfícies terrestres: a substituição da cobertura vegetal por materiais impermeáveis e compactos altera o balanço de energia e massa do ambiente, transformando os fluxos de calor sensível e latente (Oke, 2002). Combinadas às emissões antropogênicas provenientes do transporte, da indústria e dos sistemas de condicionamento de ar, essas transformações geram condições que promovem o superaquecimento dos espaços urbanos em relação às suas áreas rurais circundantes (Oke *et al.*, 2017). É nesse cenário que se manifesta a Ilha de Calor Urbana (ICU), definida como a diferença de temperatura entre áreas urbanas e seus entornos rurais (Oke, 1995), e cuja origem está associada principalmente à modificação do balanço de radiação e ao calor antropogênico não rejeitado (Landsberg, 1981).

O estudo das ICU tornou-se uma das prioridades da climatologia urbana contemporânea, em razão de suas consequências diretas sobre as condições de vida da população. As temperaturas elevadas nas cidades intensificam o desconforto térmico, aumentam o consumo de energia para resfriamento, agravam a poluição do ar e potencializam episódios de estresse hídrico (Adinna; Enete; Okolie, 2009; Landsberg, 1981; Roth, 2013). Os efeitos sobre a saúde pública são igualmente críticos: o aumento da temperatura eleva a mortalidade e a morbidade associadas ao calor, sobretudo em populações vulneráveis como idosos, crianças e pessoas com doenças crônicas. Esses impactos tendem a se agravar, uma vez que as projeções climáticas indicam o aumento da frequência e da intensidade de ondas de calor, bem como de temperaturas extremas, especialmente em regiões tropicais (IPCC, 2022).

A dimensão climática das ICU vai além do conforto imediato dos moradores. Além de contribuir para o aquecimento regional resultante da alteração das propriedades da superfície, as ICU retroalimentam as mudanças climáticas ao aumentar a demanda energética para refrigeração, o que eleva as emissões de GEE gerando um ciclo vicioso de aquecimento (Adinna; Enete; Okolie, 2009). Assim, mitigar as ICU não é apenas uma questão de bem-estar urbano, mas uma estratégia de enfrentamento das mudanças climáticas em escala global.

Diante desse cenário, a vegetação tem se mostrado como uma ferramenta versátil na modificação do clima, recebendo cada vez mais atenção de planejadores urbanos e tomadores de decisão como uma estratégia para superar o aumento das temperaturas urbanas (Balany *et al.*, 2020; Roth, 2013). A arborização urbana, “espinha dorsal” da infraestrutura verde (FAO, 2016), atua sobre múltiplos fatores que condicionam a formação das ICU: reduz a radiação solar incidente, aumenta a evapotranspiração e a evaporação, reduz o armazenamento de calor, intercepta poluentes atmosféricos e contribui para o sequestro de carbono (Oke *et al.*, 2017). Além de seus benefícios climáticos, as árvores urbanas promovem a biodiversidade, atenuam a poluição sonora e melhoram a saúde física e mental dos habitantes (Donovan *et al.*, 2013; FAO, 2016; Mascaró, 2015).

Apesar da extensa literatura que quantifica os múltiplos benefícios do plantio de árvores, a eficácia dos planos de arborização em grande escala como soluções climáticas naturais tem sido pouco avaliada (Zhao *et al.*, 2024). Essa lacuna é particularmente significativa em cidades tropicais, onde as condições climáticas amplificam tanto os efeitos das ICU quanto o potencial de resposta da vegetação. Dessa forma, analisar a influência da arborização urbana sobre as ICU é fundamental para orientar sua implementação eficaz como estratégia de mitigação, destacando as potencialidades e limitações das políticas e dos métodos aplicados, bem como da configuração urbana.

Goiânia, capital do estado de Goiás, insere-se nesse panorama como um caso de referência na promoção da arborização urbana no Brasil. A jovem cidade, fundada em 1933, tem promovido políticas de arborização por meio de legislações municipais desde 1991, elaborando seu primeiro Plano Diretor de Arborização Urbana (PDAU) em 2008. Por meio de programas como o "Plante a Vida", que distribuiu 1.200.000 mudas entre 2005 e 2009 (AMMA, [entre 2017 a 2021b]), a cidade posicionou-se como

uma das mais arborizadas do país, atingindo uma taxa de 0,97 árvore por habitante (AMMA, 2008), sendo incluída em 2024 no programa das Nações Unidas “Cidades Árvores do Mundo” junto com outras 210 cidades (Arbor day foundation, 2026).

Esta pesquisa busca responder como o aumento da arborização a partir de 2006 influenciou as Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUS) nos bairros de Goiânia - GO. Como hipótese, propõe-se que o plantio de árvores conseguiu reduzir as ICUS de forma localizada e não generalizada, sendo este o resultado da combinação de diferentes formas de implementação da arborização, aliada à heterogeneidade do tecido urbano. O objetivo geral é avaliar a influência da arborização nas ICUS dos bairros da cidade de Goiânia–GO, no período 2006–2025, a partir dos seguintes objetivos específicos:

- Identificar e analisar as políticas públicas municipais voltadas à promoção e implementação da arborização urbana na cidade de Goiânia - GO.
- Caracterizar e quantificar o comportamento das ICUS durante o período 2006 - 2025 na área de estudo.
- Caracterizar e quantificar a evolução da vegetação urbana durante o período 2006 - 2025 na área de estudo.
- Identificar a evolução da cobertura arbórea nos bairros com reduções das ICUS durante o período 2006 - 2025, bem como os elementos que condicionam sua influência e implementação.
- Formular uma metodologia de monitoramento que permita avaliar a influência dos planos de arborização de grande escala sobre as ICUS das cidades.

Por meio de sensoriamento remoto (SR) e sistemas de informação geográfica (SIG), são desenvolvidos índices de vegetação e mapas das ICUS durante o período 2006-2025. Mediante técnicas de detecção de mudanças, analisa-se de forma espacial e quantitativa o comportamento das variáveis na escala do perímetro urbano e do bairro. Nos bairros com reduções das ICUS durante o período, identificam-se as relações entre o comportamento da cobertura arbórea e aspectos como o tipo de bairro, a ocupação urbana, as áreas protegidas, as alterações na cobertura do solo e os fatores não associados à vegetação urbana, com foco na determinação da influência da arborização urbana sobre as ICUS dos bairros de Goiânia.

A pesquisa está estruturada em três capítulos principais: Ambiente Urbano; Materiais e Métodos; e Resultados e Discussão, seguidos pelas Conclusões.

## 1. AMBIENTE URBANO

Os efeitos climáticos secundários das atividades humanas, decorrentes da alteração dos ciclos naturais de energia e água, possuem ramificações complexas. A rede de causa e efeito pode ser tão extensa que o impacto climático da alteração de uma parte do sistema é, muitas vezes, desconhecido (Oke, 2002). A compreensão, a descrição e a modelagem dessas interações permitem minimizar aspectos indesejáveis e maximizar benefícios, fornecendo os dados científicos necessários para projetar, gerenciar e operar assentamentos mais seguros, saudáveis, sustentáveis e resilientes (Oke *et al.*, 2017).

O capítulo seguinte aborda os conceitos e a dinâmica que condicionam o comportamento do clima urbano, com ênfase nas duas principais variáveis de estudo: a ilha de calor urbana (ICU) e a arborização urbana. Visando manter o foco da pesquisa, foram utilizados autores únicos para alguns conceitos técnicos que possuem consenso na comunidade científica.

### 1.1 Clima urbano

Sob a perspectiva da teoria dos sistemas, Monteiro (2011) propõe um conceito de clima urbano que permite “revelar a essência” desse fenômeno complexo, identificando seus componentes, características e processos intrínsecos. O clima urbano é definido como um sistema adaptativo que envolve transformações significativas do clima local, resultantes da interação entre a urbanização e a atmosfera. Essa dinâmica é caracterizada por alterações na superfície terrestre que podem levar a modificações na própria composição atmosférica.

Nessa visão sistêmica, o “artefato físico” decorrente do processo de urbanização, integrado ao suporte geoecológico, constitui o núcleo e o operando do sistema, cuja estrutura é permeada pelos fluxos energéticos do operador: a atmosfera. Longe de uma natureza estática ou passiva, esse operando materializa-se no espaço urbano, abrangendo o homem e outros seres vivos. Tal configuração, estruturada em componentes inter-relacionados, define atributos espaciais e confere ao sistema um caráter adaptativo, tornando-o passível de autorregulação mediante a intervenção antrópica (Monteiro, 2011).

As entradas energéticas no sistema climático urbano são predominantemente de natureza térmica, provenientes da radiação solar. Tais entradas são condicionadas

pelos processos de reflexão, absorção e armazenamento térmico, as quais derivam das diferentes configurações urbanas e modalidades de uso do solo (Monteiro, 2011).

De acordo com Landsberg (1981), o clima urbano constitui um composto estatístico dos fenômenos meteorológicos diários de uma área, regidos por padrões de grande escala em um mapa meteorológico sinótico maior. Adicionalmente, o autor reitera que cada ambiente urbano altera, em diferentes proporções, as condições meteorológicas locais na interface solo-atmosfera, denominada camada limite atmosférica.

Em consonância com as definições de Monteiro (2011) e Landsberg (1981), os autores Oke *et al.* (2017) definem o clima urbano como uma consequência do impacto não intencional das atividades humanas na atmosfera, que altera o clima e a composição atmosférica em escala local, regional e global. com ênfase na superfície terrestre, Oke *et al.* (2017) afirmam que o clima integrado de uma cidade é a soma de combinações repetidas de materiais e arranjos de superfícies ativas. A natureza exata dessas superfícies ativas controla grande parte das características da camada limite da atmosfera de um local, por meio de sua função de absorver, refletir e emitir radiação; transformar energia e massa; interceptar a precipitação e os poluentes atmosféricos; e desviar o fluxo de ar e diminuir a velocidade dos ventos.

Em suma, o clima urbano decorre da interação entre o processo de urbanização, constituído tanto pelo ambiente construído quanto pelas atividades antropogênicas, e a atmosfera, regida por condições meteorológicas em uma escala maior, que podem influenciar as condições climáticas locais, regionais e globais. Seus elementos fundamentais consolidam-se na urbanização como operando e na atmosfera como operador, evidenciando um caráter adaptativo no qual o ser humano é o principal agente de mudanças, assim como o responsável pela regulação do sistema em busca de condições de vida adequadas.

### **1.1.1 Impactos ambientais do desenvolvimento urbano**

Do ponto de vista ambiental, o processo de desenvolvimento urbano não é total, instantâneo ou uniforme, produzindo uma vasta diversidade de ecossistemas urbanos típicos, cada um associado a diferentes usos da terra e graus de gerenciamento ou perturbação humana. O espectro ecológico de uma área urbana pode variar desde ecossistemas remanescentes, como lagos, florestas ou outras áreas preservadas; ecossistemas gerenciados, como campos, parques urbanos, jardins e cemitérios; até



sistemas totalmente antropogênicos, dominados pelo ambiente construído. Esses diferentes graus de modificação superficial fornecem um conjunto distinto de habitats para a flora, a fauna e os seres humanos, integrados em um arranjo único de elementos abióticos (Oke *et al.*, 2017).

Diferentes setores do ambiente podem sofrer alterações antropogênicas, gerando múltiplas consequências no sistema que compõe o clima urbano. Esses impactos podem ser classificados de acordo com seu escopo de ação em:

### **Pedósfera e litosfera urbana**

O desenvolvimento urbano altera a morfologia da paisagem e os solos originais, destruindo sua estrutura natural. Essas mudanças são agravadas pela substituição de materiais nativos por materiais importados, como areia, cascalho, entulho de construção, terras e coberturas vegetais, alterando radicalmente a composição e a disposição dos solos urbanos, o que causa mudanças significativas na fertilidade e na hidrologia local (Oke *et al.*, 2017).

### **Hidrosfera urbana**

No processo de urbanização, o terreno é frequentemente drenado e áreas úmidas, lagoas e lagos são aterrados. O uso de materiais impermeáveis, como asfalto e concreto, utilizados em estradas, estacionamentos e edificações, interrompe drasticamente o regime hídrico, vedando a superfície e reduzindo a infiltração de água (Oke *et al.*, 2017). Essa expansão de superfícies impermeáveis acelera o tempo de concentração da água da chuva nos cursos d'água, contribuindo para inundações. Em contrapartida, superfícies naturais permitem a percolação, onde parte da água é armazenada e se infiltra gradualmente no lençol freático, mitigando o impacto nos sistemas de drenagem. Em áreas vegetadas, grande parte da água é interceptada por folhas e troncos, sendo posteriormente devolvida à atmosfera pela evapotranspiração (Landsberg, 1981).

### **Biosfera urbana**

O desenvolvimento urbano acelera ou conclui a supressão da vegetação iniciada pela agricultura ou atividades pretéritas. O processo consiste na eliminação de espécies nativas, por vezes acentuada pela degradação da qualidade ambiental, e seu replantio com espécies mais favoráveis às funções urbanas, afetando a ecologia dos habitantes não humanos (Oke *et al.*, 2017).

## Atmosfera urbana

As características urbanas, que modificam a atmosfera, podem ser divididas em dois conjuntos: forma urbana, relacionada a mudanças nas propriedades da superfície, e função urbana, resultante principalmente de emissões antropogênicas (Oke *et al.*, 2017). De acordo com Oke *et al.* (2017), a forma urbana pode afetar a atmosfera das seguintes maneiras:

- **Tecidos:** Composto por materiais naturais e de construção, que constituem elementos urbanos como edifícios, estradas e vegetação, determinam as propriedades radiativas, térmicas e de umidade, alterando suas capacidades de absorção, reflexão e emissão de radiação.
- **Cobertura superficial:** Diferentes tecidos compõem diferentes frações de superfície com propriedades particulares, especialmente associadas à distribuição de calor. Enquanto as superfícies pavimentadas não removem calor via evaporação, superfícies vegetadas permanecem relativamente frias ao utilizarem energia solar para evaporar a água.
- **Estrutura urbana:** Moldada pela tridimensionalidade da cidade, a estrutura urbana, na escala da cidade, determina o albedo e a rugosidade aerodinâmica e, na escala do edifício e da rua, controla a troca radiativa e os padrões de fluxo de ar.

A função urbana, por meio de emissões antropogênicas, situa as pessoas como atores no sistema climático em todas as escalas. O metabolismo urbano, marcado por ritmos como a jornada de trabalho, modula o tráfego, o uso doméstico de serviços e as atividades industriais, liberando vapor de água, calor e poluentes (líquidos, gasosos ou particulados). Esses ritmos geram flutuações na produção antropogênica que se somam ao ciclo solar natural. Os impactos diretos incluem o calor dissipado por edificações ou veículos e o vapor de torres de resfriamento. Os impactos indiretos envolvem processos nos quais poluentes interferem na transferência radiativa, formando núcleos de condensação ou gases de efeito estufa (GEE) que modificam o balanço de radiação terrestre (Oke *et al.*, 2017).

Em suma, a urbanização altera o equilíbrio natural mediante a modificação da superfície (forma) e das emissões derivadas das atividades antropogênicas (função), acentuando as disparidades entre o núcleo urbano e seu entorno rural. À medida que as mudanças na composição do solo e da atmosfera se aprofundam, as distorções

climáticas aumentam em diferentes escalas. Assim, a configuração e a composição espacial da cidade determinam o comportamento energético que, em interação com as condições meteorológicas locais, modera o clima do espaço urbano.

### **1.1.2 Cidades e mudanças climáticas**

No contexto de agravamento das perturbações climáticas decorrentes do desenvolvimento humano, as cidades desempenham um papel fundamental, tanto por abrigarem a maior parte da população mundial quanto por serem promotores da mudança climática. Apesar de ocuparem apenas 2% da superfície terrestre, as cidades concentram 55% da população mundial (FAO, 2016; UN, 2019). Associadas ao uso intensivo de recursos, são responsáveis por entre 67 a 72% das emissões de GEE que contribuem para a mudança climática, além de consumir entre 67 a 76% da energia produzida no mundo (IPCC, 2024; Pathak *et al.*, 2022).

As cidades ocupam posições fixas no espaço, enquanto o sistema climático sofre alterações temporais que modificam as estatísticas atmosféricas, gerando consequências severas que podem, inclusive, levar ao abandono de assentamentos. Muitas cidades desenvolveram sistemas para lidar com variações sazonais e eventos climáticos extremos com base em experiências passadas, classificando tais medidas em dois tipos: mitigação e adaptação (Oke *et al.*, 2017).

As medidas de mitigação são definidas como ações implementadas por governos, empresas ou indivíduos para reduzir ou evitar a emissão de GEE, ou para ampliar os sumidouros de carbono que removem esses gases da atmosfera (UNDP, 2023). Tais ações concentram-se na busca pela eficiência energética, por meio do uso de energia renovável, transporte multimodal, ordenamento territorial sustentável, construções e processos industriais de baixo ou zero carbono, bem como padrões de produção e consumo mais sustentáveis (Oke *et al.*, 2017; UN-Habitat, 2024). Por outro lado, as medidas de adaptação compreendem ações que visam reduzir a vulnerabilidade aos impactos atuais ou esperados da mudança climática, buscando garantir a segurança dos habitantes e das infraestruturas urbanas (Oke *et al.*, 2017; UNDP, 2023).

Assim, as cidades adquiriram papel central no debate sobre a gestão do aquecimento global, gerando respostas políticas tanto para reduzir seu impacto no clima global quanto para assegurar sua resiliência e adaptação às consequências das alterações nas condições climáticas, conforme descrito a seguir.

## **Impacto urbano no sistema climático global**

A urbanização global, somada ao crescimento populacional, à demanda por terra, ao consumo de energia, à industrialização e ao desenvolvimento tecnológico, constituem os principais impulsionadores do aquecimento global. As cidades perturbam o equilíbrio energético de toda a troposfera mediante o aumento das concentrações de poluentes, GEE e aerossóis na atmosfera, bem como por meio de mudanças em larga escala no uso e na cobertura da terra (Oke *et al.*, 2017).

Embora os efeitos diretos da urbanização sejam restritos em relação à área terrestre global, estes podem assumir proporções significativas em escala urbana. Entretanto as áreas urbanas ocupam uma fração reduzida da superfície do planeta, seus processos e impactos socioeconômicos e ambientais extrapolam seus limites físicos. As mudanças indiretas na cobertura do solo para atender às demandas por alimentos, recursos, energia e transporte transformaram vastas áreas de vegetação nativa em espaços para desenvolvimento agrícola, mineração, pastagens e reservatórios hídricos, gerando impactos diretos sobre os solos e sistemas aquáticos circundantes (Oke *et al.*, 2017; Satterthwaite, 2009).

O maior impacto das cidades na mudança climática reside na produção de GEE, dada a concentração do uso de energia proveniente de combustíveis fósseis, responsáveis por grande parte das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>. Os GEE absorvem a radiação de ondas longas e contribuem para o balanço de energia na troposfera, reemitindo parte da radiação absorvida de volta à superfície e convertendo parte dessa energia em calor sensível na atmosfera. O aumento na concentração desses gases provoca um desequilíbrio radiativo, o que resulta em maior aquecimento. Estima-se que 30% a 40% de todas as emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas a combustíveis fósseis originam-se diretamente das áreas urbanas, enquanto mais de 70% decorrem das necessidades energéticas das populações urbanas. A avaliação da contribuição das cidades tem sido, portanto, complexa, devido à dificuldade em atribuir as emissões de GEE de acordo com o local de produção ou de consumo (Oke *et al.*, 2017).

Apesar do processo de urbanização contribuir para a redução dos espaços verdes globalmente (Tian *et al.*, 2022), estudos indicam que, entre 1990 e 2014, a quantidade de áreas verdes em certas cidades aumentou (Corbane *et al.*, 2020), demonstrando a capacidade de transformação dos espaços urbanos para reduzir seu

impacto sobre as mudanças climáticas.

As emissões de GEE das cidades variam conforme o nível de desenvolvimento dos países. Enquanto em nações em desenvolvimento as cidades caracterizam-se pelo crescimento acelerado e por emissões urbanas *per capita* acima das médias nacionais, em países desenvolvidos o crescimento é mais lento e as emissões *per capita* urbanas geralmente são inferiores às médias nacionais. O caso da China apresenta-se como uma exceção, exibindo crescimento urbano acelerado em contraste com emissões urbanas *per capita* abaixo da média nacional (Luqman; Rayner; Gurney, 2023). Tais dados evidenciam que os espaços urbanos possuem potencial para maior eficiência na gestão de carbono, especialmente em cidades com planejamento e gerenciamento consolidados (UN-Habitat, 2024).

### **Impacto das mudanças climáticas nas cidades**

O aumento das concentrações de GEE na atmosfera acarretou inúmeras mudanças no comportamento do sistema climático global (Oke *et al.*, 2017). A elevação do nível do mar, o incremento da precipitação, as inundações, ciclones e tempestades mais intensos e frequentes, além de temperaturas extremas, são condições projetadas no âmbito das mudanças climáticas que afetarão bilhões de famílias urbanas e periurbanas nas próximas décadas (FAO, 2016).

A convergência entre mudanças climáticas, urbanização acelerada e aumento da densidade populacional elevou a vulnerabilidade dos centros urbanos, o que pode comprometer a saúde, o bem-estar e os meios de subsistência de seus habitantes (FAO, 2016).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), instituído em 1988 para elaborar avaliações periódicas sobre os fundamentos científicos das mudanças climáticas, seus efeitos e riscos futuros, tem como principal objetivo fornecer aos governos informações científicas para a formulação de políticas centradas na adaptação e na mitigação (IPCC, 2026). Por meio de revisões sistemáticas e simulações, o IPCC concluiu que o aquecimento do sistema climático é inequívoco e que é altamente provável que a atividade humana seja sua principal causa desde meados do século XX (IPCC, 2013).

Entre as tendências e projeções de eventos extremos identificadas pelo IPCC, destacam-se o aumento das temperaturas do ar (diurnas e noturnas) na maioria das áreas terrestres, ondas de calor mais intensas, mudanças na frequência de

precipitações e secas, além da elevação do nível médio do mar (IPCC, 2007). O Quadro 1 sintetiza essas projeções e seus possíveis impactos na indústria, nos assentamentos e na sociedade.

Quadro 1 - Possíveis impactos da mudança climática devido a alterações em eventos climáticos e meteorológicos extremos, com base em projeções para meados e final do século XXI.

| <b>Fenômeno e direção da tendência</b>                                                                                      | <b>Probabilidade de tendências futuras</b> | <b>Exemplos dos principais impactos projetados em Indústria, assentamentos e sociedade</b>                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Na maior parte das áreas terrestres, dias e noites mais quentes e menos frios, dias e noites mais quentes e mais frequentes | Virtualmente certo<br>99-100%              | Redução da demanda de energia para aquecimento, aumento da demanda de energia para resfriamento, declínio da qualidade do ar nas cidades, redução das interrupções de transporte devido à neve, efeitos sobre o turismo de inverno. |
| Períodos quentes/ondas de calor. A frequência aumenta na maioria das áreas terrestres                                       | Muito provável<br>90-100%                  | Redução da qualidade de vida das pessoas em áreas quentes sem moradia adequada; impactos sobre idosos, jovens e pobres.                                                                                                             |
| Eventos de precipitação intensa. A frequência aumenta na maioria das áreas terrestres                                       | Muito provável<br>90-100%                  | Interrupção de assentamentos, comércio, transporte e sociedades devido a inundações; pressões sobre infraestruturas urbanas e rurais; perda de propriedades.                                                                        |
| Aumenta a área afetada pela seca                                                                                            | Provável<br>66-100%                        | Escassez de água para assentamentos, indústrias e sociedades; redução dos potenciais de geração de energia hidrelétrica; potencial de migração da população.                                                                        |
| Aumenta a atividade de ciclones tropicais intensos                                                                          | Provável<br>66-100%                        | Perturbações causadas por enchentes e ventos fortes; retirada da cobertura de risco em áreas vulneráveis; possibilidade de migração da população; perda de propriedade.                                                             |
| Aumento da incidência de nível do mar extremamente alto (exceto tsunamis)                                                   | Provável<br>66-100%                        | Custos de proteção costeira versus custo de realocações; potencial de movimentação de populações e infraestrutura.                                                                                                                  |

Fonte: Adaptado de IPCC (2007, p. 13, tradução nossa).

Nas áreas urbanas, as mudanças climáticas impõem efeitos adversos à saúde humana, aos meios de subsistência e às infraestruturas críticas, como os sistemas de transporte, água, saneamento e energia. Tais infraestruturas, quando comprometidas por eventos extremos ou de evolução lenta, sofrem perdas econômicas e interrupções operacionais, impactando negativamente o bem-estar da população, especialmente entre residentes marginalizados socioeconomicamente. Um dos efeitos mais evidentes nos espaços urbanos é o aumento das temperaturas extremas (IPCC, 2023).

O IPCC (2023) destaca cinco riscos chave sobre a população e infraestruturas urbanas, que têm resultados graves comuns à maioria das cidades:

- **Risco para a população devido ao aumento do calor:** O aumento substancial na frequência e na duração de eventos de calor extremo, exacerbados pelos efeitos da ICU, aumentarão os eventos de estresse por calor, a mortalidade e a morbidade; acrescentando os riscos à saúde, especialmente para jovens e adultos mais vulneráveis. Este risco é global, com consequências maiores em cidades temperadas e tropicais.
- **Infraestrutura urbana em risco de danos causados por inundações e tempestades severas:** O aumento da intensidade e da frequência das chuvas e de ciclones tropicais que contribuem para as inundações fluviais e pluviais, juntamente com o aumento do nível do mar, terá consequências sobre a infraestrutura e os serviços urbanos essenciais (edifícios, sistemas de transporte, usinas de energia, etc.), com maior risco nos assentamentos costeiros de baixa altitude. Esse risco é potencializado pela concentração de populações nas áreas costeiras, bem como a carência de sistemas de drenagem ou de proteção adequados.
- **População em risco de exposição a secas urbanas:** As projeções de secas mais frequentes e prolongadas, agravadas por ondas de calor e processos de urbanização (mudanças no uso da terra, migração para as cidades e mudanças nos padrões de uso da água), levarão à escassez de água, restringindo o acesso aos recursos hídricos para as populações vulneráveis e de baixa renda. Essa situação, agravada pela gestão ineficiente da água, aumentará os riscos ambientais e de saúde para os habitantes, causadas pelo uso de águas subterrâneas contaminadas.
- **Riscos à saúde decorrentes da exposição à poluição do ar nas cidades:** O aumento das emissões de poluentes de fontes antropogênicas (geração de energia, transporte, indústria, fontes comerciais e residenciais) e biogênicas (poeira soprada pelo vento e queima de biomassa), reforçado por secas e incêndios florestais, eleva a incidência de doenças respiratórias. Maior proporção de população jovem ou idosa vulnerável a doenças respiratórias, assim como pobreza persistente, são fatores que potenciam os impactos negativos, principalmente pela exposição a poluentes PM 2,5 e ozônio troposférico.

- **Riscos à saúde decorrentes da exposição à poluição da água e do saneamento nas cidades:** A diminuição das chuvas em determinadas regiões e as mudanças no escoamento e no armazenamento devido às secas deterioram a qualidade da água disponível. A redução do escoamento para córregos de água doce pode aumentar a salinidade, concentrar patógenos e poluentes. O uso de água subterrânea com maior teor de sedimentos e poluentes resulta em riscos à saúde dos moradores urbanos, especialmente mulheres, crianças, idosos, doentes e deficientes.

As projeções sobre o impacto do crescimento urbano nas mudanças climáticas globais são de especial relevância para o planejamento urbano. As cidades são, simultaneamente, o espaço de concentração de ativos sociais e econômicos que requerem proteção (adaptação) e a principal fonte de emissões de GEE, responsáveis pela mudança climática global (mitigação). Ademais, centros urbanos possuem sistemas de governança que facilitam a implementação de políticas eficazes em comparação a outras escalas territoriais (Oke *et al.*, 2017).

### **Planos de ação climática da cidade**

Reduzir o risco climático a níveis que não ameacem as normas privadas ou sociais estabelecidas e garantir o desenvolvimento sustentável requer esforços de adaptação imediatos e de longo prazo. Tais ações devem partir de governos, empresas, sociedade civil e indivíduos, em escala e velocidade significativamente superiores às tendências atuais (IPCC, 2023).

Nesse contexto, o IPCC (2023) propõe o conceito de “desenvolvimento resiliente ao clima”, que compreende o processo de implementação de soluções de adaptação e mitigação de GEE para alicerçar o desenvolvimento sustentável. A implementação conjunta dessas medidas amplia sua eficácia ao explorar sinergias e reduzir a sobreposição ou o conflito entre ações isoladas.

Embora o conceito de resiliência não seja abordado no restante desta pesquisa, é importante mencioná-lo, uma vez que é amplamente utilizado na formulação de estratégias para enfrentar as mudanças climáticas globais. De acordo com o IPCC (2023, p. 128, tradução nossa), a resiliência é definida como “a capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos interligados de lidar com um evento, tendência ou perturbação perigosa, reagindo ou reorganizando-se de forma a manter sua função essencial, identidade e estrutura”.



Sob a perspectiva urbanística, a resiliência consiste na capacidade de um sistema urbano sustentar ou reestabelecer celeremente suas funções frente a distúrbios, adaptando-se e transformando estruturas que restrinjam sua adaptabilidade atual e futura (Meerow; Newell; Stults, 2016).

Os planos de ação climática das cidades surgem como estratégias para incrementar a resiliência dos assentamentos urbanos. Definidos como um documento estratégico em que a cidade estabelece os processos e as medidas necessárias para enfrentar a mudança climática, compreendem um diagnóstico da situação urbana e um conjunto de instrumentos, políticas e linhas de ação atuais e futuras, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE (mitigação) e os efeitos da mudança climática (adaptação) (Buenos Aires Ciudad, [2021?]).

As estratégias de adaptação fundamentam-se na análise dos riscos aos quais a população está exposta em relação às mudanças das variáveis climáticas e suas projeções de longo prazo. Considerando as especificidades da cidade, definem-se medidas para mitigar impactos. Para a formulação de estratégias de mitigação, é imperativo elaborar um inventário das fontes de GEE da cidade, definindo metas de redução acompanhadas de um cronograma de ação e dos recursos necessários para sua implementação (Mitchell *et al.*, 2019).

Dessa forma, os planos de ação climática urbana fornecem aos governos e aos cidadãos orientações estratégicas, dados para a tomada de decisões, diretrizes e ferramentas para enfrentar as mudanças climáticas. além de promover objetivos ligados à proteção ambiental, à melhoria da qualidade de vida e ao desenvolvimento (Buenos Aires Ciudad, [2021?]).

As características físicas e funcionais da cidade estruturam-se de forma heterogênea e desigual no espaço, atuando como catalisadores dos efeitos dos fenômenos climáticos extremos. A disposição dos seus elementos gera diferentes graus de exposição, geralmente associados às características socioeconômicas dos seus habitantes. Desta maneira, a forma urbana desempenha um papel fundamental na garantia de condições adequadas de saúde e segurança para os seus habitantes, sendo necessário considerar as potencialidades e limitações do espaço físico e dos seus habitantes para a formulação e implementação de estratégias de adaptação e mitigação. As estruturas organizacionais e de governança da cidade facilitam a formulação e aplicação de planos para enfrentar as consequências do

desenvolvimento humano, buscando garantir melhores condições de vida para os seus habitantes e reduzir o seu impacto no sistema climático global.

### **1.1.3 Estudo do clima urbano no Brasil**

A partir de meados do século XIX, o clima das cidades passou a despertar interesse científico em decorrência da severa degradação ambiental nas cidades industrializadas, especialmente na Inglaterra e na França. A introdução de novos elementos físicos e químicos na atmosfera, resultante do crescimento urbano, alterou as condições naturais preexistentes, dando origem ao que se define como clima urbano (Lima; Pinheiro; Mendonça, 2012).

A intensificação da degradação ambiental urbana impulsionou os estudos climatológicos, estabelecendo um diálogo direto com o planejamento urbano por meio da integração dos campos termo-higrométrico, físico-químico e hidrometeorológico. Contudo, apesar da existência de metodologias específicas para subsidiar o ordenamento territorial, as instâncias técnicas responsáveis pela elaboração de planos diretores subestimam a relevância das variáveis atmosféricas na estruturação do espaço urbano e regional (Mendonça, 2011).

O processo de urbanização, tanto na Europa como no Brasil, resultou em inúmeros problemas (Lima; Pinheiro; Mendonça, 2012). No Brasil, caracterizado por sua velocidade, desigualdade e falta de perspectivas de planejamento, a urbanização resultou no desenvolvimento de espaços com disparidades socioeconômicas acentuadas e profunda degradação socioambiental. A metropolização acelerada observada desde o final da década de 1970, revelou a transição de uma matriz populacional predominantemente rural para urbana, atingindo uma taxa de 85% na década de 1990 (Mendonça, 2011), chegando até 87,4% no (IBGE, 2023a).

A deterioração da qualidade ambiental urbana a partir das décadas de 1950 e 1960 fomentou os primeiros estudos da climatologia urbana no Brasil. Os estudos pioneiros, concentrados no Rio de Janeiro e em São Paulo durante a década de 1960, fundamentaram-se em teorias e metodologias propostas por pesquisadores internacionais, como T. Oke em 1972. Subsequentemente, o conceito de "Sistema Clima Urbano" proposto por Monteiro em 1976, impulsionou estudos na década de 1980, com aplicações metodológicas em centros como Porto Alegre, São Paulo, Salvador e Rio de Janeiro (Lima; Pinheiro; Mendonça, 2012).

A partir da aplicação da teoria dos sistemas à dinâmica entre atmosfera,

ambiente natural e urbanização, o clima da cidade passou a ser abordado de forma holística e evolutiva, dando origem ao estudo do clima urbano conforme observado atualmente (Mendonça, 2011). A perspectiva de estudo sobre o clima urbano proposta por Monteiro em 1976, busca uma visão não antagônica entre o homem e a natureza, pautada pela coparticipação (Monteiro, 2011).

Dentre as três vertentes de estudo do clima urbano no Brasil, a termodinâmica é a que mais tem sido estudada, em consonância com a tendência de países desenvolvidos, cujas preocupações centrais residem nas condições térmicas e higrométricas. Assim como em outros países tropicais e de baixa latitude, o interesse brasileiro recai sobre os elevados índices de calor urbano nos períodos vespertino e noturno, que geram desconforto térmico considerável e diversos transtornos (Mendonça, 2011).

Além das especificidades tropicais do país, a maior facilidade técnica/tecnológica de estudo do campo da termodinâmico, impulsiona o desenvolvimento de um maior número de estudos nessa área em relação a outros campos. Outro fator é a intensificação dos fenômenos associados ao aumento da temperatura do ar, como as ICU, a inversão térmica e o desconforto térmico, proporcional ao crescimento urbano acelerado desde a década de 1960 (Lima; Pinheiro; Mendonça, 2012).

Os estudos vinculados ao campo físico-químico, associados à poluição atmosférica, apresentaram desenvolvimento mais tardio, concentrando-se no eixo urbano-industrial formado por São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Curitiba, onde se verifica maior degradação da qualidade do ar e concentração econômica. A produção científica nesta área, historicamente reduzida, sofreu novo declínio na década de 2000, principalmente devido ao elevado custo dos equipamentos de monitoramento, limitando o estudo nesse campo de grande importância para a saúde pública (Lima; Pinheiro; Mendonça, 2012; Mendonça, 2011).

No tocante às cidades de pequeno e médio porte, o campo hidrometeorológico tem sido objeto de pesquisas intensas, especialmente aquelas localizadas na área costeira, sujeitas a chuvas excessivas durante o verão tropical, frequentemente associadas à ocupação de áreas de alto risco (Mendonça, 2011).

Tais estudos têm demonstrado a incompatibilidade entre as estratégias de planejamento urbano tradicionais e a realidade tropical, especialmente quando se replicam lógicas de cidades de clima temperado. Nesse sentido, a dinâmica

atmosférica das baixas latitudes exige a adaptação do planejamento à realidade local, requerendo o conhecimento detalhado do ritmo climático e a superação do uso exclusivo de médias estatísticas no dimensionamento de obras de engenharia, visando mitigar os efeitos de eventos climáticos extremos (Mendonça, 2011).

No Brasil, assim como em outras partes do mundo, as consequências das mudanças climáticas destacaram o impacto do desenvolvimento humano sobre o meio ambiente, bem como a vulnerabilidade dos assentamentos urbanos a eventos climáticos extremos, elevando a conscientização sobre a importância de incorporar variáveis ambientais ao planejamento urbano. O aquecimento global, uma das principais características da mudança climática, intensificou os impactos das altas temperaturas sobre as condições de vida dos moradores urbanos, tornando cada vez mais necessário compreender e estudar o campo termodinâmico do clima urbano e sua relação com outros campos, com a finalidade de construir um modelo de desenvolvimento urbano resiliente e sustentável.

### **Técnicas de estudo do clima urbano no Brasil**

A literatura científica que sistematiza a evolução das técnicas aplicadas ao estudo do clima urbano no Brasil é ainda escassa. Nesta seção, aborda-se a perspectiva de Mendonça (2011) acerca do avanço das técnicas empregadas nesse campo científico ao longo do tempo.

Os estudos do clima urbano no Brasil fundamentam-se principalmente em dois determinantes da atmosfera urbana: a variação hipsométrica e a natureza do solo urbano. A primeira vincula-se à oscilação termo-higrométrica em função da altitude, pautada pelo gradiente vertical negativo de aproximadamente 6°C na troposfera. O solo urbano correlaciona-se diretamente às variações de albedo, as quais oscilam conforme a densificação e as propriedades das superfícies.

Os procedimentos convencionais para mensuração da atmosfera urbana fundamentam-se na utilização de dados meteorológicos oficiais e no emprego de dispositivos móveis, tais como miniabrigos termométricos, pluviômetros, anemômetros e amostradores de material particulado. Nas últimas três décadas, a coleta de dados concentrou-se majoritariamente em estações fixas ou móveis distribuídas em pontos estratégicos pré-estabelecidos. A partir da década de 1990, observou-se a introdução de miniestações meteorológicas automáticas, sensores eletrônicos e imagens de satélite, acompanhados de um rigor crescente na

representação cartográfica e estatística por meio de *softwares* especializados, o que conferiu maior precisão e qualidade estética aos estudos.

O número de pontos de monitoramento varia conforme o escopo da pesquisa. Enquanto a utilização de dois pontos geralmente visa contrastar as condições atmosféricas entre o ambiente rural e o espaço urbano, um número maior de pontos permite o desenvolvimento de análises detalhadas da estrutura atmosférica urbana, com ênfase na distribuição espacial dos fenômenos.

Ressalta-se que poucas investigações empregaram o "Fator de Céu Visível" " (*Sky View Factor*) como técnica analítica, assim como poucos estudos incorporaram as percepções dos habitantes sobre as condições atmosféricas, priorizando-se, frequentemente, o rigor científico instrumental em detrimento da subjetividade humana.

A partir da década de 1980, as imagens de satélite começaram a ser empregadas no estudo do clima urbano, contribuindo significativamente para a análise da distribuição espacial e para o detalhamento dos fluxos de energia no ambiente construído. Dentre os estudos pioneiros, destaca-se o estudo de Lombardo (1985) em São Paulo - SP, que analisou a formação da Ilha de Calor Urbana integrando dados térmicos do satélite NOAA à caracterização do uso do solo via sensores *Landsat*.

Mendonça (1995), por meio de imagens *Landsat TM*, elaborou uma tipologia das paisagens intraurbanas e auxiliou o estudo do campo térmico de Londrina - PR em 1993. Seus resultados, obtidos através da Análise de Componentes Principais (ACP) associada à Homogeneização de Classes e ao Cálculo de Áreas, demonstraram precisão comparável ao uso de fotografias aéreas. Complementarmente, Collischonn (1998) analisou o campo térmico na Região Metropolitana de Porto Alegre - RS por meio de imagens *Landsat TM* e o sistema de informações geográficas IDRISI, aprofundando o conhecimento no uso dessa técnica no estudo do clima urbano.

O emprego do sensoriamento remoto para a análise do clima urbano no Brasil vem ganhando espaço em diferentes áreas do conhecimento, à medida que a resolução espacial dos sensores de observação e a capacidade de processamento de dados tem aumentado, potencializado pela abertura gradual ao público de bancos de dados de imagens históricas, como *Landsat* e *Sentinel*. O uso de sensores infravermelhos com vários comprimentos de onda em plataformas de observação por satélite impulsionou os estudos no campo termodinâmico do clima urbano, o que,

juntamente com o uso de ferramentas de geoprocessamento cada vez mais acessíveis, possibilitou a representação cada vez mais detalhada do comportamento do ambiente construído em relação às condições climáticas, atraindo cada vez mais a atenção de arquitetos e urbanistas voltados à mitigação de impactos ambientais e à melhoria da qualidade de vida nas cidades.

## **1.2 Ilha de calor urbana (ICU)**

A Ilha de Calor Urbana (ICU) constitui o fenômeno climático urbano mais eloquente (Monteiro, 2011), um dos exemplos mais claros e documentados da modificação climática inadvertida induzida pela ação antrópica (Oke *et al.*, 2017), caracterizado, essencialmente, pela diferença de temperatura entre as suas urbanas e seus arredores.

As primeiras observações da ICU foram documentadas por Luke Howard em 1818, ao analisar o clima de Londres e identificar um “excesso artificial de calor” na cidade em comparação ao seu entorno rural (Howard, 1833). Na segunda metade do século XIX, Emilien Renou realiza observações semelhantes em Paris, bem como Wilhelm Schmidt em Viena, no início do século XX (Gartland, 2008). Em 1929, o meteorologista alemão Albert Peppler cunhou o termo “*Städtische Wärmeinsel*” para designar o fenômeno, como a primeira palavra equivalente à ICU (Stewart, 2019). Entre 1920 e 1940, pesquisadores de climatologia local e micrometeorologia na Europa, no México, na Índia, no Japão e nos Estados Unidos, buscaram novos métodos para entender esse fenômeno, tornando-se o foco de inúmeros estudos científicos a partir de 1990 (Masson *et al.*, 2020).

Diversos autores desenvolveram conceitos para o fenômeno, com base em sua principal característica: o diferencial de temperatura observado nas áreas urbanas em relação ao seu entorno.

Segundo Landsberg (1981), a ICU reflete o conjunto de alterações microclimáticas decorrente das intervenções antrópicas na superfície urbana, sendo a elevação da temperatura do ar a manifestação climática mais evidente do processo de urbanização. Arya (2008) define a ICU como um efeito da urbanização, caracterizado pelo aumento das temperaturas da superfície e do ar em áreas urbanas em comparação com o ambiente rural. Os autores Oke (2002) e Oke *et al.* (2017), definem o fenômeno como o diferencial térmico entre as áreas urbanas e as áreas

circundantes, caracterizado por temperaturas do ar mais quentes no dossel urbano<sup>1</sup> em relação as temperaturas do ar das áreas rurais.

Sua representação cartográfica por meio de isotermas fechadas, que delimitam a mancha urbana de seu entorno rural, assemelha-se às curvas de nível de uma pequena ilha isolada no oceano, analogia que deu origem ao termo (Arya, 2008; Landsberg, 1981).

Conforme Fialho, Fernandes e Correa (2019), embora as pesquisas atuais nas áreas de meteorologia, engenharia e arquitetura busquem compreender o processo físico das ICU, as definições existentes costumam limitar-se a descrever o comportamento de seus elementos, sem estabelecer critérios claros sobre sua origem (Quadro 2).

Quadro 2 – Conceitos da ilha de calor urbana de diversos autores.

| <b>Autores</b>                  | <b>Conceito</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amorim <i>et al.</i> (2009)     | “A ilha de calor urbana (ICU) é a manifestação do aumento das temperaturas causada por características físicas, sendo elas as altas densidades de construções, concentração de materiais construtivos de grande potencial energético de emissividade, reflectância e, ainda, as atividades humanas” |
| Paulina <i>et al.</i> (2015)    | “Seu impacto no clima local em uma cidade urbana é dado, em particular, em referência ao aumento da temperatura do ambiente”                                                                                                                                                                        |
| Sismanidis <i>et al.</i> (2015) | “Calor relativo das áreas urbanas densas em relação ao seu ambiente suburbano / rural”                                                                                                                                                                                                              |
| Hsieh; Huang (2015)             | “Um fenômeno em que a temperatura em uma cidade é maior que a temperatura nas áreas rurais vizinhas”                                                                                                                                                                                                |
| Chen <i>et al.</i> (2016)       | “que as áreas mais urbanizadas têm uma temperatura do ar mais alta do que as áreas suburbanas circundantes”                                                                                                                                                                                         |
| Gülten <i>et al.</i> (2016)     | “O efeito ilha de calor é definido como temperaturas do ar mais altas na área urbana do que na área rural numa mesma região”                                                                                                                                                                        |
| Wang; Akbari (2016)             | “um fenômeno pelo qual uma metrópole é geralmente significativamente mais quente do que a seus arredores rurais”                                                                                                                                                                                    |
| Aflaki <i>et al.</i> (2016)     | “‘Ilha de calor’ geralmente descreve as áreas urbanizadas com temperaturas mais altas em comparação com as áreas vizinhas não urbanizadas”                                                                                                                                                          |
| Buchin <i>et al.</i> (2016)     | “O efeito de ilha de calor urbana (ICU) é uma modificação climática antropogênica localizada na camada de dossel da atmosfera urbana, onde ocorrem quase todas as atividades humanas diárias”                                                                                                       |

Fonte: Reprodução de Fialho, Fernandes e Correa (2019, p. 57).

Além disso, os autores afirmam que as mudanças climáticas promoveram uma abordagem multidisciplinar no estudo das ICU, voltada para a melhoria das condições de vida urbana; no entanto, tem-se priorizado o desenvolvimento de estratégias de mitigação em detrimento do esclarecimento dos conceitos e critérios fundamentais que explicam a formação do fenômeno (Fialho; Fernandes; Correa, 2019) (Quadro 3).

<sup>1</sup> O dossel urbano (*Urban Canopy Layer - UCL*) refere-se à camada da atmosfera entre o solo e a altura dos edifícios ou das árvores, que compreende os espaços externos ao ar livre e o interior dos edifícios (Oke *et al.*, 2017).

Quadro 3 – Conceitos da ilha de calor urbana de outras áreas de pesquisa.

| <b>Autores</b>                  | <b>Área de pesquisa</b> | <b>Conceito (Causas analisadas)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ward <i>et al.</i> (2016)       | Ciências Ambientais     | “A ICU é induzida por uma combinação de fatores, incluindo a geometria do cânion urbano, a quantidade de superfícies artificiais com emissividade elevada e também a produção de calor antropogênico”                                                                                                                                                                                        |
| Li <i>et al.</i> (2016)         | Sensoriamento remoto    | “A arquitetura urbana da vizinhança afeta [...] a temperatura da superfície terrestre e a ilha de calor urbana superficial, e essa arquitetura é fundamental para a temperatura superficial do entorno. [...] desenvolvimento ou rearranjo na composição e configuração da cobertura da terra dos arredores, inclusive no nível das parcelas, pode ser usado para melhorar o efeito da ICU.” |
| Sailor (2014)                   | Engenharia Civil        | “fenômeno de ilha de calor urbana (ICU) é o resultado de vários fatores, incluindo a prevalência de superfícies termicamente massivas e de baixa refletividade, a falta geral de umidade da superfície e as emissões de calor residual de atividades consumidoras de energia.”                                                                                                               |
| Aniello <i>et al.</i> (1995)    | Geologia                | “[...] as ilhas de calor microurbanas são resultantes da falta de cobertura florestal relacionada a bairros residenciais recém-desenvolvidos, estacionamentos, distritos comerciais, complexos de apartamentos e shopping centers. Todas as ilhas de calor microurbanas eram de natureza radiativa [...]”                                                                                    |
| Ma <i>et al.</i> (2016)         | Geografia Física        | “A expansão urbana desempenha um papel dominante na formação da ilha de calor urbana (ICU) e é, portanto, a essência e característica fundamental da estrutura urbana”                                                                                                                                                                                                                       |
| Sismanidis <i>et al.</i> (2015) | Estudos urbanos         | “a rápida expansão das áreas urbanas e a subsequente conversão de superfícies [...] permeáveis, ao lado (1) da diminuição da evapotranspiração; (2) a redução no transporte de calor turbulento devido à geometria dos <i>canyons</i> urbanos; (3) os fluxos de calor antropogênicos; e (4) a poluição do ar, causam a ilha de calor urbana”                                                 |

Fonte: Reprodução de Fialho, Fernandes e Correa (2019, p. 58–59).

Apesar de o conceito focar no efeito principal do fenômeno, a abordagem multidisciplinar revela sua complexidade, envolvendo os múltiplos elementos que compõem o espaço urbano que condicionam o comportamento climático local e sua influência em diferentes escalas.

Outro conceito relevante no estudo do comportamento das temperaturas urbanas é o de Ilha de Frescor. Definida pelo efeito oposto ao da ICU, a Ilha de Frescor refere-se a áreas com temperaturas inferiores às das zonas urbanizadas circundantes, geralmente associadas a espaços arborizados, vegetação ou corpos d'água inseridos no tecido urbano, que auxiliam na regulação do microclima local (Cheung; Jim, 2019; Kantzioura; Kosmopoulos; Zoras, 2012).

Com base nos conceitos supracitados e sob a perspectiva da arquitetura e do planejamento urbano, esta pesquisa considerará a ICU como o diferencial térmico positivo entre o espaço urbano e seu ambiente rural imediato; determinado por alterações na forma e na função da superfície terrestre decorrentes do processo de urbanização, que interagem com as condições meteorológicas locais, regionais e



globais, resultando no aquecimento do espaço urbano.

### 1.2.1 Elementos que contribuem a sua formação

A urbanização, caracterizada pela supressão da vegetação e sua substituição por empreendimentos residenciais, comerciais e industriais, altera significativamente as propriedades radiativas, termodinâmicas e aerodinâmicas das superfícies, modificando os balanços de energia e de massa em relação ao ambiente rural e, por conseguinte, alterando o equilíbrio solar e hidrológico natural (Arya, 2008; Oke, 2002).

A principal causa da ICU reside na alteração no balanço de radiação e o calor antropogênico não rejeitado (Landsberg, 1981). O conceito de balanço energético, fundamentado na primeira lei da termodinâmica (a qual estabelece que a energia não se perde, mas se transforma), permite elucidar os processos de transferência de energia na superfície terrestre. Aplicado ao ambiente urbano, esse princípio implica que toda a energia absorvida pela superfície, via radiação ou fontes antropogênicas, é convertida em aquecimento do ar adjacente à superfície, evaporação da umidade ou armazenamento térmico nos materiais em forma de calor (Gartland, 2008).

A equação matemática do balanço de energia possibilita a identificação dos fatores envolvidos na transferência de energia. Os conceitos técnicos associados ao balanço de energia descritos a seguir são abordados sob a perspectiva de Gartland (2008), dada a convergência teórica sobre o tema na comunidade científica:

$$\text{Convecção} + \text{Evaporação} + \text{Armazenamento de calor} = \text{Calor antropogênico} + \text{Radiação líquida} \quad (1)$$

- **Convecção:** É o processo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás), neste caso, da superfície terrestre para o ar sobrejacente. Velocidades de vento elevadas, maior turbulência em superfícies ásperas e gradientes térmicos acentuados entre a superfície e o ar potencializam essa transferência.
- **Evaporação:** Consiste na liberação de energia por meio da transição de água em estado líquido presente nas superfícies a gasoso. A água, em solos e corpos d'água, ao ser aquecida pela radiação solar, é convertida em estado gasoso (vapor d'água), levando a energia do sol para a atmosfera. A evapotranspiração faz parte do processo de evaporação. Realizada pelas plantas, absorvem a água do solo por meio das raízes e a evaporam por meio dos estômatos nas folhas,

diminuindo a temperatura da planta. Os processos de evaporação e evapotranspiração intensificam-se por maior velocidade do vento, baixa umidade e ar mais quente.

- **Armazenamento de calor:** Esse fator é condicionado pelas propriedades de condutividade térmica e capacidade térmica dos materiais. Enquanto a alta condutividade térmica otimiza o fluxo de calor para o interior da estrutura, a elevada capacidade térmica amplia a magnitude da energia retida na massa. Consequentemente, o incremento do calor armazenado resulta na elevação da temperatura do material.
- **Calor antropogênico:** Refere-se ao calor residual gerado por atividades antropogênicas, incluindo pessoas, podendo ter uma influência significativa na formação de ICU em áreas densas.
- **Radiação líquida:** compreende 4 processos radiativos que ocorrem na superfície terrestre:

$$\begin{aligned} \text{Radiação líquida} &= \text{Solar recebida} - \text{Solar refletida} + \\ &\quad \text{Radiação atmosférica} - \text{Radiação de superfície} \end{aligned} \quad (2)$$

- **Solar recebida:** Energia irradiada pelo sol, variável segundo a sazonalidade, hora do dia, nebulosidade e poluição atmosférica.
- **Solar Refletida:** Fração da energia solar refletida pelas superfícies. As superfícies brancas e brilhantes refletem a maior parte da radiação solar, enquanto as superfícies escuras, como pavimentos de asfalto, absorvem a maior parte dela.
- **Radiação atmosférica:** compreende a energia emitida por constituintes particulados e gasosos, tais como vapor d'água, nebulosidade, poluentes e aerossóis. O incremento da carga de partículas e do estado térmico intensifica o fluxo radiante atmosférico.
- **Radiação de superfície:** Calor irradiado pela própria superfície, que é altamente dependente de sua temperatura e da temperatura de seus arredores. Uma superfície relativamente mais quente emite mais energia para seus arredores.

Por meio desses processos, as características da urbanização, tanto na forma quanto na função, geram um ambiente favorável ao acúmulo de energia, principalmente do sol, a qual é armazenada e manifesta-se na forma de calor.

Os materiais de construção densos armazenam calor e tornam as superfícies

impermeáveis; a poluição atmosférica interfere na transferência radiativa e fornece núcleos de condensação para a formação de nuvens; a geometria urbana, caracterizada por superfícies rugosas, cria as condições para reter a radiação e reduzir o fluxo de ar; o calor e a água liberados como produtos residuais das atividades urbanas complementam as fontes naturais de calor e água no sistema urbano; e a evapotranspiração é drasticamente reduzida pela remoção da vegetação e sua substituição por materiais de construção impermeáveis, o que, por sua vez, reduz o escoamento superficial, diminuindo o armazenamento de água nos solos e o resfriamento evaporativo (Landsberg, 1981; Oke, 2002).

O Quadro 4 apresenta a correlação entre as características da urbanização e as respectivas alterações no balanço energético, permitindo a identificação dos processos envolvidos para cada uma dessas características.

Quadro 4 – Relação entre as características da urbanização e o balanço energético.

| <b>Alteração dos termos do balanço de energia, resultando em uma anomalia térmica positiva</b> |                                                    | <b>Características da urbanização subjacentes às mudanças no balanço de energia</b> |                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                                                                                                |                                                    | <b>Característica urbana</b>                                                        | <b>Efeitos produzidos</b>              |
| 1                                                                                              | Aumento da absorção da radiação de ondas curtas    | Geometria dos “cânions” entre as ruas                                               | Superfície maior e reflexão múltipla   |
| 2                                                                                              | Diminuição da perda de radiação de ondas longas    | Geometria dos “cânions” entre as ruas                                               | Redução do fator de céu visível        |
| 3                                                                                              | Diminuição do transporte total de calor turbulento | Geometria dos “cânions” entre as ruas                                               | Redução da velocidade do vento         |
| 4                                                                                              | Aumento do armazenamento de calor sensível         | Materiais de construção e escassez de vegetação                                     | Aumento da admissão térmica            |
| 5                                                                                              | Diminuição da evaporação e evapotranspiração       | Materiais de construção e escassez de vegetação                                     | Aumento da impermeabilidade            |
| 6                                                                                              | Aumento da radiação de ondas longas do céu         | Poluição atmosférica                                                                | Aumento da absorção e reemissão        |
| 7                                                                                              | Fonte de calor antropogênica                       | Perdas de calor em edifícios, tráfego e uso de energia.                             | Inserção direta de calor antropogênico |

Fonte: Adaptação de Oke (2002) e Gartland (2008).

Dessa forma, a geometria urbana, as propriedades dos materiais de construção, a escassez de vegetação, a poluição atmosférica e o calor antropogênico constituem um conjunto de fatores que convergem para a formação da ICU. Esse processo ocorre por meio da redução da evaporação e da convecção, paralelamente ao incremento do armazenamento térmico, da radiação líquida e do calor antropogênico (Gartland, 2008). Cada um desses aspectos é detalhado a seguir:

- **Redução da evaporação:** A cobertura vegetal está intrinsecamente ligada aos processos evaporativos. A supressão vegetal em áreas urbanas resulta em taxas evaporativas reduzidas comparativamente às áreas rurais, favorecendo o armazenamento de energia durante o período diurno. Esse montante energético é transferido à atmosfera no período noturno, principalmente por meio de emissões radiativas e, em menor grau, pelo incremento do fluxo convectivo (Gartland, 2008).
- **Redução da convecção:** As cidades tendem a apresentar velocidades de vento até 60% menores que os ambientes rurais, visto que as edificações atuam como quebra-ventos (Landsberg, 1981). A redução da velocidade do vento compromete as trocas convectivas, diminuindo o arrefecimento das superfícies e intensificando o armazenamento de calor (Gartland, 2008).
- **Aumento do armazenamento de calor:** Somada à baixa umidade nos espaços urbanos, as propriedades dos materiais construtivos tendem a exacerbar as ICU. A combinação entre condutividade e capacidade térmica é definida como “difusividade térmica”, parâmetro que indica a facilidade com que o calor penetra em um material. Valores elevados sinalizam que o calor atinge camadas mais profundas e as temperaturas são retidas por intervalos prolongados. Materiais urbanos, como pavimentos e isolamentos, têm maior difusividade térmica do que os materiais encontrados em áreas naturais. Tais características ampliam a capacidade de armazenamento térmico diurno, com liberação lenta durante o período noturno (Gartland, 2008).
- **Aumento da radiação líquida:** A radiação absorvida pelas áreas urbanas é, em geral, superior à das zonas rurais, fenômeno decorrente da baixa refletância dos materiais, das geometrias urbanas restritivas e dos níveis acentuados de poluição atmosférica. A radiação líquida, conforme a equação (2), compreende a radiação solar e atmosférica, bem como a refletida e emitida pelas superfícies. Materiais com baixa emitância, a exemplo do concreto e do aço, possuem reduzida capacidade de irradiar calor, elevando os níveis de radiação líquida no ambiente urbano (Gartland, 2008).

A geometria urbana, especialmente a configuração de vias e edifícios que estruturam os chamados “cânions” urbanos, atua na retenção térmica. O calor irradiado pelas superfícies do solo, de forma difusa, é capturado pelas fachadas

das edificações circundantes, o que restringe sua dissipação para a atmosfera. Esse fator da geometria urbana é chamado de “céu visível” (Gartland, 2008; Oke, 2002).

A poluição atmosférica atenua parte da radiação que atinge as superfícies, especialmente sob a presença de aerossóis. Contudo, ocorre um efeito oposto na atmosfera: enquanto algumas partículas refletem a radiação, outras a absorvem, aumentando a incidência de radiação infravermelha de ondas curtas da atmosfera para a superfície. Os resultados variam conforme os níveis e tipos de poluentes particulados; embora a quantificação diurna seja complexa, à noite, quando a energia do sol não influencia, a poluição eleva os níveis de radiação líquida (Gartland, 2008).

- **Aumento do calor antropogênico:** Resultante das atividades humanas, o calor antropogênico é gerado por fontes como edificações, processos industriais, frota veicular e pelo próprio metabolismo humano. Estudos recentes demonstram um incremento substancial nos ganhos térmicos antropogênicos associados ao consumo energético, impulsionado, sobretudo, pelo uso intensivo de sistemas de climatização (ar-condicionado) durante o verão (Gartland, 2008).

A ICU é um fenômeno complexo, em parte devido a intrincada relação entre o desenvolvimento urbano e à variabilidade das condições climáticas. A multiplicidade de fatores envolvidos em sua formação, não só corrobora sua complexidade, reforça a necessidade de análises sob uma abordagem abrangente e multidisciplinar, que considere a interdependência entre os elementos constituintes do espaço urbano e as condições meteorológicas locais. A identificação das características urbanas que fomentam sua formação é fundamental para orientar ações mitigadoras, assim como subsidiar diretrizes de projeto urbano que considerem as condições climáticas e eventos extremos cada vez mais frequentes.

### 1.2.2 Características das ilhas de calor urbana

As ICU, embora dependentes das propriedades da superfície urbana e de sua interação com as condições climáticas, apresentam comportamentos característicos semelhantes:

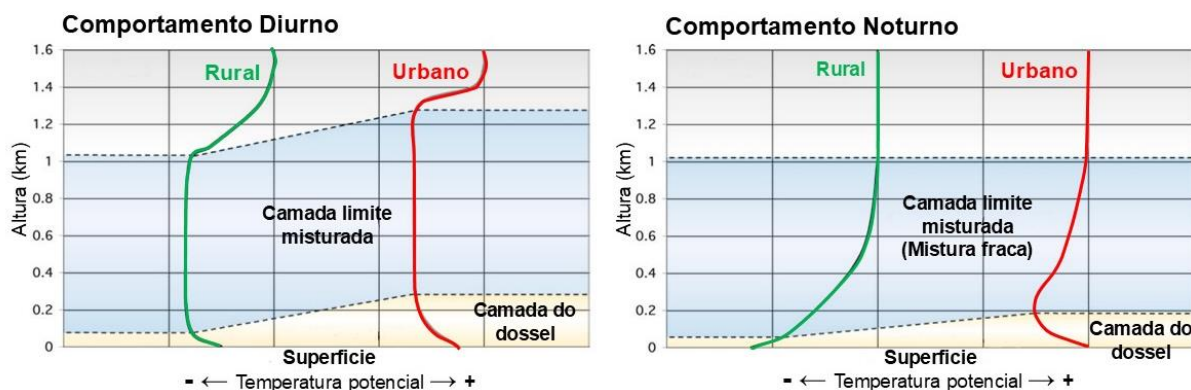
- **Temperaturas de ar mais quentes:** A ICU não é uma condição constante, apresentando flutuações periódicas e aperiódicas. As temperaturas do ar em áreas urbanas tendem a superar as das zonas rurais, com variações de

intensidade entre os períodos diurno e noturno. Pela manhã, o diferencial térmico é geralmente reduzido, intensificando-se ao longo do dia à medida que as superfícies absorvem radiação e, por conseguinte, aquecem o ar adjacente. As ilhas de calor mais intensas são tipicamente observadas durante a noite, quando as superfícies liberam gradualmente o calor armazenado, diminuindo a taxa de resfriamento noturno (Gartland, 2008; Landsberg, 1981).

- **Temperaturas de superfície mais quentes:** A amplitude térmica das superfícies apresenta maior variabilidade diurna em comparação à temperatura do ar. Sob incidência de radiação solar direta, materiais urbanos como pavimentos e coberturas podem registrar temperaturas superficiais entre 27°C e 50°C superiores à temperatura do ar (Berdahl; Bretz, 1997). Esse calor acumulado é dissipado no período noturno até a tendência ao equilíbrio térmico com o ar adjacente. Em contrapartida, superfícies vegetadas mantêm temperaturas próximas ou inferiores à do ar, mesmo sob elevada irradiância, devido à regulação térmica promovida pelo processo de evapotranspiração, condicionado ao estado de hidratação das plantas (Gartland, 2008).
- **Efeitos acentuados durante condições sinóticas baixas:** Sob regimes de fluxo sinótico intensos, caracterizados por ventos de magnitude elevada, nebulosidade acentuada e precipitação, as influências locais são suprimidas em grande parte (Landsberg, 1981), atenuando os gradientes térmicos entre as áreas urbanas e rurais. Céus claros e ventos calmos favorecem a incidência de radiação solar e retardam o resfriamento convectivo das superfícies, entanto pouca humidade no ambiente reduz a taxa de evaporação, intensificando a ICU e facilitando seu estudo (Gartland, 2008; Oke *et al.*, 2017).
- **Aumento atrelado ao desenvolvimento urbano:** O adensamento construtivo está frequentemente associado à supressão de áreas verdes e à verticalização. A expansão de áreas com tais atributos intensifica a magnitude da ICU, estabelecendo uma correlação entre o tamanho da área urbana e o fenômeno. Embora estudos determinaram uma relação proporcional entre a quantidade de população e a intensidade da ICU, as medidas associadas à densidade urbana resultam mais adequadas para descrever o fenômeno (Gartland, 2008; Oke, 2002).

- **Inversão térmica:** A ICU também afeta as temperaturas do ar sobre árvores e edifícios, estendendo-se até 2.000 m acima da superfície, na chamada “camada limite”. Esse processo é regido por dois mecanismos principais: Primeiro, a pressão é menor em altitudes mais elevadas, fazendo com que o ar se expanda e esfrie à medida que sobe, sem perder ou ganhar energia, determinado pela quantidade de umidade no ar. Segundo, durante o dia, o sol aquece as superfícies e, conseqüentemente, aquece o ar. À medida que o ar se aquece, ele se expande e fica mais leve, subindo na atmosfera. Se houver aquecimento suficiente, ocorre uma inversão do ar quente sobre o ar frio em vários níveis da atmosfera, prendendo o ar mais quente e a poluição perto da superfície nas áreas urbanas à noite (Gartland, 2008). A Figura 1 ilustra esse efeito, mostrando o comportamento das temperaturas na camada do dossel urbana e na camada limite durante o dia e a noite.

Figura 1 – Efeito de “inversão térmica” na camada do dossel e camada limite urbana.



Fonte: Elaborado por Oke (1987) *apud* Gartland (2008), tradução nossa.

### 1.2.3 Classificação das ilhas de calor urbanas

As ICU podem ser classificadas segundo sua área de ação e sua intensidade. Essas duas categorias de classificação são detalhadas a seguir:

#### Classificação de acordo a sua intensidade ou magnitude

A despeito da variabilidade espacial entre as temperaturas urbanas e rurais, a diferença entre ambas define a ICU, para a qual se busca uma única medida comparativa. A magnitude ou intensidade ( $\Delta T_{U-R}$ ) da ICU é definida como a diferença entre a temperatura urbana máxima ( $T_U$ ) e uma temperatura representativa da área rural circundante ( $T_R$ ), aplicada a cada tipo de ICU e em um determinado período

(Arya, 2008; Oke *et al.*, 2017). A equação para determinar a intensidade ou magnitude é mostrada a seguir:

$$\text{Intensidade ICU} = \Delta T_{U-R} = T_U - T_R \quad (3)$$

Segundo Garcia (1995), as ICU podem ser categorizadas em quatro tipos, considerando sua magnitude ou intensidade. O quadro 5 apresenta a classificação proposta:

Quadro 5 – Classificação das ICU de acordo a sua intensidade ou magnitude.

| Classificação    | ( $\Delta T_{U-R}$ )   |
|------------------|------------------------|
| Baixa (Frac)     | 0°C - 2°C              |
| Média (Moderada) | 2°C - 4°C              |
| Forte            | 4°C - 6°C              |
| Muito forte      | $\geq 6^\circ\text{C}$ |

Nota: Na presente pesquisa serão adotados os termos “Frac” e “Moderada” para as categorias “Baixa” e “Média”, respectivamente, para evitar confusões com termos de medição.

Fonte: Elaboração com base em Garcia (1995).

### Classificação de acordo a sua área de ação

Embora as ICU apresentem relativa facilidade de mensuração, existem diversas tipologias que respondem a distintas escalas, sendo resultantes de variadas combinações de processos, exigindo diferentes abordagens para quantificar e simular seus efeitos. Por conseguinte, a ICU não pode ser considerada como um fenômeno unitário, sendo fundamental a identificação de seu tipo para a correta interpretação de seu comportamento (Oke *et al.*, 2017).

A seguir, são detalhadas as principais características dos tipos de ICU conforme Oke *et al.* (2017), apresentadas graficamente na Figura 2.

Figura 2 - Classificação das ICU de acordo a sua área de ação.



Fonte: Elaboração própria com base em Oke *et al.* (2017).



- **Ilha de calor urbana subsuperficial:** Refere-se ao gradiente térmico entre o substrato urbano, incluindo o solo e as estruturas subterrâneas construídas, e o solo das áreas rurais circundantes. Sua formação ocorre pela transferência de calor sensível da superfície e das infraestruturas urbanas para o subsolo. O calor armazenado no subsolo representa um acúmulo durante um período de tempo que responde a processos climáticos e antropogênicos em escalas de tempo mensais, décadas e até períodos de tempo mais longos.
- **Ilha de calor urbana de superfície:** Compreende as diferenças de temperatura na interface da atmosfera com os solos urbanos em relação ao contexto rural circundante. A variabilidade geométrica e as propriedades radiativas e térmicas das superfícies produzem padrões espaciais complexos que caracterizam esse tipo de ICU. Sensores aerotransportados ou em plataformas de satélite indicam que sua magnitude é maximizada durante o dia sob céu claro, especialmente em setores com vegetação escassa ou alta densidade de coberturas edificadas.
- **Ilha de calor urbana da camada do dossel:** É definida pela diferença de temperatura do ar contido na camada do dossel entre as áreas urbanas e rurais. Essa camada compreende o espaço entre a camada da superfície urbana e o nível das coberturas das edificações e da vegetação existente. Sua magnitude é acentuada após o pôr do sol, quando o ar urbano resfria a uma taxa inferior à do ambiente rural. O fator de céu visível está inversamente relacionado à taxa de resfriamento noturno, em que edifícios altos e ruas estreitas com pouca vegetação (características associadas aos centros das cidades) retêm o calor sensível e impedem sua liberação na atmosfera. Durante o dia, as ilhas de calor na camada do dossel urbano tendem a ser pequenas e até mesmo negativas.
- **Ilha de calor urbana da camada limite:** Definida como a diferença na temperatura do ar encontrada entre a camada do dossel e a camada limite das áreas urbanas e seus arredores rurais. A camada limite estende-se até 2 Km acima do nível da superfície urbana, sendo utilizadas elevações semelhantes no ambiente rural para fins comparativos. Essa ICU se forma como resultado do aumento do calor sensível da superfície urbana, que promove a mistura na baixa atmosfera durante o dia e a mantém durante a noite, resultando em uma camada limite urbana mais quente do que a camada limite rural. O envelope de calor urbano resultante é frequentemente deslocado pelo vento na forma de uma

“pluma” para além do limite da área urbanizada.

O quadro 6 sintetiza os tipos de ICU de acordo com sua área de ação conforme Roth (2013), detalhando suas escalas, processos subjacentes, comportamento durante o dia e impactos.

Quadro 6 - Classificação dos tipos de ICU, escalas, processos subjacentes, comportamento e impactos prováveis

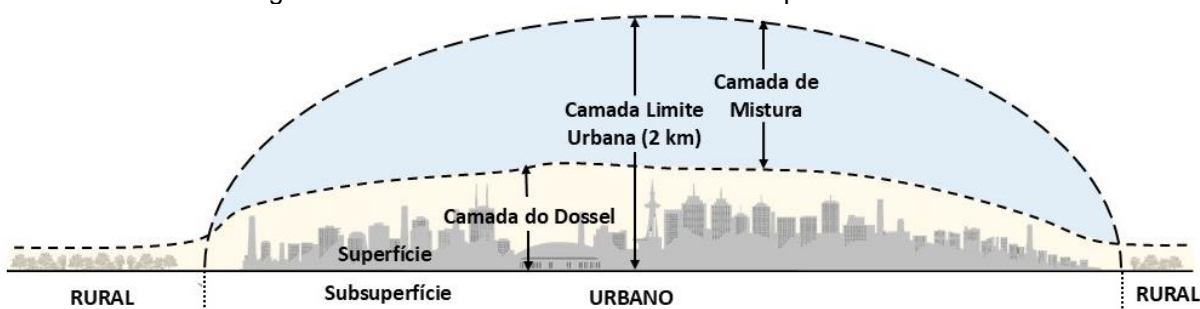
| Tipo de ICU<br>(Escala Espacial)                     | Processos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Tempo e Magnitude                                                                                                                                                                                         | Impactos                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Subsuperficial</b><br>(Micro / 1-100 m)           | Balço de energia na subsuperfície; difusão de calor no solo.                                                                                                                                                                                                                                                                             | Dia/noite: pequena; segue a ICU da superfície.                                                                                                                                                            | Projeto de engenharia para tubulações de água, construção de estradas, <i>permafrost</i> , características da água subterrânea e troca de carbono entre o solo e a atmosfera. |
| <b>Superficial</b><br>(Micro / 1-100 m)              | Dia: balanço de energia da superfície; forte absorção de radiação e aquecimento pela superfície exposta, seca e escura.<br>Noite: balanço de energia da superfície; telhados - grande resfriamento (alto FCV*); facetas do cânion - menor resfriamento (baixo FCV*).                                                                     | Dia: muito grande e positiva.<br><br>Noite: grande e positiva.                                                                                                                                            | Conforto térmico, planejamento e medidas de mitigação, temperatura do escoamento de águas pluviais e saúde dos ecossistemas aquáticos.                                        |
| <b>Camada do Dossel Urbano</b><br>(Local / 1-10 Km)  | Dia: forte fluxo de calor sensível positivo na superfície; convergência do fluxo de calor sensível no cânion.<br>Noite: fluxo de calor sensível frequentemente positivo, sustentado pela liberação de calor do armazenamento no solo e nos edifícios, convergência do fluxo radiativo de ondas longas e calor antropogênico.             | Dia: pequeno, às vezes negativa se o sombreamento for extenso.<br>Noite: grande e positiva, aumenta com o tempo a partir do pôr do sol, com o máximo entre algumas horas após o pôr do sol e a madrugada. | Conforto térmico, uso de energia do edifício, uso de água (irrigação), circulação térmica se os ventos forem fracos, qualidade do ar, ecologia urbana e gelo e neve           |
| <b>Camada Limite Urbana</b><br>(Local-Meso / >10 Km) | Dia: fluxo de calor sensível de baixo para cima através do topo da camada do dossel urbano, arrastamento de calor de cima para baixo na camada limite urbana e divergência do fluxo radiativo devido ao ar poluído<br>Noite: Semelhante ao dia, mas a intensidade dos processos é reduzida. Calor antropogênico sob condições especiais. | Dia/noite: pequena e positiva, diminuindo com a altura na camada limite urbana.                                                                                                                           | Qualidade do ar, poluentes fotoquímicos, circulação local, precipitação e atividade de tempestades a favor do vento e estação de crescimento das plantas                      |

\*FCV: Fator de Céu Visível

Fonte: Reprodução de Roth (2013, p. 146, tradução nossa).

A Figura 3 ilustra as diferentes camadas sobre a atmosfera urbana, evidenciando o comportamento climático em diferentes escalas que determinam o escopo de ação dos tipos de ICU.

Figura 3 – Camadas da atmosfera sobre a superfície urbana.



Fonte: Elaboração própria com base em Oke *et al.* (2017).

Em síntese, a seleção da abordagem para o estudo das diferentes ICU responde a objetivos específicos, com escalas de análise e áreas de conhecimento distintos. No âmbito do planejamento urbano, a investigação das ICU superficiais permite não apenas identificar o comportamento térmico do espaço construído, mas também avaliar a estrutura da superfície urbana que gera o aquecimento. Dessa forma, a compreensão das implicações das propriedades das superfícies no comportamento das temperaturas na camada do dossel urbano, bem como a abordagem em microescala no estudo da ICU superficial, proporciona um entendimento aprofundado dos elementos do ambiente edificado que contribuem para a formação do fenômeno. Esse conhecimento é fundamental para orientar ações projetuais e políticas públicas específicas visando à melhoria das condições ambientais nas cidades.

### **Características das ilhas de calor urbanas superficiais (ICUS)**

Compreendendo a importância das propriedades das superfícies ativas urbanas na determinação das condições climáticas locais, campo de ação principal do arquiteto e urbanista, o presente trabalho enfatiza o seu estudo. A seguir, abordam-se as principais características da ilha de calor urbana superficial (ICUS) sob a perspectiva de Oke *et al.* (2017), uma vez que este é o tipo de ICU analisado neste estudo

#### **Observação**

As ICUS são frequentemente estudadas por meio de sensoriamento remoto, com sensores colocados em aeronaves ou plataformas de satélite, fornecendo uma imagem contínua. Dessa forma, superam-se as dificuldades de uso de sensores *in loco*, capturando-se toda a gama de facetas que compõem o sistema urbano. A altura das observações e o campo de visão controlam a resolução da imagem; além disso, correções de emissividade atmosférica e da superfície são necessárias para obter

uma avaliação quantitativa da variação espacial da temperatura.

A avaliação das ICUS por plataformas de satélite depende do momento da captura da imagem, o que restringe as estimativas de seu comportamento durante o dia e sujeita o estudo a condições atmosféricas que podem não ser ideais.

#### Morfologia espacial sob condições sinóticas baixas

Nas imagens térmicas capturadas por plataformas de satélite, as áreas urbanas geralmente se destacam da paisagem circundante, tanto durante o dia quanto à noite. O calor relativo das superfícies construídas, especialmente quando secas, contrasta com a vegetação e as superfícies de água. À noite, os parques abertos e as áreas com vegetação com altas taxas de “céu visível” são relativamente mais frescas, em contraste com as áreas construídas ao redor. A forte diferenciação de temperatura, consequência da cobertura da copa das árvores, pode ser observada durante o dia, sendo menos evidente à noite.

#### Variação temporal e influência do clima

As estimativas das ICUS, usando plataformas de satélite ou aeronaves, geralmente são feitas sob céu limpo, pois a cobertura de nuvens impede que a radiação de ondas longas da superfície atinja o sensor. As condições de alta umidade reduzem a magnitude da ICUS durante o dia, gerando um efeito inverso à noite ao reduzir o resfriamento noturno. Altas velocidades de vento podem afetar a intensidade das ICUS ao aumentar a troca convectiva, tanto durante o dia quanto à noite. As condições de prévias à captura das imagens também podem atenuar o efeito. Condições de nebulosidade ou precipitação prévias ao dia da captura das imagens reduzem a quantidade de energia absorvida pelas superfícies, e a umidade retida aumenta a evaporação durante o dia, resfriando as superfícies e, portanto, reduzindo a magnitude da ICUS.

#### 1.2.4 Principais consequências das Ilhas de Calor Urbanas

O aumento da temperatura nos espaços urbanos associado às ICU produz consequências que afetam os habitantes tanto diretamente, ao impactar a saúde e o conforto térmico, quanto indiretamente, ao modificar as condições ambientais e de vida. As principais consequências desse fenômeno urbano são destacadas a seguir:

- **Aumento no consumo de energia:** O uso de sistemas de condicionamento de ar para mitigar a elevação das temperaturas eleva o consumo energético.

Adicionalmente, tais equipamentos liberam calor para o exterior, injetando calor antropogênico diretamente no sistema urbano e intensificando as temperaturas locais (Landsberg, 1981). Um estudo realizado em seis cidades dos Estados Unidos constatou um aumento no pico de demanda de energia entre 2% e 4% para cada elevação de 1°C na temperatura máxima diária, na faixa de 15 °C a 20 °C (Akbari, 1992). Em escala nacional, estimou-se que o uso de ar-condicionado em áreas urbanas responde por 5% a 10% da demanda de pico de eletricidade para compensar aumentos de 0,5°C a 3°C nas temperaturas (Akbari; Pomerantz; Taha, 2001).

- **Redução da velocidade dos ventos:** A alteração na rugosidade da superfície e a ICU exercem efeito perceptível no vento de baixa altura. A ICU gera uma taxa de lapso de temperatura vertical instável, induzindo uma corrente ascendente. Essa convergência de baixa altura do fluxo de ar reduz a velocidade do vento durante o dia. À noite, a ICU produz um efeito análogo ao de uma “frente fria”, em que as temperaturas variam abruptamente em distâncias curtas, gerando pulsos de ar mais frio proveniente do ambiente rural, que consiste em rajadas de vento irregulares (Landsberg, 1981).
- **Efeitos adversos à saúde:** Diversos estudos demonstram a associação entre o aumento da mortalidade e morbidade urbana e a elevação das temperaturas, especialmente no verão (Landsberg, 1981). Um estudo em Montreal, Canadá, identificou um risco maior de morte em verões quentes em áreas da cidade com temperaturas de superfície mais altas, revelando estreita relação com a distribuição espacial de micro ilhas de calor urbanas, com um efeito acentuado sobre a população idosa (Smargiassi *et al.*, 2009). Um estudo realizado em cidades europeias constatou um aumento na mortalidade durante ondas de calor, sendo três vezes maior durante episódios de maior duração e intensidade. Impacto severos foram observados em pessoas com problemas respiratórios e mulheres entre 75 e 84 anos (D'Ippoliti *et al.*, 2010).
- **Desconforto e problemas comportamentais:** O estresse térmico depende de múltiplas variáveis ambientais e individuais, como taxa metabólica, capacidade de transpiração, peso, idade e vestimenta. Temperatura e umidade elevada dificultam a dissipação do calor metabólico, causando desconforto, irritabilidade e alterações comportamentais, especialmente em condições extremas

(Landsberg, 1981).

- **Redução do transporte ativo:** O desconforto térmico limita a capacidade de caminhar e participar de atividades ao ar livre e, conseqüentemente, diminui o transporte ativo dentro da cidade. A redução da capacidade de transporte ativo e de caminhada na cidade leva a um aumento no uso de transporte público e privado motorizado, aumentando a emissão de poluentes. Em Miami, Estados Unidos, determinou-se uma distância confortável de caminhada de apenas 240 m (3 minutos) em condições simuladas de verão, identificando dificuldades em atividades ao ar livre nessas condições (DeVeau, 2011). Outro estudo realizado em Montreal, Canadá, constatou que o aumento da ciclagem cessa quando a temperatura do ar atinge 28°C (Nosal, 2010 *apud* Deveau, 2011).
- **Aumento da poluição atmosférica:** O incremento na geração de eletricidade por usinas termelétricas, decorrente do uso intensivo de ar-condicionado, amplia as emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e partículas em suspensão, bem como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), este último, um GEE que contribui para o aquecimento global e as mudanças climáticas (Adinna; Enete; Okolie, 2009).
- **Aumento da precipitação nas áreas urbanas:** Três aspectos da condição urbana contribuem para o aumento da precipitação: a ICU, o efeito de obstáculo da geometria urbana e, em menor escala, a poluição do ar. movimento vertical ascendente promovido pela ICU favorece a formação de precipitação sobre as cidades; tal fator, somado à rugosidade urbana, retarda o avanço de sistemas meteorológicos, aumentando o tempo de permanência das chuvas sobre o espaço urbano (Landsberg, 1981).

Outras conseqüências negativas incluem o aumento da demanda por água, especialmente para irrigação (Roth, 2013), e a degradação da qualidade hídrica devido ao aquecimento da água pluvial, ao entrar em contato com superfícies aquecidas antes de atingir corpos hídricos naturais (Bhargava A; Lakmini; Bhargava S, 2017).

As propriedades das superfícies ativas, em forma e função, estruturam-se de modo heterogêneo no espaço urbano, distribuindo as conseqüências das ICU de forma desigual. Tais impactos variam em intensidade e duração na microescala e, ao interagirem com as vulnerabilidades socioeconômicas, geram diferentes graus de

impacto. Dada a interdependência entre os fatores geradores e as consequências produzidas, torna-se essencial o estudo de suas correlações para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes.

### **1.2.5 Estratégias de mitigação das Ilhas de Calor Urbanas**

As intervenções e aplicações voltadas à mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbanas variam conforme a escala, podendo incidir sobre a forma ou a função da cidade, e devem considerar as condições climáticas locais. Como ponto de partida para a seleção das estratégias, é fundamental identificar os tipos de ICU e suas especificidades, as principais causas associadas à sua gênese e sua correlação com a geometria urbana (Roth, 2013).

As alterações são, geralmente, limitadas pela morfologia urbana preexistente, o que direciona os esforços para a modificação das propriedades radiativas e evaporativas das superfícies. Em regiões de baixa latitude, os elevados ângulos zenitais solares intensificam a radiação recebida; nesse contexto, pavimentos e coberturas constituem as superfícies termicamente mais ativas da geometria urbana, apresentando os maiores índices de absorção e condução de energia. Nestes casos, o emprego de materiais com alto albedo pode moderar a transferência de calor por condução (Roth, 2013).

Para mitigar as ICU, torna-se necessário reverter os processos que promovem sua formação, mediante as seguintes diretrizes:

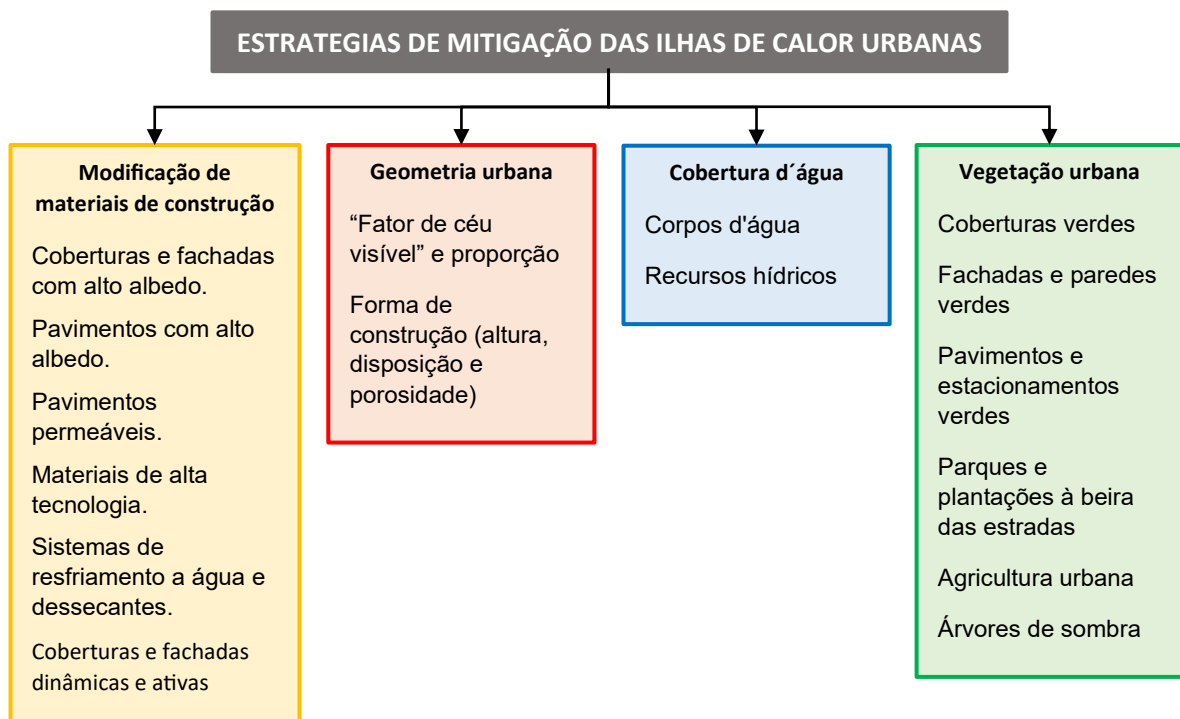
1. Aumento da evapotranspiração
2. Aumento do albedo<sup>2</sup> das superfícies urbanas
3. Redução das concentrações de GEE e poluentes atmosféricos.
4. Otimização da circulação do vento no ambiente urbano

Diversos autores discutem estratégias de mitigação das ICU, propondo variadas formas de classificação (Akbari, 1992; Akbari; Pomerantz; Taha, 2001; Gartland, 2008; Roth, 2013). Os autores Sultana e Satyanarayana (2022) propuseram uma classificação baseada no foco de ação da estratégia (Figura 4).

---

<sup>2</sup> Relação entre a quantidade de radiação de ondas curtas refletida por uma superfície (refletância) e a quantidade que atinge essa superfície (irradiância) (Oke *et al.*, 2017). Um albedo mais alto implica maior radiação de onda curta refletida.

Figura 4 - Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas.



Fonte: Elaboração própria com base em Sultana e Satyanarayana (2022).

### Modificação de materiais de construção

A alteração dos materiais de construção em edifícios e pavimentos, especialmente naqueles com maior exposição à radiação solar, é um recurso eficaz aplicável a diversos elementos da urbanização. Entre as estratégias que utilizam este recurso, destacam-se:

- Coberturas e fachadas com alto albedo (coberturas e fachadas frescas<sup>3</sup>).
- Pavimentos com alto albedo (pavimentos frescos<sup>4</sup>).
- Pavimentos permeáveis.
- Materiais de alta tecnologia.
- Sistemas de resfriamento por água e dessecantes<sup>5</sup>.
- Coberturas e fachadas dinâmicas e ativas.

Materiais com alto albedo refletem a maior parte da radiação incidente e absorvem pouco calor, o que resulta em menor armazenamento térmico e, consequentemente, em temperaturas superficiais mais baixas (Sultana; Satyanarayana, 2022). Enquanto materiais de cobertura tradicionais refletem entre 5%

<sup>3</sup> Termos *cool roofs* e *cool facades* traduzidos ao português.

<sup>4</sup> Termo *cool pavements* traduzido ao português.

<sup>5</sup> Equipamentos utilizados para diminuir a umidade relativa do ar, a fim de melhorar o conforto térmico.



e 25% da radiação (telhas asfálticas escuras refletem apenas 5%), a aplicação de revestimentos brancos pode elevar essa refletividade a até 75% (Berdahl; Bretz, 1997).

Para maximizar a eficácia, as coberturas “frias” devem apresentar duas propriedades fundamentais: alto albedo (alta refletância) e alta emitância (porcentagem de energia que um material pode irradiar). Enquanto telhados convencionais podem atingir temperaturas de 50 °C a 90 °C acima da temperatura do ar, as coberturas frescas situam-se entre 40 °C e 60 °C. O uso de coberturas frescas promove o conforto térmico nos edifícios, reduz a utilização de equipamentos de ar condicionado, os custos de manutenção dos telhados prolongando sua durabilidade, a demanda de pico de eletricidade, a poluição atmosférica e as ICU (Gartland, 2008).

No caso das fachadas, o uso de cores claras ou materiais que absorvam menos e reflitam mais a radiação solar, reduz a temperatura da envolvente e do ar adjacente, refletindo adicionalmente a radiação dos pavimentos e superfícies circundantes. A combinação de telhados com alto albedo e fachadas frescas aumenta significativamente o resfriamento interno (Sultana; Satyanarayana, 2022).

A combinação de maior refletância e permeabilidade nos materiais usados em pavimentos, incrementa a reflexão de energia e a capacidade de armazenar e evaporar água, reduzindo as temperaturas. Pavimentos com refletância média de 25% podem ser considerados frescos. Diferente dos telhados, pavimentos não devem ser excessivamente brilhantes para evitar o ofuscamento; por isso, tons de cinza e marrom claro são geralmente utilizados. Para aumentar a permeabilidade, os pavimentos frescos tendem a ser mais porosos, permitindo a passagem de água para as camadas inferiores do solo, que evapora a água armazenada durante o dia, mantendo o pavimento fresco (Gartland, 2008). Enquanto os pavimentos escuros (com refletância inferior a 25%) e impermeáveis podem atingir 65°C durante o verão, os pavimentos frescos ficam em 50°C, reduzindo 15°C ou mais (Asaeda; Ca; Wake, 1996; Pomerantz *et al.*, 2000).

A utilização de pavimentos frescos contribui na redução das temperaturas urbanas, melhora o escoamento da água, aumenta a durabilidade dos pavimentos, melhora a visibilidade noturna, reduz o consumo de energia para a iluminação pública, reduz o ruído das estradas e proporciona maior flexibilidade estética para o desenho urbano (Gartland, 2008).

As novas tecnologias introduziram materiais que permitem um comportamento ativo em resposta à radiação recebida. Os materiais retro-refletivos têm alto albedo e podem refletir grande parte da radiação recebida; os materiais de mudança de fase armazenam e liberam o calor armazenado durante as mudanças de fase, estabilizando as temperaturas internas; e os materiais termo-crômicos, baseados em nanotecnologia, variam sua cor de acordo com as temperaturas, regulando os valores de refletância (Sultana; Satyanarayana, 2022).

Os sistemas de resfriamento por água e dessecantes utilizam a evaporação e o resfriamento latente para regular a umidade do ambiente, sendo aplicáveis tanto em espaços internos quanto externos. As fachadas e os telhados ativos alteram dinamicamente sua configuração em resposta às condições climáticas, especialmente durante períodos de radiação solar intensa. Devido ao seu caráter dinâmico, seu uso mostra-se mais eficaz em climas temperados, nos quais a variabilidade das condições é maior (Sultana; Satyanarayana, 2022).

### **Geometria urbana**

Conforme indicado anteriormente, a geometria urbana desempenha um papel fundamental na redução da velocidade do vento, na redução do “fator de céu visível” e no aumento das superfícies ativas, gerando condições que promovem as ICU (Oke, 2002). Entre as estratégias aplicadas à forma urbana, destacam-se:

- “Fator de céu visível” e proporção
- Forma da edificação (altura, disposição e porosidade)

O fator de céu visível e a proporção entre a altura média dos edifícios e a largura do “cânion” urbano, a qual controla a quantidade de radiação incidente e refletida. Baixos fatores de céu visível e altas proporções (“cânions” urbanos estreitos e edifícios altos) aumentam o sombreamento dos edifícios, retêm a radiação emitida pelas fachadas, resultando em períodos mais frescos durante o dia e mais quentes à noite. Por outro lado, com altos fatores de céu visível e baixa proporção (prédios baixos e “cânions” urbanos largos), o aquecimento diurno e a ventilação eólica aumentam. Portanto, a relação entre o fator de céu visível e a proporção deve ser equilibrada para maximizar os benefícios térmicos (Sultana; Satyanarayana, 2022).

A forma dos edifícios e sua disposição influenciam a circulação do vento e o efeito de sombreamento. Edificações compactas de mesma altura podem bloquear o fluxo de ar, gerando desconforto térmico nos cânions urbanos. Uma disposição

adequada, aliada à vegetação urbana, pode minimizar a radiação direta e ampliar o sombreamento das fachadas, garantindo maior conforto térmico em ambientes internos e externos. Edificações com alturas escalonadas orientadas a favor do vento podem otimizar a circulação do ar e reduzir as temperaturas. Além disso, a inclusão de aberturas verticais ou horizontais aumenta a permeabilidade das construções, permitindo a passagem do vento e atenuando o efeito de obstrução (Sultana; Satyanarayana, 2022). Segundo Cheng *et al.* (2006), o layout disperso de edifícios com diferentes alturas e amplos espaços abertos favorece o desempenho solar.

### **Cobertura de água**

Nos espaços urbanos, as superfícies de água para o aumento da umidade por meio de processos evaporativos, promovendo a circulação do vento. Expressivas taxas de evaporação e altas velocidades de vento, aliadas à elevada capacidade de absorção térmica da água, contribuem para a redução das temperaturas urbanas. Como estratégia de mitigação, as coberturas de água podem ser agrupadas em duas categorias: corpos d'água, que consistem em grandes áreas naturais, como rios, lagos ou zonas úmidas; e recursos hídricos, que consistem em elementos artificiais que utilizam a água para proporcionar conforto térmico (Ruefenacht; Acero, 2017).

Rios, lagos e áreas úmidas atuam como sumidouros de calor naturais, cujo efeito de resfriamento depende da dimensão e distribuição desses corpos. Superfícies maiores, como grandes lagos, possuem potencial de resfriamento superior a corpos menores. Contudo, um conjunto de lagos menores com a mesma distribuição pode alcançar resultados significativos (Theeuwes; Solcerová; Steeneveld, 2013).

Lagoas artificiais, nebulizadores de água e fontes artificiais são elementos construídos que, distribuídos no espaço urbano, criam efeitos de resfriamento em várias escalas, maximizando a absorção de calor e reduzindo as temperaturas via evaporação (Sultana; Satyanarayana, 2022).

A aplicação de corpos d'água como estratégia de mitigação deve considerar as condições climáticas locais. O resfriamento baseia-se na evaporação, que eleva a umidade relativa do ar, podendo gerar desconforto térmico em climas já úmidos. Ademais, a alta inércia térmica da água pode dificultar o resfriamento noturno, estabilizando diferenciais de temperatura, o que diminui a velocidade do vento e contribui para temperaturas noturnas mais elevadas (Sultana; Satyanarayana, 2022).

## Vegetação urbana

A vegetação provou ser uma ferramenta versátil para mitigar o ambiente térmico local (Roth, 2013), recebendo atenção crescente de planejadores urbanos e gestores públicos como estratégia para superar o aumento das temperaturas nas áreas urbanas (Balany *et al.*, 2020).

Árvores e massas vegetais reduzem as ICU por meio do sombreamento e da evapotranspiração. A copa das árvores sombreia edifícios, pavimentos e pedestres, impedindo que a radiação atinja as superfícies; enquanto a evapotranspiração, parte do processo de fotossíntese, evapora a água absorvida pelas plantas e solos, reduzindo a temperatura do ar. Adicionalmente, o processo de fotossíntese absorve dióxido de carbono (CO<sup>2</sup>), removendo poluentes atmosféricos (Gartland, 2008).

A vegetação pode ser usada em diferentes elementos e situações no contexto urbano, gerando uma ampla gama de possibilidades e aplicações. Entre as aplicações mais comumente, destacam-se:

- Coberturas verdes
- Fachadas e paredes verdes
- Pavimentos e estacionamentos verdes
- Parques e plantações à beira das estradas
- Agricultura urbana
- Árvores de sombra

Uma cobertura verde é essencialmente um jardim cultivado no telhado, variando de sistemas extensivos (gramados simples) a intensivos (parques acessíveis com árvores). Os telhados verdes podem ser usados em todos os tipos de edifícios, sendo importante considerar o peso adicional desses tipos de coberturas ao instalá-los, bem como os requisitos de irrigação. Os sistemas extensivos podem ter um peso médio entre 25 e 150kg/m<sup>2</sup>, sem levar em conta o peso da água absorvida, com uma espessura mínima de 10cm, enquanto os sistemas intensivos podem atingir um peso de 100 a 200kg/m<sup>2</sup>, a partir de uma espessura de 25cm (Gartland, 2008). Superfícies de coberturas verdes mantêm-se entre 15 °C e 45 °C mais frias que as convencionais, reduzindo a temperatura do ar circundante entre 2 °C a 5 °C (Sultana; Satyanarayana, 2022). Por meio de um modelo climatológico, em Toronto, Canadá, foi possível prever uma redução de 2,8°C nas temperaturas do ar na camada limite urbana ao substituir 10% das coberturas tradicionais por verdes (Bass *et al.*, 2002).

As fachadas verdes consistem na instalação de canteiros de flores ou plantadores nas superfícies verticais dos edifícios, que podem ser aplicados tanto em ambientes internos quanto externos. A vegetação da fachada protege as superfícies da radiação solar direta, reduz a temperatura do ar por meio da evapotranspiração, filtra os poluentes e reduz as concentrações de GEE. No verão, mitigam o ganho térmico solar; no inverno, atuam como barreira contra o vento, reduzindo a perda de calor em climas temperados. Além disso, a vegetação perene protege os edifícios de chuvas fortes e mantém as fachadas secas (Sultana; Satyanarayana, 2022).

A substituição de superfícies pavimentadas impermeáveis em estacionamentos e calçadas por grama, concreto permeável ou outros materiais porosos que permitam a passagem da água aumenta as taxas de evaporação e reduz o armazenamento de calor nas superfícies. O plantio de vegetação e árvores nas margens das estradas e ao redor delas proporciona o sombreamento de ruas e calçadas, bem como a absorção de GEE, material particulado e poluentes atmosféricos provenientes do transporte e da indústria. A agricultura urbana não só proporciona os benefícios inerentes à incorporação de vegetação em espaços urbanos, como também fornece alimentos à comunidade local e reduz as emissões de GEE e poluentes atmosféricos ao diminuir as distâncias no transporte dos produtos (Sultana; Satyanarayana, 2022).

As folhas e os galhos das árvores sombreiam as superfícies abaixo delas, reduzindo a quantidade de radiação solar recebida. Quanto mais baixas forem as temperaturas da superfície, menos calor será transmitido ao ar circundante, mitigando o efeito de ICU (Gartland, 2008).

Uma distinção climática importante entre as espécies, que condiciona sua capacidade de sombreamento ao longo do ano, refere-se ao caráter decíduo (sazonal) ou perene (Oke *et al.*, 2017). A quantidade de radiação que atravessa a copa varia de acordo com a espécie; no entanto, em geral, durante o verão, o intervalo é de 6% a 30%, enquanto no inverno é de 10% a 80% (Huang; Akbari; Taha, 1990). As árvores plantadas ao redor dos edifícios reduzem as temperaturas das paredes sombreadas em 5°C a 20°C em relação a aquelas não sombreadas (Meier, 1990).

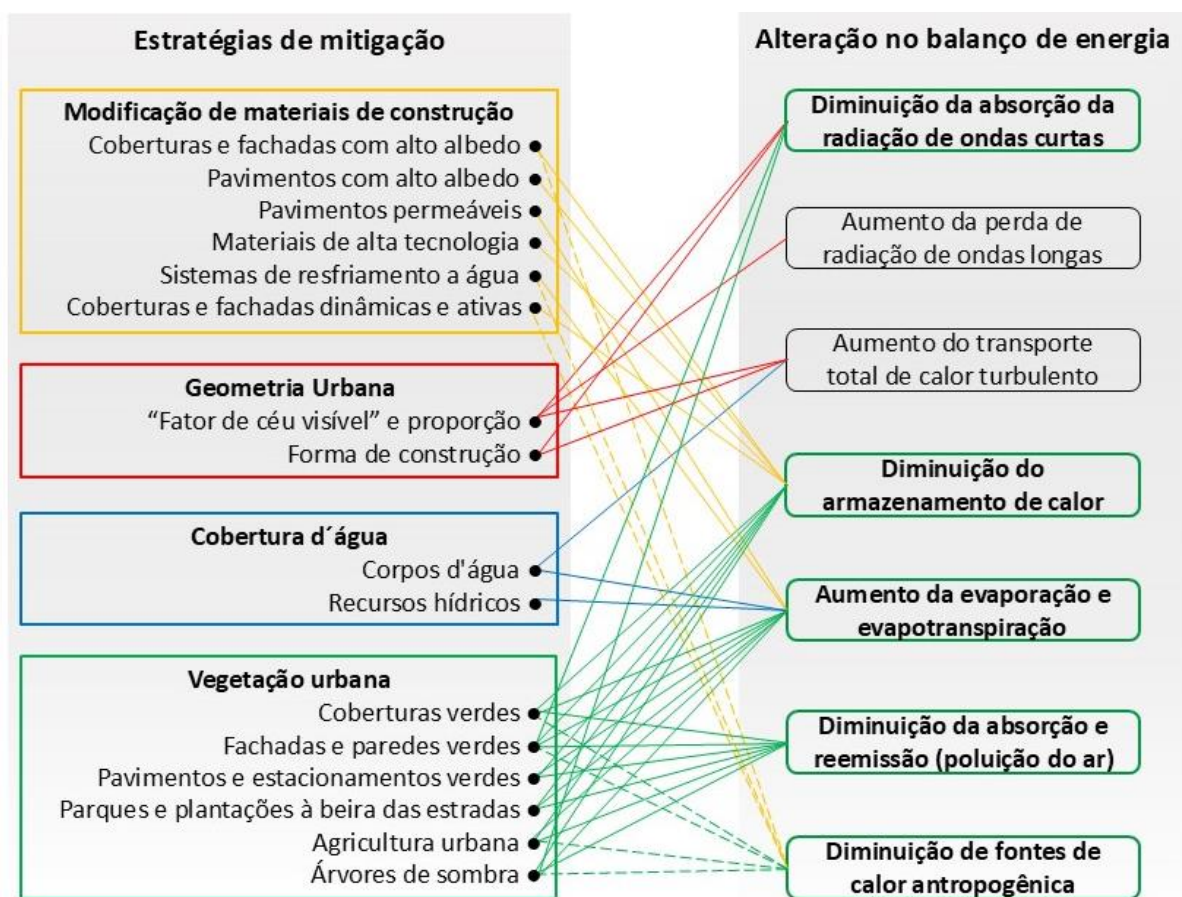
O sombreamento por árvores e outras formas de vegetação, especialmente em áreas de intenso tráfego de pedestres, traz benefícios diretos à saúde dos residentes, ao reduzir a exposição aos raios UV em cerca da metade, diminuindo a incidência de patologias da pele associadas à alta exposição à radiação solar (Grant; Heisler; Gao,

2002).

A vegetação pode controlar a troca de radiação, o fluxo de ar, a dispersão de poluentes atmosféricos, a evaporação, a temperatura, a erosão, o escoamento superficial e os níveis de ruído (Oke *et al.*, 2017), reduzindo várias das causas que promovem a formação de ICU e atenuando seus efeitos climáticos adversos. Diversos benefícios são obtidos com o uso da vegetação em espaços urbanos: melhoria da qualidade da água, redução do escoamento de águas pluviais, diminuição do consumo de energia, redução de poluentes e GEE, redução de ruídos, proteção UV, menor necessidade de manutenção de pavimentos e melhorias no ecossistema (Gartland, 2008).

A Figura 5 ilustra em síntese a influência das estratégias de mitigação descritas anteriormente sobre os processos do balanço energético urbano que originam as ICU. O uso da vegetação destaca-se frente às demais, ao incidir em cinco dos sete processos identificados na formação do fenómeno.

Figura 5 - Influência das estratégias de mitigação das ICU sob o balanço de energia urbano



Fonte: Elaboração própria com base em Sultana e Satyanarayana (2022), Oke *et al.* (2017) e Gartland (2008).

Para a implementação eficaz de estratégias voltadas à redução das temperaturas nas cidades, é necessário abordar a diversidade de elementos que contribuem para a formação do fenômeno, em conformidade com as propriedades do ambiente construído e do clima local. A vegetação provou ser uma ferramenta flexível e adaptável a diferentes condições climáticas e contextos urbanos, respondendo à maioria dos elementos que contribuem para a gênese do fenômeno. Sua eficácia na mitigação das causas e dos efeitos das ICU não é surpreendente, pois a principal diferença entre as superfícies ativas de ambientes urbanos e rurais é a presença de vegetação, elemento que define a natureza do fenômeno.

### 1.2.6 Técnicas de medição das Ilhas de Calor Urbanas

Cada tipo de ICU possui características temporais e dinâmicas espaciais distintas, o que torna complexa a metodologia de estudo. Cada uma delas é causada por uma combinação de diferentes processos e responde a diferentes escalas, exigindo sistemas específicos para medi-las e modelos para simulá-las (Oke *et al.*, 2017).

Enquanto as técnicas de medição permitem avaliar os efeitos do fenômeno em um determinado momento e local, explorando sua distribuição espacial e condições de formação, a modelagem auxilia na compreensão do funcionamento do fenômeno, bem como na avaliação da eficácia de estratégias de mitigação em um ambiente simulado (Gartland, 2008).

O Quadro 7 apresenta diferentes técnicas de medição e modelagem das ICU, segundo Gartland (2008). A seção a seguir concentra-se nas técnicas de medição, dado que o foco da pesquisa recai sobre a medição do fenômeno em uma determinada área de estudo.

Quadro 7 – Técnicas de medição e modelagem das ilhas de calor urbanas.

| <b>Técnicas de medição</b>                                                                                                                                                                       | <b>Técnicas de modelagem</b>                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estações fixas</li> <li>• Transectos móveis</li> <li>• Balanços de energia</li> <li>• Sensoriamento vertical</li> <li>• Sensoriamento Remoto</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelos de energia para edifícios</li> <li>• Calculadoras de energia para coberturas</li> <li>• Modelos de conforto e <i>canyon</i></li> <li>• Modelos de ecossistema</li> <li>• Modelos regionais</li> </ul> |

Fonte: Elaboração com base em (Gartland, 2008).

Os pontos fortes e as limitações de cada técnica de medição, bem como o tipo de análise, variam de acordo com as fontes de informação utilizadas. Como diferentes

técnicas medem distintos elementos que compõem o clima urbano, a metodologia selecionada deve permitir a coleta dos dados necessários para analisar as variáveis em estudo.

### **Estações fixas**

A maneira mais simples e comum de medir as ICU é por meio de duas ou mais estações meteorológicas fixas. Tais estações fornecem informações sobre temperatura, velocidade do vento, cobertura de nuvens, umidade e precipitação em diferentes escalas temporais, como horas, dias, meses e anos (Gartland, 2008).

As estações meteorológicas fixas são normalmente utilizadas de três formas: comparando dados entre uma estação rural e uma urbana; analisando dados de múltiplas estações para medir o impacto regional bidimensional; e utilizando dados históricos para avaliar as ICU conforme a região se desenvolve. Uma vantagem em relação a outras formas de medição é a obtenção de dados consistentes ao longo do dia, o que possibilita a avaliação da evolução das ICU em diferentes escalas de tempo (Gartland, 2008).

A localização exata do instrumento (horizontal e vertical) determina a exposição e a escala dos efeitos climáticos detectáveis (Oke *et al.*, 2017). As características das superfícies e da atmosfera ao redor do ponto de medição determinam o comportamento da temperatura; portanto, o local e a exposição devem ser criteriosamente escolhidos para obter observações significativas (Roth, 2013). Ao utilizar um par de estações para avaliar as ICU, é necessário que cada unidade represente as condições médias de seu respectivo espaço: enquanto a estação urbana deve ser representativa das práticas construtivas da cidade, a estação rural deve representar o ambiente natural prévio ao desenvolvimento humano (Gartland, 2008). De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2023), ao considerar os impactos locais e de microescala que sempre ocorrem, não existe um único local capaz de representar toda a área urbana. Adicionalmente, o uso de uma única estação pode não captar o ponto de maior intensidade da ICU da área urbana em estudo (Roth, 2013).

Avanços recentes na miniaturização de sensores e na transmissão de dados permitiram o emprego de redes de sensores, proporcionando melhor resolução espacial no estudo das temperaturas urbanas (Roth, 2013). Estudos que utilizam redes de estações permitem a geração de mapas de contorno bidimensionais das



temperaturas da cidade. Caso a região não disponha de estações suficientes, unidades provisórias podem ser incorporadas para preencher lacunas espaciais (Gartland, 2008). Embora úteis para a visualização da distribuição espacial, as interpolações de dados de temperatura do ar necessárias para gerar mapas contínuos nem sempre consideram as características dos alvos superficiais e da altimetria, o que pode limitar a análise de áreas específicas (Amorim; Dubreuil; Cardoso, 2015).

As estações fixas geralmente são instaladas em torres ou coberturas de edifícios, capturando dados que não refletem as condições vivenciadas pelos pedestres. A altura ideal para a medição da temperatura do ar é de 1,5 m acima do solo, dentro da “camada de dossel urbano”, localizada entre a superfície e o topo dos edifícios e árvores. Portanto, é fundamental identificar a localização precisa da estação e as condições de seu entorno (Gartland, 2008).

O uso de estações fixas também é empregado para o estudo da ICU na camada limite urbana; no entanto, menos estudos se concentraram nesse tipo de ICU. Por meio de sensores em torres altas, balões (cativos ou de voo livre), aeronaves e métodos de sensoriamento remoto, determinam-se as temperaturas dentro da camada limite. Os estudos focam, geralmente, na delimitação da “pegada” da ICU, que se expande com a altura, e na possibilidade de advecção de ar em larga escala (Roth, 2013).

### **Transectos móveis**

O uso de transectos móveis envolve percorrer uma rota predeterminada, realizando leituras em pontos representativos com um conjunto de instrumentos meteorológicos. Essa técnica pode ser aplicada em qualquer período do dia (Gartland, 2008).

Em comparação às estações fixas, os transectos fornecem uma amostra mais abrangente da diversidade morfológica e dos usos do solo urbano (Roth, 2013), especialmente em locais com escassez de medições ou onde se esperam gradientes espaciais acentuados (Oke *et al.*, 2017). Assim, podem complementar dados de estações fixas ou auxiliar na escolha de novos locais de monitoramento (Oke *et al.*, 2017).

Esta técnica possui limitações. O uso de um único equipamento impede a medição simultânea em diferentes locais, embora evite discrepâncias entre instrumentos. O uso simultâneo de múltiplos equipamentos amplia a cobertura e a

resolução espacial, mas eleva os custos. O tempo é uma restrição crítica: o desenho da rota deve limitar o deslocamento a aproximadamente uma hora, pois variações climáticas temporais podem gerar incertezas superiores às diferenças espaciais de temperatura. Além disso, o tráfego influencia diretamente o tempo de viagem (Gartland, 2008; WMO, 2023).

Estabelecer um ponto inicial e final comum é essencial para estimar uma taxa linear de variação térmica durante a travessia. Se a velocidade for aproximadamente constante e a taxa de variação térmica com o tempo for linear, a medição dos pontos de saída e entrada permite uma correção simples e precisa (WMO, 2023). Outra estratégia é o método “*stop and go*”, que consiste em parar em pontos fixos para coletar dados antes de ir para outro local. Para interpretar os resultados, é necessário conhecer a localização da plataforma no momento da medição, onde instrumentos económicos de Sistema de Posicionamento Global (GPS) podem ser incluídos para essa finalidade (Oke *et al.*, 2017).

Outras correções devem ser feitas antes de usar os dados. O efeito causado pelas diferenças de elevação pode ser corrigido por uma estimativa de primeira ordem, aplicando uma taxa média de lapso ambiental ( $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 100 m de altura) aos pontos ao longo da rota; sendo necessário registrar alturas de referência ao longo da rota ou nos pontos de medição. Essa correção não leva em conta os efeitos da advecção em microescala, como a drenagem de ar frio (Oke *et al.*, 2017).

Ao fazer medições, os instrumentos devem ser isolados de fontes de calor e o equipamento deve ter tempo suficiente para atingir o equilíbrio com as condições ambientais (Gartland, 2008). Quando as medições são feitas usando um veículo, os sensores devem ser de resposta rápida, o suficiente para registrar as alterações causadas pelas variações espaciais durante a viagem. Na prática, considerando uma velocidade moderada de 36 km/h, um veículo percorre uma distância de 10 m/s, e poucos sensores de temperatura podem registrar diferenças de temperatura em distâncias dessa ordem de magnitude (WMO, 2023). Além disso, as medições em vias públicas podem sofrer interferência do calor dos motores, do pavimento e da turbulência do tráfego (Gartland, 2008).

Cada plataforma móvel está limitada, em termos de localização, às áreas acessíveis; portanto, muitos locais não poderão ser monitorados, como espaços de propriedade privada ou sem estradas (caso de veículos terrestres) (WMO, 2023).

Esses instrumentos, instalados em aeronaves tripuladas ou não tripuladas, oferecem uma maneira atraente, porém geralmente onerosa, de obter dados meteorológicos na camada limite urbana. As aeronaves podem realizar travessias horizontais e verticais pela atmosfera, coletando dados que podem ser utilizados para reconstruir o comportamento tridimensional das condições e dos processos dentro da camada limite urbana. Na prática, os custos e as normas de operações aéreas limitam as trajetórias, resultando em rotas lineares em diferentes altitudes ou configurações verticais em locais específicos (Oke *et al.*, 2017).

### Balancos de energia

O estudo das ICU por meio da medição do fluxo de energia das superfícies permite uma melhor compreensão das causas do fenômeno, baseado na equação do balanço de energia abordada no capítulo anterior (Gartland, 2008).

$$\text{Convecção} + \text{Evaporação} + \text{Armazenamento de calor} = \text{Calor antropogênico} + \text{Radiação líquida} \quad (1)$$

A convecção, a evaporação e o armazenamento de energia são medidos com os seguintes equipamentos (Gartland, 2008):

- Convecção, usando um anemômetro sônico e termopares de fio fino para medir a velocidade do vento e as flutuações de temperatura (calor sensível).
- Evaporação, usando um anemômetro sônico e um higrômetro para medir a velocidade do vento e a umidade (calor latente).
- Armazenamento de calor, usando um medidor de fluxo de calor.

A radiação líquida é calculada como:

$$\text{Radiação líquida} = \text{Solar recebida} - \text{Solar refletida} + \text{Radiação atmosférica} - \text{Radiação de superfície} \quad (2)$$

Utilizando instrumentação sofisticada, são feitas medições do fluxo de entrada e saída de energia nas superfícies (Gartland, 2008):

- Radiação solar recebida (ondas curtas) usando um piranômetro ou albedômetro.
- Radiação solar refletida (ondas curtas) usando um piranômetro ou albedômetro.
- Radiação atmosférica (onda longa) usando um radiômetro.
- Radiação da superfície (onda longa) usando um pirgeômetro.

Como alternativa, a radiação líquida pode ser determinada com um radiômetro

líquido, que combina piranômetros e pirgeômetros orientados para cima e para baixo.

Além dos cálculos de energia, os dados meteorológicos locais sobre a temperatura do ar, a umidade relativa e a velocidade do vento são empregados para fazer comparações entre diferentes locais e horários. Esta metodologia geralmente desconsidera o calor antropogênico direto da superfície por ser, em muitos casos, de baixa magnitude comparativa, de modo que esses experimentos contam com alta precisos (Gartland, 2008).

### **Sensoriamento vertical**

O sensoriamento vertical descrito por Gartland (2008), refere-se ao estudo das variações térmicas na camada limite urbana, a qual estende-se até 2km de altitude. A maioria dos efeitos da superfície terrestre na atmosfera confina-se a esta camada, sendo a superfície urbana responsável pela formação da ICU nesta escala.

Conforme indicado anteriormente, o estudo da ICU na camada limite urbana pode ser realizado por meio de estações fixas colocadas em torres altas, ou por sensores instalados em plataformas móveis (como balões cativos ou de voo livre), bem como em aeronaves com trajetórias em diferentes altitudes (Oke *et al.*, 2017; Roth, 2013).

Estudos nesta camada encontraram diferenças no comportamento da temperatura em comparação com ambientes rurais, proporcionando uma melhor compreensão dos impactos da ICU no clima local (Gartland, 2008).

Um dos efeitos da urbanização na camada limite é a “inversão térmica”, descrita na seção 1.2.2 desta pesquisa. Durante o dia, as superfícies urbanas mais quentes geram uma camada limite mais espessa em relação às áreas rurais, acima da qual a temperatura se ajusta à da troposfera. À noite, as superfícies rurais resfriam-se mais rapidamente do que o ar sobrejacente, criando uma camada estável de ar frio abaixo de ar mais quente. Nas áreas urbanas, as superfícies esfriam lentamente, fazendo com que o ar quente forme uma inversão acima da camada de dossel (o ar é mais quente próximo às superfícies e esfria à medida que ascende) (Gartland, 2008). A Figura 1, na seção 1.2.2, ilustra graficamente o comportamento da “inversão térmica”.

### **Sensoriamento remoto**

Enquanto as estações fixas e os transectos móveis monitoram predominantemente as temperaturas do ar, o sensoriamento remoto é utilizado para medir as temperaturas de superfície e determinar outras características biofísicas da

malha urbana por meio da energia refletida e emitida. Os sensores podem ser embarcados em satélites ou aeronaves, capturando imagens da energia irradiada visível e invisível dos elementos da cidade e de seu entorno (Gartland, 2008).

A capacidade de fornecer imagens térmicas de alta resolução, tornou o sensoriamento remoto uma opção valiosa e atraente para a análise dos padrões temporais e espaciais de áreas urbanas extensas ao longo do tempo (Roth, 2013).

A cobertura temporal e a interpretação dos dados costumam ser restritas a momentos específicos. Por estarem em constante órbita, os satélites de observação terrestre não coletam dados continuamente sobre o mesmo ponto. Em geral, cruzam o mesmo local duas vezes ao dia, permitindo a comparação sazonal e entre períodos diurnos e noturnos (Gartland, 2008). Essa condição restringe as observações a horários fixos, que podem não coincidir com os picos do ciclo diário da ICU (Oke *et al.*, 2017). Adicionalmente, as condições atmosféricas limitam o uso dos dados, exigindo céus claros ou nebulosidade mínima (Gartland, 2008; Roth, 2013), o que pode inviabilizar a captura de imagens em determinadas épocas do ano.

Em comparação aos sensores *in situ*, o sensoriamento remoto fornece uma representação espacial contínua do comportamento térmico, permitindo a cobertura de grandes áreas (Oke *et al.*, 2017). No entanto, as temperaturas dos elementos verticais construídos, bem como áreas sob dosséis vegetativos não são capturadas, sendo elementos influentes no comportamento das temperaturas urbanas (Gartland, 2008).

A estrutura tridimensional da cidade, o ângulo de visada do sensor e a posição solar são fatores que intervêm na leitura. Sensores posicionados em ângulos opostos podem registrar diferentes magnitudes de ICUS ao capturarem faces sombreadas ou expostas diretamente à radiação solar. Restringir as observações a ângulos próximos ao *nadir* (perpendicular à superfície) proporciona uma visão mais coerente, porém prioriza as superfícies horizontais e omite as verticais como paredes e áreas sob copas de árvores (Oke *et al.*, 2017).

Para superar tal limitação, Voogt e Oke (1997) propuseram o conceito de “temperatura urbana superficial completa”. Essa abordagem utiliza o sensoriamento remoto em conjunto com medições atmosféricas para calcular uma temperatura que integre as dimensões horizontais e verticais, reconhecendo o impacto térmico da volumetria construída e determinando a verdadeira contribuição dos tipos de uso do

solo para o clima urbano.

Os instrumentos usados normalmente em plataformas satelitais fazem medições de energia em cinco comprimentos de onda diferentes, o que lhes permite determinar o quanto as superfícies estão quentes ou frias, além de mostrar a aparência das superfícies e o quanto elas são reflexivas. Os comprimentos de onda de interesse para estudar a temperatura das superfícies estão na faixa térmica, que inclui alguns dos comprimentos de onda ultravioleta e todos os comprimentos de onda visível e infravermelho (Gartland, 2008).

A altura de observação e o campo de visão do sensor controlam a resolução da imagem (Oke *et al.*, 2017). As resoluções espaciais<sup>6</sup> ideais para o mapeamento da temperatura da superfície podem ser de 50 m, ao mapear o comportamento em nível de bairro, e 100 m é suficiente para descrever as diferenças entre distritos; enquanto resoluções superiores a 500 m não permitem representar as diferenças intraurbanas (Sobrino *et al.*, 2012).

Outros instrumentos instalados em aeronaves tripuladas ou não tripuladas podem ser utilizados para medir temperaturas e outros elementos do clima, representando o campo térmico da camada do dossel urbano e da camada limite urbana.

O *Sodar* (*Sonic Detection and Ranging*) fundamenta-se na propagação de ondas acústicas para a estimativa do perfil vertical do vento e a caracterização do estado turbulento na atmosfera, operando em alcances de centenas de metros. Embora o *Sodar* não meça a temperatura diretamente, ele identifica sua estrutura térmica. Voltados para o céu, os sensores *Lidar* (*Light Detection and Ranging*) podem determinar a profundidade da mistura, a base das nuvens e as inversões térmicas, registrando o comportamento térmico da atmosfera. Orientados para a superfície terrestre, podem reproduzir modelos digitais tridimensionais do ambiente urbano (edifícios, árvores, etc.). Os sensores *RASS* (*Radio Acoustic Sounding System*), que operam com uma combinação de *Sodar* e perfil de vento por micro-ondas, medem a temperatura e o vento simultaneamente até 1,5km, permitindo o estudo de grandes porções da atmosfera (Oke *et al.*, 2017).

---

<sup>6</sup> A resolução espacial de uma imagem de satélite é definida como a medida do menor objeto que pode ser capturado pelo sensor (Liang; Wang, 2020). Em termos práticos, indica o tamanho equivalente em metros (m) de um *pixel* da imagem.

## Vantagens e desvantagens entre as técnicas de medição das ICU

Com base nas potencialidades e limitações de cada técnica de medição descrita nesta seção, o Quadro 8 resume suas respectivas vantagens e desvantagens, bem como os tipos de ICU aos quais estão associadas e as plataformas ou sensores geralmente empregados na coleta de dados.

Quadro 8 - Vantagens e desvantagens das técnicas de medição das ICU.

(Continua)

| Técnicas de medição         | Localização instrumento               | Tipo de ICU             | Vantagens                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Desvantagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>-Estações fixas</b>      | No subsolo                            | Subsuperficial          | - Permite observações simultâneas.                                                                                                                                                                                                                                                                   | -Complexidade na determinação de pontos representativos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                             | Na superfície                         | Superficial             | - Permite o registro temporal da ICU.                                                                                                                                                                                                                                                                | -Elevados custos logísticos e operacionais.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                             | Estações meteorológicas convencionais | Camada do Dossel Urbano | - Determina de forma direta a temperatura do ar ou do estrato estudado.                                                                                                                                                                                                                              | -Preparação das equipes para registro dos parâmetros e sincronização temporal das leituras.                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                             | Torres altas ou balões amarrados      | Camada Limite Urbana    | - Coleta outros dados climáticos que auxiliam o análise.                                                                                                                                                                                                                                             | -Não oferece uma leitura contínua do espaço urbano.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Transectos móveis</b>    | Em veículos terrestres                | Camada do Dossel Urbano | - Melhor descrição da heterogeneidade urbana.<br>- Ampliação da densidade de pontos de coleta no recorte espacial.<br>- Otimização da celeridade nos processos de coleta de dados.<br>- Outros sensores podem ser incluídos para coletar informações complementares.                                 | -Complexidade na determinação de pontos representativos.<br>- Reiteração de transectos para incremento da confiabilidade.<br>- Inviabilidade de aplicação em longas distâncias.<br>- Dependência exclusiva da malha viária para o modal terrestre.                                                                                                                                     |
|                             | Aeronaves ou balões de voo livre      | Camada Limite Urbana    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | - Ausência de simultaneidade na mensuração das variáveis climáticas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Balanços de energia</b>  | Na superfície                         | Superficial             | - Medição de alta precisão dos fluxos de energia.<br>- Permite o registro temporal da ICU.<br>- Permite uma melhor compreensão dos elementos que determinam o fenômeno.                                                                                                                              | - Requer um grande número de instrumentos.<br>- Não permite a leitura de grandes áreas.<br>- Seu uso é quase exclusivo para estudos controlados.<br>- Alto custo dos equipamentos.                                                                                                                                                                                                     |
|                             |                                       |                         | - Captura com precisão as diversas superfícies urbanas.<br>- Gera uma imagem térmica contínua de grandes áreas.<br>- Permite o estudo de várias propriedades das superfícies urbanas, bem como de outras variáveis climáticas.<br>- Permite a realização de estudos em diferentes escalas temporais. | - A coleta de imagens ópticas é restrita a condições atmosféricas ideais.<br>- Não permite o registro temporal da ICU.<br>- Os sensores disponíveis são restritos à plataforma de satélite existente.<br>- Altos custos para aquisição de dados de alta resolução.<br>- Não permite uma leitura direta da temperatura do ar.<br>- Não descreve a tridimensionalidade do espaço urbano. |
| <b>Sensoriamento Remoto</b> | Satélites ou aeronaves                | Superficial             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                             | Mini-Sodar, mini-Lidar                | Camada do Dossel Urbano |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                             | Sodar, Lidar, RASS                    | Camada Limite Urbana    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

(Continuação)

| Técnicas de medição           | Localização instrumento                          | Tipo de ICU          | Vantagens                                                                                                                                                                                                                                                       | Desvantagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sensoriamento Vertical</b> | Torres altas e balões amarrados (Estações Fixas) | Camada Limite Urbana | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite observações simultâneas.</li> <li>- Permite o registro temporal da ICU.</li> <li>- Determina de forma direta a temperatura do ar.</li> <li>- Coleta outros dados climáticos que auxiliam o análise.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Complexidade na determinação de pontos representativos.</li> <li>-Elevados custos logísticos e operacionais.</li> <li>-Não oferece uma leitura continua da camada limite.</li> </ul>                                                                                 |
|                               | Balões de voo livre ou aeronaves (móveis)        |                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Descreve melhor a estrutura térmica da camada limite.</li> <li>- Aumenta o número de pontos de coleta.</li> <li>- Outros sensores podem ser incluídos para coletar informações complementares.</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Custo operacional e logístico elevado.</li> <li>-Dificuldade em definir pontos representativos.</li> <li>- Aplicam-se certas restrições ao uso do espaço aéreo.</li> <li>- No caso de balões de voo livre, a trajetória é definida pela direção do vento.</li> </ul> |

Fonte: Elaboração própria com base em (Fialho; Fernandes; Correa, 2019; Gartland, 2008; Oke *et al.*, 2017; Roth, 2013; WMO, 2023)

A seleção das técnicas mais adequadas para mensurar os efeitos das ICU depende, em larga medida, dos objetivos do estudo e da disponibilidade de dados. Para subsidiar processos de tomada de decisão no campo do planejamento urbano, o sensoriamento remoto oferece a flexibilidade de operar em distintas escalas, desde a intraurbana até a metropolitana e regional.

Embora o sensoriamento remoto não forneça uma medição direta da temperatura do ar, tal técnica permite o estudo das propriedades e da disposição espacial dos componentes físicos que integram o ambiente construído, facilitando a análise e a compreensão de sua contribuição para a gênese ou mitigação das ICU. Essa abordagem viabiliza a identificação de padrões no ambiente construído que favorecem a ocorrência do fenômeno, orientando a formulação de estratégias específicas de mitigação no espaço urbano analisado.

A seção a seguir concentra-se na arborização urbana, segunda variável a ser analisada nesta pesquisa. Será abordada sua influência sobre o espaço urbano, bem como os fatores que a determinam, seguida por exemplos de planos de arborização como estratégia de mitigação das ICU, técnicas empregadas para determinar a cobertura arbórea e as tendências dos estudos focados na problemática levantada por esta pesquisa.



### 1.3 Arborização urbana

Nos últimos 30 anos, o principal objetivo da arborização evoluiu de um papel puramente estético e ornamental para a provisão de serviços ambientais e ecossistêmicos (Seamans, 2013).

Por muitas décadas, os higienistas tentaram preservar e aumentar a quantidade de espaços verdes nas cidades. No clássico tratado sobre clima urbano “*Das künstliche Klima in der Umgebung des Menschen*” (O clima artificial no ambiente humano), publicado em 1937 pelos meteorologistas Ernst Brezina e Wilhelm Schmid, os parques urbanos são mencionados como os “pulmões da metrópole”. A ideia central era a absorção do excesso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) produzido na área urbana por meio dos processos fotossintéticos das plantas, com a consequente liberação de oxigênio (Landsberg, 1981).

A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) identifica as árvores e as florestas em ambientes urbanos como elementos integrais no planejamento, no projeto e na gestão de cidades resilientes e sustentáveis, especialmente em países de baixa e média renda, onde os processos de urbanização costumam ser rápidos e com planejamento estratégico insuficiente, resultando em padrões insustentáveis de uso do solo (FAO, 2016).

As florestas urbanas constituem sistemas integrados de maciços florestais, agrupamentos arbóreos ou espécimes isolados situados em zonas urbanas ou periféricas. Tais elementos configuram a “espinha dorsal” da infraestrutura verde, estabelecendo a conectividade entre o meio urbano e o rural, mitigando o impacto ambiental das cidades. Esses espaços englobam florestas urbanas, árvores em ruas, jardins e parques, bem como árvores em terrenos ou lotes abandonados (FAO, 2016).

#### 1.3.1 Fatores que determinam a influência das árvores

Conforme mencionado anteriormente, a influência da arborização nos ambientes urbanos é determinada pela evapotranspiração e pelo sombreamento (Gartland, 2008; Rahman *et al.*, 2020).

#### Evapotranspiração

A fotossíntese é o processo biológico de formação de hidratos de carbono por meio da assimilação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico pelos tecidos vegetais clorofilados, processo dependente da radiação solar (Oke *et al.*, 2017). Durante o

processo, as árvores armazenam carbono para o seu crescimento e liberam oxigênio, removendo GEE que contribuem para a formação de ICU e para o aquecimento global (Gartland, 2008). A taxa de sequestro de carbono varia conforme a espécie e o porte da árvore: enquanto uma árvore pequena e de crescimento lento pode sequestrar 16kg/ano de CO<sub>2</sub>, indivíduos de maior porte podem atingir taxas de até 360kg/ano (McPherson *et al.*, 1999).

Simultaneamente à fotossíntese, a evapotranspiração permite que as plantas se mantenham frescas, reduzindo a quantidade de calor disponível (calor sensível) por meio da evaporação da água dentro da planta, absorvendo energia (calor latente) do sol e do ar (Charalampopoulos *et al.*, 2017; Gartland, 2008).

O efeito de resfriamento depende de vários fatores, como o tamanho e a temperatura das folhas, o tamanho e a densidade da copa, bem como o estado hídrico da planta. À medida que a superfície da folha aumenta, a variação entre o calor sensível e latente diminui, de modo que as árvores com folhas pequenas apresentam taxas de resfriamento mais altas. No caso de baixa densidade foliar, mais superfície foliar é exposta a mais radiação solar em toda a planta, resultando em temperaturas mais altas do ar, sendo insuficiente a taxa de evapotranspiração para resfriar as folhas (Manickathan *et al.*, 2018).

Por meio da evapotranspiração, as árvores liberam vapor de água na atmosfera, aumentam a umidade relativa, reduzem a temperatura do ar e, conseqüentemente, promovem o conforto térmico (Doick; Hutchings, 2013).

Isoladamente ou em conjunto com o sombreamento, a evapotranspiração, pode reduzir os picos de temperatura do ar no verão. Vários estudos identificaram as seguintes reduções (Huang; Akbari; Taha, 1990; Kurn *et al.*, 1994):

- Temperaturas máximas em áreas florestais são até 5°C inferiores às de campos abertos.
- Em campos agrícolas irrigados, as temperaturas são 3°C menores do que em solos expostos.
- Áreas periféricas com árvores maduras são 2°C a 3°C mais frescas que novas periferias desprovidas de árvores.
- Campos esportivos gramados apresentam temperaturas de 1°C a 2°C abaixo das áreas circundantes.

## Sombreamento

As árvores projetam padrões de sombra que interceptam significativamente a radiação solar. A densidade da copa pode proteger superfícies de mais de 90% da radiação de ondas curtas emitida pelo sol (Masseti *et al.*, 2019). Dependendo da espécie e do arranjo espacial, a vegetação pode regular o acesso solar em períodos específicos. Árvores de grande porte permitem a incidência solar quando o sol atinge ângulos mais baixos, provendo sombra durante as horas de maior irradiância. Contudo, suas alturas típicas em meios urbanos (<25m) limitam o potencial de sombreamento a edificações baixas, pavimentos inferiores de edifícios altos e ao nível do solo (Oke *et al.*, 2017).

Pesquisas quantificaram o efeito do sombreamento na temperatura de superfície: asfalto sombreado por copas densas apresenta diferenças superiores a 40°C em relação a áreas expostas (Armson; Stringer; Ennos, 2012). Superfícies pavimentadas de praças sombreadas por árvores mostraram uma redução de 30% na temperatura quando comparados com superfícies expostas (Júnior; Jesuino; Martins, 2018). Ademais, a presença de árvores no entorno de edificações reduziu as temperaturas máximas de telhados e paredes em uma amplitude de 11°C a 25°C (Akbari *et al.*, 1997).

Cerca de 80% do efeito de resfriamento arbóreo decorre do sombreamento, estando vinculado ao porte, cobertura da copa, localização e densidade foliar (Shashua-Bar; Pearlmutter; Erell, 2009). Em baixas latitudes, onde ângulos zenitais elevados intensificam a radiação recebida pelas superfícies (Roth, 2013), a seleção de características específicas das árvores é crucial para maximizar o resfriamento. Além disso, a saúde e a vitalidade da planta são essenciais. Condições como temperatura, seca, tolerância a doenças e contaminação, disponibilidade de meio de enraizamento e sensibilidade à compressão devem ser levadas em consideração ao selecionar as espécies (Doick; Hutchings, 2013).

### 1.3.2 Influência da arborização urbana

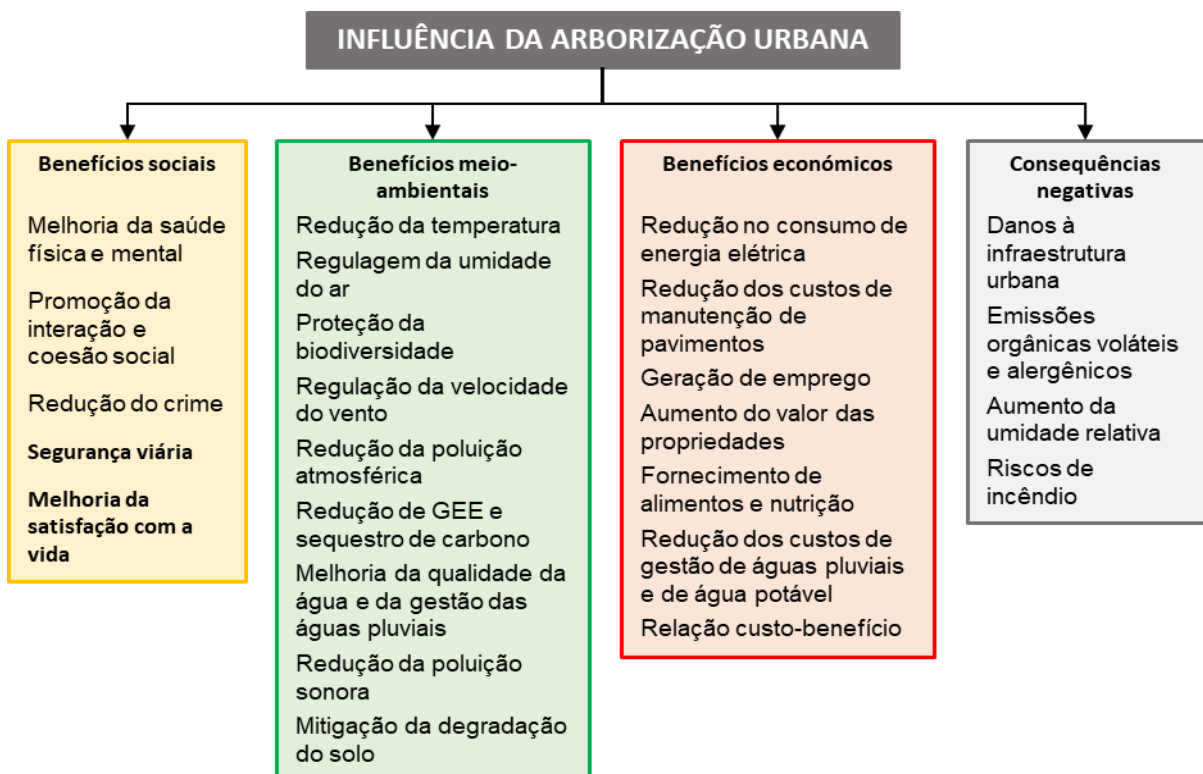
A incorporação da arborização nos centros urbanos tem funções sociais, econômicas e ambientais. A arborização urbana, além de representar uma estratégia para melhorar o conforto térmico nas grandes cidades, promove comunidades urbanas saudáveis, impactando diretamente na saúde física e mental dos habitantes (Donovan *et al.*, 2013).

As árvores e as florestas urbanas, quando adequadamente gerenciadas, oferecem contribuições fundamentais para o desenvolvimento das cidades (FAO, 2016), tornando-as:

- Seguras: reduzindo o escoamento de águas pluviais, os impactos do vento e mitigando as ICU, contribuindo para a adaptação e a mitigação das mudanças climáticas.
- Agradáveis: melhorando a qualidade do ar, oferecendo espaço para exercícios físicos e promovendo o bem-estar psicológico,
- Saudável: oferecendo oportunidades para a produção de alimentos, medicamentos e madeira, gerando serviços ecossistêmicos de valor econômico.
- Diversas e atraentes: ao proporcionar experiências naturais para os residentes urbanos, aumentando a biodiversidade, criando paisagens diversas e mantendo tradições culturais.

Diversos estudos quantificam os múltiplos benefícios da arborização no clima e na população, bem como os efeitos negativos decorrentes, majoritariamente, da carência de critérios na implementação. Os benefícios podem ser classificados como sociais, ambientais e econômicos (Figura 6).

Figura 6 - Influência da arborização urbana.



Fonte: Elaboração própria com base em (Agriculture Victoria, 2023; Akbari *et al.*, 1997; Akbari;

Pomerantz; Taha, 2001; Aronson *et al.*, 2014; Benjamin *et al.*, 1996; Boyle *et al.*, 2014; Bucur, 2006; Burden, 2006; City Fruit, 2023; Connor, 2013; Doick; Hutchings, 2013; Donovan; Prestemon, 2012; Duarte *et al.*, 2015; EPA, 2008, 2007; FAO, 2016; Frühauf *et al.*, 2016; Hansmann; Hug; Seeland, 2007; Heisler; Grant, 2000; Heisler; Grant; Gao, 2002; Herath; Halwatura; Jayasinghe, 2018; Jones, 2021; Killicoat; Puzio; Stringer, 2002; Konopacki; Akbari, 2002; Kuo; Sullivan, 2001; Lafrenz, 2022; Mascaró, 2015; McPherson, 2000; McPherson *et al.*, 2005, 2006; McPherson; Muchnick, 2005; Moore, 2009; Nowak *et al.*, 2014; Nowak; Crane, 2002; Nowak; Crane; Stevens, 2006; Nowak; Dwyer, 2007; Oh *et al.*, 2022; Oke *et al.*, 2017; Pandit; Polyakov; Sadler, 2012; Peper *et al.*, 2007; Rogers *et al.*, 2015; Salata *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2015; Scott; Simpson; McPherson, 1999; Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2012; Skelhorn; Lindley; Levermore, 2014; Srivani; Hokao, 2013; Taha, 1996; Taha; Tarran, 2009; Taylor *et al.*, 2015; Troy; Grove; O'Neil-Dunne, 2012; Tsoka, 2017; Ulrich, 1984; Van Dillen *et al.*, 2012; Velasco; Lima; Couto, 2006; Wolf, 1998c, 1998b; Xiao *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2007).

## Benefícios sociais

A arborização urbana pode melhorar direta e indiretamente a saúde dos habitantes, ao reduzir a causa de determinadas doenças não transmissíveis, fatores de estresse urbano, radiação ultravioleta, poluição do ar e sonora. Sua capacidade para diminuir as temperaturas exteriores e interiores, reduz o impacto das ondas de calor a saúde pública. Espaços verdes incentivam estilos de vida ativos, reduzindo riscos de obesidade, diabetes tipo 2, doenças coronárias, distúrbios respiratórios e alguns tipos de câncer (EPA, 2008; FAO, 2016).

- **Melhoria da saúde física e mental:** A vegetação arbórea contribui para a saúde física da população por meio do sombreamento e da mitigação da poluição atmosférica. Altos níveis de exposição aos raios UV do sol estão associados a efeitos adversos à saúde da pele e dos olhos, como o câncer de pele. A sombra de árvores com copas densas pode reduzir a exposição aos raios UV, diminuindo a probabilidade de desenvolver doenças associadas (Heisler; Grant, 2000; Heisler; Grant; Gao, 2002). Nos Estados Unidos, estima-se que as árvores previnam anualmente mais de 670.000 casos de doenças respiratórias graves, preservando mais de 850 vidas por ano (Nowak *et al.*, 2014). Em Londres, observou-se uma redução nas prescrições médicas de 1,18 por 1.000 habitantes para cada árvore adicional por quilômetro de via (Taylor *et al.*, 2015).

Ademais, as árvores urbanas e os espaços verdes estão associados a benefícios psicossociais que auxiliam na redução do estresse e de comportamentos agressivos, favorecendo a saúde mental dos habitantes (Hansmann; Hug;

Seeland, 2007; Ulrich, 1984; Wolf, 1998c). A prática de caminhadas em áreas verdes urbanas pode mitigar quadros de depressão clínica em mais de 30% quando comparada a atividades realizadas em ambientes interiores (Frühaufer *et al.*, 2016).

- **Promoção da interação e coesão social:** Áreas verdes em contextos urbanos fomentam o contato entre residentes, estimulam a atividade física, reduzem o estresse e promovem a coesão social (Van Dillen *et al.*, 2012). Tais espaços sediam eventos comunitários, festivais e reuniões que refletem a identidade coletiva dos habitantes, fortalecendo os vínculos sociais e a integração comunitária (Lafrenz, 2022; Oh *et al.*, 2022).
- **Redução da criminalidade:** Diversos estudos correlacionam a presença de árvores e vegetação urbana à redução de índices de criminalidade. Árvores de grande porte em vias públicas estão associadas à diminuição da incidência de crimes e da sensação de insegurança (Donovan; Prestemon, 2012). Estudo realizado em um conjunto habitacional público em Chicago, nos Estados Unidos, constatou que áreas dotadas de vegetação densa apresentavam níveis de criminalidade 50% menores em relação a áreas desprovidas de cobertura vegetal. A redução da criminalidade em espaços verdes bem conservados é, por vezes, atribuída a um maior senso de cuidado comunitário (Kuo; Sullivan, 2001). Em Baltimore, nos Estados Unidos, verificou-se que o aumento de 10% na cobertura arbórea estava associado a uma redução de 12% na criminalidade (Troy; Grove; O'Neil-Dunne, 2012).
- **Segurança viária:** Outro benefício social reside na capacidade da vegetação de atuar como barreira física e visual entre veículos e pedestres. O plantio ao longo das vias cria uma delimitação vertical entre a calçada e os veículos, oferecendo aos condutores uma borda definida que auxilia na orientação espacial e na avaliação da velocidade. Adicionalmente, as árvores operam como barreira física, protegendo pedestres contra ferimentos (Tarran, 2009).
- **Melhoria da satisfação com a vida:** Embora escassas, pesquisas têm avaliado o impacto da arborização urbana na qualidade de vida. Sob a perspectiva da satisfação com a vida, um estudo em Nova York, nos Estados Unidos identificou um incremento de 0,018 na percepção de bem-estar dos residentes (em uma escala de 1 a 3), três anos após a implementação do plano *MillionTreesNYC*.

Residentes com condições de saúde preexistentes médias ou precárias apresentaram ganhos superiores em comparação àqueles com melhores indicadores de saúde (Jones, 2021).

### **Benefícios ambientais**

Grande parte dos benefícios da arborização urbana reside na melhoria das condições ambientais, o que reflete, indiretamente, na qualidade de vida dos habitantes urbanos. A arborização urbana pode melhorar a qualidade da água ao reduzir o escoamento superficial e, conseqüentemente, ao favorecer a infiltração de água nos solos. Por meio do sombreamento e da evapotranspiração, as árvores reduzem a temperatura do ar e das superfícies, regulam a umidade e sequestram carbono, atenuando os efeitos das ICU e contribuindo para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas (FAO, 2016). A deposição seca permite a retenção de particulados e poluentes atmosféricos, filtrando e elevando a qualidade do ar (Oke *et al.*, 2017). Os resultados de estudos que quantificam tais contribuições são apresentados a seguir:

- **Redução da temperatura:** Por meio da evapotranspiração e do sombreamento, a arborização constitui uma ferramenta eficaz na redução térmica em diversos contextos. Árvores de rua podem reduzir as temperaturas diurnas entre 5°C e 20°C, tornando as atividades cotidianas mais agradáveis e saudáveis (Burden, 2006; Killicoat; Puzio; Stringer, 2002). A arborização, quando associada a grandes espaços verdes, gera efeitos de resfriamento que se estendem pela malha urbana. Áreas verdes de 3 a 5 hectares podem prover resfriamento a distâncias entre 70m e 120m. Outros estudos demonstraram reduções na temperatura do ar relacionadas ao incremento do plantio de árvores: 0,35 a 0,6°C (Tsoka, 2017), 0,3 a 1,5°C (Duarte *et al.*, 2015), 1°C (Skelhorn; Lindley; Levermore, 2014), 1,49°C (Salata *et al.*, 2017), 1,87°C (Herath; Halwatura; Jayasinghe, 2018) e 2,27°C (Srivani; Hokao, 2013).
- **Regulagem da umidade do ar:** Através da evapotranspiração, a vegetação emite vapor de água, elevando a umidade relativa (Doick; Hutchings, 2013). Áreas densamente arborizadas tendem a apresentar umidade relativa superior a zonas desprovidas de vegetação, sendo crucial a seleção de espécies adequadas às condições climáticas locais. Em baixas latitudes (-30°), a umidade relativa recomendada é de 65%; valores superiores podem ocasionar

desconforto térmico. Para locais que demandam incremento da umidade, recomendam-se árvores de folhas pequenas, claras e lisas, que possuem processos evaporativos acelerados. Em contrapartida, em áreas excessivamente úmidas, indica-se o uso de espécies com folhas grandes e ásperas, que retêm a água na superfície foliar e reduzem o efeito convectivo do vento, diminuindo a umidade do ar (Mascaró, 2015).

- **Proteção da biodiversidade:** A expansão urbana é responsável pela destruição, degradação e fragmentação de ecossistemas naturais dentro e ao redor das cidades, tendo um efeito que não se limita ao espaço urbano, gerando perda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos que exacerbam o conflito entre humanos e fauna silvestre. Incrementar e restaurar a funcionalidade e a conectividade dos espaços naturais urbanos contribui consideravelmente para a conservação dos recursos naturais e da biodiversidade. Quanto mais diversificadas, menos perturbadas e melhor conectadas forem as infraestruturas verdes urbanas, mais resilientes serão os ecossistemas que elas abrigam, favorecendo serviços como a produção de alimentos, a fertilidade e a estabilidade do solo e a purificação da água (FAO, 2016).

Florestas urbanas adequadamente gerenciadas podem sustentar uma grande variedade de espécies nativas de plantas e animais. Estima-se que 20% das espécies de aves e 5% das plantas vasculares sejam encontradas nas cidades (Aronson *et al.*, 2014). Em média, 70% das espécies de plantas e 94% das espécies de aves encontradas nas cidades são nativas das regiões circundantes (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2012).

- **Regulação da velocidade do vento:** As árvores e outras vegetações atuam como quebra-ventos ou escudos, reduzindo a velocidade e canalizando fluxos pelo tecido urbano. Sua porosidade dissipa o vento em vez de bloqueá-lo abruptamente, criando diferenciais de pressão menores que os de edifícios sólidos, o que torna a recuperação da velocidade do vento mais lenta e amplia a área de abrigo. Espécies perenes mantêm propriedades aerodinâmicas constantes, enquanto decíduas oferecem proteção predominante no verão (Oke *et al.*, 2017). Em climas temperados, o impacto das árvores sobre os ventos urbanos pode variar sazonalmente, proporcionando economia energética no inverno (EPA, 2008).



- **Redução da poluição atmosférica:** Por meio da deposição seca, as árvores retêm poluentes e partículas de forma direta em suas folhas. Indiretamente, reduzem emissões ao proporcionar economia de energia (Taha, 1996). Enquanto alguns dos poluentes aderem às folhas, outros podem ser res-suspendidos ou lavados pela chuva. A troca de gases por meio dos estômatos abertos permite a transferência de poluentes atmosféricos, como ozônio, óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, para a planta. Durante esse processo, a saúde da planta pode ser prejudicada ao impedir que os estômatos funcionem adequadamente, além de limitar sua capacidade de utilizar a energia solar (Oke *et al.*, 2017).

Nos Estados Unidos, estima-se que árvores urbanas removam anualmente 784.000 toneladas de poluentes, incluindo ozônio (O<sub>3</sub>), material particulado com menos de 10 microns (PM<sub>10</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO), gerando melhorias modestas na qualidade do ar, geralmente inferiores a 1%. Em 13 cidades selecionadas com cobertura de árvores entre 11 e 36%, a redução média de poluentes durante o dia foi de 0,64% (PM<sub>10</sub>), 0,62% (O<sub>3</sub>), 0,61% (SO<sub>2</sub>), 0,40% (NO<sub>2</sub>) e 0,02% (CO) (Nowak; Crane; Stevens, 2006).

Adicionalmente, o sombreamento das árvores nos estacionamentos mantém os veículos mais frescos, especialmente os tanques de combustível, reduzindo as emissões evaporativas de compostos orgânicos voláteis, um precursor crítico da formação de ozônio (O<sub>3</sub>). O aumento da cobertura de árvores nos estacionamentos entre 8% a 50% pode reduzir as emissões evaporativas de veículos leves em 2% por dia (Scott; Simpson; McPherson, 1999).

- **Redução de GEE e sequestro de carbono:** As árvores reduzem o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera direta e indiretamente. Pela fotossíntese, as árvores absorvem CO<sub>2</sub> de forma direta durante o dia. Indiretamente, as árvores reduzem as emissões CO<sub>2</sub> associadas à geração de energia, ao reduzir a demanda por resfriamento (Akbari; Pomerantz; Taha, 2001; EPA, 2008). O sequestro direto é estimado em menos de um quarto do benefício indireto total (Nowak; Crane, 2002).

A taxa de carbono sequestrado pelas árvores urbanas nos Estados Unidos em 2005 foi estimada em 24 milhões de toneladas por ano (88,5 milhões de

toneladas de CO<sub>2</sub>eq), enquanto a quantidade total armazenada é de aproximadamente 700 milhões de toneladas de carbono (EPA, 2007). Na Carolina do Sul, nos Estados Unidos, estimou-se uma redução anual de 1.500 toneladas de CO<sub>2</sub> por conta de 15.000 árvores inventariadas nas ruas da cidade, considerando seus ciclos de vida. Esse benefício é equivalente a US\$1,5 (R\$7,85) por árvore, com base no preço médio dos créditos de carbono (McPherson *et al.*, 2006).

Por meio de simulação, um estudo nos Estados Unidos estimou uma redução de 1,5 a 5% nas emissões de carbono em várias áreas metropolitanas a través da economia indireta de energia pelo sombreamento de árvores urbanas. O modelo estimou o plantio de 8 árvores ao redor de edifícios residenciais e de escritórios e 4 ao redor de edifícios comerciais (Konopacki; Akbari, 2002).

- **Melhoria da qualidade da água e da gestão das águas pluviais:** As cidades consomem 75% da água residencial e industrial, enfrentando desafios como enchentes, secas, incremento da demanda e declínio da qualidade hídrica. Florestas urbanas aumentam a disponibilidade e qualidade da água ao interceptar poluentes, reduzir a sedimentação e favorecer a infiltração, mitigando inundações e aumentando a resiliência a secas (FAO, 2016). Em Sacramento, nos Estados Unidos, árvores perenes e coníferas interceptam mais de 35% das águas pluviais (Xiao *et al.*, 1998).

A cidade de Nova York, nos Estados Unidos, investe entre US\$1,4 a 1,5 bilhões (R\$5,23 a 7,84 bilhões) em projetos de proteção de bacias hidrográficas (incluindo melhoria da gestão florestal) para a melhoria da qualidade da água, em vez de construir uma planta de filtragem com custos estimados de US\$6 bilhões (R\$31,38 bilhões) para a construção e US\$ 250 milhões (R\$1,3 bilhões) para a manutenção anual. Em Portland, nos Estados Unidos, um investimento de US\$ 9 milhões (R\$47,07 milhões) em infraestrutura verde projeta uma economia de US\$ 224 milhões (R\$1,17 bilhões) em manutenção e reparo da infraestrutura de drenagem (FAO, 2016).

- **Redução da poluição sonora:** As árvores e a vegetação em geral atuam como barreira acústica, absorvendo sons de alta frequência que geram maior desconforto nas pessoas. Um projeto adequado com cobertura vegetal densa e alturas variadas pode ter efeitos significativos na redução do ruído urbano

(Mascaró, 2015). Uma fileira de árvores e arbustos pode reduzir o ruído em 3 a 5dB, enquanto cinturões densos podem dobrar essa atenuação, assemelhando-se a barreiras rodoviárias (Nowak; Dwyer, 2007).

- **Mitigação da degradação do solo:** A arborização reduz a erosão e aumenta a fertilidade do solo ao diminuir a velocidade do vento e elevar a permeabilidade, contribuindo para o aumento da produtividade. Em periferias, cinturões verdes protegem solos agrícolas, enquanto em áreas urbanas reduzem o escoamento superficial e a poluição do solo (FAO, 2016). Os cinturões verdes adequadamente projetados podem reduzir a força dos ventos erosivos em até 75% (Agriculture Victoria, 2023).

### **Benefícios econômicos**

Diferentemente das florestas convencionais e as árvores frutíferas, os benefícios econômicos da arborização urbana são complexos de quantificar, visto que, em sua maioria, carecem de um custo de mercado (Pandit; Polyakov; Sadler, 2012).

A vegetação urbana e as demais infraestruturas verdes proporcionam diversos benefícios, tangíveis e intangíveis, que melhoram as condições e os meios de subsistência dos residentes urbanos. A valorização imobiliária, a atração de investimentos comerciais e turísticos, a redução dos custos com energia e a economia em gastos de saúde pública constituem alguns dos principais benefícios econômicos positivos em ambientes urbanos.

A prefeitura de Londres realizou uma avaliação de seus 18 milhões de árvores, determinando benefícios anuais de £132 milhões (R\$939 milhões), relacionados majoritariamente à mitigação de poluentes atmosféricos. Ademais, o valor recreativo atribuído à arborização na cidade é estimado em £43 bilhões (R\$306 milhões) (Rogers *et al.*, 2015).

Os principais benefícios econômicos das árvores em ambientes urbanos são descritos a seguir.

- **Redução no consumo de energia elétrica:** Conforme mencionado anteriormente, a vegetação arbórea mitiga o consumo energético destinado ao resfriamento de edificações por vias diretas e indiretas.

A distribuição de árvores ao redor no entorno das construções proporciona o sombreamento de superfícies, reduzindo a carga térmica e, por conseguinte, o uso de climatizadores. Em Sacramento, nos Estados Unidos, um estudo em duas

residências demonstrou que o sombreamento e os efeitos microclimáticos das árvores reduziram o consumo médio de energia para resfriamento em 30% (Akbari *et al.*, 1997).

Simulações de arborização em larga escala em dez áreas metropolitanas estadunidenses estimaram que o efeito direto do sombreamento pode representar uma economia anual entre US\$5 e US\$25 (R\$26,15 e R\$130,75) por cada 100m<sup>2</sup> de cobertura em edifícios residenciais e comerciais nas cidades mais quentes. O efeito indireto, associado à redução da temperatura do ar, estimou uma economia anual de US\$5 a US\$10 (R\$26,15 e R\$52,3) por cada 100m<sup>2</sup> de coberturas de edifícios residenciais e comerciais, demonstrando que o efeito direto tem uma influência maior na economia de energia para resfriamento (Taha; Konopacki; Gabersek, 1996 *apud* Akbari; Pomerant; Taha, 2001).

- **Redução dos custos de manutenção de pavimentos:** Árvores ao longo de vias públicas sombreiam pavimentos e calçadas, prevenindo o aquecimento excessivo e o desgaste prematuro das superfícies expostas à radiação solar. Um estudo indicou que os custos de recapeamento em ruas residenciais podem ser reduzidos entre 15% e 60%, a depender da densidade da copa das espécies utilizadas, o que ressalta o papel da arborização na preservação da infraestrutura urbana (McPherson; Muchnick, 2005).
- **Geração de emprego:** O planejamento, a manutenção e a gestão de florestas urbanas fomentam a criação de postos de trabalho e atraem investimentos turísticos. Em Manchester, na Grã-Bretanha, estima-se que as florestas urbanas sustentem cerca de 15.500 empregos (1,2% do total local), em setores que abrangem desde produtos florestais e turismo até serviços profissionais de silvicultura urbana (Connor, 2013).
- **Aumento do valor das propriedades:** Diversos estudos identificaram uma relação entre a presença de árvores e espaços verdes e a valorização de propriedades e produtos, bem como o aumento da prosperidade de estabelecimentos comerciais. Em Perth, na Austrália, observou-se uma valorização média de 20 a 30% em imóveis residenciais localizados próximos a espaços públicos arborizados (Pandit; Polyakov; Sadler, 2012). Em Alabama, nos Estados Unidos, 75% dos residentes afirmaram que a arborização viária foi

um fator decisivo na escolha de sua moradia (Zhang *et al.*, 2007). Adicionalmente, em Seattle, nos Estados Unidos, o valor médio de consumo em áreas comerciais arborizadas é 11% superior em comparação a zonas desprovidas de árvores (Wolf, 1998a).

- **Fornecimento de alimentos e nutrição:** Florestas urbanas contribuem para a segurança alimentar mediante a produção de madeira para cozinhar e produtos alimentícios. (FAO, 2016). Além disso, mitigam a emissão de GEE ao reduzir as distâncias de transporte de alimentos. Em Seattle, nos Estados Unidos, a organização *City Fruit* colheu 20.400 kg de frutas de 388 árvores e 12 hortas urbanas em 2023, que foram distribuídas a 33 organizações locais compostas por escolas, bancos de alimentos e organizações comunitárias, totalizando 200 toneladas de alimentos colhidos desde sua fundação em 2008 (City Fruit, 2023).
- **Redução dos custos de gestão de águas pluviais e de água potável:** A vegetação arbórea intercepta precipitações, reduzindo a sobrecarga nos sistemas de drenagem, além de otimizar a infiltração e a filtragem do solo. O valor da água reciclada por uma árvore ao longo de 50 anos é estimado em US\$35.000 (R\$183.050) (Bucur, 2006). Na Filadélfia, nos Estados Unidos, a implementação de infraestrutura verde desde o ano 2006, economizou aproximadamente US\$170 milhões (R\$889 milhões) ao mitigar transbordamentos de esgoto combinados, melhorando a qualidade da água. (Boyle *et al.*, 2014). As árvores viárias na cidade de Nova York, nos Estados Unidos, interceptam aproximadamente 3,37 bilhões de litros de águas pluviais anualmente (uma média de 5.764 litros por árvore), estimando um valor para esse benefício de US\$ 35 milhões (R\$183 milhões) por ano. Estima-se que para cada US\$1 (R\$5,23) investido no plantio e manutenção das árvores, a cidade obtenha US\$5,6 (R\$29,3) em benefícios (Peper *et al.*, 2007).
- **Relação custo-benefício:** Embora os danos e incômodos causados pelas árvores urbanas sejam frequentemente destacados, os benefícios são usualmente subestimados (Moore, 2009). Os benefícios podem variar consideravelmente de acordo com a comunidade e o tipo de espécie, mas na maioria dos casos excedem os custos de plantio e manutenção. Um estudo em cinco cidades dos Estados Unidos (Collins - CO., Cheyenne - WY., Bismark - ND., Berkley - CA. e Glendale - AZ.) revelou que, para cada US\$ 1 (R\$5,23)

investido, o retorno variou entre US\$1,50 e US\$3,00 (R\$7,8 e R\$15,7). Enquanto os gastos anuais por árvore oscilaram entre US\$15 e US\$65 (R\$78,4 e R\$339,9) (incluindo plantio, poda e reparos), os benefícios totais alcançaram valores entre US\$30 e US\$90 (R\$156,9 e R\$470,7) por espécime (incluindo economia de energia, sequestro de carbono, melhoria da qualidade do ar, aumento dos valores das propriedades e redução do escoamento superficial) (McPherson *et al.*, 2005).

### **Consequências negativas**

A despeito dos múltiplos benefícios, o planejamento inadequado e a ausência de manutenção das florestas urbanas podem acarretar impactos negativos aos habitantes. Direta ou indiretamente, a vegetação pode induzir alergias, abrigar vetores de doenças e causar ferimentos em pedestres ou ocupantes de veículos. O desenvolvimento radicular, a queda de espécimes ou o desprendimento de galhos podem danificar linhas de transmissão de energia, calçadas, pavimentos e outras infraestruturas, assim como colocar em risco a pedestres e motoristas. Além disso, as árvores são uma fonte de combustível, o que pode representar riscos de incêndio (EPA, 2008; FAO, 2016).

- **Danos à infraestrutura urbana:** Espécies com raízes superficiais frequentemente ocasionam o levantamento de calçadas e danos estruturais em edificações adjacentes (Santos *et al.*, 2015). Conflitos com redes aéreas de distribuição elétrica resultam em interrupções no fornecimento e expõem a população a riscos de descargas elétricas (Velasco; Lima; Couto, 2006). Os custos associados a reparos em pavimentos degradados por raízes possuem implicações orçamentárias significativas para gestões locais. Na Califórnia, nos Estados Unidos, estima-se um gasto anual de US\$71 milhões (R\$371 milhões) em danos à infraestrutura causados por árvores viárias. Dezesete cidades estadunidenses registraram dispêndio total de US\$ 1,28 milhões (R\$6,69 milhões) para mitigar conflitos entre raízes e calçamentos, o equivalente a US\$0,17 (R\$0,88) por habitante. Desse montante, 56% foram destinados à poda de raízes, 21% ao reparo de calçadas e 23% a medidas preventivas, como barreiras radiculares e estreitamento de passeios (McPherson, 2000).
- **Emissões orgânicas voláteis e alergênicos:** Certas espécies emitem compostos orgânicos voláteis (COV) que, ao reagirem com poluentes oriundos

da combustão de combustíveis fósseis, geram poluentes secundários, como o ozônio (O<sub>3</sub>) e o nitrato de peroxiacetila (PAN). Tais substâncias contribuem para o *smog* fotoquímico, comprometendo a qualidade do ar (Oke *et al.*, 2017). As emissões de COV variam segundo a intensidade solar, temperatura e umidade, apresentando oscilações consideráveis entre diferentes espécies, até mesmo dentro da mesma família e gênero (Benjamin *et al.*, 1996). O aumento das árvores e da vegetação em ambientes urbanos contribui para a redução das temperaturas, mitigando a taxa de emissão de COV (Nowak, 2000). Adicionalmente, o pólen de certas espécies pode atuar como alérgeno, desencadeando reações em indivíduos suscetíveis (FAO, 2016).

- **Aumento da umidade relativa:** Conforme mencionado, as árvores regulam a umidade do ar. Por meio da evapotranspiração, a árvore libera vapor de água, reduzindo as temperaturas e aumentando os níveis de umidade no ar. O aumento da umidade relativa acima de patamares críticos pode gerar incomodidade e desconforto térmico, portanto, a seleção de espécies deve considerar as condições de umidade preexistentes do espaço urbano (Mascaró, 2015).
- **Riscos de incêndio:** As árvores e as florestas urbanas, especialmente as localizadas na periferia, são suscetíveis a incêndios. As árvores são uma fonte de combustível que pode colocar em risco pessoas, residências e empresas (FAO, 2016). A seleção de espécies adequadas e seu plantio estratégico é um componente fundamental dos programas de arborização para minimizar os riscos de incêndio (Akbari; Pomerantz; Taha, 2001).

Em suma, os impactos negativos da arborização estão frequentemente vinculados à falta de critérios no planejamento, na implementação e na manutenção. A seleção correta das espécies de acordo com as características do ambiente urbano e a manutenção sistemática são imperativas para maximizar os serviços ecossistêmicos.

A priorização de espécies com raízes pivotantes evita danos ao pavimento, enquanto o uso de árvores de pequeno ou médio porte sob redes elétricas aéreas, bem como o uso de redes elétricas subterrâneas, reduz conflitos de infraestrutura (Velasco; Lima; Couto, 2006). A seleção de árvores com baixas emissões de COVs evita efeitos negativos na qualidade do ar, especialmente na implementação de planos

de arborização em larga escala (Benjamin *et al.*, 1996). É fundamental considerar que as árvores crescem lentamente, exigindo de pelo menos 5 anos para apreciar alguns de seus benefícios, precisando em média, de 15 anos para amadurecer e proporcionar o máximo de benefícios (McPherson, 2002).

### **1.3.3 Planos de arborização urbana como estratégia de mitigação**

Nas últimas décadas, diversas cidades iniciaram a transição para um modelo de desenvolvimento mais verde, sustentável e resiliente. Tais centros urbanos investem em florestas, áreas úmidas e espaços verdes para superar desafios anteriormente abordados apenas por soluções convencionais de engenharia. A infraestrutura verde, quando adequadamente planejada e gerenciada, pode apresentar custos inferiores de implementação e manutenção em comparação às soluções convencionais, cumprindo funções semelhantes e gerando renda e emprego que elevam a qualidade do ambiente urbano (FAO, 2018).

As árvores e florestas urbanas demonstraram sua flexibilidade e eficácia ao lidar com diferentes consequências ambientais do desenvolvimento urbano, especialmente aquelas relacionadas aos efeitos das ICU, cenários exacerbados pela mudança climática global. Quatro experiências de plantio de árvores urbanas em diferentes cidades são apresentadas a seguir, focando na criação de espaços mais resilientes com ênfase na mitigação do calor urbano.

#### **Projeto de florestamento da planície de Pequim - China**

Com uma população de aproximadamente 22 milhões de residentes permanentes, Pequim figura como uma das cidades mais populosas do mundo, sendo severamente afetada pela poluição atmosférica, pelo efeito das ICU e por outros passivos ambientais com impactos diretos na saúde e no bem-estar de seus habitantes (FAO, 2018).

Com o intuito de mitigar pressões ambientais e ampliar a sustentabilidade e a resiliência urbanas, o governo municipal implementou diversos programas de arborização desde 2000. Dentre eles, o Projeto de Florestamento da Planície de Pequim, iniciado em 2012, é reconhecido como a maior intervenção dessa natureza na história da cidade (Jin *et al.*, 2021). O programa visou à criação de extensas áreas florestais, ao desenvolvimento de clusters de parques urbanos e à otimização da configuração florestal em larga escala, propondo cinturões, anéis e corredores verdes



no entorno do centro histórico (Wang *et al.*, 2013 *apud* Jin *et al.*, 2021). O projeto previu o plantio de 66.674 hectares de novas florestas entre 2012 e 2015, mediante a conversão de lotes baldios, terras agrícolas, poços de escavação de areia e terrenos vazios em florestas, parques e áreas úmidas entre 2012 e 2015 (Jin *et al.*, 2021).

Até o final de 2015, foram plantadas mais de 54 milhões de árvores, elevando a cobertura arbórea nas áreas de planície em 42% (variando de 14,8% em 2011 para 25,6% em 2015), com taxa de sobrevivência superior a 95%. Critérios ecológicos, como espécies nativas, tolerância à seca e longevidade, foram considerados para a seleção das 37 espécies oficialmente recomendadas, aumentando a proporção de espécies nativas para 91,97%. A iniciativa logrou a criação de 23 florestas urbanas com áreas superiores a 667 hectares, 210 com mais de 67 hectares e 18 parques de grande escala, além de 500 florestas recreativas e áreas verdes. Em quatro anos, a cidade reflorestou 24.267 hectares de áreas ecologicamente frágeis, incluindo fossas, terrenos arenosos, lagoas e áreas

A arborização urbana impactou significativamente o sequestro de carbono municipal, quintuplicando sua capacidade. Segundo estimativas, enquanto em 2013 as florestas urbanas sequestraram aproximadamente 90.293 toneladas (5,42 ton/ha), em 2022 esse volume ascendeu para 513.367 toneladas (30,8 ton/ha), desempenho atribuído primordialmente ao estágio de rápido crescimento das espécies plantadas (Zhao *et al.*, 2024).

### **Corredores verdes, Medellín – Colômbia**

Medellín, o segundo município mais populoso da Colômbia, com 2.427.129 habitantes, sofre severas consequências do efeito das ICU, resultado de cinco décadas de rápido crescimento urbano (C40 Cities Climate Leadership Group, 2019). Em 2012, um estudo revelou que Medellín apresentava a maior intensidade de ICU de superfície diurna entre 419 grandes cidades analisadas, atingindo 7°C. Projeta-se que, entre 2040 e 2050, as temperaturas ultrapassarão o limiar de 29°C em mais de 150 dias por ano (Peng *et al.*, 2012).

Com o objetivo de reverter os impactos da urbanização sobre o meio ambiente e a saúde dos habitantes, como a poluição atmosférica e os efeitos da ICU, as Secretarias de Infraestrutura e de Meio Ambiente lançaram seu primeiro projeto de planejamento de ecologização urbana em 2015. O projeto Corredores Verdes, implementado entre 2016 e 2019, desenvolveu um total de 36 corredores: 18

associados a sistemas de mobilidade e 18 a cursos d'água. Durante o desenvolvimento da iniciativa, foram plantadas 10.270 espécies vegetais, incluindo árvores, arbustos e palmeiras, em uma área total de 65 hectares. A localização dos corredores foi definida com base nas zonas da cidade com menor cobertura vegetal e nas áreas de proteção de córregos, a fim de aumentar a conectividade e a diversidade (C40 Cities Climate Leadership Group, 2019).

Por meio da ferramenta “*C40 Heat Resistant Cities*”, foram calculados os benefícios do projeto, resultando em uma redução de 2,7°C no efeito da ICU, com uma diminuição projetada de 4 a 5°C em 28 anos. Outros benefícios estimados pela ferramenta incluem a redução do número de dias com temperaturas acima de 29°C e ganhos econômicos decorrentes da diminuição de internações hospitalares. Um estudo bioclimático estima que o crescimento da nova vegetação em apenas um dos corredores poderia sequestrar 160.787 kg de CO<sub>2</sub> por ano em seu estágio inicial (C40 Cities Climate Leadership Group, 2019).

### **Programa *MillionTreesNYC*, Nova York – Estados Unidos**

Em 2007, a cidade de Nova York lançou um conjunto de ações por meio do *PlaNYC*, visando enfrentar os desafios do crescimento populacional, do envelhecimento das infraestruturas e da evolução econômica sob a ótica das mudanças climáticas. O plano estabeleceu metas a serem atingidas até 2030, com ênfase na promoção e proteção da natureza. O reconhecimento dos múltiplos benefícios da arborização impulsionou a implementação do programa *MillionTreesNYC*, cujo objetivo foi ampliar a cobertura arbórea e as áreas florestais urbanas em 20%, proporcionando aos residentes ganhos econômicos, ambientais e de saúde, além de consolidar um ambiente urbano mais sustentável (The city of New York, 2011).

O programa foi iniciado em 2007 pelo Departamento de Parques e Recreação da Cidade (*NYC Parks*) e pelo Projeto de Restauração de Nova York (*NYRP*), com a meta de plantar 1 milhão de árvores em áreas públicas e privadas até 2017, por meio da iniciativa pública e privada. Aproximadamente 70% dos exemplares foram plantados por autoridades públicas em vias, parques e instituições como escolas e hospitais; os 30% restantes foram viabilizados por organizações privadas, proprietários de imóveis e entidades comunitárias. Destaca-se que mais de 60.000 árvores foram alocadas em seis bairros com índices criticamente baixos de

arborização e altas taxas de hospitalização por asma infantil (0 a 4 anos). O programa foi concluído em 2015, antecipando-se em dois anos ao cronograma previsto, tornando-se um modelo ecológico para cidades de todo o mundo (Newman, 2013; NYC Parks, [entre 2015 a 2024]).

A cobertura arbórea da cidade aumentou 1,68% entre 2010 e 2017, totalizando 22,04% da área dos cinco distritos, o que corresponde a cerca de 7 milhões de árvores (6.977.000 unidades). Cerca de 53,50% dessa cobertura está sob a jurisdição do *NYC Parks*, 35,26% em propriedades privadas e o restante em áreas públicas de outras esferas. Mais de um terço da cobertura total é composto por fragmentos de florestas naturais (Treglia *et al.*, 2021).

A arborização de Nova York contribui significativamente para o ecossistema local e a saúde pública. As árvores removem 1.100 toneladas de poluentes do ar por ano, interceptam 1,95 milhões de metros cúbicos de água da chuva, sequestram 51.000 toneladas de carbono (186.000 toneladas de CO<sub>2</sub>/ano), armazenam 1,2 milhões de toneladas de carbono (4,2 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>/ano), economizam US\$17,1 milhões (R\$89,4 milhões) em gastos energéticos prediais, reduzem a radiação ultravioleta em 25,1% e mitigam as temperaturas diurnas (06h às 17h) em uma média de 0,13°F (0,072°C) (Nowak *et al.*, 2018).

### **Estratégia Floresta Urbana, Sydney – Austrália**

Sydney é a segunda cidade com crescimento mais rápido na Austrália, apresentando um aumento populacional de 38,9% entre 2008 e 2018. Em 2021, o município contabilizava 259.273 habitantes, consolidando-se como o sexto maior da área metropolitana. Em 2007, a administração desenvolveu o plano estratégico de longo prazo "*Sustainable Sydney 2030*", cujo sucesso fundamentou a elaboração da visão "*Sustainable Sydney 2050*", baseada em uma década de pesquisas técnicas. Paralelamente, o relatório *Resilient Sydney* estabeleceu a primeira diretriz estratégica para ampliar a capacidade adaptativa da cidade às mudanças climáticas, identificando o calor extremo como um desafio crítico. As ondas de calor na Austrália configuram-se como perigos naturais potencialmente letais, com tendências de maior intensidade e duração. As ondas de calor de fevereiro de 2011 em Sydney resultaram no tratamento hospitalar de emergência de 595 pessoas e na morte de 96 (City of Sydney, 2019, 2021).

Em 2013, como parte do plano *Greening Sydney Strategy* (iniciado em 2012), foi

lançada a Estratégia de Florestas Urbanas. O objetivo consistiu em aprimorar a qualidade e a quantidade da massa arbórea, prover planejamento integrado para maximizar serviços ecossistêmicos e promover a educação ambiental. O plano estruturou-se em quatro objetivos principais: proteção e manutenção das florestas existentes, ampliação da cobertura arbórea, incremento da diversidade de espécies e fomento ao engajamento comunitário (City of Sydney, 2013).

Por meio de estudo realizado em 2008, a cidade diagnosticou uma cobertura arbórea de 15,5%, distribuída entre áreas privadas (61,7%), logradouros (22,7%) e parques (15,6%). O levantamento também identificou percentuais de cobertura por uso do solo (10,6% em propriedades privadas, 21,5% em ruas e 26,0% em parques), além de tipologias de altura e porte, estabelecendo a linha de base para o planejamento. Embasada nas recomendações da agência florestal dos Estados Unidos, que estabelece uma porcentagem ideal de cobertura de árvores para cada tipo de uso do solo para maximizar os benefícios, o plano estabeleceu uma meta de aumentar a cobertura para 23,25% até 2030 (50% do recomendado) e 27,13% até 2050 (75% do recomendado). Em 2022, a cobertura arbórea ascendeu para 19,8%, com progresso em todas as categorias de uso do solo. Para 2023, a estratégia foi renovada com novos critérios, enfatizando a distribuição equitativa da vegetação, a priorização baseada na vulnerabilidade social e o desenvolvimento de florestas adaptadas às mudanças climáticas. Para mitigar o efeito das ICU, o plano prioriza áreas onde a comunidade possui menor capacidade de enfrentamento às ondas de calor. Utilizando um índice de vulnerabilidade ao calor (calculado a partir de indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa) são gerados mapas que cruzam as áreas de maior necessidade com as de maior oportunidade de plantio (City of Sydney, 2023).

Até 2022, a cidade contava com aproximadamente 88.500 árvores. Os benefícios ambientais quantificados incluem a remoção anual de 6 toneladas de poluentes atmosféricos, o sequestro de 440 toneladas de carbono, o armazenamento de 16.000 toneladas de carbono e a interceptação de 20.000m<sup>3</sup> de águas pluviais (City of Sydney, 2023).

### **Conclusões sobre os planos de arborização abordados**

As diferentes experiências abordadas demonstram a versatilidade da arborização urbana para atender a múltiplas demandas em diferentes contextos. Dado

o lento crescimento das espécies arbóreas, o planejamento e o gerenciamento de médio e longo prazo são essenciais para a maximização dos serviços ecossistêmicos. A realização de diagnósticos prévios para compreender as condições da cobertura de árvores existente e suas potencialidades, permite o estabelecimento de estratégias de ação concretas, que considerem as limitações políticas, ambientais e sociais locais. Em qualquer escala, a implementação de sistemas de monitoramento e a definição de critérios rigorosos são essenciais para garantir uma gestão sustentável, permitindo a quantificação de benefícios e a adaptação dinâmica do planejamento.

A experiência de Sydney revela que a gestão eficaz da mitigação das ICU não deve se restringir às áreas termicamente críticas, mas integrar as características sociodemográficas da população. A análise da capacidade adaptativa, sensibilidade e exposição dos habitantes permite a identificação das zonas de maior vulnerabilidade, subsidiando critérios de priorização que minimizam os impactos na saúde pública.

O plano de arborização implementado na cidade de Pequim, que conseguiu plantar 54 milhões de árvores em apenas quatro anos, demonstra que o planejamento urbano articulado ao compromisso governamental pode promover transformações profundas nos espaços urbanos. Além da inserção de árvores na cidade, o programa converteu espaços vagos, degradados ou com funções incompatíveis com as atividades urbanas em novos espaços verdes que servem à cidade.

O programa *MillionTreesNYC* exemplifica como a articulação entre os setores público e privado é fundamental para uma abordagem urbana abrangente, envolvendo todos os setores no processo de planejamento e execução. O reconhecimento de deficiências nas comunidades permitiu priorizar determinados setores para a implementação do plano.

Sob a ótica do planejamento urbano, os corredores verdes de Medellín constituem uma experiência exitosa na melhoria das condições ambientais mediante a inserção de vegetação e arborização ao longo de eixos viários e corpos d'água. O modelo desenvolvido serve de referência para o desenho de novas vias, visando um desenvolvimento resiliente em contextos de climas tropicais.

Apesar da crescente implementação de planos de arborização urbana para reduzir os efeitos das ICU, suportado por uma extensa literatura sobre seus benefícios, observa-se uma lacuna em estudos que avaliem sua eficácia. Essa

situação é agravada pela falta de protocolos padronizados para avaliar sua influência nas ICU e pela falta de monitoramento após e durante a implementação dos planos de arborização.

#### **1.3.4 Técnicas de medição da cobertura arbórea.**

A cobertura arbórea urbana é definida pela FAO (2016) como a porcentagem da cobertura de árvores de um município em relação à sua área total.

Diversas definições podem ser adotadas para o termo, as quais dependem, majoritariamente, das técnicas de medição implementadas. Tais elementos são fundamentais para sua delimitação: se a copa das árvores é tratada como uma superfície convexa contínua, incluindo aberturas, ou como uma combinação de elementos estruturais da copa; e se a medição pode ser feita apenas verticalmente ou não (Tang *et al.*, 2019).

Nesse sentido, três termos estão associados à cobertura das árvores: fechamento da copa, cobertura efetiva da copa e cobertura da copa. O fechamento da copa é a proporção do hemisfério do céu obscurecido pela vegetação quando visto de um único ponto de observação (Jennings; Brown; Sheil, 1999). A cobertura efetiva da copa pode ser definida como a porcentagem da área fixa coberta pela projeção vertical dos elementos estruturais do dossel, excluindo as pequenas aberturas do dossel (Rautiainen; Stenberg; Nilson, 2005). A cobertura da copa é definida como a porcentagem do solo coberta pela projeção vertical da copa (Jennings; Brown; Sheil, 1999). Enquanto o termo “fechamento da copa” difere dos outros dois termos por usar um ponto de vista específico, a “cobertura efetiva da copa” e a “cobertura da copa” diferem na inclusão ou não das pequenas aberturas dentro do diâmetro externo da copa.

No momento da medição, se forem usados instrumentos que tenham um ângulo de visão, como câmeras ou densiômetros esféricos, os resultados obtidos são estimativas de “fechamento de copa”. Os métodos tendem a superestimar a cobertura real; portanto, para medições precisas da projeção sobre o solo, a observação deve seguir uma direção vertical rigorosa (Jennings; Brown; Sheil, 1999; Korhonen *et al.*, 2006).

Os dados de cobertura de árvores geralmente são obtidos por meio de visitas de campo ou pela classificação de imagens aéreas ou de satélite. As medições de campo são consideradas a “realidade no terreno”, mas geralmente são realizadas em locais

limitados e pequenos, envolvendo altos custos relativos a tempo e pessoal. O uso de imagens de satélite, de resolução moderada (10m-30m), possibilitou o mapeamento da cobertura florestal global, por meio de políticas progressivas de abertura de dados (como a série histórica *Landsat*) e o aumento da capacidade de processamento de dados (Tang *et al.*, 2019).

Imagens de resolução muito alta (menos de 1m) permitem a visualização direta das copas das árvores. Apesar da alta resolução, a altura da vegetação não pode ser determinada a partir de imagens de satélite, o que dificulta, em alguns casos, a diferenciação entre estratos arbustivos e arbóreos. Tal limitação impacta definições normativas de "floresta", que estabelecem alturas mínimas para que uma espécie seja considerada árvore (Tang *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a tecnologia *LiDAR* (*Light Detection and Ranging* ou *Laser Imaging Detection and Ranging*) destaca-se ao medir com precisão as posições tridimensionais dos elementos florestais, fornecendo dados acurados sobre altura do dossel, Índice de Área Foliar (IAF) e cobertura arbórea (Tang *et al.*, 2019).

Duas categorias principais de sistemas *LiDAR* são usadas para determinar a cobertura de árvores: o de retorno discreto (*Discrete Return LiDAR - DRL*) e o de registro de forma de onda (*waveform*). Os sistemas *DRL* possuem alta resolução espacial, possibilitada pelo pequeno diâmetro da pegada (*footprint*) e pelas altas taxas de repetição do sistema, usado principalmente para mapeamento detalhado do solo e topografia da superfície das copas. A alta resolução desses sistemas permite desde a caracterização individual de copas até inventários florestais amplos. Entre as vantagens dos sistemas de registro de forma de onda está a capacidade aprimorada de caracterizar a estrutura do dossel, de descrever de forma concisa as informações do dossel em grandes áreas e de coletar conjuntos de dados em escala global (Lefsky *et al.*, 2002).

### **1.3.5 Estudo da influência da arborização nas ICU no Brasil**

O estudo da influência da arborização na redução da temperatura urbana não está necessariamente vinculado ao fenômeno das ICU. Almeida e Vasconcellos (2018) apresentam uma visão geral das metodologias mais aplicadas no país em pesquisas que correlacionam a vegetação arbórea à temperatura do ar em espaços urbanos.

Após analisarem 91 estudos desenvolvidos entre 1999 e 2017, compreendendo teses, dissertações e artigos, os autores identificaram que a maioria das investigações utilizou medições de campo para a coleta de dados (60,4%), seguidas por simulações (24,2%) e geoprocessamento (15,4%). Quanto à tipologia dos locais de medição, a arborização viária ocupou o primeiro lugar (38,5%), seguida por praças (27,5%), escala urbana (15,4%), parques (12,1%), coberturas verdes (5,5%) e fachadas (1,1%). Os trabalhos registraram reduções térmicas de 0,2°C a 10°C entre locais arborizados e não arborizados, evidenciando disparidades significativas conforme as condições estudadas. As cidades com maior volume de publicações foram São Paulo (11 estudos), Curitiba (8), Campinas (7), Cuiabá (7) e Brasília (5). Observou-se um incremento na produção científica a partir de 2005, com pico em 2014 (14 estudos) (Almeida; Vasconcellos, 2018).

Ao abordar especificamente as ICU no Brasil, nota-se uma predominância de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR). Uma análise realizada por Fialho, Fernandes e Correa (2019) sobre os métodos aplicados ao estudo das ICU no país revela que a análise de imagens térmicas é a abordagem mais frequente. Dos 21 estudos identificados entre 1985 e 2017, nove utilizaram imagens térmicas, quatro adotaram redes de miniabrigos, três empregaram transectos móveis, três usaram transectos fixos e dois recorreram à modelagem. Quanto à natureza do fenômeno, oito estudos trataram da ICU de superfície (com imagens térmicas), ao passo que os demais métodos focaram na temperatura do ar (ICU da camada do dossel). Enquanto as intensidades máximas das ICU de superfície variaram de 3°C a 20°C, as ICU da camada do dossel variaram entre 3,5°C e 12,8°C (Fialho; Fernandes; Correa, 2019).

A revisão sistemática realizada nesta pesquisa, que incluiu estudos que analisaram a influência da arborização nas ICU no período de 2004 a 2024, identificou um crescimento da produção científica nos últimos anos, tanto em âmbito nacional quanto internacional. No cenário global, o volume de publicações expandiu-se a partir de 2006, enquanto no Brasil o aumento tornou-se expressivo a partir de 2011. Foram identificados 267 documentos internacionais (artigos e capítulos de livros) frente a 70 publicações nacionais. A produção mundial concentra-se na China, seguida por Estados Unidos, Itália e Canadá, com o Brasil ocupando a nona posição.

No que tange às metodologias aplicadas nos estudos nacionais, esta revisão sistemática identificou o SR como o método mais recorrente (43,9%), seguido por



medições de campo (33,3%), abordagens mistas (12,1%), modelagem ou simulação (9,1%) e revisões documentais (1,5%). Tais resultados corroboram a relevância que o tema adquiriu nas últimas duas décadas e a consolidação do SR como a principal estratégia metodológica para investigar a influência da arborização nas ICU.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente capítulo divide-se em duas seções principais: Caracterização da área de estudo e Procedimentos metodológicos.

A caracterização da área de estudo detalha elementos relevantes do processo de expansão urbana que fundamentaram sua configuração atual, com ênfase na abordagem da arborização no planejamento e na legislação local. Na seção de procedimentos metodológicos, são especificadas as fontes de dados, técnicas e tipos de análise utilizados para quantificar as variáveis e atingir os objetivos da pesquisa.

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

A cidade de Goiânia, área de estudo da presente pesquisa, está localizada dentro do bioma Cerrado, o que lhe confere características climáticas e ambientais específicas. A seção a seguir está dividida em duas partes: O Cerrado, que aborda as principais características climáticas e de vegetação do bioma, seguida por Goiânia, na qual são detalhados aspectos ambientais, de crescimento e planejamento urbano, bem como a legislação municipal referente à arborização urbana.

#### **2.1.1 O Cerrado**

A cidade de Goiânia forma parte do bioma do Cerrado, definindo condições climáticas e ambientais particulares que interagem com o espaço construído.

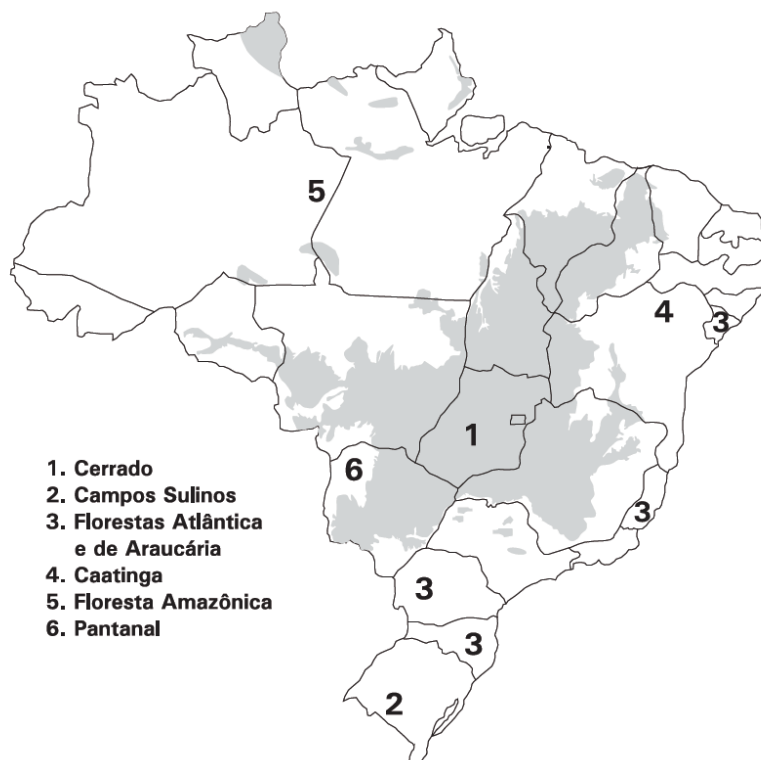
O Cerrado, situado entre 5° e 20° de latitude Sul e de 45° a 60° de longitude Oeste, ocupa a maior parte do Planalto Central do Brasil, representando 23% do território brasileiro. Sendo o segundo maior bioma do país depois da Floresta Amazônica, abrange aproximadamente 2 milhões de quilômetros quadrados, que compartilham os estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rondônia, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e o Distrito Federal (Figura 7) (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

#### **Clima e sazonalidade**

As condições meteorológicas e climáticas do bioma Cerrado são condicionadas por fatores geográficos, como a localização continental e a amplitude latitudinal e longitudinal, assim como pela dinâmica de centros de ação intertropicais e extratropicais. Tais centros podem ser positivos (centros de alta pressão subtropical do Atlântico Norte, Atlântico Sul, Pacífico Sul e massas polares) ou negativos

(depressões amazônicas do Chaco). (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

Figura 7 - Distribuição geográfica dos principais biomas do Brasil.



Fonte: Reprodução de Sano, Almeida e Ribeiro (2008, p. 153).

A interação sazonal desses sistemas atmosféricos confere ao Cerrado uma estacionalidade climática distinta, caracterizada por dois períodos bem definidos: uma estação chuvosa, compreendida entre setembro-outubro e março-abril, e uma estação seca, entre abril-maio e setembro-outubro, esta última marcada por severo déficit hídrico decorrente da redução drástica dos índices pluviométricos. A estação que apresenta déficit hídrico, que costuma durar entre 5 e 6 meses, tem um peso importante tanto no aspecto ecológico, definindo os limites de tolerância para as espécies vegetais, como nas atividades agrícolas, uma vez que os recursos hídricos para irrigação são escassos no Cerrado (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

De acordo com a classificação climática elaborada por Köppen, o Cerrado apresenta um clima megatérmico ou tropical úmido (A), com subtipo clima de savana, com inverno seco e chuvas máximas no verão (w), que predomina em grande parte do bioma, incluindo todo o estado de Goiás. Porções do bioma situadas no sul de Minas Gerais e do Mato Grosso do Sul apresentam clima mesotérmico ou temperado quente (C), caracterizado por invernos secos (tropical de altitude) e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (wa) (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

Alguns estudos mostram a tendência de mudanças no aumento das temperaturas, diminuição geral das chuvas e redução da umidade do ar no Cerrado.

Hofmann *et al.* (2021), em uma análise realizada entre 1961 e 2019, identificou um aumento nas temperaturas médias máximas de 2,2 a 4°C e de 2,4 a 2,8°C nas médias mínimas no Cerrado. Além disso, a umidade relativa do ar diminuiu 15%, tendência que pode reduzir o resfriamento noturno que permite atingir o ponto de orvalho nas primeiras horas da noite, principal recurso hídrico para a biota durante o período de estiagem.

Braga e Laurini (2024) apontam que a Amazônia e o Cerrado são os biomas que apresentam maior tendência de aumento das temperaturas médias, identificando um aumento de 0,85°C entre 1961 e 2023. Os autores sugerem que esse aumento é causado pela combinação do aquecimento global com o desmatamento nesses biomas.

De acordo com Rodrigues *et al.* (2022), 46% da cobertura nativa do cerrado foi desmatada para o desenvolvimento de pastagens e culturas, influenciando o clima regional ao reduzir a evapotranspiração (ET), aumentar as temperaturas superficiais terrestres (TST) e reduzir as precipitações. Por meio de imagens de satélite durante o período de 2006 a 2019, eles conseguiram identificar que a substituição de florestas por terras de cultivo e pastagens aumenta em média 3,5°C as TST e reduz a ET em 44% e 39%, respectivamente. As transições de savanas florestais para terras de cultivo e pastagens aumentam em média 0,9°C as TST e reduzem a ET em 27% e 21%, respectivamente. As transições de prados nativos para terras de cultivo e pastagens aumentam 0,9°C e 0,6°C as TST, respectivamente, aumentando em 15% a ET anual. Até 2019, as mudanças na cobertura e uso do solo reduziram em 10% a água que chega à atmosfera e aumentaram em média 0,9°C as TST ao longo do Cerrado, em comparação com a base histórica da vegetação nativa.

## **Vegetação**

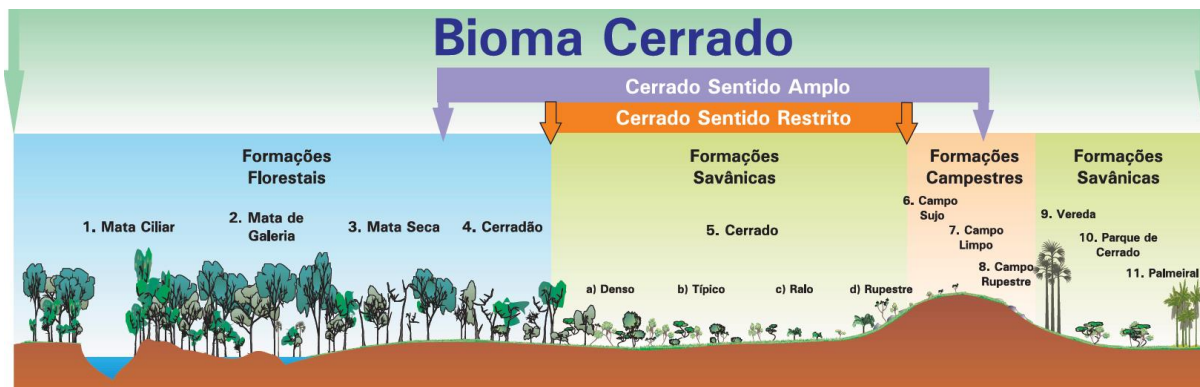
Do ponto de vista fitofisionômico<sup>7</sup>, no Cerrado distinguem-se principalmente 11 tipos de vegetação, agrupados em formações florestais (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), savânicas (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado,

---

<sup>7</sup> Fitofisionomia é um termo técnico utilizado para a classificação e descrição das formações vegetais com base em sua aparência e composição florística. Ela considera fatores como a estrutura, formas de crescimento e distribuição espacial das plantas.

Palmeiral e Vereda) e campestres (Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre) (Figura 8).

Figura 8 - Esquema adaptado das principais fitofisionomias do bioma Cerrado.



Fonte: Reprodução parcial de Sano, Almeida e Ribeiro (2008, p. 165).

As formações florestais caracterizam-se pelo predomínio arbóreo e dossel contínuo. A Mata Ciliar e a Mata de Galeria destacam-se por sua associação a corpos hídricos. A Mata Ciliar, marginal a rios de médio e grande porte, apresenta espécies caducifólias de 20 a 25m de altura, com coberturas que oscilam entre 90% no período chuvoso e menos de 50% na seca. A Mata de Galeria, composta principalmente por indivíduos perenes e com altura entre 20 e 30m, forma corredores fechados sobre cursos d'água de pequeno porte, garantindo coberturas constantes de 70 a 95% (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

Em zonas de interflúvio e solos bem drenados, ocorrem a Mata Seca e o Cerradão. A Mata Seca, marcada por espécies decíduas e com altura de 15 a 25m, apresenta coberturas entre 70 e 95% na estação chuvosa e menores que 50% na seca, atingindo menos de 35% na tipologia Decídua. O Cerradão é composto por estratos arbustivo e herbáceo com escassez de gramíneas, sendo definido por Rizzini (1997) como "floresta mesófila esclerofila"<sup>8</sup>. Nesta formação, predominam as espécies semidecíduas com altura de 8 a 15m, atingindo coberturas entre 50 e 90%, variando conforme a sazonalidade. A penetração luminosa entre as copas favorece o desenvolvimento do estrato inferior (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

As formações savânicas caracterizam-se por estratos arbustivo-arbóreos esparsos sobre um estrato gramíneo, distinguindo-se pela ausência de um dossel

<sup>8</sup> Esclerofila refere-se aos vegetais que apresentam folhas duras, coriáceas (Ferri; Menezes; Monteiro, 1981) .

contínuo. O Cerrado sentido restrito apresenta árvores de baixo porte com caules tortuosos, ramificações irregulares e evidências de queimadas, subdividindo-se conforme a densidade e o substrato. O estrato inferior é constituído por arbustos e subarbustos esparsos, frequentemente dotados de xilopódios (órgãos subterrâneos perenes), que garantem a regeneração vegetativa após distúrbios por fogo ou corte. O Parque de Cerrado é composto por agrupamentos arbóreos de altura entre 3 e 5m sobre microrrelevos ("murundus" ou "monchões"), formando coberturas arbóreas entre 5 e 20%. O Palmeiral é composto principalmente por palmeiras, classificadas conforme a espécie predominante (Babaçual, Buritizal, Guerobal e Macaubal). A Vereda, embora análoga ao Palmeiral, diferencia-se pela exclusividade da palmeira *Mauritia flexuosa* (buriti), a qual se encontra circundada por um estrato arbustivo-herbáceo diferenciado (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

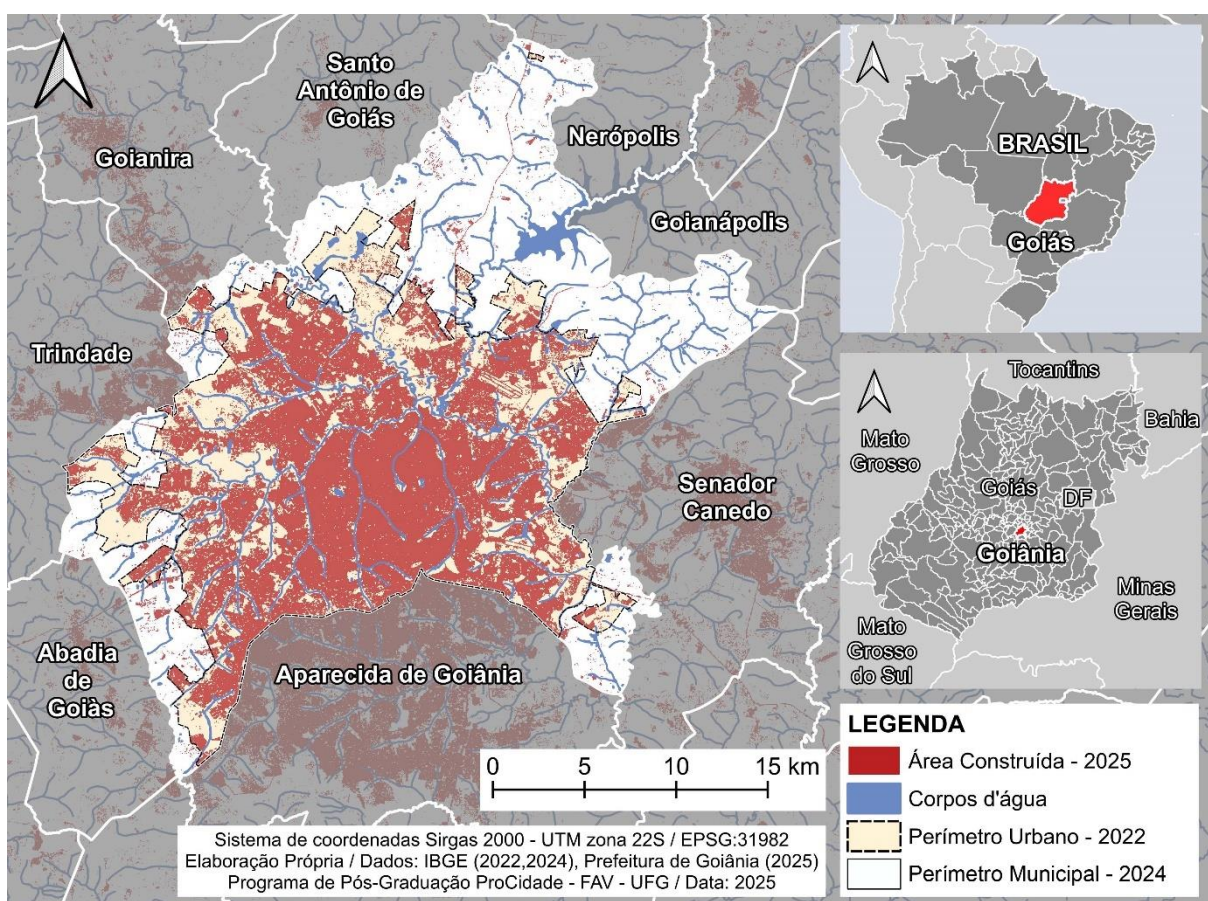
As formações campestres caracterizam-se pela predominância de estratos herbáceos e arbustivos, com ausência de elementos arbóreos, compreendendo três tipologias fitofisionômicas principais: o Campo Sujo, o Campo Limpo e o Campo Rupestre. O Campo Sujo abriga arbustos e subarbustos esparsos, diferenciados de acordo com a drenagem dos solos (Campo Sujo Seco – bem drenado / Campo Sujo Úmido – mal drenado). O Campo Limpo caracteriza-se pela predominância de estratos herbáceos, com escassez de arbustos e ausência de elementos arbóreos, ocorrendo preferencialmente em encostas, chapadas, olhos d'água, periferias de Veredas e margens de Matas de Galeria. Sua composição florística é condicionada pela profundidade do lençol freático (Campo Limpo Seco / Campo Limpo Úmido). Por fim, no Campo Rupestre predominam estratos herbáceo-arbustivos e arvoretas subdesenvolvidas (altura < 2m) esparsas, localizados em áreas de afloramentos rochosos e microrrelevos acidentados, geralmente em altitudes superiores a 900m (excepcionalmente a partir de 700m). O ambiente é condicionado por ventos constantes e elevada amplitude térmica diária (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

### **2.1.2 Goiânia**

A área de estudo corresponde à cidade de Goiânia, capital do estado de Goiás, localizada na região centro-oeste do Brasil (Mapa 1). Estabelecida em 24 de outubro de 1933 em substituição à cidade de Goiás (antiga Vila Boa), Goiânia configura-se como uma capital jovem perante os núcleos urbanos brasileiros remanescentes do século XVI. Sua implantação no setor meridional do estado (que outrora abrangia o

território do Tocantins), integrou um projeto desenvolvimentista orientado à convergência política com a região sudeste e à aceleração do processo de ocupação do Centro-Oeste do país, em alinhamento com as diretrizes da revolução de 1930 (IBGE, 2023b; Nascimento; Oliveira, 2015).

Mapa 1 – Localização do Município de Goiânia – GO.



Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2022,2024) e Prefeitura de Goiânia (2025).

De acordo com o censo populacional do 2022, o município de Goiânia possui 1.437.366 habitantes (IBGE, 2023a), sendo a cidade mais populosa do estado e a 10ª no contexto brasileiro, com uma densidade populacional de 1.970,90 hab/km² (IBGE, 2023b). O município possui uma extensão territorial de 729,296 km², com uma área urbanizada de 301,55 km², equivalente a 41,35% de sua área territorial (IBGE, 2022).

O município destaca-se pela oferta de ensino superior, prestação de serviços públicos (com ênfase no setor de saúde) e dinamismo nas atividades agropecuárias e industriais, fatores que impulsionaram fluxos migratórios provenientes de Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Pará e Piauí (Ribeiro, 2004).. Essa dinâmica migratória, associada ao êxodo rural e a uma taxa de crescimento populacional média anual de



0,83% (IBGE, 2023b), condiciona uma intensa expansão urbana. Tal processo resultou na conurbação com Aparecida de Goiânia ao sul da cidade, e continua sua expansão em direção ao noroeste com Goianira, a oeste com Trindade e a leste com Senador Canedo.

Goiânia é atualmente a cidade sede da Região Metropolitana de Goiânia (RMG), criada em 1999 pela Lei Complementar Estadual Nº27. No momento de sua criação, a RMG era composta pelos municípios de Goiânia, Abadia de Goiás, Aparecida de Goiânia, Aragoiânia, Goianópolis, Goianira, Hidrolândia, Nerópolis, Santo Antônio de Goiás, Senador Canedo e Trindade, posteriormente foram incorporados os municípios de Bela Vista de Goiás (2004), Guaporé (2005), Bonfinópolis, Brazabrantes, Caldazinha, Caturaí, Nova Veneza, Terezópolis de Goiás (2010), Inhumas e Santa Bárbara de Goiás (2019), totalizando 21 municípios na atualidade. A RMG abriga 35,84% da população de Goiás, equivalente a 2.529.092 habitantes (IBGE, 2023a), ocupando um área de 7.480,54km<sup>2</sup> (IBGE, 2024).

A influência de Goiânia foi privilegiada por abrigar o comando político e administrativo do estado, contar com uma localização estratégica e dispor de boas redes de infraestruturas construídas pelo governo federal, criadas para que a capital federal Brasília, a uma distância de Goiânia de 207 km, mantivesse conexões rodoviárias com todas as sedes dos governos estaduais. Além disso, a disposição radial das rodovias da cidade permite conectá-la a todas as localidades do estado, facilitando o acesso a produtos e serviços especializados que posicionam Goiânia como um polo de atração para os municípios vizinhos (Martins; Nucada, 2023).

### **Características ambientais**

Goiânia, localizada em uma região de planalto, possui uma topografia relativamente plana, com poucas áreas de declives significativos. O ponto mais alto, o Morro do Mendanha, tem uma altura de 841m acima do nível do mar, enquanto o ponto mais baixo fica a 657m, mantendo uma altitude média de 749m (Novaes; Ramalho, 2024).

Do ponto de vista hidrográfico, Goiânia está integralmente inserida na Bacia do Rio Paranaíba. Seus principais cursos d'água são o Rio Meia Ponte, afluente direto do Paranaíba, e o Ribeirão João Leite e o Ribeirão Anicuns, ambos afluentes do Meia Ponte, que confluem dentro da cidade. As nascentes do Ribeirão Anicuns se estendem por grande parte das regiões sul e oeste da cidade, formando parte das 13



sub-bacias em que se divide o município (Novaes; Ramalho, 2024).

Como indicado anteriormente, Goiânia faz parte do bioma Cerrado, com um clima tropical úmido (Aw), com subtipo clima de savana, de acordo com a classificação de Köppen, com uma estação seca e uma estação chuvosa bem definida.

A estação chuvosa se estende de outubro a março (83% a 88% da precipitação) com índices mais altos entre os meses de dezembro e março que excedem a média mensal de 250mm. A estação seca se estende de abril a setembro, com precipitação próxima de zero (média abaixo de 10mm de junho a agosto) e baixa umidade relativa que pode atingir valores abaixo de 20%, especialmente nos meses de agosto e setembro (Casaroli *et al.*, 2018).

Com base em dados do período de 1979 a 2015, Casaroli *et al.* (2018) identificaram uma tendência de redução de 3,7 mm por ano nas precipitações da cidade. A precipitação anual média restringiu-se a 73 dias, contra 292 dias de estiagem, evidenciando uma frequência pluvial limitada a 20% do período anual. A análise realizada mostra uma tendência de aumento de um dia seco a cada 25,9 anos e de diminuição de um dia chuvoso a cada 23,8 anos.

As temperaturas mais altas ocorrem entre setembro e novembro, com médias entre 25°C e 26,3°C, máximas entre 34°C e 31,3°C e mínimas entre 19,4°C e 20,3°C, com um recorde de temperatura máxima de 41,2°C em outubro. Os meses mais frios são junho e julho, com médias entre 22,3°C e 22,5°C, máximas entre 30°C e 30,6°C e mínimas entre 15,2°C e 14,8°C (INMET, 2025).

Uma análise realizada por Nascimento e Oliveira (2011) para o período de 1986 a 2010 identifica no município um aumento de 3,5°C nas temperaturas superficiais terrestres (TST) médias e um aumento de 7°C nas máximas. O estudo destaca o aumento das áreas com temperaturas mais elevadas durante o período. Áreas com TST inferiores a 22°C reduziram-se de 49,8% para 17,3%, enquanto as áreas de 26,1 a 28°C aumentaram de 0,6% para 24,9%. Áreas com TST entre 28,1 e 38°C, inexistentes no cenário de 1986, registraram uma expansão espacial equivalente a 13,6% da extensão municipal em 2010.

Publicada em 2024, a atualização da norma ABNT NBR 15220-3:2024 estabeleceu um novo zoneamento bioclimático para auxiliar as análises de desempenho térmico aplicadas a edificações residenciais e não residenciais. Composta por 12 subzonas na escala municipal, a norma define regiões geográficas

cujos elementos climáticos, que intervêm nas relações entre o ambiente construído e o conforto térmico, comportam-se de forma homogênea. As três partes que compõem a atualização da norma permitem que projetistas e profissionais contem com uma base confiável para a definição de estratégias de conforto térmico e eficiência energética (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024).

A maior parte do estado de Goiás, incluindo Goiânia, encontra-se dentro da zona 4B, denominada “levemente quente e seca”. Em relação aos parâmetros climáticos médios anuais, a norma indica uma temperatura de bulbo seco de 24,27°C, umidade relativa de 64,67%, radiação horizontal diária de 5.520,65 kWh/m<sup>2</sup>.ano e amplitude térmica de 11,66°C (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024).

A cidade se destaca pela sua proporção de vegetação urbana, atingindo uma taxa de 0,94 m<sup>2</sup> de área verde por habitante, de acordo com um estudo realizado pela Agência Municipal do Meio Ambiente (AMMA) no ano de 2007. Para 2008, a AMMA contabiliza 187 unidades de conservação que somam uma área total de 16.567.685,17 m<sup>2</sup>, incluindo 16 parques implantados e 6 em processo de implantação, bem como cerca de 401 praças espalhadas pela cidade (AMMA, 2008).

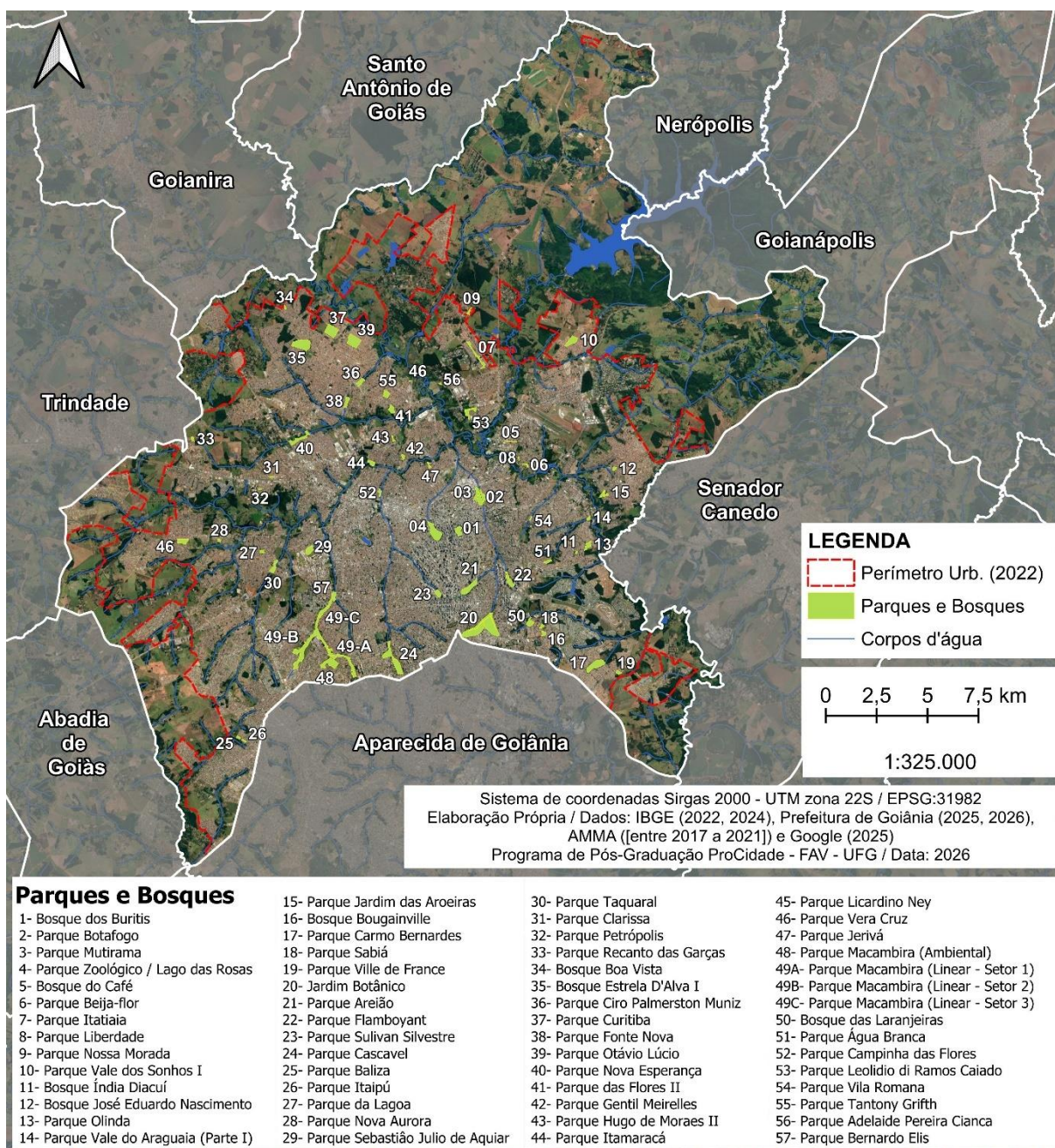
Um projeto emblemático desenvolvido pela prefeitura de Goiânia, é o Programa Urbano Ambiental Macambira Anicuns (PUAMA). Focado na área de influência direta das bacias hidrográficas do córrego Macambira e do Riberão Anicuns, o PUAMA prevê a implantação de um parque linear com 24km de extensão ao longo desses dois cursos d'água (com largura mínima de 30m em cada margem), bem como a criação do Parque Ambiental Urbano Macambira, com uma área prevista de 25,5 hectares. O programa beneficiará 131 bairros, recuperando espaços socioambientalmente degradados por meio da implantação de infraestrutura urbana e social, composta por obras de pavimentação, drenagem, iluminação, escolas, unidades básicas de saúde da família, centros comunitários, quadras poliesportivas, entre outros (Prefeitura de Goiânia, [2015?]).

Para sua execução, o programa conta com recursos públicos do Município e com financiamento do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Em 2015, foram iniciadas as três primeiras etapas do parque linear, bem como o Parque Ambiental Macambira. O sistema de parques proposto pelo programa prevê um aumento do índice de áreas verdes de 3,6 m<sup>2</sup>/hab (Prefeitura de Goiânia, [2015?]).

De acordo com informações disponíveis no site da Prefeitura de Goiânia (2026)

e da AMMA ([entre 2017 e 2021a]), bem como no Mapa Digital Fácil (Prefeitura de Goiânia, 2025), a cidade conta atualmente com 201 áreas designadas como parques e bosques, 12 delas localizadas dentro de condomínios fechados, ocupando uma área aproximada de 17.230.494,84m<sup>2</sup>. Dentre essas áreas, 57 são de acesso público e contam com infraestrutura (Mapa 2), totalizando 6.786.733,84m<sup>2</sup> (as áreas são aproximadas, uma vez que há discrepâncias nos dados apresentados pelas fontes).

Mapa 2 – Localização dos Parques e Bosques com acesso público e infraestrutura no Município de Goiânia – GO.



Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2022, 2024), Prefeitura de Goiânia (2026), AMMA ([entre 2017 a 2021]) e Google (2025).

## Planejamento urbano

A cidade de Goiânia tem uma tradição em matéria de planejamento urbano desde o seu início, totalizando 6 planos diretores até 2025.

O plano inicial da cidade foi projetado por Atílio de Correia Lima em 1933, designado por Pedro Ludovico Teixeira, interventor federal do estado de Goiás nomeado por Getúlio Vargas, presidente na época do Brasil e líder da revolução de 1930. A criação da nova capital do estado de Goiás foi impulsionada pelo movimento “marcha para o oeste”, uma iniciativa do governo para o progresso e ocupação do centro-oeste do país, incentivando a migração de pessoas para o centro do país, o que só seria possível com a garantia de uma infraestrutura básica conectando o centro-oeste com o sul do país (IBGE, 2023b).

O plano original formulado por Atílio Corrêa Lima estava baseado no conceito de cidades-jardim de Ebenezer Howard (Inglaterra), sob uma estrutura radioconcêntrica, na qual os principais eixos viários convergem para a Praça Cívica, respeitando a topografia. Com uma capacidade para 50 mil habitantes, o plano propunha uma cidade setorizada, composta por 5 zonas: o Centro Cívico, o Centro Comercial, as Áreas Urbanas e Suburbanas, a Zona Industrial (ao norte) e a Zona Residencial (Nascimento; Oliveira, 2015).

O plano foi reformulado por Armando Augusto de Godoy em 1938, embora tal intervenção não seja classificada pela literatura como o segundo plano urbanístico. As principais modificações incluíram a criação da Praça do Cruzeiro, a delimitação de quatro novas zonas (Diversões, Universitária, Militar e Residencial de Luxo) e a redefinição dos limites setoriais e das áreas livres. O planejamento de Godoy estabeleceu etapas de expansão cronológica, iniciando-se pelos setores Central e Norte, seguidos pelo Setor Sul após seis anos e, posteriormente, pelo Setor Oeste. O plano previu, ainda, a implantação de cidades-satélites e de um cinturão verde (constituído por parques, jardins e praças) destinado à proteção e conservação do núcleo urbano (Nascimento; Oliveira, 2015).

Com a aprovação do Código de Edificações de Goiânia em 1947, o setor privado passou a atuar na execução de novos parcelamentos, condicionada à implementação prévia de infraestrutura básica. As pressões para facilitar o parcelamento levou a supressão dessas exigências no início do 1950, levando a proliferação de loteamentos sem infraestruturas adequadas. A cidade, desenvolvida até então com financiamento

do governo, começa a se distanciar dos planos iniciais, experimentando um crescimento acelerado na construção de novos loteamentos, sobretudo na zona leste e oeste da cidade, destinados principalmente a migrantes com poucas condições financeiras (Nascimento; Oliveira, 2015).

As décadas de 1950 e 1960 foram marcadas pela proliferação de loteamentos comercializados sem a anuência do poder público e pela ocupação urbana por integrantes do Movimento dos Sem-Terra, impulsionados pela ausência de parâmetros urbanísticos para loteamentos e de regularização fundiária, bem como a falta de diretrizes que garantissem a continuidade do plano original (Souza, 2020). Entre 1950 e 1964, foram aprovados aproximadamente 183 loteamentos sem obedecer aos critérios técnicos, levando à formação de áreas com infraestrutura inadequada e ocupação territorial precária (Rodovalho, 2008).

Com o reconhecimento do crescimento descontrolado da cidade, em 1959 o governo do Estado de Goiás convidou o arquiteto Luís Saia para desenvolver um novo plano diretor (Souza, 2020). Nesta proposta, o arquiteto integrou dimensões históricas e administrativas à identificação de vetores de polarização e da configuração urbana, segmentando a cidade em zonas para a aplicação de diretrizes específicas. Embora concluído em 1962, o plano não foi executado, por ser considerado pelo regime autoritário estabelecido em 1964 como "produto do comunismo" (Ribeiro, 2004). Dessa forma, entre 1960 e 1970, o crescimento dos loteamentos irregulares continuou, com destaque nas regiões central e sul e, em maior medida, para as regiões periféricas norte e oeste.

Impulsionado pelas políticas de fomento federal do Serviço Federal de Habitação e Urbanismo (SERFHAU), direcionadas a municípios com planos de urbanização, o prefeito Iris Rezende contratou, em 1967, a empresa Serete S/A Engenharia para a elaboração do Plano de Desenvolvimento Integrado de Goiânia (PDIG). Desenvolvido entre os anos de 1968 e 1969 e coordenado pelo arquiteto Jorge Wilhelm, o PDIG é publicado em 1969 sob a lei N°4.272 desse ano (Souza, 2020). Visando orientar o ordenamento territorial, o PDIG consolidou a infraestrutura no setor oeste mediante a implementação de malha viária e pavimentação asfáltica, condicionando o vetor de expansão urbana às regiões sul, sudoeste e oeste (Nascimento; Oliveira, 2015).

Incentivado pelo PDIG, foram criados em 1975 os principais eixos de transporte coletivo pela Lei N°5.019 08/10/1975, que se mantêm até hoje e orientam em grande

medida o crescimento urbano da cidade. Os eixos criados são: o eixo norte/sul (Av. Goiás / Rua 90), o eixo leste/oeste (Av. Anhanguera), os eixos das Av. T-7, T-9 e T-63 ao sul, e os eixos nas Av. 24 de Outubro, Castelo Branco e Padre Wendel na região oeste imóveis (Souza, 2020). Como resultado da expansão da malha viária asfaltada, que consolidou a implantação de conjuntos habitacionais periféricos, surgiram grandes vazios urbanos, objeto de retenção especulativa por agentes imobiliários visando à valorização futura (Oliveira, 2005).

Entre as décadas de 1960 e 1990, Goiânia experienciou um processo de verticalização sem critérios urbanísticos, evidenciando a falta de controle do poder público sobre o ordenamento urbano. Concentrado inicialmente em áreas consolidadas e de maior densidade, como o Centro e o Setor Oeste, o processo de verticalização se estendeu à parte alta do Setor Bueno, em áreas não contíguas aos setores consolidados, bem como ao Setor Oeste, Setor Bela Vista, Setor Aeroporto e Setor Leste Universitário (Nascimento; Oliveira, 2015).

No contexto da constituição da república em 1988, é criado o Conselho Municipal de Política Urbana (COMPUR) em Goiânia, a partir da Lei Complementar N°010 de 30/12/1991. O PDGI foi reformulado em 1992 e publicado na Lei Complementar N°015, de 30/12/1992, atendendo às novas tendências de crescimento, que incluem demandas por transporte coletivo, saúde, educação, infraestrutura, entre outras. O novo Plano Diretor (PD) modifica o perímetro urbano em seu primeiro artigo, adaptando-se às dinâmicas do mercado imobiliário, caracterizadas pelo desenvolvimento de loteamentos periféricos (Nascimento; Oliveira, 2015; Souza, 2020).

As diretrizes do plano compreendem a elaboração de nova legislação de uso e ocupação do solo, a modernização administrativa, o fomento ao uso comercial e de serviços no núcleo central da cidade e a definição de programas para o perímetro urbano. A proposta contempla a análise de subcentralidades e vazios urbanos, o diagnóstico da estrutura urbana e a proposição de instrumentos estratégicos para a implementação do PDGI (Souza, 2020).

No contexto da década de 1990, emergiram em Goiânia os parcelamentos sob a forma de loteamentos ou condomínios fechados. Tal tipologia foi formalizada mediante alteração na Lei N°4.526/1972 pela Lei de Planos Urbanísticos (Lei N°7.042/1991), que instituiu as categorias de Núcleo Residencial Fechado e Conjunto



Residencial Horizontal, facultando a transferência da exclusividade de uso e da responsabilidade pela gestão do sistema viário e das áreas verdes no interior dos loteamentos aos adquirentes, via concessão administrativa (Souza, 2020).

A Carta de Risco de Goiânia, elaborada em 1993, empregou uma abordagem holística fundamentada em variáveis físicas, morfológicas e de ocupação para classificar a aptidão do território. O documento identificou as regiões centro-sul e sudoeste como aptas à urbanização, condicionadas à implementação de sistemas de drenagem e contenção erosiva. Em contrapartida, as planícies, terraços, fundos de vale e as porções norte e nordeste foram consideradas inadequadas, destinando-se à preservação ambiental e recarga de mananciais (Nascimento; Oliveira, 2015).

Em 2008, é publicada uma nova carta de risco para o município, reiterando a alta suscetibilidade da região nordeste e dos fundos de vale urbanos, classificando as demais áreas do município com graus de suscetibilidade média ou baixa, sujeitas a aptidões e restrições específicas (Nascimento; Oliveira, 2015).

No contexto da criação do estatuto das cidades em 2001 (Lei N°10.257 de 10/07/2001), é contratado pela prefeitura no ano de 2002 o quinto plano urbanístico para a cidade. O plano tramitou por cinco anos até sua aprovação e publicação, pela Lei Complementar N°171/2007, sendo seus estudos técnicos, diagnósticos e levantamentos financiados e executados por equipe técnica contratada pelo setor imobiliário (Souza, 2020).

De acordo com o texto, o PD de 2007 foi desenvolvido observando as disposições previstas no Estatuto das Cidades e na Lei Orgânica do Município de Goiânia, buscando garantir o “direito à cidade sustentável, compatibilizando o crescimento econômico com a proteção ambiental, o respeito à biodiversidade e à sociodiversidade” (Goiânia, 2007a, cap. I, art. 3°, Inc. I).

Com base nas características físico-ambientais, socioeconômicas e culturais, o PD propõe uma macroestruturação que utiliza a malha viária básica e os corredores de transporte coletivo como elementos estruturantes da ocupação urbana, priorizando a implantação de corredores exclusivos, bem como o investimento em habitação social (Nascimento; Oliveira, 2015).

O PD incorpora instrumentos voltados ao preenchimento de vazios urbanos, delimitando o território em macrozonas para fins de zoneamento, com o objetivo de promover um crescimento urbano concêntrico compatível com os preceitos da cidade

compacta. Segundo levantamento da Secretaria Municipal de Planejamento e Urbanismo (SEPLAM) em 2007, baseado no cadastro imobiliário, a cidade apresentava aproximadamente 110 mil lotes vagos (Nascimento; Oliveira, 2015; Ribeiro; Milagre; Resende, 2024).

Para promover a ocupação de lotes vagos, o plano estabelece o critério de contiguidade a outro loteamento já implantado no artigo 89 do PD, exigindo a ocupação mínima de 30% construída e ocupada. Adicionalmente, a Lei Complementar N°181 de 01/10/2008 criada a partir do PD, a qual “dispõe sobre solo urbano não edificado, subutilizado ou não utilizado”, incorpora as medidas de compulsoriedade indicadas pelo Estatuto das Cidades, estabelecendo um incremento progressivo do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) nos lotes vagos, na busca do aproveitamento do solo urbano (Goiânia, 2008c).

Na busca por uma ocupação equilibrada, que pudesse compatibilizar a infraestrutura instalada com as densidades populacionais, e considerando os critérios estabelecidos na Carta de Risco de Goiânia publicada em 2008, o PD estabelece quatro áreas de ocupação diferenciada:

- I - Áreas Adensáveis, para as quais serão incentivadas as maiores densidades habitacionais e de atividades econômicas, sustentadas pela rede viária e de transporte,...
- II - Áreas de Desaceleração de Densidades, para as quais serão dirigidas ações de controle e redução do atual processo de densificação urbana;
- III - Áreas de Adensamento Básico, correspondente às áreas de baixa densidade, para as quais será admitida a duplicação dos atuais padrões de densidade, visando a correlação das funções urbanas em menores distâncias e a otimização dos benefícios sociais instalados,...
- IV - Áreas de Restrição à Ocupação, para as quais serão estabelecidas normas de restrição parcial ou absoluta à ocupação urbana. (Goiânia, 2007a, cap. II, art. 110)

Conforme Souza (2020), os instrumentos previstos no Estatuto da Cidade, como a Outorga Onerosa do Direito de Construir, a Transferência do Direito de Construir, a Operação Urbana Consorciada e a Parceria Público-Privada, foram utilizados para subsidiar a flexibilização de índices urbanísticos estabelecidos no PD. Tal aplicação viabilizou a ampliação de limites de área construída e de altura das edificações, além de alterações na taxa de permeabilidade, posicionando o município entre as capitais brasileiras com os maiores gabaritos de construção.

Em 2022, é publicado o sexto e atual PD de Goiânia, sob a Lei Complementar N°349, de 04/03/2022, em um contexto polêmico em relação à participação popular



exigida para sua discussão e aprovação. A revisão do PD de 2007, que deveria ter sido concluída em 2017 para cumprir o prazo decenal estabelecido pelo Estatuto das Cidades, é iniciada precisamente em 2017, revelando fragilidades institucionais e a influência de interesses econômicos e políticos que orientaram as decisões urbanísticas (Côrtes, 2025).

O novo plano traria consigo a atualização de 14 leis complementares, entre as quais se incluem a Lei de Vazios Urbanos (Lei Complementar N°371 de 04/01/2024) e a Lei que regulamenta a Outorga Onerosa do Direito a Construir (Lei Complementar N°373 de 19/01/2024), entre outras. O plano mantém os corredores viários de transporte coletivo como componentes estruturais do crescimento e densificação urbana, denominados Eixos de Desenvolvimento (ED), compostos por 12 corredores (Goiânia, 2022). Também mantém a classificação de áreas de ocupação diferenciada no artigo 139, como estratégia para o aproveitamento das infraestruturas existentes, anexando algumas unidades territoriais:

- I - Área de Restrição Ambiental Urbana (ARAU), para a qual serão estabelecidas normas de restrição parcial ou absoluta ao uso e à ocupação do solo urbano, devido a seus aspectos ambientais existentes e preponderantes sobre os demais;
- II - Área de Ocupação Sustentável (AOS), para a qual serão estabelecidas limitações urbanísticas que visam ocupações de baixa densidade habitacional, com intuito de mitigar os impactos do adensamento, compatibilizando as funções urbanas com a preservação do meio ambiente;
- III - Área de Patrimônio Cultural (APAC), para a qual serão estabelecidas restrições e limitações urbanísticas ao uso e ocupação do solo, bem como incentivos à manutenção do bem tombado, mediante a aplicação de instrumentos urbanísticos, visando a correlação das funções urbanas com a preservação dos bens de patrimônio histórico e artístico tombados e suas áreas de entorno;
- IV - Área de Adensamento Básico (AAB), para a qual serão estabelecidas limitações urbanísticas que visam ocupações de baixa densidade habitacional e sua relação harmoniosa com as atividades econômicas, resultantes da correlação das funções urbanas em menores distâncias e a otimização dos benefícios sociais instalados;
- V - Área Adensável (AA), para a qual serão incentivadas as maiores densidades habitacionais e a alta concentração de atividades econômicas, sustentadas pela rede viária e de transporte público;
- VI - Área de Desaceleração de Densidade (ADD), para a qual serão dirigidas ações de controle e redução do atual processo de densificação urbana instalado, servindo como medida compensatória dos impactos. (Goiânia, 2022, cap.II, art. 139).

Os índices de aproveitamento foram modificados de acordo com as unidades territoriais, estabelecendo um máximo de 5 vezes em relação à área do terreno em Áreas de Desaceleração de Densidade (Art. 196, Inc. I) e até um máximo de 6 vezes

em Áreas Adensáveis (Art. 196, Inc. II). Em relação à área permeável, o plano estabelece um mínimo de 15% para os imóveis que se encontram dentro do perímetro urbano, garantindo um mínimo de 10% de cobertura vegetal permeável (Art. 192). No caso de Áreas de Ocupação Sustentável e Áreas de Restrição Ambiental Urbana passíveis de ocupação (Art. 194), é exigida uma área mínima de 25% de cobertura vegetal permeável (Goiânia, 2022).

Barreira *et al.* (2023) apontam sobre algumas mudanças problemáticas do novo PD em relação ao anterior. A liberação da ocupação em fundos de vale para construção, o adensamento irrestrito em áreas anteriormente protegidas, a supressão de diretrizes voltadas para habitação de interesse social e a ampliação do limite de expansão urbana sem a devida consulta pública, além de flexibilizar as restrições estabelecidas para a ocupação de áreas ambientalmente frágeis, com impactos significativos para a região norte da cidade.

Segundo Souza (2020), embora Goiânia tenha experienciado o desenvolvimento de seis planos urbanísticos, sua configuração urbana reflete problemáticas típicas das metrópoles brasileiras sob gestão territorial pautada pelo capital privado. Esse cenário é caracterizado pela dispersão da malha urbana, segregação socioespacial, apropriação privada de espaços públicos e pela formação de centralidades verticalizadas em áreas de interesse estratégico para o mercado imobiliário.

Apesar dos instrumentos estabelecidos nos PD, destinados a promover e ocupar lotes vagos, a cidade ainda mantém altos índices de desocupação. De acordo com informações não oficiais, em 2022 a cidade contava com 114.624 terrenos baldios, o equivalente a 28,87% do total de lotes (Abreu, 2023), evidenciando a ineficácia dos instrumentos aplicados para esse fim.

Em relação à gestão das áreas verdes, os parques urbanos, que deveriam ser espaços de convivência e lazer acessíveis a todos, são frequentemente utilizados como instrumentos de valorização imobiliária, revelando as contradições da urbanização sob a lógica capitalista. Enquanto a criação de novos parques eleva o valor dos terrenos nas proximidades e fomenta a especulação imobiliária, as áreas verdes de proteção são frequentemente suprimidas para dar lugar a novos empreendimentos urbanos, reforçando a segregação socioespacial (Rodvalho, 2008).

## Arborização Urbana

A seção a seguir detalha elementos específicos sobre a arborização da cidade de Goiânia, principal objeto de estudo da pesquisa, começando com um breve resumo do início da arborização da cidade, seguido de seu estado atual e terminando com uma breve análise da legislação associada à gestão da arborização no município.

### Os inícios da arborização em Goiânia

A concepção urbanística original de Goiânia, projetada por Attilio Corrêa Lima, fundamentou-se em critérios paisagísticos que integravam a configuração urbana a um sistema de áreas verdes. O projeto funcional estruturava-se em eixos viários delimitados por córregos, que atuavam como cinturões verdes (*ring parks*) para conter a expansão urbana. Esse modelo contemplava parques e praças interconectados por avenidas arborizadas de amplos canteiros centrais (*parkways*). Dentre as principais unidades previstas, destacam-se os parques Botafogo e Paineiras, além do Bosque dos Buritis, cuja extensão original compreendia 400.000m<sup>2</sup> (Ribeiro, 2004).

Entre as modificações realizadas por Armando Augusto de Godói entre 1935 e 1937 ao plano original, estava a reestruturação do setor sul, originalmente pensado por Lima para uma futura expansão. Godói reorienta o crescimento para o sul da cidade, imprimindo critérios de cidade-jardim, buscando respeitar os acidentes geográficos e alcançar uma maior integração com a natureza (Ribeiro, 2004).

Durante as décadas de 1930 e 1940, a cidade caracterizava-se pela escassez de arborização. À época, a gestão do plantio competia à Secretaria de Ação e Obras do governo estadual que, mediante um viveiro e depósito de plantas, limitava-se à reprodução de espécies exóticas já introduzidas na cidade, como “ficus – *Ficus microcarpa*, flamboyant – *Delonix regia*, espatódea – *Spathodea campanulata*, alfeneiro – *Ligustrum japonicum* e dilênia – *Dilenia*” (AMMA, 2008, p. 13).

Sob a gestão do prefeito Venerando de Freitas Borges (1935-1945), a arborização de Goiânia foi intensificada. Em 1937, o processo recebeu orientações técnicas de Campos Sales e Augusto Brade, vinculados ao Jardim Botânico do Rio de Janeiro (Cruz *et al.*, 2025). As mudas, provenientes de São Paulo, enfrentavam desafios logísticos devido às condições precárias das rodovias, sendo submetidas a um período de aclimação no horto antes do plantio definitivo (AMMA, 2008).

As primeiras áreas a receber arborização na cidade foram as avenidas Goiás (denominada Pedro Ludovico na época), Tocantins, Araguaia e Paraníba. Os

primeiros setores a serem arborizados foram o Setor Central e Norte, seguidos pelo Setor Oeste e Aeroporto. Posteriormente, o Setor Universitário, Setor Sul e Setor Pedro Ludovico, que foram arborizados à medida que foram crescendo (AMMA, 2008).

Até meados da década de 1990, o plantio concentrou-se em espécies como o flamboyant, fícus, saboneteiro, sibipiruna, espatódea e dilênia, priorizando a introdução de espécimes exóticos em detrimento da flora nativa do Cerrado. Destacou-se a disseminação em larga escala da monguba (*Pachira aquatica*), a qual representava o 19% do inventário arbóreo municipal para 2008 (AMMA, 2008).

A discussão relativamente recente sobre a introdução de espécies nativas em projetos paisagísticos incentivou a inserção da flora do Cerrado em espaços públicos livres da cidade. Um exemplo dessa transição é a revitalização da Av. Goiás em 2002, realizada durante a gestão do prefeito Pedro Wilson (2001-2004) e coordenada pelo arquiteto Jesus Henrique Cheregati. O projeto removeu espécies exóticas e introduziu espécies do Cerrado, com destaque para a Tabebuia (Ipê do Cerrado), configurando-se como uma das iniciativas mais bem-sucedidas na introdução da flora autóctone na cidade (Cruz *et al.*, 2025).

#### Situação atual

O Convênio 047/97 viabilizou o Cadastramento e Mapeamento da Arborização Urbana em 1997, visando diagnosticar o estado fitossanitário dos exemplares em logradouros públicos. Os dados obtidos fundamentaram o planejamento de intervenções, tais como podas, remoção de espécimes e tocos, além da orientação de novos plantios.

O registro concentrou-se no levantamento das árvores localizadas em vias públicas de 70 bairros centrais da cidade, representando 11,16% dos bairros da cidade. Nesse cadastro, foram diagnosticados 178.230 pontos, classificados em árvores, tocos e novas plantações. Foram encontradas 133.061 árvores (74,65%), 6.295 tocos a serem removidos (3,53%) e 38.874 novas plantações (21,81%). Através do diagnóstico, foi recomendada a remoção de 7.079 árvores (5,32%) por apresentarem problemas fitossanitários, das quais 54,56% correspondem a espécie Monguba – *Pachira aquática*, oriunda da Região Amazônica (AMMA, 2008).

Em relação as espécies, foram encontradas 328, dentro das quais, as mais ocorrentes foram a monguba – *Pachira aquática* (19,15%), seguida pela sibipiruna – *Caesalpinia pluviosa var. peltophoroides* (17,05%). O 21,8% das árvores cadastradas

servem de alimento para a fauna local, como a “Mangueira – *Mangifera indica*, Jambolão – *Syzygium cumini*, Goiabeira – *Psidium guajava*, Abacateiro – *Persea gratissima*, Caju – *Anacardium occidentale*, Jaca – *Antocarpus integrifolia*, Ata – *Annona squamosa*, Ingá – *Inga cylindrica*, Ameixa – *Eriobotrya*”. Adicionalmente, o cadastro permitiu verificar que apenas 39,1% das espécies são nativas do cerrado (AMMA, 2008, p. 64).

Com base no diagnóstico efetuado, elaborou-se um plano paisagístico para 16 dos bairros analisados, integrando a situação pretérita, a infraestrutura de equipamentos urbanos e o inventário arbóreo. O plano contemplou o plantio de 24.415 árvores de 151 espécies diferentes, priorizando as espécies nativas do cerrado (64,56%), incluindo espécies frutíferas para servir de alimento à fauna local. Para os demais bairros desprovidos de plano específico, estabeleceram-se diretrizes genéricas baseadas em características locais. Tais orientações fundamentaram-se em uma listagem de 151 espécies, categorizadas por portes (pequeno, médio e grande), destinadas a calçadas e canteiros centrais (AMMA, 2008).

Em relação aos bairros que não foram objeto do cadastro, que compreendem os 89% restantes, foram realizadas amostragens, determinando a existência de aproximadamente 516.939 árvores. Dessa forma, determinou-se que, em 2005, Goiânia teria aproximadamente 650.000 árvores em vias públicas (AMMA, 2008).

Desde 2005, a implementação do Programa Plante a Vida e as intervenções da Companhia de Urbanização de Goiânia (COMURG) resultaram no plantio de mais de 300.000 espécimes em calçadas, praças e canteiros centrais. Esse incremento elevou o inventário arbóreo para 950.000 unidades, representando um incremento de 46% na arborização urbana. Adicionalmente, entre 2005 e 2009, o referido programa viabilizou a distribuição de mais de 1.200.000 mudas de espécies nativas do Cerrado à população. Dessa forma, Goiânia se posiciona como uma das cidades mais arborizadas, com um índice de 0,79 árvores por habitante, superando a Curitiba (0,17) e João Pessoa (0,06). O programa Planta a Vida foi reconhecido na época pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) como modelo de ação para outras cidades (AMMA, 2008, [entre 2017 a 2021b]).

A prefeitura de Goiânia, a través da Agencia Municipal de Meio Ambiente (AMMA) e a Companhia de Urbanização de Goiânia (COMURG), conta com três programas principais de plantio de árvores no município iniciados no 2021: Disque

Árvore, ArborizaGyn e Rearboriza Goiânia. A falta de disponibilidade de informações oficiais sistematizadas sobre esses programas dificulta o acompanhamento das ações da prefeitura em relação à gestão da arborização da cidade. A seguir, apresentamos informações coletadas em jornais digitais, que resumem as ações realizadas por cada um desses programas<sup>9</sup>:

- **Disque Árvore:** O programa consiste no fornecimento gratuito de mudas de árvores (até duas plantas nativas do Cerrado), bem como na assistência no plantio dos exemplares, que podem ser solicitados por telefone. A iniciativa tem como objetivo ampliar a cobertura vegetal do município (Prefeitura de Goiânia, 2021b). O programa conseguiu distribuir quase 9.000 mudas até o início de 2024 (Okumura, 2024).
- **ArborizaGyn:** A iniciativa envolve o plantio em grande escala de mudas de árvores nativas do Cerrado, com jornadas intensivas em áreas majormente degradadas, realizadas em conjunto com pessoal da AMMA, da COMURG e da comunidade. Posterior ao plantio, a AMMA faz o monitoramento e manutenção periódica das mudas, para garantir a recuperação integral das áreas. De acordo com as informações coletadas, o programa plantou, desde o seu início em 2021 até o final de 2024, um total de 261.500 mudas dentro da cidade. Os locais e quantidade de mudas plantadas descrevem-se a continuação:
  - ArborizaGyn 1.0: Em 2021, a primeira edição (1.0) do programa logrou plantar aproximadamente 71.500 mudas, das quais 61.500 foram plantadas no Parque Três Marias, Parque Macambira e Parque Cascavel, e 10.000 distribuídas no Parque Macambira Anicuns, Bosque dos Anjos, Parque Cascavel, Residencial Vale do Araguaia, Residencial Eldorado Oeste, Morro do Além e na Parque Ambiental Vargem Bonita (Prefeitura de Goiânia, 2021a; Duarte, 2024).
  - ArborizaGyn 2.0: Em 2022, a edição 2.0 do programa plantou aproximadamente 50.000 mudas no Setor Grajaú (Prefeitura de Goiânia, 2022).
  - ArborizaGyn 3.0: Em 2023, a edição 3.0 do programa, em alusão ao aniversário de 90 anos da Capital, plantou 90.000 mudas no Residencial do Cerrado 2 (Prefeitura de Goiânia, 2023a).
  - ArborizaGyn Especial 2024: Após um incêndio na Área de Preservação

---

<sup>9</sup> Os objetivos, ações e atores envolvidos nos programas “Disque Árvore, ArborizaGyn e Rearboriza Goiânia” foram identificados com base nas informações contidas nos jornais e reportagens digitais citados.

Permanente (APP) no Residencial Três Marias, o programa planta 50.000 mudas em novembro do 2024, com o objetivo de recuperar e preservar a área degradada (Passos, 2024b; Prefeitura de Goiânia, 2024b).

- **Rearboriza Goiânia:** O programa tem como objetivo revitalizar a arborização urbana, especialmente em áreas onde as árvores se encontram na fase final do seu ciclo de vida. O programa concentra-se em áreas consolidadas, principalmente em ruas e avenidas do centro da cidade. De acordo com informações coletadas, o programa plantou 457 mudas desde o seu início em 2021 até o final de 2024.

-1ª Edição: Em junho de 2021, a edição inaugural do programa implementou um projeto piloto na Rua Olinto Manso Pereira (Rua 94), no Setor Sul. A intervenção reverteu o histórico de degradação da via, ocasionado pela expansão comercial e pela supressão de espécimes doentes, convertendo-a no logradouro com maior densidade arbórea do município (Passos, 2024a; Prefeitura de Goiânia, 2024c). Nesta primeira edição do programa, não foram publicadas as quantidades de mudas plantadas.

-2ª Edição: Em junho de 2023 foram plantadas 150 mudas no Setor Campinas, ao longo dos 3,78Km da Rua Quintino Bocaiúva (Passos, 2024a; Prefeitura de Goiânia, 2023b).

-3ª Edição: Em dezembro de 2023 foram plantadas 170 mudas, sendo 110 ao longo dos 2Km da Av. Araguaia e 60 mudas nos 800m da Av. Tocantins (Passos, 2024a; Prefeitura de Goiânia, 2023b).

-4ª Edição: Em dezembro de 2024 foram plantadas 137 mudas no Centro, sendo 86 ao longo dos 1,6km da Rua 4 e 51 nos 865m da Rua 8 (Passos, 2024a; Prefeitura de Goiânia, 2024a).

Em relação ao total de árvores plantadas na cidade nos últimos anos, de acordo com a AMMA, foram plantadas 400 mil mudas, desde 2021 até o final de 2024 (Prefeitura de Goiânia, 2024b). Isso evidencia que os três programas citados acima não são as únicas formas pelas quais a AMMA e a COMURG realizaram o plantio de mudas no município. Além disso, as informações coletadas indicam que os plantios se concentram em áreas protegidas vegetadas (APP, APA, UC e parques) durante o período 2021-2024, em contraste com áreas com maior componente construtivo, como ruas, avenidas e lotes.

A AMMA e a COMURG contam com 5 viveiros na atualidade. A COMURG conta com 4, localizados em Nova Esperança (Chácara São Joaquim), Meia Ponte (Jardim Novo Mundo), Redenção (Setor Pedro Ludovico, no Jardim Botânico) e Buritis (Residencial Kátia), que produziram nos primeiros 3 meses do ano de 2025 cerca de 250 mil mudas de diferentes espécies, entre flores, árvores, plantas ornamentais, trepadeiras, arbustos e palmeiras. Destas 250 mil mudas, 20 mil correspondem a árvores de pequeno, médio e grande porte, e 5 mil a palmeiras (COMURG, 2025). A AMMA conta com um viveiro especializado em espécies do Cerrado, que a partir de um convênio realizado com a Universidade Federal de Goiás (UFG) no 2008, aumentaria sua produção de 150 mil para 400 mil mudas por ano, com uma variedade de 80 espécies (AMMA, 2008).

De acordo com o censo populacional de 2022 realizado pelo IBGE, 89,6% dos habitantes de Goiânia residem em logradouros que possuem uma ou mais árvores, posicionando-a como a segunda cidade mais arborizada do Brasil, atrás apenas de Campo Grande – MS, que ocupa o primeiro lugar com 91,4% (IBGE, 2023a).

Em 2024, o programa Cidades Árvores do Mundo, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) e pela Fundação *Arbor Day*, incluiu a cidade de Goiânia junto com 210 cidades de todo o mundo (34 cidades brasileiras foram reconhecidas pelo programa<sup>10</sup>). O programa determina como critérios de seleção o estabelecimento de responsabilidades pelo cuidado das árvores a uma instância municipal, a elaboração de leis e políticas que regem a gestão de florestas e árvores, possuir um inventário atualizado dos recursos arbóreos para o estabelecimento de planos de longo prazo, disponibilização de um orçamento anual para o desenvolvimento de planos de gestão de arborização, e realização de uma celebração anual das árvores para sensibilizar os residentes a participarem do programa municipal de arborização (Arbor day foundation, 2026).

Para a realização desta pesquisa, foram solicitadas informações sobre o plantio de árvores no município à Gerência de Arborização da Agência Municipal do Meio Ambiente (AMMA), compreendendo o período de 2004 a 2024, com o objetivo de

---

<sup>10</sup> As 34 cidades brasileiras selecionadas pelo programa Cidades Árvores do Mundo em 2024, foram: Arapiraca, Belo Horizonte, Cabedelo, Campina Grande, Campo Grande, Cianorte, Cordeirópolis, Cubatão, Goiânia, Guarujá, Hortolândia, Itapipoca, Ivaiporã, João Pessoa, Juiz de Fora, Lorena, Marialva, Mogi Mirim/SP, Monte Alto, Niterói, Nova Friburgo, Paranaguá, Pinhais, Porto Alegre, Recife, Ribeirão, Preto, Rio Claro, Rio Grande, São Carlos, São José dos Campos, São Paulo, Taubaté, Teresina e Três Lagoas.

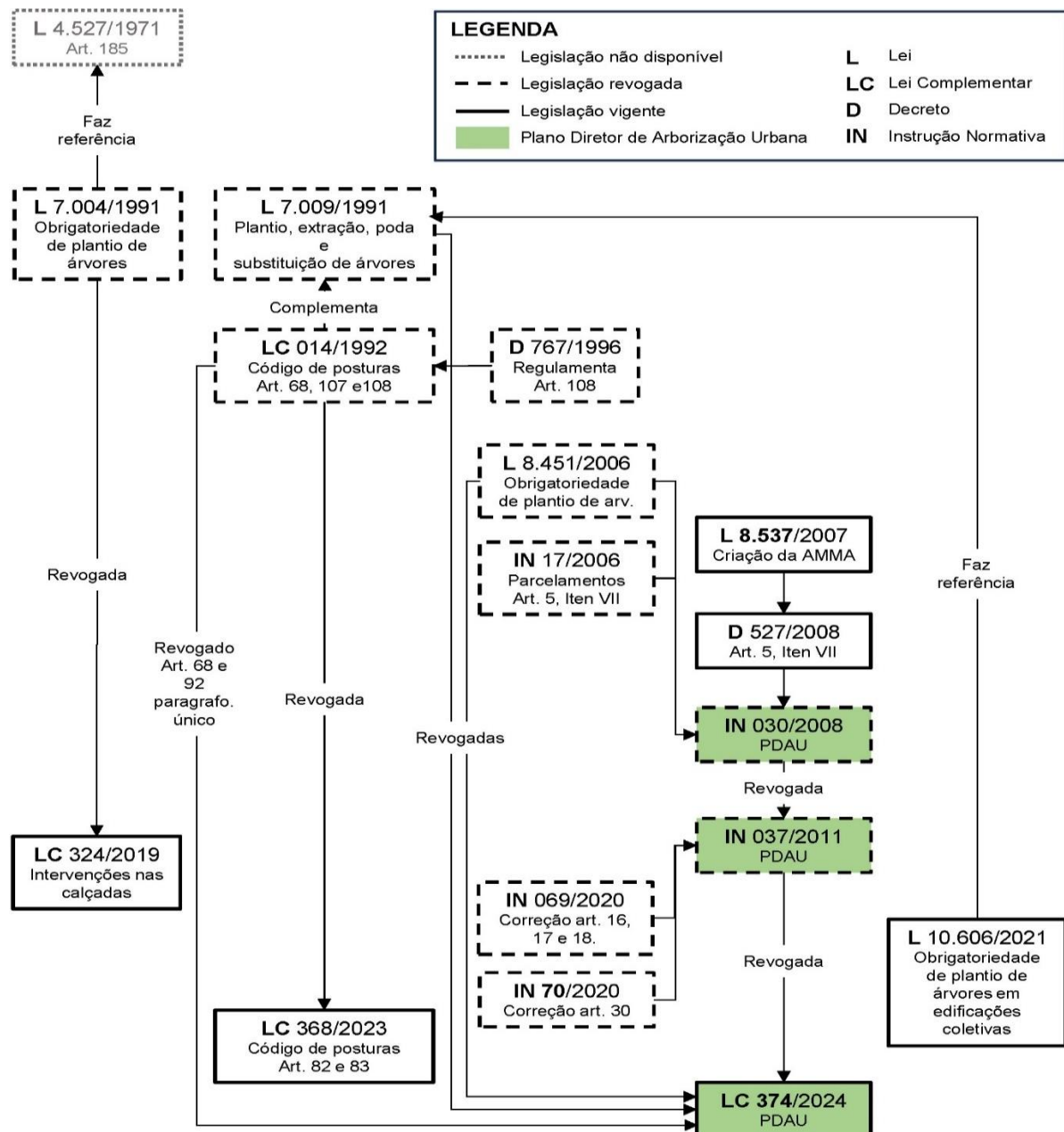


mapear sua evolução. No entanto, o órgão informou dispor de dados apenas sobre projetos desenvolvidos em 2024. Por esse motivo, optou-se por realizar uma revisão documental sobre esses aspectos.

#### Evolução do marco regulatório de Goiânia para a arborização urbana

O município de Goiânia tem uma longa tradição na promoção do plantio e proteção da arborização urbana por meio de legislação municipal. A Figura 9 mostra de forma gráfica a evolução e as conexões das legislações municipais que regulamentam a arborização urbana no município.

Figura 9 - Evolução das legislações municipais que regulamentam a arborização urbana em Goiânia



Fonte: Elaboração própria.

A lei municipal mais antiga identificada com relação à arborização urbana de Goiânia durante esta pesquisa corresponde à Lei nº 7.004, de 03/10/1991, que “dispõe sobre a obrigatoriedade do plantio de árvores”. Em seu artigo 1º, estabelece-se a obrigatoriedade do plantio de no mínimo duas árvores ornamentais por lote residencial ou comercial, cuja frente ultrapasse 10 (dez) metros; condicionando a aprovação de “termos de habite-se” ou alvarás de funcionamento ao cumprimento deste artigo em seu §1º (Goiânia, 1991a).

Além disso, a lei estabelece a proibição de cortar, podar, danificar, derrubar, remover ou sacrificar árvores ornamentais, bem como a aplicação de penalidades a serem cobradas por meio do imposto territorial pertinente pelo descumprimento, incluindo lotes e terrenos baldios. A lei também estende a obrigação aos conjuntos habitacionais, em seu artigo 1º, § 3º. Em seu Art. 1º, a lei faz referência ao disposto no Art. 185 da Lei Nº 4.527 de 31/12/1971 publicada no Diário Oficial Nº 266 dessa data, que se encontra incompleta em sua versão pública digital e não pôde ser consultada (Goiânia, 1991a). A Lei nº 7.004 de 03/10/1991 foi revogada pela Lei Complementar nº 324 de 28/11/2019, a qual não faz referência a arborização urbana.

No mesmo ano, é aprovada pela Câmara Municipal de Goiânia a Lei nº 7.009 de 23/10/1991, a qual “Dispõe sobre o plantio, extração, poda, substituição de árvores e dá outras providências”. Esta lei, composta por 21 artigos, considera as mudas de árvores plantadas em vias públicas como bens comuns, estabelece os funcionários da prefeitura como únicos autorizados a realizar o corte e a poda de árvores, bem como exige que o Poder Executivo Municipal, juntamente com a Superintendência de Parques e Jardins, mantenha um departamento destinado à orientação técnica para o plantio dentro do município (Goiânia, 1991b).

Nesta lei, destacam-se os artigos 7 e 8, relativos à elaboração de projetos de arborização. O artigo 7º estabelece como pré-requisito para a aprovação de parcelamento do solo a apresentação de um projeto de arborização de vias e logradouros públicos, acrescentando critérios como tamanhos de calçadas de acordo com sua orientação e disposição das redes de serviços. O artigo 8º exige que o poder executivo municipal elabore projetos de arborização em loteamentos existentes que não possuam arborização (Goiânia, 1991b). Desta forma, e introduzido o projeto de arborização como exigência para a aprovação de loteamentos, bem como a capacidade da prefeitura de realizar projetos em loteamentos já existentes.

A Lei nº 7.009 de 23/10/1991 é complementada posteriormente pelo código de posturas do município, publicado sob a Lei Complementar N°041 de 29/12/1992. A seção III “Da Defesa da Arborização e dos Jardins Públicos”, em seu artigo 68, proíbe podar, cortar, danificar, derrubar ou sacrificar qualquer árvore pública, matas ou vegetações protetoras de mananciais ou fundos de vale. O artigo 107 exige a colaboração da prefeitura com a União e o Estado para evitar a devastação das florestas e estimular o plantio de árvores, e o artigo 108 autoriza o corte de árvores que, por seu estado de conservação ou pouca estabilidade, possam representar um perigo para imóveis vizinhos ou pessoas, o qual é regulamentado posteriormente pelo Decreto nº767 de 14/03/1996 (Goiânia, 1992).

O código de posturas do município, publicado em 1992, é revogado em 2023 com a publicação do novo código sob a Lei Complementar nº 368 de 15/12/2023. Em relação à arborização, o novo código de posturas, em seu Capítulo IX “da defesa da arborização”, artigos 82 e 83, estabelece que o órgão ou entidade municipal ambiental deverá promover “o controle, a manutenção e o monitoramento da arborização”, sendo “obrigado a implementar o Plano Diretor de Arborização de Goiânia” (Goiânia, 2023), momento em que estava em vigor o plano aprovado no ano de 2011.

Em 2006, foram publicadas duas leis que se tornaram importantes para a promoção da arborização urbana, sendo acolhidas pelo primeiro plano diretor de arborização do município.

A Lei nº 8.451 de 07/08/2006, que “dispõe sobre o incentivo à manutenção e redistribuição de arvoredo nativo nos imóveis de nossa capital e dá outras providências”, estabelece em seu artigo 1 a existência de pelo menos uma árvore nativa da região em cada lote, ou na faixa da calçada adjacente a esse lote, no momento da vistoria de conclusão da obra. Em seu artigo 2, indica que o não cumprimento do disposto no artigo 1, bloqueará a emissão do documento de conclusão da obra (Goiânia, 2006b).

A instrução normativa nº 017, de 15/08/2006, que tem como objetivo “instituir as diretrizes ambientais para licenciamento ambiental de parcelamento do Solo Urbano no Município de Goiânia”, estabelece em seu art. 5, item VII, a necessidade da elaboração de projeto de arborização, como parte dos documentos necessários para a expedição da Licença Ambiental Prévia (LP). Em seu art. 6, parágrafo único, é exigido o início imediato do projeto de arborização no momento da emissão da Licença

Ambiental de Instalação (Goiânia, 2006a).

Em relação às Áreas de Preservação Permanente (APP), a instrução normativa no artigo 7º, estabelece um raio de preservação e revegetação de 100m a partir da cota de inundação do rio Meia Ponte e dos Ribeirões Anicuns e João Leite, enquanto que para cursos d'água temporários e permanentes, bem como áreas circundantes a lagos, lagoas e reservatórios de água naturais ou artificiais, estabelece um raio mínimo de preservação e revegetação de 50m. No caso das Zonas de Proteção Ambiental I e IV, elas devem ser circundadas por ruas e nunca contíguas a áreas parceladas (Goiânia, 2006a).

Em contraste com a Lei nº 7.004, de 03/10/1991, a Lei nº 8.451 de 07/08/2006 não estabelece a necessidade de que o lote tenha no mínimo 10 m de testada para exigir o plantio de árvores, atendendo a uma quantidade maior de lotes. Além disso, essa lei exige apenas uma árvore em vez de duas unidades como a anterior, porém indica a utilização de uma árvore nativa da região, valorizando as espécies do Cerrado. No caso da instrução normativa nº 017 de 15/08/2006, impõe a exigência de iniciar a implantação imediata do projeto de arborização no momento da emissão da Licença Ambiental de Instalação, buscando garantir a execução da arborização nos novos loteamentos. Nenhuma dessas leis publicadas em 2006 faz alusão aos lotes vagos, no entanto, elas coexistem com a Lei nº 7.004 de 03/10/1991, até serem revogadas em 2024.

Como elemento fundamental da implementação das políticas municipais voltadas a gestão da arborização urbana em Goiânia, em 2007 é criada a Agência Municipal do Meio Ambiente (AMMA), sob a Lei Nº8.537 de 20/06/2007, “com a finalidade de formular, implementar e coordenar a execução da Política Municipal do Meio Ambiente, voltada ao desenvolvimento sustentável, no âmbito do território municipal” (Goiânia, 2007b, art. 27). Entre suas competências estão “a implantação, administração, manutenção, preservação, recuperação, supervisão e fiscalização da arborização urbana, unidades de conservação, áreas verdes e demais recursos naturais” (Goiânia, 2007b, art. 27, inc. II).

Em conformidade com as orientações do art. 5, item VII, do regimento interno da AMMA publicado no Decreto nº 527 de 29/02/2008, que exige que este órgão elabore, implemente a coordene a execução do Plano Diretor de Arborização Urbana juntamente com outros planos setoriais da área ambiental (como o Mapa das áreas

de risco) (Goiânia, 2008a), é instituído o primeiro Plano Diretor de Arborização Urbana de Goiânia (PDAU), sob a Instrução Normativa nº 030, de 05/09/2008.

O PDAU é definido por esta Instrução Normativa como “um instrumento municipal para a implantação da Política de plantio, preservação, manejo e expansão da arborização urbana na cidade...” (Goiânia, 2008b, cap. 1, art. 1), estabelecendo como responsável pela elaboração de planos e projetos de implantação e manutenção da arborização a AMMA, enquanto a COMURG fica encarregada da execução das atividades relacionadas à arborização (Goiânia, 2008b).

A arborização urbana é definida pelo PDAU como “o conjunto de exemplares arbóreos que compõem a vegetação localizada nas vias públicas (calçadas, canteiros centrais e praças)” (Goiânia, 2008b, cap. III, art. 4º, inc. I). Apesar de restringir o conceito às árvores localizadas em vias públicas, o PDAU também regulamenta a arborização em áreas privadas. Dentro das diretrizes estabelecidas pelo PDAU para o planejamento, manejo e manutenção da arborização, indica incentivar a implantação da calçada verde, planejar a implantação e o manejo dentro de áreas privadas, exigir dos novos loteamentos Programas de Arborização Urbana, elaborar um Programa Anual de Plantio, um Programa de Substituição Gradual das Árvores, um Programa de Educação Ambiental e um Programa de Manutenção e Monitoramento da Arborização (Goiânia, 2008b, cap. IV, art. 5º).

Em relação às tarefas de monitoramento, exige o estabelecimento de um cronograma integrado de plantio e monitoramento, bem como “informatizar todas as ações, dados e documentos referentes à arborização urbana, com vistas a manter um cadastro permanente atualizado, mapeando todos os exemplares arbóreos” (Goiânia, 2008b, cap. IV, art. 8, inc. II). Vinculado ao monitoramento da arborização, o PDAU estabelece como atribuições da AMMA e da COMURG diagnosticar a população de árvores da cidade, integrando o cadastro informatizado ao Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (MUBDG), hoje denominado pela prefeitura como Mapa Digital Fácil (MDF). Por meio da elaboração desse diagnóstico, o PDAU estabelece, dentro dessas atribuições, “identificar áreas potenciais para novos plantios, estabelecendo prioridades e hierarquias para implantação, priorizando áreas menos arborizadas” (Goiânia, 2008b, cap. VI, art. 10, inc. XIII).

Como estratégia para promover o plantio de árvores pela população, o PDAU incorpora em seu artigo 16 o cumprimento da Lei nº 8.451, de 07/08/2006, que exige

o plantio de pelo menos uma árvore para a concessão da licença de habitabilidade, acrescentando-a como condição para a concessão de licenças de reforma, demolição, Modificação de Projeto Com ou Sem Aumento para unidades unifamiliares. Em relação a novos parcelamentos, o PDAU incorpora o disposto no artigo 5 da instrução normativa nº 017, de 15/08/2006, em seu artigo 36, que exige, entre os documentos para a emissão da Licença Ambiental de Instalação, a apresentação do Projeto de Arborização (Goiânia, 2008b).

Do ponto de vista técnico, o PDAU detalha critérios para a realização dos plantios, como distância entre árvores de acordo com suas características e presença de equipamentos urbanos, procedimentos para os plantios, tipos de espécies recomendadas para calçadas e aquelas proibidas, seja por seus princípios tóxicos ou por serem perigosas e causarem danos à infraestrutura construída. O PDAU promove o uso de espécies nativas do Cerrado, bem como estabelece compensações ambientais para os casos em que ocorrem danos à arborização da cidade, especificamente dentro de áreas privadas. No artigo 27, destaca-se entre suas exigências em áreas privadas, que todos os estacionamentos de veículos ao ar livre devem ser arborizados (Goiânia, 2008b).

O PDAU de 2008 oferece, pela primeira vez, um marco regulamentar para a gestão da arborização da cidade, detalhando critérios técnicos para sua implementação, bem como exigências aos órgãos responsáveis para o planejamento e execução das atividades relacionadas à arborização urbana, buscando estabelecer uma metodologia de trabalho que permita orientar as ações de acordo com as necessidades específicas do município. Embora o PDAU seja denominado “Plano Diretor”, ele não determina áreas específicas dentro do município para orientar as ações, apesar de se basear em grande parte no diagnóstico da arborização da cidade realizado por meio do Convênio 047/97.

Em 2011, o PDAU foi atualizado por meio da Instrução Normativa nº 037, de 21/11/2011. O novo PDAU apresenta uma redação muito semelhante, com poucas alterações, entre as quais se destaca o incentivo à implantação do “Manual da Calçada Consciente”, substituindo a antiga “calçada verde” pela configuração atual, composta por faixa de acesso, faixa livre e faixa de serviço. Em relação ao monitoramento da arborização, especifica que o mesmo se refere à arborização localizada em áreas públicas. O artigo 16 é modificado, estabelecendo que, para a

liberação do Habite-se, será necessária a vistoria da AMMA para a verificação da necessidade do plantio de árvores, sem fazer referência à Lei nº 8.451, de 07/08/2006. Desta forma, a obrigatoriedade do plantio fica sujeita ao critério da vistoria da AMMA. O artigo 36, que se refere à necessidade de apresentar um projeto de arborização para a emissão da Licença Ambiental de Instalação, não faz mais referência ao artigo 5 da instrução normativa nº 017, de 15/08/2006, mas mantém os preceitos da mesma. Além disso, o novo PDAU modifica os artigos 29 e 30, relacionados às compensações ambientais relacionadas à arborização de áreas internas (Goiânia, 2011).

Em 2020, foram publicadas duas instruções normativas que modificam e complementam o PDAU de 2011. A Instrução Normativa nº 069, de 04/05/2020, altera os artigos 16, 17 e 18, estabelecendo para o primeiro a obrigatoriedade do plantio de pelo menos uma árvore nativa da região dentro do lote ou na calçada pública contigua ao lote para obter o Certificado de Conclusão de Obras. Desta forma, a obrigatoriedade do plantio não fica sujeita ao critério da AMMA (como modificado no PDAU do 2011 em relação ao PDAU do 2008), implantando novamente no PDAU o estabelecido na Lei nº 8.451, de 07/08/2006, sem fazer menção a ela. Os artigos 17 e 18 regulamentam os procedimentos para o cumprimento do artigo 16 (Goiânia, 2020a). A Instrução Normativa nº 070, de 27/05/2020, altera o artigo 31 do PDAU de 2011, aumentando a quantidade de doação de mudas como mecanismo de compensação ambiental por danos não mitigáveis no interior de imóveis particulares (Goiânia, 2020b).

Em 2021, foi aprovada a lei nº 10.606, de 25/03/2021, que “dispõe da obrigatoriedade do plantio de árvores por unidade imobiliária residencial ou comercial de edificação de uso coletivo construída...”. A lei estabelece a obrigatoriedade do “plantio de 2 (duas) mudas arbóreas por cada unidade imobiliária residencial ou comercial de edificação de uso coletivo” (Goiânia, 2021, art. 1º). O cumprimento desse dispositivo deve ocorrer em até seis meses após a aprovação do projeto construtivo, em locais designados pela AMMA (como APP, parques e praças), priorizando-se a execução no próprio bairro do empreendimento. Esta lei, faz referência em seu artigo 4, a observar as disposições estabelecidas na Lei nº 7.009 de 23/10/1991. Desta forma, busca-se uma compensação ambiental por parte das edificações de uso coletivo, que não se enquadram nos instrumentos desenhados até o momento (Goiânia, 2021).

Em 2024, é publicado o último e vigente PDAU de Goiânia, sob a Lei Complementar nº 374, de 24/01/2024, revogando grande parte das leis anteriores relacionadas com a arborização urbana do município (Lei nº 7.004/1991, Lei nº 7.009/1991, art. 68, parágrafo art.92 e o art.178 da Lei Complementar nº 014/1992, Lei 8.451/2006 e Instrução Normativa 037/2011).

O novo PDAU mantém uma estrutura e redação semelhantes ao anterior, incorporando novas seções, bem como artigos das leis revogadas por ele. Entre as principais mudanças estão a incorporação de diretrizes gerais do PDAU no artigo 8, especificando a execução de programas de implantação e preservação de áreas verdes, como estratégia de sustentabilidade socioambiental, a responsabilidade das pessoas e do poder público nas ações de preservação, conservação, plantio e replantio de unidades arbóreas, e a manutenção e incentivo à arborização adequada dos passeios públicos. Nos artigos 9 e 10, estabelece as competências do órgão municipal ambiental (AMMA) e do órgão municipal de limpeza e serviços urbanos (COMURG), destacando a responsabilidade pelas tarefas de serviço em condomínios fechados por parte da administração do loteamento, bem como a autorização da manutenção de vegetação rasteira e arbustos em vias públicas aos proprietários de imóveis contíguos à via. O novo PDAU também autoriza o Poder Público Municipal a delegar funções de prestação de serviços públicos de poda e corte de árvores em calçadas a empresas privadas, mediante o cumprimento dos procedimentos específicos para tais fins. Além disso, o novo PDAU estabelece os objetivos do Programa de Educação Ambiental, além de permitir a doação de mudas produzidas pela Administração Pública Municipal para o plantio em vias ou áreas públicas (Goiânia, 2024).

Em relação ao plantio, o artigo 17 estabelece a obrigatoriedade do plantio de árvores nos passeios públicos do município, de acordo com o parecer técnico emitido pelo órgão ambiental municipal, delegando a responsabilidade pelo plantio e conservação ao proprietário ou possuidor do imóvel contíguo ao passeio. O parecer técnico indicará a quantidade de mudas a serem plantadas, as espécies e o prazo para o cumprimento da obrigação. Por meio do artigo 40, o PDAU condiciona a emissão do Certificado de Conclusão da Obra ao cumprimento do artigo 17, estratégia similar à implementada nos PDAU e leis anteriores. O artigo 55 mantém a exigência da apresentação do projeto de arborização em novos loteamentos, como requisito



para a emissão da Licença Ambiental de Instalação, acrescentando a indicação de projetar os canteiros centrais das avenidas com arborização (Goiânia, 2024).

O artigo 29 do novo PDAU incorpora o disposto na seção III, artigo 68, da Lei Complementar nº 041/1992, no que se refere à proteção da arborização e dos jardins públicos. O artigo 30 incorpora as condições sob as quais podem ser realizadas podas de árvores localizadas em vias ou áreas públicas, enquanto os artigos 31, 32, 35, 36 e 37 estabelecem os procedimentos e condições para a substituição de árvores em vias ou áreas públicas. Nestes artigos é introduzido o disposto no artigo 108 do código de posturas do município de 1992 (Lei Complementar Nº 041/1992), que estabelecia em que condições as árvores podem ser cortadas (Goiânia, 2024).

Em relação às compensações ambientais por intervenções em unidades arbóreas localizadas em áreas específicas, o novo PDAU aumenta as restrições, com ênfase na proteção das espécies do Cerrado, elevando a quantidade de mudas como medida de mitigação dos danos. Também foi incorporado um capítulo referente às penalidades, estabelecendo as sanções associadas a infrações administrativas e ambientais (Goiânia, 2024).

O marco regulatório da arborização urbana de Goiânia vem sendo aperfeiçoado ao longo do tempo, condensando as leis, regulamentos e normas que regem essa matéria dentro do PDAU, evidenciando o compromisso do poder municipal na promoção e proteção da arborização urbana. A incorporação de critérios de valorização das espécies nativas e daquelas que servem de alimento para a fauna local, bem como as amplas especificações técnicas estabelecidas para o plantio e manutenção da arborização urbana, refletem o amadurecimento progressivo dos instrumentos e a compreensão das especificidades ecológicas e ambientais do município.

Apesar desses avanços, elementos estabelecidos em leis anteriores, como exigências sobre a obrigação de arborização em lotes e glebas vazias (artigo 4º, parágrafo único, Lei nº 7.004/1991), bem como a exigência de plantio de árvores em relação à quantidade de unidades imobiliárias residenciais ou comerciais de uso coletivo (lei nº 10.606/2021) - entendendo-se que a cidade passa por processos de verticalização desde a década de 1960 - não foram incorporadas no último PDAU. No entanto, a lei nº 10.606/2021 continua vigente.

Em relação aos mecanismos para promover o plantio de árvores dentro do

município por parte dos proprietários ou possuidores de imóveis, destacam-se, a exigência de um projeto de arborização para a aprovação de novos parcelamentos e a obrigatoriedade do plantio de árvores como requisito para a emissão do Certificado de Conclusão da Obra. Em ambos os casos, o mecanismo pressiona novos empreendimentos ou edificações que passam por processos de reforma, deixando de lado imóveis já construídos que podem se proteger do cumprimento dessas disposições por meio do “direito adquirido”.

Para tal fim, o artigo 8º da Lei nº 7.009/1991, que exigia do Poder Municipal a elaboração de projetos de arborização em loteamentos existentes devidamente legalizados, nos quais não houvesse arborização, poderia orientar a criação de instrumentos para a implantação de arborização em loteamentos mais antigos.

Em relação ao monitoramento e integração dos dados da arborização da cidade ao Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (hoje denominado pela prefeitura como Mapa Digital Fácil - MDF), que deveriam ser mantidos permanentemente atualizados de acordo com os PDAU de 2008 e 2011, os dados disponíveis datam de 1996-2000 e estão restritos aos 70 bairros centrais, correspondente as informações que foram levantadas por meio do Convênio 047/97. Essas obrigações não foram cumpridas durante a vigência dos PDAU 2008 e 2011, que foram suprimidas no PDAU de 2024. Dessa forma, não há informações públicas disponíveis sobre o cadastro de arborização, bem como sobre os planos e projetos desenvolvidos pelo Poder Municipal em matéria de arborização urbana.

## **2.2 Procedimentos metodológicos**

### **2.2.1 Dados de Sensoriamento Remoto**

Levando em consideração a implementação de políticas para a promoção do plantio de árvores no município a partir de 2006, a implementação de programas de arborização de grande impacto como o “Planta a Vida” iniciado em 2005, e a implementação do primeiro PDAU no 2008, bem como o tempo de crescimento de 5 a 15 anos requerido para que os benefícios das arvores possam ser apreciados (McPherson, 2002), foi definido o período de estudo entre os anos 2006 a 2025.

Para o estudo das variáveis, foram utilizadas imagens multiespectrais dos

satélites *Landsat 5* (*TM*<sup>11</sup>), *Landsat 8* (*OLI-TIRS*<sup>12</sup>) e *Landsat 9* (*OLI-TIRS*), disponíveis gratuitamente no módulo Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). As imagens do satélite *Landsat 5* têm 7 bandas, enquanto as dos satélites *Landsat 8* e *9* têm 11 bandas. O Quadro 9 mostra os comprimentos de onda e as resoluções espaciais de cada banda.

Quadro 9 - Especificações das bandas dos satélites *Landsat 5*, *8* e *9*.

| <b><i>Landsat 5 (TM)</i></b>                      |                                |                 | <b><i>Landsat 8 e 9 (OLI-TIRS)</i></b>            |                                |                 |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| <b>Bandas</b>                                     | <b>Comprimento de onda (μ)</b> | <b>Res. (m)</b> | <b>Bandas</b>                                     | <b>Comprimento de onda (μ)</b> | <b>Res. (m)</b> |
| <b>1</b> - Azul                                   | 0,45-0,52                      | 30              | <b>1</b> - Aerossol costeiro                      | 0,43-0,45                      | 30              |
| <b>2</b> - Verde                                  | 0,52-0,60                      | 30              | <b>2</b> - Azul                                   | 0,45-0,51                      | 30              |
| <b>3</b> - Vermelho                               | 0,63-0,69                      | 30              | <b>3</b> - Verde                                  | 0,53-0,59                      | 30              |
| <b>4</b> - Infravermelho Próximo (NIR)            | 0,76-0,90                      | 30              | <b>4</b> - Vermelho                               | 0,64-0,67                      | 30              |
| <b>5</b> - Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) 1 | 1,55-1,75                      | 30              | <b>5</b> - Infravermelho Próximo (NIR)            | 0,85-0,88                      | 30              |
| <b>6</b> - Térmica                                | 10h40-12h50                    | 120*            | <b>6</b> - Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) 1 | 1,57-1,65                      | 30              |
| <b>7</b> - Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) 2 | 2,08-2,35                      | 30              | <b>7</b> - Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) 2 | 2,11-2,29                      | 30              |
|                                                   |                                |                 | <b>8</b> - Pancromático                           | 0,50-0,68                      | 15              |
|                                                   |                                |                 | <b>9</b> - Cirrus                                 | 1,36-1,38                      | 30              |
|                                                   |                                |                 | <b>10</b> - Infravermelho Térmico (TIRS) 1        | 10,6-11,19                     | 100*            |
|                                                   |                                |                 | <b>11</b> - Infravermelho Térmico (TIRS) 2        | 11h50-12h51                    | 100*            |

\*As bandas térmicas são reamostradas a uma resolução espacial de 30m.

Fonte: Elaboração própria com base em USGS (2025).

Para a análise da evolução das variáveis dentro do período de estudo, foi adotada uma resolução temporal de 5 anos, buscando compatibilizar as informações de media resolução (*Landsat*) com as informações em alta resolução disponíveis para validação. Os anos de estudo selecionados foram: 2006, 2010, 2016, 2021 e 2025. Infelizmente, não foi possível obter imagens sem nebulosidade para o ano de 2011 durante a época do ano selecionada para o estudo, pelo que se optou por selecionar o ano de 2010.

Em relação ao período do ano mais adequado para o estudo, foram consideradas a sazonalidade de Goiânia, a vegetação predominante do Cerrado (caracterizada por vegetação caducifolia) e as condições de baixa nebulosidade. Desta forma foram selecionadas imagens próximas a estação chuvosa, durante o mês de março e abril.

<sup>11</sup> Denominação do sensor a bordo: *TM* - *Thematic Mapper*.

<sup>12</sup> Denominação dos sensores a bordo: *OLI* - *Operational Land Imager* e *TIRS* - *Thermal Infrared Sensor*.

De acordo com Amorim (2018), durante os períodos com maior precipitação, a vegetação está mais desenvolvida e o solo apresenta maior umidade, resultando em uma maior diferença entre as temperaturas superficiais rurais e urbanas. O maior vigor da vegetação durante este período facilita sua detecção por meio dos índices de vegetação, assim como uma maior quantidade de folhas nas copas das árvores produz maior sombreamento e permite maior evapotranspiração, o qual aumenta sua eficiência na redução das temperaturas. Além disso, a área rural de Goiânia, altamente intervinda por atividades agropecuárias, é afetada pela sazonalidade, reduzindo drasticamente a cobertura vegetal durante a estação seca, o que diminui a diferenciação entre o ambiente rural e o espaço urbano.

O Quadro 10 apresenta os dados das imagens utilizadas, especificando a data específica, o caminho, fila, data, plataforma, hora local, cobertura de nuvens e referência bibliográfica.

Quadro 10 - Dados das imagens multiespectrais empregadas.

| Ano  | Dados Imagens |      |            |            | Hora local | Cobertura de nuvens (%) | Referência          |
|------|---------------|------|------------|------------|------------|-------------------------|---------------------|
|      | Caminho       | Fila | Data       | Plataforma |            |                         |                     |
| 2006 | 222           | 071  | 28/04/2006 | Landsat 5  | 13:12:47   | 0.00                    | (EROS Center, 1982) |
|      |               | 072  |            |            | 13:13:11   | 0.00                    |                     |
| 2010 | 222           | 071  | 07/04/2010 | Landsat 5  | 13:11:49   | 0.00                    | (EROS Center, 1982) |
|      |               | 072  |            |            | 13:12:13   | 10.00                   |                     |
| 2016 | 222           | 071  | 07/04/2016 | Landsat 8  | 13:20:32   | 0.40                    | (EROS Center, 2013) |
|      |               | 072  |            |            | 13:20:55   | 1.54                    |                     |
| 2021 | 222           | 071  | 21/04/2021 | Landsat 8  | 13:20:32   | 0.02                    | (EROS Center, 2013) |
|      |               | 072  |            |            | 13:20:56   | 0.01                    |                     |
| 2025 | 222           | 071  | 07/03/2025 | Landsat 9  | 13:20:58   | 2.33                    | (EROS Center, 2013) |
|      |               | 072  |            |            | 13:21:22   | 3.11                    |                     |

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de EROS Center (1982, 2013).

Como imagens de validação e para a realização das análises de arborização, foram utilizadas ortofotomapas de alta resolução extraídas do Mapa Fácil Digital de Goiânia, para os anos de 2006, 2010 e 2016 (Prefeitura de Goiânia, 2025), enquanto que para os anos de 2021 e 2025 foram utilizadas imagens extraídas do *software Google Earth Pro*.

Considerando que a umidade, a nebulosidade, o vento e as precipitações influenciam o comportamento das ICUS (Oke *et al.*, 2017), foram registradas as condições meteorológicas do dia em que cada uma das imagens foi capturada, com o intuito de auxiliar as análises. Os dados provêm da estação meteorológica N°83423, localizada no Setor Aeroporto (Latitude 16°40'25"S e Longitude 49°15'50"O), que está

em funcionamento desde 1937 e cujos dados estão disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025). Entre os dados coletados estão a temperatura do ar (mínima, máxima e média), umidade relativa (mínima e média), vento (velocidade e direção), nebulosidade e precipitação (5, 10 e 30 dias antes da captura da imagem). As tabelas 1 e 2 mostram os valores para cada elemento climático durante o dia e as 12 horas<sup>13</sup>, respectivamente.

Tabela 1 - Condições meteorológicas no dia da captura das imagens empregadas.

| Data       | Temperatura do ar<br>(°C) |      |       | Umidade Relativa<br>(%) |       | Vento<br>(m/s) | Precipitações dias antes<br>(mm) |         |         |
|------------|---------------------------|------|-------|-------------------------|-------|----------------|----------------------------------|---------|---------|
|            | Máx.                      | Mín. | Média | Mín.                    | Média | Velocidade     | 5 dias                           | 10 dias | 30 dias |
| 28/04/2006 | 32,0                      | 16,8 | 24,4  | 38,0                    | 52,0  | 1,2            | 0,0                              | 0,0     | 206,0   |
| 07/04/2010 | 27,8                      | 15,7 | 21,2  | 42,0                    | 58,8  | 1,4            | 100,3                            | 187,2   | 319,3   |
| 07/04/2016 | 34,2                      | 21,0 | 27,6  | 37,0                    | 49,8  | 1,0            | 0,0                              | 0,0     | 97,9    |
| 21/04/2021 | 30,1                      | 15,6 | 22,9  | 29,0                    | 48,5  | 1,3            | 0,0                              | 0,0     | 145,5   |
| 07/03/2025 | 34,6                      | 22,7 | 28,3  | 38,0                    | 47,3  | 2,4            | 0,0                              | 57,4    | 186,0   |

Fonte: Elaboração própria com base em INMET (2025).

Tabela 2 - Condições meteorológicas as 12 horas no dia da captura das imagens empregadas.

| Data       | Temperatura<br>do ar (°C) | Umidade<br>Relativa (%) | Nebulosidade | Vento   |                  |
|------------|---------------------------|-------------------------|--------------|---------|------------------|
|            |                           |                         |              | Direção | Velocidade (m/s) |
| 28/04/2006 | 22,5                      | 72,0                    | 0,0          | 32      | 0,7              |
| 07/04/2010 | 19,6                      | 71,0                    | 1,0          | 14      | 1,6              |
| 07/04/2016 | 27,0                      | 58,0                    | 3,8          | 9       | 1,5              |
| 21/04/2021 | 21,0                      | 71,0                    | 0,0          | 32      | 1,0              |
| 07/03/2025 | 26,5                      | 55,0                    | 2,5          | 5       | 2,1              |

Fonte: Elaboração própria com base em INMET (2025).

## 2.2.2 Pré-processamento das imagens

A informação captada pelos sistemas a bordo das plataformas satelitais requerem de alguns tratamentos denominados pré-processamento, e que são necessários antes da elaboração de produtos para análise. Esses são descritos da seguinte forma:

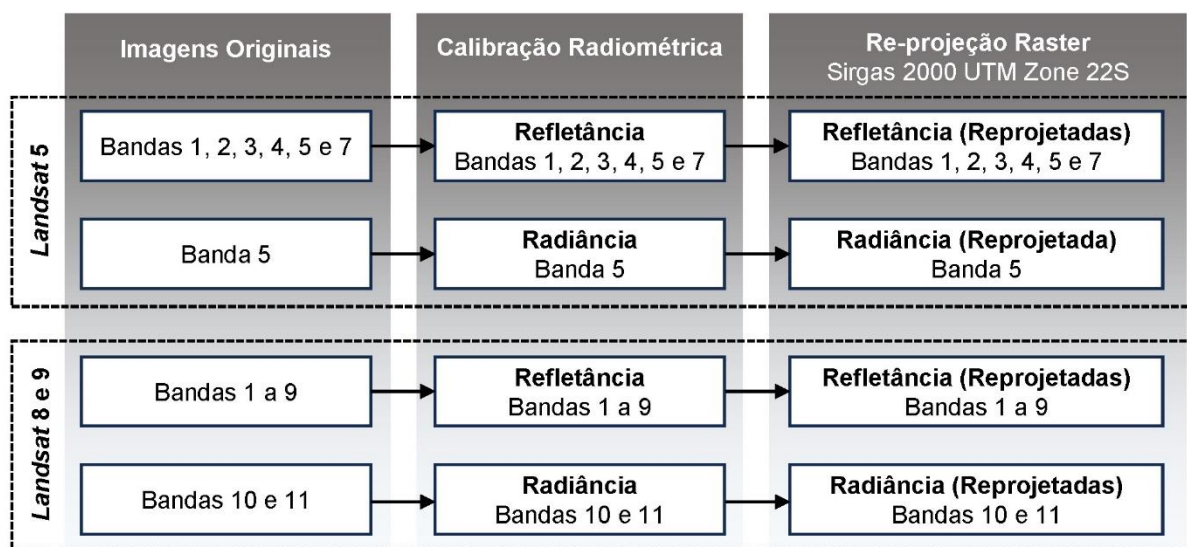
- **Correção radiométrica:** Consiste na modificação dos Números Digitais (ND) originais, numa escala absoluta de radiância ou refletância (Liang; Wang, 2020b)
- **Correção geométrica:** É o câmbio da posição original dos *pixels* para ajustar ou modificar as suas coordenadas (Chuvieco, 1995).
- **Correção atmosférica:** Elimina os efeitos causados por aerossóis e vapor de

<sup>13</sup> Os dados horários coletados pela estação meteorológica correspondem às 0 horas, 12 horas e 18 horas, sendo a mais próxima ao momento em da captura das imagens as correspondentes às 12 horas.

água (Chuvieco, 1995).

Para realizar essas correções, foi utilizado o programa ENVI, versão 5.3 - 64 *bits*, o qual permite obter os valores de radiância e refletância, utilizando as informações contidas no arquivo de metadados de cada imagem. A Figura 10 mostra o fluxograma de trabalho para a realização das correções.

Figura 10 - Fluxograma de pré-processamento das imagens empregadas.



Fonte: Elaboração própria.

Para realizar as correções radiométricas e atmosféricas, foi utilizada a ferramenta “Calibração Radiométrica”, que permite obter os valores de radiância para as bandas do espectro térmico (Banda 5 no *Landsat 5* e Bandas 10 e 11 no *Landsat 8 e 9*) utilizado para a obtenção das Temperaturas Superficiais Terrestres (TST), bem como os valores de refletância empregados para a elaboração dos índices.

As imagens foram corrigidas geometricamente por meio da ferramenta “Reprojetar *Raster*”, utilizando o sistema de coordenadas Sirgas 2000 UTM Zona 22S, correspondente à área onde se localiza Goiânia. Após as correções, foram realizados “mosaicos”, unindo as linhas 71 e 72 para obter uma única imagem que abrange a área do município.

### 2.2.3 Variáveis de estudo

A seção a seguir detalha os procedimentos utilizados para quantificar, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, as variáveis do estudo. Além disso, são detalhados os procedimentos para a obtenção de variáveis que auxiliam na análise e

permitem uma melhor compreensão dos fatores que condicionam o comportamento das ICUS dentro da área de estudo. Para o cálculo dessas variáveis, foi utilizado o *software* de livre acesso QGIS, versão 3.34.6, por meio da ferramenta “calculadora *raster*”, que permite realizar operações matemáticas utilizando as diferentes bandas que compõem cada imagem.

### **Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUS)**

Para determinar as ICUS, é necessário determinar previamente as TST. Os dados de banda infravermelha térmica de imagens de satélite podem representar com eficácia a distribuição espacial do ambiente térmico de grandes áreas urbanas, estimando a Temperaturas Superficial Terrestre (TST ou *Land Surface Temperature* – *LST* em inglês) (Polydoros *et al.*, 2022).

Uma das vantagens da utilização das TST a partir de imagens de satélite, é que elas fornecem um valor de temperatura por *pixel* de imagem, permitindo que mudanças menores de temperatura sejam capturadas e mapeadas, em contraste com o uso de estações meteorológicas fixas (Nimish; Bharath; Ramachandra, 2022).

O cálculo das TST, obtido a partir das bandas de infravermelho, depende das características particulares dos instrumentos a bordo da plataforma do satélite, portanto, há procedimentos específicos para cada tipo. Além disso, as informações necessárias para realizar esses cálculos são registradas nos metadados que acompanham cada imagem, que incluem diversas variáveis dos sensores utilizados ao momento da captura da imagem.

Para o cálculo da TST a partir de imagens dos satélites *Landsat*, foram empregados os procedimentos descritos Salih *et al.* (2018) e Waleed e Sajjad (2022), baseado nas especificações das plataformas *Landsat* 8 e 9. Os autores desenvolveram um procedimento que utiliza a banda térmica para estimar a temperatura de brilho (*BT*) e as bandas Vermelha e Infravermelho Próximo (*NIR*) para calcular o índice *NDVI*, este último necessário para calcular a emissividade ( $\epsilon$ ). As etapas descritas pelos autores para obter a TST são detalhadas a seguir:

A primeira etapa é a conversão dos Números Digitais (DN) das bandas térmicas em radiância espectral ( $L\lambda$ ). No caso desta pesquisa foram utilizadas as ferramentas de “Calibração Radiométrica” do programa ENVI 5.3 para obter a radiância espectral das bandas térmicas. No caso do *Landsat* 5 é calculada a partir da banda 5, enquanto no caso do *Landsat* 8 e 9 são utilizadas as bandas 10 e 11, obtendo uma radiância

para cada banda.

A banda de infravermelho térmico deve ser convertida em temperatura de brilho ( $BT$ ) em graus celsius usando os metadados e a seguinte equação:

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} - 273,15 \quad (4)$$

Onde:

$BT$ : Temperatura de brilho em grados celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$K1$  e  $K2$ : Constantes de calibração que se encontram especificadas nos metadados.

$L\lambda$ : Radiância espectral calculada previamente.

O seguinte passo é o cálculo do índice  $NDVI$  utilizando as bandas 4 e 5 correspondentes a banda vermelha (0.636- 0.673 $\mu\text{m}$ ) e a banda de infravermelho próximo (0.851-0.879 $\mu\text{m}$ ), utilizando a equação seguinte:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (5)$$

Onde:

$NIR$ : Resposta espectral na banda do infravermelho próximo (0.851-0.879 $\mu\text{m}$ ).

$RED$ : Resposta espectral da banda vermelha (0.636- 0.673 $\mu\text{m}$ ).

A partir dos valores de  $NDVI$  obtidos na etapa anterior, é calculada a proporção de vegetação ( $Pv$ ), a qual fornece a estimativa da área sob cada tipo de cobertura de terra. As proporções de vegetação e solo descoberto são obtidas do  $NDVI$  do *pixel* sem correções (Números Digitais - DN).

$$Pv = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (6)$$

Onde:

$NDVI$ : Corresponde ao índice obtido anteriormente.

$NDVI_{max}$  e  $NDVI_{min}$ : Valores máximos e mínimos do índice obtido anteriormente.

Para estimar as TST, é necessário calcular a emissividade da superfície terrestre ( $\epsilon$ ), que é calculada pela equação a seguir:

$$\epsilon = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (7)$$

Onde:



$\varepsilon$ : Emissividade da superfície terrestre.

$Pv$ : Proporção de vegetação calculada anteriormente.

0,986: Valor de correção da equação.

Como última etapa para obter a TST, a seguinte fórmula é aplicada, usando os valores de  $BT$  e  $\varepsilon$  calculados anteriormente:

$$TST = \frac{BT}{\left[1 + \left\{\left(\frac{\lambda BT}{\rho}\right) \ln \varepsilon \lambda\right\}\right]} \quad (8)$$

Onde:

$BT$ : Temperatura de brilho em graus celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\lambda$ : Média de comprimento de onda da banda. No caso do *Landsat 5* é utilizada a média de comprimento de onda da banda 5 (11,435). No caso do *Landsat 8* e 9 foi utilizada uma média dos comprimentos de onda das bandas 10 (10,9) e 11 (12,0), equivalente a 11,45.

$\varepsilon\lambda$ : emissividade da superfície terrestre calculada anteriormente. No caso do *Landsat 5* foi utilizada a emissividade calculada a partir da banda 5. No caso do *Landsat 8* e 9 foi utilizada uma média das emissividades calculadas a partir das bandas 10 e 11.

$\rho$ : 1,4388.

Compreendendo a constante nos conceitos abordados sobre ICU, representada principalmente pela diferença de temperatura entre a área urbana e o seu entorno rural imediato, torna-se a definição territorial de ambos os espaços importante para a medição do fenômeno. De acordo com De Lucena (2013), a quantificação da ICU por meio de sensoriamento remoto é muitas vezes incorreta, pois se baseia apenas em temperaturas absolutas, desconsiderando a base de seu conceito.

Nesse sentido, para o cálculo das ICUS na área de estudo, foi utilizada a média das TST do meio rural como temperatura base para determinar o diferencial. O uso da média permite captar a heterogeneidade do comportamento das TST no meio rural, em contraste com outros trabalhos que utilizam as temperaturas mínimas identificadas. O território rural empregado no cálculo é o definido na legislação como “macrozona rural”, correspondente a áreas fora do perímetro urbano do município. Para os anos de 2006, 2010, 2016 e 2021, foi utilizado o perímetro estabelecido pelo PD de 2007, enquanto que para o ano de 2025 foi utilizado o perímetro estabelecido pelo atual PD publicado em 2022, extraídos do Mapa Digital Fácil de Goiânia

(Prefeitura de Goiânia, 2025).

O cálculo das intensidades das ICUS foi realizado através da seguinte fórmula:

$$Intensidade\ ICUS = TST - \bar{X} TST_{rural} \quad (9)$$

Onde:

$TST$ : Temperatura Superficial Terrestre (*Pixel*).

$\bar{X} TST_{rural}$ : Média da Temperatura Superficial Terrestre do Perímetro Rural.

### **Vegetação Urbana**

A maneira mais eficiente de mapear as mudanças na superfície da terra é por meio do uso de índices. Os índices geralmente assumem a forma de coeficientes de radiância de bandas espectrais em imagens de satélite (Sultana; Satyanarayana, 2022). Os índices permitem o estudo de elementos específicos em grandes áreas, sendo os mais utilizados aqueles relacionados à vegetação, corpos d'água, solos e neve. Mais recentemente, foram desenvolvidos índices para estudar componentes associados à superfície urbana. O estudo de esses ambientes ajuda no entendimento dos comportamentos e mudanças na biodiversidade, padrões dos corpos de água, biomassa e do uso do solo, o que reforça a importância deste tipo de informação para o desenvolvimento de novas estratégias de manejo e políticas ambientais.

Os índices mais comuns empregados para a avaliação do comportamento da vegetação são o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI*), que são adotados nesta pesquisa para quantificar e avaliar a evolução da vegetação urbana.

O índice *NDVI* é capaz de medir a quantidade e o vigor da vegetação, permitindo representar a vegetação encontrada em áreas públicas e privadas como um todo, fornecendo uma visão geral do comportamento espacial da vegetação na área de estudo. A análise da vegetação, segundo Camps-Valls *et al.* (2021), baseia-se no estudo da saúde das plantas e como seu comportamento é reproduzido dentro do espectro do Vermelho (*R*) e Infravermelho Próximo (*NIR*). De acordo com Huang *et al.* (2021), a expressão matemática deste índice é a seguinte:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (5)$$

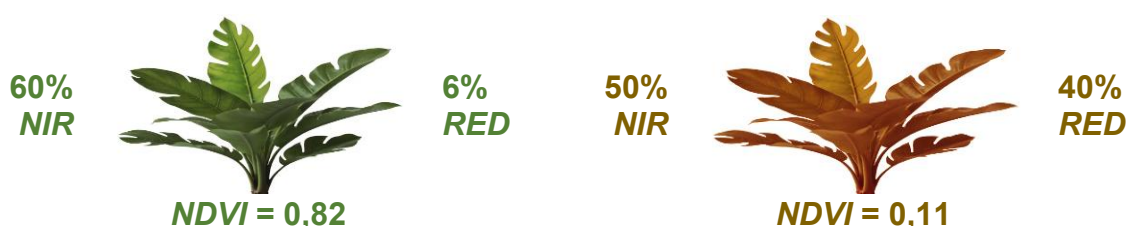
Onde:

*NIR*: Resposta espectral na banda do infravermelho próximo (0.851-0.879 $\mu$ m).

*RED*: Resposta espectral da banda vermelha (0.636- 0.673 $\mu$ m).

Os resultados se expressam dentro do intervalo de -1 a 1, sendo os valores negativos referentes à água e solos descobertos, e os valores maiores representam vegetação densa. A figura 11 compara a refletância da vegetação sadia e seca nos dois espectros eletromagnéticos utilizados pelo índice, evidenciando valores mais elevados de *NDVI* na vegetação sadia em comparação com a vegetação seca.

Figura 11 - Percentual de reflectância no NIR e no RED para as folhagens sadia e seca



Fonte: Elaboração própria com base em Ortiz, Shaw e Fulton (2019).

Os valores *NDVI* também permitem distinguir diferentes tipos de cobertura do solo. O Quadro 11 mostra os valores do *NDVI* associados a diferentes tipos de cobertura do solo e estado de crescimento e saúde das plantas.

Quadro 11 - Valores *NDVI* associados a diferentes estágios de crescimento e saúde das plantas.

| Valores     | Tipos de coberturas do solo, estágio de crescimento e saúde das plantas                                                    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -1,0 a -0,1 | Corpos de água, cobertura de neve, nuvens ou superfícies artificiais                                                       |
| -0,1 a 0,0  | Solo nu ou terreno sem vegetação, como areia ou neve                                                                       |
| 0,0 a 0,1   | Áreas áridas, plantas altamente estressadas ou doentes, ou ambientes urbanos                                               |
| 0,1 a 0,2   | Vegetação escassa ou com dificuldade, muitas vezes necessitando de irrigação ou cuidados                                   |
| 0,2 a 0,3   | A vegetação está presente, mas possivelmente seca, sob estresse ou em recuperação                                          |
| 0,3 a 0,4   | Fases iniciais de crescimento ou plantas moderadamente saudáveis                                                           |
| 0,4 a 0,5   | Indica boa cobertura da cultura e vegetação saudável com densidade moderada.                                               |
| 0,5 a 0,6   | Representa culturas maduras e saudáveis e terras agrícolas bem geridas                                                     |
| 0,6 a 0,8   | Mostra vegetação exuberante, condições ideais para o cultivo e ecossistemas prósperos                                      |
| 0,8 a 1,0   | Indica vegetação extremamente densa e saudável, frequentemente encontrada em florestas tropicais ou culturas de época alta |

Fonte: Elaboração própria com base em Xrtech Group (2025).

Uma variação desse índice foi desenvolvido por Huete (1988) considerando o

efeito do solo sobre os dados captados pelos satélites, criando assim o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*SAVI*). De igual forma como no *NDVI*, o *SAVI* expressa os resultados num intervalo de -1 a 1 e sua expressão matemática é a seguinte:

$$SAVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} * (1 + L) \quad (10)$$

Neste caso, os elementos do *NIR* e *RED* correspondem também as bandas do espectro Infravermelho Próximo e Vermelho, respectivamente, só que é adicionado um coeficiente de ajuste denominado *L*, e que varia em função das condições da área de estudo, ou seja, no caso de áreas com cobertura vegetal alta se usará 0; para média coberta, se usará 0,5; e para áreas com pouca cobertura 1. No caso da presente pesquisa foi utilizado o coeficiente de ajuste com valor de 0,5.

### **Variáveis de apoio**

Com o objetivo de apoiar as análises, foram desenvolvidos o Índice de Edificações de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Building Index - NDBI*), bem como mapas de uso e cobertura do solo (*Land Use Land Cover – LULC*).

#### **Índice de Edificações de Diferença Normalizada (*NDBI*)**

Considerando a densidade construtiva como um fator destacado pela literatura na promoção da formação de ICU, foi utilizado o índice *NDBI* como variável de suporte. Desenvolvido por Zha, Gao e Ni (2003), este índice permite realçar e mapear áreas urbanas, ao distinguir áreas construídas, caracterizadas principalmente por superfícies impermeáveis, de áreas vegetadas e corpos d'água.

O *NDBI* apresenta seus resultados dentro do intervalo de -1 a 1, onde valores positivos altos (próximos a 1) indicam maior densidade construtiva (edifícios, asfalto, pavimentos, etc.), enquanto valores negativos costumam corresponder à vegetação e corpos d'água. Superfícies com baixa umidade, como as áreas impermeáveis que caracterizam o ambiente urbano, bem como solos nus, rochas e areia, respondem de maneira similar ao espectro de radiação, fazendo com que este índice os caracterize dentro da mesma categoria (Sultana; Satyanarayana, 2022). Sua formulação matemática é explicada a seguir:

$$NDBI = \frac{SWIR1-NIR}{SWIR1+NIR} \quad (11)$$

Onde:

*SWIR1*: Resposta espectral das bandas do Infravermelho de onda curta (1.55-1.75 $\mu$ m)

*NIR*: Resposta espectral das bandas do Infravermelho Próximo (0.851-0.879 $\mu$ m)

Uso e Cobertura do Solo (*LULC – Land Use Land Cover*)

Como mencionado anteriormente, as mudanças na cobertura e no uso do solo são o principal fator na formação das ICUS, especialmente nas superficiais. Para identificar o comportamento das superfícies foram elaborados mapas de uso e cobertura do solo (*LULC*) por meio de classificação supervisionada, com o objetivo de distinguir entre cinco classes: vegetação densa, vegetação rasteira, solo nu, áreas construídas e corpos d'água.

Como método de classificação supervisionada, foi adotado o algoritmo de Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Classification*), considerado o classificador paramétrico mais eficiente baseado nas funções de densidade de probabilidade do teorema de Bayes (Otukey; Blaschke, 2010). Este método de classificação opera sob a premissa de que a distribuição da resposta espectral das categorias de treinamento é gaussiana (normal), permitindo descrevê-las completamente por meio do vetor médio e da matriz de covariância. Assim, ao avaliar um *pixel* desconhecido, esses parâmetros são usados para avaliar quantitativamente a variância e a covariância do padrão de resposta espectral de cada classe, atribuindo-o à classe que oferece a maior probabilidade (Lillesand; Kiefer; Chipman, 2015).

A classificação supervisionada foi realizada através do programa QGIS, versão 3.34.6, fornecendo amostras de cada uma das classes em cada imagem multiespectral correspondente a cada ano de estudo.

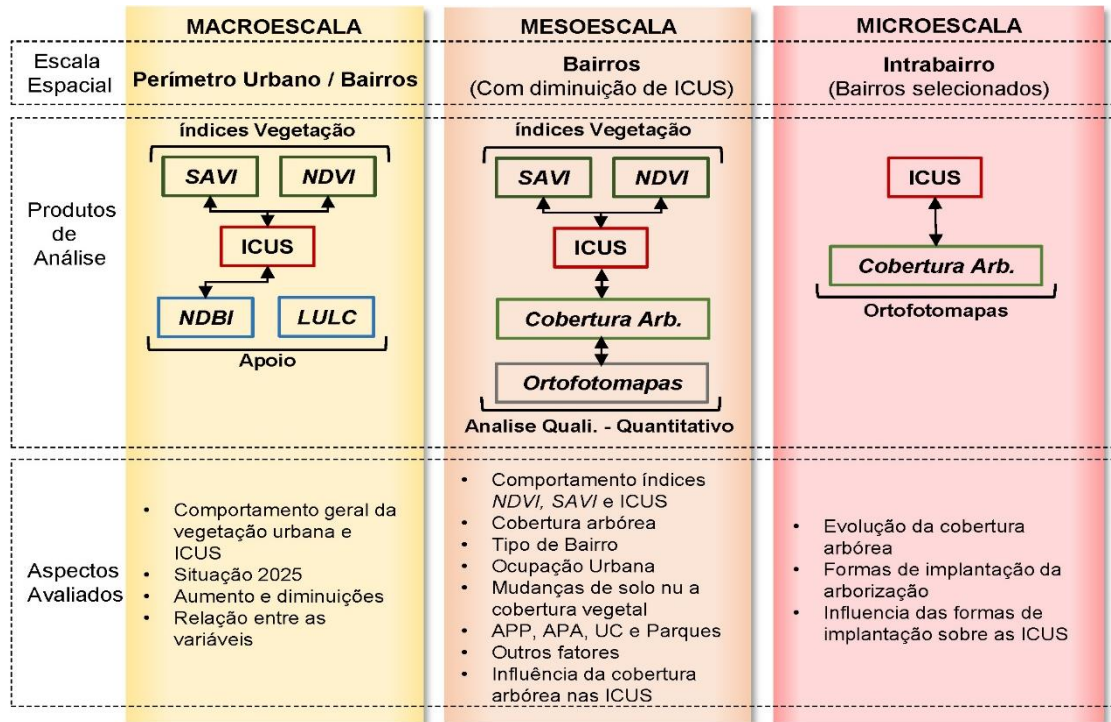
A precisão das classificações foi avaliada por meio da matriz de confusão, utilizando 200 pontos dispostos aleatoriamente dentro do perímetro urbano, contemplando 40 pontos para cada classe. Como fonte de validação, foram utilizados os ortofotomapas de alta resolução indicados na seção 4.2.1. A matriz de confusão permite calcular a precisão do usuário (*Accuracy*), a precisão do produtor (*Reliability*), a precisão geral (*Overall Accuracy*) e o coeficiente Kappa (K).

#### **2.2.4 Análise**

Para atingir os objetivos da presente pesquisa, foram determinadas três escalas de análise, organizadas de uma abordagem mais geral para uma mais específica,

começando pelo perímetro urbano até a escala intrabairro. A Figura 12 descreve graficamente as três etapas de análise, juntamente com a escala espacial adotada para cada fase, bem como os produtos a serem utilizados e os aspectos avaliados.

Figura 12 - Diagrama descritivo das três escalas de análise desenvolvidas na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

Para extrair dados e realizar análises espaciais a partir dos índices desenvolvidos, foram utilizadas as ferramentas estatísticas *raster* do programa QGIS 3.34.6, bem como o programa *Microsoft Excel* para o cálculo de estatísticas a partir dos dados numéricos e para a elaboração de gráficos.

### Unidades espaciais

Com o objetivo de que os resultados da presente pesquisa possam orientar ações que sejam incorporadas ao planejamento urbano local, foram adotadas divisões territoriais utilizadas pela legislação municipal: O “Perímetro Urbano” e o “Bairro”.

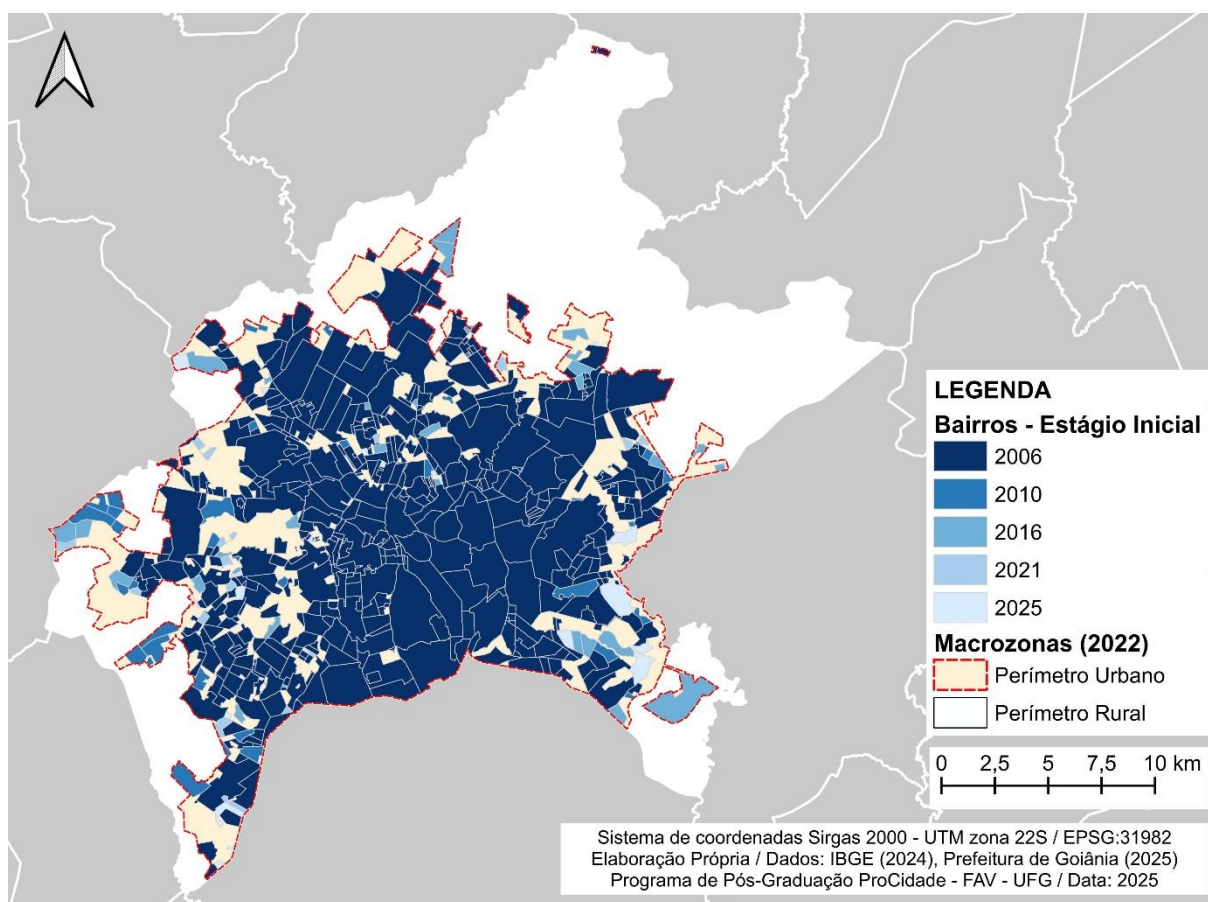
Os perímetros urbanos utilizados na presente pesquisa correspondem aos estabelecidos pelos Planos Diretores de 2007 e 2022, extraídos do Mapa Digital Fácil de Goiânia (Prefeitura de Goiânia, 2025). Para as imagens de 2006, 2010, 2016 e 2021, foi utilizado o perímetro urbano estabelecido pelo PD de 2007, enquanto que para a imagem de 2025 foi utilizado o perímetro urbano do PD vigente de 2022.

Em relação aos bairros, foi utilizada como base a malha de “Divisas de Barrios”

do Mapa Digital Fácil de Goiânia (Prefeitura de Goiânia, 2025), que é composta por 1197 polígonos. Por meio do uso das imagens de validação mencionadas na seção 4.2.1, foram eliminados polígonos vazios e unificados alguns bairros, gerando uma malha composta por 556 bairros.

Com a finalidade de avaliar a evolução dos bairros, uma vez incorporados ao tecido urbano, a malha foi ajustada de acordo com cada ano de estudo. Como critério, foram eliminados os polígonos correspondentes a bairros que estavam completamente em construção (sem moradias concluídas, principalmente correspondentes a condomínios fechados) ou aqueles que não contavam com nenhuma moradia construída (loteamentos em processo de parcelamento) de acordo a cada ano de estudo. Os bairros que contavam com moradias construídas, apesar de terem altas taxas de desocupação, foram contabilizados. Assim, foram contabilizados 450 bairros para o ano de 2006, 484 bairros para 2010, 517 para 2016, 535 para 2021 e 556 para 2025. O mapa 3 mostra os bairros analisados de acordo a seu estágio inicial.

Mapa 3 - Estágio inicial dos bairros por ano de estudo



Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2024) e Prefeitura de Goiânia (2025).

Em relação ao perímetro do município, foi utilizada a malha municipal disponível no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), atualizada em 2024 (IBGE, 2024).

### **Macroescala**

Nesta primeira etapa da análise, foi estudado o comportamento geral de cada variável a partir do perímetro urbano, considerando cada ano de estudo.

Foram elaborados mapas das ICUS para cada ano de estudo e classificados de acordo com os valores de intensidades estabelecidos por Garcia (1995), acrescentando a categoria de “ilhas de frescor” para intensidades inferiores a 0°C, conforme definido na literatura. Com base nessa classificação, foram calculadas as proporções ocupadas pelas diferentes categorias dentro do perímetro urbano, com o objetivo de quantificar sua evolução. Na escala dos bairros, são calculadas as intensidades médias de ICUS para cada um dos bairros e classificadas de acordo com a escala proposta para cada ano de estudo.

Em relação à vegetação urbana, foram elaborados mapas dos índices *NDVI* e *SAVI* para cada ano de estudo. Em escala de bairro, foram calculados os valores médios do *NDVI* e do *SAVI* para cada um, estabelecendo uma classificação de 5 classes com base nos valores máximos e mínimos de cada índice. Com base nessa classificação, são elaboradas estatísticas da quantidade de bairros por cada ano de estudo, permitindo analisar o comportamento geral no período.

Nas variáveis de apoio, é analisado o comportamento das 5 classes levantadas pelo mapa de Uso e Cobertura do Solo (*LULC*). Os valores médios do índice *NDBI* são contrastados com o comportamento dos índices *NDVI* e *SAVI*.

### **Deteção de mudanças**

Para determinar o comportamento das variáveis durante o período de estudo, representadas pelas ICUS e índices de vegetação, foram utilizadas técnicas de detecção de mudanças no âmbito espacial e métodos quantitativos para os bairros.

De acordo com Singh (1989), a detecção de mudanças consiste no processo de identificação de disparidades no estado de um objeto ou fenômeno a partir de observações cronologicamente distintas. Em termos gerais, essa análise pressupõe o emprego de conjuntos de dados multitemporais para a quantificação de efeitos temporais, no qual os dados de sensoriamento remoto consolidaram-se, nas últimas décadas, como a fonte principal para a aplicação dessas técnicas (Lu *et al.*, 2004).



Na presente pesquisa, foram adotadas as técnicas de diferença de imagem (*Image differencing*) para a variável ICUS e diferenciação entre índices de vegetação (*Vegetation index differencing*), para os índices *NDVI* e *SAVI*. De acordo com Lu *et al.* (2004), ambas as técnicas pertencem à categoria de “álgebra” e baseiam-se na mesma operação, a subtração da imagem mais antiga da mais recente, *pixel* por *pixel*. De acordo com o autor, a Diferença de Imagem é a técnica mais utilizada na prática entre os métodos baseados em álgebra, tendo entre suas vantagens a simplicidade e a facilidade da interpretação dos resultados.

Considerando o período de estudo, foram subtraídos, *pixel a pixel*, os valores da imagem de 2006 da imagem de 2025, para cada variável. Desta forma, são destacadas graficamente as alterações entre o primeiro e o último ano de estudo, obtendo-se valores positivos para os aumentos e valores negativos para as diminuições. O procedimento foi aplicado de forma espacial, por meio da “calculadora *raster*” no programa QGIS, utilizando como base a imagem *raster* de cada variável. A fórmula aplicada na “calculadora *raster*” detalha-se a seguir:

$$Raster_{Aum/Dism} = Raster_{2025} - Raster_{2006} \quad (12)$$

Onde:

*Raster* 2006: Imagem *raster* correspondente ao ano 2006.

*Raster* 2025: Imagem *raster* correspondente ao ano 2025.

No caso do método quantitativo, foram determinadas a média de cada variável discriminada por bairro, utilizando a ferramenta “Estatísticas *raster*” no programa QGIS. Dessa forma, obtém-se uma média das variáveis com base no comportamento espacial da área de cada bairro, para cada ano de estudo. Posteriormente, são calculados os aumentos e diminuições de forma semelhante à utilizada no método espacial, mas de forma numérica no programa *Microsoft Excel*.

A forma numérica tem a vantagem de poder isolar (eliminar) os dados referentes a bairros que não estavam construídos no ano do estudo, evitando distorções na análise da evolução das variáveis. Desta forma, utiliza-se o valor correspondente ao «Estágio inicial» do bairro para efetuar a subtração, utilizando a seguinte formula:

$$Variavel_{Aum/Dism} = Variavel_{2025} - Variavel_{Est. Inicial} \quad (13)$$

Onde:

*Raster Est. Inicial*: Valor médio da variável correspondente ao estágio inicial do bairro.

*Raster 2025*: Valor médio da variável correspondente ao ano 2025.

#### Relação entre as variáveis

A relação entre a vegetação, representada pelos índices *NDVI* e *SAVI* (variável independente) e as ICUS (variável dependente), foi avaliada por meio do coeficiente de correlação de Pearson e pela regressão dos mínimos quadrados ordinários. Foram utilizados os valores médios de *NDVI*, *SAVI* e ICUS de cada bairro para cada ano analisado, utilizando os coeficientes de correlação ( $r$ ) e de determinação ( $R^2$ ) para avaliar a força e direção da relação, assim como o impacto relativo da vegetação na predição das intensidades das ICUS.

O Quadro 12 apresenta a interpretação do coeficiente de Pearson ( $r$ ) de acordo a Zou, Tuncali e Silverman (2003).

Quadro 12 - Interpretação do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ).

| Valor do Coeficiente de correlação ( $r$ ) | Direção e força da correlação |
|--------------------------------------------|-------------------------------|
| -1                                         | Perfeitamente negativa        |
| -0,8                                       | Fortemente negativa           |
| -0,5                                       | Moderadamente negativa        |
| -0,2                                       | Ligeiramente negativa         |
| 0                                          | Sem associação                |
| 0,2                                        | Ligeiramente positiva         |
| 0,5                                        | Moderadamente positiva        |
| 0,8                                        | Fortemente positiva           |
| 1                                          | Perfeitamente positiva        |

Fonte: Elaboração com base em Zou, Tuncali e Silverman (2003).

#### Mesoescala

A segunda fase da análise tem como objetivo determinar a influência da cobertura arbórea nas intensidades das ICUS, identificando os elementos que condicionam a sua capacidade enquanto estratégia de mitigação. A análise centra-se nos bairros que reduziram as suas intensidades durante o período, incluindo aqueles que não registaram aumentos nos índices de vegetação

Por meio dos ortofotomapas e imagens de alta resolução empregadas para validação (Seção 4.2.1), assim como os mapas de mudanças nos índices de vegetação, ICUS e uso e cobertura do solo, é realizada uma análise qualitativa e quantitativa, analisando vários elementos identificados durante a pesquisa, atribuindo-lhes uma escala qualitativa para facilitar a sua compreensão.

## Cobertura arbórea

Com o intuito de determinar o potencial da arborização urbana na mitigação das ICUS, os bairros analisados foram categorizados de acordo a sua cobertura arbórea e crescimento no período de estudo.

A estimativa da cobertura arbórea foi realizada através do cálculo da superfície (área) ocupada pelas copas das árvores (incluindo palmeiras) em relação à área total do bairro, de acordo com os perímetros dos bairros definidos na secção 2.2.4 «Análise, Unidades espaciais», tanto no estágio inicial do bairro como para 2025.

Para efeitos analíticos, a cobertura foi classificada em dois tipos:

1. Cobertura arbórea identificada em áreas delimitadas como APP, APA, UC e Parques pela Prefeitura de Goiânia, disponível nas camadas correspondentes do Mapa Fácil Digital.
2. Cobertura arbórea localizada em lotes e quadras, bem como em áreas adjacentes não identificadas como áreas protegidas.

As chácaras e bairros de uso não residencial foram excluídas da estimativa da cobertura arbórea, uma vez que apresentam configurações muito heterogêneas que dificultam a pegada de amostras representativas do comportamento da cobertura.

Com o objetivo de captar as particularidades da configuração urbana dos bairros analisados, foram definidos três tipos de áreas para a estimativa de cobertura:

**Zona Urbana Geral:** Estas áreas constituem a maior parte do bairro e caracterizam-se principalmente pela disposição típica de lotes e quadras. Para determinar a cobertura arbórea destas áreas, são realizadas amostragens equivalentes a 10% da área total do bairro utilizando uma área de 25.000 m<sup>2</sup> para cada amostra. No caso de bairros com uma área inferior a 250.000m<sup>2</sup>, aqueles que apresentam uniformidade no tecido urbano são amostrados através de uma única amostra; aqueles com grande heterogeneidade são amostrados na totalidade.

Para determinar o número de amostras necessárias, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$N^{\circ} \text{ Amostras} = \frac{\left( \frac{\text{Área Total Bairro}}{10} \right)}{250.000\text{m}^2} \quad (18)$$

Onde:

*Área Total Bairro:* Área total do bairro expressa em m<sup>2</sup>.

Depois de definida a quantidade de amostras, estas são localizadas nos setores

mais representativos da «Zona Urbana Geral» e calcula-se a área ocupada pelas copas das árvores dentro das amostras. Posteriormente, calcula-se a cobertura arbórea equivalente à área das amostras, através da seguinte fórmula:

$$Cob. amostras = \frac{Cob. Amostras}{(N^{\circ} Amostras \times 25.000m^2)} \quad (19)$$

Onde:

*Cob. Amostras (m<sup>2</sup>)*: Área total da copa das árvores expressa em m<sup>2</sup>.

*N<sup>o</sup> Amostras*: Número de amostras utilizadas.

Por fim, a proporção de cobertura obtida nas amostras é aplicada à «Zona Urbana Geral», com o objetivo de estimar o valor total, em metros quadrados (m<sup>2</sup>), da área ocupada pela cobertura arbórea. A fórmula utilizada é a seguinte:

$$Cob. Geral = Cob. Amostras \times \text{Área Urb. Geral} \quad (20)$$

Onde:

*Cob. Amostras*: Proporção da cobertura arbórea determinada nas amostras.

*Zona Urbana Geral (m<sup>2</sup>)*: Área em m<sup>2</sup> correspondente à “Zona Urbana Geral”.

**Zona Urbana Especial:** Áreas atípicas em relação ao tecido urbano geral com arborização abundante, como praças, avenidas ou configurações diferenciadas, bem como quadras e áreas vazias. Estas zonas são amostradas na sua totalidade, calculando-se a área correspondente às copas das árvores.

**Zona APP, APA, UC e Parques:** Áreas delimitadas como APP, APA, UC e parques situadas dentro do perímetro do bairro. Estas zonas são amostradas na sua totalidade, calculando-se a área correspondente às copas das árvores.

Depois de determinada a área ocupada pela copa das árvores correspondente aos três tipos de zonas descritas anteriormente, calcula-se a cobertura arbórea total do bairro através da seguinte fórmula:

$$Cob. Total = \left( \frac{Cob. Geral + Cob. Esp. Urb. + Cob. APP}{\text{Área Total Bairro}} \right) \times 100 \quad (21)$$

Onde:

*Cob. Geral*: Cobertura arbórea da “Zona Urbana Geral” em m<sup>2</sup>.

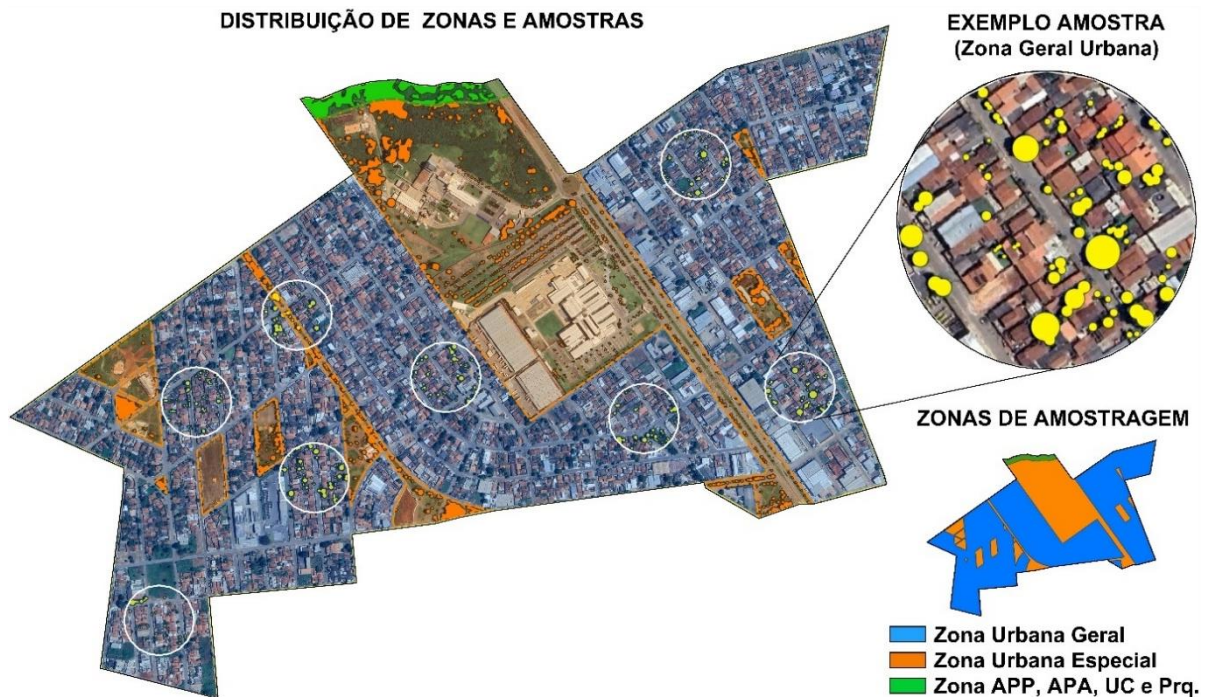
*Cob. Esp. Urb.*: Cobertura arbórea da “Zona Urbana Especial” em m<sup>2</sup>.

*Cob. APP*: Cobertura arbórea da “Zona APP, APA, UC e Prq.” em m<sup>2</sup>.

*Área Total Bairro* : Área total do bairro, em m<sup>2</sup>.

A Figura 13 apresenta um exemplo da estimativa de cobertura arbórea.

Figura 13 - Exemplo da estimativa de cobertura arbórea (Setor Santos Dumont - 2025)



**Estimativa de Cobertura Arbórea - Setor Santos Dumont - 2025**

$$\begin{aligned}
 1. N^{\circ} \text{ Amostras} &= \frac{\left( \frac{1.929.235,18\text{m}^2}{10} \right)}{25.000\text{m}^2} = 7,7 \approx 8 & 3. \text{ Cob. Geral} &= 0,0976 \times 1.382.770,90\text{m}^2 = \mathbf{134.963,76\text{m}^2} \\
 2. \text{ Cob. Amostras} &= \frac{19.520,87\text{m}^2}{8 \times 25.000\text{m}^2} = \mathbf{0,0976} & 4. \text{ Cob. Total} &= \frac{134.963,76\text{m}^2 + 60.874,45\text{m}^2 + 16.037,78\text{m}^2}{1.929.235,18\text{m}^2} \times 100 = \mathbf{10,98\%}
 \end{aligned}$$

Fonte: Elaboração própria com base em imagens de Google (2025).

Os bairros são agrupados de acordo com a estimativa da cobertura arbórea em seis categorias, tanto no estágio inicial como para 2025. O quadro 13 apresenta os intervalos de cobertura correspondentes a cada categoria.

Quadro 13 – Escala qualitativa atribuída à proporção de cobertura arbórea

| Escala qualitativa de cobertura arbórea | Intervalos (%) |
|-----------------------------------------|----------------|
| Sem arborização                         | < 1%           |
| Muito baixa                             | 1 a 6%         |
| Baixa                                   | 6 a 12%        |
| Média                                   | 12 a 18%       |
| Alta                                    | 18 a 24%       |
| Muito alta                              | > 24%          |

Fonte: Elaboração própria.

O crescimento da cobertura arbórea é calculado subtraindo o valor da cobertura

no estágio inicial do valor estimado para 2025, expressando o resultado em pontos percentuais. A fórmula seguinte detalha o procedimento:

$$\text{Cresc. Cobertura} = \text{Cob. 2025} - \text{Cob. Est. Inicial} \quad (22)$$

Onde:

*Cob. 2025*: Cobertura arbórea estimada no 2025, expressa em porcentagem.

*Cob. Est. Inicial*: Cobertura arbórea estimada no estágio inicial, expressa em porcentagem.

Tal como acontece com a cobertura arbórea, os bairros são classificados de acordo com sete categorias de crescimento, cujos intervalos são apresentados no quadro 14.

Quadro 14 – Escala qualitativa atribuída ao crescimento da cobertura arbórea

| <b>Escala qualitativa de crescimento da cobertura</b> | <b>Intervalos (pontos percentuais)</b> |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Supressão                                             | < - 1                                  |
| Sem crescimento                                       | -1 a 1                                 |
| Muito leve                                            | 1 a 5                                  |
| Leve                                                  | 5 a 9                                  |
| Médio                                                 | 9 a 13                                 |
| Alto                                                  | 13 a 17                                |
| Muito alto                                            | >17                                    |

Fonte: Elaboração própria.

### Tipo de bairro

Os bairros são classificados em bairros residenciais, chácaras, condomínios fechados, condomínios verticais, de uso misto e de uso não residencial. A definição adotada nesta pesquisa para cada categoria está apresentada no quadro seguinte:

Quadro 15 - Definições adotadas para cada categoria de tipo de bairro

| <b>Classificação</b> | <b>Definição adotada</b>                                                                                                          |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bairro residencial   | Bairro residencial integrado ao tecido urbano (sem controle de acesso), com diferenciação de lotes                                |
| Condomínio fechado   | Bairro residencial com controle de acesso, com diferenciação de lotes                                                             |
| Condomínio vertical  | Bairro residencial com controle de acesso, composto por um ou vários edifícios de apartamentos, sem diferenciação de lotes        |
| Uso misto            | Bairro composto por usos residenciais e usos não residenciais de grande porte (shoppings, indústrias, armazéns, etc.)             |
| Uso não residencial  | Bairros com uso não residencial de grande porte, sem diferenciação evidente de lotes                                              |
| Chácaras             | Áreas dentro do perímetro urbano com usos e configuração predominantemente rural, denominadas “chácaras” na malha de bairros base |

Fonte: Elaboração própria.

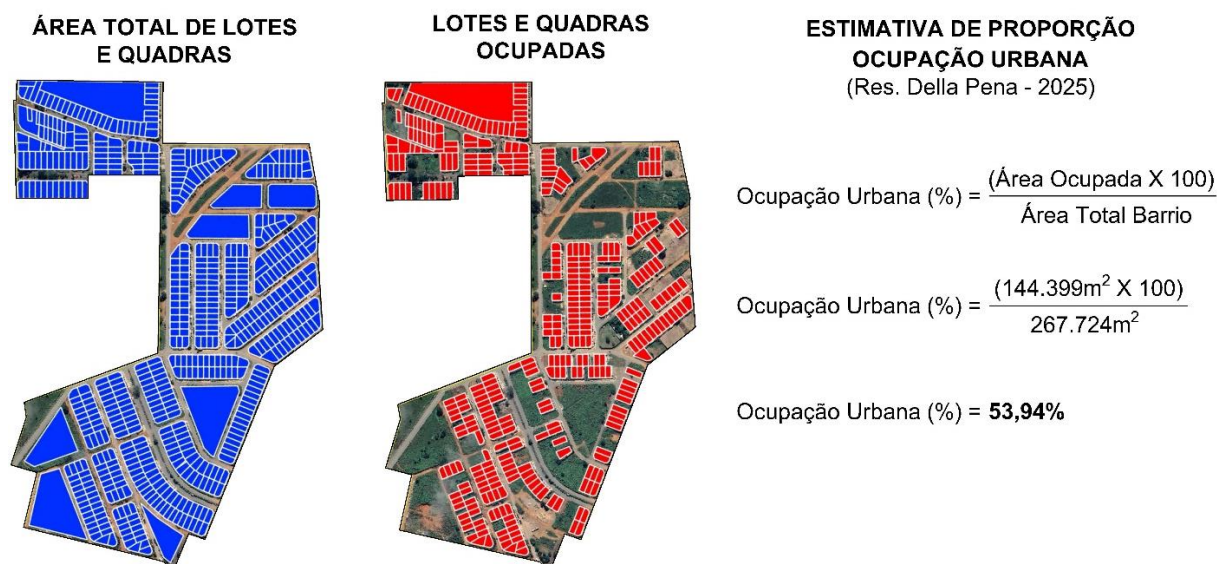
## Ocupação Urbana

Levando em consideração a influência da densidade construtiva no comportamento das ICU, destacado por Oke (2002), calculam-se as percentagens correspondentes aos lotes e às áreas edificáveis ocupadas de cada bairro, tanto no estágio inicial como para 2025.

Tendo como base a malha de divisas de lotes do Mapa Digital Fácil de Goiânia, e mediante o registro visual das imagens de alta resolução empregadas para validação (Seção 4.2.1), calculam-se as áreas de lotes e quadras com ocupação aparente. Áreas de uso esportivo e praças com infraestrutura visível são contabilizadas como áreas ocupadas, enquanto áreas pertencentes a APP, APA, UC e parques não são incluídas como áreas edificáveis. Bairros de uso não residencial não são contemplados nesta análise por apresentarem configurações que impossibilitam a diferenciação de lotes, bem como as chácaras, cujo comportamento assemelha-se ao de áreas rurais.

A Figura 14 apresenta um exemplo do cálculo da proporção de ocupação urbana.

Figura 14 - Exemplo de estimativa de ocupação urbana (Res. Della Pena - 2025)



Fonte: Elaboração própria com base em imagens de Google (2025) e Prefeitura de Goiânia (2025).

Em função da proporção de ocupação urbana obtida (%), os bairros são classificados em 6 categorias. O quadro 16 indica os intervalos para cada categoria:



Quadro 16 – Escala qualitativa atribuída à ocupação urbana

| <b>Escala qualitativa de ocupação urbana</b> | <b>Proporção estimada (%)</b> |
|----------------------------------------------|-------------------------------|
| Muito baixa                                  | < 20%                         |
| Baixa                                        | 20 a 40%                      |
| Média                                        | 40 a 60%                      |
| Alta                                         | 60 a 80%                      |
| Muito alta                                   | 80 a 95%                      |
| Ocupação total                               | > 95%                         |

Fonte: Elaboração própria.

### Mudanças de solo nu a cobertura vegetal

Nesta categoria são identificados os bairros nos quais ocorrem mudanças de solo nu para áreas verdes durante o período de estudo, elemento identificado pela pesquisa com uma forte influência sobre as ICUS.

### APP, APA, UC e Parques

Áreas de Preservação Permanente (APP), Áreas de Proteção Ambiental (APA), Unidades de Conservação (UC) e Parques, percorrem toda a cidade e fazem parte do perímetro de múltiplos bairros, influenciando o comportamento da vegetação urbana e das ICUS. Dessa forma, foram identificados os bairros que possuem áreas classificadas nesta categoria dentro de seus limites.

### Outros fatores

Durante a análise, foram identificados outros fatores que influenciam o comportamento das ICUS, como coberturas refletivas, sombreamento de edificações altas e mudanças na cobertura do solo em áreas contíguas ao perímetro dos bairros.

### Influência da cobertura arbórea nas ICUS

Tal como na análise em macroescala, a relação entre a cobertura arbórea (variável independente) e as ICUS (variável dependente) é avaliada através do método dos mínimos quadrados ordinários. Utilizando os dados do 2025, os valores da cobertura arbórea e das intensidades médias das ICUS dos bairros, são agrupados em função da ocupação urbana. Através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e dos componentes da função da regressão linear ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ), avalia-se a força e a direção da relação, bem como o impacto da cobertura arbórea na previsão das intensidades.

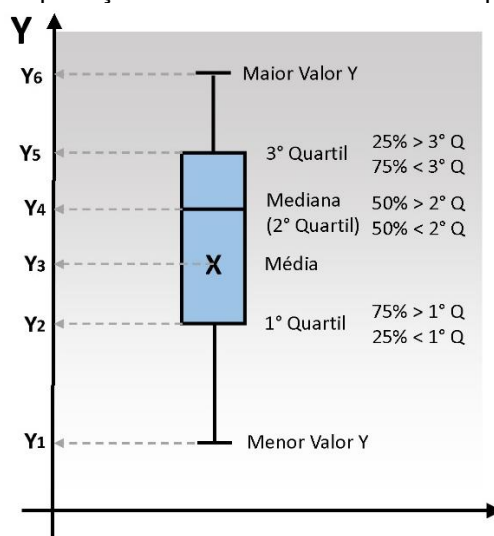
### Gráficos

Por meio de gráficos de caixa simples (*Box Plot*), os dados levantados para cada elemento são relacionados com os valores médios das ICUS e da cobertura arbórea,



revelando padrões e tendências que condicionam a influência da arborização urbana. Os gráficos de caixa simples permitem representar a distribuição do conjunto de dados de forma visual, exibindo seis estatísticas importantes: mínimo, máximo, média, mediana, primeiro quartil e terceiro quartil (Figura 15). A construção desses gráficos por meio do programa *Microsoft Excel* permite isolar os valores discrepantes (*Outliers*), reduzindo distorções na interpretação.

Figura 15 - Interpretação de um Gráfico de Caixa Simples (*Box Plot*).



Fonte: Adaptado de Montoro (2019).

A seguir são apresentadas a definição de cada um dos termos estatísticos identificado no gráfico de caixa simples, de acordo com Assis, Sousa e Dias (2019):

- **Média:** Também denominada média aritmética, corresponde à soma de todos os valores dividida pelo número total de observações.
- **Mediana:** Medida de tendência central que representa o valor central de uma distribuição de dados, quando dispostos em ordem crescente ou decrescente. Também pode ser denominada segundo quartil (2ºQ).
- **Quartil:** Ao dividir um conjunto de dados em quatro partes iguais (25% cada), cada uma delas adota o nome de quartil. O primeiro quartil (1ºQ ou percentil 25) corresponde ao valor que separa os 25% valores inferiores dos 75% superiores. O terceiro quartil (3ºQ ou percentil 75) corresponde ao valor que separa os 75% valores inferiores dos 25% superiores.
- **Máximo:** Corresponde ao maior valor de um conjunto de dados.
- **Mínimo:** Corresponde ao menor valor de um conjunto de dados.

Os valores mínimos e máximos apresentados nos gráficos de caixa simples

nesta pesquisa, excluem os valores discrepantes (*outliers*) identificados pelo *software*, exceto quando indicado o contrário.

### **Microescala**

A última fase de análise constitui um desdobramento da pesquisa que, dada a amplitude do trabalho realizado e as limitações temporais do mestrado, projeta-se como continuidade em nível de doutorado ou pesquisas posteriores.

Com a finalidade de aprimorar a eficácia da arborização urbana como estratégia de mitigação das ICUS no município, esta fase propõe o estudo da influência da arborização na escala intrabairro. Para atingir esse objetivo, propõe-se mapear a cobertura arbórea em bairros que apresentaram crescimento significativo da arborização urbana no período do estudo, empregando as imagens de alta resolução utilizadas para validação.

Os bairros são selecionados considerando suas configurações urbanas, buscando representar as diferentes tipologias construtivas presentes na cidade. Por meio do uso de ferramentas SIG, será mapeada e quantificada a evolução da cobertura arbórea, determinando-se relações espaciais com o comportamento das ICUS. A avaliação da distribuição espacial da cobertura arbórea em relação ao ambiente construído permitirá identificar os padrões mais eficientes na redução das ICUS, adaptados aos diferentes contextos selecionados, fornecendo critérios que podem ser incorporados na elaboração de projetos de arborização urbana, bem como na legislação municipal (PDAU).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados de acordo com as escalas de análise estabelecidas na metodologia. O capítulo se inicia de uma perspectiva mais ampla (macroescala), que busca determinar o comportamento das variáveis desde a escala do perímetro urbano; até uma mais detalhada (mesoescala), concentrada na influência da arborização urbana sobre as ICUS na escala de bairro.

Ao longo do capítulo, são contrastados resultados de estudos realizados em outras cidades, tanto brasileiras quanto estrangeiras, buscando elucidar as associações entre os diferentes elementos urbanos envolvidos na formação das ICU, bem como as metodologias empregadas para o seu estudo.

A apresentação dos resultados é abordada de forma descritiva, com o intuito de permitir ao leitor estabelecer associações entre as variáveis levantadas e exemplos concretos da cidade de Goiânia. Com o objetivo de fornecer informações atualizadas que permitam orientar e priorizar ações de mitigação das ICU em Goiânia por meio da arborização urbana, dados de 2025 sobre o comportamento das variáveis levantadas na análise de “Macroescala”, podem ser encontrados no “Apêndice A” da presente pesquisa.

#### **3.1 Macroescala**

No perímetro urbano, é abordada a evolução das variáveis de estudo no período de 2006 a 2025, bem como seu estado atual (2025) dentro da área de estudo, por meio das TST, que permitem a elaboração de mapas de ICUS, assim como dos índices *NDVI* e *SAVI*, que determinam os níveis de vegetação.

##### **3.1.1 Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUS)**

###### **Temperaturas Superficiais Terrestres (TST)**

Por meio de imagens de satélite, foram calculadas as TST durante o período do estudo, tanto para a área municipal quanto para o perímetro urbano e rural. A tabela 3 e a figura 16 mostram o comportamento das TST para a área do município, identificando aumentos nas mínimas, máximas e médias no período do estudo. O município apresenta um aumento médio equivalente a 3,08°C, considerando os anos de 2006 a 2025, registrando a maior temperatura média no ano de 2016 (30,62°C) e a menor em 2010 (26,17°C).

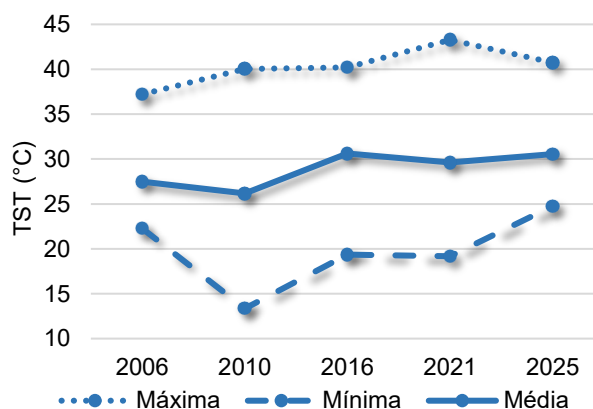
Em 2021, o município atingirá sua TST média mais alta, equivalente a 43,27°C, enquanto em 2010 atingirá a mínima de 13,35°C. Em relação à amplitude entre as TST mínimas e máximas, são registradas oscilações entre 26,66°C e 14,95°C, correspondendo a mais alta para 2010 e a mais baixa para 2006.

Tabela 3 - Comportamento das TST no município de Goiânia-GO, 2006-2025.

| Data | Área do município (°C) |       |       |                         |
|------|------------------------|-------|-------|-------------------------|
|      | Méd.                   | Máx.  | Mín.  | $\Delta$<br>Tmáx - Tmín |
| 2006 | 27,48                  | 37,21 | 22,26 | 14,95                   |
| 2010 | 26,17                  | 40,01 | 13,35 | 26,66                   |
| 2016 | 30,62                  | 40,20 | 19,36 | 20,84                   |
| 2021 | 29,62                  | 43,27 | 19,17 | 24,10                   |
| 2025 | 30,56                  | 40,75 | 24,75 | 16,00                   |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 - Comportamento das TST no município de Goiânia-GO, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

Em relação às TST do perímetro urbano e rural, a tabela 4 mostra os valores médios, mínimos e máximos para cada área, permitindo determinar as intensidades médias e máximas das ICUS que se desenvolvem no perímetro urbano.

Tabela 4 - TST do perímetro urbano e rural e intensidades de ICUS no período 2006-2025.

| Data | TST Perímetro Urbano (°C) |        |        | TST Perímetro Rural (°C) |        |        | Intensidade ICUS (°C) |        |
|------|---------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|--------|
|      | Média                     | Máxima | Mínima | Média                    | Máxima | Mínima | Média                 | Máxima |
| 2006 | 28,49                     | 37,21  | 22,26  | 25,93                    | 34,76  | 22,26  | 2,56                  | 11,28  |
| 2010 | 27,20                     | 40,01  | 13,35  | 24,59                    | 33,11  | 19,52  | 2,60                  | 15,42  |
| 2016 | 31,81                     | 40,20  | 23,92  | 28,81                    | 37,98  | 22,36  | 3,01                  | 11,39  |
| 2021 | 30,87                     | 43,27  | 19,17  | 27,69                    | 38,46  | 22,75  | 3,18                  | 15,58  |
| 2025 | 31,66                     | 40,75  | 25,21  | 28,84                    | 38,66  | 24,75  | 2,82                  | 11,90  |

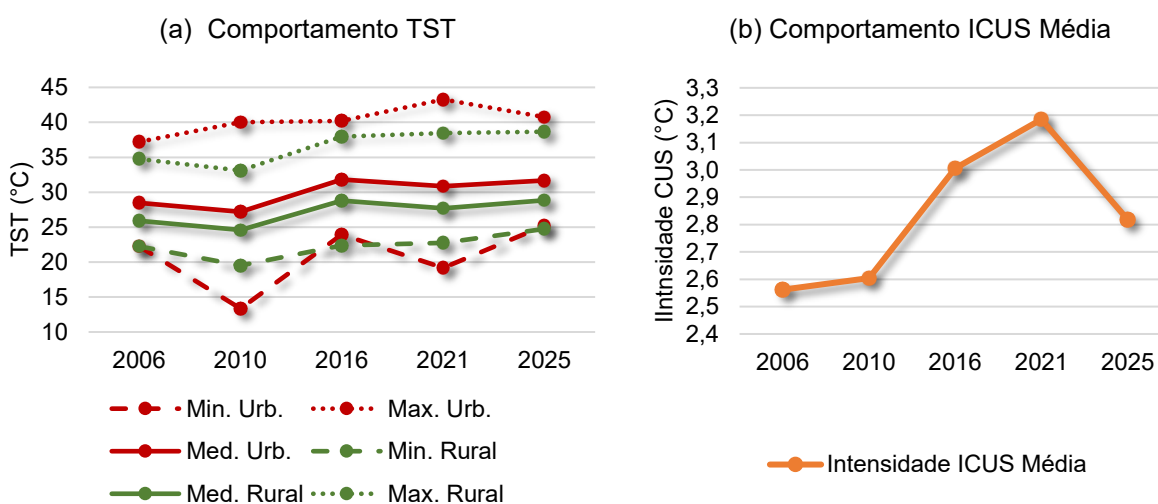
Fonte: Elaboração própria.

Durante o período de estudo, o perímetro urbano apresenta TST médias que oscilam entre 27,20 e 31,80°C, mínimas entre 13,35 e 25,21°C e máximas entre 37,21 e 43,27°C; enquanto que no perímetro rural as TST médias oscilam entre 24,59 e 28,84°C, máximas entre 33,11 e 38,66°C e mínimas entre 19,52 e 24,75°C. Em relação às intensidades das ICUS (relacionadas ao perímetro urbano), a intensidade média oscila entre 2,56 e 3,18°C e a intensidade máxima entre 11,28 e 15,58°C, sendo 2021 o ano em que se registra a maior intensidade média e máxima do período.

estudado, em contraste com o 2006 que apresenta as menores intensidades médias e máximas. Nos anos de 2016 e 2025, o perímetro rural registra as TST médias mais altas do período, reduzindo o diferencial entre a área urbana e a rural, registrando uma intensidade média de ICUS de 3,01 e 2,82°C, respectivamente.

Como se pode observar na figura 17 (a), as TST médias entre a área urbana e a área rural apresentam um comportamento semelhante, com uma variação média de 2,84°C, valor que representa a intensidade média da ICUS para o período em estudo. No gráfico, é possível observar uma maior amplitude nas TST urbanas em relação às rurais. Enquanto a área rural apresenta uma amplitude média de 14,26°C, registrando uma máxima de 15,71°C no ano de 2021, a área urbana registra uma média de 19,50°C, com uma amplitude máxima de 26,66°C registrada no 2010.

Figura 17 - Comportamento das TST e ICUS no perímetro urbano e rural, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

As diferenças de amplitude térmica podem ser explicadas pela maior presença de vegetação nas áreas rurais em relação às urbanas. Conforme Milano e Dalcin (2000), a vegetação atua como agente de estabilização e otimização microclimática ao mitigar a insolação direta, elevar as taxas de evapotranspiração e atenuar a velocidade dos ventos.

Em relação ao comportamento das ICUS durante o período de estudo, a figura 17 (b) mostra um aumento constante da intensidade entre 2006 e 2021, de 2,56 a 3,18°C respectivamente, descendo para 2,82°C no ano de 2025. Considerando as intensidades registradas no primeiro e no último ano do período de estudo (2006-2025), a intensidade média das ICUS no perímetro urbano aumentou um 10%,

equivalente a 0,26°C.

A comparação com outros estudos é dificultada pela falta de consenso para determinar as ICUS. A falta de uma classificação padronizada e baseada em elementos físicos sobre a definição de área rural e área urbana gera incompatibilidades na comparação dos valores relatados pela literatura (Stewart; Oke, 2012). Diversos trabalhos realizados no Brasil adotaram o critério estabelecido por Oke (2002) para delinear as ICUS, no qual a intensidade do fenômeno é definida pela diferença entre a temperatura máxima urbana e a mínima rural registradas simultaneamente.

No estudo realizado por Nascimento e Oliveira (2011) sobre a evolução das ICUS de Goiânia, esse critério é utilizado. Os autores registraram um aumento nas intensidades máximas das ICUS entre 1986 e 2010 de 7°C, passando de 10 para 17°C, tomando como base uma TST de 19°C, registrada como mínima para cada ano. O presente estudo identifica TST mínimas entre 13,35 e 24,75°C durante o período de 2006-2025, gerando maiores variações nas amplitudes, equivalentes a 14,95 a 26,66°C. Em relação aos aumentos das médias das TST, ambos os estudos apresentam valores semelhantes. Para o período de 1986 a 2010, o estudo realizado por Nascimento e Oliveira (2011) registra um aumento de 3,5°C (1986 = 24°C / 2010 = 27,5°C) equivalente a 0,15°C por ano, enquanto o presente estudo registra um aumento de 3,08°C (2006 = 27,48°C / 2025 = 30,56°C), equivalente a 0,16°C. A diferença nos resultados revela a variabilidade do fenômeno das ICUS, dependendo em grande parte dos elementos climáticos no momento da captura das imagens.

Em outros estudos desenvolvidos com esse critério, cidades como Presidente Prudente – SP (11 – 13°C), Rosana – SP (8°C), Paranavaí – PR (11°C), Nova Andradina – MS (8°C), Palmas – TO (15°C) e Goiânia – GO (10 - 17°C) registraram intensidades máximas entre 8 e 17°C, utilizando como base a temperatura mínima capturada na área de estudo (Amorim, 2017; Andrade; Amorim, 2023; Gomes; Fuzeto; Prates, 2020; Nascimento; Barros, 2009; Nascimento; Oliveira, 2011). Outro trabalho, como o realizado por Silveira *et al.* (2023), utilizou as TST médias do último ano de estudo para estabelecer comparações entre os anos 2000 e 2020 nas cidades de Joinville, Criciúma e Lages, no estado de Santa Catarina.

Em contrapartida, outros estudos estabeleceram uma diferenciação entre a área urbana e a área rural para delinear a intensidade das ICUS. O estudo realizado por

Alves (2019) estabelece um buffer de 550 m em relação ao perímetro urbano para delimitar a área rural, utilizando a média das TST dessa área para delinear as intensidades das ICUS. Neste estudo, são feitas comparações entre 20 cidades de pequeno porte localizadas no leste do estado de Goiás, registrando ICUS entre 1,6 e 5,8°C, demonstrando relações entre a quantidade de população e área urbana com as intensidades registradas.

Estudos desenvolvidos em outros países adotam um critério semelhante, variando a distância em que se estende a área rural, dependendo das escalas de análise. Clinton e Gong (2013) utilizaram buffers de 5 e 10 km para delimitar as áreas urbanas das rurais, buscando determinar a influência de diversos fatores ao longo das cidades localizadas entre as latitudes 71 e -55 em nível mundial; enquanto Imhoff *et al.* (2010) definiram como áreas suburbanas aquelas localizadas até 5 km da área densamente ocupada e como rurais aquelas até 45 km das suburbanas, para determinar o impacto de 38 cidades sobre os biomas nos Estados Unidos. Ao invés de adotar uma medida fixa, Peng *et al.* (2012) definiram o tamanho da área rural como uma área equivalente à área urbana analisada, ao redor do perímetro urbano, para estudar o comportamento das ICUS em 419 cidades em todo o mundo.

O presente estudo utiliza o perímetro urbano estabelecido pelo PD da cidade como critério para diferenciar o âmbito urbano do rural, buscando desenvolver análises e gerar resultados compatíveis com as unidades territoriais empregadas no planejamento urbano local. A adoção da média do TST da área rural para delinear as intensidades das ICUS permite capturar a heterogeneidade dessas áreas, podendo ocorrer desvios decorrentes da alta antropização. Nesse sentido, foram levantadas as TST médias da unidade de conservação integral Parque Estadual do João Leite, caracterizada por vegetação densa, para ser comparada com as médias rurais obtidas.

Como pode ser observado na tabela 5 e na figura 18, a média rural e a correspondente ao Parque Estadual do João Leite apresentam comportamentos muito semelhantes, com variações que oscilam entre 1,35 e 1,89°C, com uma diferença de apenas 0,54°C de amplitude entre as variações. Dessa forma, o uso da TST média da área rural como base para delinear as ICUS no presente estudo não apresenta grandes variações em comparação com o comportamento de uma área com vegetação densa fora do perímetro urbano, podendo-se empregar um aumento médio

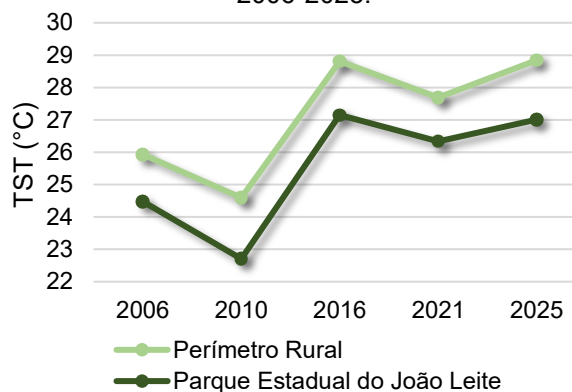
de 1,64°C para fins comparativos.

Tabela 5 - Comparação da TST média entre o Perímetro Rural e o Parque Estadual João Leite, 2006-2025.

| Data | TST Média (°C)  |                               |           |
|------|-----------------|-------------------------------|-----------|
|      | Perímetro Rural | Parque Estadual do João Leite | Diferença |
| 2006 | 25,93           | 24,48                         | 1,45      |
| 2010 | 24,59           | 22,71                         | 1,89      |
| 2016 | 28,81           | 27,15                         | 1,66      |
| 2021 | 27,69           | 26,34                         | 1,35      |
| 2025 | 28,84           | 27,01                         | 1,84      |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 - Comparação da TST média entre o Perímetro Rural e o Parque Estadual João Leite, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

## Evolução das ICUS

O mapa 4 mostra a evolução espacial das ICUS dentro do município para cada ano do estudo, categorizadas em 5 intensidades de acordo com a classificação proposta por Garcia (1995). Na distribuição espacial das ICUS, é possível observar as maiores intensidades no centro da cidade, com algumas manchas que se propagam para as periferias, onde o comportamento é mais dinâmico. Ao longo de todo o perímetro urbano, as Áreas de Preservação Permanente (APP) que acompanham os rios e córregos representam as principais ilhas de frescor, que se combinam com parques, Unidades de Conservação (UC) e Áreas de Proteção Ambiental (APA) dentro do tecido urbano.

A tabela 6 e a figura 19 mostram numericamente e graficamente o comportamento das áreas que ocupam cada categoria de intensidade dentro do perímetro urbano para cada ano do estudo.

Tabela 6 - Áreas de acordo a intensidades de ICUS no Perímetro Urbano.

| Data | Ilha Frescor<br>(< 0°C) |       | Fracca<br>(0 - 2°C) |       | Moderada<br>(2 - 4°C) |       | Forte<br>(4 - 6°C) |       | Muito Forte<br>(> 6°C) |       |
|------|-------------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-------|--------------------|-------|------------------------|-------|
|      | km²                     | %     | km²                 | %     | km²                   | %     | km²                | %     | km²                    | %     |
| 2006 | 73,99                   | 16,73 | 96,56               | 21,83 | 131,98                | 29,85 | 127,48             | 28,83 | 12,21                  | 2,76  |
| 2010 | 62,93                   | 14,23 | 107,96              | 24,41 | 142,35                | 32,19 | 110,90             | 25,08 | 18,08                  | 4,09  |
| 2016 | 57,11                   | 12,91 | 93,13               | 21,06 | 108,10                | 24,44 | 160,00             | 36,18 | 23,88                  | 5,40  |
| 2021 | 60,54                   | 13,69 | 84,77               | 19,17 | 96,54                 | 21,83 | 149,22             | 33,74 | 51,16                  | 11,57 |
| 2025 | 62,80                   | 14,18 | 95,82               | 21,63 | 121,78                | 27,49 | 141,19             | 31,87 | 21,37                  | 4,83  |

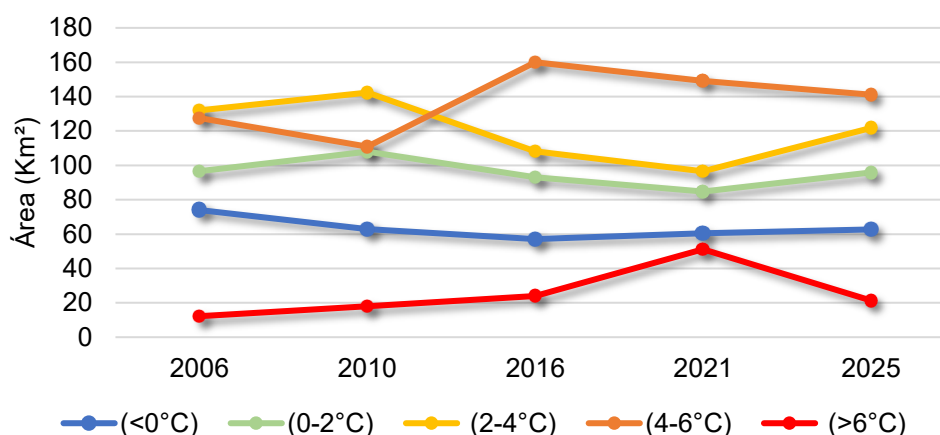
Fonte: Elaboração própria.







Figura 19 - Áreas de acordo a intensidades de ICUS no Perímetro Urbano.



Fonte: Elaboração própria.

As áreas ocupadas por Ilhas de Frescor dentro do perímetro urbano apresentam um declínio contínuo de 2006 a 2016, passando de 73,99 para 57,11 km<sup>2</sup>, respectivamente, aumentando a 62,80 km<sup>2</sup> no ano de 2025, totalizando uma redução de 15,12% no período estudado. As ICUS fracas apresentam um comportamento mais estável, com uma maior área apresentada de 107,96 km<sup>2</sup> em 2010 e sua menor área de 84,77 km<sup>2</sup> em 2021. Em relação ao período estudado, as ICUS fracas apresentam uma redução de apenas 0,76%, passando de 96,56 km<sup>2</sup> em 2006 para 95,82 km<sup>2</sup> em 2025.

A maior parte do perímetro urbano apresenta intensidades de ICUS moderadas e fortes, equivalente a 21,83 – 32,19% e 25,08 – 36,18% respectivamente. Em 2006, as ICUS moderadas ocupavam 131,98 km<sup>2</sup>, reduzindo-se para 121,78 km<sup>2</sup> em 2025, o que representa uma redução de 7,73%. Em relação às ICUS fortes, elas apresentam um aumento de 127,48 para 141,19 km<sup>2</sup> entre 2006 e 2025, chegando a ocupar 160 km<sup>2</sup> em 2016. As ICUS Fortes aumentaram 10,75% no período estudado. As ICUS muito fortes apresentam o maior aumento dentro de sua categoria, no entanto, ocupam a menor área do perímetro urbano (entre 2,76% e 11,57%). Em 2006, as ICUS muito fortes ocupavam uma área equivalente a 12,21 km<sup>2</sup>, atingindo seu ponto mais alto em 2021, ocupando 51,15 km<sup>2</sup> (4,18 vezes a área ocupada em 2006), reduzindo-se para 21,37 km<sup>2</sup> em 2025. O aumento das ICUS muito fortes dentro do período analisado equivale a 74,99%.

Com relação às ICUS nos bairros da cidade, a tabela 7 e a figura 20 mostram a quantidade de bairros por ano de acordo com sua intensidade média de ICUS, categorizados de acordo com a classificação proposta por Garcia (1995). A maioria

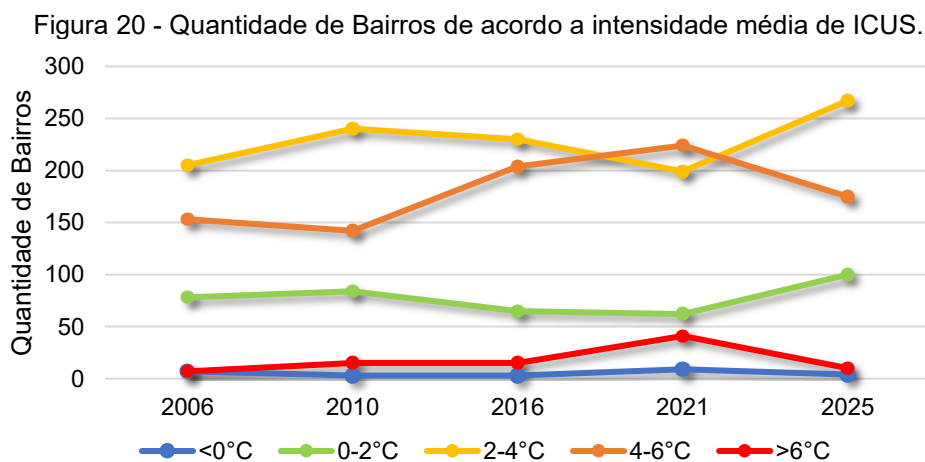
dos bairros está dentro da categoria Moderada (37 a 50%) e Forte (29 a 42%), semelhante ao comportamento apresentado no perímetro urbano. Seguem-se a estas categorias os bairros com intensidades Fracas (12 a 18%) e Muito Fortes (2 a 8%), ficando em último lugar os que apresentam intensidades de Ilha de Frescor (1 a 2%).

Os bairros que apresentam intensidades médias equivalentes às Ilhas de Frescor diminuíram de 7 para 4 bairros entre 2006 e 2025 (redução equivalente a 42,85%), chegando a 9 bairros em 2021. Os bairros com intensidades Fracas aumentaram de 78 para 100 (aumento de 28,20%), os Moderados de 205 para 267 (aumento de 30,24%) e os Fortes de 153 para 175 (aumento de 14,37%) durante o período do estudo. Em 2021, observa-se um aumento dos bairros na categoria Fortes, superando os bairros Moderados, situação que se inverte em 2025. Os bairros que apresentam intensidades médias de ICUS Muito Fortes aumentaram de 7 para 10 entre 2006 e 2025 (aumento de 42,85%), chegando a 41 bairros em 2021, o equivalente a 5,85 vezes a quantidade no primeiro ano do período analisado.

Tabela 7 - Quantidade de Bairros de acordo a intensidade média de ICUS.

| Data | Ilha Frescor<br>( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) | Fraca<br>( $0 - 2^{\circ}\text{C}$ ) | Moderada<br>( $2 - 4^{\circ}\text{C}$ ) | Forte<br>( $4 - 6^{\circ}\text{C}$ ) | Muito Forte<br>( $> 6^{\circ}\text{C}$ ) | Média ICUS<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| 2006 | 7                                         | 78                                   | 205                                     | 153                                  | 7                                        | 3,32                                 |
| 2010 | 3                                         | 84                                   | 240                                     | 142                                  | 15                                       | 3,30                                 |
| 2016 | 3                                         | 65                                   | 230                                     | 204                                  | 15                                       | 3,67                                 |
| 2021 | 9                                         | 62                                   | 199                                     | 224                                  | 41                                       | 3,86                                 |
| 2025 | 4                                         | 100                                  | 267                                     | 175                                  | 10                                       | 3,37                                 |

Fonte: Elaboração própria.



Fonte: Elaboração própria.

De um ponto de vista geral, durante o período estudado, aumentaram as áreas

ocupadas por intensidades de ICUS entre 4 e 6°C (fortes) e de 6°C ou mais (muito fortes), com reduções nas categorias de menor intensidade, destacando-se as inferiores a 0°C (ilhas de frescor). Em relação aos bairros, todas as categorias apresentam aumentos, com destaque para as superiores a 6°C (muito fortes) e as compreendidas entre 2 e 4°C (moderadas), exceto os referentes a intensidades inferiores a 0°C (ilhas de frescor), que registram uma redução.

Esses resultados evidenciam um aumento nas áreas e bairros com intensidade de ICUS maiores dentro do perímetro urbano, que se propagam dos setores mais antigos da cidade, localizados no centro, para a periferia. Em 2006 (Mapa 4-A), os setores centrais formados por Campinas (1), Coimbra (2) e Centro-Oeste (3) apresentavam as maiores intensidades de ICUS, com destaque para Jardim Nova Esperança (4), mais ao norte. Durante o período de estudo, as altas intensidades se espalham para outros setores centrais (Mapa 4-E), como Aeroporto (5), Setor dos Funcionários (6), Central (7), Leste Vila Nova (8), Nova Vila (9), Norte Ferroviário (10), Criméia Oeste (11); para o sul, Jardim América (12), Setor Sul (13) e parte do Setor Bueno (14); para o leste, Jardim Novo Mundo (15) e Bairro Feliz (16); e para o norte, o setor Urias Magalhães e Vila Roriz (17). Setores mais distantes do centro também apresentam altas intensidades em 2025, como o Setor União (18), Conjunto Vera Cruz (19), Vila Romana (20), Jardim Liberdade (21), Vila Mutirão I e II (22), Jardim Novo Planalto (23), Jardim Guanabara I, II e III (24), e Vila Itatiaia (25).

Conforme descrito por Oke (2002), o aumento da densidade está associado a mudanças nas propriedades das superfícies, caracterizadas pela diminuição das áreas verdes e pela construção de edifícios mais altos e maciços, que alteram a disponibilidade de água, bem como as propriedades térmicas dos materiais. A geometria urbana e a densidade da urbanização influenciam o aprisionamento da radiação solar, a redução do transporte turbulento e a quantidade de calor antropogênico liberado. Dessa forma, o aumento da densidade acentua as alterações na forma e na função, gerando condições que favorecem um maior aquecimento urbano.

Para o ano de 2001, Nascimento e Barros (2009) identificaram uma distribuição concêntrica das ICUS na cidade de Goiânia, na qual as áreas periféricas apresentam TST entre 24 e 26°C, em contraste com as áreas mais centrais, que registram valores entre 26 e 28°C, com máximas de 32°C na área central. Bairros no centro, como

Campinas, Coimbra e Centro Oeste, a oeste, o Setor São José e Rodoviário, ao norte, Criméia Oeste, ao sul, Setor Central e dos Funcionários, e a Leste, Leste Vila Nova e Negrão de Lima, apresentam as TST mais altas, que oscilam entre 28 e 32°C.

Outras cidades brasileiras apresentam distribuições semelhantes. Paiva e Souza (2024), em um estudo realizado na conurbação de Cuiabá–Várzea Grande – MT, assim como Silveira *et al.* (2023) para as cidades de Joinville, Criciúma e Lages – SC, registraram as maiores TST nos setores centrais e mais antigos das cidades.

A distribuição concêntrica apresentada em Goiânia, é fragmentada pelas APP. As APP apresentam intensidades de ICUS que variam de 0 a 4°C (Mapa 4A-D), com destaque na correspondente ao Rio Meia Ponte (26), cujo raio de proteção é de 100m, em comparação com os 50m aplicados a córregos de menor porte. Diversos parques e unidades de conservação se apresentam como ilhas de frescor (< 0°C) ao longo da cidade, mantendo baixas intensidades durante o período do estudo. Entre eles, destacam-se, na área central, o Jardim Botânico (27), o Parque Areião Washington Novaes (28), o Parque Vaca Brava (29), o Zoológico de Goiânia (30), o Bosque dos Buritis (31), o Parque Mutirama e o Botafogo (32); ao norte, o Parque Brisas da Mata (33), o Bosque Estrela Daiva (34), o Parque Curitiba (35) e o Parque Tantony Griffith (36). A oeste, a APA correspondente ao Morro de Mendanha (37). Ao Sudoeste o conjunto de Parques que acompanham o córrego Macambira (38).

Nascimento e Barros (2009), identificaram as TST mais baixas nas áreas compostas por matas de galeria que acompanham os cursos d'água, no estudo realizado em 2001 na cidade de Goiânia. No estudo, essas áreas apresentavam valores abaixo de 22°C e, em alguns pontos, atingindo 26°C, destacando-se nas porções norte, nordeste e sudeste, com menor quantidade em direção ao oeste.

Estudos realizados nas cidades de Palmas – TO, Presidente Prudente – SP, Ituverava – SP e na conurbação Cuiabá – Várzea Grande em Mato Grosso registram as menores TST nas vegetações densas que acompanham os cursos d'água (Andrade; Amorim, 2023; Costa *et al.*, 2023; Gomes; Fuzeto; Prates, 2020; Paiva; Souza, 2024). Na conurbação Cuiabá – Várzea Grande, em Mato Grosso, Gomes, Fuzeto e Prates (2020) registraram intensidades de ICUS entre 0 e 3°C nas APP, enquanto na cidade de Presidente Prudente – SP, Andrade e Amorim (2023) identificaram intensidades entre 3 e 5°C.

Conforme Wong *et al.* (2021), nas análises das TST, os parques com vegetação

apresentam um maior potencial de resfriamento em comparação com as análises baseadas nas temperaturas do ar, devido à melhor condutividade térmica das superfícies sólidas. Por meio de tecnologias de sensoriamento remoto, com resoluções espaciais entre 60 e 120m, os parques com vegetação apresentam reduções médias das TST de 4,2°C, oscilando entre 1,9 e 6,7°C.

Os parques urbanos de maiores dimensões apresentam uma influência maior em relação à vegetação isolada. De acordo com Landsberg (1981), os parques grandes e coerentes têm uma influência considerável sobre o clima urbano, em contraste com as árvores de sombra ao longo das ruas e avenidas, que afetam apenas o microclima onde estão localizadas. Nesse sentido, Yu e Hien (2006) mostraram que os parques nos centros urbanos têm um efeito significativo de resfriamento que afeta não apenas o local onde estão instalados, mas também os ambientes construídos próximos, reduzindo as temperaturas do ar de 1 a 3,8°C; enquanto Monteiro *et al.* (2016) identificaram que áreas verdes de 3 a 5 hectares podem produzir efeitos de resfriamento de 70 a 120m.

Enquanto os grandes parques tendem a ter um maior potencial de resfriamento, devido à diminuição líquida do fluxo de calor sensível e a redução das fontes de calor antropogênicas, os parques pequenos apresentam resultados contraditórios. Em áreas pequenas, a geometria urbana e as condições predominantes de vento tornam-se fatores importantes, além de serem espaços mais suscetíveis à influência de elementos antropogênicos urbanos, como superfícies pavimentadas, que aumentam o ganho de calor sensível (Cao *et al.*, 2010; Wong *et al.*, 2021). Em Taipei, na China, 14 de 61 parques pequenos apresentaram temperaturas médias do ar 0,42°C mais altas do que seus arredores, assim como um pequeno parque de 1,5 hectares em Melbourne (Cao *et al.*, 2010), na Austrália, apresentou temperaturas 0,2°C mais altas durante as primeiras horas do dia (Motazedian; Coutts; Tapper, 2020).

Grandes áreas com aumentos e diminuições são observadas dentro e fora do perímetro urbano, correspondentes a terras cultiváveis e construção de novos loteamentos, nas quais a cobertura do solo muda de solo nu para vegetação.

Nos anos de 2016, 2021 e 2025 (Mapa 4C-D-E), observam-se grandes áreas fora do perímetro urbano compostas por áreas de cultivo em fase de solo nu (40), apresentando intensidades de ICUS semelhantes às dos setores mais quentes da cidade, situação que eleva a TST média e, conseqüentemente, reduz a diferenciação

entre o meio rural e o urbano. Grandes áreas de cultivo dentro do perímetro urbano em estágios iniciais (39), assim como novos parcelamentos (41), também podem ser observadas ao longo do período de estudo, apresentando intensidades elevadas semelhantes às áreas densamente urbanizadas.

Estudos realizados em outras cidades brasileiras identificaram altas TST em áreas rurais. Ao norte da área rural da cidade de Maceió – AL, Santiago e Gomes (2016) identificaram áreas de plantação agrícola com variações de vegetação e presença de solos nus, que apresentaram altas TST. Silveira *et al.* (2023) identificaram a formação de ICUS ao norte e extremo oeste da cidade de Lages – SC em áreas destinadas a pastagens, agricultura e fragmentos reflorestados, que eram caracterizados por solo descoberto no momento da captura da imagem. Além disso, áreas de cultivo ao redor da parte central da cidade, compostas por plantações de Pinus e Eucaliptos ligadas ao setor madeireiro, mostram variações de intensidades ligadas às mudanças no vigor vegetativo associado aos ciclos de colheita. Na cidade de Ituverava, Costa *et al.* (2023) identificaram um aumento de 3°C na TST média durante o verão de 2021, explicado por fatores como a expansão das atividades agrícolas e agropecuárias, acompanhada de variações nos elementos climáticos.

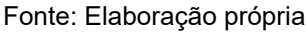
Nesse sentido, assim como grandes áreas florestais podem gerar efeitos de resfriamento além de seus limites, áreas de desenvolvimento agrícola e pecuário podem gerar o efeito contrário, criando ICUS que não estão ligadas ao desenvolvimento urbano, mas às características da cobertura do solo, que nessas áreas, variam de acordo com o ciclo de colheita.

### **Mudança das ICUS no período de estudo**

Durante o período, foram identificados aumentos e diminuições nas intensidades das ICUS dentro do perímetro urbano, que oscilam entre 10,4°C e -13,03°C, com uma média de 0,26°C. Em relação às intensidades médias dos bairros, foram identificados aumentos de até 2,41°C e reduções de até -3,34°C, com uma média de 0,18°C, evidenciando um aumento geral, tanto nos bairros quanto no perímetro urbano.

Ao analisar a distribuição espacial dos aumentos e diminuições da intensidade das ICUS durante o período do estudo (Mapa 5-A), é possível observar um predomínio dos aumentos nos setores norte e leste da cidade, e diminuições no Oeste. Entre os padrões identificados, estão as reduções associadas às APP, especialmente a correspondente ao Rio Meia Ponte (1).







Foram identificadas fortes reduções em setores que, em 2006, apresentavam solo nu, sejam áreas correspondentes a culturas em fase inicial (2) ou novos loteamentos com grande quantidade de lotes vazios (3). O comportamento dessas áreas durante o período do estudo é caracterizado por transições de solo nu para áreas com cobertura vegetal ou construídas. O efeito contrário também pode ser observado, associado à transformação de solos com vegetação em solos descobertos, sejam para áreas de cultivo (4) ou para a construção de novos loteamentos (5).

Em alguns setores centrais da cidade, localizados ao sul e a oeste do centro, observam-se diminuições dentro do tecido urbano (6). Áreas densas de uso comercial, como o sul do Setor Campinas, bem como bairros ao sul do centro, que sofreram processos de verticalização como o Setor Bueno e Marista, apresentam diminuições espalhadas dentro de seus perímetros. Em contrapartida, observam-se aumentos nos setores ao norte e leste da cidade (7), como o Setor Parque Tremendão, Morada do Sol, Jardim Guanabara, Goiânia 2, Santa Genoveva, Jaó e Residencial Alice Barbosa; bem como em setores mais ao centro-leste (8), como o Setor Aeroporto, Leste Vila Nova, Leste Universitário e Jardim Novo Mundo, entre outros.

Em relação ao comportamento dos bairros (Mapa 5-B), 64% dos bairros (354 bairros) apresentam aumentos de intensidade, enquanto 32% apresentam diminuições (180 bairros), ficando 4% sem alterações (22 bairros), os quais correspondem a bairros cujo estado inicial é de 2025, pelo que não é possível fazer comparações com anos anteriores.

A maioria dos bairros apresentam aumentos de 0 a 1°C em suas intensidades médias (52%), com uma distribuição espalhada por toda a cidade, predominando do centro para o norte e leste da cidade. A maior proporção das reduções está na ordem de 0 a -1°C (25%), acentuando-se em direção às periferias da cidade, com predominância para o oeste, principal área de expansão e de novos loteamentos identificados em 2006.

Como indicado anteriormente, alguns setores centrais e mais antigos da cidade apresentam reduções entre 0 e -1°C. Setores como Campinas (-0,71°C), Coimbra (-0,31°C), Bairro de Aeroviários (-0,31°C), Bairro Rodoviário (-0,24°C), Bairro Cidade Jardim (-0,23°C) e Vila Aurora Oeste (-0,78°C), são alguns dos bairros centrais que apresentam reduções, assim como setores mais ao sul, como o Setor Bueno (-0,04°C)

e Marista ( $-0,46^{\circ}\text{C}$ ), nos quais ocorreram processos de verticalização nos últimos anos.

Bairros periféricos, como Residencial Pilar dos Sonhos ( $-3,34^{\circ}\text{C}$ ), Della Pena ( $-2,85^{\circ}\text{C}$ ), São Bernardo ( $-2,25^{\circ}\text{C}$ ), Jardim Real ( $-2,12^{\circ}\text{C}$ ), Tropical Ville ( $-2,71^{\circ}\text{C}$ ) e Brisas do Cerrado ( $-2,12^{\circ}\text{C}$ ), entre outros, se destacam por suas diminuições, associadas em sua maioria a loteamentos incipientes com grande quantidade de lotes vazios em 2006.

Os bairros pertos ao centro como Vila Jaraguá ( $1,07^{\circ}\text{C}$ ), Vila Megale ( $1,15^{\circ}\text{C}$ ) y Vila São Francisco ( $1,10^{\circ}\text{C}$ ), assim como outros mais longes como o Sector Perim ( $1,03^{\circ}\text{C}$ ), Residencial Itamaraca ( $1,24^{\circ}\text{C}$ ), Condomínio Alto Boa Vista ( $1,66^{\circ}\text{C}$ ), Sector Morada do Sol ( $1,12^{\circ}\text{C}$ ), Parque Tremendão ( $1,80^{\circ}\text{C}$ ), Conjunto Primavera ( $1,28^{\circ}\text{C}$ ), Jardim Guanabara ( $1,25^{\circ}\text{C}$ ), Jardim São José ( $1,03^{\circ}\text{C}$ ), Residencial Vale dos Sonhos ( $1,50^{\circ}\text{C}$ ), entre outros, apresentam aumentos de 1 a  $2^{\circ}\text{C}$  em seus intensidades médias. Entre os bairros que registraram aumentos superiores aos  $2^{\circ}\text{C}$  encontram-se o Residencial Alice Barbosa ( $2,10^{\circ}\text{C}$ ), Novo mundo 2 e 3 ( $2,33^{\circ}\text{C}$ ), Jardim Camargo ( $2,41^{\circ}\text{C}$ ), Residencial Aquários ( $2,24^{\circ}\text{C}$ ) e Residencial Rio Jordão ( $2,33^{\circ}\text{C}$ ), os quais se encontram em áreas periféricas.

Em resumo, em direção ao centro da cidade, os bairros apresentam comportamentos mais estáveis durante o período de estudo (baixas variações), apresentando aquecimentos leves que oscilam entre 0 e  $1^{\circ}\text{C}$ ; em contraste com os setores periféricos, nos quais se registra a maior proporção de diminuições, bem como aumentos que ultrapassam  $1^{\circ}\text{C}$ , mostrando um comportamento com maior variabilidade nas intensidades das ICUS.

Os setores periféricos são as principais áreas de expansão da cidade, sendo o Oeste um dos vetores de crescimento de Goiânia nos últimos anos. Novos loteamentos apresentam grandes áreas e lotes vazios após o processo de remoção da vegetação existente, atingindo altas intensidades das ICUS em suas fases iniciais. Bairros como Residencial Della Pena, Tropical Ville, Jardim Real, Pilar dos Sonhos, Moinho dos Ventos, Canadá, Vereda dos Buritis, entre outros, são exemplos dessa situação, evidenciando a forte influência das mudanças na cobertura do solo sobre as intensidades das ICUS.

A expansão dos limites urbanos, caracterizada pelo aumento das áreas construídas em detrimento da cobertura vegetal, eleva a temperatura e amplia a

amplitude térmica ambiental (Deng *et al.*, 2018; Jamei; Rajagopalan; Sun, 2019; Yusuf; Pradhan; Idrees, 2014). Novas áreas urbanas tendem a apresentar temperaturas superficiais mais elevadas em relação às áreas mais antigas, motivadas principalmente pelo incentivo a projetos de expansão de áreas verdes e arborização de vias públicas (Wang; Zhou; Wang, 2019).

Dessa forma, é possível explicar que os maiores aumentos e diminuições nas intensidades de ICUS da cidade de Goiânia estão associados aos diferentes ciclos de urbanização dos novos loteamentos, que se concentram nas áreas periféricas de expansão, em contraste com as áreas centrais mais antigas e consolidadas.

### 3.1.2 Índices de vegetação

#### Evolução da vegetação urbana

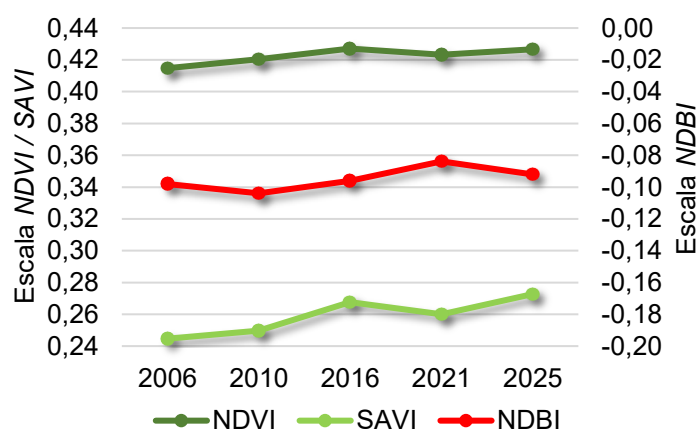
Durante o período de estudo, os valores médios dos índices de vegetação apresentam um aumento dentro do perímetro urbano (Tabela 8 e Figura 21). Para 2006, foram registrados valores médios de *NDVI* e *SAVI* de 0,415 e 0,245, elevando-se para 0,427 e 0,273 para 2025, o equivalente a um aumento de 2,88% e 11,47%, respectivamente. Em 2021, registra-se um ligeiro declínio em ambos os índices de vegetação, equivalentes a 0,91% no caso do *NDVI* e 2,92% no caso do *SAVI* em relação a 2016. O índice *NDBI*, utilizado como variável de apoio, também mostra um aumento durante o período de estudo, passando de -0,098 em 2006 para -0,092 em 2025, o que equivale a um crescimento de 6,03%. Este índice registra seu valor mais alto em 2021 (-0,084), descendo 12,81% em 2025 (-0,092).

Tabela 8 – Valores médios dos índices *NDVI*, *SAVI* e *NDBI* no perímetro urbano 2006-2025.

| Data | Vegetação   |             | Urbanização |
|------|-------------|-------------|-------------|
|      | <i>NDVI</i> | <i>SAVI</i> | <i>NDBI</i> |
| 2006 | 0,415       | 0,245       | -0,098      |
| 2010 | 0,420       | 0,250       | -0,104      |
| 2016 | 0,427       | 0,268       | -0,096      |
| 2021 | 0,423       | 0,260       | -0,084      |
| 2025 | 0,427       | 0,273       | -0,092      |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 – Valores médios dos índices *NDVI*, *SAVI* e *NDBI* no perímetro urbano 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com esses resultados, durante o período do estudo, observa-se um crescimento da vegetação dentro do perímetro urbano, acompanhado pelo crescimento das áreas urbanizadas, com um ligeiro declínio em 2021 da vegetação urbana, que coincide com o valor mais alto registrado pelo índice *NDBI*.

Ao analisar a evolução dos índices *NDVI* e *SAVI* categorizados em 5 classes, registram-se aumentos nos valores mais baixos e mais altos do índice, em contraste com os valores intermediários que apresentam reduções durante o período de estudo.

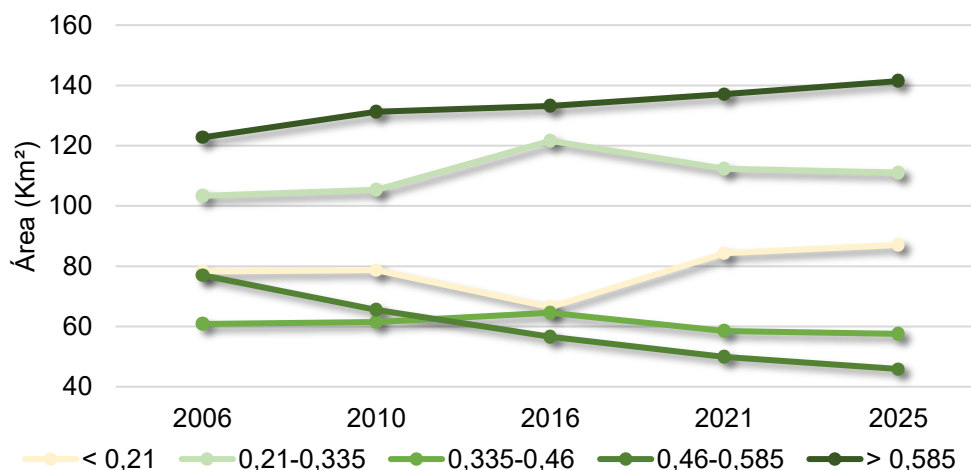
A tabela 9 e a figura 22 mostram a área e a percentagem que representam as diferentes classes do índice *NDVI* dentro do perímetro urbano por cada ano do estúdio.

Tabela 9 - Áreas de acordo a classes do índice *NDVI* no Perímetro Urbano.

| Data | < 0,21          |       | 0,21-0,335      |       | 0,335-0,46      |       | 0,46-0,585      |       | > 0,585         |       |
|------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|      | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     |
| 2006 | 78,30           | 21,51 | 103,35          | 28,40 | 60,88           | 16,73 | 76,98           | 21,15 | 122,72          | 33,72 |
| 2010 | 78,70           | 21,65 | 105,31          | 28,97 | 61,46           | 16,91 | 65,53           | 18,02 | 131,23          | 36,10 |
| 2016 | 66,43           | 17,68 | 121,59          | 32,36 | 64,55           | 17,18 | 56,54           | 15,04 | 133,12          | 35,42 |
| 2021 | 84,34           | 23,57 | 112,33          | 31,39 | 58,52           | 16,35 | 49,90           | 13,94 | 137,12          | 38,31 |
| 2025 | 87,07           | 24,47 | 111,03          | 31,20 | 57,55           | 16,17 | 45,90           | 12,90 | 141,41          | 39,74 |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 22 - Áreas de acordo a classes do índice *NDVI* no Perímetro Urbano.



Fonte: Elaboração própria.

Os níveis superiores a 0,585 representam a maior parte da área (33,72 a 39,74%), apresentando um aumento de 15,22% durante o período, variando de 122,72 a 141,41 km<sup>2</sup>. Os níveis inferiores a 0,21 aumentaram 11,20%, passando de 21,51% (78,30 km<sup>2</sup>) da área em 2006 para 24,47% (87,07 km<sup>2</sup>), experimentando uma

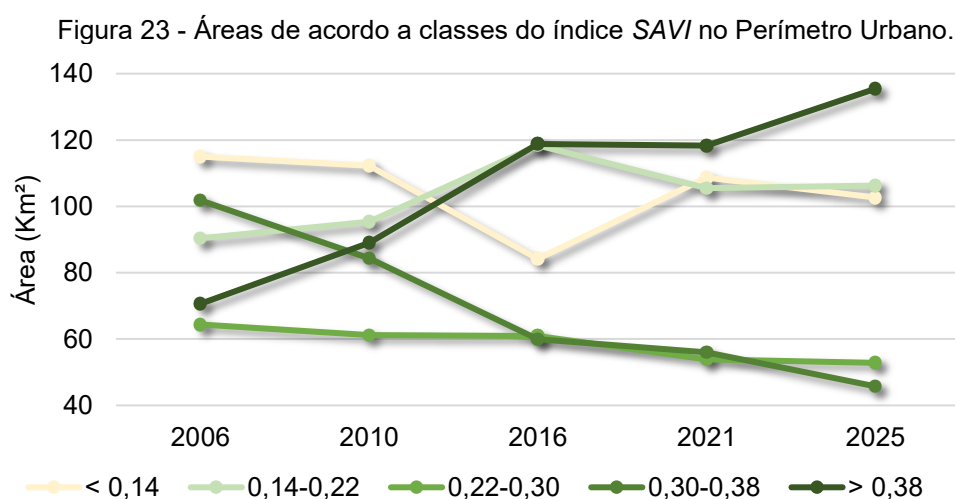
redução em 2016 para 17,68% (66,43 km<sup>2</sup>) da área. Em relação às áreas com níveis entre 0,21 e 0,335, registrou-se um aumento de 7,42% durante o período, representando porcentagens de 28,40% (103,35 km<sup>2</sup>) a 31,20% (111,03 km<sup>2</sup>) da área, apresentando sua maior porcentagem em 2016, equivalente a 32,36% (121,59 km<sup>2</sup>). As áreas com valores entre 0,46 e 0,585 reduzem-se em 40,38%, passando de 21,15% (76,98 km<sup>2</sup>) em 2006 para 12,90% (45,9 km<sup>2</sup>) em 2025, sendo a classe com maior redução no período. Áreas com valores entre 0,335 e 0,46 apresentam pouca variação, com uma redução de apenas 5,46% (60,88 km<sup>2</sup> para 57,55 km<sup>2</sup>).

A tabela 10 e a figura 23 mostram a área e a porcentagem que representam as diferentes classes do índice SAVI dentro do perímetro urbano por cada ano do estudo, apresentando um comportamento mais dinâmico que o apresentado pelo NDVI.

Tabela 10 - Áreas de acordo a classes do índice SAVI no Perímetro Urbano.

| Data | < 0,14          |       | 0,14-0,22       |       | 0,22-0,30       |       | 0,30-0,38       |       | > 0,38          |       |
|------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|      | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     |
| 2006 | 115,01          | 35,15 | 90,38           | 27,62 | 64,40           | 19,68 | 101,81          | 31,11 | 70,64           | 21,59 |
| 2010 | 112,27          | 34,03 | 95,39           | 28,91 | 61,24           | 18,56 | 84,33           | 25,56 | 89,00           | 26,97 |
| 2016 | 84,18           | 23,51 | 118,39          | 33,07 | 60,92           | 17,01 | 59,90           | 16,73 | 118,83          | 33,19 |
| 2021 | 108,63          | 32,56 | 105,48          | 31,62 | 53,85           | 16,14 | 55,96           | 16,78 | 118,30          | 35,46 |
| 2025 | 102,67          | 30,17 | 106,26          | 31,23 | 52,84           | 15,53 | 45,75           | 13,44 | 135,44          | 39,80 |

Fonte: Elaboração própria.



Fonte: Elaboração própria.

Áreas com níveis superiores a 0,38 e aquelas entre 0,14–0,22 experimentaram aumentos durante o período, em contraste com as outras categorias. As áreas com valores superiores a 0,38 apresentam o maior aumento no período, passando de

21,59% (70,64 km<sup>2</sup>) em 2006 para 39,80% (135,44 km<sup>2</sup>) em 2025, o que equivale a um aumento de 91,74%. Áreas entre 0,14–0,22 experimentaram um aumento de 17,57%, passando a ocupar 27,62% (90,38 km<sup>2</sup>) para 31,23% (106,26 km<sup>2</sup>).

Em contraste com o comportamento das classes de *NDVI*, os valores mais baixos do *SAVI*, representados por valores inferiores a 0,14, apresentaram um declínio de 10,73%, passando de 35,15% (115,01 km<sup>2</sup>) em 2006 para 30,17% (102,67 km<sup>2</sup>) em 2025. Apesar dessa diferença, essa classe apresenta um declínio em 2016, assim como a classe do *NDVI* com valores inferiores a 0,21, atingindo sua menor proporção durante o período do estudo, equivalente a 23,51% (84,18 km<sup>2</sup>). Áreas com níveis entre 0,22-0,30 e 0,30-0,38 experimentaram quedas de 17,95% e 55,06%, respectivamente, sendo esta última a classe com maior queda registrada para o período.

Os resultados do comportamento de ambos os índices sugerem o aumento de áreas de vegetação densa, em detrimento das áreas intermediárias, bem como o aumento de áreas com pouca vegetação, representadas por valores baixos dos índices *NDVI* e *SAVI*, que podem estar associadas a áreas urbanizadas ou de solo nu.

As mudanças nos níveis de vegetação urbana dependem em grande medida das condições naturais pré-existentes à ocupação urbana, bem como dos modelos de desenvolvimento urbano implementados, gerando o aumento ou a diminuição de diferentes classes associadas aos índices de vegetação.

Estudos da evolução da vegetação urbana realizados em outras cidades brasileiras, permitem comparar as diferenças nos processos de urbanização próprios de cada cidade.

A cidade de Recife – PE, apresenta uma evolução semelhante das classes de *NDVI* durante o período de 1989 a 2019 às apresentadas em Goiânia no presente estudo. Os maiores aumentos registrados estão nas classes entre 0 e 0,2, compostas por áreas urbanizadas ou de solo nu, em detrimento das classes de vegetação entre 0,4 e 0,6. Áreas correspondentes a classes maiores que 0,6 apresentam relativa estabilidade durante o período, evidenciando a conservação de áreas de vegetação densa (Nova; Gonçalves; Lima, 2021).

Em contrapartida, as cidades de Joinville, Criciúma e Lages, em Santa Catarina, apresentam os maiores aumentos nos valores de -0,1 a 0,2 para o período 2000-2020,

com uma redução quase total das áreas com valores superiores a 0,4, evidenciando uma forte substituição de áreas de vegetação densa por áreas de vegetação esparsa e principalmente urbanizadas (Silveira *et al.*, 2023).

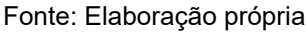
Em relação à distribuição espacial da vegetação urbana da cidade de Goiânia durante o período, os Mapas 6 e 7 mostram os índices *NDVI* e *SAVI* para cada ano analisado, reclassificados de acordo com as categorias descritas anteriormente

Nos mapas de ambos os índices, é possível observar que os setores centrais são aqueles com menor vegetação, segmentados pelas APP que acompanham os córregos que atravessam a cidade. Ao longo desses córregos, combinam-se parques, áreas de proteção e unidades de conservação, que formam grandes áreas verdes dentro do tecido urbano, sendo percebidas, em menor grau, praças e avenidas com vegetação. Nas periferias, observam-se maiores contrastes, com maior presença de áreas verdes associadas a vazios urbanos e áreas de cultivo, bem como grandes áreas de solo nu, compostas por áreas de cultivo em fase inicial ou loteamentos recentes e em construção.

Estudos em outras cidades apresentaram distribuições de vegetação urbana semelhantes às encontradas em Goiânia. No estudo realizado por Andrade e Amorim (2023) na cidade de Presidente Prudente – SP, as áreas centrais da cidade são identificadas como aquelas com os níveis mais baixos de *NDVI*, evidenciando a falta de vegetação urbana nesses setores. Quanto às zonas com maiores níveis de *NDVI*, Paiva e Souza (2024) identificam na cidade de Cuiabá – MT a maior cobertura vegetal nas proximidades dos cursos d'água. Segundo os autores, o déficit hídrico é reduzido pela presença dos cursos d'água, promovendo o desenvolvimento das plantas e, consequentemente, resultando em valores mais elevados de *NDVI*.

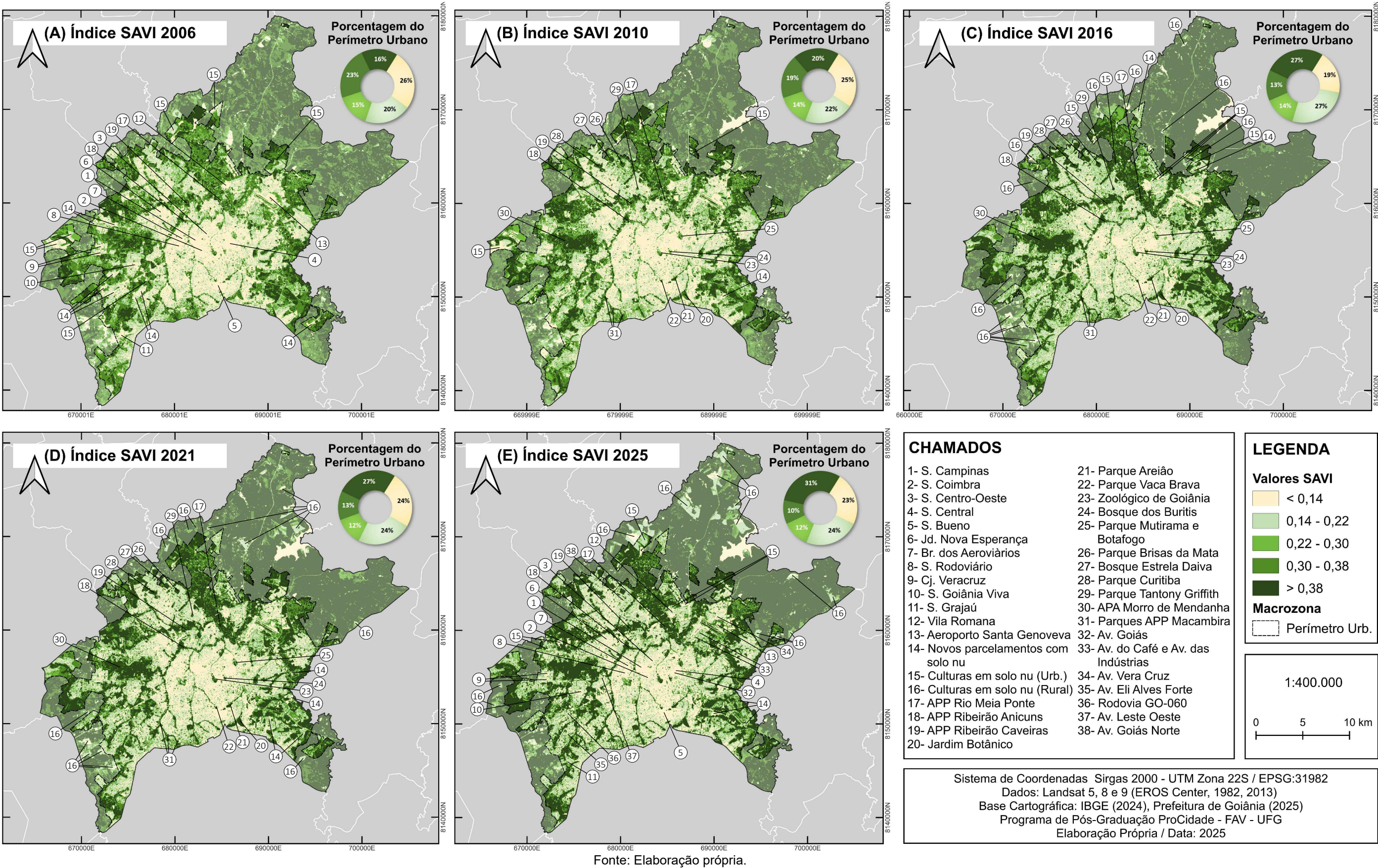
Nas formações florestais que acompanham os cursos de água no Cerrado, predominam as espécies arbóreas da Mata Ciliar e da Mata de Galeria, que produzem estruturas de dossel contínuo com grande sombreamento. Enquanto a Mata Ciliar forma coberturas entre 90 e 50% entre a estação chuvosa e seca (por ser composta principalmente por espécies caducifólias), a Mata de Galeria proporciona coberturas entre 70 e 95% durante todo o ano (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008). Assim, os córregos d'água que atravessam a cidade representam o principal sustento dessas formações florestais, apresentando os maiores índices de vegetação dentro do tecido urbano e, por suas características, têm um grande potencial de resfriamento







Mapa 7 - Evolução do índice SAVI no perímetro urbano de Goiânia - GO, 2006-2025





Para 2006 (Mapas 6 e 7 – A), dentro do tecido urbano podem ser identificados setores centrais como Campinas (1), Coimbra (2), Centro-Oeste (3) e Central (4), caracterizados pela falta de vegetação, bem como setores mais distantes do centro, como a parte sul do Setor Bueno (5), Jardim Nova Esperança (6), Bairro dos Aeroviários (7), Rodoviário (8), Parte Sul do Conjunto Veracruz (9), Residencial Goiânia Viva (10), Setor Grajaú (11), Vila Romana (12) e o Aeroporto Santa Genoveva (13), este último em obras de construção da segunda pista.

Durante o período, podem ser identificados alguns loteamentos periféricos em estado incipiente com pouca vegetação (14), observando-se uma maior quantidade a oeste em 2006, enquanto que para os anos de 2021 e 2025 eles se concentram no Sudeste.

Outras áreas que se destacam pela falta de vegetação são aquelas dedicadas a atividades agrícolas em estado inicial, algumas dentro do perímetro urbano que posteriormente são transformadas em áreas urbanizadas (15). Em 2016, 2021 e 2025 (Mapas 6 e 7 – C, D e E), identificam-se grandes áreas fora do perímetro urbano dedicadas a atividades agrícolas com pouca vegetação (16), que podem representar aumentos nas TST da área rural.

Como mencionado anteriormente, outras cidades brasileiras apresentaram áreas com pouca vegetação associadas a diferentes ciclos de coleta em áreas de cultivo, apresentando fortes variações nas TST (Costa *et al.*, 2023; Santiago; Gomes, 2016; Silveira *et al.*, 2023).

Em relação às áreas com vegetação densa, destacam-se dentro do perímetro urbano as APP, parques e áreas de conservação (Mapas 6 e 7). Dentro das APP, as correspondentes ao Rio Meia Ponte (17), Anicuns (18) e Caveiras (19) apresentam maior vegetação nas margens do curso d'água. Dentro dos parques (Mapas 5 e 6 – B, C e D), destacam-se na área central o Jardim Botânico (20), o Parque Areião Washington Novaes (21), o Parque Vaca Brava (22), o Zoológico de Goiânia (23), o Bosque dos Buritis (24), o Parque Mutirama e o Botafogo (25); ao norte, o Parque Brisas da Mata (26), o Bosque Estrela Daiva (27), o Parque Curitiba (28) e o Parque Antony Griffith (29). A oeste, a APA correspondente ao Morro de Mendaña (30). Ao Sudoeste, o conjunto de parques que acompanham o córrego Macambira (31).

Para 2025 (Mapas 6 e 7 – D), setores centrais e periféricos identificados anteriormente, como Campinas (1), Coimbra (2), Centro-Oeste (3), Central (4), Sector

Bueno (5), Jardim Nova Esperança (6), Bairro dos Aeroviários (7) e Rodoviário (8), ainda são percebidos como bairros com pouca vegetação urbana. No entanto, alguns aumentos podem ser observados dentro desses setores centrais, como, por exemplo, a vegetação da Av. Goiás (32) e algumas manchas verdes dentro do tecido no Setor Central, Coimbra, Centro-Oeste, Rodoviário e Bairro dos Aeroviários. Avenidas de outros setores também podem ser identificadas por sua vegetação, como a Av. do Café e a Av. das Indústrias em Santa Genoveva (33), a Av. Vera Cruz no Jardim Guanabara (34), a Av. Eli Alves Forte no Residencial Forteville (35), a rodovia GO-060 (36), a Av. Leste Oeste no Bairro Goiá (37) e a Av. Goiás Norte no Residencial Recanto do Bosque (38).

Os maiores aumentos nos valores de *NDVI* e *SAVI* são observados nas APP, seguidas pelos parques e unidades de conservação, sendo mais evidentes nos setores consolidados. Nessas áreas, é possível observar um aumento nos valores dos índices dentro dos limites de suas áreas de proteção, o que pode ser interpretado como uma densificação da vegetação, o que não implica uma expansão dessas áreas sobre o tecido urbano.

As periferias apresentam um comportamento mais dinâmico, associado aos processos inerentes à urbanização, que resultam em aumentos ou diminuições nos níveis de vegetação. Enquanto loteamentos relativamente novos para 2006, com grande quantidade de lotes e terrenos vazios, transformam sua cobertura do solo em áreas construídas ou verdes; áreas de cultivo ou vazios urbanos, em solo nu ou verde, são transformadas em novos loteamentos. Dessa forma, na periferia observam-se processos de urbanização em diferentes estágios, produzindo resultados contrastantes em relação aos setores consolidados.

Em relação aos bairros, a tabela 11 e a figura 24 mostram a quantidade de bairros de acordo com o valor médio do índice *NDVI* para cada ano do estudo, enquanto a tabela 12 e a figura 25 mostram os valores para o índice *SAVI*.

A maior parte dos bairros apresenta níveis médios de *NDVI* entre 0,21-0,46, sendo os mais baixos os associados a níveis extremos, representados por valores inferiores a 0,21 e superiores a 0,585 (Tabela 11 e Figura 24). Os bairros com níveis inferiores a 0,21 registraram uma ligeira redução de 10%, passando de 30 bairros em 2006 para 27 em 2025. Os bairros com níveis entre 0,21-0,335 experimentaram um crescimento de 13,66%, enquanto aqueles com níveis de 0,335-0,46 registraram 44%,

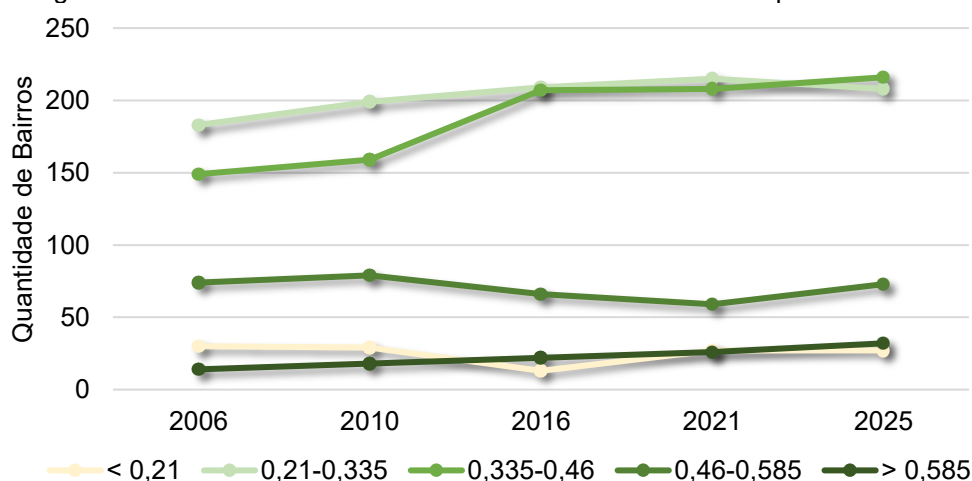
representando 37% e 39%, respectivamente. Aqueles com níveis entre 0,46-0,585 registraram uma ligeira queda de 1,35%, com seu menor registro em 2021 (59 bairros). Os bairros com níveis superiores a 0,585 registraram o maior aumento em relação às classes, passando de 14 bairros para 32 no período estudado, o que representa um aumento de 128%.

Tabela 11 - Quantidade de bairros de acordo a média do *NDVI* por ano de estudo.

| Data | Média do índice <i>NDVI</i> |            |            |            |         |
|------|-----------------------------|------------|------------|------------|---------|
|      | < 0,21                      | 0,21-0,335 | 0,335-0,46 | 0,46-0,585 | > 0,585 |
| 2006 | 30                          | 183        | 149        | 74         | 14      |
| 2010 | 29                          | 199        | 159        | 79         | 18      |
| 2016 | 13                          | 209        | 207        | 66         | 22      |
| 2021 | 27                          | 215        | 208        | 59         | 26      |
| 2025 | 27                          | 208        | 216        | 73         | 32      |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 - Quantidade de bairros de acordo a média do *NDVI* por ano de estudo



Fonte: Elaboração própria.

A proporção dos bairros em relação ao índice *SAVI* mostra uma distribuição semelhante à do *NDVI*, em que os valores médios baixos representam a maior proporção dos bairros da cidade (Tabela 12 e Figura 25). Os bairros com valores médios inferiores a 0,14 apresentam um declínio de 45%, passando de 82 bairros em 2006 para 45 em 2025. Bairros com valores de 0,14-0,22 e 0,22-0,30 registram aumentos de 7,69% e 83,48%, passando de 195 para 210 e de 109 para 200 bairros, respectivamente. Os bairros com níveis entre 0,30-0,38 registraram um aumento de 20%, passando de 60 para 72 bairros. Aqueles com níveis superiores a 0,38 registram o maior aumento por classes, equivalente a 625%, passando de 4 bairros em 2006

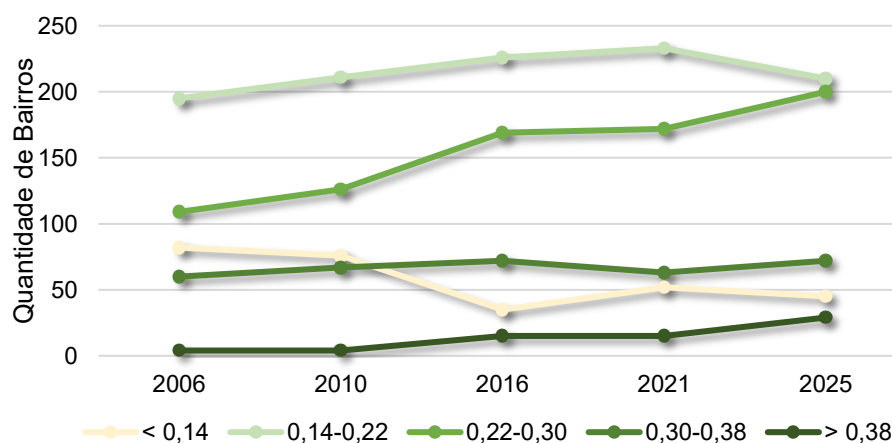
para 29 em 2025. Apesar desse aumento, os bairros com valores superiores a 0,38 representam a menor proporção dos bairros.

Tabela 12 - Quantidade de bairros de acordo a média do SAVI por ano de estúdio.

| Data | Média do índice <i>NDVI</i> |           |           |           |        |
|------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|
|      | < 0,14                      | 0,14-0,22 | 0,22-0,30 | 0,30-0,38 | > 0,38 |
| 2006 | 82                          | 195       | 109       | 60        | 4      |
| 2010 | 76                          | 211       | 126       | 67        | 4      |
| 2016 | 35                          | 226       | 169       | 72        | 15     |
| 2021 | 52                          | 233       | 172       | 63        | 15     |
| 2025 | 45                          | 210       | 200       | 72        | 29     |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 25- Quantidade de bairros de acordo a média do SAVI por ano de estúdio.



Fonte: Elaboração própria.

A distribuição apresentada pelos bairros de acordo com seus níveis médios de *NDVI* e *SAVI*, confirmam uma configuração urbana centro-periferia. Os setores centrais e mais antigos apresentam um tecido urbano compacto com escassa vegetação, em contraste com as periferias, nas quais se concentram chácaras e condomínios fechados que apresentam os maiores níveis de vegetação, assim como novos parcelamentos em diferentes estágios de construção. No entanto, essa distribuição não é homogênea. Os processos de urbanização, caracterizados pela remoção da vegetação existente, produzem grandes variações nos níveis de vegetação nas áreas de expansão da cidade, principalmente pela transformação de terrenos agrícolas para uso urbano. Além disso, os terrenos de uso agrícola, dentro e fora do perímetro urbano, apresentam diferentes coberturas do solo, associadas às etapas de desenvolvimento dessa atividade.

### **Mudança dos índices de vegetação no período de estudo**

Entre 2006 e 2025, foram identificados no perímetro urbano aumentos e diminuições do índice *NDVI* entre -1,17 e 1,19, com uma média de 0,012. No caso do índice *SAVI*, os aumentos e diminuições ficaram entre -0,65 e 0,65, com uma média de 0,031.

Em relação às médias do índice *NDVI* e *SAVI* por bairro, os aumentos e diminuições ficaram entre -0,35 a 0,17 e -0,18 a 0,12, com uma média de 0,006 e 0,017, respectivamente. Os resultados indicam um aumento geral dos níveis de vegetação, tanto no perímetro urbano quanto nos bairros analisados.

Ao analisar a distribuição espacial dos aumentos e diminuições dos índices de vegetação (Mapas 8 e 9 – A), observa-se, de forma geral, maiores mudanças nas periferias do que nos setores centrais.

Em relação aos setores centrais, observam-se maiores reduções nas áreas correspondentes ao Setor Bueno (1) e Marista (2), áreas com processos de verticalização, bem como no Setor Norte Ferroviário (3), Vila Viana (4) e na parte norte do Setor Central (5). Em relação aos aumentos nessas áreas, podem-se observar principalmente aqueles associados às APP, parques e áreas de conservação e, em menor medida, em praças e avenidas, como a Av. Goiás.

Ao longo do perímetro urbano, as APP apresentam aumentos nos índices *NDVI* e *SAVI*, principalmente os referentes ao Rio Meia Ponte (6), Ribeirão Anicuns (7) e Ribeirão Caveiras (8). A APA Morro de Mendanha (9), a oeste da cidade, também apresenta aumentos gerais, com reduções parciais na parte noroeste.

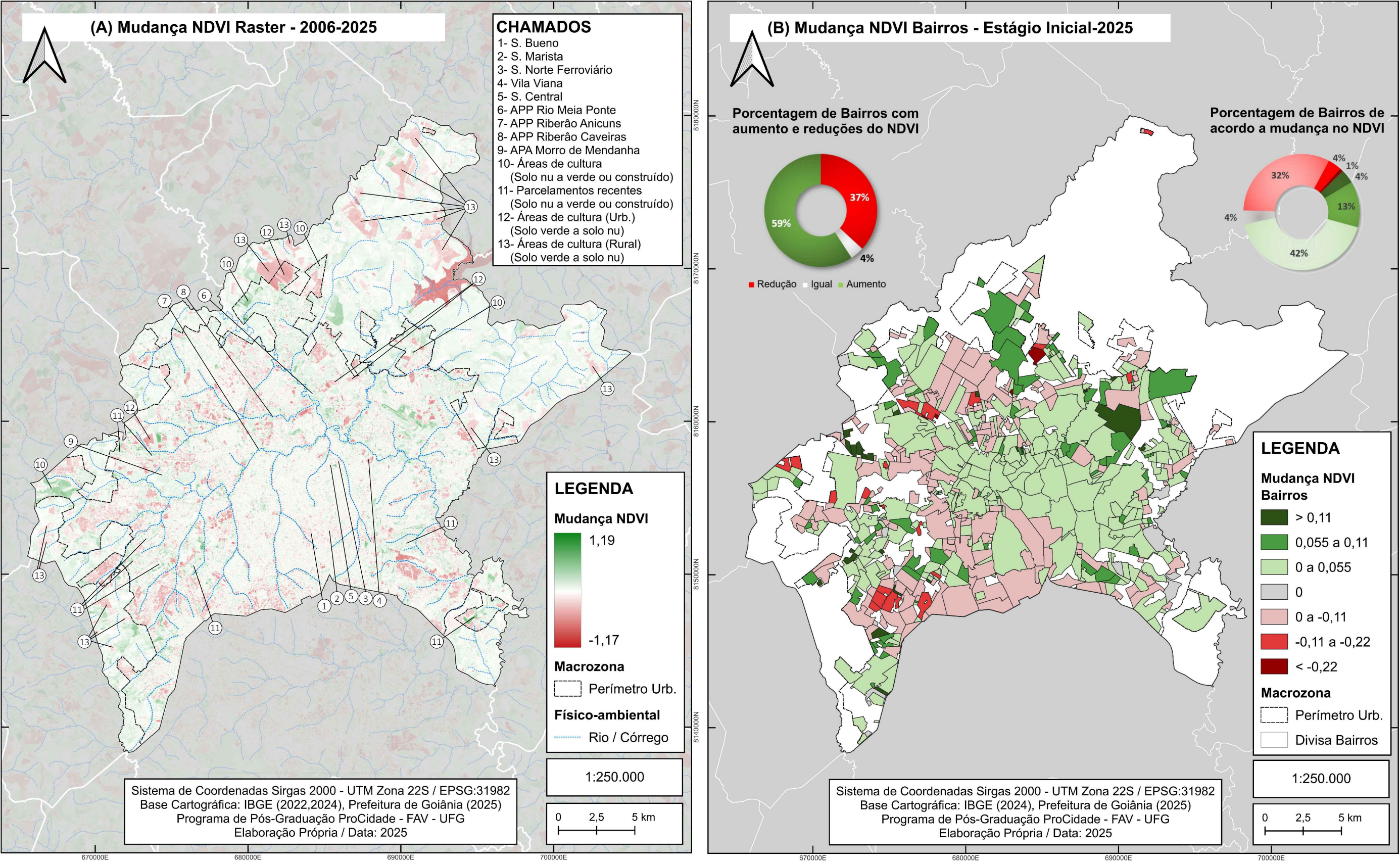
Aumentos nos índices podem ser identificados em áreas que em 2006 apresentavam solos nu, correspondentes a culturas em fase inicial (10) ou novos loteamentos com grande quantidade de lotes e terrenos vazios (11).

Por outro lado, em áreas de cultivo que contavam com vegetação e foram transformadas em solo nu, observam-se fortes reduções dentro (12) e fora do perímetro urbano (13).

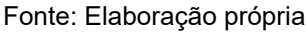
No caso do desenvolvimento urbano, as maiores reduções, principalmente na periferia, provêm da transformação de solos com vegetação em áreas construídas, compostas principalmente por áreas agrícolas.



Mapa 8 - Mudanças no índice NDVI no perímetro urbano e nos bairros de Goiânia - GO, 2006-2025



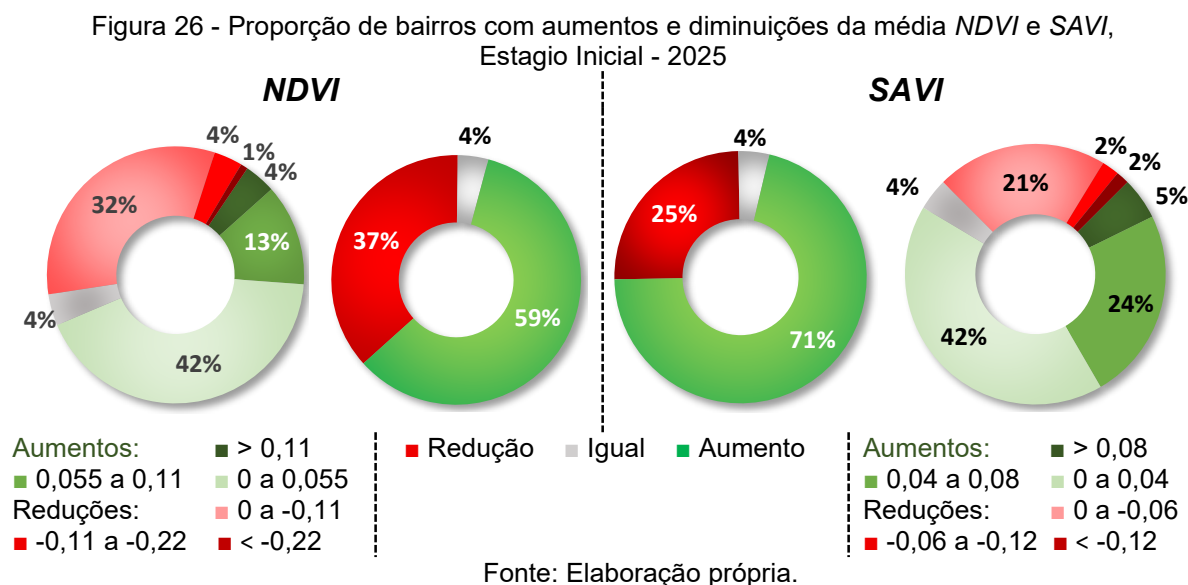






Entre as áreas que se destacam pelas reduções produto da expansão urbana, encontram-se o desenvolvimento de condomínios fechados no Sudeste; ao norte, a ocupação de lotes vazios dos setores Estrela Daiva, Recanto do Bosque, Morada do Sol, Parque Tremendão, entre outros, bem como loteamentos recentes como Alice Barbosa, Residencial Orlando Moraes e Antônio Carlos Pires. A oeste da cidade concentram-se as maiores supressões de vegetação decorrentes da expansão da cidade, mostrando aumentos e reduções produto das diferentes etapas de urbanização dos parcelamentos desenvolvidos durante o período.

Em relação ao comportamento dos bairros (Mapas 8 e 9 – B), 59% (329 bairros) e 71% (395 bairros) apresentam aumentos nos valores médios do índice *NDVI* e *SAVI*, respectivamente (Figura 26). A maioria dos bairros apresenta aumentos baixos (42%), entre 0-0,055 do *NDVI* e 0-0,04 do *SAVI*, com uma distribuição espalhada que se estende dos setores centrais até a periferia, predominando nos setores norte e leste da cidade. Setores centrais como o Setor Sul, Central, Oeste, Coimbra, Aeroporto, Norte Ferroviário, Centro Oeste, Leste Vila Nova, Leste Universitário, Jardim América e Jardim Goiás apresentam baixo crescimento, assim como bairros mais distantes do centro, como Jardim Curitiba, Conjunto Vera Cruz, Parque industrial João Braz, Residencial Real Conquista, Jardim Novo Mundo, entre outros.



Bairros com crescimento no índice *NDVI* entre 0,055-0,11 e *SAVI* entre 0,04-0,08 representam uma proporção menor (13% e 24% respectivamente), cuja distribuição responde mais às periferias, com maior presença no Nordeste no caso do *SAVI*. Entre

os bairros com aumentos no *NDVI* entre 0,055-0,11, destacam-se fazendas como Califórnia, Samambaia, Retiro, Governador, Sítios de Recreio Mansões do Campus, Pindorama; condomínios fechados como Aldeia do Vale, Jardim Florença e Jardim Gardênia, assim como diversos bairros residenciais a oeste como Residencial Vereda dos Buritis, Canadá, Granville, Goiânia Viva, San Marino, entre outros. Bairros com incrementos do *SAVI* entre 0,04-0,08, destacam-se a nordeste o Setor Jaó, Santa Genoveva, Goiânia 2, Urias Magalhães, Vila Roriz, Criméia Oeste e Leste; assim como bairros mais periféricos como Aldeia do Vale, Parque dos Cisnes, Sítios de Recreio Mansões do Campus, Chácaras de Recreio São Joaquim, Residencial Vereda dos Buritis, Canadá, Granville, Parque Santa Rita, Goiânia Viva, entre outros.

Nos bairros com aumentos superiores a 0,11 na escala *NDVI*, foram identificados apenas 21 bairros (4%), enquanto aumentos superiores a 0,08 no índice *SAVI* correspondem a 27 bairros (5%), com uma distribuição para as periferias. Entre esses bairros estão o Aeroporto Santa Genoveva, Residencial Recanto das Garças, Tempo Novo, Tropical Ville, Jardim Real, São Bernardo, Pilar dos Sonhos, Dela Pena, entre outros, que são caracterizados em sua maioria pela presença de solos nus no ano de 2006.

No que diz respeito às quedas, a maior quantidade corresponde aos níveis *NDVI* entre 0 e -0,11 e *SAVI* entre 0 e -0,06 (32% e 21% respectivamente), com uma distribuição para as periferias, com maior presença nos setores sul, oeste e norte da cidade. Dos setores centrais, destacam-se nesta categoria os setores Bueno e Marista, bem como Vila Viana e Barrio Feliz, um pouco mais a nordeste. Ao Norte, destacam-se os setores Estrela Daiva, Recanto do Bosque, Morada do sol e Parque Tremendão. Para o sudeste, o desenvolvimento de vários condomínios como Parque da Cidade, Portal do Sol II, Jardim Amsterdã, França, Mariliza, Milão, Atenas, Itália, Bela Vista, entre outros. Ao sul, bairros na divisa com Aparecida de Goiânia, como Jardim Presidente, Loteamento Faiçãville, Jardim Atlântico e Vila Rosa. A sudoeste, vários bairros agrupados, como Moinho dos Ventos, Jardins Madri, Eli Forte, Santa Rita, Center Ville, Santa Fé, Rio Verde, Forte Ville, Caravelas, Portal do Oriente, entre outros. A oeste, bairros como Parque Peste Industrial, Jardim Petrópolis, São José, Monte Pascoal I e II, Parque Eldorado Oeste, entre outros.

Em menor proporção, observam-se bairros com quedas no *NDVI* entre 0,11 e -0,22 (4%), bem como no *SAVI* entre -0,06 e -0,012 (2%), localizados nas periferias,

com maior presença no sudoeste e norte da cidade. Entre eles estão o Residencial Antônio Barbosa, Jardim Colorado, Jardim Helou, Residencial Primavera e Ana Moraes, Residencial Portinari, Setor Três Marias, Residencial Acrópole II, Residencial Fidélis e Residencial Talismã.

Apenas cinco bairros apresentam reduções inferiores a -0,22 na média *NDVI* (1%) e oito bairros no caso de quedas inferiores a -0,012 no *SAVI* (2%). Entre eles estão o Residencial Alice Barbosa, Jardim Lago Azul, Jardim Camargo e o Condomínio Belo Park.

Os aumentos e diminuições nas médias dos índices de vegetação dos bairros confirmam o ligeiro crescimento identificado nas médias do perímetro urbano. Uma maior proporção de bairros apresenta aumentos ligeiros, enquanto nas periferias se observam resultados com maior variabilidade. Setores centrais, como Bueno e Marista, apresentam reduções, principalmente nas áreas onde se concentraram os processos de verticalização durante o período. Nos setores sul e norte da cidade concentram-se reduções leves, principalmente correspondentes à ocupação de lotes vazios em loteamentos parcialmente ocupados em 2006. Em contrapartida, os loteamentos a oeste da cidade, com grande quantidade de lotes vazios em 2006, apresentam aumentos nos índices de vegetação.

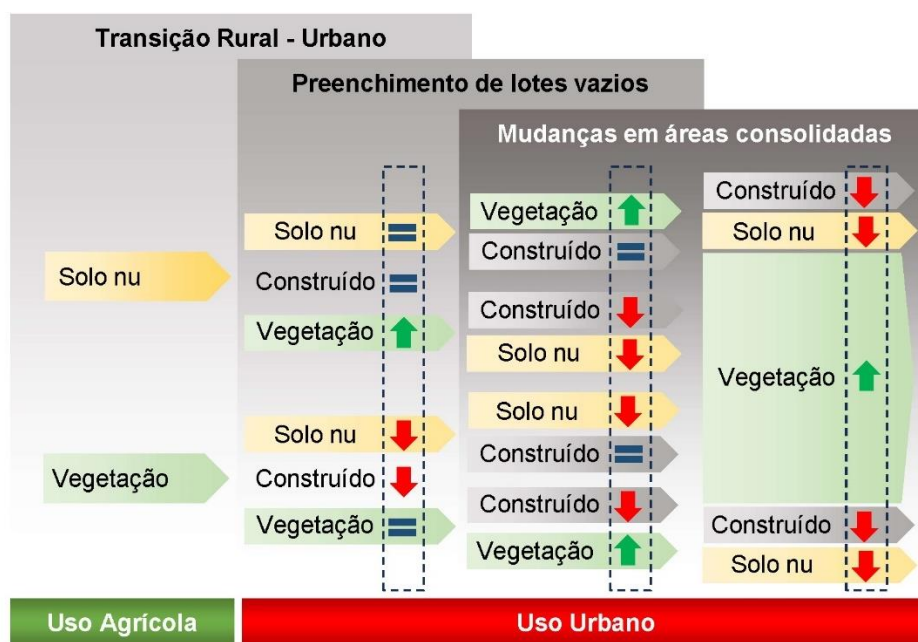
Nesse sentido, o dinamismo da periferia se traduz em maiores mudanças no comportamento do uso e ocupação do solo em relação aos setores consolidados. Os setores consolidados, caracterizados por áreas mais compactas e com alto grau de ocupação, têm menor capacidade de transformação da superfície, o que limita sua capacidade de abrigar novas áreas com vegetação. Os setores periféricos, por outro lado, contam com maiores áreas desocupadas, que sofrem transformações no uso do solo, principalmente pela conversão de áreas agrícolas em áreas urbanizadas, o que produz mudanças na cobertura do solo que variam entre áreas verdes, solo nu e área construída.

A Figura 27 mostra graficamente as transições no uso do solo e as mudanças na cobertura do solo associadas aos processos de urbanização identificados no período de estudo.

No processo de transição do uso rural para o urbano, os terrenos agrícolas em solo nu que são transformados em loteamentos, podem apresentar aumentos nos lotes destinados a áreas verdes; enquanto as transições para áreas construídas, não

apresentam grandes mudanças em relação à vegetação. Em contrapartida, os terrenos agrícolas com vegetação que são transformados em loteamentos apresentam as maiores reduções, uma vez que a vegetação é removida como parte do processo de urbanização.

Figura 27 – Principais transições de usos e coberturas do solo nos processos de urbanização.



Fonte: Elaboração própria.

Na segunda fase, correspondente ao preenchimento dos lotes, os parcelamentos podem apresentar aumentos ou reduções, sobretudo aqueles com grande quantidade de lotes vazios. Lotes vazios em solo nu que se transformam em áreas verdes, seja por abandono ou por sua disposição para vegetação, apresentam os maiores aumentos nos loteamentos recentes. O contrário ocorre com loteamentos onde os lotes ou glebas vazias têm vegetação, nos quais a construção dos lotes produz grandes reduções nos índices de vegetação.

Na terceira fase, setores consolidados apresentam baixos aumentos e reduções, uma vez que há poucas áreas vazias, limitando as transformações na cobertura do solo. Setores sujeitos à verticalização, como Bueno e Marista, apresentam reduções, em contraste com a maior parte dos setores consolidados centrais, que apresentam leves aumentos de vegetação.

De acordo com Oke *et al.* (2017), o processo de desenvolvimento urbano não é total, instantâneo nem uniforme, produzindo uma grande diversidade de ecossistemas urbanos, cada um associado a diferentes usos do solo e graus de gestão ou

perturbação urbana. A zona urbana abrange ecossistemas remanescentes, compostos por áreas verdes não alteradas; ecossistemas gerenciados, como parques e áreas verdes mantidas; bem como sistemas altamente antropogênicos, compostos por aqueles dominados pelo sistema construído.

Os processos relacionados ao desenvolvimento dessa diversidade de ecossistemas urbanos tornam complexa a análise multitemporal da cidade. As mudanças na cobertura do solo, associadas às etapas de construção dos parcelamentos, devem ser identificadas ao longo do período de estudo para se obter uma compreensão integral de seus efeitos sobre o ambiente urbano. De acordo com o presente estudo, o ponto de partida desses loteamentos está associado à remoção total da vegetação existente, seguida por um desenvolvimento urbano com diferentes graus de reposição da vegetação urbana, gerando diferentes respostas no campo térmico urbano.

### 3.1.3 Variáveis de apoio

#### Índice de Edificações de Diferença Normalizada (*NDBI*)

O índice *NDBI* mostra um aumento durante o período de estudo, tanto para o perímetro urbano quanto para os bairros analisados (Tabela 13 e Figura 28).

Tabela 13 - Valores mínimos, máximos e médios do índice *NDBI* no Perímetro Urbano e Bairros, 2006-2025.

| Data | Perímetro Urbano |       |        | Bairros |       |        |
|------|------------------|-------|--------|---------|-------|--------|
|      | min.             | máx.  | média  | min.    | máx.  | média  |
| 2006 | -0,934           | 1,000 | -0,098 | -0,330  | 0,159 | -0,043 |
| 2010 | -0,921           | 1,000 | -0,104 | -0,336  | 0,160 | -0,049 |
| 2016 | -1,000           | 0,376 | -0,096 | -0,305  | 0,133 | -0,043 |
| 2021 | -1,000           | 1,000 | -0,084 | -0,306  | 0,161 | -0,028 |
| 2025 | -1,000           | 1,000 | -0,092 | -0,320  | 0,170 | -0,040 |

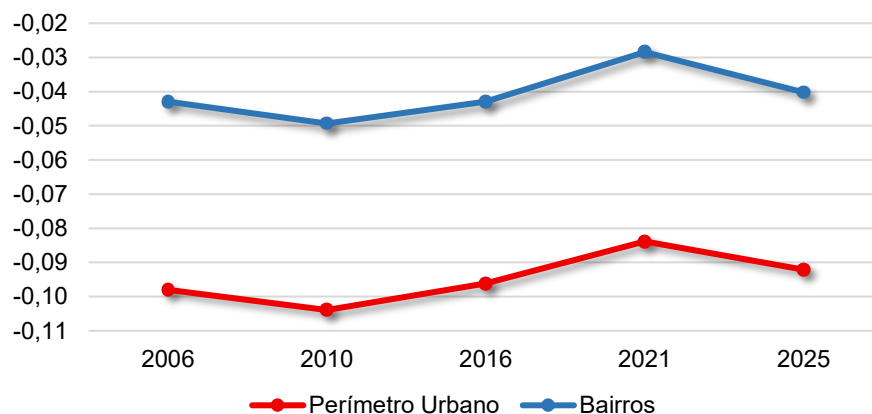
Fonte: Elaboração própria.

Durante o período do estudo, esse índice experimenta um aumento de 6,03% no perímetro urbano, passando de -0,098 em 2006 para -0,092 em 2025. Em 2010, ele registra seu nível mais baixo, equivalente a -0,104, enquanto que em 2021 registra -0,084, atingindo seu nível mais alto para o período.

Os bairros apresentam um comportamento muito semelhante, com valores superiores entre 0,052-0,055 em relação ao perímetro urbano. Nos bairros analisados, esse índice aumenta em 6,38%, passando de -0,043 em 2006 para -0,040 em 2025.

Assim como o perímetro urbano, o índice registra seu valor mais baixo em 2010, com -0,049, e o mais alto em 2021, com -0,028.

Figura 28 - Valores médios do índice *NDBI* no Perímetro Urbano e Bairros, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

### Uso e cobertura do solo (*LULC*)

Por meio das imagens multiespectrais utilizadas para cada ano de estudo, foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo, diferenciando cinco classes: vegetação densa, vegetação rasteira, área construída, corpos d'água e solo nu. A tabela 14 mostra a precisão da classificação realizada para cada ano, calculada por meio da matriz de confusão.

Tabela 14 - Matriz de confusão de classificação de uso e cobertura do solo, 2006-2025

| Data        | Precisão do produtor |              |                   |               |         | Precisão do usuário |              |                   |               |         | Precisão Geral | Kappa       |
|-------------|----------------------|--------------|-------------------|---------------|---------|---------------------|--------------|-------------------|---------------|---------|----------------|-------------|
|             | Veg. Densa           | Veg. Esparza | Áreas Construídas | Corpos d'água | Solo nu | Veg. Densa          | Veg. Esparza | Áreas Construídas | Corpos d'água | Solo nu |                |             |
| <b>2006</b> | 0.84                 | 0.63         | 0.69              | 1.00          | 0.72    | 0.78                | 0.90         | 0.85              | 0.80          | 0.45    | <b>0.76</b>    | <b>0.69</b> |
| <b>2010</b> | 0.89                 | 0.92         | 0.66              | 0.97          | 0.83    | 0.98                | 0.88         | 0.95              | 0.90          | 0.48    | <b>0.84</b>    | <b>0.79</b> |
| <b>2016</b> | 0.74                 | 0.65         | 0.77              | 1.00          | 0.87    | 0.98                | 0.83         | 0.93              | 0.63          | 0.50    | <b>0.77</b>    | <b>0.71</b> |
| <b>2021</b> | 0.67                 | 0.70         | 0.86              | 1.00          | 0.88    | 0.98                | 0.95         | 0.90              | 0.75          | 0.35    | <b>0.79</b>    | <b>0.73</b> |
| <b>2025</b> | 0.77                 | 0.77         | 0.80              | 1.00          | 0.94    | 0.93                | 0.83         | 0.88              | 0.78          | 0.80    | <b>0.84</b>    | <b>0.80</b> |

Fonte: Elaboração própria.

As classificações de uso e cobertura do solo apresentam uma precisão geral entre 76% e 84%, com o valor mais baixo para 2006 e o mais alto para os anos de 2016 e 2025. A classe de solo nu é a que apresenta menor precisão, especialmente

nos anos de 2006 e 2021, confundindo-se frequentemente com áreas construídas com coberturas de telhas de barro, bem como áreas de vegetação rasteira com muita pouca vegetação. No caso de áreas com vegetação, as classificações mostram boa precisão, especialmente a vegetação densa, que apresenta uma precisão do produtor entre 67 e 89% e uma precisão do usuário entre 78 e 98%.

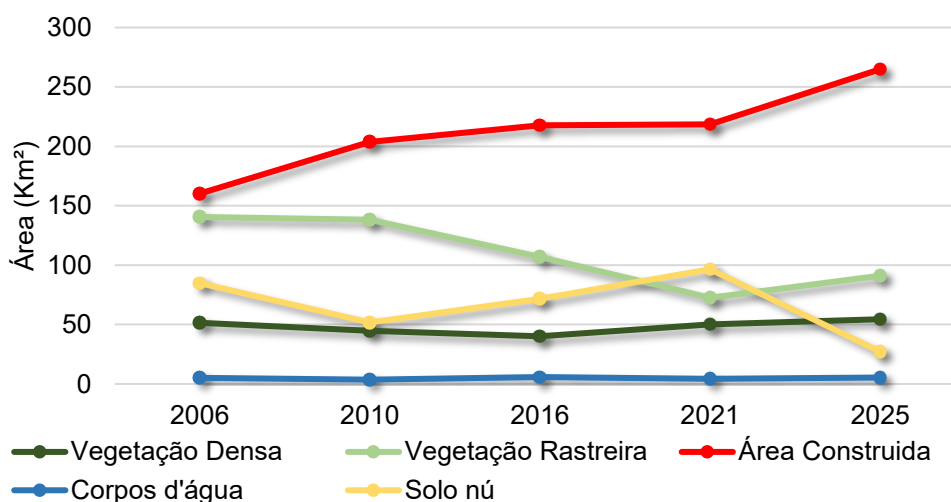
Ao observar o comportamento das 5 classes ao longo do período de estudo (Tabela 15 e Figura 29), pode-se perceber que a classe com maior ocupação do perímetro urbano é representada pelas áreas construídas, que apresentam grandes aumentos em contraste com a vegetação rasteira, que ocupa o segundo lugar e apresenta fortes reduções.

Tabela 15 - Áreas de acordo as classes de uso e cobertura do solo no Perímetro Urbano, 2006-2025.

| Data | Vegetação Densa |       | Vegetação Rasteira |       | Área Construída |       | Corpos d'água   |      | Solo nu         |       |
|------|-----------------|-------|--------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|------|-----------------|-------|
|      | Km <sup>2</sup> | %     | Km <sup>2</sup>    | %     | Km <sup>2</sup> | %     | Km <sup>2</sup> | %    | Km <sup>2</sup> | %     |
| 2006 | 51,49           | 11,64 | 140,58             | 31,79 | 160,25          | 36,24 | 5,02            | 1,13 | 84,89           | 19,20 |
| 2010 | 44,73           | 10,11 | 138,33             | 31,28 | 203,82          | 46,09 | 3,61            | 0,82 | 51,74           | 11,70 |
| 2016 | 40,13           | 9,07  | 106,85             | 24,16 | 217,70          | 49,23 | 5,80            | 1,31 | 71,75           | 16,23 |
| 2021 | 50,18           | 11,35 | 72,57              | 16,41 | 218,52          | 49,41 | 4,40            | 1,00 | 96,56           | 21,83 |
| 2025 | 54,47           | 12,30 | 91,14              | 20,58 | 264,91          | 59,80 | 5,31            | 1,20 | 27,13           | 6,13  |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Áreas de acordo as classes de uso e cobertura do solo no Perímetro Urbano, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

As áreas construídas representam a maior proporção do perímetro urbano, registrando o maior aumento entre as classes, passando de 160,25 km<sup>2</sup> (36%) em 2006 para 264,91 km<sup>2</sup> (60%) em 2025, o que representa um aumento de 65,3% no período. Como se pode observar na figura 28, entre os anos de 2006 e 2010, e entre

2021 e 2021, as áreas construídas apresentam os maiores aumentos para o período, equivalentes a 27,2% e 21,23%, respectivamente.

As áreas construídas representam a maior proporção do perímetro urbano, registrando o maior aumento entre as classes, passando de 160,25 km<sup>2</sup> (36%) em 2006 para 264,91 km<sup>2</sup> (60%) em 2025, o que representa um aumento de 65,3% no período. Como se pode observar na figura 28, entre os anos de 2006 e 2010, e entre 2021 e 2021, as áreas construídas apresentam os maiores aumentos para o período, equivalentes a 27,2% e 21,23%, respectivamente.

As áreas de vegetação rasteira ocupam o segundo lugar em ocupação dentro do perímetro urbano, registrando um declínio de 35,2%, passando de 140,58 km<sup>2</sup> (32%) em 2006 para 91,14 km<sup>2</sup> (21%) em 2025. As áreas de vegetação rasteira experimentam sua maior queda em 2021, atingindo 72,57 km<sup>2</sup>, equivalentes a 16% da área urbana.

As áreas de solo nu registram a maior queda do período, equivalente a uma redução de 68%. Em 2006, as áreas identificadas como solo descoberto atingiram 84,89 km<sup>2</sup> (19% da área urbana), registrando uma queda em 2010 para 51,74 km<sup>2</sup> (12% da área urbana). Entre 2010 e 2021, essas áreas apresentam um aumento de 86,61%, atingindo seu máximo no período, equivalente a 22% da área urbana, superando as áreas de vegetação rasteira. Entre 2021 e 2025, essas áreas registram novamente um declínio, equivalente a uma redução de 72%, passando a ocupar 6% da área urbana, o valor mais baixo registrado no período.

As áreas de vegetação densa apresentam poucas alterações, registrando um crescimento de 5,8% no período, passando de 51,49km<sup>2</sup> em 2006 para 54,47km<sup>2</sup> em 2025. Durante o ano de 2016, essas áreas registraram seu valor mais baixo, reduzindo-se para 40,13 km<sup>2</sup>, o equivalente a 9% da área urbana.

Ao observar o comportamento do solo nu e o índice *NDBI* durante o período do estudo, é possível identificar uma semelhança. Conforme (2008), tal índice apresenta limitações decorrentes da similaridade na resposta espectral entre áreas urbanizadas, solos nus e vegetação muito seca. Essa ambiguidade radiométrica justifica as discrepâncias entre o *NDBI* e a classificação das áreas construídas, sugerindo que os valores registrados por esse índice podem ser o resultado da sobreposição espectral entre superfícies edificadas e solo exposto.

As áreas classificadas como vegetação densa e rasteira apresentam um



comportamento semelhante ao identificado por Nova, Gonçalves e Lima (2021) na cidade de Recife – PE entre 1989 e 2019. Neste estudo, as áreas urbanizadas, representadas por aquelas sem vegetação, apresentam os maiores aumentos, em detrimento das áreas de vegetação intermediária, registrando maior estabilidade nas áreas de vegetação densa, compostas principalmente por APP. Além disso, conforme indicado na seção anterior, este estudo também mostra um comportamento semelhante em relação às classes de *NDVI*, evidenciando a conexão entre os índices de vegetação e a classificação dos usos e cobertura do solo analisados.

Em relação à distribuição espacial, o mapa 10 mostra a evolução de cada classe de uso e cobertura do solo para cada ano do estudo.

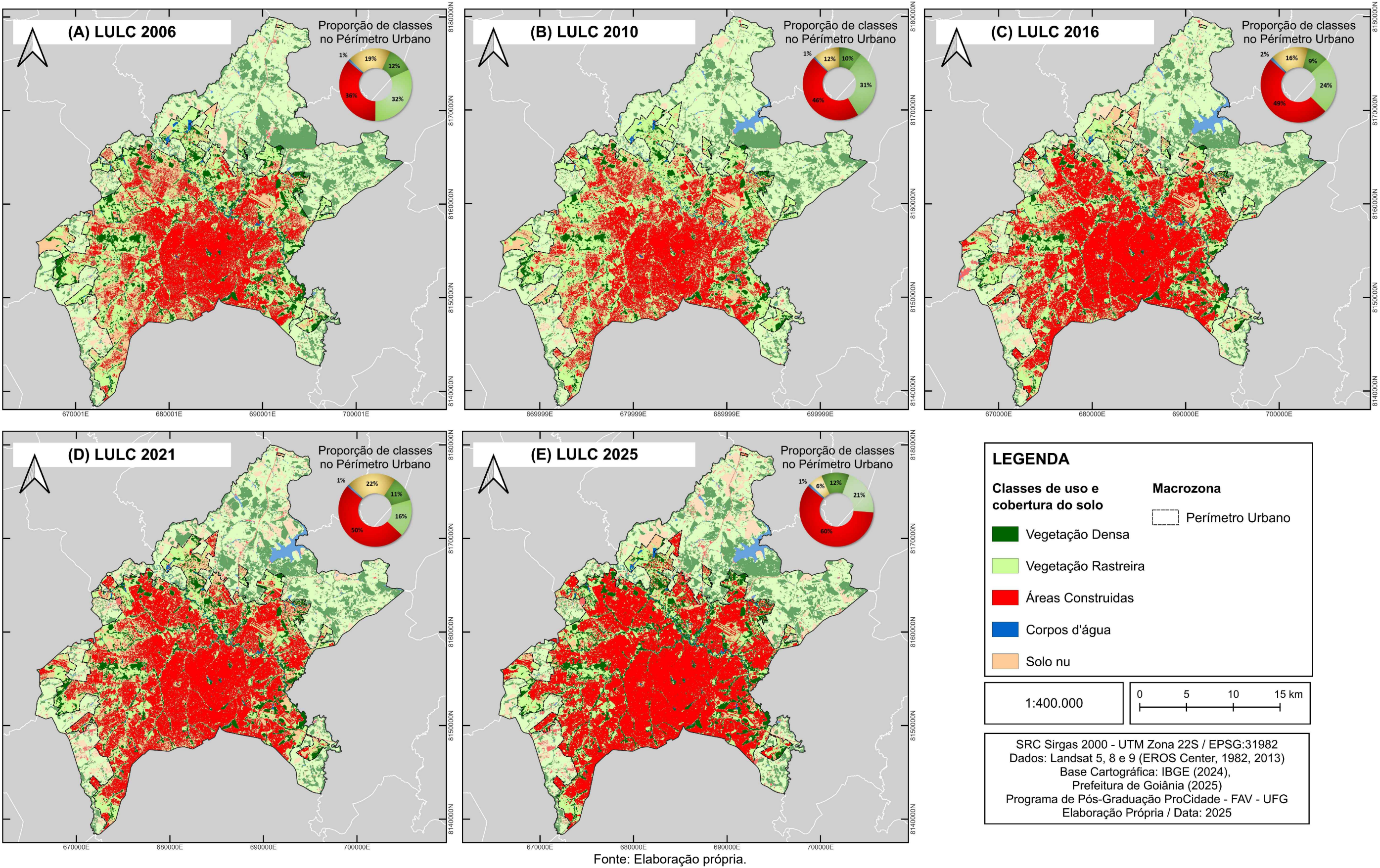
No Mapa 10-A, referente a 2006, podem-se observar grandes áreas do tecido urbano com solo nu, principalmente nas áreas periféricas ao norte e oeste da cidade. Ao Sul, em setores contíguos a Aparecida de Goiânia, observa-se uma mistura de áreas de vegetação rasteira e solo descoberto, correspondendo a lotes vazios com diferentes coberturas de solo. Para o sudeste, podem-se observar grandes áreas de vegetação rasteira, nas quais estão em construção alguns condomínios fechados que posteriormente se propagarão nessas áreas. Para 2021 (Mapa 10-D), observa-se novamente uma grande presença de áreas de solo descoberto nas periferias e áreas de expansão da cidade, especialmente para o sudeste, com a construção de novos condomínios fechados.

No que diz respeito às áreas de vegetação densa, podem-se observar transformações de vegetação rasteira para densa, principalmente nas APP. Em 2006, as áreas de vegetação densa estavam mais dispersas dentro do perímetro urbano, mas, em comparação com 2025, elas se concentraram e se densificaram ao longo das margens dos rios e córregos, o que pode ser observado em maior medida nas APP correspondentes ao Rio Meia Ponte, Ribeirão Anicuns e Ribeirão Caveiras.

O comportamento das classes e sua distribuição ao longo do período de estudo, indicam que os processos de expansão e ocupação de novas áreas na cidade ocorrem principalmente por meio da conversão de solos de uso agrícola, de modo que áreas de vegetação densa não são afetadas pelo desenvolvimento urbano. As áreas de vegetação rasteira são transformadas em solo nu durante o processo de urbanização, sendo gradualmente substituídas por áreas construídas, com diferentes níveis de vegetação urbana.



Mapa 10 - Evolução do uso e cobertura do solo no perímetro urbano de Goiânia - GO, 2006-2025





Esses resultados confirmam o observado na evolução dos índices de vegetação, em que áreas com níveis altos e baixos de vegetação apresentam os maiores aumentos, em detrimento das áreas com níveis intermediários. Áreas construídas, caracterizadas por vegetação escassa, bem como áreas de vegetação densa, representadas principalmente por APP, APA, parques e unidades de conservação, apresentam densificação; no entanto, áreas de vegetação rasteira, que representam valores intermediários dos índices, apresentaram reduções.

Ao analisar o comportamento das áreas construídas e do solo nu, juntamente com o comportamento do índice *NDBI* durante o período de estudo, podem-se observar dois tipos de ciclos no processo de urbanização, composto por momentos de expansão e momentos de preenchimento. Nesse sentido, identificam-se dois ciclos de preenchimento, compreendidos entre 2006-2010 e 2021-2025. Em esses períodos diminuem as áreas de solo nu e aumentam abruptamente as áreas construídas, mantendo-se mais estáveis as áreas de vegetação rasteira, principal cobertura do solo das áreas de conversão (áreas de uso agrícola). Como ciclo de expansão, observa-se o período de 2010 a 2021, no qual aumentam as áreas de solo nu e diminuem as de vegetação rasteira, produto da conversão de solos rurais em urbanizados.

De acordo com Nascimento e Oliveira (2015), o período de 2006 a 2010 é caracterizado pela consolidação de um processo de preenchimento de vazios intra-urbanos na porção central e nas regiões periféricas de Goiânia, iniciado na década de 1990 em grande parte pela implementação da Lei Orgânica do Município de 1990, que ampliou as pressões sobre o uso especulativo dos terrenos urbanos.

A classificação dos usos e da cobertura do solo revelou-se de grande utilidade para identificar as diferentes etapas do processo de urbanização durante o período de estudo. No entanto, a resolução espacial de 30m das imagens captadas pelas plataformas *Landsat* não permite a identificação eficaz da arborização no tecido urbano, sobretudo a composta por árvores isoladas, limitando-se à detecção de áreas de vegetação densa com dimensões iguais ou superiores à resolução espacial.

Assim, conforme indicado por diversos autores (Du *et al.*, 2016; Elmes *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2020), a eficácia no mapeamento da cobertura de copas arbóreas e gramíneas em ambientes urbanos requer o emprego de imagens de sensoriamento remoto com alta resolução espacial e espectral, indispensável para a determinação de seus benefícios ambientais.

### 3.1.4 Relação entre as variáveis

#### ICUS e índices de vegetação (*NDVI* e *SAVI*)

Para avaliar a relação entre a vegetação e as ICUS, foram utilizados os valores médios dos índices *NDVI* e *SAVI* (variável independente) e as intensidades médias das ICUS (variável dependente) apresentadas pelos bairros analisados para cada ano do estudo. Por meio da correlação de Pearson e da regressão linear dos quadrados ordinários, foi possível verificar uma relação significativa ( $p < 0,001$ ) entre as variáveis, cujos coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $R^2$ ), indicam uma forte relação.

Para cada ano de estudo, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) indica uma forte relação negativa entre os valores médios do índice *NDVI* e as intensidades das ICUS nos bairros, atingindo valores entre -0,90 e -0,84, com uma média de -0,88 para o período (Tabela 16).

Tabela 16 - Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) entre Intensidades de ICUS e índices *NDVI* e *SAVI* nos bairros, 2006-2025.

| Índice      | Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) |       |       |       |       |       |
|-------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 2006                                         | 2010  | 2016  | 2021  | 2025  | Média |
| <i>NDVI</i> | -0,90                                        | -0,86 | -0,89 | -0,84 | -0,84 | -0,88 |
| <i>SAVI</i> | -0,88                                        | -0,85 | -0,89 | -0,84 | -0,85 | -0,88 |

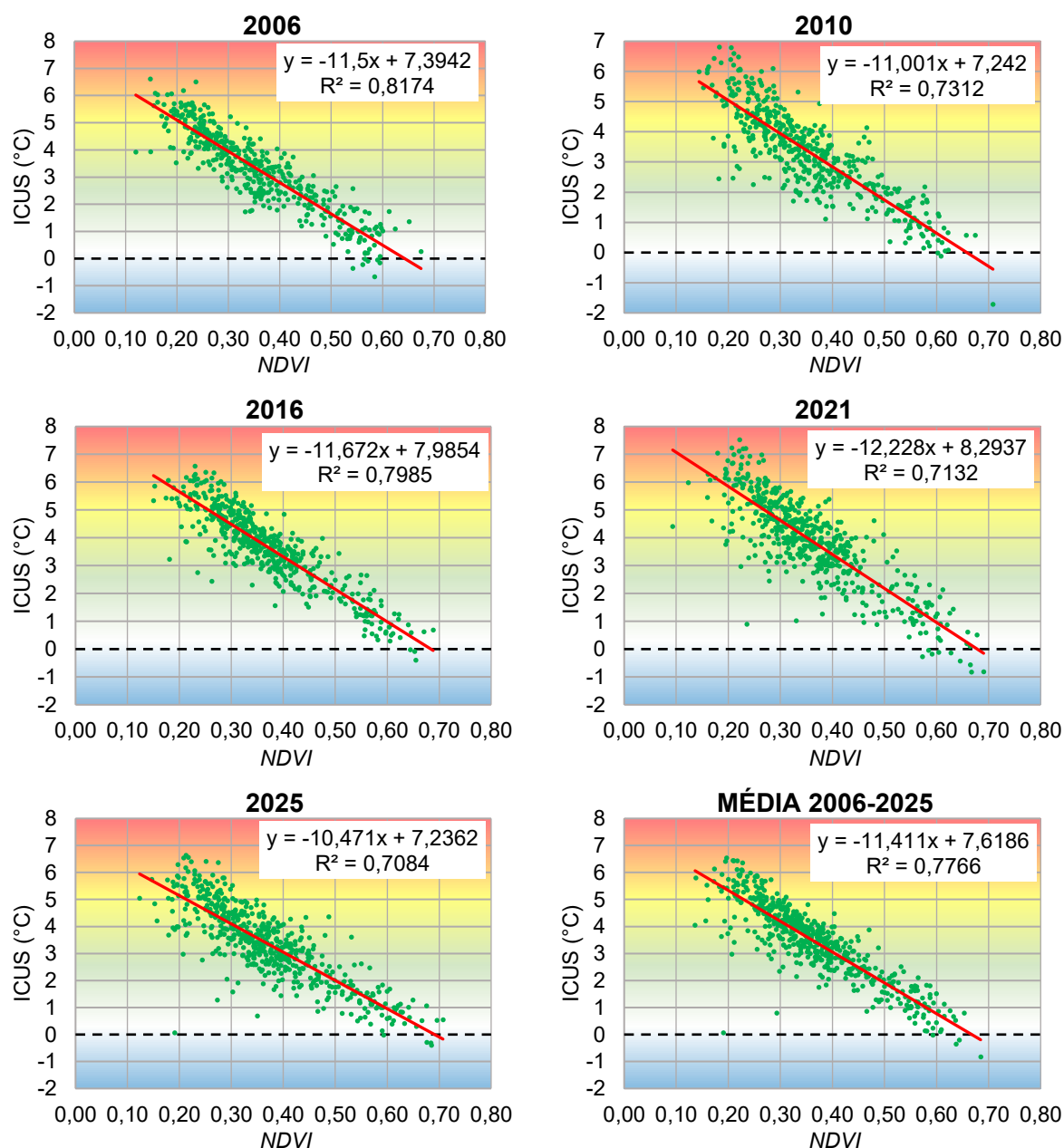
Fonte: Elaboração própria

Em relação à regressão linear, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que os valores médios do índice *NDVI* conseguiram explicar em um 77,6% a variação das intensidades médias das ICUS dos bairros, sob uma relação inversamente proporcional, em que o aumento de 0,087 neste índice está relacionado a uma diminuição de 1°C na intensidade (Figura 30). Para 2006, a variação na intensidade das ICUS é explicada em 81,7%, enquanto que para 2025 diminui para 70,8%, o valor mais baixo para o período.

No caso do índice *SAVI*, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) atinge valores entre -0,89 e -0,84, com uma média de -0,88 para o período do estudo (Tabela 16), igual à alcançada pelo índice *NDVI*. Em relação à regressão linear, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que os valores médios do índice *SAVI* dos bairros conseguiram explicar 77,7% das variações na intensidade das ICUS durante o período de estudo, com uma relação em que o aumento de 0,057 neste índice está relacionado com uma diminuição de 1°C na intensidade (Figura 31). Durante o período do estudo, os valores médios desse índice explicam entre 69,8% e 79,2% a variação das

intensidades médias das ICUS, registrando seu menor valor em 2021 e seu maior valor em 2016.

Figura 30 - Regressão linear dos valores médios de *NDVI* e intensidade das ICUS nos bairros.

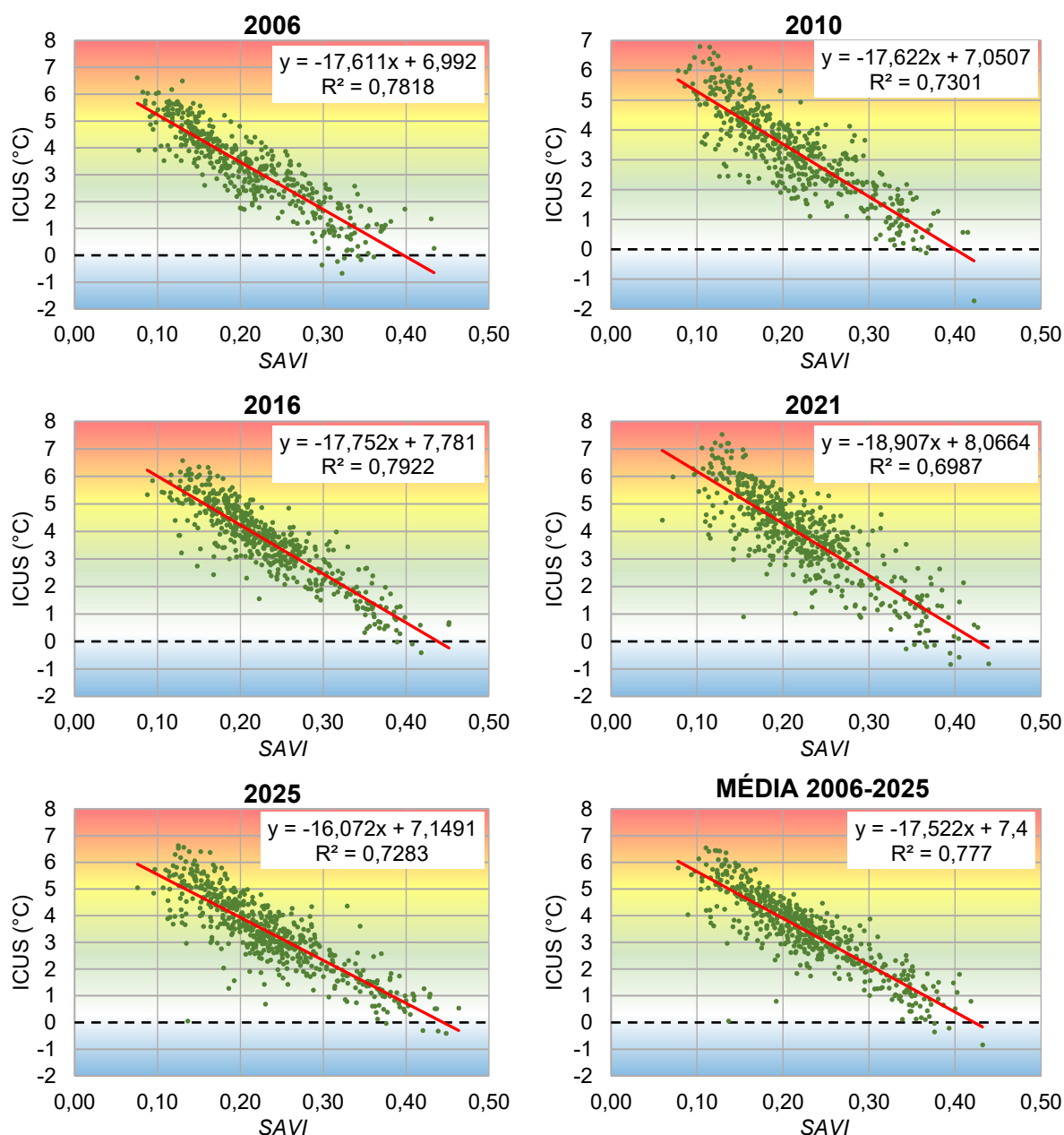


Fonte: Elaboração própria.

Vários estudos nacionais identificaram relações negativas entre o comportamento do índice *NDVI* e as TST em áreas urbanas, através da seleção de pontos aleatórios dentro da área estudada. Paiva e Souza (2024) obtiveram um coeficiente ( $r$ ) de -0,578 durante o período chuvoso e de -0,306 durante o período seco na conurbação urbana de Cuiabá – Várzea Grande, em Mato Grosso, reforçando a importância do vigor da vegetação na determinação das TST. Na cidade de Belém –

PA, Bezerra, Moraes e Soares (2018) demonstraram que o índice *NDVI* explicava o 65% do comportamento das TST, durante o período 2006 – 2016. Por meio do método de correlação de Spearman, Nova, Gonçalves e Lima (2021) estudaram a relação entre o índice *NDVI* e as TST na cidade de Recife – PE, obtendo um coeficiente (*r*) de -0,72 e -0,59, para os anos de 1989 e 2019, respectivamente.

Figura 31 - Regressão linear dos valores médios de SAVI e intensidade das ICUS nos bairros.



Fonte: Elaboração própria.

Em relação a estudos internacionais, relações semelhantes são identificadas nas cidades de Florença (-0,71) e Nápoles (-0,57) na Itália, bem como Guangzhou (-0,67) e Hong Kong (-0,41) na China (Guha *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2015; Liu; Zhang, 2011).

De acordo com o observado por Guha *et al.* (2018) e Yu *et al.* (2018), as correlações entre o índice *NDVI* e as TST são mais fortes na medida em que há maior presença de vegetação, diminuindo com o aumento de áreas construídas o solo nu, o que poderia explicar a diminuição dessas correlações à medida que o desenvolvimento urbano se expande. Além disso, de Oliveira (2022) e Paiva e Souza (2024) identificaram maiores correlações durante a estação chuvosa em contraste com a estação seca, revelando a importância das precipitações no aumento do vigor da vegetação urbana (representada pelos índices de vegetação), o que se traduz em maiores efeitos de resfriamento.

As relações identificadas na presente pesquisa refletem a importância da vegetação urbana no comportamento do campo térmico de Goiânia, bem como a utilidade dos índices *NDVI* e *SAVI* na predição das intensidades das ICUS dos bairros. Diferente da maioria dos trabalhos citados, neste estudo determina-se a relação das variáveis por meio dos valores médios dos índices de vegetação e intensidades das ICUS, utilizando o polígono do bairro como unidade espacial de análise. A forte relação entre as variáveis, identificada por meio dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e de determinação ( $R^2$ ), sugere uma maior precisão sobre o método de pontos aleatórios utilizados em outros trabalhos, além de permitir associações diretas com as escalas territoriais empregadas no planejamento urbano local.

Ao avaliar as intensidades das ICUS dos bairros durante o período, classificadas de acordo com as categorias estabelecidas para os índices *NDVI* e *SAVI*, é possível identificar que os bairros com maiores níveis de vegetação apresentam menores intensidades das ICUS.

Enquanto bairros que apresentam valores inferiores a 0,21 no índice *NDVI* apresentam intensidades de ICUS entre 4,09 e 5,78°C, aqueles com valores superiores a 0,585 apresentam intensidades entre 0,15 e 1,15°C, próximas às temperaturas médias rurais (Tabela 17 e Figura 32).

No caso do índice *SAVI*, bairros com valores inferiores a 0,14 apresentam intensidades entre 4,99 e 5,89°C, em contraste com aqueles com níveis superiores a 0,38, que apresentam intensidades entre 0,34 e 1,49°C (Tabela 18 e Figura 33).

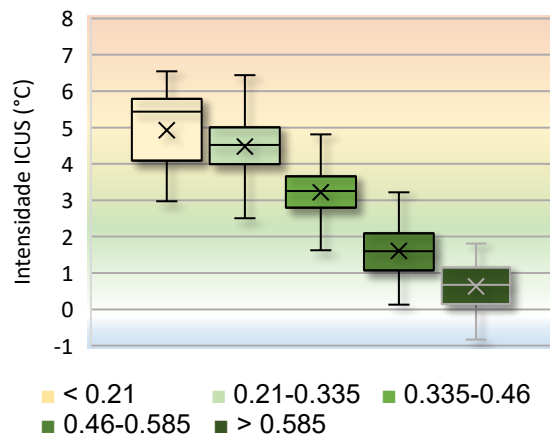
Como demonstram os resultados acima mencionados, os valores de *NDVI* e *SAVI* estão significativamente relacionados com a capacidade de resfriamento da vegetação urbana, em concordância com outros estudos (Akbari; Kolokotsa, 2016;

Bowler *et al.*, 2010; Kuang *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2018).

Tabela 17 - Intensidades médias das ICUS nos bairros de acordo a categorias *NDVI* no período 2006-2025.

| Medida       | Intensidade ICUS (°C) de acordo a categorias <i>NDVI</i> |               |               |               |             |
|--------------|----------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
|              | < 0,21                                                   | 0,21<br>0,335 | 0,335<br>0,46 | 0,46<br>0,585 | > 0,585     |
| <b>Média</b> | <b>4,92</b>                                              | <b>4,48</b>   | <b>3,21</b>   | <b>1,61</b>   | <b>0,63</b> |
| Mediana      | 5,44                                                     | 4,52          | 3,25          | 1,60          | 0,68        |
| 1ro. Quart.  | 4,09                                                     | 3,99          | 2,79          | 1,07          | 0,15        |
| 3ro. Quart.  | 5,78                                                     | 5,00          | 3,66          | 2,09          | 1,15        |

Figura 32 - Intensidades médias das ICUS nos bairros de acordo a categorias *NDVI* no período 2006-2025.

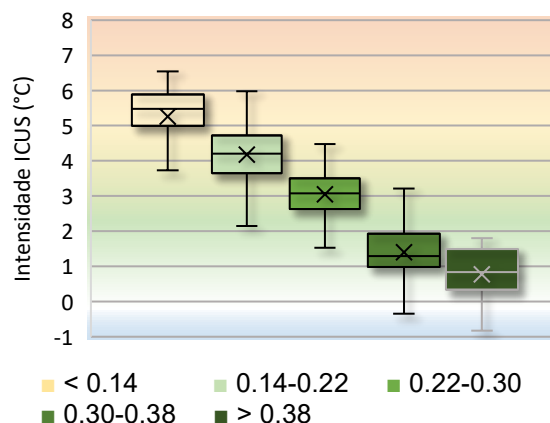


Fonte: Elaboração própria.

Tabela 18 - Intensidades médias das ICUS nos bairros de acordo a categorias *SAVI* no período 2006-2025.

| Medida       | Intensidade ICUS (°C) de acordo a categorias <i>SAVI</i> |              |              |              |             |
|--------------|----------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
|              | < 0,14                                                   | 0,14<br>0,22 | 0,22<br>0,30 | 0,30<br>0,38 | > 0,38      |
| <b>Média</b> | <b>5,26</b>                                              | <b>4,17</b>  | <b>3,05</b>  | <b>1,40</b>  | <b>0,78</b> |
| Mediana      | 5,15                                                     | 4,37         | 3,07         | 1,55         | 0,84        |
| 1ro. Quart.  | 4,99                                                     | 3,65         | 2,63         | 0,99         | 0,34        |
| 3ro. Quart.  | 5,89                                                     | 4,73         | 3,51         | 1,92         | 1,49        |

Figura 33 - Intensidades médias das ICUS nos bairros de acordo a categorias *SAVI* no período 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

No caso da relação entre os índices de vegetação e as intensidades das ICUS na cidade de Goiânia, Nascimento e Barros (2009) identificaram relações semelhantes para o ano de 2001 às levantadas pelo presente estudo. Os autores encontram as maiores TST associadas aos setores centrais, como Campinas, Centro-Oeste e Coimbra, caracterizados por intensa edificação, pavimentação asfáltica e atividade comercial, com pouca presença de corpos d'água e áreas verdes. Em contrapartida, as áreas com remanescentes de vegetação nas porções norte, nordeste e sudeste, bem como as associadas aos cursos d'água compostos principalmente por Mata de Galeria, apresentam as menores TST.



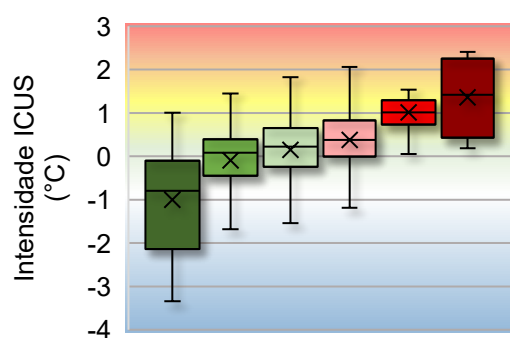
Desta forma, os valores do *NDVI* e do *SAVI* demonstram grande utilidade no monitoramento dos níveis de vegetação dos bairros de Goiânia, assim como preditores do comportamento das ICUS, permitindo avaliar e priorizar áreas da cidade para a aplicação de estratégias de mitigação, por meio da implementação de políticas públicas voltadas ao aumento da vegetação urbana.

Em relação à influência dos aumentos nos índices *NDVI* e *SAVI* sobre as intensidades das ICUS nos bairros, observa-se que, em média, pequenos aumentos não resultaram em reduções das intensidades. Bairros com aumentos no índice *NDVI* entre 0-0,055 registraram um aumento médio de 0,15°C nas intensidades (Tabela 19 e Figura 34), enquanto aumentos no índice *SAVI* entre 0-0,04 e 0,04-0,08 registraram aumentos médios de 0,18 e 0,03°C em suas intensidades (Tabela 20 e Figura 35).

Tabela 19 – Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de *NDVI* nos bairros, 2006-2025.

| Medida       | Aumentos <i>NDVI</i> |               |             | Reduções <i>NDVI</i> |                |             |
|--------------|----------------------|---------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|
|              | > 0,11               | 0,055<br>0,11 | 0<br>0,055  | 0<br>-0,11           | -0,11<br>-0,22 | < -0,22     |
| <b>Média</b> | <b>-1,00</b>         | <b>-0,09</b>  | <b>0,15</b> | <b>0,38</b>          | <b>1,02</b>    | <b>1,36</b> |
| Mediana      | -0,79                | 0,09          | 0,23        | 0,38                 | 1,01           | 1,42        |
| 1ro. Quart.  | -2,14                | -0,45         | -0,24       | -0,01                | 0,73           | 0,43        |
| 3ro. Quart.  | -0,10                | 0,39          | 0,65        | 0,83                 | 1,29           | 2,26        |

Figura 34 - Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de *NDVI* nos bairros, 2006-2025.



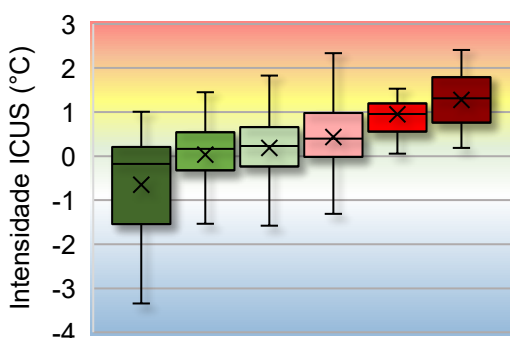
Aumentos: ■ > 0,11    ■ 0,055 a 0,11    ■ 0 a 0,055  
Reduções: ■ 0 a -0,11    ■ -0,11 a -0,22    ■ < -0,22

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 20 – Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de *SAVI* nos bairros, 2006-2025.

| Medida       | Aumentos <i>SAVI</i> |              |             | Reduções <i>SAVI</i> |                |             |
|--------------|----------------------|--------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|
|              | > 0,08               | 0,04<br>0,08 | 0<br>0,04   | 0<br>-0,06           | -0,06<br>-0,12 | < -0,12     |
| <b>Média</b> | <b>-0,68</b>         | <b>0,03</b>  | <b>0,18</b> | <b>0,43</b>          | <b>0,95</b>    | <b>1,27</b> |
| Mediana      | -0,18                | 0,16         | 0,23        | 0,40                 | 0,96           | 1,31        |
| 1ro. Quart.  | -1,54                | -0,32        | -0,24       | -0,01                | 0,56           | 0,76        |
| 3ro. Quart.  | 0,21                 | 0,54         | 0,66        | 0,98                 | 1,20           | 1,79        |

Figura 35 - Mudança nas intensidades de ICUS de acordo ao aumento e reduções de *SAVI* nos bairros, 2006-2025.



Aumentos: ■ > 0,08    ■ 0,04 a 0,08    ■ 0 a 0,04  
Reduções: ■ 0 a -0,06    ■ -0,06 a -0,12    ■ < -0,12

Fonte: Elaboração própria.

Esse comportamento explica por que, apesar de haver um aumento geral nos níveis de *NDVI* e *SAVI* na cidade, as intensidades das ICUS aumentaram durante o período do estudo. A maior parte dos bairros apresenta aumentos leves (42% dos bairros), de 0,055 e 0,04 nos índices *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, aumentos que, em média, não são suficientes para produzir reduções nas ICUS.

A grande amplitude no comportamento das intensidades em relação aos aumentos e reduções dos índices *NDVI* e *SAVI*, também indica que a vegetação não é o único fator que influencia as ICUS na área de estudo. Bairros que registraram reduções leves nos índices de vegetação, entre -0,11 e -0,06 no *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, registraram reduções nas intensidades das ICUS de até -1,86°C, evidenciando a intervenção de outros fatores, bem como a necessidade de identificá-los para delimitar com maior detalhe a influência da vegetação.

A densidade construtiva e a distribuição espacial da vegetação no tecido urbano exercem influência direta na eficácia do resfriamento. Conforme Greene e Millward (2017), árvores dispersas não mitigam eficientemente a TST, especialmente em proximidade a edificações e pavimentos asfálticos, os quais absorvem radiação de ondas curtas e a reemitem como radiação de ondas longas. Tais condições elevam o déficit de pressão de vapor entre o ar e o dossel da árvore, induzindo o fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, reduzindo a taxa de evapotranspiração (Elmes *et al.*, 2020; Hulley *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020; Weng; Yang, 2004).

Os setores mais centrais e antigos da cidade de Goiânia, caracterizados por uma maior presença de superfícies compactas e impermeáveis, apresentam distribuições de vegetação dispersa, compostas principalmente por árvores em ruas e praças. Isso poderia explicar por que, apesar desses setores apresentarem leves aumentos nos níveis *NDVI* e *SAVI*, apresentaram aumentos nas intensidades das ICUS, evidenciando que os efeitos de resfriamento são superados pelos materiais que compõem a urbanização. Nesse sentido, com o intuito de assegurar condições ambientais favoráveis aos moradores urbanos, diversos autores enfatizam o padrão de distribuição arbórea como uma variável determinante no planejamento da arborização urbana (Deng *et al.*, 2018; Ferreira; Duarte, 2019; Zhang *et al.*, 2013).

### **ICUS e variáveis de apoio**

Com o objetivo de avaliar a relação entre os níveis de urbanização e as ICUS, um dos principais fatores que influenciam o comportamento das ICUS de acordo a

literatura, foram utilizados os valores médios do índice *NDBI* (variável independente) e as intensidades médias das ICUS (variável dependente) dos bairros para cada ano do estudo. Por meio da correlação de Pearson e da regressão linear dos quadrados ordinários, foi possível verificar uma relação significativa ( $p < 0,001$ ) entre as variáveis, cujos coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $R^2$ ), indicam uma forte relação.

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) indica uma forte relação positiva entre os valores médios do índice *SAVI* e as intensidades das ICUS nos bairros, atingindo valores entre 0,91 e 0,85, com uma média de 0,90 para o período (Tabela 21).

Tabela 21 - Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) entre Intensidades de ICUS e índice *NDBI* nos bairros, 2006-2025.

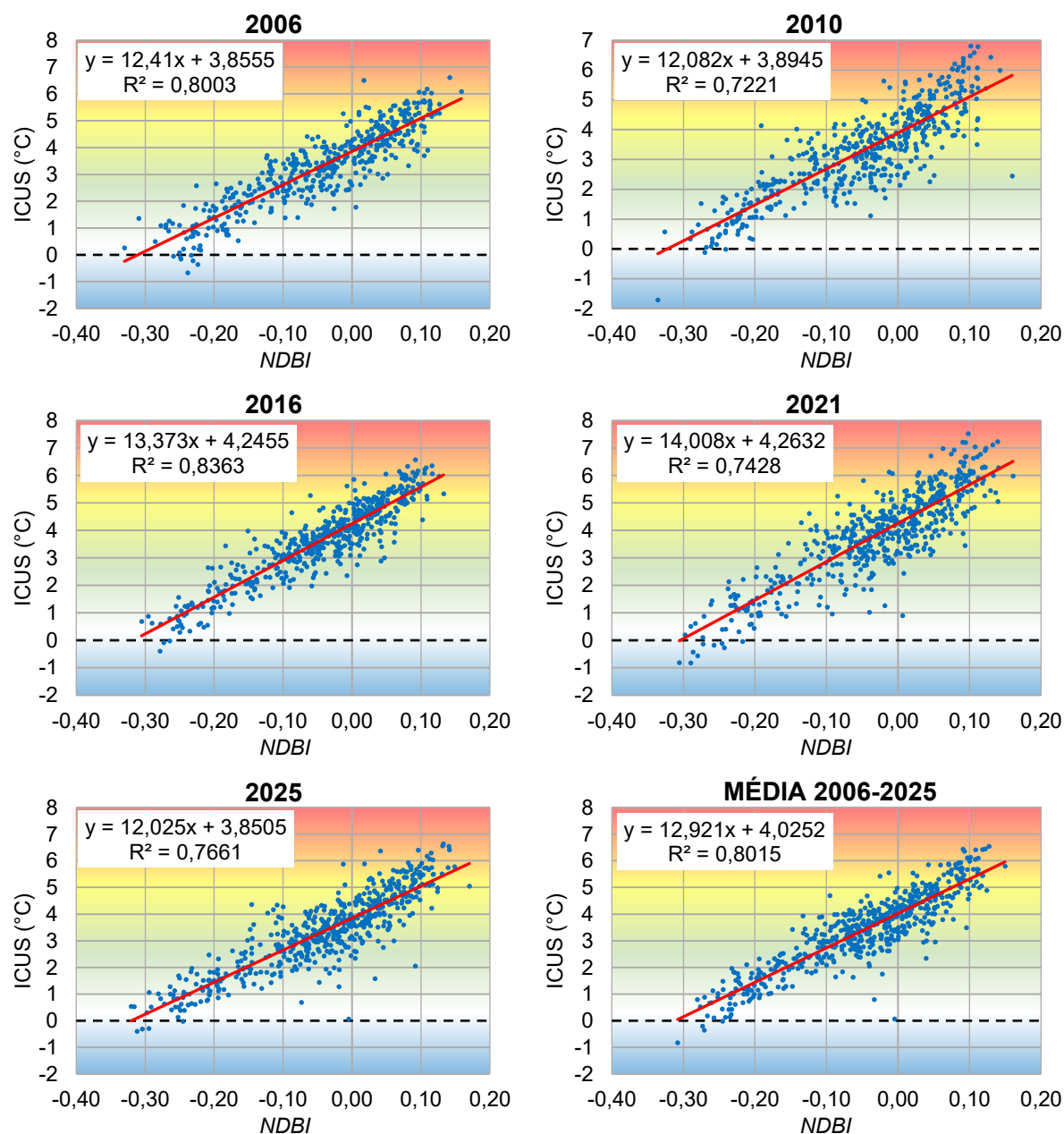
| Índice      | Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) |      |      |      |      | Média |
|-------------|----------------------------------------------|------|------|------|------|-------|
|             | 2006                                         | 2010 | 2016 | 2021 | 2025 |       |
| <i>NDBI</i> | 0,89                                         | 0,85 | 0,91 | 0,86 | 0,88 | 0,90  |

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à regressão linear, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que os valores médios desse índice conseguiram explicar 80,1% da variação das intensidades médias das ICUS nos bairros, superior aos valores apresentados pelos índices de vegetação (Figura 36). A relação entre as variáveis é positiva, em que o aumento de 0,311 nesse índice está relacionado a um aumento de 1°C na intensidade das ICUS. Esse índice consegue explicar a variação da intensidade média das ICUS nos bairros entre 72,2% e 83,6%, atingindo a esses dois valores em 2010 e 2016, respectivamente.

Estudos em outras cidades analisaram a relação entre o índice *NDBI* e as TST através do coeficiente ( $r$ ) de Pearson, demonstrando maiores correlações em relação aos índices de vegetação. Guha *et al.* (2018) registraram uma correlação ( $r$ ) de 0,71 e 0,61 nas cidades de Florença e Nápoles, na Itália, superando a correlação obtida com o índice *NDVI* para Nápoles (-0,71 e -0,57, respectivamente). Liu e Zhang (2011) registraram um coeficiente de correlação ( $r$ ) de 0,71 para o índice *NDBI* na cidade de Hong Kong, China, mostrando uma relação mais forte com o índice *NDVI* (-0,41). Em um estudo realizado na cidade de Melbourne, Austrália, Jamei, Rajagopalan e Sun (2019) identificaram uma relação mais forte entre as TST e o índice *NDBI*, em comparação com o *NDVI*, mostrando um comportamento mais estável em relação à sazonalidade.

Figura 36 – Regressão linear dos valores médios de *NDBI* e intensidade das ICUS nos bairros.



Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, as precipitações desempenham um papel menor na capacidade de resfriamento em áreas urbanas com maior densidade construtiva, onde predominam superfícies mais compactas e impermeáveis sobre as áreas vegetadas, reduzindo o potencial evaporativo. Além disso, conforme mencionado anteriormente, a correlação entre os índices de vegetação e as TST diminui à medida que as áreas vegetadas se reduzem, aumentando a correlação com o índice *NDBI* conforme as áreas urbanizadas se expandem. Isso sugere que o índice *NDBI* é mais apropriado para a previsão das TST em contextos urbanos, onde as superfícies urbanizadas

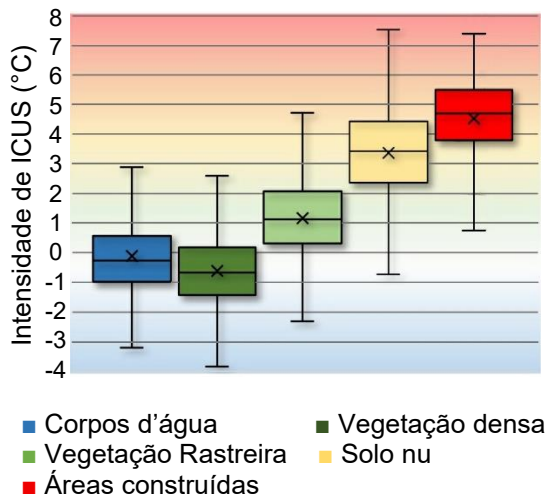
predominam sobre as vegetadas.

Como evidenciado nas análises anteriores, diferentes usos e coberturas do solo apresentam intensidades de ICUS contrastantes, associadas às suas características materiais. Superfícies associadas a áreas construídas apresentam as maiores intensidades de ICUS, enquanto áreas com vegetação densa apresentam as menores (Tabela 22 e Figura 37).

Tabela 22 - Intensidades das ICUS de acordo a classes de uso e cobertura do solo, 2006-2025.

| Medida       | Corpos d'água | Vegetação densa | Vegetação rasteira | Solo nu     | Áreas construídas |
|--------------|---------------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------|
| <b>Média</b> | <b>-0,12</b>  | <b>-0,62</b>    | <b>1,16</b>        | <b>3,38</b> | <b>4,54</b>       |
| Mediana      | -0,27         | -0,68           | 1,12               | 3,42        | 4,66              |
| 1er. Quartil | -0,98         | -1,43           | 0,32               | 2,37        | 3,85              |
| 3er. Quartil | 0,56          | 0,17            | 2,08               | 4,43        | 5,39              |
| Mínimo       | -3,21         | -3,84           | -2,32              | -0,73       | 0,73              |
| Máximo       | 2,88          | 2,58            | 4,72               | 7,53        | 7,35              |
| Amplitude    | 6,09          | 6,42            | 7,04               | 8,26        | 6,61              |

Figura 37 - Intensidades das ICUS de acordo a classes de uso e cobertura do solo, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

Para o período de estudo, as superfícies construídas apresentam uma intensidade média de 4,54°C, com mínimos e máximos que oscilam entre 0,73 e 7,35°C; seguidas por áreas de solo nu, que registram uma intensidade média de 3,38°C, com mínimos e máximos que superam as áreas construídas, entre -0,73 e 7,53°C. As áreas de vegetação densa, caracterizadas pela presença de arborização, apresentam a menor intensidade média, atingindo -0,62°C, com mínimas e máximas de -3,84 e 2,58°C.

Os corpos d'água apresentam um comportamento semelhante ao das áreas de vegetação densa, registrando uma intensidade média de -0,27°C, com um mínimo de -3,21°C e um máximo de 2,88°C. As áreas de vegetação rasteira apresentam intensidades intermediárias, situadas entre as áreas de vegetação densa e o solo nu. Com uma intensidade média de 1,16°C, essas áreas podem atingir intensidades máxima e mínimas entre 4,72 e -2,32°C. Das 5 classes analisadas, os solos nus têm

a maior amplitude, registrando uma variação de 8,26°C, atingindo intensidades ainda mais altas do que as áreas construídas.

Nesse sentido, é possível estabelecer uma relação entre o comportamento das intensidades das ICUS (Figura 19) e as classes de uso e cobertura do solo associadas à vegetação (Figura 29) no perímetro urbano. As intensidades associadas a ilhas de frescor ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) apresentaram reduções entre 2006 e 2016, registrando posteriormente aumentos até 2025, comportamento semelhante ao apresentado pelas classes de vegetação densa para o período. Em relação às intensidades fracas ( $0 - 2^{\circ}\text{C}$ ), estas tiveram uma redução geral durante o período, apresentando seu valor mais baixo para 2021, comportamento semelhante ao apresentado pela classe de vegetação rasteira.

De acordo com Oke *et al.* (2017), os diferentes tecidos que compõem as frações de cobertura são de especial relevância para a distribuição do calor. Enquanto as zonas secas aquecem mais em um dia ensolarado, por não conseguirem eliminar a energia por meio da evaporação, as zonas com vegetação permanecem relativamente frescas, ao evaporar a água presente nos solos e nas plantas por meio da energia solar.

Como evidenciado em vários estudos, áreas construídas e solos nus apresentam as maiores TST em relação a áreas vegetadas e corpos d'água (Andrade; Amorim, 2023; Deng *et al.*, 2018; Guha *et al.*, 2018; Sahana; Ahmed; Sajjad, 2016). Na cidade de Presidente Prudente – SP, Andrade e Amorim (2023) registraram intensidades de ICUS de 7 a 13°C em zonas do centro da cidade com pouca vegetação, em contraste com coberturas de vegetação arbórea de Mata Ciliar associadas a cursos d'água, que apresentaram intensidades de 3 a 5°C no período chuvoso e de 5 a 8°C no período seco.

Em relação à capacidade de resfriamento da vegetação, é importante diferenciar a vegetação densa, composta principalmente por árvores, da vegetação rasteira, composta por arbustos e gramíneas.

As copas tridimensionais das árvores permitem uma maior capacidade de evapotranspiração, além de produzirem sombreamento que reduz a radiação recebida pelas superfícies abaixo delas, mantendo níveis mais elevados de umidade. Os gramados e arbustos têm uma superfície mais plana e menor capacidade de evapotranspiração, limitando sua capacidade de resfriamento (Hu; Dai; Guldman, 2021; Lin *et al.*, 2012; Sodoudi *et al.*, 2018).

Em relação ao comportamento sazonal, as precipitações têm um impacto maior sobre o efeito de resfriamento das áreas com vegetação rasteira, em contraste com as áreas arborizadas. A forte relação entre as áreas de vegetação rasteira e as precipitações pode ser explicada pelo principal mecanismo de resfriamento dessas áreas, determinado pela evapotranspiração, que depende em grande medida do abastecimento de água, especialmente em zonas secas. Além disso, o abastecimento de água está relacionado com as condições de crescimento desses tipos de cobertura vegetal, o que se reflete no comportamento dos valores do *NDVI* e, conseqüentemente, nos efeitos de resfriamento (Oliveira; Andrade; Vaz, 2011; Sahana; Ahmed; Sajjad, 2016; Wang *et al.*, 2016).

Nesse sentido, a arborização oferece uma capacidade de resfriamento mais estável ao longo do ano, em comparação com a vegetação rasteira. Além disso, o clima de Goiânia, caracterizado por uma estação seca com pouca precipitação, altas temperaturas do ar e baixa umidade relativa, condiciona em grande medida a capacidade de resfriamento das áreas com vegetação rasteira, nos meses do ano em que se registram as maiores temperaturas e incidências de ondas de calor.

Em resumo, as mudanças na cobertura e no uso do solo modificam o equilíbrio energético superficial, produzindo alterações no comportamento térmico, inerente às características das superfícies. As transições entre as diferentes categorias de cobertura geram aumentos ou diminuições nas intensidades das ICUS, determinadas pelas TST. Em consonância com os resultados obtidos por Sahana, Ahmed e Sajjad (2016), os maiores aumentos nas intensidades das ICUS (TST no caso do estudo mencionado) são representados por transições de vegetação para áreas construídas, enquanto as transições de áreas construídas para áreas naturais, sejam corpos d'água ou vegetação, representam as maiores diminuições.

Na presente pesquisa, a identificação dos tipos de usos e coberturas do solo, permite delinear os principais fatores que determinam o comportamento das ICUS em cada etapa do desenvolvimento urbano, alcançando uma compreensão integral dos impactos do processo de urbanização sobre o campo térmico da cidade de Goiânia.

### **3.2 Mesoescala**

Dos 556 bairros estudados dentro do perímetro urbano, 180 apresentam reduções nas intensidades das ICUS. Nesses bairros, foram identificados elementos como tipo de bairro, ocupação urbana, mudanças de solo ou a cobertura vegetal,

associações a APP, APA, UC e Parques, assim como outros fatores que interagem com a cobertura arbórea, produzindo diferentes resultados no comportamento das intensidades das ICUS.

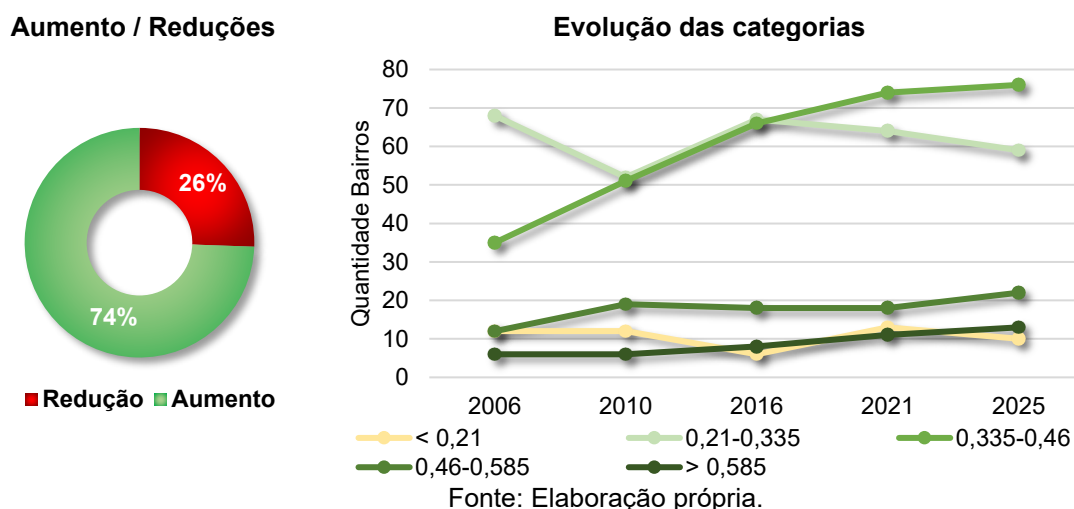
### 3.2.1 Comportamento geral das variáveis de estudo

Dos 180 bairros que registram reduções em suas intensidades de ICUS durante o período, 134 apresentam aumentos no índice *NDVI* (74%) e 149 no *SAVI* (83%), com aumentos e reduções entre 0,168 a -0,075 e 0,118 a -0,044, respectivamente.

Os bairros analisados registram um aumento médio geral no índice *NDVI* de 15,4% durante o período, passando de 0,323 para 0,373.

A maior proporção dos bairros apresenta níveis entre 0,21 a 0,46, sendo que a categoria entre 0,335-0,46 é a que registra o maior aumento, equivalente a 117%; em contraste com os níveis entre 0,21-0,335, que registram uma queda de 13% (Figura 38). Bairros com níveis entre 0,46-0,585 e superiores a 0,585 representam uma pequena proporção, registrando aumentos de 83% e 116%, este último superando a aqueles com valores inferiores a 0,21. Os bairros com os níveis mais baixos, inferiores a 0,21, registram uma queda de 16%, representando a menor proporção dos bairros no 2025.

Figura 38 - Comportamento geral do índice *NDVI* nos bairros com reduções de intensidades das ICUS 2006-2025.

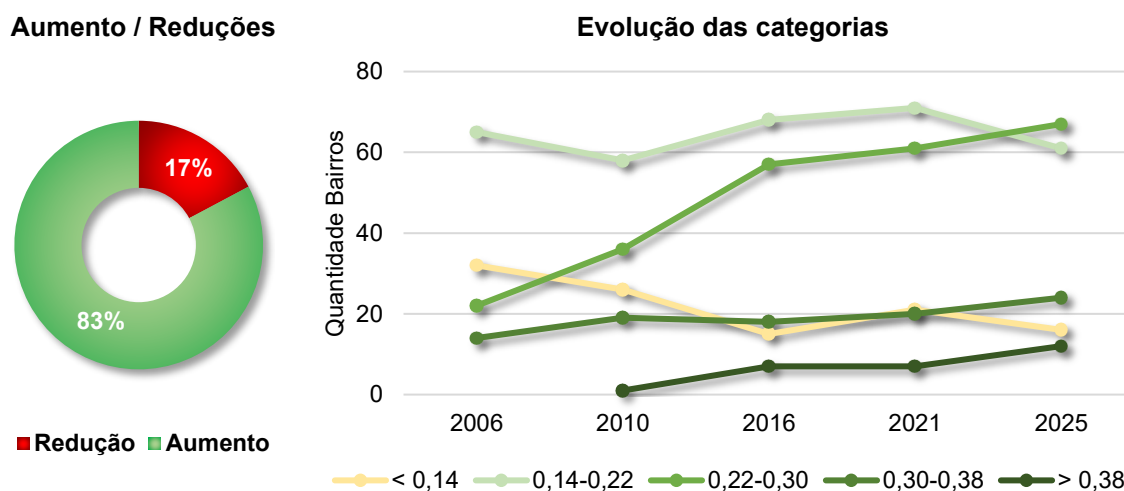


Em relação ao índice *SAVI*, os bairros experimentam um aumento geral de 24,8%, passando de 0,192 para 0,239.



Tal como no índice *NDVI*, a maior proporção dos bairros corresponde a níveis intermédios e baixos, com valores médios entre 0,14 e 0,30 (Figura 39).

Figura 39 - Comportamento geral do índice *SAVI* nos bairros com reduções de intensidades das ICUS 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

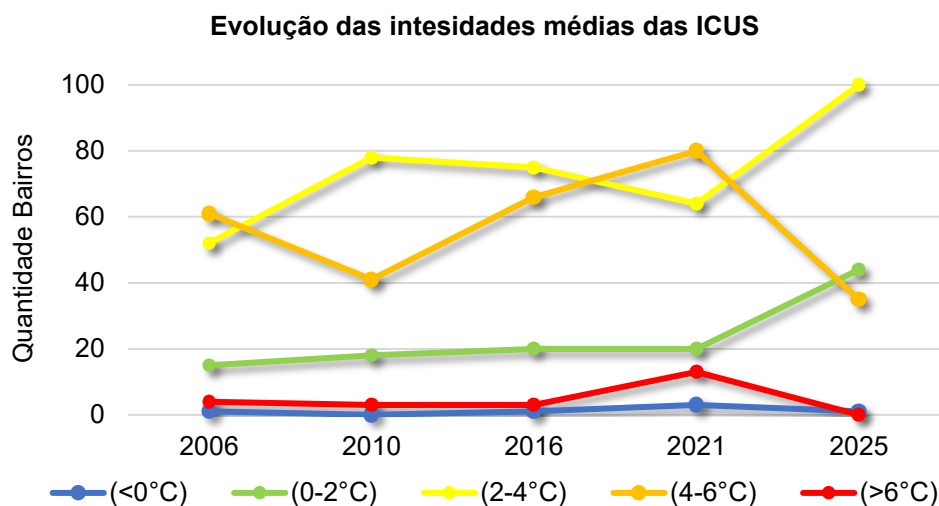
Os bairros com valores entre 0,22 e 0,30 representam a maior proporção para 2025, experimentando um aumento de 204% e deslocando aqueles com níveis inferiores a 0,14 e entre 0,14 e 0,22, sendo este último o nível que representava a maior proporção dos bairros em 2006 (Figura 43). Os bairros com níveis inferiores a 0,14 experimentam o maior declínio, equivalente a 50%, seguidos por aqueles com valores baixos entre 0,14 e 0,22, que se reduzem em 6,1%. Os níveis mais altos, entre 0,30-0,38 e superiores a 0,38, experimentaram grandes aumentos equivalentes a 71,4 e 1100% durante o período, representando as menores proporções do total.

Com relação ao comportamento das intensidades médias das ICUS, durante o período esses bairros experimentam um declínio geral de 22%, passando de 3,87 para 2,99°C.

Os bairros com intensidades entre 2 e 4°C representam a maior proporção. Aqueles com intensidades moderadas (2-4°C) registram um aumento de 92% durante o período, deslocando os fortes (4-6°C), que registram uma redução de 42% (Figura 40). Os bairros com intensidades fracas (0-2°C) apresentam o maior aumento durante o período, equivalente a 193%, superando até mesmo em proporção os fortes para 2025. A maior redução é apresentada pelos bairros com intensidades muito fortes (>6°C), reduzindo-se em 100% durante o período. Os bairros com intensidades

equivalentes a ilhas de frescor ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) não apresentam variação geral durante o período, experimentando um aumento em 2021 e, em seguida, um declínio em 2025.

Figura 40 - Comportamento geral das intensidades das ICUS nos bairros com reduções 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria.

De um modo geral, observa-se um aumento substancial das intensidades de ICUS fortes e muito fortes durante o ano de 2021, associadas a uma redução dos níveis *NDVI* e *SAVI* dos bairros analisados. Este comportamento é semelhante ao apresentado no perímetro urbano, onde se registam reduções dos índices de vegetação durante 2021, em contraste com o aumento do índice *NDBI*. Possíveis associações podem ser feitas com o aumento da cobertura de solo nu, que atinge seu máximo nos anos de 2006 e 2021, sendo este último o ano em que se registam as maiores intensidades de ICUS dentro do perímetro urbano.

Com relação ao aumento dos índices de vegetação, ambos mostram um aumento das classes intermediárias em detrimento das baixas, registrando as maiores quedas nos bairros com os valores mais baixos dos índices. Os níveis altos dos índices apresentam grandes aumentos, porém, ocupam uma proporção menor do que os níveis intermediários, que representam a maior proporção para 2025. Dessa forma, observa-se um aumento geral dos níveis de vegetação nos bairros que apresentam reduções nas intensidades do ICUS, deslocando em maior proporção os bairros com níveis baixos de vegetação para os intermediários.

### 3.2.2 Cobertura arbórea e elementos relacionados

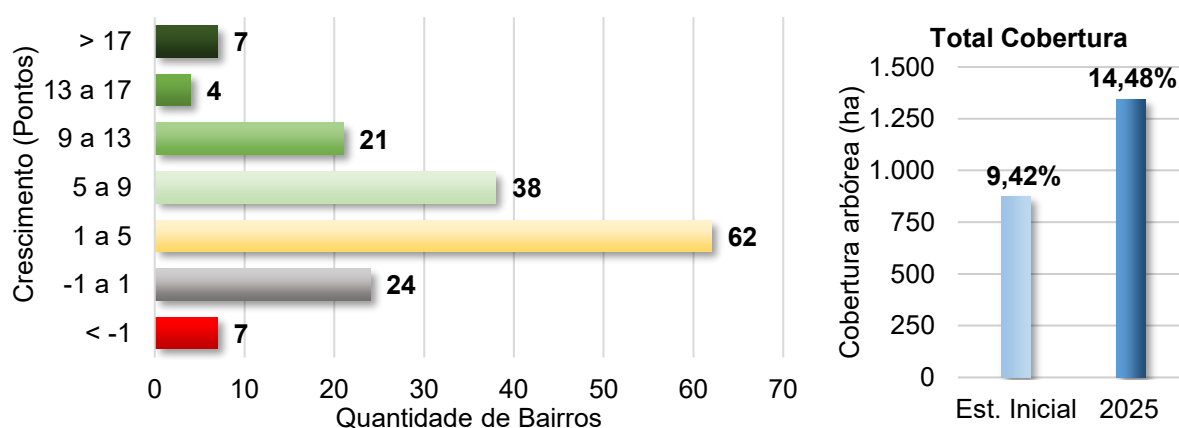
A estimativa da cobertura arbórea abrangeu 163 dos 180 bairros que registaram reduções nas ICUS, tendo sido excluídas as áreas de uso não residencial e as chácaras. Por meio dos procedimentos descritos na metodologia, foi amostrada uma área equivalente ao 43% dos bairros, discriminando a cobertura em dois tipos:

1. Arborização pertencente a Áreas de Preservação Permanente (APP), Áreas de Proteção Ambiental (APA), Unidades de Conservação (UC) e parques.
2. Arborização pertencente a lotes, quadras e áreas adjacentes, fora dos perímetros das APP, APA, UC e parques.

A cobertura arbórea total dos 163 bairros analisados registou um crescimento de 5,06% pontos percentuais, passando de 9,42% para 14,48%, o que equivale a um aumento relativo de 53,71% (Figura 41).

A maior proporção dos bairros analisados registou um crescimento da cobertura de entre 1 a 5 pontos (62 bairros), seguida por aumentos entre 5 a 9 pontos (38 bairros) e bairros sem crescimento (24 bairros), cujos aumentos ou diminuições não ultrapassam 1 ponto. 21 bairros apresentam crescimentos entre 9 a 13 pontos, seguidos por aqueles com aumentos superiores a 17 pontos e pelos que registraram supressão de arborização, formado por 7 bairros cada. Em menor proporção (4 bairros) encontram-se aqueles com aumento entre 13 e 17 pontos.

Figura 41 - Crescimento da cobertura arbórea nos bairros com reduções de intensidades das ICUS (excluindo chácaras e uso não residencial)

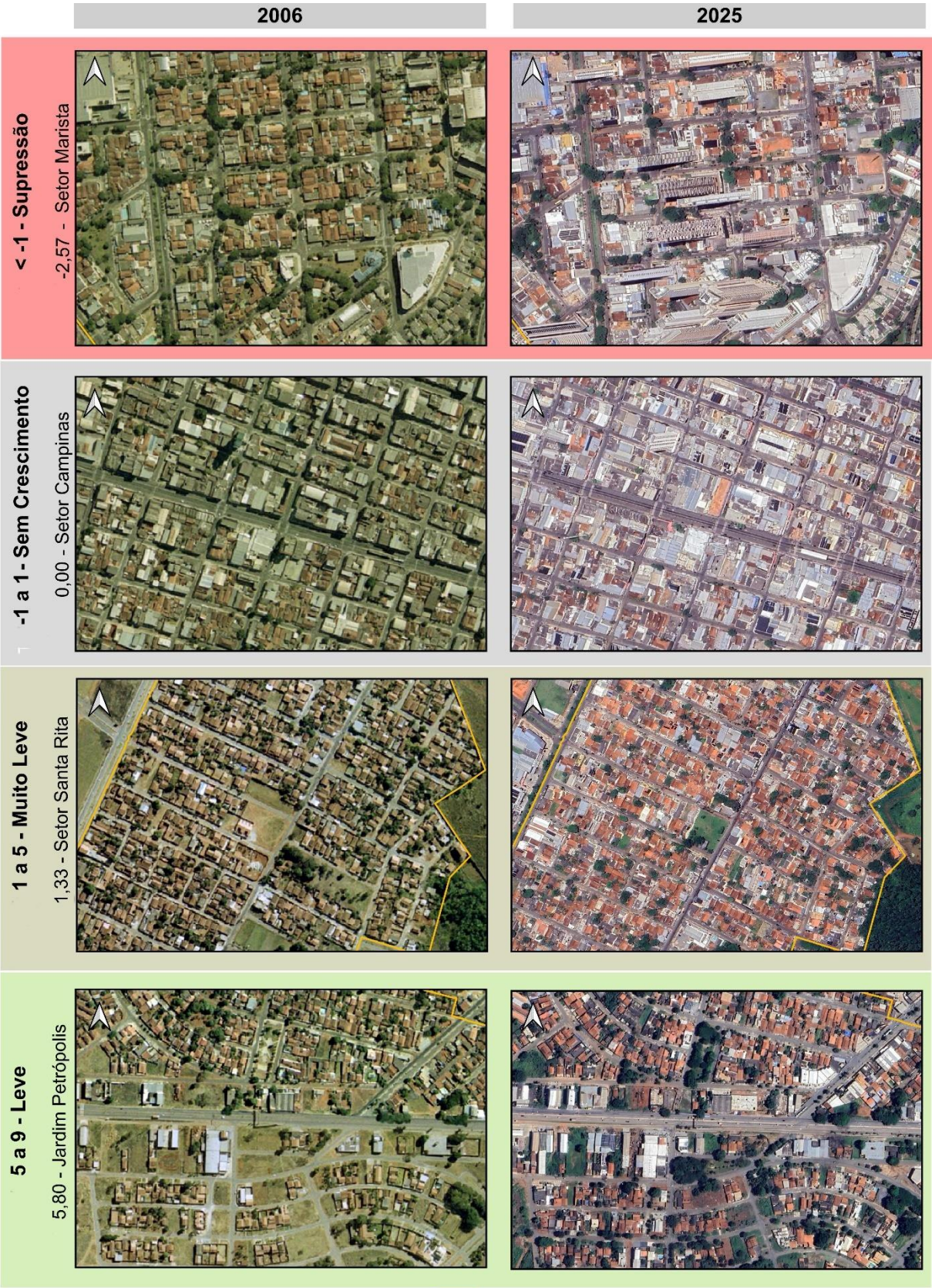


Fonte: Elaboração própria.

A figura 42 mostra exemplos para cada categoria de crescimento da arborização urbana identificada nos bairros analisados. O mapa 11, no final desta secção, apresenta a localização dos bairros utilizados como exemplo.



Figura 42 - Exemplos de crescimento da cobertura arbórea, 2006-2025 (Continua)



SRC Sirgas 2000 - UTM Zoma 22S - ESPG:31982     Divisa Bairros 1:10.000    0 100 200 300 m

Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025) e Google (2025).



Figura 47 - Exemplos de crescimento da cobertura arbórea, 2006-2025 (Continuação)

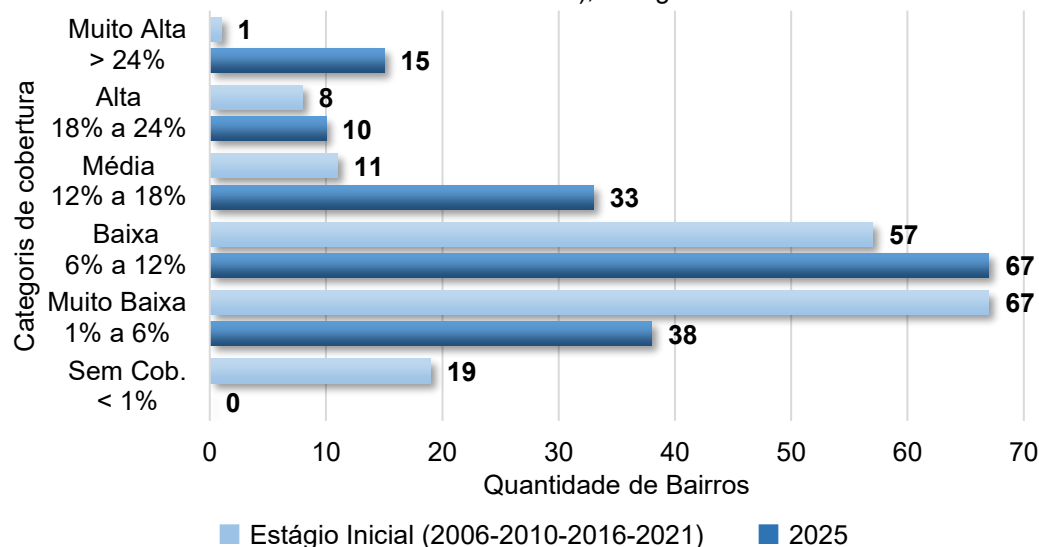


SRC Sirgas 2000 - UTM Zoma 22S - ESPG:31982  Divisa Bairros 1:10.000 0 100 200 300 m

Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025) e Google (2025).

Em relação ao comportamento da cobertura arbórea, em seu estágio inicial, a maior proporção dos bairros analisados apresentava cobertura entre 1 e 6% (41% dos bairros) (Figura 43). Bairros com cobertura entre 1 e 6% (Muito Baixa) constituíam 67 unidades, seguidos por 57 bairros com valores entre 6 e 12% (Baixa) e 19 com valores inferiores a 1% (Sem Cobertura). O intervalo entre 12 e 18% (Média) compreendia 11 bairros, enquanto 8 apresentavam cobertura entre 18 e 24% (Alta). Apenas um bairro registrou cobertura arbórea superior a 24% (Muito Alta).

Figura 43 – Cobertura arbórea nos bairros com reduções das intensidades de ICUS (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025



Fonte: Elaboração própria

Até 2025, os bairros com taxas de cobertura entre 6% e 12% (Baixa) aumentam 18%, representando a maior proporção (41%) e totalizando 67 bairros. Os bairros com cobertura entre 1% e 6% (Muito Baixa) diminuem 43%, totalizando 38 bairros, assim como aqueles com cobertura inferior a 1% (Sem Cobertura), desaparecem por completo. Os bairros com coberturas entre 12% e 18%, 18% e 24% e superiores a 24% apresentam aumentos, compostos por 33, 10 e 15 bairros, respetivamente, sendo estes últimos os que registam o maior aumento relativo.

A figura 44 mostra exemplos das categorias de cobertura arbórea identificadas nos 163 bairros analisados.

No que diz respeito à relação entre as intensidades médias das ICUS e o crescimento da cobertura arbórea, os bairros não apresentam uma relação linear, sendo que aqueles com crescimento entre 5 e 9% pontos (Leve) são os que apresentam a maior redução média (Tabela 23 e Figura 45).

Os bairros com crescimento leve (5 a 9% pontos) e sem crescimento apresentam as maiores reduções médias, equivalentes a  $-0,88^{\circ}\text{C}$  e  $-0,87^{\circ}\text{C}$ , respetivamente, registando um máximo de  $-3,34^{\circ}\text{C}$  e  $-2,84^{\circ}\text{C}$  durante o período de estudo. Os bairros com crescimento médio (9 a 13% pontos) e com supressão ( $< -1\%$  ponto) registam reduções médias de  $-0,69^{\circ}\text{C}$ , seguidos dos que apresentam crescimento leve (5 a 9%), com reduções médias de  $-0,64^{\circ}\text{C}$ . Os bairros com crescimento muito alto ( $> 17\%$ ) e alto (13 a 17%) registam as menores reduções, equivalentes a  $-0,30^{\circ}\text{C}$  e  $-0,19^{\circ}\text{C}$ , respetivamente.



Figura 44 - Exemplos de categorias de cobertura arbórea identificada nos bairros.



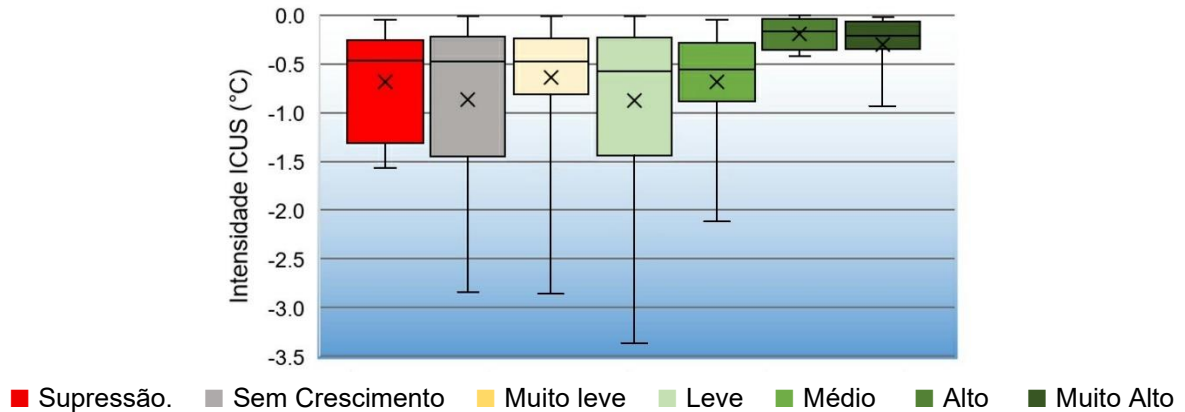
Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025) e Google (2025).

Tabela 23 - Reduções médias de intensidades das ICUS de acordo ao crescimento da cobertura arbórea nos bairros (excluindo chácaras e uso não residencial), Estagio Inicial – 2025

| Crescimento da cobertura arbórea nos bairros (pontos percentuais) |                   |                      |                     |               |                 |                 |                    |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Medida                                                            | Supressão<br>< -1 | Sem Cresc.<br>-1 a 1 | Muito Leve<br>1 a 5 | Leve<br>5 a 9 | Médio<br>9 a 13 | Alto<br>13 a 17 | Muito Alto<br>> 17 |
| Média                                                             | -0,69             | -0,87                | -0,64               | -0,88         | -0,69           | -0,19           | -0,30              |
| 1ro. Quart.                                                       | -1,31             | -1,45                | -0,81               | -1,44         | -0,88           | -0,36           | -0,35              |
| 3ro. Quart.                                                       | -0,26             | -0,22                | -0,24               | -0,23         | -0,28           | -0,04           | -0,07              |
| Mín.                                                              | -1,56             | -2,84                | -2,86               | -3,34         | -2,12           | -0,42           | -0,93              |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 - Reduções médias de intensidades das ICUS de acordo ao crescimento da cobertura arbórea nos bairros (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025



Nota: O gráfico inclui valores discrepantes (*outliers*). Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar o comportamento das intensidades das ICUS em função da cobertura arbórea (Tabela 24 e Figura 46), durante o estágio inicial e em 2025, observa-se de um modo geral, que os bairros com menor cobertura registam intensidades mais elevadas; no entanto, é possível identificar uma discrepância na categoria entre 1 e 6% (Muito Baixa).

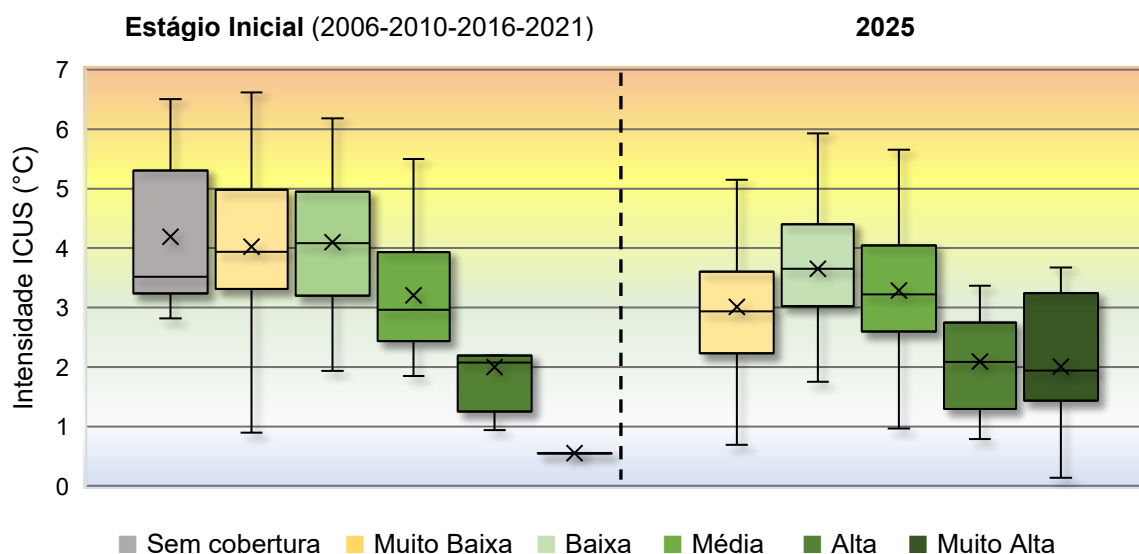
Tabela 24 - Comparação de intensidades médias das ICUS nos bairros, de acordo a cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025

| Densidade Arborização Urb.   | Medida       | ICUS (°C)    |             |
|------------------------------|--------------|--------------|-------------|
|                              |              | Est. Inicial | 2025        |
| <b>Sem Cobertura</b><br>< 1% | <b>Média</b> | <b>4,19</b>  | -           |
|                              | 1ro. Quart.  | 3,24         | -           |
|                              | 3ro. Quart.  | 5,30         | -           |
| <b>Muito Baixa</b><br>1 a 6% | <b>Média</b> | <b>4,02</b>  | <b>3,01</b> |
|                              | 1ro. Quart.  | 3,31         | 2,23        |
|                              | 3ro. Quart.  | 4,98         | 3,60        |
| <b>Baixa</b><br>6 a 12%      | <b>Média</b> | <b>4,10</b>  | <b>3,65</b> |
|                              | 1ro. Quart.  | 3,20         | 3,02        |
|                              | 3ro. Quart.  | 4,95         | 4,40        |
| <b>Média</b><br>12 a 18%     | <b>Média</b> | <b>3,21</b>  | <b>3,29</b> |
|                              | 1ro. Quart.  | 2,44         | 2,60        |
|                              | 3ro. Quart.  | 3,93         | 4,04        |
| <b>Alta</b><br>18 a 24%      | <b>Média</b> | <b>2,00</b>  | <b>2,09</b> |
|                              | 1ro. Quart.  | 1,25         | 1,29        |
|                              | 3ro. Quart.  | 2,19         | 2,75        |
| <b>Muito Alta</b><br>> 24%   | <b>Média</b> | <b>0,55</b>  | <b>2,00</b> |
|                              | 1ro. Quart.  | N/A          | 1,43        |
|                              | 3ro. Quart.  | N/A          | 3,25        |

Fonte: Elaboração própria.



Figura 46 - Comparação de intensidades médias das ICUS nos bairros, de acordo a cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025



Fonte: Elaboração própria.

Em seu estágio inicial, os bairros com cobertura muito baixa (1 a 6% = 4,02°C) apresentam intensidades inferiores às dos que têm cobertura baixa (6 a 12% = 4,10°C), situação que se repete em 2025 entre as mesmas categorias de cobertura (1 a 6% = 3,01°C vs. 6 a 12% = 3,65°C). A partir de coberturas superiores a 6%, identifica-se uma relação linear, na qual as intensidades diminuem à medida que a cobertura arbórea aumenta. Os bairros sem cobertura (< -1%), presentes apenas no estágio inicial, apresentam as intensidades mais elevadas (4,19°C), enquanto aqueles com coberturas superiores a 24% apresentam as mais baixas (Fase Inicial = 0,55°C / 2025 = 2,00°C).

Do ponto de vista da implantação da arborização urbana, durante a análise foram identificadas diferentes formas de inserção, tendo sido classificadas em 5 tipos:

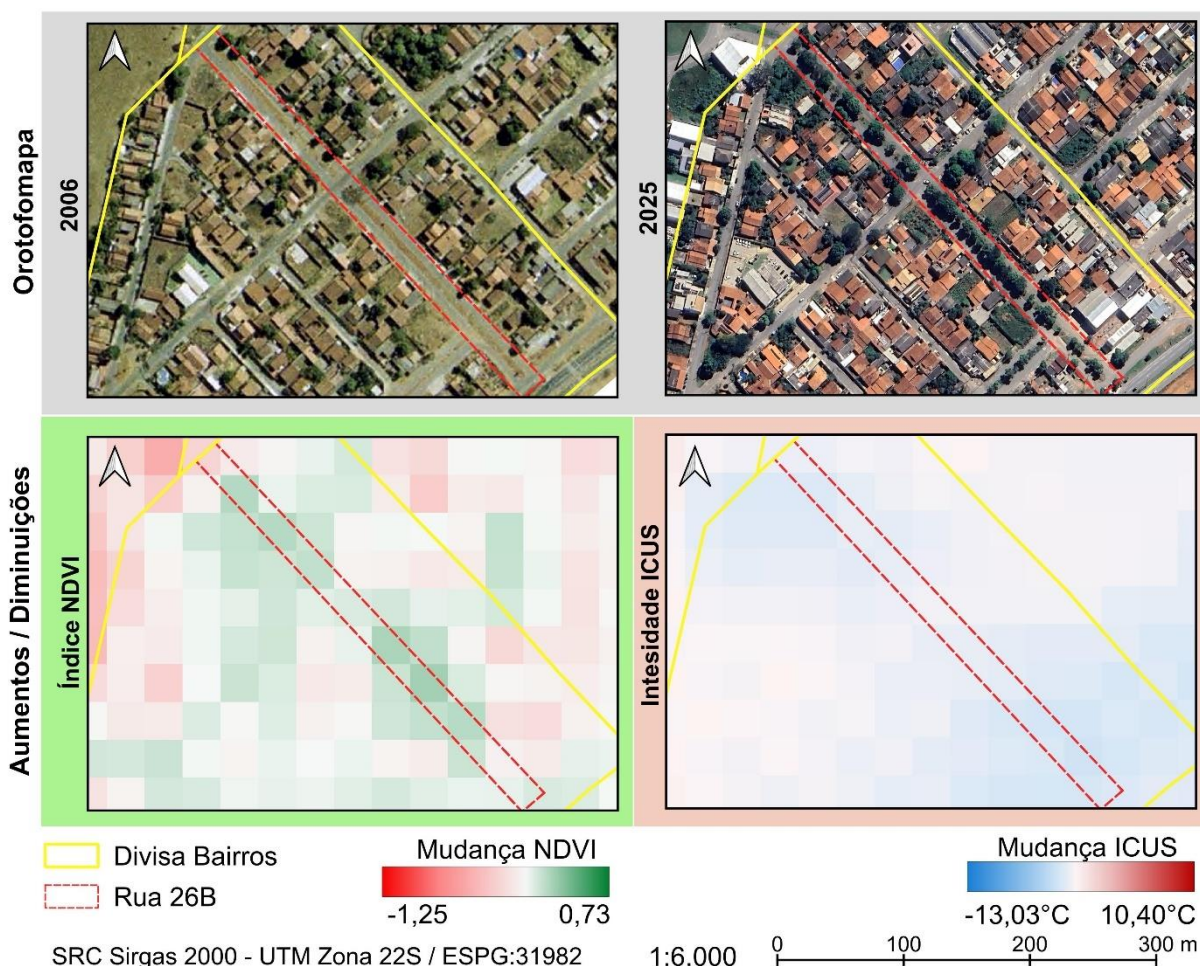
#### Canteiros centrais e elementos viários

Em diversas ruas e avenidas, foram observados aumentos na cobertura arbórea, através do plantio em canteiros centrais, rotatórias e elementos de divisão viária. Por meio do aumento da cobertura arbórea nestes elementos viários, verificam-se reduções nas intensidades das ICUS, que se tornam mais evidentes em zonas onde a cobertura arbórea começa a cobrir a maior parte das faixas de rolamento.

Um exemplo do aumento da cobertura arbórea identificada é a Rua 26B, localizada no Setor Garavelo. Na Figura 47 é possível identificar o crescimento da cobertura arbórea na rua entre os anos de 2006 e 2025, resultando em aumentos no

índice *NDVI* de até 0,24, bem como reduções das intensidades das ICUS de até  $0,85^{\circ}\text{C}$ , ao nível do *pixel*. As alterações na cobertura do solo em lotes vazios ao redor da rua, bem como as coberturas refletivas em telhados (a sul da rua), têm implicações na leitura das variáveis.

Figura 47 – Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em canteiros centrais – Setor Garavelo.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

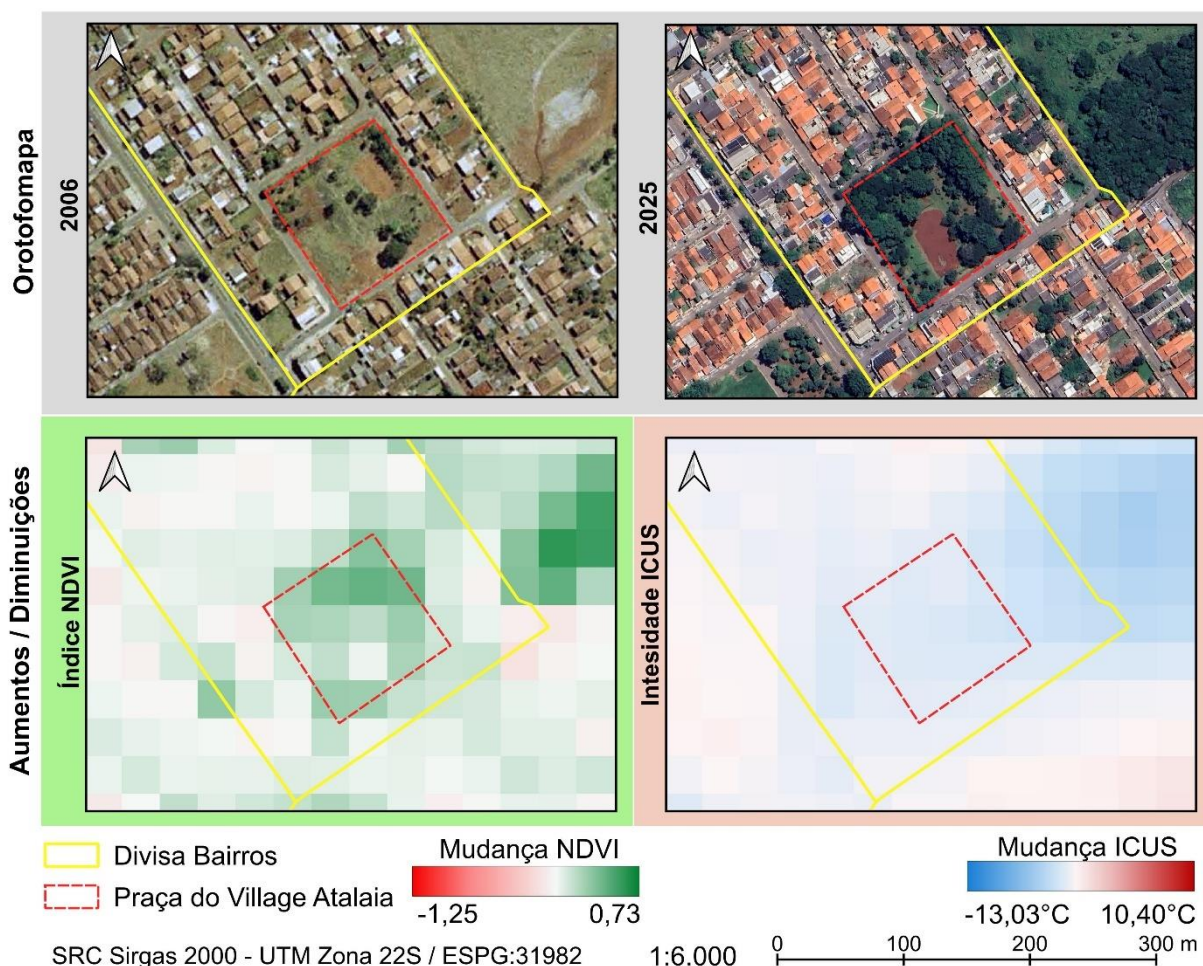
## Praças

Outra forma identificada de implantação de arborização urbana é por meio de praças. Múltiplas praças estão inseridas no tecido urbano dos bairros analisados, contribuindo para a redução das intensidades das ICUS, na medida em que apresentam maior cobertura arbórea.

Um exemplo do crescimento da arborização urbana nesses espaços é a praça do Village Atalia, localizada ao sul do bairro Residencial Atalia (Figura 48). Essa praça apresenta um forte crescimento de arborização densa entre 2006 e 2025, com

aumentos no índice *NDVI* de até 0,43, bem como reduções nas intensidades de até -1,42°C, ao nível do *pixel*. Além disso, é possível identificar fortes aumentos no índice *NDVI* a leste, fora dos limites do bairro, o que implica em fortes reduções nas intensidades, resultado da transformação de solo nu em arborização densa.

Figura 48 – Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em praças – Res. Atalaia.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

### Quadras destinadas a equipamentos urbanos

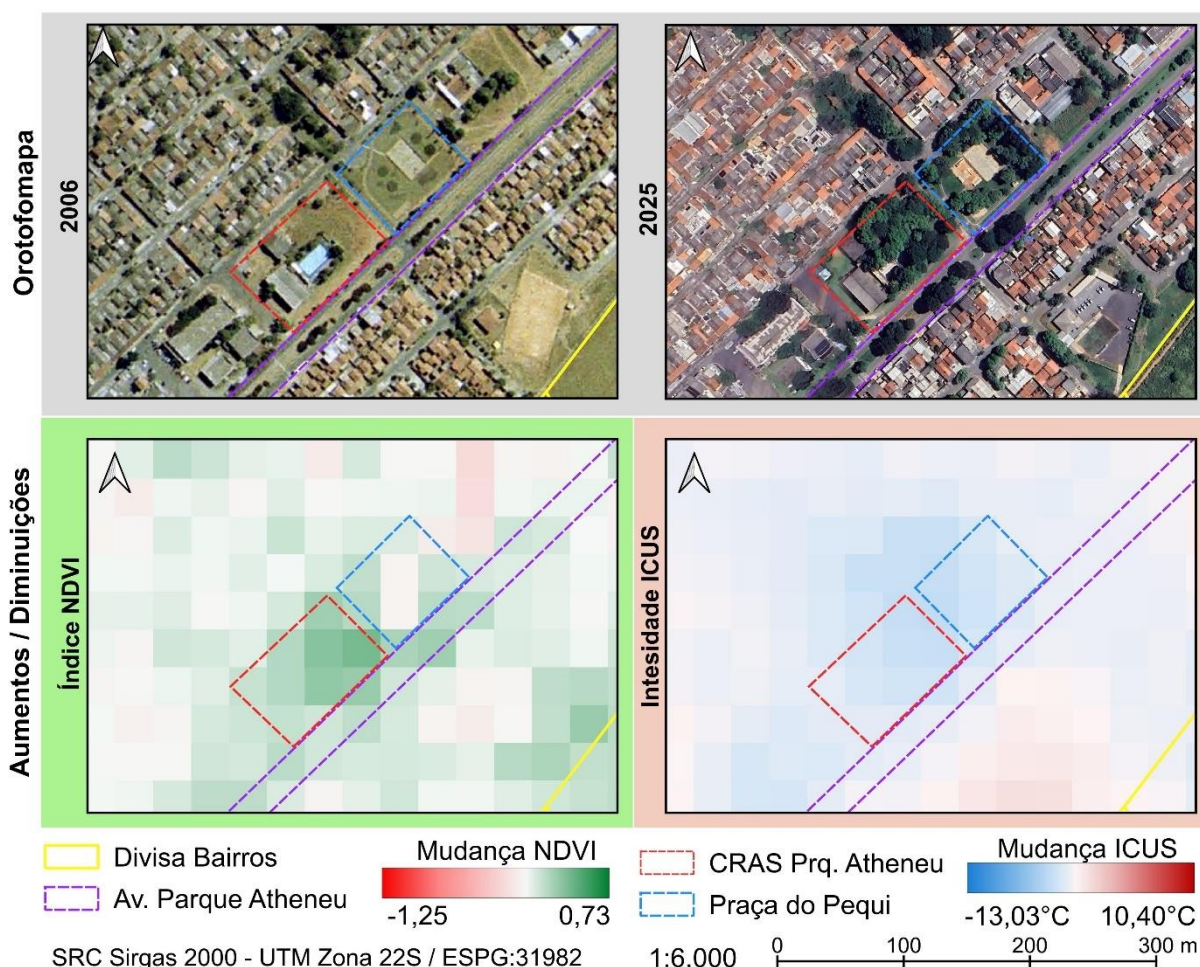
Principalmente localizados em bairros residenciais, foram observados aumentos na arborização urbana em quadras destinadas a equipamentos urbanos, compostos por instituições de ensino, saúde e esportes, cujo aumento na cobertura arbórea contribui para a redução das intensidades das ICUS.

Como exemplo, o Centro de Referência de Assistência Social (CRAS) Parque Atheneu, localizado no bairro Parque Atheneu, apresenta um grande aumento na cobertura arbórea entre 2006 e 2025 (Figura 49). Esse aumento se traduz em



incrementos no índice *NDVI* de até 0,37, bem como em reduções de intensidade de até  $-1,98^{\circ}\text{C}$ , ao nível do *pixel*. Além disso, podem ser identificados aumentos na cobertura da Praça do Pequi e da Av. Parque Atheneu, adjacentes ao CRAS Parque Atheneu, apresentando reduções de intensidades de até  $-1,98^{\circ}\text{C}$  e  $-0,78^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, ao nível do *pixel*.

Figura 49 – Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em quadras de equipamento urbano – Bairro Parque Atheneu.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

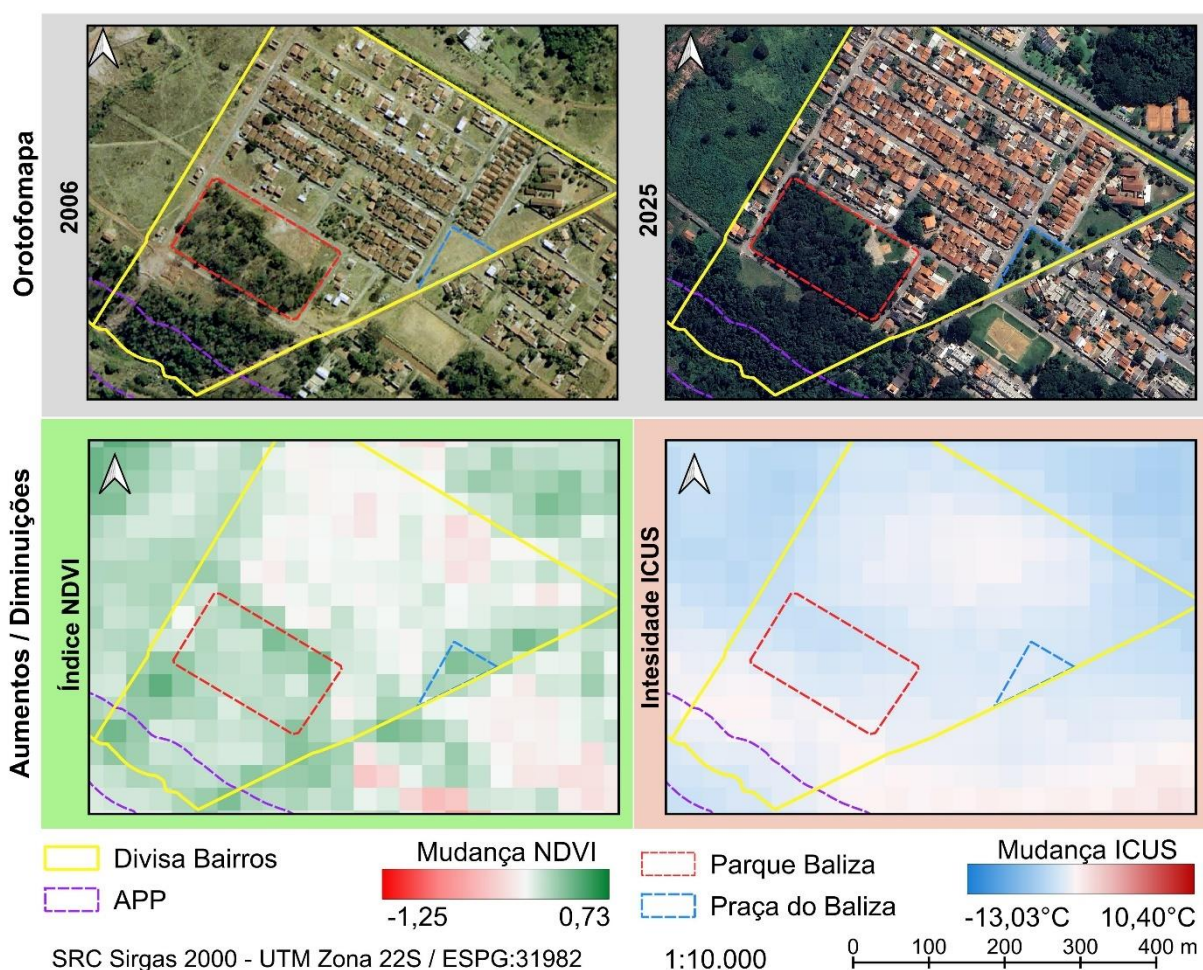
### APP, APA, UC e Parques

Conforme abordado na seção “Macroescala”, as APP se estendem por toda a cidade, combinando-se com APA, UC e Parques, representando as principais ilhas de frescor da cidade de Goiânia. Essas áreas de vegetação densa são parte integrante da cidade, exercendo um impacto significativo sobre as ICUS nos bairros.

O Parque Baliza, localizado no Conjunto Baliza, é um exemplo do aumento da cobertura arbórea nesses espaços (Figura 50). O aumento da cobertura entre os anos

2006 e 2025, traduz-se em incrementos de até 0,28 em suas áreas de arborização densa, resultando em reduções de até  $-1,90^{\circ}\text{C}$  nas intensidades, ao nível do *pixel*. Além disso, é possível identificar aumentos na arborização na APP, áreas adjacentes ao sul do bairro, Praça do Baliza e nas quadras de equipamentos urbanos a oeste. No mapa de aumentos e reduções das intensidades, é possível identificar que as principais reduções provêm das áreas compostas por APP, parque, praça e quadras de equipamento urbano, em contraste com os lotes residenciais.

Figura 50 – Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em parques – Conjunto Baliza.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

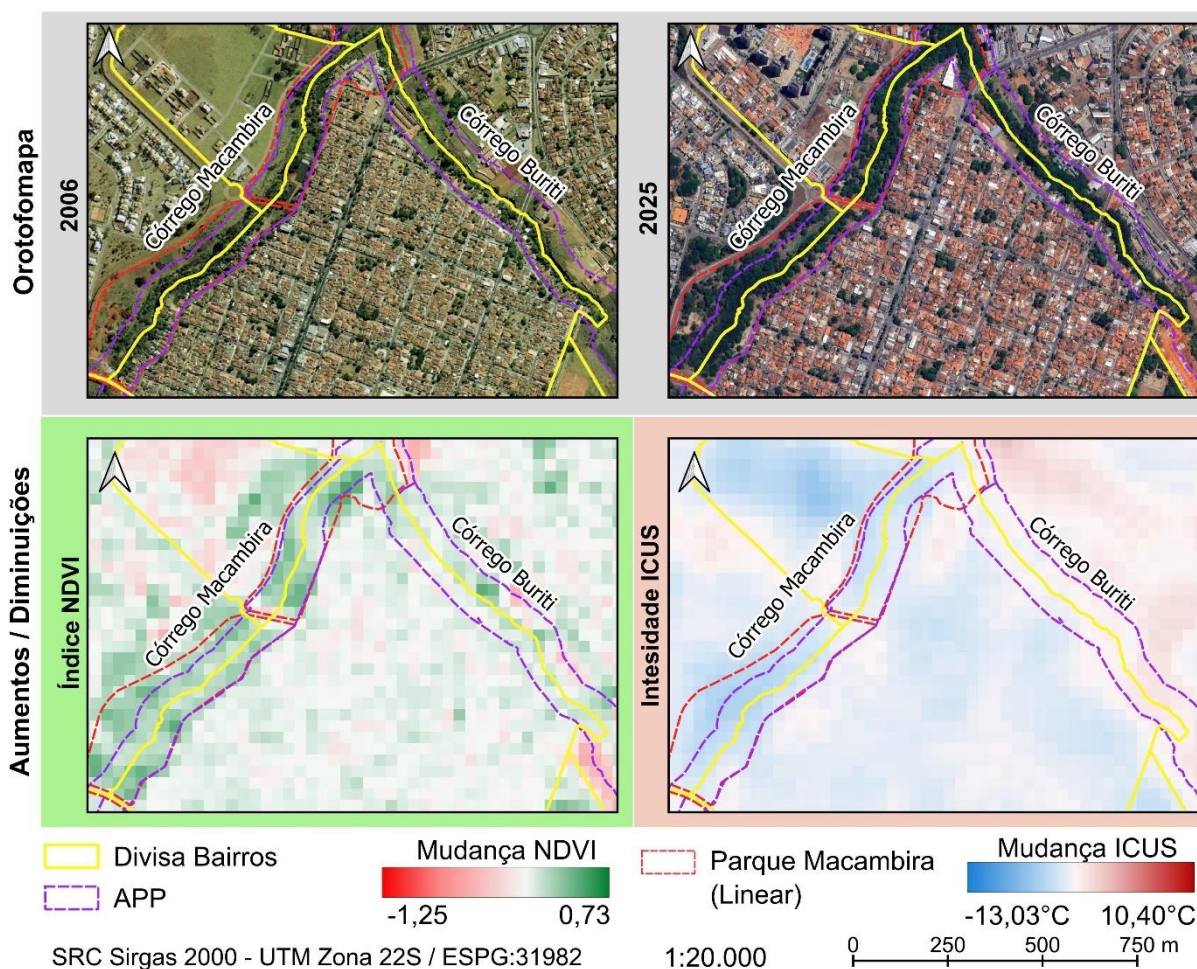
Em relação ao aumento da cobertura arbórea nas APP, o Setor Novo Horizonte, que faz fronteira a noroeste com o córrego Macambira e a nordeste com o córrego Buriti, é um exemplo de conversão de áreas edificadas em arborizadas dentro dessas zonas (Figura 51).

Ao longo do córrego Macambira, combinam-se áreas designadas como APP, UC



e Parque, apresentando maiores aumentos na cobertura arbórea em relação ao córrego Buriti. Ao longo deste córrego, dentro dos limites do bairro, são identificados aumentos de até 0,45 no índice *NDVI*, bem como reduções de até  $-2,19^{\circ}\text{C}$  nas intensidades das ICUS, ao nível do *pixel*. Grande parte do comportamento observado é resultado da desapropriação de lotes construídos dentro da APP, existentes em 2006 e convertidos em áreas verdes arborizadas para 2025.

Figura 51 – Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em APP – Setor Novo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

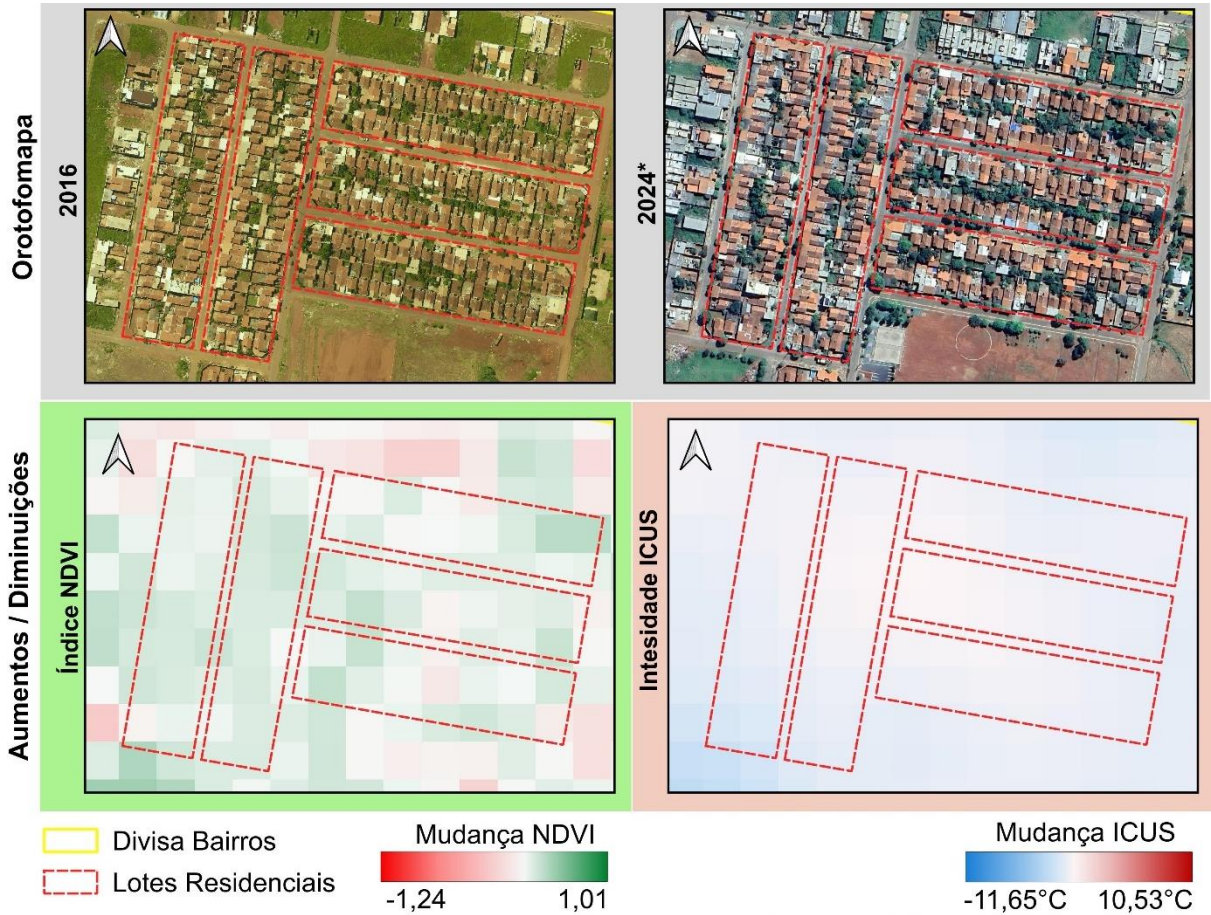
O córrego Macambira faz parte do programa PUAMA, que propõe a construção de um parque linear com 24km de extensão, abrangendo o córrego Macambira, parte do Ribeirão Anicuns e o Parque Ambiental Urbano Macambira. Este programa prevê a desocupação de 160,42ha de áreas construídas dentro da APP, incluindo o reassentamento das famílias e negócios nas proximidades do local onde a população reside atualmente (Prefeitura de Goiânia, [2015?]).

Lotes

A maior proporção do tecido urbano é constituída por lotes, principalmente de uso residencial, nos quais foram identificados aumentos na cobertura arbórea; sua disposição dispersa tende a produzir reduções menores nas intensidades das ICUS, em comparação com as outras formas de implantação da arborização.

Nos lotes residenciais do bairro Orlando Morais é possível observar crescimento da cobertura arbórea entre os anos de 2016 e 2024 (Figura 52). O crescimento da cobertura nessas áreas resulta em aumentos de até 0,17 no índice *NDVI*, bem como em reduções de até -1,14°C nas intensidades, ao nível de *pixel*, entre os anos de 2016 e 2025. Nos mapas de aumentos e diminuições, é possível identificar variações mais acentuadas ao redor das quadras residenciais, impulsionadas por mudanças na cobertura do solo em áreas e lotes vazios.

Figura 52 – Exemplo de crescimento da cobertura arbórea em lotes – Res. Orlando Morais.



SRC Sirgas 2000 - UTM Zona 22S / ESPG:31982 1:6.000

\*Nota: As imagens mais recentes disponíveis no Google Earth para o bairro de Orlando Morais datam de abril de 2024. Os mapas de aumento e diminuição foram elaborados com imagens de 2016 e 2025, nas datas indicadas na seção 2.2.1 “Dados de sensoriamento remoto”

Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).



Durante a análise, o tamanho do lote foi identificado como um fator determinante da tipologia construtiva do edifício, o que limita o potencial para o plantio de árvores urbanas. A figura 53 mostra exemplos da implantação de árvores urbanas de acordo com diferentes tamanhos de lotes residenciais.

Os lotes menores, de 5 x 30m, costumam ser o resultado da divisão de lotes de 10 x 30m, nos quais são construídas moradias geminadas. Essas moradias possuem pátios de ventilação muito reduzidos ao longo do corpo do edifício, culminando em um pátio com a largura do lote, que dispõe de áreas reduzidas para o plantio de árvores. O maior potencial está na calçada, onde geralmente são plantadas árvores de pequeno e médio porte, limitadas pelo acesso à garagem da moradia.

Lotes de 9 x 25m e 10 x 30m, costumam ter construções que se estendem pelas laterais e mantêm pátios na parte da frente e nos fundos do lote, onde podem ser plantadas árvores. Nas observações realizadas, a maioria dos pátios frontais recebe cobertura para funcionar como garagem coberta, ficando disponíveis para o plantio de árvores o pátio traseiro e a calçada. Como se pode observar, grande quantidade de residências não possui arborização nas calçadas, assim como outras constroem em toda a área do lote, reduzindo a capacidade de receber arborização.

Lotes maiores, de 18 x 36m, 32 x 40m e 50 x 100m, encontram-se em sua maioria em condomínios fechados, cuja proporção de áreas verdes é regulamentada por normas internas. Como se pode observar, à medida que o tamanho do lote aumenta, mais espaços podem ser destinados ao plantio de árvores, liberando as laterais do lote para abrigar vegetação.

Dessa forma, a configuração dos lotes influencia o potencial do tecido urbano para receber arborização e, conseqüentemente, o potencial na redução das intensidades das ICUS por meio do aumento da cobertura arbórea.

Em resumo, a cobertura arbórea dos 163 bairros analisados apresenta um aumento de 5,06 pontos percentuais (Estágio Inicial = 9,42%; 2025 = 14,48%), o que resulta em um crescimento relativo de 53,71% em relação ao estágio inicial. A maior parte dos bairros (38%) registra um crescimento entre 1 e 5 pontos (Muito Leve) em sua cobertura, seguida por 23% dos bairros, que apresentam aumentos entre 5 e 9 pontos (Leve).

Figura 53 – Exemplo de implantação de arborização urbana de acordo ao tamanho do lote



SRC Sirgas 2000 - UTM Zona 22S / ESPG:31982

1:1.500 0 25 50 75 m

Fonte: Elaboração própria com base em imagens de Google (2025).

Durante o período de estudo, os bairros sem cobertura arbórea (<1%) e aqueles com cobertura muito baixa (1% a 6%) diminuíram 100% e 43%, respectivamente, enquanto as categorias com cobertura superior a 6% apresentaram crescimento. No estágio inicial, os bairros com cobertura muito baixa (1% a 6%) detinham a maior proporção (41%); contudo, em 2025, estes serão superados pelos bairros com cobertura baixa (6% a 12%), que passarão a representar a maioria (41%).

A maior redução nas intensidades das ICUS, observada em bairros com crescimentos leves (5 a 9 pontos) ou sem incremento na cobertura arbórea, evidencia a influência de fatores exógenos que condicionam o comportamento térmico dos bairros analisados. Adicionalmente, o comportamento das intensidades em relação às categorias de cobertura indica que tais fatores podem exercer maior influência em bairros com coberturas inferiores a 6%, sobrepondo-se ao efeito da arborização nas variações de intensidade.

As diferentes formas como o plantio de árvores é implementado na cidade de Goiânia, somadas às diversas configurações urbanas do tecido urbano, promovem a redução das intensidades das ICUS de maneira heterogênea. O crescimento em estruturas de arborização densa, como parques, praças, APP, APA e UC, apresenta reduções maiores em comparação com o crescimento em lotes, caracterizados por uma disposição dispersa; no entanto, as primeiras representam pontos específicos no tecido urbano, enquanto os últimos representam a maior proporção do bairro.

Conforme mencionado anteriormente, segundo Greene e Millward (2017), árvores dispersas não mitigam eficientemente a TST, especialmente em proximidade a edificações e pavimentos asfálticos. Além disso, tais condições elevam o déficit de pressão de vapor entre o ar e o dossel da árvore, induzindo o fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, reduzindo a taxa de evapotranspiração (Elmes *et al.*, 2020; Hulley *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020; Weng; Yang, 2004).

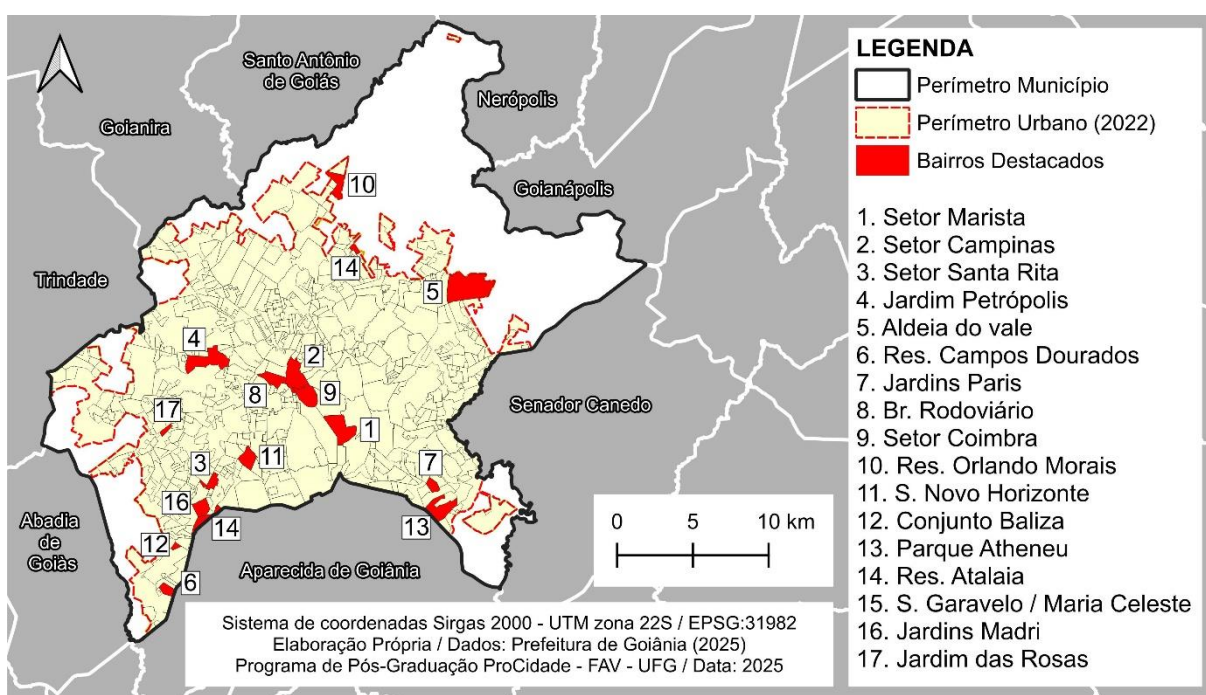
Autores como Grey e Deneke (1978) e Schubert (1979) afirmam que, embora uma única árvore não afete uma área em termos climáticos, grupos de árvores ou uma grande quantidade espalhada podem ser muito eficientes na melhoria climática. Nesse sentido, o estudo realizado por Ananyeva e Emmanuel (2023) corrobora essas afirmações, sendo mais eficientes na redução das temperaturas os agrupamentos densos e em maior escala, em comparação com pequenas parcelas isoladas.



Desta forma, a partir de coberturas baixas (6 a 12%), pode-se observar um comportamento mais linear em relação à redução das intensidades das ICUS, em conformidade com o relatado pela literatura, onde aumentos na percentagem de arborização urbana estão associados à redução das temperaturas.

As discrepâncias entre os resultados obtidos nesta seção e a literatura sugerem que outros fatores, além da arborização urbana, intervêm na redução das intensidades das ICUS. Além disso, é importante destacar que os 180 bairros analisados (163 excluindo chácaras e uso não residencial) correspondem àqueles que apresentam reduções nas intensidades dentro do período de estudo, dos quais entre 26% e 17% não apresentam aumentos nos índices de vegetação. Nesse sentido, é importante identificar e delimitar fatores não relacionadas à cobertura arbórea, para determinar a influência da arborização urbana sobre o campo térmico da cidade de Goiânia.

Mapa 11 - Localização dos bairros utilizados como exemplo na seção “Cobertura arbórea e elementos relacionados”.



Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2024) e Prefeitura de Goiânia (2025).

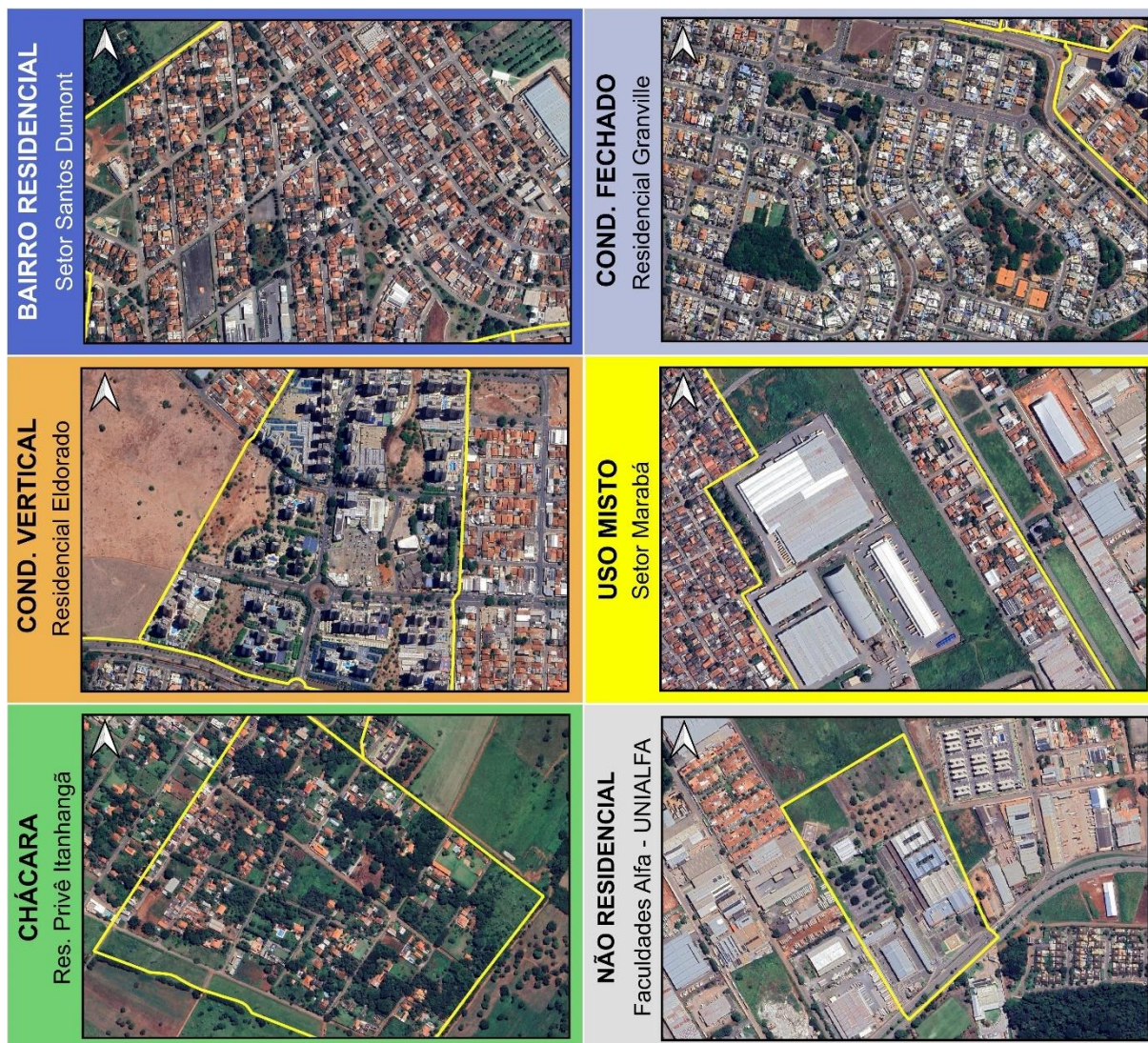
## Tipos de bairros

Diferentes configurações urbanas, associadas aos modelos de uso e ocupação do solo, apresentam características próprias na distribuição da arborização e das áreas verdes.

O 71% dos bairros que apresentam reduções nas intensidades das ICUS durante

o período correspondem a bairros residenciais (128 bairros), seguidos por 13% compostos por condomínios fechados (22 bairros), 7% por chácaras (13 bairros), 5% por condomínios verticais (9 bairros), 2% de uso misto (4 bairros) e 2% de uso não residencial (4 bairros). A Figura 54 apresenta exemplos para cada tipo de bairro, e o Mapa 12, no final desta secção, apresenta sua localização.

Figura 54 – Exemplos das categorias de tipos de bairros.



SRC Sirgas 2000 - UTM Zona 22S / ESPG:31982  Divisa Bairros 1:15.000 0 100 200 300 400 m

Fonte: Elaboração própria com base em de Google (2025).

Dos bairros analisados (excluindo-se chácaras e áreas de uso não residencial), os condomínios fechados apresentam a maior proporção de crescimento da cobertura arbórea (Tabela 25 e Figura 55). Entre estes, 64% (14 bairros) exibem incrementos superiores a 9 pontos percentuais, em contraste com os bairros residenciais, nos quais essa proporção é de apenas 12% (15 bairros). O 67% dos bairros residenciais (86



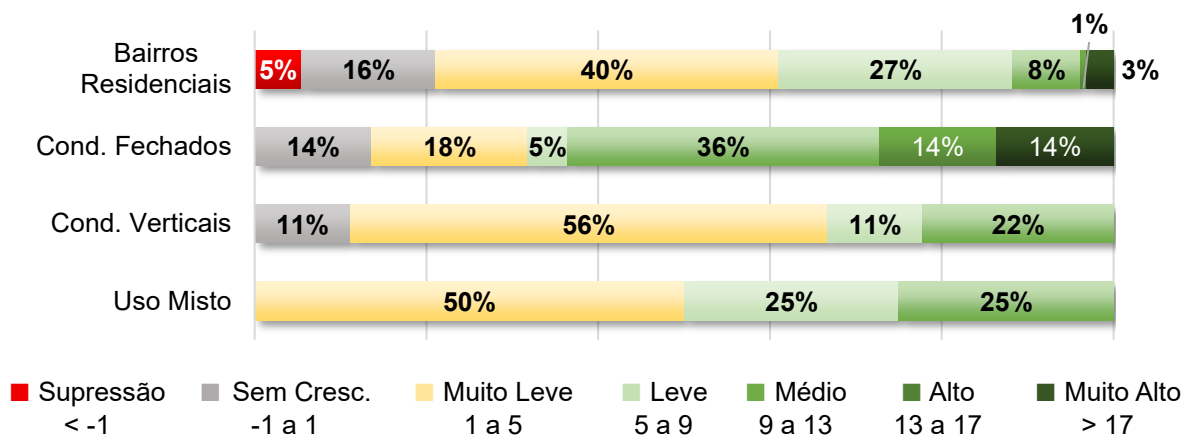
bairros) apresentam crescimentos situados entre 1 e 9 pontos, somados a 16% que não apresentam crescimento (20 bairros) e 5% nos quais se identifica diminuição da cobertura arbórea (7 bairros).

Tabela 25 - Quantidade de bairros de acordo ao crescimento da cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025

| Tipo de bairro       | Crescimento da cobertura arbórea (pontos percentuais) |                      |                     |               |                 |                 |                    |
|----------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|
|                      | Supressão<br>< -1                                     | Sem Cresc.<br>-1 a 1 | Muito Leve<br>1 a 5 | Leve<br>5 a 9 | Médio<br>9 a 13 | Alto<br>13 a 17 | Muito Alto<br>> 17 |
| Bairros Residenciais | 7                                                     | 20                   | 51                  | 35            | 10              | 1               | 4                  |
| Cond. Fechados       | -                                                     | 3                    | 4                   | 1             | 8               | 3               | 3                  |
| Cond. Verticais      | -                                                     | 1                    | 5                   | 1             | 2               | -               | -                  |
| Uso Misto            | -                                                     | -                    | 2                   | 1             | 1               | -               | -                  |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 55 – Quantidade de bairros de acordo ao crescimento da cobertura arbórea (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025



Fonte: Elaboração própria.

Entre os condomínios verticais, 56% (5 bairros) apresentam crescimento muito leve (1 a 5 pontos), 22% (2 bairros) exibem crescimento médio (9 a 13 pontos) e as categorias leve (5 a 9 pontos) e sem crescimento representam 11% (1 bairro) cada. Quanto aos bairros de uso misto, 50% (2 bairros) registram crescimento muito leve (1 a 5 pontos), enquanto as categorias 'leve' e 'alta' correspondem a 25% (1 bairro) cada.

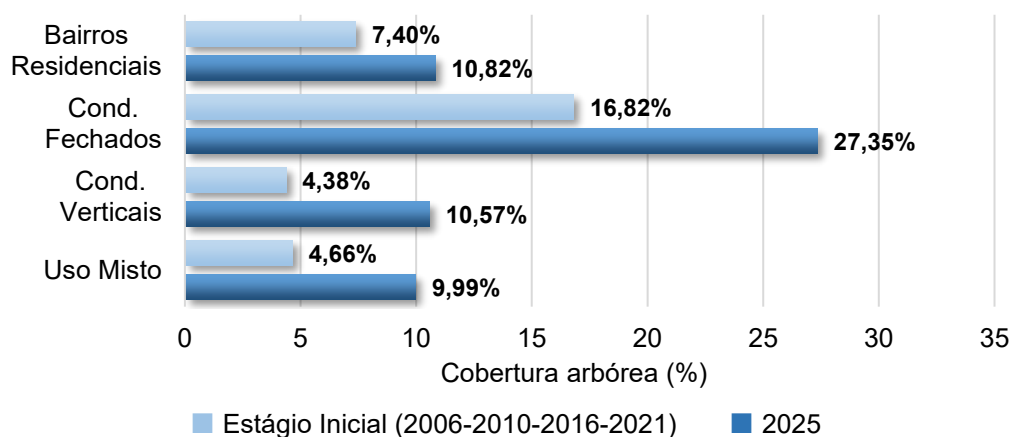
No que tange à dinâmica da cobertura arbórea durante o período de estudo, os condomínios fechados apresentam os maiores percentuais de cobertura total, tanto no estágio inicial quanto no 2025, registrando o maior crescimento (Tabela 26 e Figura 56).

Tabela 26 – Cobertura arbórea total de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025

| Tipo de bairro       | Área Total (ha) | Cobertura arbórea total por tipo de bairro |               |           |               |             |              |
|----------------------|-----------------|--------------------------------------------|---------------|-----------|---------------|-------------|--------------|
|                      |                 | Estágio Inicial                            |               | 2025      |               | Crescimento |              |
|                      |                 | Área (ha)                                  | Cobertura (%) | Área (ha) | Cobertura (%) | Área (ha)   | Pontos       |
| Bairros Residenciais | 6.983,82        | 516,46                                     | <b>7,40</b>   | 755,74    | <b>10,82</b>  | 239,27      | <b>3,43</b>  |
| Cond. Fechados       | 2.065,43        | 347,33                                     | <b>16,82</b>  | 564,99    | <b>27,35</b>  | 217,67      | <b>10,54</b> |
| Cond. Verticais      | 83,87           | 3,67                                       | <b>4,38</b>   | 8,87      | <b>10,57</b>  | 5,20        | <b>6,20</b>  |
| Uso Misto            | 158,02          | 7,36                                       | <b>4,66</b>   | 15,78     | <b>9,99</b>   | 8,42        | <b>5,33</b>  |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 56 – Cobertura arbórea total de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025



Fonte: Elaboração própria.

Em seu estágio inicial, os condomínios fechados detinham 16,82% de cobertura, elevando-se para 27,35%, o que representa um incremento de 10,54 pontos percentuais. Os condomínios verticais apresentam o segundo maior crescimento, partindo de 4,28% no estágio inicial para 10,57% em 2025, resultando em um aumento de 6,29 pontos. Os bairros de uso misto experimentaram um incremento de 5,33 pontos, evoluindo de 4,66% para 9,99%. Por fim, os bairros residenciais registraram o menor incremento entre as quatro tipologias analisadas, equivalente a 3,43 pontos, progredindo de 7,40% para 10,82%.

Os condomínios fechados apresentam também a maior média de cobertura arbórea, em contraste com as outras tipologias, tanto no estágio inicial como para 2025 (Tabela 27 e Figura 57). Em média, os condomínios fechados apresentam uma cobertura na fase inicial de 11,29%, aumentando para 17,91% em 2025, com uma média de crescimento de 9,42 pontos percentuais.

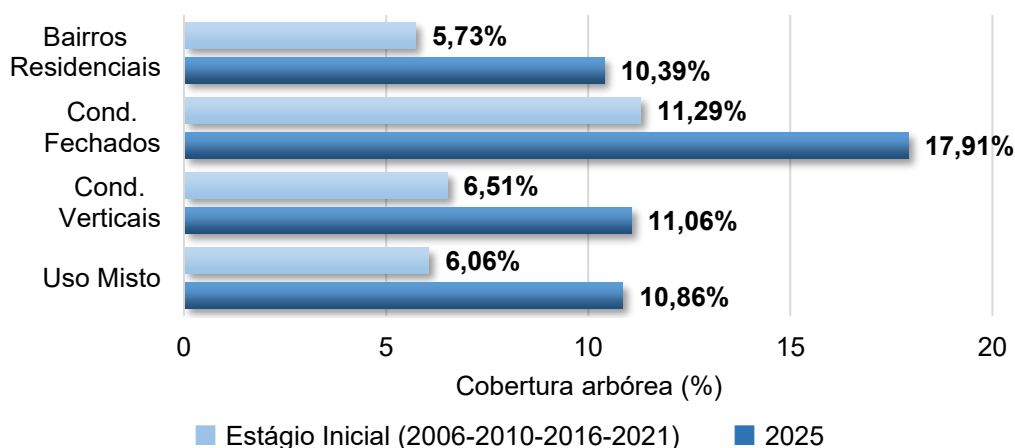


Tabela 27 – Cobertura arbórea média de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025

| Tipo de Bairro       | Cobertura arbórea média por tipo de bairro |          |             |
|----------------------|--------------------------------------------|----------|-------------|
|                      | Est. Inicial (%)                           | 2025 (%) | Crescimento |
| Bairros Residenciais | 5,73                                       | 10,39    | 4,66        |
| Cond. Fechados       | 11,29                                      | 17,91    | 9,42        |
| Cond. Verticais      | 6,51                                       | 11,06    | 4,55        |
| Uso Misto            | 6,06                                       | 10,86    | 4,80        |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 57 – Cobertura arbórea média de acordo ao tipo de bairro, Estágio Inicial-2025 (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025



Fonte: Elaboração própria.

Em contrapartida, os bairros residenciais apresentam a média mais baixa, com uma cobertura no estágio inicial de 5,73% e de 10,39% para 2025, com uma média de crescimento de 4,66 pontos. Os condomínios verticais e de uso misto apresentam médias de cobertura de 6,51% e 6,06% durante o seu estágio inicial, aumentando para 11,06% e 10,86% para 2025, apresentando uma média de crescimento de 4,55 e 4,80 pontos, respectivamente.

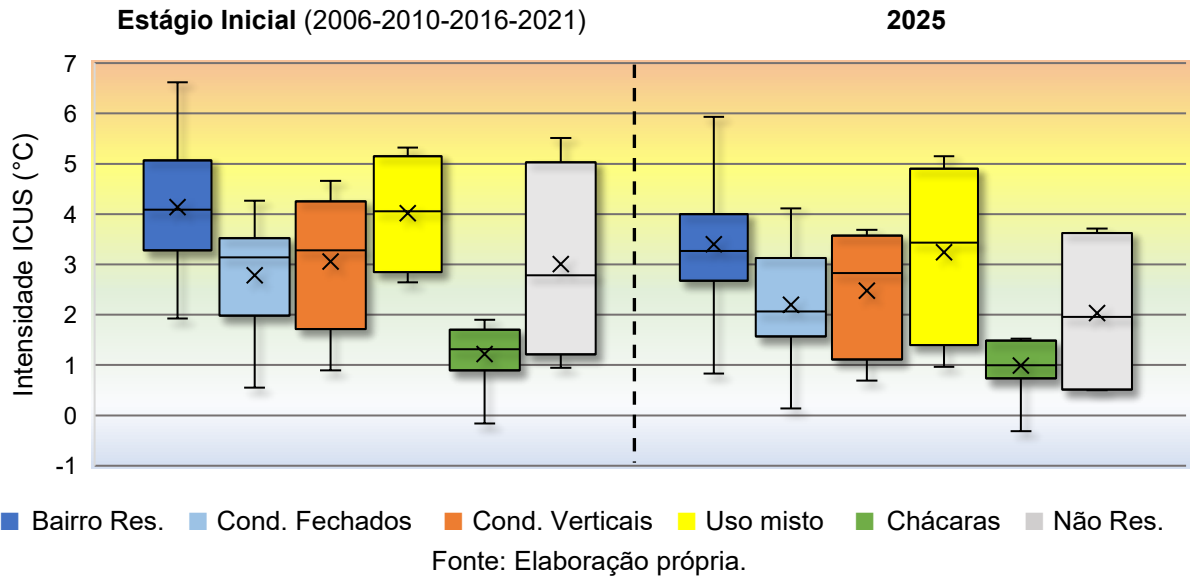
Ao analisar as intensidades médias das ICUS por tipo de bairro no período de estudo, observa-se que as chácaras detêm as intensidades mais baixas, em contraste com os bairros residenciais, que registram os valores mais elevados (Tabela 28 e Figura 58). Enquanto as chácaras apresentam médias entre 1,22 e 0,99°C, os bairros residenciais oscilam entre 4,14 e 3,40°C. Os condomínios fechados apresentam as menores intensidades após as chácaras, com valores entre 2,79 e 2,20°C, seguidos pelos usos não residenciais, que variam de 3,01 a 2,03°C. Por sua vez, os bairros de uso misto detêm as médias mais altas logo após os residenciais, atingindo entre 4,02 e 3,24°C, seguidos pelos condomínios verticais, com valores entre 3,05 e 2,48°C.

Tabela 28 - Comparação de intensidades e redução média as ICUS de acordo ao tipo de bairro, Estágio Inicial – 2025.

| Tipo de bairro              | Medida       | ICUS (°C)    |             |              |
|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|                             |              | Est. Inicial | 2025        | Redução      |
| <b>Bairros Residenciais</b> | <b>Média</b> | <b>4,14</b>  | <b>3,40</b> | <b>-0,74</b> |
|                             | 1ro. Quart.  | 3,28         | 2,67        |              |
|                             | 3ro. Quart.  | 5,06         | 4,00        |              |
| <b>Cond. Fechados</b>       | <b>Média</b> | <b>2,79</b>  | <b>2,20</b> | <b>-0,59</b> |
|                             | 1ro. Quart.  | 1,98         | 1,57        |              |
|                             | 3ro. Quart.  | 3,52         | 3,13        |              |
| <b>Cond. Verticais</b>      | <b>Média</b> | <b>3,05</b>  | <b>2,48</b> | <b>-0,57</b> |
|                             | 1ro. Quart.  | 1,72         | 1,11        |              |
|                             | 3ro. Quart.  | 4,25         | 3,57        |              |
| <b>Uso Misto</b>            | <b>Média</b> | <b>4,02</b>  | <b>3,24</b> | <b>-0,78</b> |
|                             | 1ro. Quart.  | 2,85         | 1,40        |              |
|                             | 3ro. Quart.  | 5,15         | 4,90        |              |
| <b>Chácaras</b>             | <b>Média</b> | <b>1,22</b>  | <b>0,99</b> | <b>-0,23</b> |
|                             | 1ro. Quart.  | 0,89         | 0,74        |              |
|                             | 3ro. Quart.  | 1,71         | 1,49        |              |
| <b>Não Residenciais</b>     | <b>Média</b> | <b>3,01</b>  | <b>2,03</b> | <b>-0,98</b> |
|                             | 1ro. Quart.  | 1,21         | 0,51        |              |
|                             | 3ro. Quart.  | 5,03         | 3,62        |              |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 58 - Comparação de intensidades médias de ICUS de acordo ao tipo de bairro, Estágio Inicial – 2025.



Quanto às reduções médias da intensidade das ICUS, os bairros não residenciais e de uso misto apresentam as quedas mais expressivas, de -0,98 e -0,78°C, respectivamente. No âmbito habitacional, os bairros residenciais exibem as reduções médias mais acentuadas, equivalentes a -0,74°C, seguidos pelos

condomínios fechados e verticais, com decréscimos de  $-0,59$  e  $-0,57^{\circ}\text{C}$ , nesta ordem. As chácaras apresentam a menor redução média observada, equivalente a  $-0,23^{\circ}\text{C}$ .

Apesar dos condomínios fechados apresentarem os maiores níveis de crescimento da arborização urbana, os bairros residenciais apresentam uma maior redução média da intensidade das ICUS. Enquanto os condomínios fechados mantêm intensidades mais baixas em seu estágio inicial ( $1,98$  a  $3,52^{\circ}\text{C}$ ), os bairros residenciais apresentam valores superiores ( $3,28$  a  $5,06^{\circ}\text{C}$ ), resultando em maiores reduções durante o período.

As diferenças entre as intensidades e as reduções das ICUS podem estar relacionadas aos processos de transformação na cobertura do solo, que apresentam certas particularidades para cada tipo de bairro.

De acordo com Landsberg (1981), a distinção entre o ambiente urbano e o rural reside na sua estrutura superficial totalmente diferente. Assim, pode-se inferir que as configurações urbanas com características superficiais mais próximas das rurais terão comportamentos térmicos semelhantes e, portanto, reduzirão sua diferença de temperatura com o ambiente rural.

As chácaras são o tipo de bairro encontrado em Goiânia que mais se assemelha ao ambiente rural, caracterizado por vegetação densa, áreas de cultivo e frequentemente estão associadas a APP. Essas configurações urbanas apresentam as menores reduções, possivelmente motivado a maiores limitações nas transformações na cobertura do solo, produzindo menos alterações no comportamento das ICUS.

Os parcelamentos apresentam maior diferenciação em relação ao ambiente rural, com configurações que variam em proporção de áreas verdes e graus de compactação urbana, produzindo uma gama mais ampla de respostas no campo térmico.

Um estudo realizado por Amorim (2019) na cidade de Presidente Prudente – SP, compara as intensidades de ICUS entre três bairros com diferentes padrões construtivos e proporções de cobertura vegetal. O bairro popular de baixo padrão selecionado, caracterizado por alta densidade construtiva, lotes pequenos, coberturas de telha vermelha e fibrocimento, bem como uma densidade média de arborização, apresenta na maior parte de sua área (38%) ICUS fortes ( $4 - 6^{\circ}\text{C}$ ), com uma forte incidência (25%) de intensidades muito fortes ( $> 6^{\circ}\text{C}$ ). Em contraste, o condomínio

fechado de alto padrão analisado, composto por lotes maiores, coberturas de telhas vermelhas, maior densidade arbórea e vegetação rasteira, bem como a presença de uma área próxima com extensa vegetação arbórea e rasteira (Parque do Povo), apresenta em 54% de sua superfície intensidades moderadas (2 - 4°C), sem ocorrência de intensidades muito fortes.

Em Goiânia, os condomínios fechados diferem dos bairros residenciais tradicionais pela inserção de áreas verdes e lotes maiores, além de oferecerem áreas públicas e sistemas de controle de acesso. A maioria apresentam lotes regulares com área mínima de 450m<sup>2</sup>, podendo chegar a 1.200m<sup>2</sup>, distribuídos a partir de áreas verdes, que incluem reservas ambientais provenientes de margens de córregos ou remanescentes de áreas verdes pré-existentes (Reis; Resende, 2019). A inclusão de áreas verdes nesses empreendimentos tornou-se uma das principais estratégias de *marketing* utilizadas pelos incorporadores imobiliários. Condomínios desenvolvidos em Goiânia pela empresa FGR Incorporações utilizam o nome “jardins” em seus loteamentos, promovendo-os como “um espaço de total integração com a natureza” e utilizando o slogan “esse é o jeito de jardins de viver” (FGR Incorporações, [2025?]). De acordo com um estudo realizado em 5 condomínios fechados de Goiânia (Aldeia do Vale, Jardins Florença, Jardins Madri, Jardins Lisboa e Residencial Granville), a segunda razão dos moradores para viver nesses condomínios é ter uma maior aproximação com a natureza, depois da busca por maior segurança (Souza, 2012).

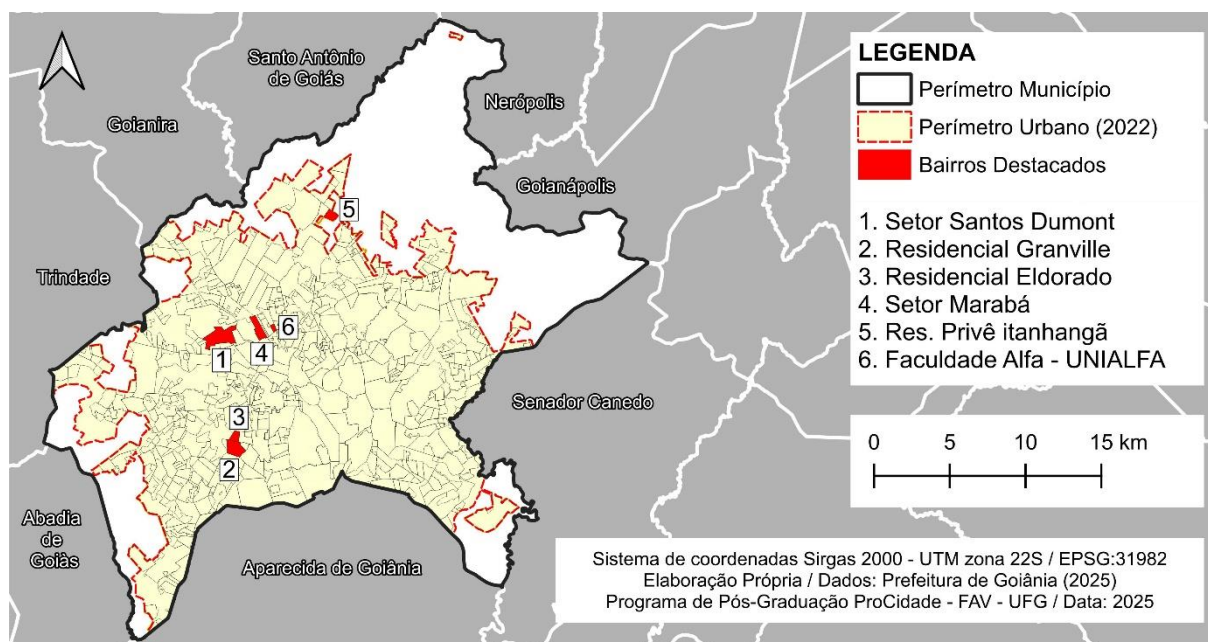
Nesse sentido, os condomínios fechados apresentam configurações urbanas mais semelhantes às rurais em relação aos bairros residenciais tradicionais, combinando a presença de áreas com vegetação rasteira e arborização densa, associadas a padrões de ocupação menos compactos, que promovem, em menor grau, a formação das ICUS.

Em relação à disparidade entre as reduções de intensidade registradas pelos condomínios fechados e pelos bairros residenciais tradicionais, a cobertura predominante do solo em seus estágios iniciais pode ser determinante para a análise do comportamento térmico durante o processo de urbanização. Os condomínios fechados frequentemente estão associados a APP, cujas estruturas de arborização densa preexistentes ocupam áreas consideráveis dentro de seus perímetros, elevando a cobertura arbórea em suas fases iniciais.

Ademais, esses condomínios caracterizam-se por manter seus lotes vazios com

vegetação rasteira durante as etapas incipientes da urbanização, atuando como áreas verdes prévias à ocupação; em contrapartida, os bairros residenciais tradicionais tendem a mantê-los como solo nu. Dessa forma, os condomínios fechados incorporam maior cobertura vegetal, o que resulta em intensidades de ICUS mais baixas durante o seu estágio inicial.

Mapa 12 - Localização dos bairros utilizados como exemplo na seção “Tipos de bairros”.



Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2024) e Prefeitura de Goiânia (2025).

## Ocupação urbana

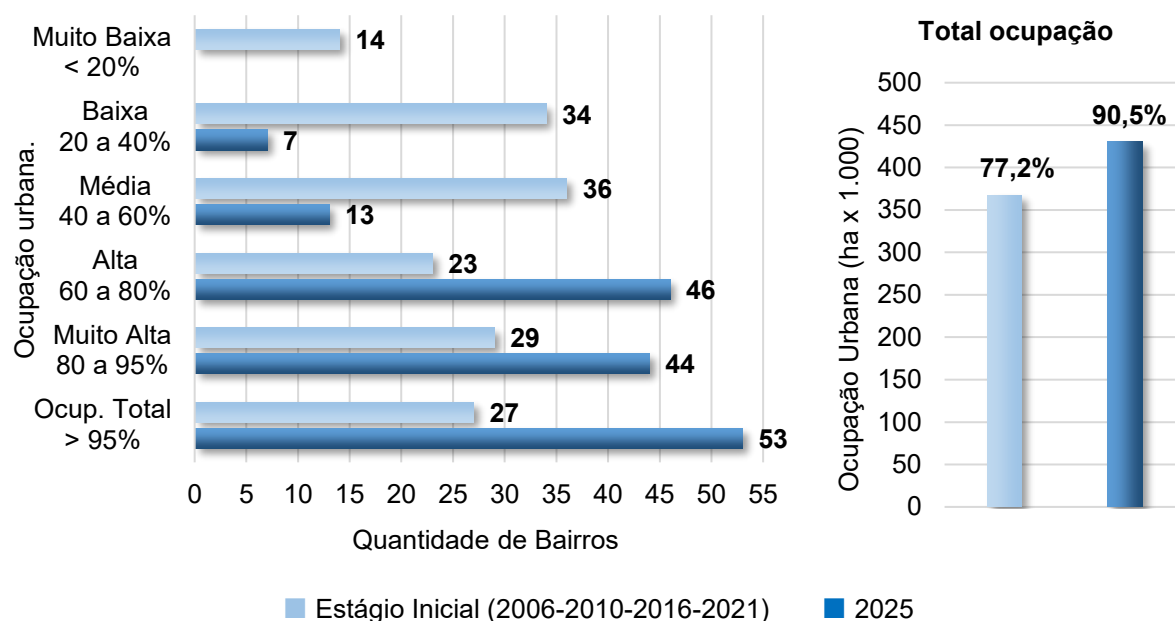
Os bairros foram categorizados de acordo a sua ocupação urbana (excluindo as chácaras e uso não residencial), contabilizando a área correspondente aos lotes e quadras ocupadas, tanto em seu estágio inicial quanto para 2025 (Figura 59).

Nas suas fases iniciais, a maior parte dos bairros apresenta níveis médios (40 a 60 %) e baixos (20 a 40 %) de ocupação, o que corresponde a 22% e 21% (36 e 34 bairros, respetivamente), seguidos por níveis de ocupação muito alta (80 a 95%) e ocupação total (> 95%), representando o 18% e 17% (29 e 27 bairros, respetivamente). Os níveis de ocupação alta (60 a 80%) representam 14% (23 bairros), enquanto os bairros com ocupação muito baixa (< 20%) representam a menor proporção, equivalente a 9% (14 bairros).

Até 2025, os bairros com níveis de ocupação muito baixos (< 20%) desaparecerão completamente, enquanto aqueles com níveis baixos (20 a 40%) e médios (40 a 60%) passarão a representar a menor proporção (4 % - 7 bairros e 8 %

- 13 bairros, respetivamente). Os bairros com ocupação total (> 95%) representam a maior proporção, constituindo 33% (53 bairros), seguidos dos que apresentam ocupação alta (60 a 80%) e ocupação muito alta (80 a 95%), constituindo 46 e 44 bairros, respetivamente. Numa perspectiva global, os bairros registam um aumento da ocupação urbana de 13,3 pontos percentuais, passando de 77,2% no estágio inicial para 90,5% em 2025.

Figura 59 – Ocupação urbana nos bairros com reduções das intensidades de ICUS (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial - 2025.

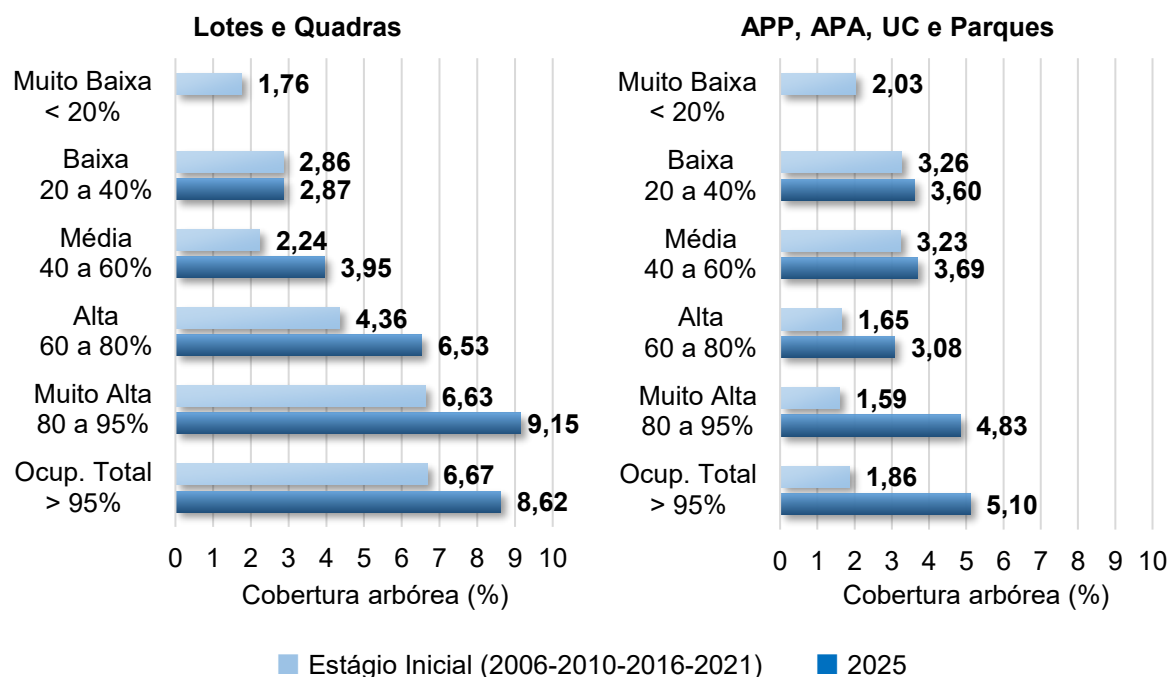


Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar as médias da cobertura arbórea localizada em lotes e quadras de acordo com as categorias de ocupação urbana, é possível constatar que esta diminui à medida que os níveis de ocupação diminuem, tanto nos estágios iniciais como em 2025 (Figura 60). O comportamento da cobertura arbórea presente em APP, APA, UC e parques não parece estar relacionado com as categorias de ocupação urbana, apesar de se observarem maiores aumentos em ocupações superiores a 60%.

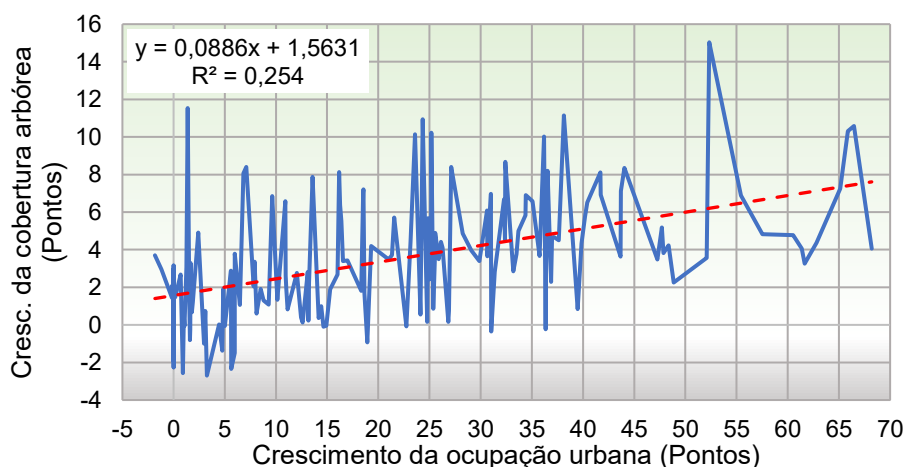
Durante a seu estágio inicial, os bairros com uma taxa de ocupação inferior a 60% apresentam uma cobertura arbórea entre 1,76% e 2,87%, aumentando em 2025 para valores entre 2,86% e 3,95%. Em contrapartida, os bairros com taxas de ocupação superior a 60% apresentam coberturas entre 4,36% e 6,67% em seu estágio inicial, aumentando para 2025 para coberturas entre 6,53% e 9,15%.

Figura 60 – Cobertura arbórea média de acordo a ocupação urbana por tipo de cobertura nos bairros (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.



Ao relacionar o crescimento da cobertura arbórea em lotes e quadras com os aumentos na ocupação urbana durante o período de estudo, é possível identificar a relação entre ambas as variáveis (Figura 61 e Tabela 29).

Figura 61 – Relação entre o crescimento da ocupação urbana e o da cobertura arbórea presente em lotes e quadras, Estágio Inicial - 2025



Bairros com médias de crescimento urbano entre 0 a 10 e 10 a 20 pontos percentuais registam médias de crescimento da cobertura equivalentes a 1,56 e 2,87 pontos, respectivamente; em contraste com aqueles com médias de crescimento da



ocupação entre 50 a 60 e superiores a 60 pontos, que registam médias de crescimento da cobertura de 7,58 e 6,08 pontos, respetivamente. Os bairros que registam uma diminuição da ocupação urbana apresentam uma média de crescimento da cobertura de 2,55 pontos, composto por 4 bairros com ocupações superiores a 60%, apresentando uma redução máxima na ocupação urbana de -1,82 pontos.

Tabela 29 - Relação entre o crescimento da ocupação urbana e o da cobertura arbórea presente em lotes e quadras, Estágio Inicial - 2025

| <b>Cresc,<br/>Cobertura<br/>arbórea (%)</b> | <b>Crescimento da ocupação urbana (pontos percentuais)</b> |             |             |             |             |             |             |             |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                             | < 0                                                        | 0 a 10      | 10 a 20     | 20 a 30     | 30 a 40     | 40 a 50     | 50 a 60     | > 60        |
| <b>Média</b>                                | <b>2,55</b>                                                | <b>1,56</b> | <b>2,87</b> | <b>4,13</b> | <b>4,87</b> | <b>5,45</b> | <b>7,58</b> | <b>6,08</b> |
| 1ro. Quart.                                 | 1,60                                                       | 0,00        | 0,61        | 2,03        | 2,83        | 3,68        | 3,88        | 4,07        |
| 3ro. Quart.                                 | 3,51                                                       | 2,70        | 4,86        | 5,10        | 6,74        | 7,08        | 13,00       | 9,54        |

Fonte: Elaboração própria.

Essa tendência evidencia que a implementação da arborização urbana em Goiânia é, em grande medida, determinada pela ocupação dos lotes. Parcelamentos com grande quantidade de lotes vazios em 2006 e com baixo crescimento urbano continuam com baixa cobertura arbórea para 2025.

Desde 1991, é promovida a plantação de árvores no município de Goiânia como condição para a aprovação dos “termos de Habite-se” ou alvarás de funcionamento. A Lei nº 7.004/1991 estabelece a obrigatoriedade do plantio de duas árvores por cada lote residencial ou comercial como requisito para a obtenção do documento acima mencionado, necessário para a regularização de imóveis dentro do município (Goiânia, 1991a). No entanto, essa lei limita sua aplicação a lotes com frentes superiores a 10m, sendo substituída em termos de aplicação em 2006 pela implementação da Lei nº 8.451/2006, que estabelece a obrigatoriedade do plantio de uma única árvore por cada lote no momento da vistoria de conclusão da obra (Goiânia, 2006b). Os PDAU publicados em 2008, 2011 e 2024 mantêm essa estratégia, exigindo o plantio de árvores como condição para a obtenção de documentos de regularização imobiliária (Goiânia, 2008b, 2011, 2024).

No entanto, essa não é a única estratégia implantada pela legislação municipal para a promoção da arborização. Em 1991, por meio da Lei nº 7.009/1991, passou a ser exigida a apresentação de um projeto de arborização de vias e logradouros públicos para a aprovação de loteamentos, além de autorizar o poder municipal a executar projetos de arborização em loteamentos existentes (Goiânia, 1991b). A

Instrução Normativa Nº017/2006 reforça tal requisito ao condicionar a emissão da Licença Ambiental Prévia (LP) à apresentação de um projeto de arborização, exigindo, adicionalmente, sua execução imediata no momento da expedição da Licença Ambiental de Instalação (Goiânia, 2006a). Dessa forma, os novos loteamentos têm a obrigação de elaborar e executar projetos de arborização, não associados à ocupação dos lotes desde o ano de 1991, sendo reforçada em 2006.

Em relação à implantação de árvores em lotes vazios, a única legislação que faz referência a essa exigência é a Lei nº 7.004/1991 citada anteriormente, que estende a obrigatoriedade do plantio de duas árvores por cada lote residencial ou comercial em lotes vazios com testada superior a 10 metros. O não cumprimento do estabelecido acarreta a aplicação de penalidades a serem cobradas por meio do imposto territorial correspondente (Goiânia, 1991a). Esta lei é revogada pelo PDAU vigente (2024), que não faz referência à exigência de plantio de árvores em lotes vazios.

Nesse sentido, os lotes vazios representam um grande obstáculo identificado nesta pesquisa para a implementação da arborização urbana em Goiânia. Apesar da exigência, desde 1991, da apresentação de projetos de arborização para a aprovação de novos loteamentos, o plantio continua condicionado à ocupação dos lotes. Parcelamentos nos quais persiste um grande número de lotes vazios, não oferecem um contexto urbano em conformidade com as políticas públicas estabelecidas, impactando as condições ambientais de seus habitantes e, no foco desta pesquisa, afetando o campo térmico dos bairros da cidade.

No que diz respeito ao comportamento das ICUS nos bairros de acordo com a ocupação urbana, durante o estágio inicial, os bairros com ocupação alta (60 a 80%) apresentam a intensidade média mais baixa ( $3,47^{\circ}\text{C}$ ), aumentando tanto nos bairros com ocupação muito baixa ( $< 20\% = 3,97^{\circ}\text{C}$ ), como naqueles com ocupação total ( $> 95\% = 4,75^{\circ}\text{C}$ ). Para 2025, as intensidades mostram uma relação linear conforme aumenta a ocupação, sendo de  $2,06^{\circ}\text{C}$  para os bairros com baixa ocupação (20 a 40%) e de  $3,91^{\circ}\text{C}$  para ocupação total ( $> 95\%$ ) (Tabela 30 e Figura 62).

No que concerne à relação entre a redução das intensidades das ICUS e o comportamento da vegetação urbana, entre o estágio inicial e 2025, os bairros com baixa ocupação (20 a 40%) apresentam uma maior diminuição nas intensidades e um maior aumento nos valores do *NDVI*, apesar de registarem os menores aumentos na cobertura arbórea.

Tabela 30 - Comparação de Intensidade de ICUS, valores *NDVI* e cobertura arbórea de acordo a ocupação urbana (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.

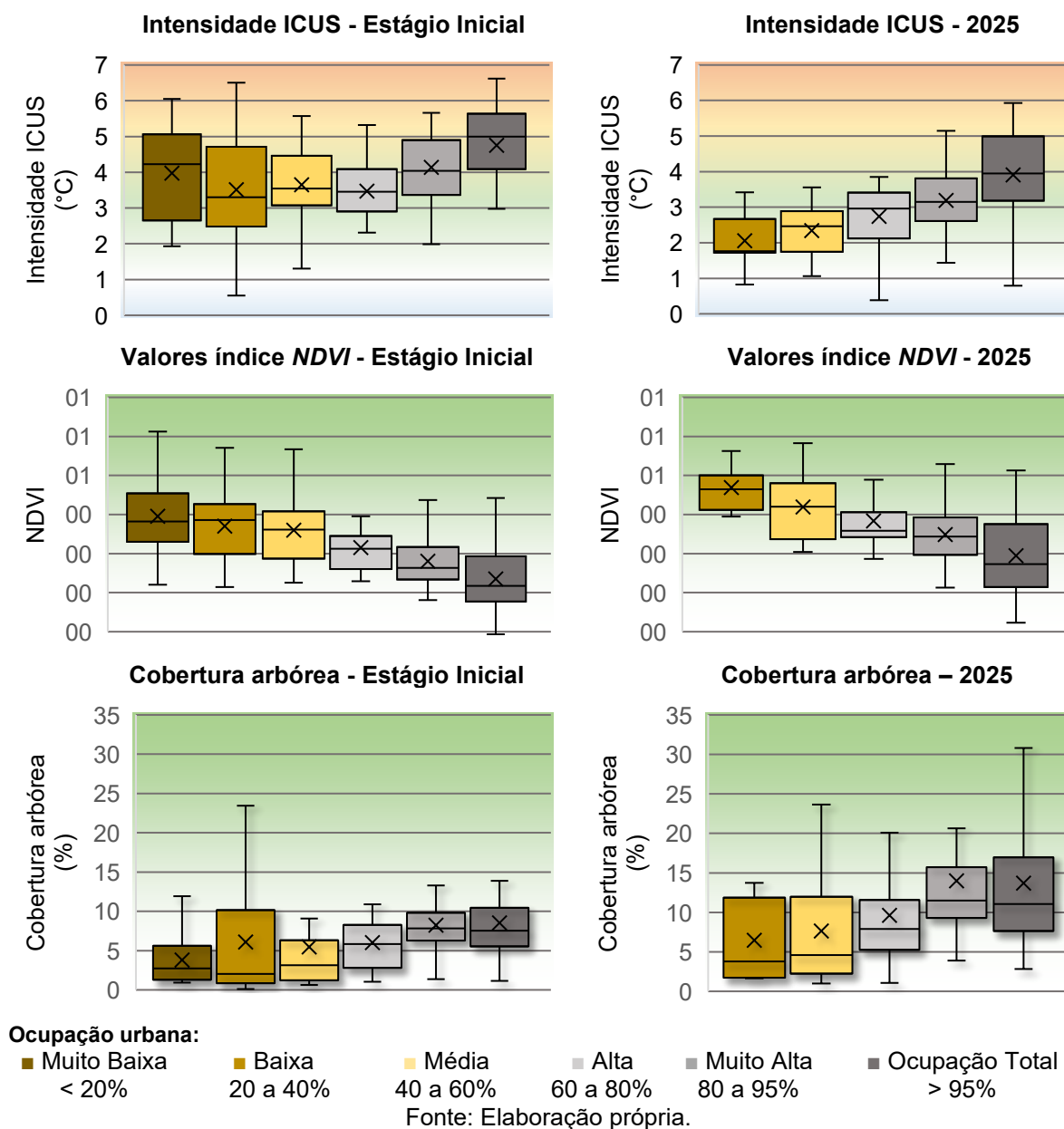
| Ocupação Urbana               | Medida       | ICUS (°C)    |             |                | NDVI         |             |                | Cob. Arbórea (%) |              |                |
|-------------------------------|--------------|--------------|-------------|----------------|--------------|-------------|----------------|------------------|--------------|----------------|
|                               |              | Est. Inicial | 2025        | Variação média | Est. Inicial | 2025        | Variação média | Est. Inicial     | 2025         | Variação média |
| <b>Muito Baixa</b><br>< 20%   | <b>Média</b> | <b>3,97</b>  | -           |                | <b>0,40</b>  | -           |                | <b>3,79</b>      | -            |                |
|                               | 1ro. Quart.  | 2,65         | -           | -              | 0,33         | -           | -              | 1,31             | -            | -              |
|                               | 3ro. Quart.  | 5,06         | -           |                | 0,45         | -           |                | 5,61             | -            |                |
| <b>Baixa</b><br>20 a 40%      | <b>Média</b> | <b>3,51</b>  | <b>2,06</b> | <b>-1,45</b>   | <b>0,37</b>  | <b>0,47</b> | <b>0,10</b>    | <b>6,11</b>      | <b>6,47</b>  | <b>0,36</b>    |
|                               | 1ro. Quart.  | 2,48         | 1,72        |                | 0,30         | 0,41        |                | 0,85             | 1,73         |                |
|                               | 3ro. Quart.  | 4,72         | 2,67        |                | 0,43         | 0,50        |                | 10,15            | 11,86        |                |
| <b>Média</b><br>40 a 60%      | <b>Média</b> | <b>3,65</b>  | <b>2,34</b> | <b>-1,31</b>   | <b>0,36</b>  | <b>0,42</b> | <b>0,06</b>    | <b>5,47</b>      | <b>7,64</b>  | <b>2,17</b>    |
|                               | 1ro. Quart.  | 3,08         | 1,74        |                | 0,29         | 0,34        |                | 1,23             | 2,23         |                |
|                               | 3ro. Quart.  | 4,46         | 2,89        |                | 0,41         | 0,48        |                | 6,31             | 11,98        |                |
| <b>Alta</b><br>60 a 80%       | <b>Média</b> | <b>3,47</b>  | <b>2,75</b> | <b>-0,72</b>   | <b>0,32</b>  | <b>0,38</b> | <b>0,06</b>    | <b>6,01</b>      | <b>9,61</b>  | <b>3,60</b>    |
|                               | 1ro. Quart.  | 2,90         | 2,12        |                | 0,26         | 0,34        |                | 2,82             | 5,24         |                |
|                               | 3ro. Quart.  | 4,08         | 3,41        |                | 0,34         | 0,41        |                | 8,28             | 11,58        |                |
| <b>Muito Alta</b><br>80 a 95% | <b>Média</b> | <b>4,14</b>  | <b>3,19</b> | <b>-0,95</b>   | <b>0,28</b>  | <b>0,35</b> | <b>0,07</b>    | <b>8,23</b>      | <b>13,99</b> | <b>5,76</b>    |
|                               | 1ro. Quart.  | 3,37         | 2,61        |                | 0,23         | 0,30        |                | 6,28             | 9,30         |                |
|                               | 3ro. Quart.  | 4,90         | 3,81        |                | 0,32         | 0,39        |                | 9,82             | 15,74        |                |
| <b>Ocup. Total</b><br>> 95%   | <b>Média</b> | <b>4,75</b>  | <b>3,91</b> | <b>-0,84</b>   | <b>0,23</b>  | <b>0,29</b> | <b>0,06</b>    | <b>8,53</b>      | <b>13,72</b> | <b>5,19</b>    |
|                               | 1ro. Quart.  | 4,09         | 3,18        |                | 0,18         | 0,21        |                | 5,55             | 7,62         |                |
|                               | 3ro. Quart.  | 5,64         | 4,99        |                | 0,29         | 0,38        |                | 10,45            | 16,97        |                |

Fonte: Elaboração própria.

Entre o estágio inicial e 2025, os bairros com baixa ocupação (20 a 40%) registram médias de intensidade das ICUS de 3,51 e 2,06°C, respetivamente, o que resulta numa variação de -1,45°C; bem como valores médios de NDVI de 0,37 e 0,47, respetivamente, o que implica um aumento médio de 0,10 nos valores deste índice. Os bairros com taxas de ocupação superiores a 40% registram médias de intensidade das ICUS entre 3,47 e 4,75°C durante a seu estágio inicial, descendo em 2025 para intensidades que oscilam entre 2,34 e 3,91°C, o que resulta numa redução média de -0,72 a -1,31°C. No que concerne ao comportamento do índice *NDVI*, estes bairros apresentam valores médios de 0,23 a 0,36 durante o seu estágio inicial, aumentando para valores de 0,29 a 0,42, o que resulta em aumentos de 0,06 a 0,07.

Apesar de os bairros com baixa ocupação (20 a 40%) apresentarem um maior aumento no índice *NDVI*, registram um aumento muito inferior na cobertura arbórea (0,36 pontos) em comparação com aqueles com níveis de ocupação superiores a 40% (2,17 a 5,76 pontos), evidenciando uma maior presença de vegetação não associada à cobertura arbórea em 2025.

Figura 62 - Comparação de Intensidade de ICUS, valores *NDVI* e cobertura arbórea de acordo a ocupação urbana (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial-2025.



Esses resultados indicam a importância dos lotes vazios no comportamento térmico dos processos de urbanização. A maior presença de lotes vazios implica uma maior área para as transformações da cobertura do solo, fator com forte influência sobre as ICUS. Os loteamentos que mantêm grandes quantidades de lotes vazios, especialmente aqueles identificados no ano de 2006, apresentam transições de solo nu para áreas verdes, principalmente devido ao abandono e à falta de manutenção, registrando consequentemente, grandes aumentos de vegetação e as maiores reduções nas intensidades das ICUS.

No caso da diferenciação entre o comportamento dos bairros residenciais e dos

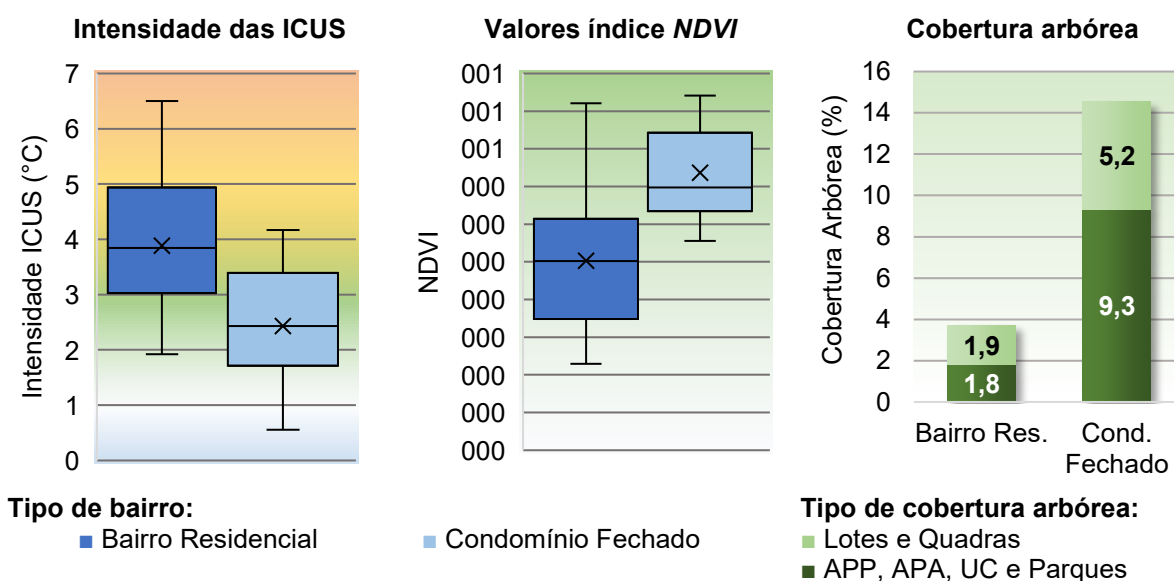
condomínios fechados no período de estudo, conforme indicado anteriormente, esta reside nas coberturas do solo predominantes em seus estágios iniciais. Enquanto bairros residenciais com taxas de ocupação inferiores ao 60% registram valores médios de *NDVI* de 3,71 y cobertura arbórea de 3,71%, condomínios fechados registram valores de 0,47 y 14,53%, respectivamente (Tabela 31 e Figura 63).

Tabela 31 - Comparação de Intensidades das ICUS, índice *NDVI* e cobertura entre Bairros Residenciais e Cond. Fechados com ocupação urbana < 60%, Estágio Inicial.

| Medida       | ICUS (°C)   |             | NDVI        |             | Cobertura arbórea média (%) |        |             |             |        |              |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|--------|-------------|-------------|--------|--------------|
|              | Bairro Res. | Cond. Fech. | Bairro Res. | Cond. Fech. | Bairro Res.                 |        |             | Cond. Fech. |        |              |
|              |             |             |             |             | Lotes...                    | APP... | Total       | Lotes...    | APP... | Total        |
| <b>Média</b> | <b>3,89</b> | <b>2,43</b> | <b>0,35</b> | <b>0,47</b> | 1,87                        | 1,84   | <b>3,71</b> | 5,21        | 9,33   | <b>14,53</b> |
| 1ro. Quart.  | 3,03        | 1,72        | 0,27        | 0,42        | 0,82                        | 0,00   | 0,97        | 0,61        | 2,85   | 3,74         |
| 3ro. Quart.  | 4,94        | 3,39        | 0,41        | 0,52        | 2,31                        | 2,37   | 5,01        | 6,90        | 16,35  | 21,81        |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 63 - Comparação de médias de Intensidade das ICUS, índice *NDVI* e cobertura, entre Bairros Residenciais e Cond. Fechados com ocupação urbana < 60%, Estágio Inicial.



Fonte: Elaboração própria.

Apesar da baixa ocupação urbana, a combinação de vegetação rasteira nos lotes vazios com a elevada percentagem de cobertura arbórea, pertencente principalmente a APP, permite que os condomínios fechados mantenham uma intensidade média 1,46°C mais baixa do que os bairros residenciais durante o seu estágio inicial, sendo estes últimos caracterizados por maior proporção de solo nu. Desta forma, os bairros residenciais apresentam um maior diferencial de intensidade durante o período de estudo, em resultado da conversão da cobertura do solo nos lotes vazios

Essa diferença se acentua com a persistência de uma grande proporção de lotes vazios durante o processo de urbanização nos bairros residenciais. Seja por abandono ou falta de manutenção, esses lotes passam por transições de solo nu para vegetação, aumentando ainda mais a diferença de intensidade em comparação com os condomínios fechados, quase equivalente à conversão de áreas construídas em áreas verdes.

Conforme Amorim (2017), os solos nus têm um albedo reduzido, retendo mais calor e, conseqüentemente, atingindo temperaturas semelhantes às de áreas densamente construídas. Silveira *et al.* (2023) e Andrade e Amorim (2023) identificaram intensidades de ICUS equivalentes a áreas construídas em áreas com solo nu, compostas por novos loteamentos ou áreas de cultivo, ao analisar o campo térmico das cidades de Joinville, Criciúma e Lages em Santa Catarina, e em Presidente Prudente – SP.

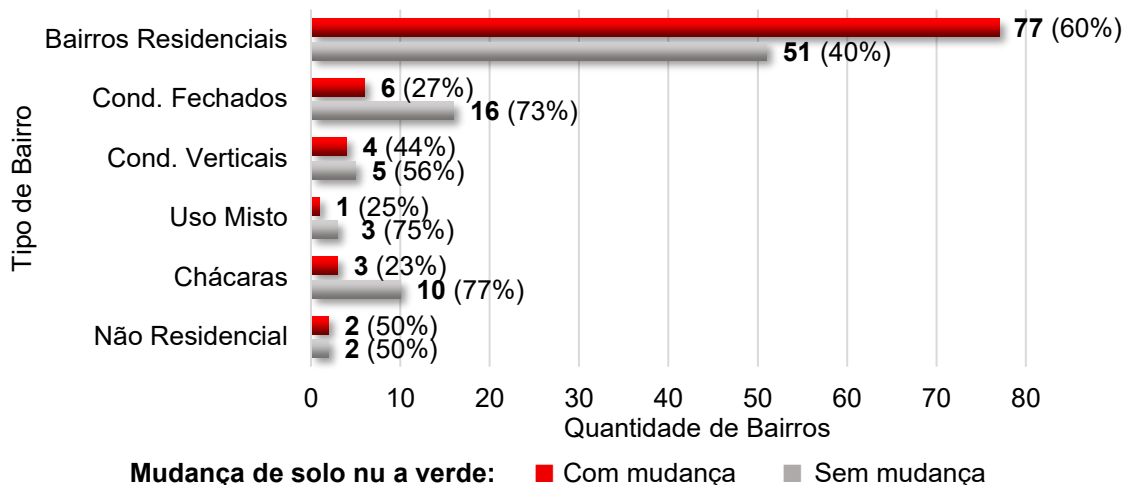
Conseqüentemente, o comportamento térmico de parcelamentos com grande proporção de solo nu pode ser equivalente ao de aqueles totalmente construídos. A legislação municipal, por meio do Decreto nº 108/2019, estabelece em seu artigo 1º “a obrigação dos proprietários, inquilinos ou outros usuários mantê-los com gramíneas, vegetação rasteira semelhante, ou cobertos por brita,...” (Goiânia, 2019). O uso de coberturas gramadas ou vegetação rasteira pode contribuir para reduzir o impacto que os lotes vazios produzem no campo térmico dos bairros, em contraste com o uso da brita, material mais compacto e com menor albedo.

No entanto, o efeito de resfriamento dos gramados depende em grande medida da disponibilidade de água, especialmente em cidades com climas secos, conforme Guha *et al.* (2018). Estudos como o desenvolvido por de Oliveira (2022) em Brasília - DF e Andrade e Amorim (2023) em Presidente Prudente – SP, mostram que áreas compostas por gramíneas e vegetação rasteira apresentam efeitos de resfriamento baixos ou nulos durante períodos secos. Nesse sentido, a implementação de protocolos de manejo de gramados, como a irrigação suplementar durante o período de estiagem, é imprescindível para a mitigação do desconforto térmico (Zhou; Wang; Cadenasso, 2017), tendo sua eficácia sido identificada nesta pesquisa, na conversão de solos nus em áreas com vegetação rasteira em lotes vazios, bem como nas configurações urbanas dos condomínios fechados.

## Mudanças de solo nu a cobertura vegetal

A mudança de solo nu para cobertura vegetal é um dos fatores identificados com maior influência na redução das ICUS durante o período do estudo. Esse processo foi identificado em 52% dos bairros analisados (93 bairros), com maior proporção em bairros residenciais (Figura 64).

Figura 64 - Proporção de bairros com mudança de solo nu a cobertura vegetal de acordo ao tipo de bairro.



Fonte: Elaboração própria.

Do total de bairros residenciais, 60% passam por esse tipo de processo (77 bairros), enquanto nos condomínios fechados isso ocorre em 27% dos bairros (6 bairros). Nos condomínios verticais e bairros de uso misto, esse processo é identificado em 44% e 25% dos bairros, o equivalente a 4 e 1 bairro, respectivamente. Nos bairros de uso não residencial, estas transições são identificadas em 50% dos bairros (2 bairros), enquanto as chácaras apresentam a menor proporção, equivalente a 23% (3 bairros).

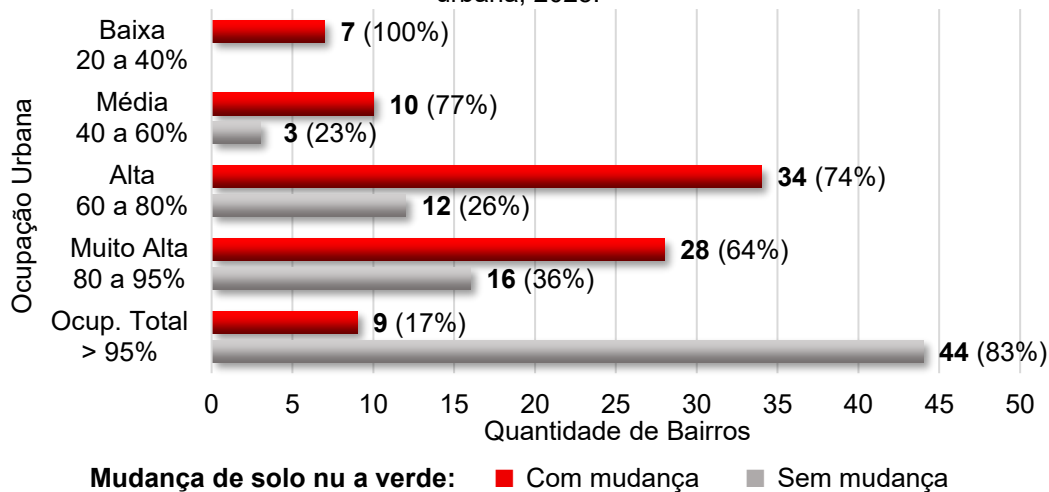
As mudanças de solo nu para vegetação estão diretamente relacionadas à proporção de lotes vazios, principais áreas onde ocorrem as transformações da cobertura do solo no espaço urbano. A figura 65 mostra a ocorrência desse processo de acordo com ocupação urbana para o ano de 2025.

A proporção de bairros que apresentam mudanças de solo nu a cobertura vegetal diminui à medida que aumenta a proporção de área ocupada. Bairros com baixa ocupação (20 a 40%) e média (40 a 60%) apresentam essas transições em 100% e 77% dos bairros, respectivamente; em contraste com bairros com ocupação muito alta (80 a 95%) e total (>95%), nos quais essas mudanças ocorrem em 64% e 17% dos bairros, respectivamente. Apesar da diminuição à medida que a ocupação



aumenta, os bairros nos quais esses processos ocorrem superam aqueles onde não ocorrem em cada categoria de ocupação, exceto naqueles com ocupação total (>95%), ressaltando a abrangência desses processos.

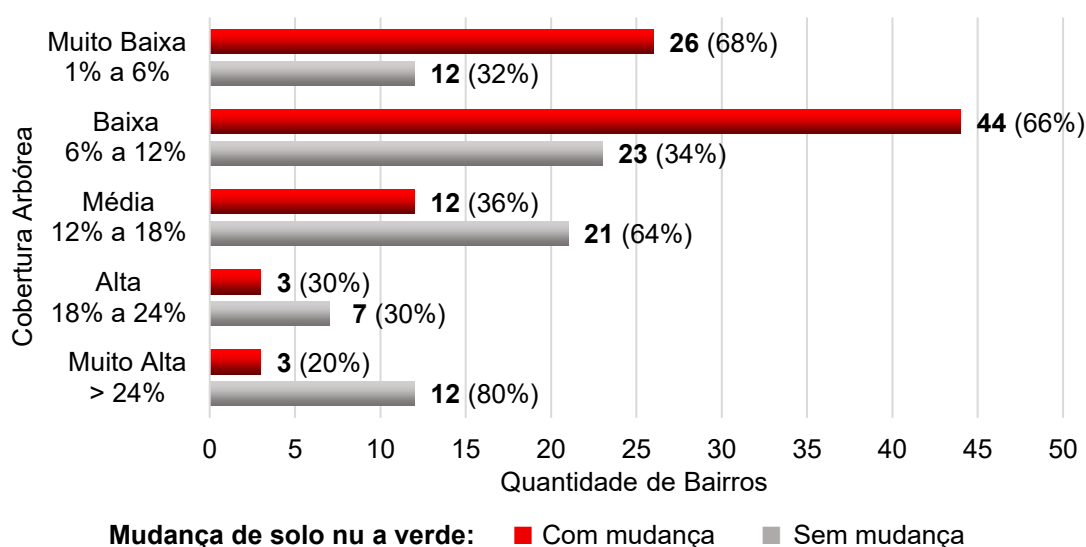
Figura 65 - Proporção de bairros com mudança de solo nu a cobertura vegetal de acordo a ocupação urbana, 2025.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme desenvolvido na seção anterior, existe uma relação entre a proporção de lotes vazios e a proporção de cobertura arbórea, que se estende à ocorrência de transições de solo nu para vegetação. A figura 66 mostra a ocorrência desses processos nos bairros analisados de acordo com a cobertura arbórea para 2025.

Figura 66 - Proporção de bairros com mudança de solo nu a cobertura vegetal de acordo a cobertura arbórea, 2025.



Fonte: Elaboração própria.

Na medida em que os bairros apresentam maior cobertura arbórea, diminuem as mudanças de solo nu para vegetação. Bairros com coberturas muito baixas (1 a 6%) e baixas (6 a 12%) apresentam a ocorrência desses processos em 68% e 66% dos bairros, respectivamente; enquanto em bairros com cobertura alta (18 a 24%) e muito alta (>24%), é identificado em 30% e 20% dos bairros, respectivamente.

Mudanças drásticas no uso e na cobertura do solo modificam as TST e, conseqüentemente, o balanço energético da superfície. As transições de coberturas com vegetação densa em áreas construídas são responsáveis pelos maiores aumentos nas TST (Sahana; Ahmed; Sajjad, 2016), inerentes às mudanças nas propriedades materiais das superfícies. No entanto, conforme descrito por Oke (2017), o processo de urbanização não é total, instantâneo, nem uniforme, produzindo ecossistemas urbanos com diferentes graus de antropização.

Conforme indicado nesta pesquisa, os solos nus registram as intensidades mais altas das ICUS depois das áreas construídas, com uma média de 3,38°C no período do estudo; enquanto as áreas com vegetação rasteira registram 1,16°C. De acordo com esses dados, as transições de solo nu a vegetação rasteira poderiam implicar uma redução média de 2,22°C, quase equivalente a diferença identificada entre bairros sem cobertura (<1%) arbórea e aqueles com cobertura alta (18 a 24%) no estágio inicial (equivalente a 2,19°C).

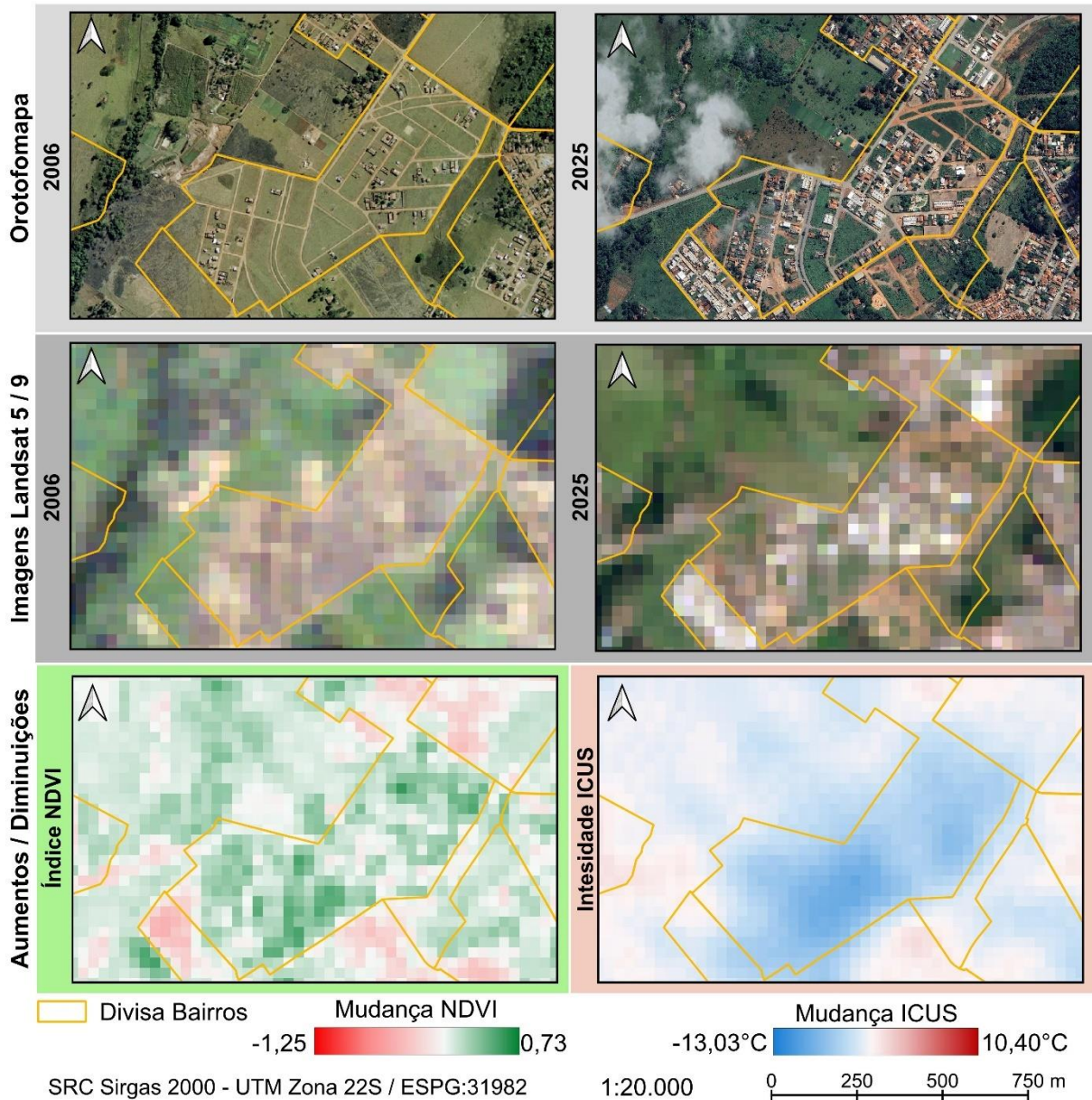
Um exemplo da influência das mudanças do solo nu para vegetação sobre as intensidades das ICUS é o bairro Residencial Della Pena, que registra a segunda maior redução média dos 180 bairros analisados (Figura 67 e Mapa 13).

Registrando uma redução de intensidade de -2,86°C durante o período, o bairro Della Pena apresenta o maior aumento nos índices *NDVI* e *SAVI*, equivalentes a 0,144 e 0,118, respectivamente, mantendo uma cobertura arbórea muito baixa (Est. Inicial = 1,44% / 2025 = 5,64%), assim como um crescimento da cobertura muito leve (4,50 pontos percentuais). As reduções são sustentadas pela persistência de grandes quantidades de lotes vazios durante o período de estudo, os quais, em 2006, apresentavam em sua maioria solos nus, transformados em áreas verdes para o 2025.

Em resumo, as mudanças de solo nu para cobertura vegetal estão presentes em mais da metade dos bairros analisados, com maior proporção em bairros residenciais, acentuando-se à medida que diminui a ocupação urbana. Uma vez que o crescimento da cobertura arbórea está relacionado com o aumento da ocupação urbana, estes

processos ocorrem em maior proporção em bairros com baixa cobertura, dificultando a determinação da influência da arborização sobre as ICUS, especialmente em loteamentos com baixa ocupação urbana.

Figura 67 – Influência das mudanças de solo nu a vegetação no bairro Della Pena, 2006-2025.

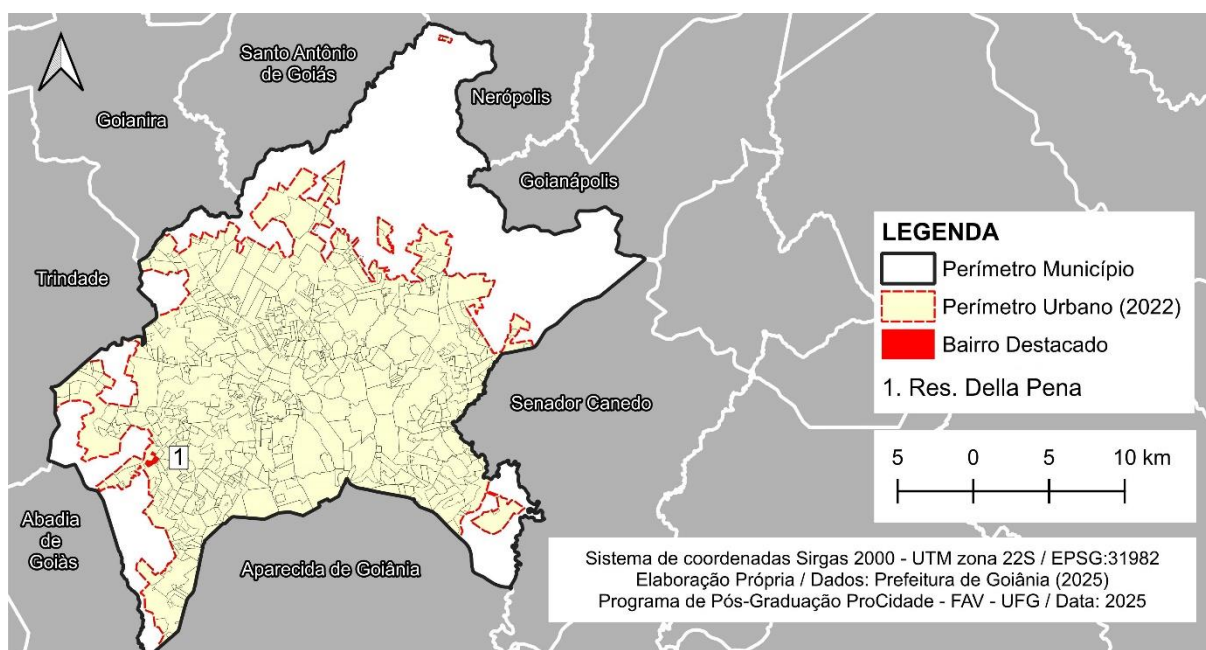


Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

A elevada proporção de bairros que apresentam estes processos na análise realizada reflete a seleção efetuada dos bairros que reduziram as suas intensidades médias das ICUS durante o período de estudo. Assim, deve-se considerar que a amostra selecionada visa identificar os processos que conduzem à redução das intensidades das ICUS e a sua relação com o comportamento da cobertura arbórea

nos bairros da cidade de Goiânia.

Mapa 13 - Localização do bairro Residencial Della Pena



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025).

### APP, APA, UC e Parques

As Áreas de Preservação Permanente (APP) percorrem toda a cidade, atravessando desde bairros periféricos até setores consolidados no centro da cidade, juntamente com Áreas de Proteção Ambiental (APA), Unidades de Conservação (UC) e parques que as acompanham, representando as principais ilhas de frescor da área urbana. O 62% (111 bairros) dos 180 bairros que apresentam reduções nas intensidades das ICUS durante o período do estudo contam com esse tipo de áreas dentro de seu perímetro. Dos 163 bairros em que se estimou a cobertura arbórea, excluindo as chácaras e os bairros de uso não residencial, estas áreas estão presentes em 60% dos bairros (97 bairros).

De o ponto de vista global, a cobertura arbórea presente nas APP, APA, UC e parques representa 35% da cobertura existente nos bairros analisados, tanto no estágio inicial como no 2025, apresentando um aumento de 1,78 pontos percentuais em relação à cobertura total (Tabela 32).

No que concerne à distinção entre os bairros associados a estas áreas de vegetação densa e aqueles que não o estão, os primeiros caracterizam-se por uma maior percentagem de cobertura arbórea e por valores mais baixos das intensidades das ICUS, tanto no estágio inicial como em 2025 (Tabelas 33, 34 e Figura 68).

Tabela 32 – Cobertura arbórea total dos bairros por tipo de cobertura (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial - 2025

| Medida    | Cobertura arbórea total |        |               |          |        |                 |                      |        |               |
|-----------|-------------------------|--------|---------------|----------|--------|-----------------|----------------------|--------|---------------|
|           | Est. Inicial (%)        |        |               | 2025 (%) |        |                 | Crescimento (pontos) |        |               |
|           | Lotes...                | APP... | Total         | Lotes... | APP... | Total           | Lotes...             | APP... | Total         |
| Cobertura | 6,14                    | 3,28   | <b>9,42</b>   | 9,42     | 5,06   | <b>14,48</b>    | 3,28                 | 1,78   | <b>5,06</b>   |
| Área (ha) | 570,42                  | 304,40 | <b>874,82</b> | 875,24   | 470,01 | <b>1.345,25</b> | 304,82               | 165,61 | <b>470,43</b> |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 33 – Cobertura arbórea média dos bairros de acordo a sua associação a APP, APA, UC e Parques (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial - 2025

| Medida       | Cobertura arbórea média (%) |             |       |              |             |       |          |              |
|--------------|-----------------------------|-------------|-------|--------------|-------------|-------|----------|--------------|
|              | Não associado               |             |       | Associado    |             |       |          |              |
|              | Est. Inicial                | 2025        | Total | Est. Inicial |             | Total | 2025     |              |
|              | Lotes...                    | Lotes...    |       | Lotes...     | APP...      |       | Lotes... | APP...       |
| <b>Média</b> | <b>3,78</b>                 | <b>7,03</b> | 4,39  | 4,02         | <b>8,41</b> | 7,91  | 7,19     | <b>15,09</b> |
| 1ro. Quart.  | 1,10                        | 4,71        | 1,17  | 0,50         | 3,62        | 4,89  | 2,24     | 9,43         |
| 3ro. Quart.  | 6,11                        | 9,39        | 6,47  | 4,44         | 10,78       | 9,75  | 10,82    | 19,08        |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34 – Intensidades médias das ICUS dos bairros de acordo a sua associação a APP, APA, UC e Parques (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial - 2025

| Medida       | Intensidade média da ICUS (°C) |             |              |             |
|--------------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|
|              | Não associado                  |             | Associado    |             |
|              | Est. Inicial                   | 2025        | Est. Inicial | 2025        |
| <b>Média</b> | <b>4,45</b>                    | <b>3,63</b> | <b>3,51</b>  | <b>2,88</b> |
| 1ro. Quart.  | 3,51                           | 2,91        | 2,67         | 1,97        |
| 3ro. Quart.  | 5,30                           | 4,40        | 4,21         | 3,64        |

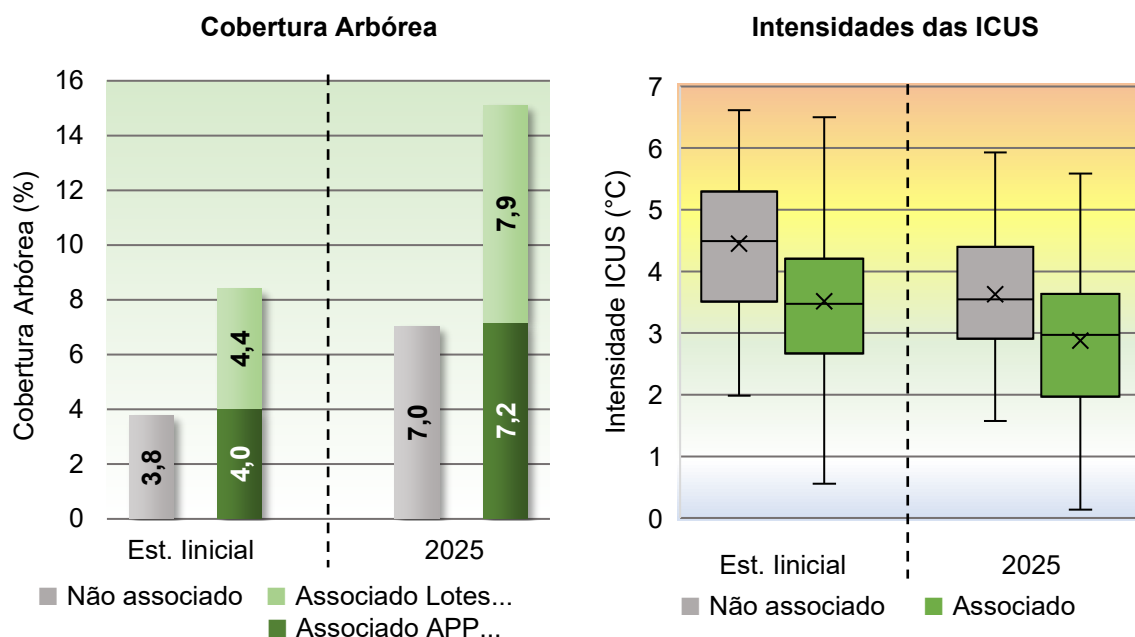
Fonte: Elaboração própria.

Os bairros associados apresentam médias de cobertura no estágio inicial e em 2025 de 8,41% e 15,09%, respectivamente, representando 48% da cobertura para ambos os momentos. Em contrapartida, os bairros não associados apresentam médias de cobertura de 3,78% e 7,03% para cada momento, menos de metade em comparação com os associados.

Os bairros associados mantêm intensidades médias das ICUS durante o seu estágio inicial e para o 2025 de 3,51 e 2,88°C, respectivamente, em comparação com os bairros não associados, que apresentam médias de 4,45 e 3,63°C, respectivamente. A inclusão da cobertura arbórea densa pertencente as APP, APA, UC e Parques, permite que os bairros associados mantenham intensidades médias entre 0,75 e 0,94°C mais baixas do que aqueles que não dispõem dessas áreas dentro dos seus perímetros.

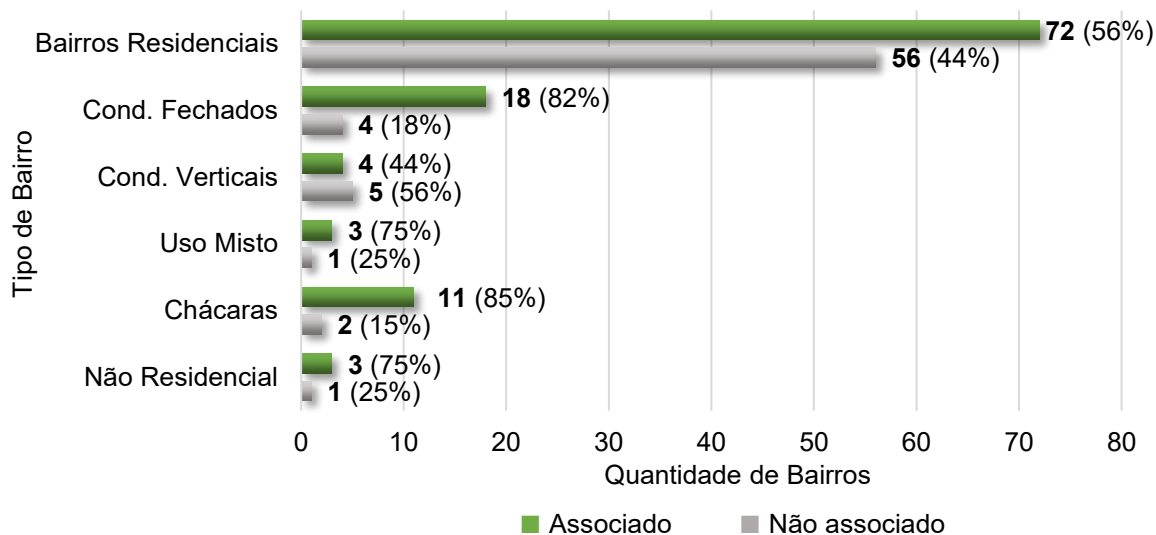


Figura 68 - Média da cobertura arbórea e Intensidade das ICUS dos bairros de acordo a sua associação a APP, APA, UC e Parques (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial - 2025



Entre os tipos de bairros analisados, as chácaras apresentam a maior proporção de unidades associadas a APP, APA, UC e Parques, o que equivale a 85% dos bairros (11 bairros), seguidas pelos condomínios fechados, com uma proporção de 82% (18 bairros) (Figura 69). O 75% dos bairros de uso misto e uso não residencial estão associados a estas áreas (3 bairros cada), enquanto os bairros residenciais apresentam uma proporção de 56% (72 bairros). Os condomínios verticais apresentam a menor proporção, com 44% associados a estas áreas (4 bairros).

Figura 69 - Proporção de bairros associados a APP, APA, UC e Parques por tipo de bairro.



No que diz respeito à proporção de cobertura arbórea pertencente a APP, APA, UC e parques, os bairros de uso misto e os condomínios verticais apresentam a maior proporção nos seus estágios iniciais, atingindo 55% da sua cobertura, seguidos pelos condomínios fechados com 46,1% e pelos bairros residenciais com 26,7% (Tabela 35). Para 2025, os bairros de uso misto mantêm a maior proporção, equivalente a 62,8%, seguidos pelos condomínios fechados (42,3%), bairros residenciais (28,9%) e condomínios verticais (27,0%).

Tabela 35 – Proporção de cobertura arbórea pertencente APP, APA, UC e Parques por tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), Estágio Inicial – 2025

| Tipo de Bairro     | Estágio Inicial          |             |                        |             |             | 2025                     |             |                        |             |             |
|--------------------|--------------------------|-------------|------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|------------------------|-------------|-------------|
|                    | Lotes...<br>Área<br>(ha) | Cob.<br>(%) | APP...<br>Área<br>(ha) | Cob.<br>(%) | Prop        | Lotes...<br>Área<br>(ha) | Cob.<br>(%) | APP...<br>Área<br>(ha) | Cob.<br>(%) | Prop        |
| Bairro Residencial | 378,43                   | 5,42        | 138,04                 | 1,98        | <b>26,7</b> | 537,05                   | 7,69        | 218,56                 | 3,13        | <b>28,9</b> |
| Cond. Fechado      | 187,08                   | 9,06        | 160,25                 | 7,76        | <b>46,1</b> | 325,85                   | 15,78       | 239,15                 | 11,58       | <b>42,3</b> |
| Cond. Vertical     | 1,63                     | 1,95        | 2,04                   | 2,43        | <b>55,5</b> | 6,47                     | 7,72        | 2,39                   | 2,85        | <b>27,0</b> |
| Uso Misto          | 3,27                     | 2,07        | 4,09                   | 2,59        | <b>55,5</b> | 5,87                     | 3,72        | 9,91                   | 6,27        | <b>62,8</b> |

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar o comportamento médio da cobertura arbórea e as intensidades das ICUS por tipo de bairro, entre bairros associados e não associados no 2025, mantém-se a tendência observada anteriormente (Tabela 36 e Figura 70). Dentro de cada tipo de bairro, os bairros associados apresentam proporções de cobertura arbórea superiores em comparação com os não associados, o que se reflete nas intensidades das ICUS.

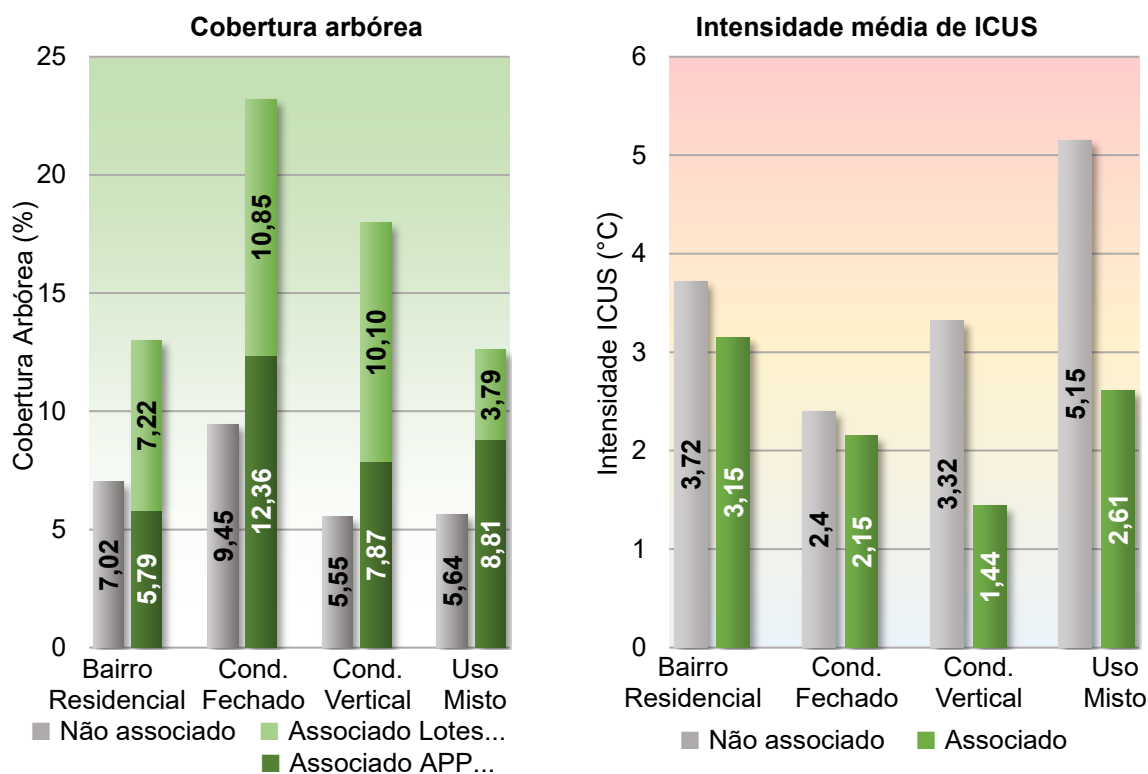
Tabela 36 - Médias de cobertura arbórea e intensidade das ICUS entre bairros associados e não associados de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), 2025

| Tipo de Bairro       | Não associados            |           | Associados                |        |       | ICUS (°C) |
|----------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|--------|-------|-----------|
|                      | Cobertura (%)<br>Lotes... | ICUS (°C) | Cobertura (%)<br>Lotes... | APP... | Total |           |
| Bairros Residenciais | 7,02                      | 3,72      | 7,22                      | 5,79   | 13,01 | 3,15      |
| Cond. Fechados       | 9,45                      | 2,40      | 10,85                     | 12,36  | 21,22 | 2,15      |
| Cond. Verticais      | 5,55                      | 3,32      | 10,10                     | 7,87   | 17,96 | 1,44      |
| Uso Misto            | 5,64                      | 5,15      | 3,79                      | 8,81   | 12,60 | 2,61      |

Fonte: Elaboração própria.



Figura 70 – Médias de cobertura arbórea e intensidade das ICUS entre bairros associados e não associados, de acordo ao tipo de bairro (excluindo chácaras e uso não residencial), 2025



Fonte: Elaboração própria.

Os condomínios fechados apresentam a maior média de cobertura nos bairros associados, atingindo 21,22%, dos quais a maior proporção corresponde à cobertura em APP, APA, UC e parques, resultando numa intensidade média das ICUS de 2,15°C. Os bairros não associados desta mesma tipologia atingem uma média de cobertura de 9,45% e uma intensidade de 2,40°C.

Os condomínios verticais apresentam uma cobertura média de 17,96% nos bairros associados, atingindo uma intensidade média de 1,44°C; em contraste com os não associados, que atingem uma cobertura média de 5,55% e uma intensidade de 3,32°C.

Os bairros residenciais associados atingem uma cobertura média de 13,01% e uma intensidade de 3,15°C, enquanto os não associados atingem uma cobertura média de 7,02% e uma intensidade de 3,72°C.

Por último, os bairros de uso misto associados atingem uma cobertura média de 12,60% e uma intensidade de 2,61°C, enquanto os não associados apresentam uma cobertura de 5,64% e registam a maior intensidade em comparação com os restantes bairros, equivalente a 5,15°C.

Um exemplo da influência da densificação da vegetação nas APP e UC, bem

como sua integração ao tecido urbano dos bairros, é o condomínio fechado Jardins Madri (Figura 71 e Mapa 14). Apesar deste bairro apresentar reduções nos índices *NDVI* e *SAVI* de -0,005, registra um crescimento na cobertura arbórea de 11,97 pontos percentuais (2006 = 8,99% / 2025 = 20,64%) e uma redução de -1,28°C nas intensidades das ICUS, resultado de um alto crescimento urbano, acompanhado de arborização urbana em áreas públicas, APP e UC.

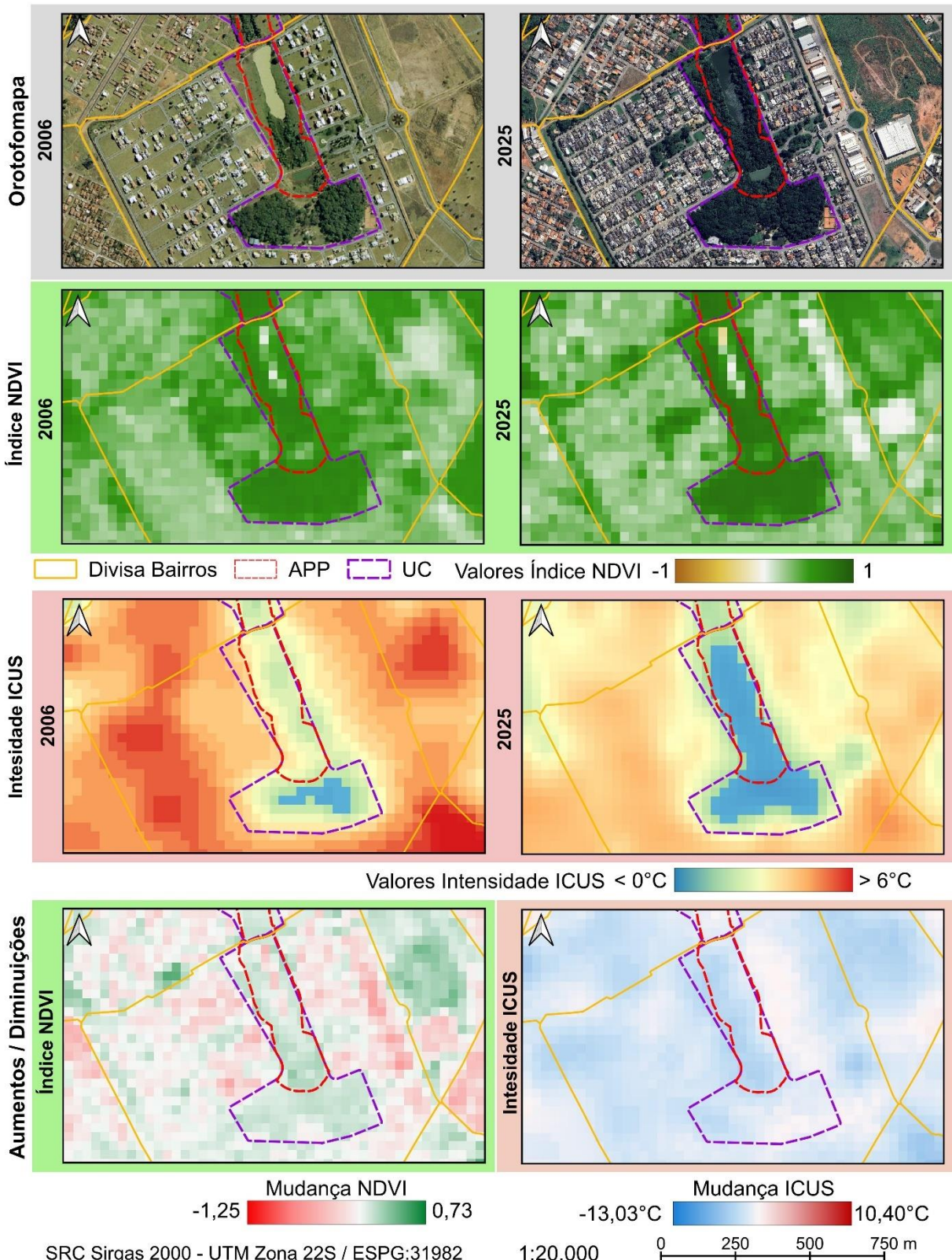
Na figura 71, podem-se observar as reduções no índice *NDVI*, resultado da substituição de solos com vegetação rasteira, que caracterizam os lotes vazios desse tipo de bairro, por áreas construídas. Também podem ser observados aumentos de vegetação em áreas dentro do tecido do bairro, como na APP e UC, associados à redução das intensidades das ICUS no período.

As APP representam as principais ilhas de frescor da cidade, que atravessam desde bairros periféricos até os setores centrais e mais consolidados, configuração observada tanto em Goiânia quanto em outras cidades brasileiras (Andrade; Amorim, 2023; Costa *et al.*, 2023; Gomes; Fuzeto; Prates, 2020; Nascimento; Barros, 2009; Paiva; Souza, 2024). Constituída principalmente por Mata de Galeria e Mata ciliar, a vegetação que acompanha os cursos d'água no Cerrado formam estruturas de dossel contínuo, que atingem coberturas entre 50% e 95%, dependendo da época do ano (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008). Essa configuração, somada à presença de corpos d'água, proporciona grande sombreamento e capacidade de evapotranspiração, os dois fatores identificados pela literatura que promovem o resfriamento na arborização (Gartland, 2008; Rahman *et al.*, 2020).

Diversos estudos reportaram uma maior capacidade de resfriamento das áreas verdes na medida que aumenta seu tamanho. De acordo com Ananyeva e Emmanuel (2023), áreas arborizadas com raio de 50 a 100m em contextos urbanos têm maior impacto sobre o calor urbano, enquanto agrupamentos de 10 a 20m proporcionam efeitos de resfriamento fracos. Xiao *et al.* (2018) identificam aumentos nos efeitos de resfriamento de 1,75°C para parques pequenos (< 4 ha), 2,66°C para parques médios (4-10 ha) e 3,32°C em parques grandes (> 10 ha). Monteiro *et al.* (2016) demonstraram que áreas verdes de 3 a 5 hectares podem produzir efeitos de resfriamento que se estendem entre 70 e 120m. Dessa forma, as APP representam grandes áreas de vegetação densa com forte potencial de resfriamento, sendo oportunidades para gerar corredores verdes com amplo impacto sobre as ICU, como demonstrado na cidade de

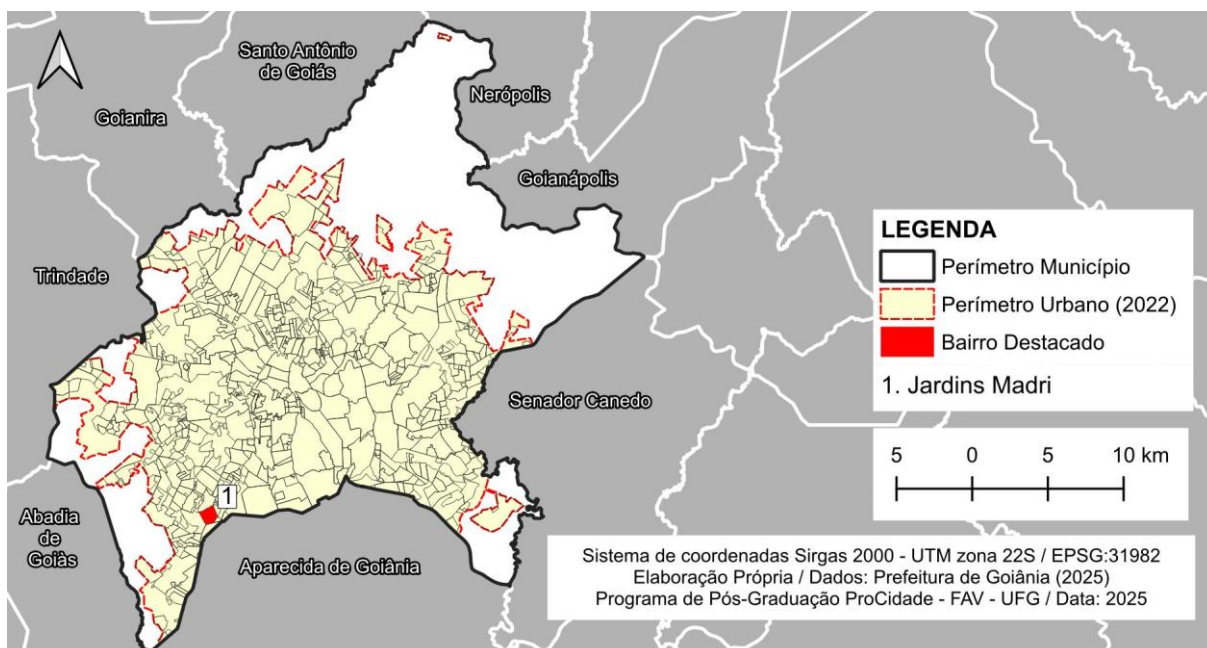
Medellín, na Colômbia.

Figura 71 – Influência da APP no bairro Jardins Madri, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

Mapa 14 - Localização do bairro Jardins Madri



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025).

Além dos benefícios no campo térmico, Fernandes *et al.* (2016) destacam que as matas de galeria atuam como corredores ecológicos que fomentam a conectividade e o fluxo gênico entre populações, servindo como refúgio para a fauna. Ademais, essas formações vegetais operam como barreiras físicas entre os meios terrestre e aquático, mitigando a poluição, a sedimentação e a erosão nos cursos d'água.

Desta forma, os bairros que integram APP, APA, UC e Parques dentro de seus perímetros, se beneficiam dos efeitos de resfriamento da arborização densa e dos cursos d'água que as compõem. A integração desses espaços ao tecido urbano permite a redução substancial das intensidades das ICUS, além de incorporar espaços de lazer e esportes, o que foi identificado em maior proporção nos condomínios fechados.

### Outros fatores

A análise dos bairros que não apresentaram aumentos nos índices de vegetação, permitiu a identificação de outros fatores que promovem reduções nas intensidades das ICUS.

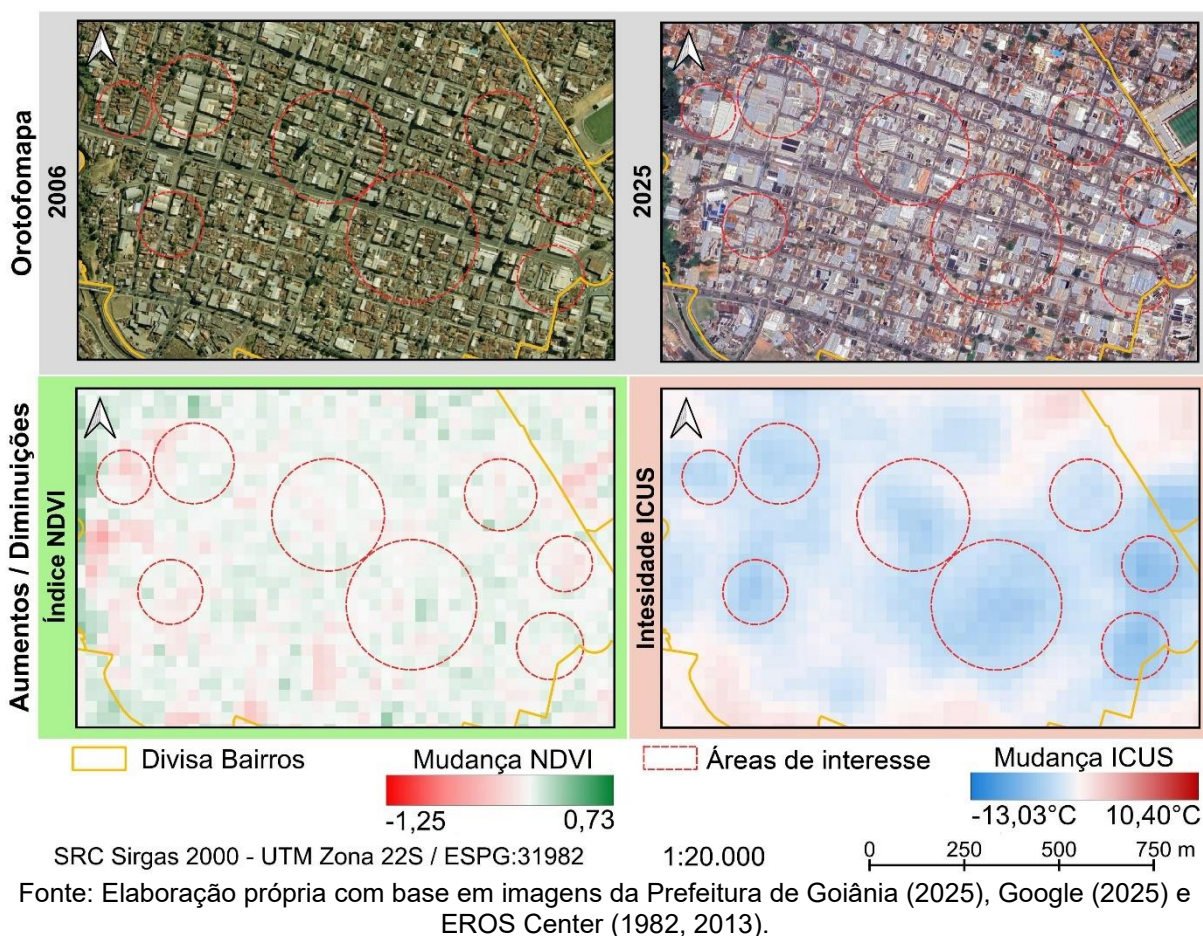
A influência das coberturas refletivas foi identificada em 36 bairros, dos quais 14 correspondem a bairros que não apresentaram aumentos nos índices de vegetação. Essa influência é mais evidente em setores com grandes áreas comerciais ou industriais, onde o uso dessas coberturas aumenta o albedo das superfícies expostas



à radiação solar e reduz as intensidades das ICUS.

A figura 72 mostra esse efeito na zona comercial ao redor da Av. Anhanguera, no Setor Campinas. Nesse bairro registrou-se uma diminuição na intensidade média das ICUS durante o período de  $-0,72^{\circ}\text{C}$  e aumento de apenas 0,016 e 0,021 nos índices *NDVI* e *SAVI*, sem apresentar crescimento na cobertura arbórea (2006 e 2025 = 6,37%). O mapa 15, no final desta secção, apresenta a localização dos bairros utilizados como exemplo.

Figura 72 - Comportamento das coberturas refletivas no Setor Campinas, 2006-2025.



Como se pode observar nas imagens de 2006 e 2025 (figura 72), não há aumentos consideráveis na vegetação urbana na área. Nas áreas sinalizadas como de interesse, identificam-se diminuições nas intensidades das ICUS que não correspondem a aumentos nos níveis do *NDVI*, observando-se coberturas com um tom mais azul, relacionadas à substituição de telhados existentes por materiais mais refletivos. No Setor Campinas, foram identificadas nessas áreas reduções máximas no nível de *pixel* entre  $-2,99$  e  $-4,34^{\circ}\text{C}$  nas intensidades durante o período do estudo.

Coberturas com baixo albedo, que geralmente apresentam cores escuras,

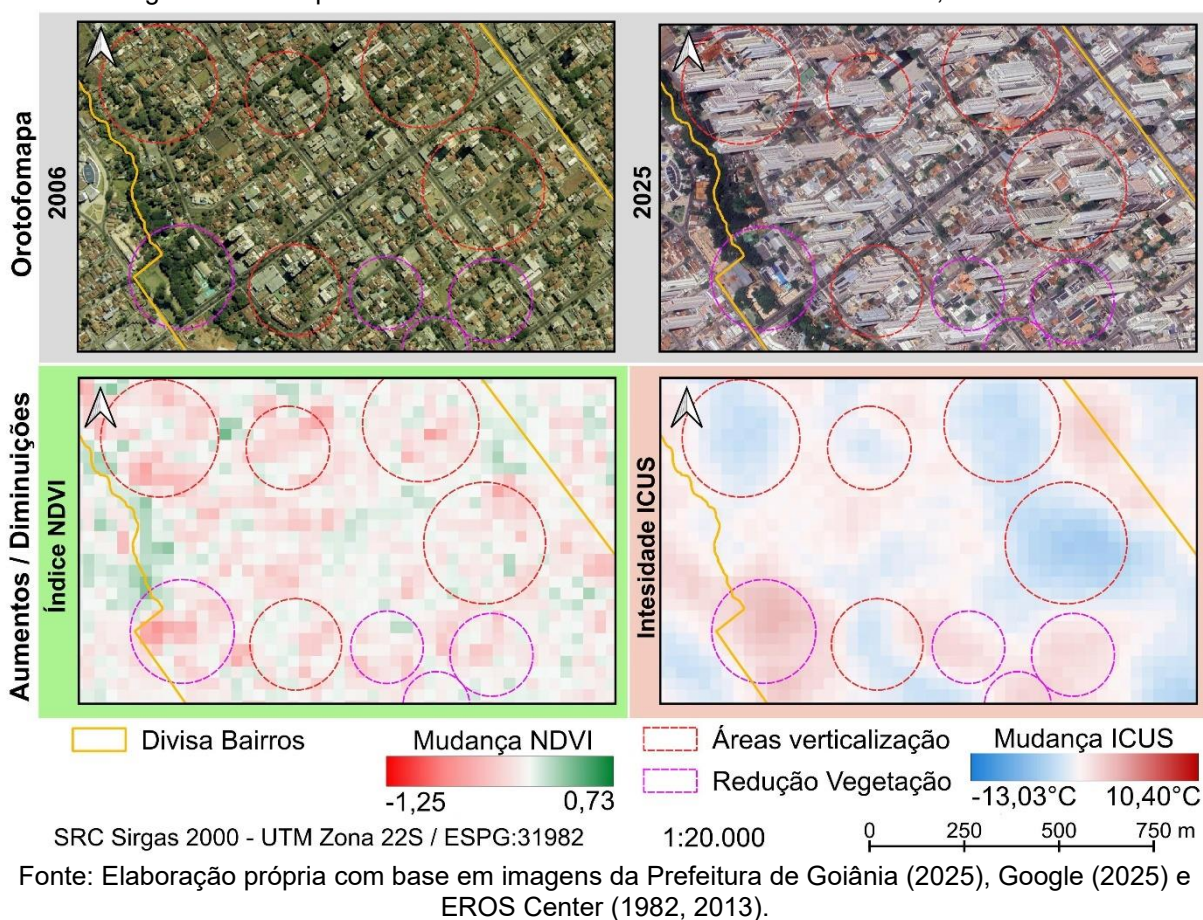
podem atingir temperaturas superficiais de até 50°C acima da temperatura ambiente do ar, enquanto superfícies com alto albedo podem atingir diferenças de apenas 10°C (Berdahl; Bretz, 1997). Por meio de simulação, Wang, Berardi e Akbari (2016) demonstraram que aumentos no albedo das coberturas de 0,3 a 0,7 em edifícios altos resultam em reduções nas temperaturas superficiais de 9,6°C, enquanto em áreas de residências unifamiliares (baixa altura) elas foram reduzidas em 11,3°C, o equivalente a uma redução aproximada de 50% em relação aos modelos básicos (sem alteração do albedo). Na mesma linha, Chatterjee *et al.* (2019) identificaram reduções nas temperaturas superficiais em edifícios de média altura de 4,6°C, enquanto que em edifícios compactos de baixa altura e abertos de baixa altura identificaram reduções de 5,6 e 6,3°C, respectivamente, ao aumentar o albedo das coberturas de 0,36 a 0,81.

Ambos os estudos mencionados, e em concordância com o afirmado por Middel *et al.* (2016), o aumento do albedo nas coberturas (estratégia denominada *Cool Roof* – Telhado Fresco) é mais eficaz em contextos de edifícios baixos abertos e compactos, em comparação com ambientes de edifícios de média altura. Quanto maior a altura dos edifícios, menor o efeito de resfriamento no nível do solo (pedestre), sendo essa estratégia mais eficaz em contextos de edifícios baixos. Dessa forma, bairros baixos e compactos de Goiânia, com coberturas predominantemente de telhas de barro, poderiam se beneficiar do uso de cores mais claras ou de materiais mais refletivos nas coberturas.

Outro fator identificado é o efeito causado pela sombra dos edifícios, que reduz o aquecimento das superfícies nas áreas opostas à direção do sol, reduzindo as TST no momento da captura das imagens. Esse efeito foi claramente identificado em quatro bairros, entre os quais se encontram o Setor Bueno e Marista, bairros nos quais foram observados processos de verticalização e diminuição de cobertura arbórea durante o período do estudo (Figuras 73 e 74).

Nos setores Bueno e Marista, foram registradas reduções nas médias das intensidades das ICUS de -0,04 e -0,46°C, respectivamente, e reduções nos índices *NDVI* (-0,021 e -0,036) e *SAVI* (-0,002 e -0,007), bem como a supressão de cobertura arbórea durante o período (Bueno = -1,85 pontos / Marista = -2,57 pontos). As figuras 77 e 78 mostram o comportamento das intensidades das ICUS e do índice *NDVI*, nos quais é possível identificar a diminuição das intensidades em algumas áreas verticalizadas, bem como o aumento em outras onde houve supressão da vegetação.

Figura 73 - Comportamento das áreas verticalizadas no Setor Bueno, 2006-2025.



Nas áreas identificadas no Setor Bueno (Figura 73), foram registradas reduções na intensidade das ICUS de entre 1,27 e 3,43°C ao nível do *pixel*, enquanto no Setor Marista elas atingiram entre 2,36 e 4,49°C (Figura 74), gerando efeitos de ilhas de frescor ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) com pouca presença de vegetação.

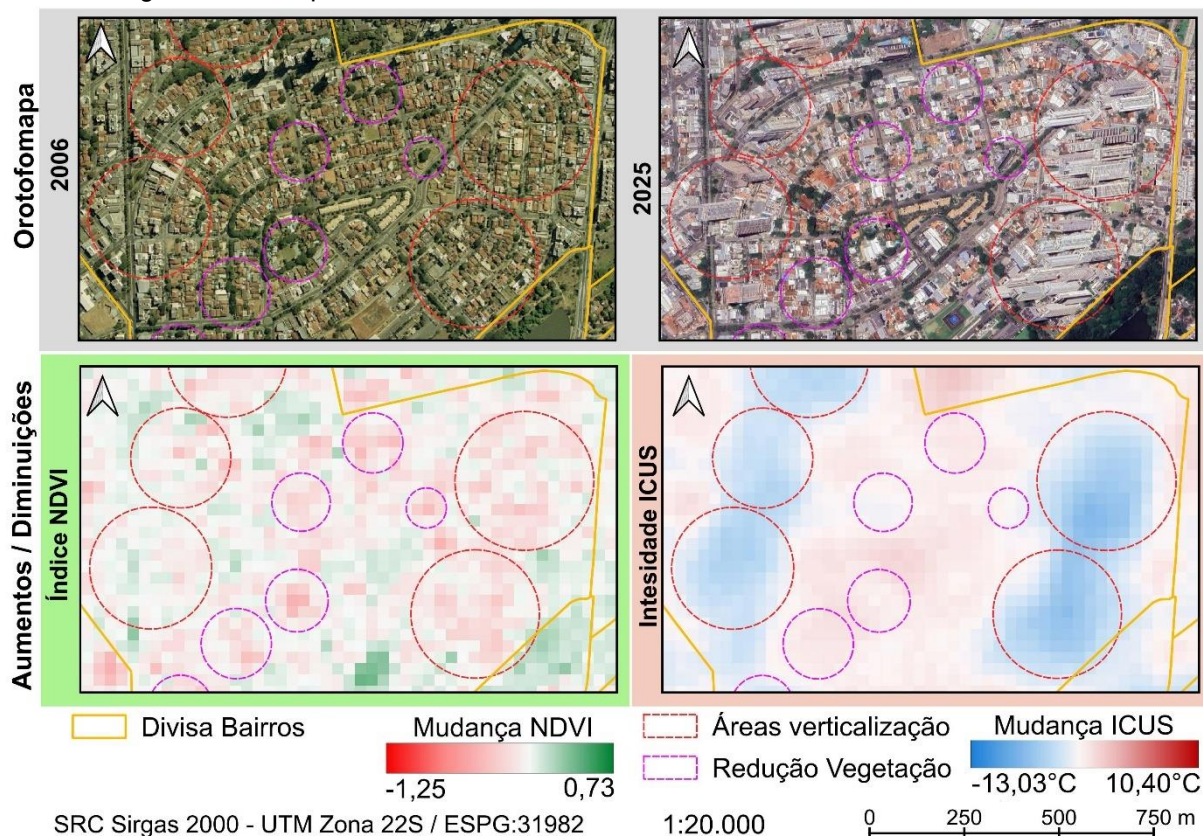
De acordo com Oke (2002), os efeitos radiativos mais importantes, decorrentes da inserção dos edifícios no contexto urbano, são uma diminuição da radiação solar recebida pelas áreas sombreadas, um aumento local na recepção solar pela reflexão das paredes expostas ao sol e a redução do resfriamento líquido por ondas longas das superfícies próximas ao edifício. Dessa forma, a projeção de sombra pode reduzir as TST, enquanto a geometria dos *canyons* pode aumentar a reflexão do calor entre as superfícies verticais e dificultar sua liberação na atmosfera, ao reduzir o fator de céu visível.

Estudos focados na análise da atmosfera abaixo do nível dos edifícios e árvores identificaram a formação de ilhas de frescor resultantes da sombra projetada por edifícios altos durante o dia (Chow; Roth, 2006; Roth, 2013). Edifícios mais altos tendem a projetar mais sombra, reduzindo a incidência direta da radiação solar sobre



as superfícies (Morakinyo *et al.*, 2017; Nath; Ni-Meister; Özdoğan, 2021). Outros efeitos relatados, que podem ser benéficos para a redução das temperaturas, são o aumento da velocidade do vento, que depende em grande medida das condições locais e da geometria adotada (Nogueira *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2021).

Figura 74 - Comportamento das áreas verticalizadas no Setor Marista, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

No que tange à arborização urbana em áreas verticalizadas, somente em 2021, por meio da Lei nº 10.606 de 25/03/2021, estabeleceram-se critérios para o plantio de árvores nessas tipologias construtivas, apesar de a cidade vivenciar esses processos desde a década de 1960 (Nascimento; Oliveira, 2015). Ao estipular a obrigatoriedade do plantio de dois espécimes nativos por unidade imobiliária (residencial ou comercial) em edificações de uso coletivo, em áreas designadas pela AMMA, a legislação visa mitigar a reduzida capacidade dessas tipologias em abrigar arborização, priorizando a execução no próprio bairro do empreendimento (Goiânia, 2021).

Dessa forma, bairros com extensas áreas verticalizadas, como os setores Bueno e Marista, que apresentam médias de intensidade de ICUS de 3,89 e 3,95°C (intensidade moderada) para 2025, bem como reduções na cobertura arbórea durante

o período 2006–2025, evidenciam a necessidade de incrementar a cobertura arbórea nas adjacências desses empreendimentos, visando mitigar as consequências resultantes do aumento da densidade construída e a redução da cobertura arbórea.

No entanto, é preciso considerar certas condições para a implantação de arborização nesses contextos. Autores como Helletsgruber *et al.* (2020) e Thom *et al.* (2016) indicam que a vegetação urbana e as árvores de sombra são menos eficazes em locais com sombreamento de edifícios altos. Morakinyo *et al.* (2017) apontam que a presença de árvores altas com copas densas entre grandes edificações pode obstruir a dissipação de energia térmica para a atmosfera, resultando em desconforto térmico no período noturno (2017). Assim, a inserção da arborização urbana como estratégia de mitigação em contextos verticalizados deve ser projetada buscando maximizar a ventilação e a dissipação de energia para a atmosfera.

Outro processo identificado durante o análise são as mudanças na cobertura do solo em áreas adjacentes, as quais podem ter impactos que se estendem para o interior dos perímetros dos bairros. Essa influência foi identificada em oito bairros, dos quais cinco correspondem a mudanças na cobertura do solo em terrenos agrícolas adjacentes e três a crescimento de vegetação em APP ou de arborização fora do perímetro do bairro.

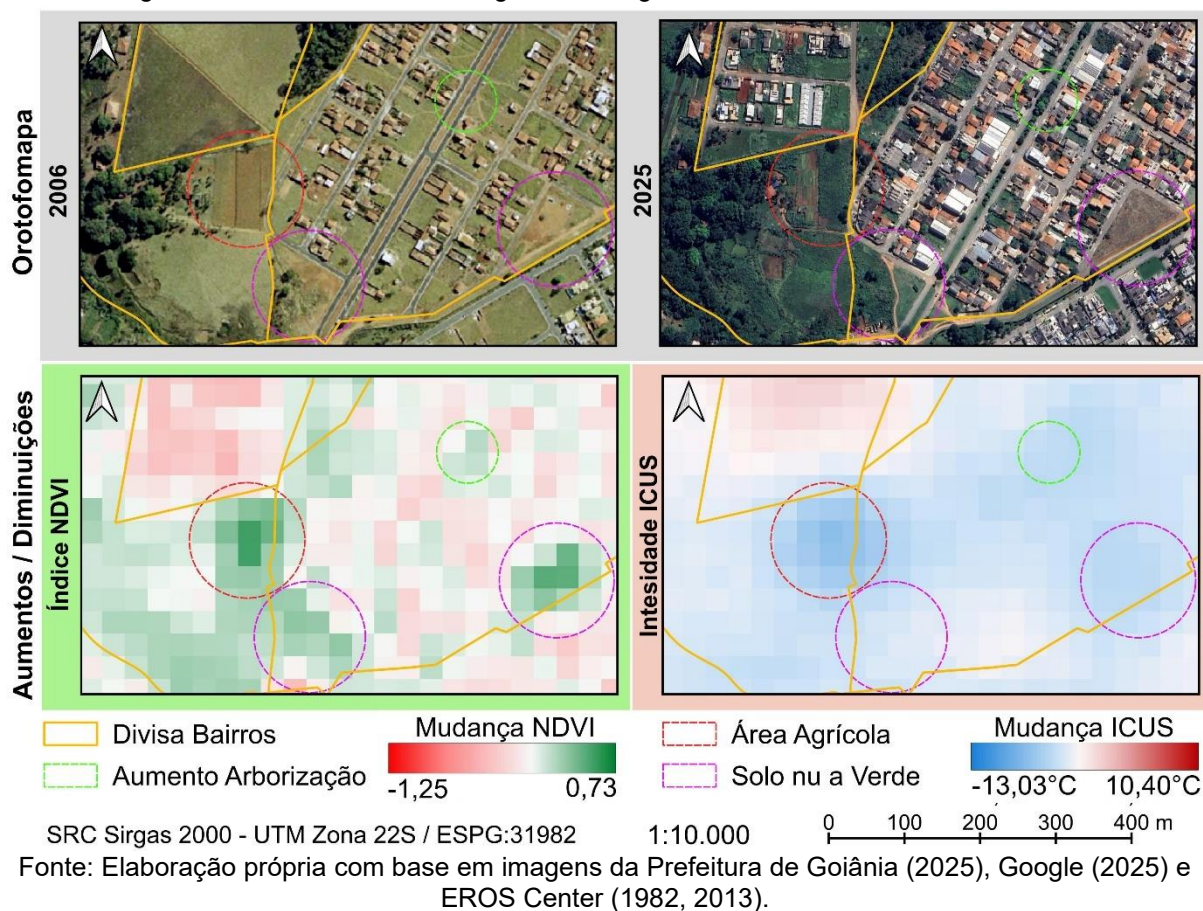
Na figura 75, pode-se observar a área sudoeste do bairro Center Ville, onde há um terreno agrícola adjacente ao perímetro do bairro. Em 2006, a área apresentava solo nu, transformando-se durante o período em vegetação, produzindo diminuições nas intensidades das ICUS de entre  $-2,59$  a  $-3,5^{\circ}\text{C}$  ao nível do *pixel* que se estendem aproximadamente 45m para o interior do perímetro do bairro.

Outros processos podem ser identificados dentro do bairro, como a transição de solos nus para áreas verdes em lotes e quadras vazias, bem como o aumento da arborização na Av. Center, ambos processos ligados à diminuição das intensidades das ICUS.

Em relação ao crescimento de vegetação em áreas adjacentes, a figura 80 mostra o bairro residencial Privê Ilhas do Caribe. O bairro apresenta uma diminuição de  $-1,19^{\circ}\text{C}$  nas intensidades das ICUS entre 2006-2025, bem como nos índices *NDVI* e *SAVI* de  $-0,063$  e  $-0,044$ , respectivamente, registrando um crescimento de 7,24 pontos percentuais na cobertura arbórea (2006 = 0,11% / 2025 = 7,35%). Neste pequeno bairro, é possível observar o aumento da vegetação ao redor do perímetro,

produzindo reduções nas intensidades das ICUS que se estendem para o interior.

Figura 75 – Influência da área agrícola contígua ao Bairro Center Ville, 2006-2025.

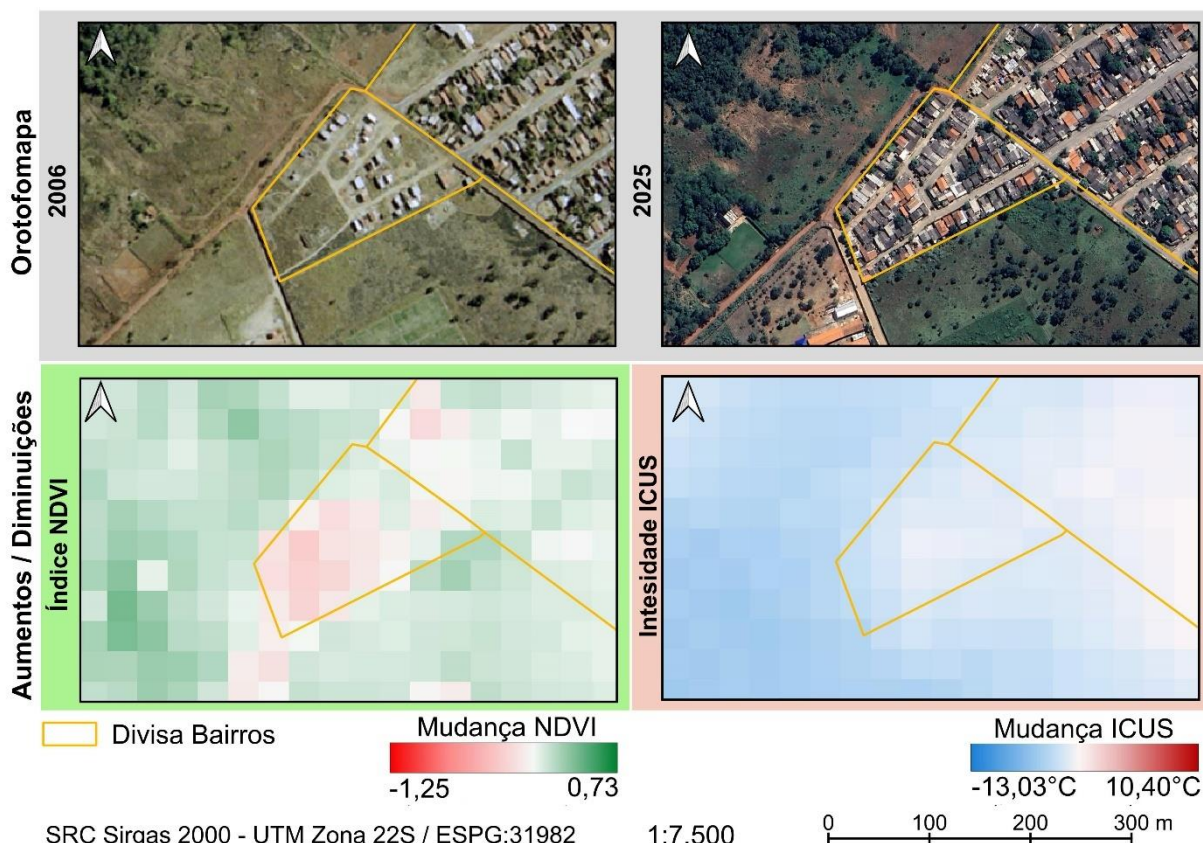


Conforme indicado por Sahana, Ahmed e Sajjad (2016), mudanças drásticas no uso e na cobertura do solo produzem alterações no balanço energético da superfície e, consequentemente, modificam as TST. Estudos realizados no contexto brasileiro (Costa *et al.*, 2023; Santiago; Gomes, 2016; Silveira *et al.*, 2023) e internacional (Deng *et al.*, 2018) identificam áreas de cultivo com TST próximas às de áreas construídas, originando ilhas de calor não associadas a processos de urbanização.

Assim como as áreas verdes podem produzir efeitos de resfriamento além de seus limites (Kong *et al.*, 2014; Monteiro *et al.*, 2016), as áreas de cultivo em estado de solo nu podem aumentar as temperaturas das áreas urbanas adjacentes, especialmente durante o período seco, quando as baixas precipitações diminuem radicalmente a capacidade de resfriamento. Dessa forma, devem ser considerados os impactos das áreas de cultivo no contexto urbano, destacando a importância do desenvolvimento de estratégias que diminuam seus efeitos durante as fases iniciais da atividade agrícola, bem como durante os períodos de seca.



Figura 76 – Influência de crescimento de vegetação contígua ao Privê Ilhas do Caribe, 2006-2025.



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025), Google (2025) e EROS Center (1982, 2013).

Os fatores identificados nesta seção, apesar de serem menos frequentes, produzem desvios que dificultam a determinação da influência da arborização sobre as intensidades das ICUS. Os múltiplos elementos que intervêm na definição do campo térmico da cidade, combinada com o dinamismo dos processos de urbanização, aponta para a necessidade de combinar estratégias para maximizar a mitigação dos efeitos das ICUS.

Por meio da simulação, técnica utilizada para determinar o impacto das estratégias de mitigação nas ICU (Gartland, 2008), Wang, Berardi e Akbari (2016) e Chatterjee *et al.* (2019) avaliam a eficiência da implementação da estratégia de Cidade Fresca (*cool city*) nas cidades de Toronto – Canadá e na área metropolitana de Calcutá – Índia, respectivamente.

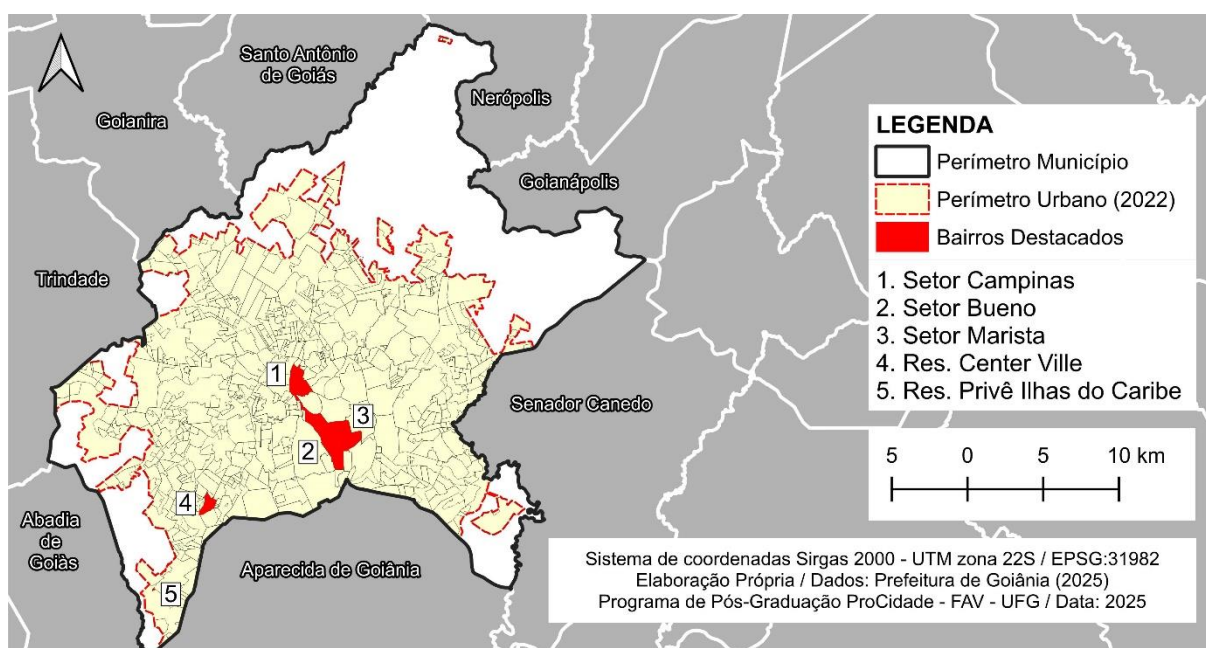
Na cidade de Toronto, a implementação da estratégia cidade fresca, que consiste na incorporação de arborização urbana e no aumento do albedo dos pavimentos e coberturas, poderia reduzir a temperatura do ar durante o verão entre 0,75 e 0,80°C, sendo o aumento da cobertura arbórea em 10% responsável por

reduções entre 0,6 e 0,8°C (Wang; Berardi; Akbari, 2016).

No estudo da área metropolitana de Calcutá, a estratégia de cidade fresca poderia reduzir a temperatura do ar uma média de 0,7 a 1,1°C, sendo o aumento da cobertura arbórea de 5 a 15% responsável pela redução média de 0,5°C. Além disso, este estudo demonstra que estratégias relacionadas ao aumento do albedo em coberturas e pavimentos têm um impacto maior em grandes cidades compactas com altos níveis de urbanização associadas a climas temperados, em contraste com cidades em climas tropicais pertencentes a países em desenvolvimento. As características materiais que compõem a massa construída dominam em grande medida o comportamento térmico das cidades em países desenvolvidos, alcançando maiores reduções de temperatura através do aumento do albedo das superfícies (Chatterjee *et al.*, 2019).

Assim, a combinação de estratégias como coberturas refletivas e pavimentos de alto albedo, juntamente com o aumento da cobertura arbórea, poderia proporcionar melhorias substanciais no campo térmico dos bairros. A aplicação de modelos de simulação dessas estratégias, de acordo com as diferentes configurações urbanas encontradas na cidade de Goiânia, poderia fornecer informações precisas para a implementação de políticas públicas voltadas para a melhoria do conforto térmico da cidade, o que se traduz em múltiplos benefícios para seus habitantes.

Mapa 15 - Localização dos bairros utilizados como exemplo na seção “Outros fatores”



Fonte: Elaboração própria com base em imagens da Prefeitura de Goiânia (2025).

### 3.2.3 Influência da cobertura arbórea sobre as intensidades das ICUS

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, na medida em que existe uma maior proporção de lotes vazios (menor ocupação urbana), as alterações na cobertura do solo têm uma influência maior do que a cobertura arbórea no comportamento das ICUS. Além disso, o aumento da cobertura arbórea atrelado ao crescimento urbano, dificulta a determinação da influência da arborização, especialmente à medida que a ocupação urbana diminui.

Com o objetivo de reduzir os desvios decorrentes da presença de lotes vazios, os bairros foram agrupados de acordo com as categorias de ocupação urbana previamente definidas. A tabela 37 e a figura 77 apresentam os valores médios da intensidade das ICUS, agrupados de acordo com os níveis de ocupação urbana e a proporção de cobertura arbórea para 2025.

Tabela 37 - Intensidades médias das ICUS de acordo a cobertura arbórea e ocupação urbana nos bairros (Excluindo Chácaras e uso não residencial), 2025.

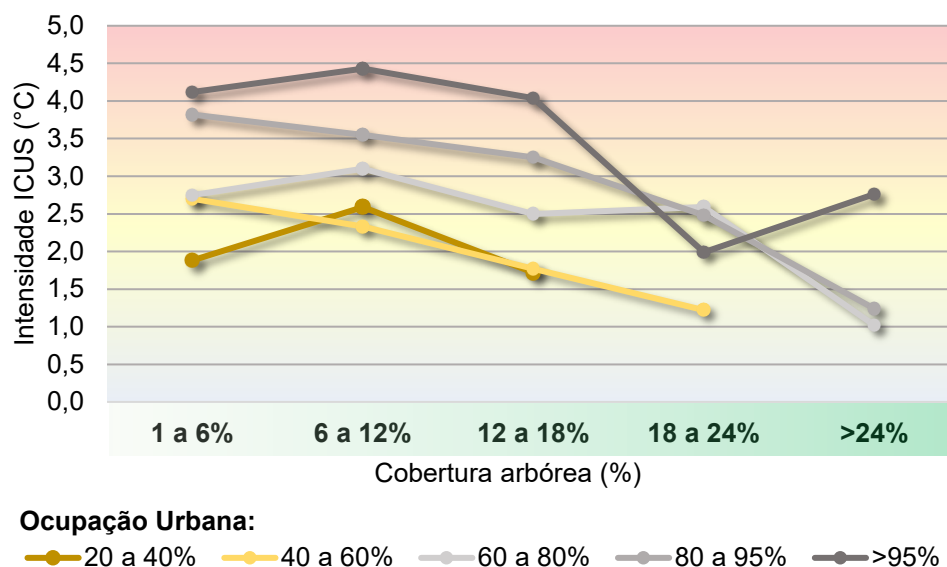
| <b>Cobertura arbórea</b>     | <b>Ocupação Urbana - 2025</b> |                   |                  |                        |                      |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|------------------------|----------------------|
|                              | Baixa<br>20 a 40%             | Média<br>40 a 60% | Alta<br>60 a 80% | Muito Alta<br>80 a 95% | Ocup. Total<br>> 95% |
| <b>Muito Baixa</b><br>1 a 6% | 1,88                          | <b>2,70</b>       | 2,75             | <b>3,82</b>            | 4,12                 |
| <b>Baixa</b><br>6 a 12%      | 2,59                          | <b>2,33</b>       | 3,10             | <b>3,55</b>            | 4,43                 |
| <b>Média</b><br>12 a 18%     | 1,72                          | <b>1,77</b>       | 2,50             | <b>3,25</b>            | 4,04                 |
| <b>Alta</b><br>18 a 24%      | -                             | <b>1,22</b>       | 2,59             | <b>2,48</b>            | 1,99                 |
| <b>Muito Alta</b><br>> 24%   | -                             | -                 | 1,02             | <b>1,24</b>            | 2,76                 |

Fonte: Elaboração própria.

De um modo geral, verifica-se que as intensidades aumentam à medida que a ocupação urbana cresce, sendo reduzidas à medida que a cobertura arbórea aumenta.

À medida que a ocupação urbana aumenta, os bairros com cobertura muito baixa (1 a 6%) apresentam intensidades entre 1,88 e 4,12°C, enquanto aqueles com cobertura baixa (6 a 12 %) registam intensidades entre 2,33 e 4,43°C. Os bairros com cobertura média (12 a 18%) apresentam intensidades entre 1,72 e 4,04°C, enquanto os bairros com cobertura alta (18 a 24%) registam intensidades entre 1,22 e 2,59°C. Os bairros com cobertura muito alta (>24%) apresentam as intensidades mais baixas, variando entre 1,02 e 2,76°C.

Figura 77 - Intensidades médias das ICUS de acordo a cobertura arbórea e ocupação urbana nos bairros (Excluindo Chácaras e uso não residencial), 2025.



Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito ao comportamento de cada categoria de cobertura, os bairros com cobertura muito baixa (1 a 6%), média (12 a 18%) e muito alta (>24%) apresentam linearidade nos valores, enquanto aqueles com cobertura baixa (6 a 12%) e alta (18 a 24%) apresentam saltos. Os bairros com baixa cobertura (6 a 12%) apresentam a sua intensidade mais baixa em ocupações médias (40 a 60% = 2,33°C), enquanto aqueles com cobertura alta (18 a 24%) apresentam a sua maior intensidade em ocupações altas (60 a 80% = 2,59°C) e a sua segunda intensidade mais baixa na ocupação total (> 95% = 1,99°C).

No que concerne às intensidades em função da ocupação urbana, os bairros com baixa ocupação (20 a 40%) registam intensidades entre 2,59 e 1,72°C, enquanto os de ocupação média (40 a 60%) apresentam intensidades entre 2,70 e 1,22 °C. Os bairros com ocupação alta (60 a 80%) registam intensidades entre 3,10 e 1,02°C, enquanto os bairros com ocupação muito alta (80 a 95%) registam intensidades entre 3,82 e 1,24 °C. Por último, os bairros com ocupação total (> 95%) registam intensidades que variam entre 4,43°C e 1,99°C.

Em relação às categorias de ocupação, os bairros com ocupação média (20 a 40%) e muito alta (80 a 95 %) apresentam um comportamento linear. Os bairros com baixa ocupação apresentam um comportamento atípico em cada uma das categorias de cobertura. Nos bairros com ocupação elevada (60 a 80%), as intensidades de coberturas baixas (6 a 12% = 3,10°C) superam as muito baixas (1 a 6% = 2,75°C),



assim como as coberturas altas (18 a 24% = 2,59°C) superam as médias (12 a 18% = 2,50°C). Em bairros com ocupação total (>95%), as coberturas baixas (6 a 12% = 4,43 °C) superam as muito baixas (1 a 6% = 4,12 °C), assim como as coberturas muito altas (>24% = 2,76 °C) superam as altas (18 a 24% = 1,99 °C).

Para avaliar e quantificar a relação entre a cobertura arbórea e as intensidades das ICUS, foi aplicada a regressão dos mínimos quadrados ordinários, identificando-se uma diferença entre a utilização da totalidade dos dados e o agrupamento dos mesmos, de acordo com as categorias de ocupação urbana.

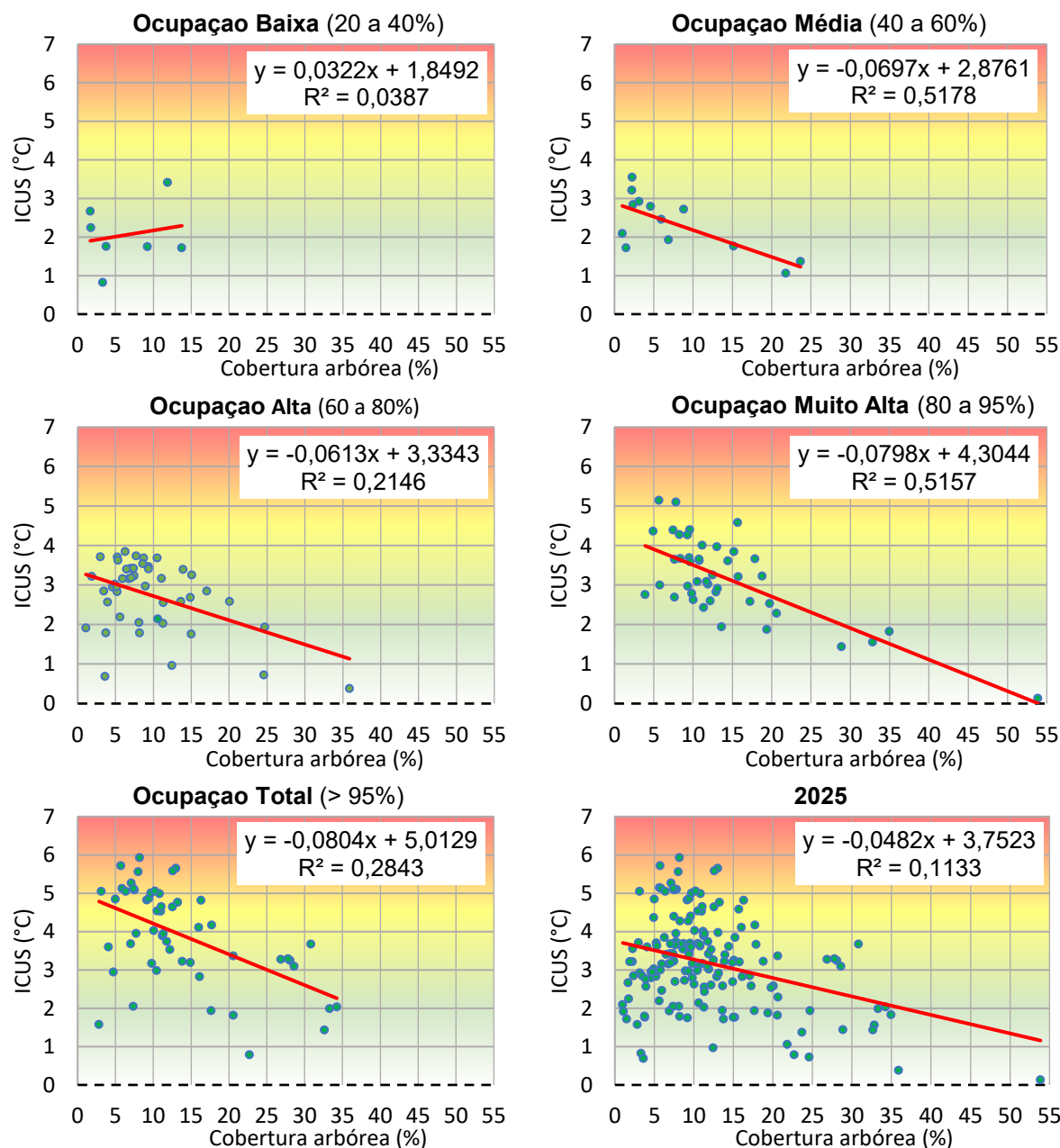
A figura 78 apresenta os gráficos para cada categoria, bem como a função correspondente à regressão linear e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A tabela 38 apresenta um resumo dos valores que compõem a função ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ), bem como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada categoria.

Os resultados revelam uma maior determinação ( $R^2$ ) na utilização dos dados de acordo com as categorias de ocupação urbana, em comparação com a utilização dos dados em sua totalidade. Além disso, confirmam o comportamento mais linear nas categorias de ocupação média (40 a 60%) e muito alta (80 a 95%), bem como o comportamento atípico da categoria de baixa ocupação (20 a 40%), observados na tabela 37 e na figura 77.

Em níveis de ocupação médios (40 a 60%) e muito elevados (80 a 95%), a cobertura arbórea explica 52% do comportamento das ICUS, apresentando uma redução de -0,069 e -0,079°C por cada aumento de 1% na cobertura, respectivamente. Em ocupações totais (>95%) e altas (60 a 80%), a cobertura consegue explicar 28% e 21% do comportamento das ICUS, respectivamente, apresentando uma redução de -0,080 e -0,061°C por cada aumento de 1% na cobertura. Os bairros com baixa ocupação (20 a 40%) apresentam um comportamento totalmente atípico, nos quais a cobertura consegue explicar apenas 3%, apresentando um aumento de 0,032°C por cada aumento de 1% na cobertura.

Os valores do intercepto ( $\beta_0$ ) refletem a influência da ocupação urbana nas intensidades das ICUS, que aumentam conforme a ocupação urbana. Para esta análise, o valor do intercepto corresponde à intensidade quando o valor da cobertura arbórea é igual a 0, para cada categoria. A categoria de ocupação baixa (20 a 40%) apresenta o valor mais baixo, equivalente a 1,85°C, enquanto a categoria de ocupação total (>95%) apresenta o valor mais alto, equivalente a 5,05°C.

Figura 78 – Regressão linear da cobertura arbórea e intensidade das ICUS, de acordo a ocupação urbana – 2025 (Excluindo Chácaras e uso não residencial)



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 38 – Dados função regressão linear da cobertura arbórea e intensidade das ICUS, de acordo a ocupação urbana – 2025 (Excluindo Chácaras e uso não residencial)

| Dados regressão linear   | Categorias de ocupação urbana |                  |                 |                       |                    |         |
|--------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|---------|
|                          | Baixa (20 a 40%)              | Média (40 a 60%) | Alta (60 a 80%) | Muito Alta (80 a 95%) | Ocup. Total (>95%) | 2025    |
| Inclinação ( $\beta_1$ ) | 0,0322                        | -0,0697          | -0,0613         | -0,0798               | -0,0804            | -0,0482 |
| Intercepto ( $\beta_0$ ) | 1,8492                        | 2,8761           | 3,3343          | 4,3044                | 5,0129             | 3,7523  |
| Coef. ( $R^2$ )          | 0,0387                        | 0,5178           | 0,2146          | 0,5157                | 0,2843             | 0,1133  |

Fonte: Elaboração própria.

De um modo geral, o comportamento das intensidades das ICUS em função da ocupação urbana, confirmam o descrito por Oke (2002), segundo o qual o aumento da densidade construtiva está associada a mudanças nas propriedades das superfícies que favorecem a formação da ICU. No que diz respeito à interação com a vegetação urbana, os resultados estão em consonância com os obtidos por Amorim (2019), no qual demonstra que o comportamento das ICUS é, em grande medida, determinado pela densidade construtiva e pela proporção de vegetação.

Do ponto de vista da influência da arborização urbana sobre as ICUS na cidade de Goiânia, estes resultados confirmam que, em contextos de baixa ocupação urbana, a cobertura arbórea perde influência sobre as mudanças na cobertura do solo em lotes vazios. Em contextos de ocupação urbana superior a 40%, a arborização urbana apresenta reduções de intensidade aproximadas entre  $-0,061$  e  $-0,080^{\circ}\text{C}$  por cada aumento de 1% na cobertura arbórea.

No que diz respeito à determinação da influência, a associação dos dados de acordo com a ocupação urbana revela-se mais eficaz do que a utilização dos dados em sua totalidade, destacando a importância do ambiente construído na análise das ICUS. No caso da relação entre a cobertura arbórea e as ICUS, os resultados mostram uma menor força, em comparação com os obtidos com os índices *NDVI* e *SAVI* na análise de macroescala. O melhor desempenho destes índices poderia estar relacionado com o facto de captarem a vegetação na sua totalidade, contemplando o comportamento de todas as coberturas vegetais. Neste sentido, a agrupação dos dados de acordo com elementos associados à proporção de vegetação de outras classes poderia trazer resultados mais precisos.

A falta de linearidade no comportamento dos dados em alguns dos agrupamentos realizados demonstra a heterogeneidade do ambiente construído, bem como os múltiplos fatores que intervêm no campo térmico da cidade. Os resultados obtidos mostram a capacidade da arborização urbana como estratégia de mitigação das ICUS na cidade de Goiânia, promovendo a redução das intensidades em diferentes configurações urbanas e graus de ocupação.

## CONCLUSÕES

A presente pesquisa demonstra como o plantio de árvores durante o período de 2006 a 2025, logrou reduzir de forma localizada as intensidades das Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUS) dos bairros de Goiânia-GO, corroborando a hipótese estabelecida.

O incremento da cobertura arbórea nos bairros, por meio de diferentes formas de implantação da arborização (plantio em canteiros centrais, praças, lotes de equipamentos e lotes urbanos, bem como áreas de vegetação densa como APP, APA, UC e Parques), promoveu a mitigação das intensidades das ICUS em diferentes magnitudes de forma localizada, em função da configuração e ocupação urbana, intrínsecas a cada bairro. Aspectos, como o tamanho dos lotes, determinam em grande medida a tipologia construtiva, limitando o potencial do terreno para o plantio de árvores; enquanto a ocupação urbana, define uma intensidade de ICUS base, de acordo com a proporção da área construída.

A implantação da arborização em Goiânia, atrelada ao crescimento urbano, dificulta o estudo da influência da cobertura arbórea sobre as ICUS. A cobertura arbórea, que atenua a intensidade das ICUS, cresce conforme aumentam as áreas construídas, as quais, por sua vez, promovem a formação do fenômeno, dificultando o estabelecimento de uma linha de base para a análise.

As mudanças no uso e na cobertura do solo, associadas às dinâmicas do processo de urbanização e aos padrões de ocupação, mostraram-se fundamentais no comportamento do campo térmico da cidade. Dessa forma, a identificação do aumento das áreas construídas, bem como das mudanças na cobertura do solo em lotes e áreas vazias, demonstrou-se essencial para determinar a influência da arborização urbana sobre as ICUS.

A metodologia formulada permitiu avaliar a influência da cobertura arbórea sobre as ICUS, destacando os impactos do processo de urbanização no campo térmico e demonstrando seu potencial para o monitoramento de planos de arborização como estratégia de mitigação. O uso do sensoriamento remoto mostrou-se eficaz para captar o comportamento das variáveis durante o período de estudo, permitindo identificar mudanças na vegetação urbana e nas TST, desde a escala do perímetro urbano até a escala intrabairro.

Os índices de vegetação mostraram ser uma ferramenta útil para o

monitoramento da vegetação urbana. No entanto, a resolução espacial de 30m das imagens disponíveis das plataformas *Landsat* não permitem a identificação da arborização dentro do tecido urbano, sendo necessário o uso de imagens de alta resolução para quantificar a cobertura arbórea. Além disso, a resolução espacial dos sensores térmicos (120–100m) das plataformas *Landsat*, dificultam a identificação dos efeitos da arborização dispersa sobre as TST, bem como o estudo de bairros de pequeno porte, nos quais mudanças fora de seus perímetros se estendem para o seu interior, gerando desvios nas análises.

No que concerne à metodologia aplicada para a determinação das ICUS, a utilização da média das TST do âmbito rural permite capturar a heterogeneidade dessas áreas, em consonância com o descrito na literatura, enfatizando as alterações no uso e cobertura do solo em detrimento das variações nas condições meteorológicas. Em contrapartida, mudanças drásticas no comportamento do solo nas áreas rurais, especialmente em áreas com elevado grau de antropização como as verificadas em Goiânia, podem gerar desvios na análise, dificultando as avaliações multitemporais. Consequentemente, estudos semelhantes poderiam apresentar resultados diferentes sobre a mesma área de estudo, uma vez que a linha de base para o cálculo das ICUS depende da composição do solo da área rural no momento da captura das imagens.

As técnicas de detecção de mudanças empregadas, permitiram a identificação espacial das alterações na vegetação urbana e sua associação com as variações nas TST, destacando as mudanças no uso e na cobertura do solo associadas às diferentes etapas do processo de urbanização.

As unidades espaciais adotadas para a quantificação das variáveis (Perímetro Urbano, Perímetro Rural e Bairros) permitiram realizar análises com base na escala territorial utilizada pela legislação local, gerando resultados que permitem priorizar a implementação de políticas municipais, além de contribuir com uma metodologia replicável para o monitoramento da arborização urbana e sua influência sobre o campo térmico da cidade.

Em contrapartida, o estudo dos bairros de acordo com o perímetro estabelecido pela legislação local desconsidera características urbanas que exercem grande influência sobre as variáveis estudadas, dificultando a comparação entre bairros. Elementos como a tipologia do bairro, sua associação a estruturas de vegetação

densa (APP, APA, UC e parques) e, em maior medida, a ocupação urbana, são elementos identificados por esta pesquisa que possuem influência significativa no potencial do tecido urbano em comportar a arborização, repercutindo na capacidade de mitigação das ICUS. Dessa forma, a delimitação do perímetro das áreas urbanas segundo características físicas, como tipologias de edificações, presença de áreas de vegetação densa e padrões de ocupação, poderia facilitar a comparação entre bairros, além de gerar resultados direcionados à formulação de estratégias de mitigação específicas para os contextos urbanos identificados na cidade de Goiânia.

Em relação aos resultados obtidos no análise de Macroescala, apesar do perímetro urbano apresentar aumentos de 2,88% e 11,47% nos índices *NDVI* e *SAVI* entre 2006 e 2025, respectivamente, identifica-se um aumento na intensidade média das ICUS, equivalente a 0,26°C. Essa tendência se reflete nos bairros, onde 59% e 71% apresentam aumentos nos índices *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, enquanto em relação às ICUS, 64% registram aumentos nas intensidades.

Os setores centrais mais antigos e consolidados, caracterizados por maior densidade construtiva e menor vegetação, apresentam as maiores intensidades de ICUS de forma constante durante o período estudado, em contraste com as periferias, onde coexistem bairros com diferentes graus de vegetação e intensidades. A vegetação densa que acompanha os cursos d'água nas APP foi identificada como as principais ilhas de frescor da cidade, que se estendem desde os tecidos mais densos e consolidados da cidade até as regiões menos desenvolvidas e periféricas. Entre 2006 e 2025, a vegetação nessas áreas registrou uma densificação dentro de seus limites estabelecidos, contribuindo para a diminuição das ICUS nos bairros cujos perímetros estão associados a essas estruturas florestais.

A distribuição dos aumentos e diminuições de ambas as variáveis evidenciam um maior dinamismo nas áreas periféricas de expansão da cidade, onde se verificam as maiores mudanças. Em contrapartida, os setores centrais e consolidados registram ligeiros aumentos, tanto na vegetação quanto na intensidade das ICUS, destacando a necessidade de intensificar a implantação de arborização nessas áreas, a fim de reduzir as temperaturas nesses contextos de maior densidade construtiva.

Essa distribuição revela a influência das mudanças no uso e na cobertura do solo sobre as ICUS, bem como a necessidade de sua identificação para uma análise correta. Mudanças na cobertura do solo associadas às diferentes etapas do processo

de urbanização de novos parcelamentos, desenvolvidos principalmente em áreas de expansão periférica da cidade, resultam em grandes variações nas intensidades das ICUS.

Terrenos destinados a culturas também apresentam grandes mudanças em sua cobertura do solo nessas áreas de expansão, as quais podem apresentar intensidades equivalentes às de áreas construídas. Esse comportamento destaca o papel das áreas de cultivo dentro do perímetro urbano, as quais, devido à sua extensão, exercem grande influência sobre o campo térmico da cidade.

A forte relação identificada entre os índices de vegetação e as intensidades das ICUS, reforça a importância da vegetação como preditor das temperaturas nos bairros de Goiânia. As médias dos índices *NDVI* e *SAVI* dos bairros obtidas durante o período de estudo apresentaram uma correlação negativa forte ( $-0,88$ ) com as intensidades médias das ICUS, por meio do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ). Através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtido pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários, os índices *NDVI* e *SAVI* explicam 78% do comportamento das intensidades das ICUS. O uso da unidade espacial do “bairro” para analisar essa relação apresentou melhores resultados do que a metodologia de pontos aleatórios utilizada em outros estudos, destacando sua utilidade para o monitoramento da vegetação e das ICUS em uma escala compatível com o planejamento urbano local.

O emprego de mapas de cobertura e uso do solo como variável de apoio, bem como do índice *NDBI*, forneceu informações relevantes para caracterizar o processo de desenvolvimento urbano e suas implicações sobre as ICUS. O comportamento das classes de uso e ocupação do solo durante o período de estudo, confirma o crescimento das áreas urbanizadas sobre áreas de vegetação rasteira, compostas principalmente por terrenos agrícolas, sem afetar áreas de vegetação densa, as quais apresentam aumentos leves. As áreas de solo nu variam em função do desenvolvimento urbano, aumentando nas fases iniciais dos loteamentos e diminuindo à medida que estes são ocupados.

Como aspecto positivo, o aumento da vegetação urbana em conjunto com as áreas construídas evidencia um crescimento urbano que contempla a incorporação de vegetação. Durante o período, os índices de vegetação *NDVI* e *SAVI* apresentam aumentos, em conjunto com o índice *NDBI* e a classe de “áreas construídas”. No entanto, esse comportamento revela um aspecto negativo das condições que



antecedem o processo de urbanização. As áreas de cultivo, que constituem as principais áreas de expansão urbana, apresentam vegetação escassa e, em alguns casos, são compostas por solos nus. Dessa forma, o processo de urbanização em Goiânia avança sobre áreas previamente desmatadas pela atividade agropecuária, as quais podem apresentar intensidades de ICUS equivalentes a áreas construídas, como mencionado anteriormente.

Do ponto de vista térmico, a classificação por classes permitiu estabelecer relações entre o comportamento das intensidades das ICUS e as transições de cobertura do solo envolvidas no processo de urbanização. As áreas construídas apresentam as maiores intensidades médias para o período de estudo ( $4,54^{\circ}\text{C}$ ), seguidas pelas áreas de solo nu ( $3,38^{\circ}\text{C}$ ). As áreas de vegetação densa apresentam as menores intensidades ( $-0,62^{\circ}\text{C}$ ), seguidas pelos corpos d'água ( $-0,12^{\circ}\text{C}$ ) e pelas áreas de vegetação rasteira ( $1,16^{\circ}\text{C}$ ). Dessa forma, as variações nas magnitudes das ICUS durante o processo de urbanização estão ligadas às transições entre as diferentes classes de uso e cobertura do solo.

A análise em mesoescala, realizada nos 180 bairros que apresentaram reduções nas intensidades das ICUS, revelou a complexidade da dinâmica urbana.

Os resultados mostram aumentos significativos na cobertura arbórea dos bairros analisados, implantada por meio do plantio de árvores em canteiros centrais e vias públicas, praças, quadras destinadas a equipamentos urbanos, lotes urbanos e áreas de vegetação densa como APP, APA, UC e parques. Nos 163 bairros onde foi estimada a cobertura arbórea, identificou-se um crescimento total de 5,06 pontos percentuais, passando de 9,42% para 14,48%, o que equivale a um aumento relativo de 53,71%. A maior parte dos bairros apresentou aumentos entre 1 e 5 pontos percentuais, com uma média de 5,3. Durante o estágio inicial, a maior proporção (41%) corresponde a bairros com coberturas entre 1 e 6%, sendo deslocados, em 2025, por aqueles com coberturas de 6 a 12% (41%).

O tipo de bairro, como forma de caracterizar a configuração urbana, demonstrou-se relevante, tanto para o comportamento da cobertura arbórea quanto para o das intensidades das ICUS. As chácaras e os condomínios fechados apresentam as intensidades mais baixas, em contraste com os bairros residenciais tradicionais, que apresentam as mais altas. Em relação à cobertura arbórea, os condomínios fechados apresentam a maior taxa de crescimento e porcentagens médias de cobertura durante

o período, enquanto os bairros residenciais tradicionais apresentam as mais baixas.

Os condomínios fechados, caracterizados por ocupações urbanas de menor densidade, maior presença de áreas de vegetação rasteira combinadas com maior cobertura arbórea e integração a APP, APA, UC e Parques, reúnem maiores condições para reduzir as intensidades. Dessa forma, os arranjos urbanos mais semelhantes aos rurais conseguem manter intensidades mais baixas, sendo necessário compreender as limitações e as potencialidades das diferentes configurações urbanas da cidade de Goiânia para elaborar estratégias de mitigação adequadas.

Um elemento-chave identificado na pesquisa, no comportamento da cobertura arbórea e as intensidades das ICUS, é a ocupação urbana. A identificação da proporção de lotes ocupados nos 163 bairros analisados permitiu identificar a relação entre o crescimento urbano e a cobertura arbórea, bem como a forte influência sobre as ICUS das mudanças no uso e na cobertura do solo de lotes vazios, especialmente em bairros com baixa ocupação urbana.

Embora o aumento da cobertura arbórea em função ao desenvolvimento urbano possa ser visto como algo positivo, a persistência de uma grande quantidade de lotes vazios nos bairros analisados demonstra uma limitação na estratégia de implantação. Apesar da exigência de um projeto de arborização para a aprovação de novos parcelamentos desde 1991, a obrigatoriedade do plantio de árvores continua condicionada à ocupação dos lotes no PDAU de 2024, como requisito para a obtenção do alvará de conclusão de obra. Bairros antigos e novos, com grande quantidade de lotes vazios, permanecem integrados ao tecido urbano sem arborização (e calçadas) nas áreas públicas, prejudicando as condições ambientais dos moradores desses bairros, além de criar descon continuidades urbanas no projeto da cidade plasmado nos instrumentos de ordenamento urbano.

A análise dos bairros com grande quantidade de lotes vazios destaca a importância dessas áreas no contexto urbano, especialmente no que diz respeito às condições térmicas. Bairros com baixa ocupação urbana registraram as maiores reduções nas intensidades das ICUS, em função da transição de solo nu para cobertura vegetal nos lotes e áreas vazias, principalmente devido ao abandono e à falta de manutenção. Dessa forma, em bairros com ocupação urbana inferior ao 40%, a influência da cobertura arbórea sobre as ICUS é superada pelos efeitos das

mudanças na cobertura do solo nos lotes e áreas vazias, as quais representam grande parte desses parcelamentos.

Bairros associados a APP, APA, UC e Parques registraram proporções de cobertura arbórea significativamente superiores, bem como intensidades das ICUS mais baixas em relação àqueles que não dispõem dessas áreas em seus perímetros, inclusive dentro de cada categoria de bairro. A cobertura arbórea total correspondente a essas áreas representa 35% da cobertura dos bairros analisados, registrando um incremento de 1,78 ponto percentual, equivalente a um crescimento relativo de 54,26% durante o período. Para 2025, bairros associados a essas áreas apresentam intensidades médias de ICUS  $0,75^{\circ}\text{C}$  inferiores em comparação aos não associados, com uma cobertura arbórea média de 15,09% (da qual 48% pertence a essas áreas), em contraste com os 7,03% estimados nos bairros não associados.

Desta forma, a integração das APP, APA, UC e Parques ao tecido urbano representa uma oportunidade para a redução efetiva das ICUS nos bairros da cidade. A combinação dos corpos d'água com a vegetação densa que compõem essas áreas pode garantir efeitos de resfriamento durante todo o ano, além de se tornarem refúgios para a fauna local e possíveis áreas de lazer para os habitantes.

Fatores como coberturas de maior albedo (refletivas), sombreamento de edificações e alterações na cobertura do solo em áreas adjacentes ao perímetro dos bairros foram identificados como elementos influentes no comportamento das ICUS, refletindo as múltiplas variáveis que condicionam o clima urbano, bem como o potencial de outras estratégias de mitigação. Dessa forma, a arborização urbana pode ser combinada com estratégias complementares para maximizar os benefícios, sendo imprescindível considerar as características específicas das configurações urbanas para garantir sua eficácia.

A classificação dos bairros de acordo com a sua ocupação urbana permitiu determinar com maior precisão a influência da cobertura arbórea sobre as intensidades das ICUS, ao isolar aqueles bairros com baixa ocupação urbana, nos quais o comportamento da cobertura do solo em áreas vazias rege o comportamento térmico. Por meio dos dados de 2025 dos 163 bairros analisados, determinou-se uma redução de intensidade entre  $-0,061$  e  $-0,080^{\circ}\text{C}$  para cada incremento de 1% na cobertura arbórea, em bairros com ocupação urbana superior a 40%. Bairros com ocupação média (40% a 60%) e muito alta (80% a 95%) obtiveram os coeficientes de

determinação ( $R^2$ ) mais elevados (0,52) em relação às demais categorias, demonstrando que, mesmo quando agrupados de acordo com a ocupação urbana, outros elementos intervêm na definição das intensidades.

Com base nos resultados da presente pesquisa, apresentam-se as seguintes recomendações, com o objetivo de aumentar a eficácia da arborização urbana como estratégia de mitigação das ICUS na cidade de Goiânia:

- Exigir das empresas responsáveis pela execução de novos loteamentos o plantio de árvores em áreas públicas no momento da construção (tanto em áreas ocupadas quanto em lotes vazios), bem como a sua manutenção para garantir a sobrevivência dos exemplares, seguindo as diretrizes do projeto de arborização exigido pelo PDAU. As árvores poderiam ser plantadas no alinhamento que divide os lotes, dentro do passeio público, com a finalidade de não prejudicar o acesso aos lotes.
- Incorporar ao PDAU a obrigatoriedade do plantio de árvores em áreas públicas correspondentes a lotes vazios, com caráter retroativo, que permita a implantação de arborização em lotes vagos anteriores à vigência da lei.
- Incorporar ao PDAU as exigências da Lei nº 10.606/2021, referentes ao plantio de árvores em proporção ao número de unidades imobiliárias residenciais ou comerciais de uso coletivo, reconhecendo os processos de verticalização que a cidade enfrenta. Exigir que o plantio da arborização referente à compensação pelo desenvolvimento dessa tipologia construtiva seja realizado nas adjacências do empreendimento (no tecido urbano), buscando incrementar a cobertura arbórea dos bairros em processo de verticalização.
- Incorporar ao PDAU a exigência ao poder municipal para a elaboração de projetos de arborização urbana em loteamentos existentes devidamente legalizados, nos quais não houvera arborização, conforme estabelecido anteriormente no artigo 8º da Lei nº 7.009/1991. Mediante este mecanismo, o poder municipal poderá implantar a arborização de forma direta em áreas da cidade que não cumprem os padrões exigidos pelo atual PDAU, bem como áreas mais antigas da cidade que apresentam pouca cobertura arbórea.
- Reincorporar ao PDAU a exigência ao poder municipal de manter um inventário informatizado atualizado da arborização urbana, integrado ao Mapa Digital Fácil de Goiânia, diretrizes que estavam presentes nos PDAU anteriores. Dessa

forma, mantêm-se atualizadas as informações necessárias para a realização de diagnósticos que permitam orientar os projetos e estabelecer prioridades na gestão ambiental do município.

- Exigir o uso de vegetação rasteira ou gramíneas em substituição ao uso de brita na cobertura do solo de lotes vazios, garantindo sua manutenção e irrigação periódica. Dessa forma, os lotes vagos poderiam contribuir significativamente para o controle das temperaturas na cidade.

Como desdobramento desta pesquisa, propõe-se uma análise em microescala com a finalidade de determinar a influência das distintas formas de implantação da arborização urbana sobre as intensidades das ICUS em contextos específicos de Goiânia. Para tal análise, selecionam-se bairros representativos das diversas configurações urbanas encontradas na cidade, mapeando-se a evolução da cobertura arbórea em seus diferentes arranjos, em conjunto com o comportamento térmico. Dessa forma, identificam-se os padrões de arborização mais eficientes para cada contexto analisado, fornecendo subsídios que podem ser incorporados ao PDAU para a elaboração e execução de projetos de arborização.

Outros estudos, derivados das questões levantadas pela presente pesquisa, poderiam concentrar-se em explorar a capacidade de suporte para a arborização nas configurações urbanas de Goiânia, bem como o papel dos lotes e quadras vazias no campo térmico da cidade.

Considerando os bairros com maiores intensidades de ICUS, poderiam ser elaboradas diferentes propostas de arborização urbana que considerem as capacidades reais do ambiente construído e as normas vigentes. Por meio de ferramentas de simulação, as variáveis climáticas poderiam ser controladas, permitindo, ademais, testar outras estratégias de mitigação em combinação com a arborização em um cenário controlado, evitando os desvios produzidos pelas dinâmicas associadas ao processo de urbanização identificados nesta pesquisa.

Os lotes vazios na cidade de Goiânia representam uma porcentagem significativa do tecido urbano. O estudo do impacto dessas áreas sobre o campo térmico da cidade poderia destacar sua importância para o desenvolvimento de estratégias de mitigação das ICU, orientando políticas públicas para o aproveitamento desses espaços em sua condição de “desocupados” em prol do clima urbano da cidade.

Os resultados desta pesquisa evidenciam que a arborização urbana constitui uma estratégia de mitigação das ICUS notavelmente flexível, capaz de promover reduções térmicas em diferentes contextos urbanos, de bairros consolidados a periferias em expansão, de condomínios fechados a bairros residenciais tradicionais, adaptando-se às possibilidades e limitações que cada configuração urbana impõe. Essa versatilidade, contudo, somente se traduz em benefícios mensuráveis e duradouros quando os instrumentos de gestão pública garantem a continuidade da implementação ao longo do tempo, assegurando não apenas o plantio, mas também a manutenção e o monitoramento sistemático da cobertura arbórea. O planejamento urbano deve reconhecer que investir em arborização é, por natureza, um compromisso de longo prazo: as árvores plantadas hoje são a infraestrutura climática da cidade de amanhã. Nesse sentido, a cidade que desejamos, mais fresca, mais verde, mais resiliente e mais justa para todos os seus habitantes, não pode ser construída no futuro sem que comecemos a plantá-la hoje.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, V. Metade da área loteada de Goiânia não tem nenhuma casa, **O Popular**, Goiânia, 2023. Disponível em: <https://opopular.com.br/cidades/metade-da-area-loteada-de-goiania-n-o-tem-nenhuma-casa-1.2545627>. Acesso em: 13 out. 2025.
- ADINNA, E. N.; ENETE, I. C.; OKOLIE, T. Assessment of urban heat island and possible adaptations in Enugu urban using Landsat-ETM. **Journal of Geography and Regional Planning**, [s. l.], Nigeria, v. 2, n. 2, p. 30–36, 2009. Disponível em: <https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/Adinna-et-al.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.
- AGRICULTURE VICTORIA. **Shelterbelts for control of wind erosion**. Victoria, Australia: Department of Energy, Environment and Climate Action, 2023. (Landcare Note LC0422 version June 2023). Disponível em: <https://agriculture.vic.gov.au/farm-management/soil/erosion/shelterbelts-for-control-of-wind-erosion/Shelterbelts-for-control-of-wind-erosion.pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.
- AKBARI, H. **Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, 1992. (Lawrence Berkeley Laboratory report LBL-31587). Disponível em: <https://escholarship.org/content/qt98z8p10x/qt98z8p10x.pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.
- AKBARI, H. *et al.* Peak power and cooling energy savings of shade trees. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 139–148, 1997. DOI: 10.1016/S0378-7788(96)01003-1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778896010031>. Acesso em: 28 out. 2024.
- AKBARI, H.; KOLOKOTSA, D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 133, p. 834–842, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.067. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816310143>. Acesso em: 28 out. 2024.
- AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 295–310, 2001. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00089-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X0000089X>. Acesso em: 28 out. 2024.
- ALMEIDA, M. A. M. D.; VASCONCELLOS, V. M. N. D. Perfil dos métodos de análise mais usados na avaliação da influência da vegetação na temperatura do ar em ambientes externos no Brasil. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, [s. l.], n. 20, 2018. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n20.2018.01. Disponível em: <http://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/24041>. Acesso em: 28 out. 2024.



ALVES, E. D. L. Intensidade e modelagem das ilhas de calor urbanas de superfície em cidades de pequeno porte: Análise da região do oeste goiano. **Boletim de Geografia**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 50, 2019. DOI: 10.4025/bolgeogr.v37i1.37346. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/37346>. Acesso em: 28 out. 2024.

AMMA, Agência Municipal do Meio Ambiente. Parques e Bosques. **AMMA - Agência Municipal do Meio Ambiente**, [entre 2017 a 2021a]. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/shtml/amma/parquesebosques.shtml#>. Acesso em: 20 fev. 2026.

AMMA, Agência Municipal do Meio Ambiente. Plante a vida. **AMMA - Agência Municipal do Meio Ambiente**, [entre 2017 a 2021b]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/shtml/amma/plante\\_vida.shtml](https://www.goiania.go.gov.br/shtml/amma/plante_vida.shtml). Acesso em: 10 fev. 2025.

AMMA, Agência Municipal do Meio Ambiente. **Plano diretor de arborização urbana de Goiânia**. Goiânia, GO, Brasil: Agência Municipal do Meio Ambiente - Goiânia, 2008. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/download/amma/relatorio\\_Plano\\_Diretor.pdf](https://www.goiania.go.gov.br/download/amma/relatorio_Plano_Diretor.pdf). Acesso em: 10 fev. 2025.

AMORIM, M. C. D. C. T. Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil. **Finisterra**, [s. l.], v. 52, n. 105. 2017. DOI: 10.18055/FINIS6888. Disponível em: <https://doi.org/10.18055/Finis6888> . Acesso em: 16 nov. 2025.

AMORIM, M. C. D. C. T. Ilhas de calor superficiais: frequência da intensidade e variabilidade espacial em cidade de clima tropical continental. **Geo UERJ**, [s. l.], n. 34, p. 1-18. 2019. DOI: 10.12957/geouerj.2019.40959. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.40959>. Acesso em: 24 nov. 2025.

AMORIM, M. C. D. C. T. Spatial variability and intensity frequency of surface heat island in a Brazilian city with continental tropical climate through remote sensing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s. l.], v. 9, p. 10–16, 2018. DOI: 10.1016/j.rsase.2017.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.11.001>. Acesso em: 27 nov. 2025.

AMORIM, M. C. D. C. T.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. D. S. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP) – Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 16, 2015. DOI: 10.5380/abclima.v16i0.40585. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v16i0.40585>. Acesso em: 27 mar. 2025.

ANANYEVA, O.; EMMANUEL, R. Street trees and Urban Heat Island in Glasgow: Mitigation through the ‘Avenues Programme’. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 86, p. 128041, 2023. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128041. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128041>. Acesso em: 23 nov. 2025.

ANDRADE, L. N. D.; AMORIM, M. C. D. C. T. Diagnóstico da distribuição espacial da intensidade das ilhas de calor superficiais e da vegetação em Presidente Prudente – SP/Brasil. **Entre-Lugar**, [s. l.], v. 14, n. 27, p. 87–109, 2023.

DOI: 10.30612/rel.v14i27.17412. Disponível em:

<https://doi.org/10.30612/rel.v14i27.17412>. Acesso em: 16 nov. 2025.

ARBOR DAY FOUNDATION. Celebrating greener cities, worldwide. **Tree Cities of the world**, 2026. Disponível em: <https://www.treecitiesoftheworld.org/>.

Acesso em: 15 mar. 2026.

ARMSON, D.; STRINGER, P.; ENNOS, A. R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 245–255, 2012. DOI: 10.1016/j.ufug.2012.05.002.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>. Acesso em: 25 out. 2024.

ARONSON, M. F. J. *et al.* A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 281, n. 1780, p. 20133330, 2014. DOI:

10.1098/rspb.2013.3330. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.3330>.

Acesso em: 25 out. 2024.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2. ed. San Diego, Calif.: Acad. Press, 2008. 420 p. ISBN: 978-0-12-059354-5.

ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 413-427, 1996.

DOI: 10.1016/1352-2310(94)00140-5. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5). Acesso em: 25 out. 2024.

ASSIS, J. P. de. **Glossário de estatística**. Mossoró, RN: Edufersa, 2019.

ISBN: 978-85-5757-104-4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2024.

BALANY, F. *et al.* Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy - A Review. **Water**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 3577, 2020. DOI: 10.3390/w12123577.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12123577>. Acesso em: 25 out. 2024.

BARREIRA, C. C. M. A. *et al.* O novo Plano Diretor de Goiânia. A trajetória de um desastre anunciado. In: BARREIRA, C. C. M. A.; HADDAD, M. B.; MOYSÉS, A. (orgs.). **Reforma urbana e direito à cidade: Goiânia**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Letra Capital, 2023. p. 237-258. ISBN: 978-85-7785-820-0.

BASS, B. *et al.* **Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure**.

Toronto, Canada: Environment Canada at the University of Toronto, 2002. Disponível em: [https://coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/finalpaper\\_bass.pdf](https://coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/finalpaper_bass.pdf).

Acesso em: 25 out. 2024.

BENJAMIN, M. T. *et al.* Low-emitting urban forests: A taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 30, n. 9, p. 1437–1452, 1996. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00439-4. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00439-4](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00439-4). Acesso em: 26 out. 2024.

BERDAHL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 149–158, 1997. DOI: 10.1016/S0378-7788(96)01004-3. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778896010043>. Acesso em: 18 out. 2024.

BEZERRA, P. E. S.; DE MORAES, E. T. I.; SOARES, I. R. D. C. Análise da Temperatura de Superfície e do Índice de Vegetação no Município de Belém na Identificação das Ilhas de Calor. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 803–818, 2018. DOI: 10.14393/rbcv70n3-45701. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45701>. Acesso em: 21 nov. 2025.

BHARGAVA A; LAKMINI S; BHARGAVA S. Urban Heat Island Effect: It's Relevance in Urban Planning. **Journal of Biodiversity & Endangered Species**, [s. l.], v. 5, n. 2, 2017. DOI: 10.4172/2332-2543.1000187. Disponível em: <https://www.hilarispublisher.com/abstract/urban-heat-island-effect-its-relevance-in-urban-planning-28532.html> . Acesso em: 25 out. 2024.

BOWLER, D. E. *et al.* Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 97, n. 3, p. 147–155, 2010. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>. Acesso em: 22 nov. 2025.

BOYLE, C. *et al.* **Greening cities: a review of green infrastructure**. Auckland, New Zealand: Transforming Cities: Innovations for Sustainable Futures, University of Auckland, 2014. ISBN: 978-0-9922510-2-4. Disponível em: [https://cdn.auckland.ac.nz/assets/creative/schools-programmes-centres/transforming%20cities/Greening\\_Cities\\_Report.pdf](https://cdn.auckland.ac.nz/assets/creative/schools-programmes-centres/transforming%20cities/Greening_Cities_Report.pdf). Acesso em: 26 out. 2024.

BRAGA, A.; LAURINI, M. Spatial heterogeneity in climate change effects across Brazilian biomes. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 16414, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-67244-x. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67244-x>. Acesso em: 8 out. 2024.

BUCUR, V. (org.). **Urban Forest Acoustics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN: 978-3-540-30783-9.

BUENOS AIRES CIUDAD. Planes de Acción Climática de la Ciudad. **Buenos Aires Ciudad**, [2021?]. Disponível em: <https://buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/cambioclimatico/planes-de-accion-climatica-de-la-ciudad>. Acesso em: 21 dez. 2024.

BURDEN, D. **Urban Street Trees: 22 Benefits, Specific Application**. Orlando, FL: Glatting Jackson and Walkable Communities Inc., 2006. Disponível em: [https://sustainablect.org/fileadmin/media/Content/For\\_resources/LNR/1.\\_Urban\\_Street\\_Trees.pdf](https://sustainablect.org/fileadmin/media/Content/For_resources/LNR/1._Urban_Street_Trees.pdf). Acesso em: 26 out. 2024.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP. Cities100: Medellín's interconnected green corridors. **C40 Knowledge**, 2019. Disponível em: [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Cities100-Medellin-s-interconnected-green-corridors?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Cities100-Medellin-s-interconnected-green-corridors?language=en_US). Acesso em: 30 dez. 2024.

CAMPS-VALLS, G. *et al.* A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. **Science Advances**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. eabc7447, 2021. DOI: 10.1126/sciadv.abc7447. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc7447>. Acesso em: 10 set. 2024.

CAO, X. *et al.* Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 224–231, 2010. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.03.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.008>. Acesso em: 17 nov. 2025.

CASAROLI, D. *et al.* Padrões de Chuva e de Evapotranspiração em Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 247–256, 2018. DOI: 10.1590/0102-7786332004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786332004>. Acesso em: 2 jul. 2025.

CHARALAMPOPOULOS, I. *et al.* A methodology for the evaluation of the human-bioclimatic performance of open spaces. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 128, p. 811–820, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1742-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1742-9>. Acesso em: 25 out. 2024.

CHATTERJEE, S. *et al.* Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 663, p. 610–631, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.299. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>. Acesso em: 26 nov. 2025.

CHENG, V. *et al.* Urban Form, Density and Solar Potential. In: PLEA2006 - THE 23RD CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2006, Geneva, Switzerland. **Anais [...]**. Geneva, Switzerland: PLEA2006, 2006. p. 1–6. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/server/api/core/bitstreams/5cca4513-86e5-4598-87e8-46c911b55f79/content>. Acesso em: 15 nov. 2024.

CHEUNG, P. K.; JIM, C. Y. Differential cooling effects of landscape parameters in humid-subtropical urban parks. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 192, p. 103651, 2019. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103651. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103651>. Acesso em: 20 mar. 2025.

CHOW, W. T. L.; ROTH, M. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 26, n. 15, p. 2243–2260, 2006. DOI: 10.1002/joc.1364. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.1364>. Acesso em: 26 nov. 2025.

CHUVIECO, E. S. **Fundamentos de Teledetección Espacial**. 2. ed. Madrid: Rialp, 1995. 449 p. ISBN: 84-321-2680-2.

CITY FRUIT. **2023 Impact Report**. Seattle, WA: City Fruit. 2023. *E-book* (7 p.). (Annual Report). Disponível em: <https://www.cityfruit.org/wp-content/uploads/2024/02/2023-Impact-Report-7.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024.

CITY OF SYDNEY. **Cooling Sydney Strategy. Planning for Sydney 2050**. Sydney, Australia: City of Sydney, 2019. Disponível em: [https://www.unsw.edu.au/content/dam/pdfs/ada/built-environment/low-carbon-living-crc/resources/sp0012u3\\_-\\_cooling\\_sydney\\_strategy\\_final\\_-\\_web.pdf](https://www.unsw.edu.au/content/dam/pdfs/ada/built-environment/low-carbon-living-crc/resources/sp0012u3_-_cooling_sydney_strategy_final_-_web.pdf). Acesso em: 31 dez. 2024.

CITY OF SYDNEY. **Greening Sydney Strategy**. Sydney, Australia: City of Sydney, 2021. Disponível em: <https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/strategies-action-plans/greening-sydney-strategy>. Acesso em: 28 out. 2024.

CITY OF SYDNEY. **Urban Forest Strategy**. Sydney, Australia: City of Sydney, 2013. Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/-/media/corporate/files/2020-07-migrated/files\\_u/urban-forest-strategy-adopted-feb-2013.pdf&ved=2ahUKEwj\\_jpHAzNKKAxVxLbkGHQNMGYcQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw0CpahscpPgkdGeZWof-tJA](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/-/media/corporate/files/2020-07-migrated/files_u/urban-forest-strategy-adopted-feb-2013.pdf&ved=2ahUKEwj_jpHAzNKKAxVxLbkGHQNMGYcQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw0CpahscpPgkdGeZWof-tJA). Acesso em: 31 dez. 2024.

CITY OF SYDNEY. **Urban Forest Strategy**. Sydney, Australia: City of Sydney, 2023. Disponível em: <https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/strategies-action-plans/urban-forest-strategy>. Acesso em: 28 out. 2024.

CLINTON, N.; GONG, P. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 134, p. 294–304, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.008>. Acesso em: 16 nov. 2025.

CONNOR, S. Urban forestry and developing a green economy. **Platform**, 2013. Disponível em: <http://ontheplatform.org.uk/article/urban-forestry-invest-now>. Acesso em: 26 out. 2024.

CORBANE, C. *et al.* The grey-green divide: multi-temporal analysis of greenness across 10,000 urban centres derived from the Global Human Settlement Layer (GHSL). **International Journal of Digital Earth**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 101–118, 2020. DOI: 10.1080/17538947.2018.1530311. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1530311>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CÔRTEZ, T. M. **Revisão do Plano Diretor de Goiânia, 2017-2022: Uma análise na perspectiva da gestão democrática e do direito à cidade**. 2025. 173 f.

Dissertação (Mestrado em Direitos Humanos) - Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Direitos Humanos, Goiânia, GO, 2025. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/items/65b79295-6111-4ca1-8303-4cf81951ddc9>. Acesso em: 8 out. 2025.

COSTA, F. G. *et al.* O Fenômeno de Ilhas de Calor e o Papel da Arborização Urbana Para Mitigá-lo: Um Estudo em Ituverava, Região Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, [s. l.], v. 11, n. 30, 2023.

DOI: 10.17271/23178604113020233737. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/23178604113020233737>. Acesso em: 17 nov. 2025.

CRUZ, L. A. *et al.* Capital verde do brasil: Trajetória e desafios na arborização de Goiânia. **Revista Uniaraguaia**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 12–26, 2025. Disponível em:

<https://sipe.uniaraguaia.edu.br/index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/view/1531>. Acesso em: 12 out. 2025.

DENG, Y. *et al.* Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 641, 2018.

DOI: 10.1038/s41598-017-19088-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-19088-x>. Acesso em: 12 out. 2025.

DEVEAU, M. **Strategies to address the climatic barriers to walkable, transit-oriented communities in Florida**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2011. Disponível em:

<https://repository.gatech.edu/entities/publication/8aeed18e-e16b-4a43-b034-0a2ca6f11937>. Acesso em: 30 set. 2024.

D'IPPOLITI, D. *et al.* The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. **Environmental Health**, [s. l.], vol. 9, n. 1, p. 37, 2010. DOI: 10.1186/1476-069X-9-37. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-37>. Acesso em: 30 set. 2024.

DOICK, K.; HUTCHINGS, T. **Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure**. **Forestry Commission**, 2013. (Research Note FCRN 012) ISBN: 978-0-85538-878-2. Disponível em:

<https://www.forestresearch.gov.uk/publications/air-temperature-regulation-by-urban-trees-and-green-infrastructure/>. Acesso em: 25 out. 2024.

DONOVAN, G. H. *et al.* The Relationship Between Trees and Human Health.

**American Journal of Preventive Medicine**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 139–145, 2013.

DOI: 10.1016/j.amepre.2012.09.066. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2012.09.066>. Acesso em: 25 out. 2024.

DONOVAN, G. H.; PRESTEMON, J. P. The Effect of Trees on Crime in Portland, Oregon. **Environment and Behavior**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 3–30, 2012.

DOI: 10.1177/0013916510383238. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0013916510383238>. Acesso em: 25 out. 2024.

DU, S. *et al.* Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 178, p. 84–92, 2016. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.063. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.063>. Acesso em: 21 nov. 2025.

DUARTE, C. Goiânia: ArborizaGyn projeta plantar 50 mil mudas de árvores em área de preservação no Residencial Três Marias, na sexta-feira (8/11), **Portal Serra Dourada News**, Catalão, Goiás, 2024. Disponível em: <https://sdnews.com.br/noticia/11196/goiania-arborizagyn-projeta-plantar-50-mil-mudas-de-arvores-em-area-de-preservacao-no-residencial-tr.html>.

DUARTE, D. H. S. *et al.* The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, [s. l.], v. 14, p. 224–239, 2015. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.09.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>. Acesso em: 26 out. 2024.

ELMES, A. *et al.* Effects of urban tree canopy loss on land surface temperature magnitude and timing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 128, p. 338–353, 2017. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.04.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.04.011>. Acesso em: 21 nov. 2025.

ELMES, A. *et al.* Mapping spatiotemporal variability of the urban heat island across an urban gradient in Worcester, Massachusetts using in-situ Thermochrons and Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) data. **GIScience & Remote Sensing**, [s. l.], v. 57, n. 7, p. 845–864, 2020. DOI: 10.1080/15481603.2020.1818950. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1818950>. Acesso em: 21 nov. 2025.

EPA, United States Environmental Protection Agency. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2005**. Washington, DC, United States: U.S. Environmental Protection Agency, 2007. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/07cr.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2024.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Trees and Vegetation. In: **Reducing urban heat islands: compendium of strategies**. Unites States: U.S. Environmental Protection Agency, 2008. (*Draft*). Disponível em: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>. Acesso em: 28 dez. 2024.

EROS CENTER. **Landsat 4-5 Thematic Mapper Level-1, Collection 2**. United States Geological Survey, 1982. (Imagens de satélite). Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-4-5-thematic-mapper-collection-2>. Acesso em: 15 jan. 2025.

EROS CENTER. **Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-1, Collection 2**. United States Geological Survey, 2013. (Imagens de satélite). Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-operational-land-imager-and>. Acesso em: 15 jan. 2025.



FAO, Food and Agriculture Organization. **Forests and sustainable cities: Inspiring stories from around the world**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. ISBN: 978-92-5-130417-4. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/5beb24c4-9700-4496-93a2-703325ea6d39>. Acesso em: 25 out. 2024.

FAO, Food and Agriculture Organization. **Guidelines on urban and peri-urban forestry**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. (FAO forestry paper 178). ISBN: 978-92-5-109442-6. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/ed818e71-49f8-4247-91eb-56158955dff6>. Acesso em: 28 dez. 2024.

FERNANDES, G. W. *et al.* **Cerrado: em busca de soluções sustentáveis**. Rio de Janeiro: Vertente Produções Artísticas Ltda, 2016. 212 p. ISBN: 978-85-63100-09-2.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. H. S. Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. **Urban Climate**, [s. l.], v. 27, p. 105–123, 2019. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.11.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.11.002>. Acesso em: 16 fev. 2025.

FERRI, M. G.; MENEZES, N. L.; MONTEIRO, W. R. **Glossário Ilustrado de Botânica**. São Paulo, SP: Nobel, 1981. 196 p. ISBN: 978-85-213-0041-0.

FGR INCORPORAÇÕES. Jardins Viena, O primeiro condomínio Jardins. **FGR incorporações**, [2025?]. Disponível em: <https://fgr.com.br/condominio/jardins-viena>. Acesso em: 24 nov. 2025.

FIALHO, E. S.; FERNANDES, L. A.; CORREA, W. D. S. C. Climatologia urbana: conceitos, metodologias e técnicas. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], p. 47-85, 2019. (Edição Especial - SBCG 2018) DOI: 10.5380/abclima.v0i0.65748. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v0i0.65748>. Acesso em: 24 out. 2024.

FRÜHAUF, A. *et al.* Acute effects of outdoor physical activity on affect and psychological well-being in depressed patients – A preliminary study. **Mental Health and Physical Activity**, [s. l.], v. 10, p. 4–9, 2016. DOI: 10.1016/j.mhpa.2016.02.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mhpa.2016.02.002>. Acesso em: 26 out. 2024.

GARCIA, F. F. **Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación**. 1. ed. Madrid: Síntesis, 1995. ISBN: 84-7738-275-1.

GARTLAND, L. **Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas**. London: Earthscan, 2008. ISBN: 978-1-84407-250-7.

GOIÂNIA. **Decreto nº 108, de 08 de janeiro de 2019**. Altera o Decreto no 3.861, de 19 de outubro de 2009, que regulamenta a fiscalização, lançamento e cobrança de taxa de serviço público pela limpeza de terreno situados no Município. Goiânia: Prefeitura, [2019]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2019/dc\\_20190108\\_000000108.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2019/dc_20190108_000000108.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Decreto nº 527 de 16 de fevereiro de 2008**. Aprova o Regimento Interno da Agência Municipal do Meio Ambiente - AMMA e dá outras providências. Goiânia: Prefeitura, [2008a]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2008/dc\\_20080229\\_000000527.pdf](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2008/dc_20080229_000000527.pdf). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Instrução Normativa nº 017 de 15 de agosto de 2006**. Instituir as diretrizes ambientais para licenciamento ambiental de parcelamento do Solo Urbano no Município de Goiânia. Goiânia: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, [2006a]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/download/legislacao/diariooficial/2006/do\\_20060817\\_00003945.pdf](https://www.goiania.go.gov.br/download/legislacao/diariooficial/2006/do_20060817_00003945.pdf). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Instrução Normativa nº 030 de 05 de setembro de 2008**. Institui o Plano Diretor Arborização Urbana de Goiânia. Goiânia: Agência Municipal do Meio Ambiente, [2008b]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2008/in\\_20080905\\_000000030.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2008/in_20080905_000000030.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Instrução Normativa nº 037 de novembro de 2011**. Institui o Plano Diretor de Arborização Urbana de Goiânia e revoga em todo seu teor a Instrução Normativa nº 30. Goiânia: Agência Municipal do Meio Ambiente, [2011]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/Dados/legis/Instru%E7%F5es%20Normativas%20AMMA/2011/in\\_20111121\\_000000037.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/Dados/legis/Instru%E7%F5es%20Normativas%20AMMA/2011/in_20111121_000000037.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Instrução Normativa nº 069 de 04 de maio de 2020**. Altera a Instrução Normativa nº 037, de 21 de novembro de 2011, que Institui o Plano Diretor de Arborização Urbana de Goiânia. Goiânia: Agência Municipal do Meio Ambiente, [2020a]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2020/in\\_20200504\\_000000069.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2020/in_20200504_000000069.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Instrução Normativa nº 070 de 27 de maio de 2020**. Altera a Instrução Normativa nº 037, de 21 de novembro de 2011, que Institui o Plano Diretor de Arborização Urbana de Goiânia. Goiânia: Agência Municipal do Meio Ambiente, [2020b]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2020/in\\_20200527\\_000000070.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2020/in_20200527_000000070.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei Complementar nº 014 de 29 de dezembro de 1992**. Institui o Código de Posturas do Município de Goiânia e dá outras providências. Goiânia: Câmara Municipal, [1992]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/1992/lc\\_19921229\\_000000014.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/1992/lc_19921229_000000014.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei Complementar nº 171 de 29 de maio de 2007**. Dispõe sobre o Plano Diretor e o processo de planejamento urbano do Município de Goiânia e dá outras providências. Goiânia: Câmara Municipal, [2007a]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2007/lc\\_20070529\\_000000171.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2007/lc_20070529_000000171.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei Complementar nº 181, de 01 de outubro de 2008**. Dispõe sobre Solo Urbano não edificado, subutilizado ou não utilizado [...]. Goiânia: Câmara Municipal, [2008c]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2008/lc\\_20081001\\_000000181.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2008/lc_20081001_000000181.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei Complementar nº 349 de 4 de março de 2022**. Dispõe sobre o Plano Diretor do Município de Goiânia e dá outras providências. Goiânia: Prefeitura, [2022]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2022/lc\\_20220304\\_000000349.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2022/lc_20220304_000000349.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei Complementar nº 368 de 15 de dezembro de 2023**. Dispõe sobre o Código de Posturas do Município de Goiânia e dá outras providências. Goiânia: Prefeitura, [2023]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2023/lc\\_20231215\\_000000368.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2023/lc_20231215_000000368.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei Complementar nº 374, de 24 de janeiro de 2024**. Institui o Plano Diretor de Arborização Urbana do Município de Goiânia. Goiânia: Prefeitura, [2024]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2024/lc\\_20240124\\_000000374.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2024/lc_20240124_000000374.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei nº 7.004 de 03 de outubro de 1991**. Dispõe sobre a obrigatoriedade do plantio de árvores. Goiânia: Câmara Municipal, [1991a]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/1991/lo\\_19911003\\_000007004.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/1991/lo_19911003_000007004.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei nº 7.009 de 23 de outubro de 1991**. Dispõe sobre o plantio, extração, poda, substituição de árvores e dá outras providências. Goiânia: Câmara Municipal, [1991b]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/1991/lo\\_19911023\\_000007009.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/1991/lo_19911023_000007009.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei nº 8.451 de 07 de agosto de 2006**. Dispõe sobre o incentivo à manutenção redistribuição de arvoredo nativo nos imóveis de nossa capital e dá outras providências. Goiânia: Câmara Municipal, [2006b]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2006/lo\\_20060807\\_000008451.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2006/lo_20060807_000008451.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei nº 8.537 de 20 de junho de 2007**. Dispõe sobre a alteração na estrutura administrativa da Prefeitura Municipal de Goiânia e dá outras providências. Goiânia: Câmara Municipal, [2007b]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2007/lo\\_20070620\\_000008537.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2007/lo_20070620_000008537.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOIÂNIA. **Lei nº 10.606 de 25 de março de 2021**. Dispõe da obrigatoriedade do plantio de árvores por unidade imobiliária residencial ou comercial de edificação de uso coletivo construída no município de Goiânia. Goiânia: Prefeitura, [2021]. Disponível em: [https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete\\_civil/sileg/dados/legis/2021/lo\\_20210325\\_000010606.html](https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2021/lo_20210325_000010606.html). Acesso em: 10 fev. 2025.

GOMES, F. D. G.; FUZETO, I. M. R.; PRATES, R. P. Análise multitemporal do clima urbano em Palmas, estado do Tocantins – Brasil. **Colloquium Exactarum**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 01–14, 2020. DOI: 10.5747/ce.2020.v12.n2.e314. Disponível em: <http://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/3810/3083>. Acesso em: 16 nov. 2025.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, V 7.3.7.1155. 2025. (Imagens de Satélite). Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/versions/#earth-pro>. Acesso em: 30 jun. 2025.

GRANT, R. H.; HEISLER, G. M.; GAO, W. Estimation of Pedestrian Level UV Exposure Under Trees. **Photochemistry and Photobiology**, [s. l.], v. 75, n. 4, p. 369, 2002. DOI: 10.1562/0031-8655(2002)075<0369:EOPLUE>2.0.CO;2. Disponível em: [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)0750369EOPLUE2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)0750369EOPLUE2.0.CO2). Acesso em: 26 de. 2024.

GREENE, C. S.; MILLWARD, A. A. Getting closure: The role of urban forest canopy density in moderating summer surface temperatures in a large city. **Urban Ecosystems**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 141–156, 2017. DOI: 10.1007/s11252-016-0586-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0586-5>. Acesso em: 22 nov. 2025.

GREY, G. W.; DENEKE, F. J. **Urban forestry**. New York: John Wiley & Sons, 1978. 279 p. ISBN: 978-0-471-01515-4.

GUHA, S. *et al.* Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. **European Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 667–678, 2018. DOI: 10.1080/22797254.2018.1474494. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>. Acesso em: 22 nov. 2025.

GUO, A. *et al.* Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 63, p. 102443, 2020. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102443. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102443>. Acesso em: 21 nov. 2025.

GUO, G. *et al.* Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 135, p. 1–10, 2015. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.11.007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.007>. Acesso em: 21 nov. 2025.

HANSMANN, R.; HUG, S.-M.; SEELAND, K. Restoration and stress relief through physical activities in forests and parks. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 213–225, 2007. DOI: 10.1016/j.ufug.2007.08.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.08.004>. Acesso em: 26 out. 2024.

HEISLER, G. M.; GRANT, R. H. Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health. **Urban Ecosystems**, [s. l.], v. 4, p. 193–229, 2000. DOI: 10.1023/A:1012210710900. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1012210710900>. Acesso em: 26 out. 2024.

HEISLER, G. M.; GRANT, R. H.; GAO, W. Urban tree influences on ultraviolet irradiance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OPTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2002, San Diego, CA. **Anais [...]**. San Diego, CA: SPIE Digital Library. 2002. p. 277–290. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.452929>. Acesso em: 26 out. 2024.

HELLETSGRUBER, C. *et al.* Identifying Tree Traits for Cooling Urban Heat Islands - A Cross-City Empirical Analysis. **Forests**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1064, 2020. DOI: 10.3390/f11101064. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11101064>. Acesso em: 26 nov. 2025.

HERATH, H. M. P. I. K.; HALWATURA, R. U.; JAYASINGHE, G. Y. Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 29, p. 212–222, 2018. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.11.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.013>. Acesso em: 26 out. 2024.

HOFMANN, G. S. *et al.* The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 27, n. 17, p. 4060–4073, 2021. DOI: 10.1111/gcb.15712. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>. Acesso em: 9 fev. 2025.

HOWARD, L. **The Climate of London, deduced from meteorological observations, made in the metropolis and at various places around it**. London: Harvey and Darton, 1833.

HU, Y.; DAI, Z.; GULDMANN, J. M. Greenspace configuration impact on the urban heat island in the Olympic Area of Beijing. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, p. 33096–33107, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-12086-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12086-z>. Acesso em: 22 nov. 2025.

HUANG, S. *et al.* A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 1–6, 2021. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>. Acesso em: 22 nov. 2025.

HUANG, D. J.; AKBARI, H.; TAHA, H. The wind-shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements. In: WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC., 1990, Atlanta, GA, USA. **Anais [...]**. Atlanta, GA, USA: 1990. p. 1403–1411. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/85g3s8xt>. Acesso em: 20 out. 2024.

HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 295–309, 1988. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). Acesso em: 30 set. 2024.

HULLEY, G. C. *et al.* Land Surface Temperature. In: HULLEY, G. C.; GHENT, D. (orgs.). **Taking the Temperature of the Earth**, [s. l.]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019. p. 57–127. ISBN: 978-0-12-814458-9. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128144589000034>. Acesso em: 22 nov. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Áreas urbanizadas do Brasil: 2019**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2022. ISBN: 978-85-240-4548-6. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/apps/areas\\_urbanizadas/pdf/Informativo\\_Areas\\_Urbanizadas\\_do\\_Brasil\\_2019.pdf](https://www.ibge.gov.br/apps/areas_urbanizadas/pdf/Informativo_Areas_Urbanizadas_do_Brasil_2019.pdf). Acesso em: 9 out. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022. **IBGE**, 2023a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 6 nov. 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha Municipal. **IBGE**, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=43129>. Acesso em: 6 out. 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal Cidades, Goiânia. **IBGE**, 2023b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/goiania/historico>. Acesso em: 6 nov. 2024.

IMHOFF, M. L. *et al.* Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 114, n. 3, p. 504–513, 2010. DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>. Acesso em: 16 nov. 2025.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos, 1937-Presente. **INMET**, 2025. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. About the IPCC. **IPCC**, 2026. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: 1 fev. 2026.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. ISBN: 92-9169-122-4. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. ISBN: 978-1-107-65481-5. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. NY, USA: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>. Acesso em: 26 out. 2024.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. ISBN 978-92-9169-164-7. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf). Acesso em: 20 out. 2024.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. NY, USA: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 2013. (Summary for Policymakers) Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf). Acesso em: 20 dez. 2024.

JAMEI, Y.; RAJAGOPALAN, P.; SUN, Q. C. Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 659, p. 1335–1351, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.308. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.308>. Acesso em: 20 nov. 2025.

JENNINGS, S. B.; BROWN N. D.; SHEIL D. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. **Forestry**, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 59–74, 1999. DOI: 10.1093/forestry/72.1.59. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/forestry/72.1.59> Acesso em: 5 jan. 2025.



JIN, J. *et al.* Planning to Practice: Impacts of Large-Scale and Rapid Urban Afforestation on Greenspace Patterns in the Beijing Plain Area. **Forests**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 316, 2021. DOI: 10.3390/f12030316. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f12030316>. Acesso em: 30 dez. 2024.

JONES, B. A. Planting urban trees to improve quality of life? The life satisfaction impacts of urban afforestation. **Forest Policy and Economics**, [s. l.], v. 125, p. 102408, 2021. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102408. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102408>. Acesso em: 16 out. 2024.

JÚNIOR, J. I. F.; JESUINO, I. T.; MARTINS, M. C. Análise do modelo de arborização em praças públicas do Município de Fortaleza (Estado do Ceará, Nordeste do Brasil) e sua influência no conforto térmico e estruturas urbanas. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 5, n. 11, p. 883–896, 2018. DOI: 10.21438/rbgas.051107. Disponível em: <https://doi.org/10.21438/rbgas.051107>. Acesso em: 18 out. 2024.

KANTZIOURA, A.; KOSMOPOULOS, P.; ZORAS, S. Urban surface temperature and microclimate measurements in Thessaloniki. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 44, p. 63–72, 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.10.019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.019>. Acesso em: 20 mar. 2025.

KILLICOAT, P.; PUZIO, E.; STRINGER, R. The economic value of trees in urban areas: Estimating the benefits of Adelaide's street trees. In: 3RD NATIONAL STREET TREE SYMPOSIUM, 3., 2002, Adelaide, Australia. **Anais [...]**. Adelaide, Australia: Treenet, 2002. p. 1–14. Disponível em: <https://treenet.org/symposium-yearly-downloads/>. Acesso em: 25 out. 2024.

KONG, F. *et al.* Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 128, p. 35–47, 2014. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.04.018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.04.018>. Acesso em: 26 nov. 2025.

KONOPACKI, S.; AKBARI, H. **Energy Savings of Heat-Island Reduction Strategies in Chicago and Houston (Including Updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City)**. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California, 2002. (LBNL-49638). Disponível em: <https://eta.lbl.gov/publications/energy-savings-heat-island-0>. Acesso em: 26 out. 2024.

KORHONEN, L. *et al.* Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. **Silva Fennica**, [s. l.], v. 40, n. 4, 2006. DOI: 10.14214/sf.315. Disponível em: <https://doi.org/10.14214/sf.315>. Acesso em: 5 jan. 2025.

KUANG, W. *et al.* What are hot and what are not in an urban landscape: quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China. **Landscape Ecology**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 357–373, 2015. DOI: 10.1007/s10980-014-0128-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0128-6>. Acesso em: 22 nov. 2025.

KUO, F. E.; SULLIVAN, W. C. Environment and Crime in the Inner City: Does Vegetation Reduce Crime?. **Environment & Behavior**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 343–367, 2001. DOI: 10.1177/00139160121973025. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0013916501333002>. Acesso em: 22 nov. 2025.

KURN, D. M. *et al.* **The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling**. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California, 1994. (LBL-35320). DOI: 10.2172/10180633. Disponível em: <https://heatisland.lbl.gov/publications/potential-reducing-urban-air>. Acesso em: 25 out. 2024.

LAFRENZ, A. J. Designing Multifunctional Urban Green Spaces: An Inclusive Public Health Framework. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 17, p. 10867, 2022. DOI: 10.3390/ijerph191710867. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph191710867>. Acesso em: 25 out. 2024.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. New York: Academic Press, 1981. 275 p. ISBN: 978-0-12-435960-4.

LEFSKY, M. A. *et al.* Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. **BioScience**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 19, 2002. DOI: 10.1641/0006 3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2. Disponível em: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2). Acesso em: 1 mai. 2025.

LIANG, S.; WANG, J. A systematic view of remote sensing. In: LIANG, S.; WANG, J. (orgs.). **Advanced Remote Sensing**. 2. ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2020. p. 1–57. *E-book*. ISBN: 978-0-12-815826-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00001-5>. Acesso em: 30 set. 2024.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 7. ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, Inc, 2015. 720 p. ISBN: 978-1-118-34328-9.

LIMA, N. R.; PINHEIRO, G. M.; MENDONÇA, F. Clima urbano no brasil: Análise e contribuição da metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. **Revista Geonorte**, [s. l.], v. 2, n. 5, Edição Especial 2, p. 626–638, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/aaaa>. Acesso em: 26 mar. 2025.

LIN, T.-P. *et al.* Quantification of the effect of thermal indices and sky view factor on park attendance. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 107, n. 2, p. 137–146, 2012. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.05.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.05.011>. Acesso em: 22 nov. 2025.

LIU, L.; ZHANG, Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 3, n. 7, p. 1535–1552, 2011. DOI: 10.3390/rs3071535. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs3071535>. Acesso em: 21 nov. 2025.

LU, D. *et al.* Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 25, n. 12, p. 2365–2401, 2004.

DOI: 10.1080/0143116031000139863. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>. Acesso em: 27 nov. 2025.

LUCENA, A. J. Notas Conceituais e Metodológicas em Clima Urbano e Ilhas de Calor. **Continentes**, [s. l.], n. 2, p. 28–59, 2013. Disponível em:

<https://www.revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/view/17>.

Acesso em: 17 out. 2025.

LUQMAN, M.; RAYNER, P. J.; GURNEY, K. R. On the impact of urbanisation on CO<sub>2</sub> emissions. **npj Urban Sustainability**, [s. l.], v. 3, p. 6, 2023. DOI: 10.1038/s42949-023-00084-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00084-2>.

Acesso em: 19 mar. 2025.

MANICKATHAN, L. *et al.* Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 248, p. 259–274, 2018.

DOI:10.1016/j.agrformet.2017.10.014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.014>. Acesso em: 25 out. 2024.

MARTINS, C. A.; NUCADA, M. K. Desenvolvimento urbano na região metropolitana de Goiânia. In: BARREIRA, C. C. M. A. **Região metropolitana de Goiânia: produção habitacional e ordenamento territorial**. Goiânia, GO: C&A Alfa

Comunicação, 2023. p. 151–178. ISBN 978-65-89324-90-4. Disponível em:

<https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/regiao-metropolitana-de-goiania-producao-habitacional-e-ordenamento-territorial/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

MASCARÓ, L. E. A. R. **Vegetação urbana**. 3. ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2015. 232 p. ISBN: 978-85-99897-17-1.

MASSETTI, L. *et al.* Effects of deciduous shade trees on surface temperature and pedestrian thermal stress during summer and autumn. **International Journal of Biometeorology**, [s. l.], v. 63, n. 4, p. 467–479, 2019. DOI: 10.1007/s00484-019-01678-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01678-1>.

Acesso em: 25 out. 2024.

MASSON, V. *et al.* Urban Climates and Climate Change. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 411–444, 2020. DOI:

10.1146/annurev-environ-012320-083623. Disponível em:

<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>. Acesso em: 24 out. 2024.

MCPHERSON, E. G. *et al.* Benefits-cost analysis of Modesto's municipal urban forest. **Journal of Arboriculture**, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 235–248, 1999. Disponível em:

<https://research.fs.usda.gov/treesearch/60592>. Acesso em: 27 dez. 2024.

MCPHERSON, E. G. *et al.* **City of Charleston, South Carolina Municipal Forest Resource Analysis**. Davis, CA: Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2006. Disponível em:

<https://research.fs.usda.gov/treesearch/45985>. Acesso em: 26 out. 2024.

MCPHERSON, E. G. Expenditures Associated with Conflicts between Street Tree Root Growth and Hardscape in California, United States. **Arboriculture & Urban Forestry**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 289–297, 2000. DOI: 10.48044/jauf.2000.036. Disponível em: <https://doi.org/10.48044/jauf.2000.036>. Acesso em: 26 out. 2024.

MCPHERSON, E. G. **Green plants or power plants?**. Davis, CA.: Center for Urban Forest Research, Pacific Southwest Research Station, USDA Forest Service, 2002. Disponível em: [https://www.fs.usda.gov/psw/topics/urban\\_forestry/products/3/cufr\\_148.pdf](https://www.fs.usda.gov/psw/topics/urban_forestry/products/3/cufr_148.pdf). Acesso em: 15 out. 2024.

MCPHERSON, E. G. *et al.* Municipal Forest Benefits and Costs in Five US Cities. **Journal of Forestry**, [s. l.], v. 103, n. 8, p. 411–416, 2005. DOI: 10.1093/jof/103.8.411. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jof/103.8.411>. Acesso em: 26 out. 2024.

MCPHERSON, E. G.; MUCHNICK, J. Effects of Street Tree Shade on Asphalt Concrete Pavement Performance. **Journal of Arboriculture**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 303–310, 2005. DOI: 10.48044/jauf.2005.039. Disponível em: <https://doi.org/10.48044/jauf.2005.039>. Acesso em: 26 out. 2024.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P.; STULTS, M. Defining urban resilience: A review. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 147, p. 38–49, 2016. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.11.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>. Acesso em: 27 nov. 2024.

MEIER, A. K. Measured Cooling Savings from Vegetative Landscaping. In: CONFERENCE: 6. AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY (ACEEE) SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, PACIFIC GROVE, CA, 1990, Washington, DC, United States. **Proceedings of the 1990 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**. Washington, DC, United States: American Council for an Energy Efficient Economy, 1990. p. 4133–4143. Disponível em: [https://www.aceee.org/files/proceedings/1990/data/papers/SS90\\_Panel4\\_Paper15.pdf](https://www.aceee.org/files/proceedings/1990/data/papers/SS90_Panel4_Paper15.pdf). Acesso em: 25 out. 2024.

MENDONÇA, F. **Clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e sua aplicação a cidade de Londrina - PR. 1995.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

MENDONÇA, F. O estudo do clima urbano no Brasil. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. 2. ed. São Paulo, SP: Editora Contexto, 2011. p. 175–190. ISBN: 978-85-7244-239-8.

MIDDEL, A. *et al.* Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. **International Journal of Biometeorology**, [s. l.], v. 60, p. 1849–1861, 2016. DOI: 10.1007/s00484-016-1172-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>. Acesso em: 26 nov. 2025.

MILANO, M.; DALCIN, E. **Arborização de Vias Públicas**. Rio de Janeiro, RJ: Light, 2000. 226 p. ISBN: 85-87005-02-2.

MITCHELL, F. *et al.* **Planes locales de acción climática: aportes para su elaboración y lecciones aprendidas de la experiencia de la Red Argentina de Municipios frente al Cambio Climático**. Buenos Aires: Fundación Friedrich Ebert, 2019. ISBN: 978-987-44-3918-5. Disponível em: <https://collections.fes.de/publikationen/ident/fes/15537>. Acesso em: 21 dez. 2024.

MONTEIRO, C. A. F. Teoria e Clima Urbano. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. 2. ed. São Paulo, SP: Editora Contexto, 2011. p. 9–68. ISBN: 978-85-7244-239-8.

MONTEIRO, M. V. *et al.* The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 16, p. 160–169, 2016. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.02.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.008>. Acesso em: 17 nov. 2025.

MONTORO, E. R. Box Plot e suas versatilidades. **Ermontoro**, 2019. Disponível em: <https://www.ermontoro.com/post/2018/05/08/box-plot-e-suas-versatilidades>. Acesso em: 19 out. 2025.

MOORE, G. Urban trees: worth more than they cost. In: 10TH NATIONAL STREET TREE SYMPOSIUM 2009, 10., 2009, Adelaide, Australia. **Anais [...]**. Adelaide, Australia: Treenet, 2009. p. 7–14. Disponível em: <https://treenet.org/symposium-yearly-downloads/>. Acesso em: 25 out. 2024.

MORAKINYO, T. E. *et al.* A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. **Building and Environment**, [s. l.], v. 115, p. 1–17, 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.01.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>. Acesso em: 26 nov. 2025.

MOTAZEDIAN, A.; COUTTS, A. M.; TAPPER, N. J. The microclimatic interaction of a small urban park in central Melbourne with its surrounding urban environment during heat events. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 52, p. 126688, 2020. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126688. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126688>. Acesso em: 17 nov. 2025.

NASCIMENTO, D. T. F.; BARROS, J. R. Identificação de ilhas de calor por meio de sensoriamento remoto: Estudo de caso no município de Goiânia – GO/2001. **Boletim Goiano de Geografia**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 119–134, 2009. DOI: 10.5216/bgg.v29i1.7112. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/7112>. Acesso em: 16 nov. 2024.

NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. Análise da evolução do fenômeno de ilhas de calor no município de Goiânia-GO (1986-2010). **Boletim Goiano de Geografia**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 113–127, 2011. DOI: 10.5216/bgg.v31i2.16849. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/16849>. Acesso em: 16 nov. 2024.

NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. D. Mapeamento do processo histórico de expansão urbana do município de Goiânia-GO. **GEOgraphia**, [s. l.], v. 17, n. 34, p. 141, 2015. DOI: 10.22409/GEOgraphia2015.v17i34.a13715. Disponível em: <https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2015.v17i34.a13715>. Acesso em: 10 jun. 2025.

NATH, B.; NI-MEISTER, W.; ÖZDOĞAN, M. Fine-Scale Urban Heat Patterns in New York City Measured by ASTER Satellite - The Role of Complex Spatial Structures. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 13, n. 19, p. 3797, 2021. DOI: 10.3390/rs13193797. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13193797>. Acesso em: 26 nov. 2025.

NEWMAN, A. **Best Practice: Planting One Million Trees to Develop the Urban Forest**. New York, Unites States: NYC Global Partners' Innovation Exchange, 2013. (Report). Disponível em: [https://www.nyc.gov/html/ia/gprb/downloads/pdf/NYC\\_Environment\\_MillionTrees.pdf](https://www.nyc.gov/html/ia/gprb/downloads/pdf/NYC_Environment_MillionTrees.pdf). Acesso em: 30 dez. 2024.

NIMISH, G.; BHARATH, H. A.; RAMACHANDRA, T. V. Visualization of landuse change pattern and its impact on Urban Heat Islands. In: KHAN, A. *et al.* (orgs.). **Global Urban Heat Island Mitigation**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022. p. 301–322. ISBN: 978-0-323-85539-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00001-9>. Acesso em: 3 jan. 2025.

NOGUEIRA, A. M. P. *et al.* Impacto da verticalização no microclima urbano: o caso do bairro Guaxuma, em Maceió-AL, Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 72–85, 2018. DOI: 10.20396/parc.v9i2.8650267. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650267>. Acesso em: 7 set. 2025.

NOVA, R. A. V.; GONÇALVES, R. M.; LIMA, F. V. M. S. Análise Temporal de Ilhas de Calor Através da Temperatura de Superfície e do Índice de Vegetação em Recife-PE, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 73, n. 2, p. 598–614, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n2-54522. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n2-54522>. Acesso em: 20 nov. 2025.

NOVAES, P. C.; RAMALHO, T. **Goiânia Resiliente: Mudanças Climáticas, Adaptação Urbana e Direitos Humanos**. Goiânia: Prefeitura Municipal de Goiânia, Secretaria Municipal de Direitos Humanos e Políticas Afirmativas, 2024. Disponível em: <https://goianiaresiliente.com/relatorios>. Acesso em: 2 jul. 2025.

NOWAK, D. J. **The Effects of Urban Trees on Air Quality**. Syracuse, NY: USDA Forest Service, Northeastern Research Station, 2000. Disponível em: [https://groundworkdenver.net/devs/Trees\\_airquality.pdf](https://groundworkdenver.net/devs/Trees_airquality.pdf). Acesso em: 26 out. 2024.

NOWAK, D. J. *et al.* **The Urban Forest of New York City**. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2737/NRS-RB-117>. Acesso em: 31 dez. 2024.

NOWAK, D. J. *et al.* Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 193, p. 119–129, 2014. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.05.028. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028>. Acesso em: 26 out. 2024.

NOWAK, D. J.; CRANE, D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 116, n. 3, p. 381–389, 2002. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7). Acesso em: 26 out. 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**, [s. l.], v. 4, n. 3-4, p. 115–123, 2006. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>. Acesso em: 26 out. 2024.

NOWAK, D. J.; DWYER, J. F. Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. In: KUSER, J. E. (org.). **Urban and Community Forestry in the Northeast**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. p. 25–46. ISBN: 978-1-4020-4289-8. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4289-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4289-8_2). Acesso em: 26 out. 2024.

NYC PARKS, New York City Department of Parks & Recreation. MillionTreesNYC. **NYC Parks**, [entre 2015 a 2024]. Disponível em: <https://www.nycgovparks.org/trees/milliontreesnyc>. Acesso em: 31 dez. 2024.

OH, R. R. Y. *et al.* Connection to nature and time spent in gardens predicts social cohesion. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 74, p. 127655, 2022. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127655. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127655>. Acesso em: 25 out. 2024.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London: Routledge, 2002. 435 p. ISBN: 0-415-04319-0.

OKE, T. R. The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. In: CERMAK, J. E. *et al.* (orgs.). **Wind Climate in Cities**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. p. 81–107. ISBN: 978-94-017-3686-2. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_5). Acesso em: 30 set. 2024.

OKE, T. R. *et al.* **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 519 p. ISBN: 978-1-107-42953-6.

OKUMURA, R. Quer plantar uma muda em frente a sua casa? Essas cidades criaram o 'disque-árvore'. **Terra**, 2024. Disponível em: <https://www.terra.com.br/planeta/noticias/quer-plantar-uma-muda-em-frente-a-sua-casa-essas-cidades-criaram-o-disque-arvore,9c29c5e4c7ed60b005a036a3a7e5bd00a12ysk2v.html>. Acesso em: 12 ago. 2025.



OLIVEIRA, M. M. B. O padrão territorial de Goiânia: um olhar sobre o processo de formação de sua estrutura urbana. **Arquitextos**, [s. l.], v. 065.07, no ano 06, 2005. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/06.065/419>. Acesso em: 8 out. 2025.

OLIVEIRA, C. M. M. **Relação entre vegetação e temperatura da superfície terrestre: uma abordagem baseada em sensoriamento remoto para área urbana de Brasília, DF**. 2022. 166 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/handle/10482/46477?locale=es>. Acesso em: 22 set. 2025.

OLIVEIRA, S.; ANDRADE, H.; VAZ, T. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. **Building and Environment**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 2186–2194, 2011. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.04.034. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034>. Acesso em: 22 set. 2025.

ORTÍZ, B.; SHAW, J.; FULTON, J. **Basics of Crop Sensing**. Alabama, USA: Alabama A&M University and Auburn University, 2019. Disponível em: [https://www.aces.edu/wp-content/uploads/2019/03/ANR-1398-Basics-of-Crop-Sensing\\_061319La.pdf](https://www.aces.edu/wp-content/uploads/2019/03/ANR-1398-Basics-of-Crop-Sensing_061319La.pdf). Acesso em: 17 out. 2025.

OTUKEI, J. R.; BLASCHKE, T. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 12, p. S27–S31, 2010. DOI: 10.1016/j.jag.2009.11.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.002>. Acesso em: 27 nov. 2025.

PAIVA, F. F. G. D.; SOUZA, N. S. E. Mapeamento de Ilhas de Calor Urbanas na Conurbação Urbana de Cuiabá – Várzea Grande/MT por Sensoriamento Remoto. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v. 20, n. 5, 2024. DOI: 10.17271/1980082720520245209. Disponível em: [https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum\\_ambiental/article/view/5209](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/5209). Acesso em: 16 nov. 2025.

PANDIT, R.; POLYAKOV, M.; SADLER, R. The importance of tree cover and neighbourhood parks in determining urban property values. In: 2012 CONFERENCE (56TH), FEBRUARY 7-10, 2012, Fremantle, Australia. **Anais [...]**. Fremantle, Australia: Australian Agricultural and Resource Economics Society, 2012. p. 1 - 16. Disponível em: <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.124357>. Acesso em: 26 out. 2024.

PASSOS, D. Centro de Goiânia recebe mais de 100 novas mudas com programa Rearboriza. **ANP, Acontece No País**, 2024a. Disponível em: <https://anp.com.br/centro-de-goiania-recebe-mais-de-100-novas-mudas-com-programa-rearboriza/#:~:text=A%20Prefeitura%20de%20Goi%C3%A2nia%2C%20por%20meio%20da,tem%20como%20objetivo%20revitalizar%20a%20arboriza%C3%A7%C3%A3o%20urbana%2C>. Acesso em: 16 nov. 2025.

PASSOS, D. Prefeitura de Goiânia lança ArborizaGyn especial para recuperar área incendiada no Residencial Três Marias. **ANP, Acontece No País**, 2024b. Disponível em: <https://anp.com.br/prefeitura-de-goiania-lanca-arborizagyn-especial-para-recuperar-area-incendiada-no-residencial-tres-marias/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

PATHAK, M. *et al.* **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. (Technical Summary). ISBN 978-92-9169-160-9. DOI: 10.1017/9781009157926.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157926.002> . Acesso em: 16 nov. 2025.

PENG, S. *et al.* Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 696–703, 2012. DOI: 10.1021/es2030438. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2030438>. Acesso em: 16 nov. 2025.

PEPER, P. J. *et al.* **New York municipal forest resource analysis**. Davis, CA: Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2007. Disponível em: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/45969>. Acesso em: 26 out. 2024.

POLYDOROS, A. *et al.* Use of landscape metrics for the mitigation of the surface urban heat island effect in Mediterranean cities. In: KHAN, A. *et al.* (orgs.). **Global Urban Heat Island Mitigation**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022. p. 95–108. ISBN: 978-0-323-85539-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00015-9>. Acesso em: 3 jan. 2025.

POMERANTZ, M. *et al.* **The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities**. Berkeley, California: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental energy technologies division, 2000. (LBNL-43442). Disponível em: <https://heatisland.lbl.gov/publications/effect-pavements-temperatures-air>. Acesso em: 25 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA, Centro de Goiânia recebe mais de 100 novas mudas com programa Rearboriza. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2024a. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/centro-de-goiania-recebe-mais-de-100-novas-mudas-com-programa-rearboriza/>. Acesso em: 13 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Goiânia: Capital Verde do Brasil, Parques e Bosques. **Prefeitura de Goiânia**, 2026. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/sobre-goiania/parques-e-bosques/>. Acesso em: 15 mar. 2026.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Goiânia realiza 2a etapa do ArborizaGyn. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2021a. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/goiania-realiza-2a-etapa-do-arborizagyn/>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Mapa Digital Fácil. **Prefeitura de Goiânia**, 2025. Disponível em: <https://portalmapa.goiania.go.gov.br/mapafacil/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Prefeitura de Goiânia lança ArborizaGyn especial para recuperar área incendiada no Residencial Três Marias. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2024b, Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/prefeitura-de-goiania-lanca-arborizagyn-especial-para-recuperar-area-incendiada-no-residencial-tres-marias/>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Prefeitura de Goiânia prepara mudas para plantio no ArborizaGYN 3.0. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2023a. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/agora/prefeitura-de-goiania-prepara-mudas-para-plantio-no-arborizagyn-3-0>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Prefeitura lança 2º etapa do Rearboriza Goiânia, no bairro mais quente da capital, neste sábado (03/06). **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2023b. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/prefeitura-lanca-2o-etapa-do-rearboriza-goiania-no-bairro-mais-quente-da-capital-neste-sabado-03-06/>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Programa Centraliza: gestão Rogério investe em infraestrutura, incentivos fiscais, segurança pública e rearborização do Centro da Capital. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2024c. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/programa-centraliza-gestao-rogerio-investe-em-infraestrutura-incentivos-fiscais-seguranca-publica-e-rearborizacao-do-centro-da-capital/>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. **Programa Urbano Ambiental Macambira Anicuns**. Goiânia, [2015?]. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/download/puama/programa.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2026.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. “Queremos transformar Goiânia na cidade mais arborizada do mundo”, afirma Rogério Cruz em plantio de 50 mil mudas pelo ArborizaGyn 2.0. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2022. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/agora/queremos-transformar-goiania-na-cidade-mais-arborizada-do-mundo-afirma-rogerio-cruz-em-plantio-de-50-mil-mudas-pelo-arborizagyn-2-0>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Rearboriza Goiânia planta 170 mudas de árvores no Centro da Capital. **Goiânia Agora, Agência de notícias**, 2023b. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/rearboriza-goiania-planta-170-mudas-de-arvores-no-centro-da-capital/>. Acesso em: 12 out. 2025.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Semana do Meio Ambiente, Junho de 2021. **Prefeitura de Goiânia**, 2021b. Disponível em: <https://www.goiania.go.gov.br/semana-meio-ambiente/#:~:text=A%20Prefeitura%20de%20Goi%C3%A2nia%20lan%C3%A7a,pelo%20n%C3%BAmero%209%209330%2D7995>. Acesso em: 12 out. 2025.

RAHMAN, M. A. *et al.* Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 287, p. 107947, 2020. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.107947. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107947>. Acesso em: 25 out. 2024.

RAUTIAINEN, M.; STENBERG, P.; NILSON, T. Estimating canopy cover in Scots pine stands. **Silva Fennica**, [s. l.], v. 39, n. 1, 2005. DOI: 10.14214/sf.402. Disponível em: <https://doi.org/10.14214/sf.402>. Acesso em: 5 jan. 2025.

REIS, A. C. R.; RESENDE, S. C. P. Localização residencial urbana e estratégias de mercado: ascensão dos condomínios horizontais residenciais fechados. **Revista Eletrônica de Ciências Humanas, Saúde e Tecnologia**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 24–51, 2019. Disponível em: <https://revista.fasem.edu.br/index.php/fasem/article/view/205>. Acesso em: 27 nov. 2025.

RIBEIRO, M. E. J. **Goiânia: Os Planos, A Cidade E O Sistema De Áreas Verdes**. Goiânia, GO: Editora da PUG Goiás, 2004. 157 p. ISBN: 978-8571032330.

RIBEIRO, V. S.; MILAGRE, C. V. C.; RESENDE, S. C. P. A produção do espaço urbano de Goiânia a partir do Programa Minha Casa Minha Vida: espraiamento urbano e áreas periurbanas. **Journal Of Humanities And Social Science**, [s. l.], v. 29, n. 7, p. 56–64, 2024. DOI: 10.9790/0837-2907015664. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jhss/papers/Vol.29-Issue7/Ser-1/F2907015664.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2025.

RIZZINI, C. T. **Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Âmbito Cultural Edições, 1997. 748 p. ISBN: 978-8500258404.

RODOVALHO, M. O. **Análise do planejamento urbano e efetividade dos planos diretores de Goiânia**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Planejamento Territorial) - Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, 2008. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/2859#preview-link0>. Acesso em: 7 ago. 2025.

RODRIGUES, A. A. *et al.* Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 22, p. 6807–6822, 2022. DOI: 10.1111/gcb.16386. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16386>. Acesso em: 8 out. 2025.

ROGERS, K. *et al.* **Valuing London's urban forest: results of the London i-Tree eco project**. London, England: Treeconomics London, 2015. 84 p. ISBN: 978-0-9571371-1-0.

ROTH, M. Urban Heat Islands. In: FERNANDO, H. J. S. (org.). **Handbook of environmental fluid dynamics**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2013. v. 2, p. 143–159. ISBN: 978-1-4665-5604-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b13691>. Acesso em: 8 out. 2025.

RUEFENACHT, L.; ACERO, J. A. **Strategies for Cooling Singapore: A catalogue of 80+ measures to mitigate urban heat island and improve outdoor thermal comfort**. Singapore: Cooling Singapore (CS), 2017. DOI: 10.3929/ETHZ-B-000258216. Disponível em: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000258216>. Acesso em: 25 out. 2024.

SAHANA, M.; AHMED, R.; SAJJAD, H. Analyzing land surface temperature distribution in response to land use/land cover change using split window algorithm and spectral radiance model in Sundarban Biosphere Reserve, India. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], v. 2, p. 81, 2016. DOI: 10.1007/s40808-016-0135-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0135-5>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SALATA, F. *et al.* Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 30, p. 79–96, 2017. DOI: 10.1016/j.scs.2017.01.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.006>. Acesso em: 26 out. 2024.

SALIH, M. M. *et al.* Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT-8 Thermal Infrared Sensor Data and Validation with Infrared Thermometer Camera. **International Journal of Engineering & Technology**, [s. l.], v. 7, n. 4.20, p. 608, 2018. DOI:10.14419/ijet.v7i4.20.27402. Disponível em: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.20.27402>. Acesso em: 2 fev. 2025.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. D.; RIBEIRO, J. F. (orgs.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. ISBN: 78-85-7383-397-3. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/570911/cerrado-ecologia-e-flora>. Acesso em: 6 jul. 2025.

SANTIAGO, D. D. B.; GOMES, H. B. Estudo de Ilhas de Calor no Município de Maceió/AL usando Dados Orbitais do Landsat 5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 793–803, 2016. DOI: 10.5935/1984-2295.20160053. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.3.p793-803>. Acesso em: 2 nov. 2025.

SANTOS, C. Z. A. D. *et al.* Análise qualitativa da arborização urbana de 25 vias públicas Cidade de Aracaju-SE. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 751–763, 2015. DOI: 10.5902/1980509819678. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509819678>. Acesso em: 26 out. 2024.

SATTERTHWAITE, D. The implications of population growth and urbanization for climate change. **Environment and Urbanization**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 545–567, 2009. DOI: 10.1177/0956247809344361. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0956247809344361>. Acesso em: 19 mar. 2025.

SCHUBERT, T. H. **Trees for urban use in Puerto Rico and The virgin islands**. Rio Piedras, Puerto Rico: U. S. Department of Agriculture, 1979. (General Technical Report SO-27). Disponível em: [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr\\_sr027.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr_sr027.pdf). Acesso em: 23 nov. 2024.

SCOTT, K.; SIMPSON, J.; MCPHERSON, E. G. Effects of Tree Cover on Parking Lot Microclimate and Vehicle Emissions. **Arboriculture & Urban Forestry**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 129–142, 1999. DOI: 10.48044/jauf.1999.019. Disponível em: <https://auf.isa-arbor.com/content/25/3/129>. Acesso em: 26 out. 2024.

SEAMANS, G. S. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 2–11, 2013. DOI: 10.1016/j.ufug.2012.08.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.08.004>. Acesso em: 25 out. 2024.

SECRETARIAT OF THE CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY. **Cities and Biodiversity Outlook: Action and Policy**. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2012. ISBN: 92-9225-432-2. Disponível em: <https://www.cbd.int/doc/health/cbo-action-policy-en.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024

SHASHUA-BAR, L.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 92, n. 3–4, p. 179–186, 2009. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2009.04.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>. Acesso em: 25 out. 2024

SILVA, L. M. C. D. *et al.* Influência da verticalização no microclima urbano em cidades tropicais: uma revisão da literatura. In: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA, 3., 2021, Maceió, Brasil. **Anais [...]**. Maceió, Brasil: Antac, 2021. p. 270–280. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/singeurb/article/view/1134>. Acesso em: 9 jul. 2025.

SILVEIRA, P. C. D. *et al.* Análise das superfícies urbanas para identificação de ilhas de calor através da aplicação de índices radiométricos e da temperatura da superfície. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 33, p. 329–353, 2023. DOI: 10.55761/abclima.v33i19.16322. Disponível em: <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16322>. Acesso em: 16 nov. 2025.

SINGH, A. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 989–1003, 1989. DOI: 10.1080/01431168908903939. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>. Acesso em: 27 nov. 2025.

SKELHORN, C.; LINDLEY, S.; LEVERMORE, G. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 121, p. 129–140, 2014. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.09.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.012>. Acesso em: 26 out. 2024.

SMARGIASSI, A. *et al.* Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. **Journal of Epidemiology & Community Health**, [s. l.], v. 63, n. 8, p. 659–664, 2009. DOI: 10.1136/jech.2008.078147. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/jech.2008.078147>. Acesso em: 30 set. 2024.

SOBRINO, J. A. *et al.* Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 117, p. 50–56, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.042. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.042>. Acesso em: 8 fev. 2025.

SODOUDI, S. *et al.* The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s. l.], v. 34, p. 85–96, 2018. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.06.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.002>. Acesso em: 22 set. 2025.

SOUZA, M. E. Marco regulatório urbanístico da cidade de Goiânia, Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, [s. l.], v. 40, n. 01, p. 1–24, 2020. DOI: 10.5216/bgg.v40i01.66139. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v40i01.66139>. Acesso em: 6 out. 2025.

SOUZA, R. M. **Novos modelos de ocupação urbana: os condomínios fechados horizontais em Goiânia**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Desenvolvimento Territorial) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, 2012. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/bitstream/tede/2794/1/RENATO%20MEDEIROS%20D%20SOUZA.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

SRIVANIT, M.; HOKAO, K. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer. **Building and Environment**, [s. l.], v. 66, p. 158–172, 2013. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.012>. Acesso em: 26 out. 2024.

STEWART, I. D. Why should urban heat island researchers study history?. **Urban Climate**, [s. l.], v. 30, p. 100484, 2019. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100484. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>. Acesso em: 24 out. 2024.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SULTANA, S.; SATYANARAYANA, A. N. V. Urban heat island: land cover changes, management, and mitigation strategies. In: KHAN, A. *et al.* (orgs.). **Global Urban Heat Island Mitigation**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022. p. 71–93. ISBN: 978-0-323-85539-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00009-3>. Acesso em: 25 out. 2024.

TAHA, H. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 30, n. 20, p. 3423–3430, 1996. DOI: 10.1016/1352-2310(96)00035-0. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00035-0](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00035-0). Acesso em: 18 out. 2024.



TANG, H. *et al.* Definition and measurement of tree cover: A comparative analysis of field-, lidar- and landsat-based tree cover estimations in the Sierra national forests, USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 268, p. 258–268, 2019. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.01.024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.024>. Acesso em: 5 jan. 2025.

TARRAN, J. People and trees, providing benefits, overcoming impediments. In: 10TH NATIONAL STREET TREE SYMPOSIUM 2009. 10., 2009, Adelaide, Australia. **Anais [...]**. Adelaide, Australia: Treenet, 2009, p. 63–82. Disponível em: <https://treenet.org/symposium-yearly-downloads/>. Acesso em: 25 out. 2024.

TAYLOR, M. S. *et al.* Research note: Urban street tree density and antidepressant prescription rates—A cross-sectional study in London, UK. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 136, p. 174–179, 2015. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.12.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.12.005>. Acesso em: 26 out. 2024.

THE CITY OF NEW YORK. **PlaNYC, update April 2011**. New York, USA: The city of New York, 2011. . Disponível em: [https://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/planyc\\_2011\\_planyc\\_full\\_report.pdf](https://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/planyc_2011_planyc_full_report.pdf). Acesso em: 26 out. 2024.

THEEUWES, N. E.; SOLCEROVÁ, A.; STEENEVELD, G. J. Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 118, n. 16, p. 8881–8896, 2013. DOI: 10.1002/jgrd.50704. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50704>. Acesso em: 25 out. 2024.

TIAN, Y. *et al.* A global analysis of multifaceted urbanization patterns using Earth Observation data from 1975 to 2015. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 219, p. 104316, 2022. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104316. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104316>. Acesso em: 19 mar. 2025.

TREGLIA, M. L. *et al.* **The State of the Urban Forest in New York City**. [S. l.]: The Nature Conservancy, 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5532876. Disponível em: <https://zenodo.org/record/5532876>. Acesso em: 31 dez. 2024.

TROY, A.; GROVE, J. M.; O'NEIL-DUNNE, J. The relationship between tree canopy and crime rates across an urban-rural gradient in the greater Baltimore region. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 106, n. 3, p. 262–270, 2012. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.03.010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.03.010>. Acesso em: 25 out. 2024.

TSOKA, S. Investigating the Relationship Between Urban Spaces Morphology and Local Microclimate: A Study for Thessaloniki. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 38, p. 674–681, 2017. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.148. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.148>. Acesso em: 26 out. 2024.

ULRICH, R. S. View Through a Window May Influence Recovery from Surgery. **Science**, [s. l.], v. 224, n. 4647, p. 420–421, 1984. DOI: 10.1126/science.6143402. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.6143402>. Acesso em: 26 out. 2024.

UN, United Nations. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. New York, United States: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. (ST/ESA/SER.A/420). ISBN: 978-92-1-148319-2. Disponível em: <https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.

UNDP, United Nations Development Programme. **The Climate Dictionary. Speak climate fluently**. New York, United States: United Nations Development Programme, 2023. Disponível em: <https://www.undp.org/publications/climate-dictionary>. Acesso em: 19 mar. 2025.

UN-HABITAT. **Cities and Climate Action. World Cities Report 2024**. Nairobi, Kenya: UN-Habitat, 2024. ISBN: 978-92-1-132955-1. Disponível em: [https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024\\_-\\_full\\_report.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024_-_full_report.pdf). Acesso em: 19 mar. 2025.

USGS, United States Geological Survey. What are the band designations for the Landsat satellites?. **USGS**, 2025. Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>. Acesso em: 15 mar. 2025.

VAN DILLEN, S. M. E. *et al.* Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health: adding quality to quantity. **Journal of Epidemiology and Community Health**, [s. l.], v. 66, n. 6, p. e8–e8, 2012. DOI: 10.1136/jech.2009.104695. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/jech.2009.104695>. Acesso em: 25 out. 2024.

VELASCO, G. D. N.; LIMA, A. M. L. P.; COUTO, H. T. Z. D. Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto da arborização urbana. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 30, n 4, p. 679–686, 2006. DOI: 10.1590/S0100-67622006000400022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000400022>. Acesso em: 26 out. 2024.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Complete Urban Surface Temperatures. **Journal of Applied Meteorology**, [s. l.], v. 36, n. 9, p. 1117–1132, 1997. DOI: 10.1175/1520-0450(1997)036<1117:CUST>2.0.CO;2. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036%3C1117:CUST%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036%3C1117:CUST%3E2.0.CO;2). Acesso em: 26 mar. 2025.

WALEED, M.; SAJJAD, M. Leveraging cloud-based computing and spatial modeling approaches for land surface temperature disparities in response to land cover change: Evidence from Pakistan. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s. l.], v. 25, p. 100665, 2022. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100665. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100665>. Acesso em: 1 nov. 2025.

WANG, Z.-H. *et al.* Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. **Applied Energy**, [s. l.], v. 161, p. 437–444, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.047. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.047>. Acesso em: 22 nov. 2025.

WANG, J. *et al.* Significant effects of ecological context on urban trees' cooling efficiency. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 159, p. 78–89, 2020. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.001>. Acesso em: 22 nov. 2025.

WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 114, p. 2–19, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.046. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>. Acesso em: 26 nov. 2025.

WANG, Jia; ZHOU, W.; WANG, Jing. Time-Series Analysis Reveals Intensified Urban Heat Island Effects but without Significant Urban Warming. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 11, n. 19, p. 2229, 2019. DOI: 10.3390/rs11192229. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11192229>. Acesso em: 20 nov. 2025.

WENG, Q.; YANG, S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 70, n. 2, p. 145–156, 2004. DOI: 10.1016/j.jenvman.2003.11.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.11.006>. Acesso em: 20 nov. 2025.

WMO, World Meteorological Organization. **Guidance on Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL-UHI)**. Geneva 2, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2023. ISBN: 978-92-63-11292-2. Disponível em: <https://library.wmo.int/records/item/58410-guidance-on-measuring-modelling-and-monitoring-the-canopy-layer-urban-heat-island-cl-uhi?offset=1>. Acesso em: 24 mar. 2025.

WOLF, K. **Trees in Business Districts: Positive Effects on Consumer Behavior**. Seattle, WA: Center for Urban Horticulture, College of Forest Resources, University of Washington, 1998a. (Fact Sheet #5). Disponível em: <https://urbanforestrysouth.org/resources/library/ttresources/trees-in-business-districts-positive-effects-on-consumer-behavior>. Acesso em: 22 out. 2024.

WOLF, K. **Urban Forest Values: Economic Benefits of Trees in Cities**. Seattle, WA: Center for Urban Horticulture, College of Forest Resources, University of Washington, 1998b. (Fact Sheet #3). Disponível em: <https://wrrc.arizona.edu/publication/urban-forest-values-economic-benefits-trees-cities>. Acesso em: 22 out. 2024.

WOLF, K. **Urban Nature Benefits: Psycho-Social Dimensions of People and Plants**. Seattle, WA: Center for Urban Horticulture, College of Forest Resources, University of Washington, 1998c. (Fact Sheet #1). Disponível em: <https://planning.org/knowledgebase/resource/9126940/>. Acesso em: 22 out. 2024.

WONG, N. H. *et al.* Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. **Nature Reviews Earth & Environment**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 166–181, 2021. DOI: 10.1038/s43017-020-00129-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00129-5>. Acesso em: 15 mar. 2025.

XIAO, Q. *et al.* Rainfall Interception by Sacramento's Urban Forest. **Arboriculture & Urban Forestry**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 235–244, 1998. DOI: 10.48044/jauf.1998.028. Disponível em: <https://doi.org/10.48044/jauf.1998.028>. Acesso em: 26 out. 2024.

XIAO, X. D. *et al.* The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 40, p. 428–439, 2018. DOI: 10.1016/j.scs.2018.04.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.002>. Acesso em: 24 set. 2024.

XRTECH GROUP. What is NDVI and How To Calculate NDVI?. **Xrtech Group**, 2025. Disponível em: <https://xrtechgroup.com/what-is-ndvi-and-how-to-calculate-ndvi/>. Acesso em: 17 out. 2025.

XU, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 29, n. 14, p. 4269–4276, 2008. DOI: 10.1080/01431160802039957. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>. Acesso em: 24 set. 2024.

YU, Z. *et al.* Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 6798, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-25296-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25296-w>. Acesso em: 22 set. 2025.

YU, C.; HIEN, W. N. Thermal benefits of city parks. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 105–120, 2006. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.04.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.003>. Acesso em: 17 set. 2025.

YUSUF, Y. A.; PRADHAN, B.; IDREES, M. O. Spatio-temporal Assessment of Urban Heat Island Effects in Kuala Lumpur Metropolitan City Using Landsat Images. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 829–837, 2014. DOI: 10.1007/s12524-013-0342-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0342-8>. Acesso em: 20 set. 2025.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 583–594, 2003. DOI: 10.1080/01431160304987. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>. Acesso em: 30 set. 2024.

ZHANG, H. *et al.* Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. **Applied Geography**, [s. l.], v. 44, p. 121–133, 2013. DOI: 10.1016/j.apgeog.2013.07.021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.021>. Acesso em: 22 set. 2025.

ZHANG, Y. *et al.* Public Attitudes Toward Urban Trees and Supporting Urban Tree Programs. **Environment and Behavior**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 797–814, 2007. DOI: 10.1177/0013916506292326. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0013916506292326>. Acesso em: 26 out. 2024.

ZHAO, J. *et al.* Assessing the potential of large-scale urban forest projects as a natural climate solution. **Nature-Based Solutions**, [s. l.], v. 6, p. 100153, 2024. DOI: 10.1016/j.nbsj.2024.100153. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100153>. Acesso em: 28 out. 2024.

ZHOU, W.; WANG, J.; CADENASSO, M. L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: A comparative study. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 195, p. 1–12, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.043. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.043>. Acesso em: 24 set. 2025.

ZOU, K. H.; TUNCALI, K.; SILVERMAN, S. G. Correlation and Simple Linear Regression. **Radiology**, [s. l.], v. 227, n. 3, p. 617–628, 2003. DOI: 10.1148/radiol.2273011499. Disponível em: <https://doi.org/10.1148/radiol.2273011499>. Acesso em: 15 jul. 2025.

## APÊNDICE A – SITUAÇÃO 2025

Nesta seção, é apresentado um resumo sobre o comportamento das intensidades das ICUS e dos índices de vegetação para o ano de 2025, com exemplos concretos da cidade de Goiânia que permitam orientar e priorizar ações de mitigação por meio da arborização urbana. Os dados são apresentados desde a escala do perímetro urbano até o comportamento médio dos bairros, estabelecendo relações entre as variáveis.

### Distribuição das intensidades das ICUS - 2025

Para o ano de 2025, o perímetro urbano apresenta uma intensidade média de ICUS de  $2,82^{\circ}\text{C}$ . O 31,87% do perímetro urbano apresenta intensidades de ICUS fortes ( $4$  a  $6^{\circ}\text{C} = 141,19\text{km}^2$ ), seguidas pelas moderadas ( $2$  a  $4^{\circ}\text{C} = 121,78\text{km}^2$ ), que representam 27,49% da área. As intensidades fracas ( $0$  a  $2^{\circ}\text{C} = 95,82\text{km}^2$ ) representam 21,63% da área, seguidas das ilhas de frescor ( $< 0^{\circ}\text{C} = 62,80\text{km}^2$ ), as quais representam 14,18%. As intensidades muito fortes ( $> 6^{\circ}\text{C} = 21,37\text{km}^2$ ) ocupam a menor percentagem da área, equivalente a 4,83%.

As ICUS apresentam uma distribuição concêntrica (Mapa 1-A), na qual os bairros centrais, caracterizados por maior ocupação e compactação, apresentam as intensidades mais elevadas, enquanto nas periferias observa-se um comportamento mais variável.

Entre os bairros que registraram maior intensidade, destacam-se, em direção ao centro, os setores Campinas (1), Coimbra (2), Centro-Oeste (3), Aeroporto (5), Setor dos Funcionários (6), Central (7), Leste Vila Nova (8), Nova Vila (9), Norte Ferroviário (10), Criméia Oeste (11); ao sul, Jardim América (12), Setor Sul (13) e parte do Setor Bueno (14); a leste, Jardim Novo Mundo (15) e Bairro Feliz (16); e ao norte, o setor Urias Magalhães e Vila Roriz (17). Entre outras áreas urbanas com altas intensidades distantes do centro, destacam-se os setores Jardim Nova Esperança (4), Setor União (18), Conjunto Vera Cruz (19), Vila Romana (20), Jardim Liberdade (21), Vila Mutirão I e II (22), Jardim Novo Planalto (23), Jardim Guanabara I, II e III (24) e Vila Itatiaia (25).

A distribuição concêntrica é fragmentada pelas áreas de vegetação densa que acompanham os rios e córregos que atravessam a cidade, compostas principalmente por Áreas de Preservação Permanente (APP).







Essas áreas, junto com Áreas de Proteção Ambiental (APA), Unidades de Conservação (UC) e Parques, representam as principais ilhas de frescor da cidade, apresentando intensidades das ICUS que variam de 0 a 4°C. Dessas áreas destacam-se a correspondente ao Rio Meia Ponte (26), cujo raio de proteção é de 100m, em comparação com os 50m aplicados a córregos de menor porte. Entre essas áreas, distingue-se, na área central, o Jardim Botânico (27), o Parque Areião Washington Novaes (28), o Parque Vaca Brava (29), o Zoológico de Goiânia (30), o Bosque dos Buritis (31), o Parque Mutirama e o Botafogo (32); ao norte, o Parque Brisas da Mata (33), o Bosque Estrela Daiva (34), o Parque Curitiba (35) e o Parque Tantony Griffith (36). A oeste, a APA correspondente ao Morro de Mendanha (37). Ao Sudoeste o conjunto de Parques que acompanham o córrego Macambira (38).

Em áreas periféricas e fora do perímetro urbano, foram observadas intensidades elevadas não relacionadas a áreas densamente urbanizadas. Terrenos agrícolas em fase inicial, caracterizados por solo nu, registraram intensidades equivalentes às de áreas densamente construídas, tanto dentro do perímetro urbano (39) quanto fora (40). Terrenos com essas características fora do perímetro urbano elevam as Temperaturas Superficiais Terrestres (TST) da zona rural, reduzindo a diferença entre as temperaturas urbanas e rurais. O desenvolvimento de novos loteamentos (41), caracterizados por grandes áreas de solo descoberto em suas etapas iniciais, exhibe esse mesmo comportamento, destacando o impacto desse tipo de cobertura do solo sobre o campo térmico da cidade.

Em relação aos bairros, para o 2025 apresentam uma intensidade média de ICUS de 3,37°C, com uma distribuição que reflete o comportamento observado no perímetro urbano (Mapa 1–B). O 48% (267 bairros) dos bairros apresentam uma intensidade média moderada (2 a 4°C), com uma distribuição bastante dispersa. Dentro dessa categoria encontram-se bairros antigos, como o Setor Oeste, Setor Marista, Setor Bueno, Jardim Goiás e Setor Pedro Ludovico, bem como bairros mais recentes e periféricos, como Jardins do Cerrado 7 e 10, Buena Vista I, II e IV, Residencial Orlando Moraes, Residencial Antônio Carlos Pires e Residencial João Paulo II.

O 31% (175 bairros), compostos por intensidades fortes (4 a 6°C), apresentam uma distribuição mais concêntrica. Bairros centrais como Campinas, Coimbra, Central, Setor dos Funcionários, Aeroporto, Norte Ferroviário, Sul e Leste

Universitário, bem como Jardim América, Sudoeste, Cidade Jardim, Rodoviário, São José, Setor dos Aeroviários, Setor Urias de Magalhães e Vila Roriz, entre outros, são representantes dessa categoria, formando uma mancha mais ou menos uniforme que se estende do centro até a periferia.

Em relação às intensidades das ICUS Fracas (0 a 2°C), 18% dos bairros se enquadram nessa categoria (100 bairros), com uma distribuição acentuada nas periferias, composta principalmente por chácaras e condomínios fechados. Entre os bairros que se encontram nesta categoria estão Goiânia 2, Bairros São Domingos, Fonte das Águas, Aldeia do Vale, Loteamento Alphaville Flamboyant, Jardins Munique, Jardins Milão, Jardim França, Residencial Goiânia Golfe Clube, Parque Lozandes; e chácaras como Sítios de Recreio Ipê, Sítios de Recreio Mansões Bernardo Sayão, Chácaras Retiro Setor Jaó, Chácaras de Recreio São Joaquim, Chácaras Anhanguera, entre outras.

Apenas 2% (10 bairros) dos bairros apresentam intensidades médias de ICUS muito fortes ( $> 6^{\circ}\text{C}$ ), dos quais 5 estão localizados no centro da cidade. Nesta categoria estão Vila Bela ( $6,63^{\circ}\text{C}$ ), Vila Isaura ( $6,57^{\circ}\text{C}$ ), Vila São Francisco ( $6,54^{\circ}\text{C}$ ), Vila Santa Cruz ( $6,41^{\circ}\text{C}$ ), Conjunto Romildo F. R. do Amaral ( $6,40^{\circ}\text{C}$ ), Loteamento Nova Vila ( $6,37^{\circ}\text{C}$ ), Setor Centro Oeste e Setor Marechal Rondon ( $6,30^{\circ}\text{C}$ ), Vila Paraíso ( $6,18^{\circ}\text{C}$ ), Setor União ( $6,07^{\circ}\text{C}$ ) e Bairro Feliz ( $6,03^{\circ}\text{C}$ ).

Um 1% (4 bairros) dos bairros apresentam intensidades equivalentes a ilhas de frescor ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ), formadas por chácaras e glebas com níveis muito baixos de urbanização. Nesta categoria encontram-se as chácaras Samambaia, Califórnia, Condomínio Faz Dourados e a Gleba anexa ao Village Campos Verdes.

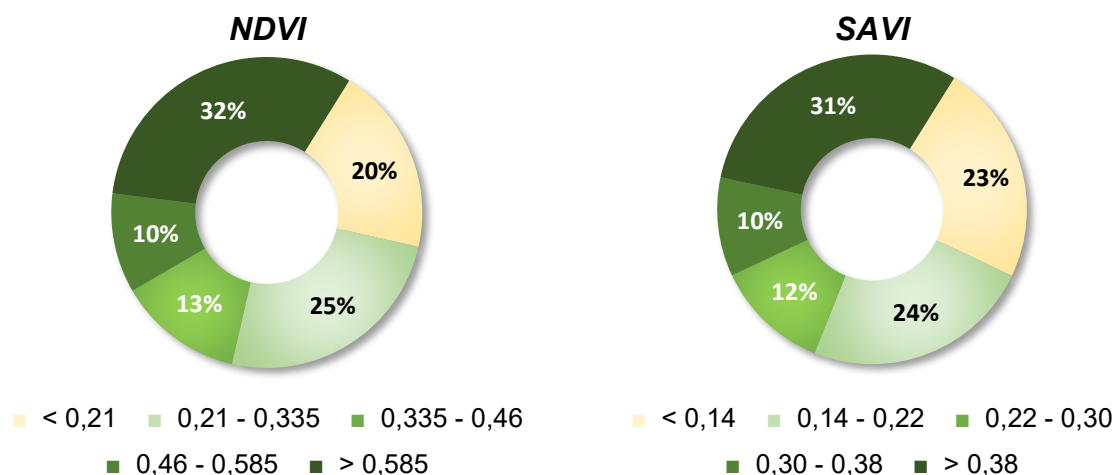
### **Distribuição dos Índices de Vegetação - 2025**

Para o ano de 2025, 32% (141,41 km<sup>2</sup>) do perímetro urbano é representado por níveis superiores a 0,585 na escala do índice *NDVI*, seguido por 25% (111,03 km<sup>2</sup>) com níveis entre 0,21-0,335 e 20% (87,07 km<sup>2</sup>) com níveis inferiores a 0,21. As áreas com níveis entre 0,335-0,46 e 0,46-0,585 representam a menor parte da área, sendo 13% (57,55 km<sup>2</sup>) e 10% (45,90 km<sup>2</sup>), respectivamente (Figura 1).

Em relação à escala do índice *SAVI*, 31% (135,44 km<sup>2</sup>) da área apresenta níveis superiores a 0,38, seguidos por níveis entre 0,14-0,22 e inferiores a 0,14, que representam 24% (106,28 km<sup>2</sup>) e 23% (102,67 km<sup>2</sup>), respectivamente. Os níveis entre 0,22-0,30 e 0,30-0,38 representam a menor área, sendo 12% (52,84 km<sup>2</sup>) e 10%

(45,75 km<sup>2</sup>), respectivamente.

Figura 1 - Proporção do Perímetro Urbano de acordo a classes *NDVI* e *SAVI* no 2025.



Fonte: Elaboração própria.

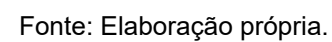
Os mapas 2 e 3 - A mostram o comportamento espacial dos índices *NDVI* e *SAVI* para 2025, respectivamente.

Nos mapas é possível observar os setores centrais consolidados e mais antigos da cidade, como aqueles com menor vegetação, em contraste com as periferias, que apresentam maiores variações, compostos por terras cultiváveis, terrenos vazios e loteamentos em diferentes estágios de urbanização.

Entre os setores que podem ser claramente identificados com escassa vegetação, destacam-se Campinas (1), Coimbra (2), Centro-Oeste (3), Central (4), Sector Bueno (5), Jardim Nova Esperança (6), Bairro dos Aeroviários (7) e Rodoviário (8), a maioria composta por áreas centrais consolidadas, caracterizadas por maior ocupação e compactação. Apesar da escassa vegetação nessas áreas, é possível identificar áreas com vegetação, como, por exemplo, a Av. Goiás (9), bem como áreas verdes distribuídas dentro do tecido urbano nos Setores Central, Coimbra, Centro-Oeste, Rodoviário e Bairro dos Aeroviários. Avenidas de outros setores também podem ser identificadas por sua vegetação, como a Av. do Café e a Av. das Indústrias em Santa Genoveva (10), a Av. Vera Cruz no Jardim Guanabara (11), a Av. Eli Alves Forte no Residencial Forteville (12), a rodovia GO-060 (13), a Av. Leste Oeste no Bairro Goiá (14) e a Av. Goiás Norte no Residencial Recanto do Bosque (15).

Outras áreas que se destacam pela falta de vegetação são aquelas dedicadas a atividades agrícolas em fase inicial (caracterizadas por solo nu), identificadas tanto dentro (17) quanto fora do perímetro urbano (16).











Também são observadas áreas com vegetação escassa em decorrência do desenvolvimento de novos loteamentos, identificadas principalmente a sudoeste da cidade (18), caracterizadas por grandes áreas com solo nu.

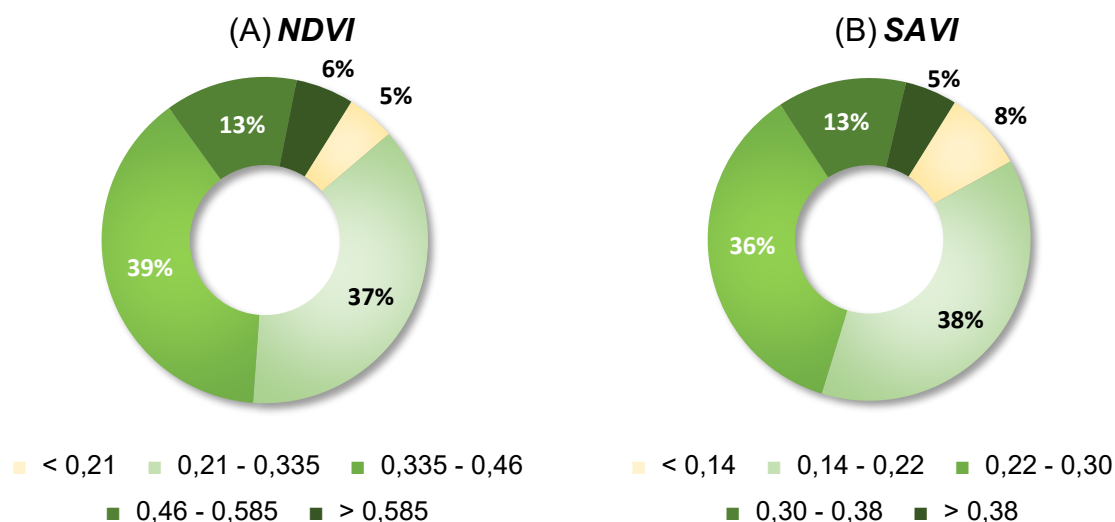
As APP representam uma constante de vegetação densa ao longo do tecido urbano, sendo as associadas ao Rio Meia Ponte, Ribeirão Anicuns e Ribeirão Caveiras as que possuem maior área vegetada, fragmentando o tecido denso e carente de vegetação das zonas centrais. Parques e áreas de conservação representam as principais áreas verdes, seguidas por praças e avenidas, estas últimas observadas em maior medida no último ano do estudo.

Dentro das APP, destacam-se, as correspondentes ao Rio Meia Ponte (19), Anicuns (20) e Caveiras (21) apresentam maior vegetação nas margens do curso d'água. Dentro dos parques, destacam-se na área central o Jardim Botânico (22), o Parque Areião Washington Novaes (23), o Parque Vaca Brava (24), o Zoológico de Goiânia (25), o Bosque dos Buritis (26), o Parque Mutirama e o Botafogo (27); ao norte, o Parque Brisas da Mata (28), o Bosque Estrela Daiva (29), o Parque Curitiba (30) e o Parque Tantony Griffith (31). A oeste, a APA correspondente ao Morro de Mendanha (32). Ao Sudoeste, o conjunto de parques que acompanham o córrego Macambira (33).

A proporção das classes dos índices de vegetação, bem como sua distribuição, sugere que a cidade apresenta um forte contraste em relação à vegetação urbana, composta principalmente por áreas com vegetação muito densa e áreas com vegetação muito escassa, sendo os níveis intermediários altos os que ocupam a menor proporção.

Em relação aos bairros, para 2025, a maior proporção apresenta valores médios de *NDVI* entre 0,335-0,46, o equivalente a 39% (216 bairros) do total (Figura 2-A e Mapa 2-B). Entre esses níveis estão Jardim Novo Mundo, Setor Jaó, Santa Genoveva, Criméia Oeste, Jardim Petrópolis, Conjunto Vera Cruz, Residencial Recanto do Bosque, Setor Estrela Daiva, Jardim Curitiba, Residencial Brisas da Mata, entre outros. Os bairros que apresentam níveis entre 0,21-0,335 representam 37% (208 bairros), entre os quais se encontram o Setor Central, Oeste, Sul, Pedro Ludovico, Jardim América, Leste Vila Nova, Norte Ferroviário, Leste Universitário, Vila Viana, Cidade Jardim, Setor Sudoeste, Barrio dos Aeroviários, Setor São José, entre outros.

Figura 2 - Proporção de bairros de acordo a classes *NDVI* e *SAVI* no 2025.



Fonte: Elaboração própria.

Em menor proporção, encontram-se os bairros com níveis entre 0,46-0,585, que representam 13% (73 bairros) do total. A maioria dos bairros dentro dessa categoria for representada por chácaras como Sítios de Recreio Caraíbas, Chácaras de Recreio São Joaquim, Chácaras Retiro, Sítios de Recreio Mansões Bernardo Sayão; bem como condomínios fechados como Aldeia do Vale, Alphaville Flamboyant, Jardins Paris, Jardim França, entre outros.

O 6% (32 bairros) apresentam médias superiores a 0,585, representados em sua maioria por chácaras como Califórnia, Samambaia, Anhanguera, Sítios de Recreio Mansões do Campus, Ipê, Panorama; condomínios fechados como Jardins Munique e Residencial Goiânia Golfe Clube; bem como lotes com grandes áreas verdes como o Campus Samambaia e a escola de agronomia da UFG. A menor proporção dos bairros é representada por níveis inferiores a 0,21 (5% - 27 bairros), composta principalmente por bairros centrais e com processos de verticalização, como o Setor Campinas, Coimbra, Aeroporto, Bueno, Marista, Nova Suíça, Bela Vista, Centro Oeste, Setor dos Funcionários, Bairro Rodoviário, entre outros.

A classificação através do índice *SAVI* apresenta uma distribuição semelhante (Mapa 3-B), detectando um maior número de bairros em níveis baixos e intermediários (Figura 2-B). A maioria dos bairros apresenta níveis baixos entre 0,14 e 0,22, o equivalente a 38% (210 bairros), e níveis intermediários entre 0,22 e 0,30, o equivalente a 36% (200 bairros). Entre os bairros que apresentam níveis entre 0,14 e 0,22, encontram-se Jardim Novo Mundo, Setor Jaó, Santa Genoveva, Conjunto Vera



Cruz, Jardim Petrópolis, Jardim Curitiba, Setor Estrela Daiva, Residencial Recanto do Bosque, Setor Jaó, Santa Genoveva, Jardim Novo Mundo, entre outros. Bairros mais centrais, como Setor Oeste, Setor Sul, Jardim América, Setor Sudoeste, Setor Leste Universitário, Setor Pedro Ludovico, Jardim Goiás e Setor Leste Vila Nova, estão dentro da faixa de 0,22-0,30.

Em menor proporção, encontram-se os bairros que apresentam níveis entre 0,30 e 0,38, representando 13% (72 bairros), compostos em grande parte por chácaras como Recreio São Joaquim, Sítios de Recreio Mansões do Campus, Chácaras Retiro, Sítios de Recreio Mansões Bernardo Sayão; y condomínios fechados como Aldeia do Vale, Alphaville Flamboyant, Jardins Munique, Jardim França, Residencial Goiânia Clube, entre outros.

Bairros com níveis inferiores a 0,14 representam apenas 8% (45 bairros), em sua maioria compostos por bairros centrais e com processos de verticalização. Entre esses bairros estão o Setor Campinas, Coimbra, Bueno, Marista, Nova Suíça, Bela Vista, Central, Aeroporto, Setor dos Funcionários, Centro Oeste, Vila Abajá, Vila Isaura, Vila São Francisco, Vila Paraíso, entre outros. Bairros com níveis superiores a 0,38 representam a menor proporção dos bairros (5% - 29 bairros), compostos por chácaras como Califórnia, Samambaia, Sítios de Recreio Panorama, Chácara Anhanguera e lotes com grandes áreas verdes como o Campus Samambaia e a escola de agronomia da UFG.

### **Relação entre Índices de Vegetação e ICUS - 2025**

Ao analisar as intensidades das ICUS dos bairros no 2025, classificados de acordo com 5 categorias para os índices *NDVI* e *SAVI*, é possível identificar que os bairros com maiores níveis de vegetação apresentam menores intensidades das ICUS, o que se reflete nas proporções das categorias para cada variável (Figura 3 e 4).

Para 2025, 76% dos bairros apresentam níveis médios de *NDVI* entre 0,21 e 0,46 (39% entre 0,335 e 0,46; 37% entre 0,21 e 0,335), cujas intensidades médias de ICUS oscilam entre 2,69 e 5,05°C. No caso do *SAVI*, para este ano, 74% dos bairros são representados por níveis médios entre 0,14 e 0,30 (38% entre 0,14 e 0,22; 36% entre 0,22 e 0,30), que registram intensidades médias de ICUS que oscilam entre 2,61 e 4,87°C. Essas categorias representam em grande parte o 48% dos bairros identificados para este ano com intensidades moderadas das ICUS (2 a 4°C).

Figura 3 - Proporção de bairros de acordo a categorias *NDVI* e classificação das ICUS no 2025.

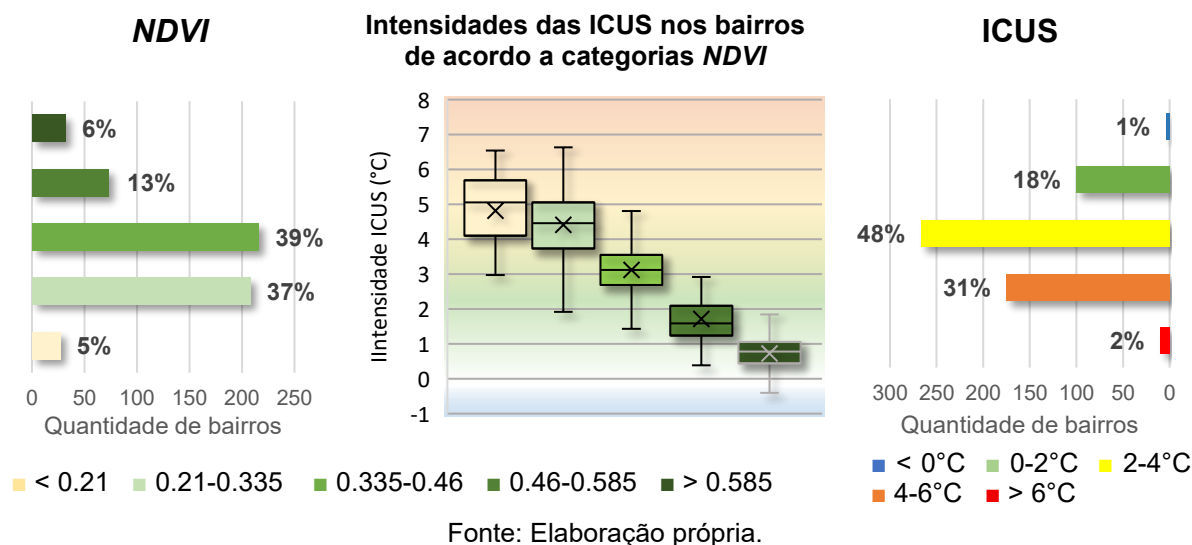
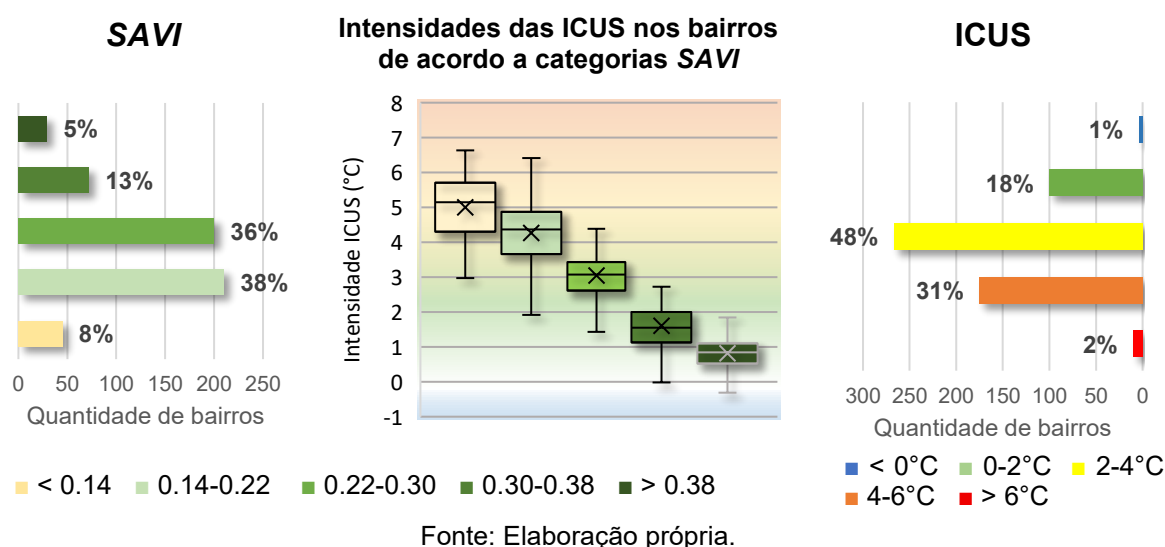


Figura 4 - Proporção de bairros de acordo a categorias *SAVI* e classificação das ICUS no 2025.



Bairros com níveis de vegetação inferiores a 0,21 e 0,14 nas médias dos índices *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, apresentam as intensidades mais altas das ICUS. Entre eles, destacam-se setores centrais como Centro Oeste (6,29°C), Vila São Francisco (6,53°C), Coimbra (5,72°C), Aeroporto (5,65°C), Campinas (5,04°C), Setor dos Funcionários (5,81°C), Bairro Rodoviário (5,00°C), bem como alguns mais distantes do centro, como o Setor Cândida de Moraes (5,52°C), Vila Romana (5,87°C) e Vila Nova Canaã (5,55°C).

Entre aqueles com níveis superiores a 0,58 e 0,38 nas médias dos índices *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, destacam-se principalmente Chácaras como Samambaia (-0,31°C), Califórnia (-0,29°C), Sítios de Recreio Ipê (0,58°C), Chácaras Retiro Bairro

Feliz (0,82°C), Chácara Botafogo (0,87°C), Sítios de Recreio Panorama (0,51°C), bem como alguns bairros como Residencial Goiânia Golfe Clube (0,72°C), Residencial João Bom (0,99°C) e Jardins Munique (0,13°C), apresentando intensidades próximas às encontradas nos setores rurais.

Os bairros com níveis intermediários de vegetação, que oscilam entre 0,335-0,46 e 0,22-0,30 nas médias dos índices *NDVI* e *SAVI*, respectivamente, apresentam uma maior variação nas intensidades das ICUS. Entre esses bairros estão Jardim Novo Mundo (4,35°C), Setor Jaó (2,77°C), Santa Genoveva (3,05°C), Residencial Recanto do Bosque (3,51°C), Residencial Brisas da Mata (3,02°C), Sector Estrela Daiva (3,45°C), Jardim Curitiba (3,90°C), Conjunto Veracruz (3,27°C), Vila Itatiaia (4,79°C), Jardim Petrópolis (2,68°C), entre outros.

Esses resultados mostram como os valores médios dos índices de vegetação estão relacionados à capacidade de resfriamento dos bairros, influenciando o comportamento das intensidades do ICUS.

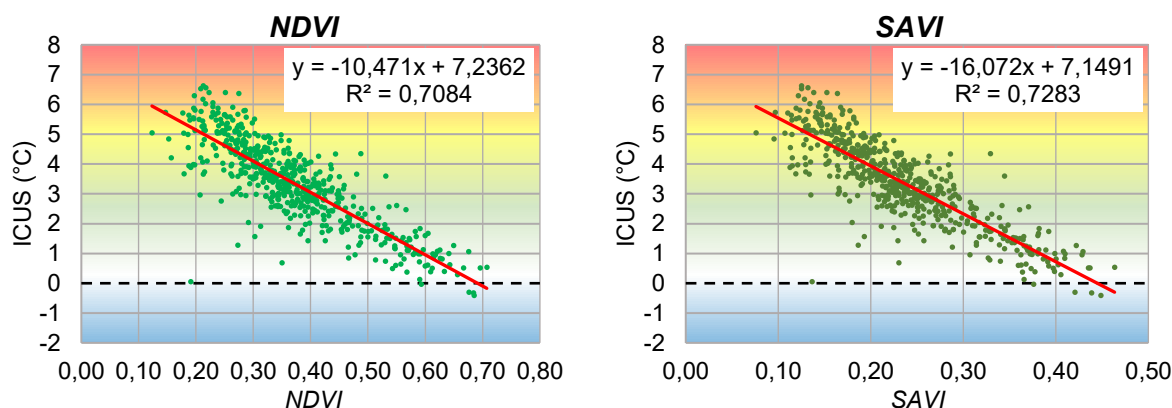
Ao avaliar a relação entre as variáveis por meio da correlação de Pearson e da regressão dos mínimos quadrados ordinários (Variável independente = índices de vegetação / Variável dependente = intensidade das ICUS) para o ano de 2025, utilizando os valores médios de acordo com o polígono de cada bairro, foi possível verificar uma relação significativa ( $p < 0,001$ ).

Para 2025, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) indica uma relação “fortemente negativa” entre as variáveis, registrando um valor de -0,84 no caso do índice *NDVI* e de -0,85 no *SAVI*.

Em relação à regressão dos mínimos quadrados ordinários (Figura 5), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que os valores médios do índice *NDVI* conseguiram explicar 70,8% das variações nas intensidades médias das ICUS dos bairros, em uma relação na qual o aumento de 0,095 nesse índice está relacionado a uma redução de 1°C na intensidade.

No caso do índice *SAVI*, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que os valores médios desse índice conseguiram explicar 72,8% das variações nas intensidades médias das ICUS dos bairros, em uma relação na qual um aumento de 0,062 nesse índice está associado a uma redução de 1°C na intensidade.

Figura 5 - Regressão linear dos valores médios de *NDVI* e *SAVI* com as intensidades das ICUS nos bairros – 2025.



Fonte: Elaboração própria.

A forte relação entre as variáveis identificada por meio dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e de determinação ( $R^2$ ), refletem a importância da vegetação urbana no comportamento do campo térmico de Goiânia. Os índices *NDVI* e *SAVI* demonstraram grande utilidade no monitoramento da vegetação urbana, bem como na previsão do comportamento das ICUS, permitindo a realização de diagnósticos para priorizar bairros da cidade na aplicação de estratégias de mitigação. Além disso, o uso do polígono do bairro como unidade espacial proporcionou maior precisão em comparação com técnicas de pontos aleatórios, além de permitir associações diretas com as escalas territoriais empregadas no planejamento urbano local.