



EXPANSÃO DE SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS E VARIABILIDADE TERMO-HIGROMÉTRICA NA REGIÃO NORTE DE GOIÂNIA (1985–2020)

Simone Gonçalves Sales Assunção¹
Marcus Vinicius Maluf de Almeida²
Heloina Teresinha Faleiro³

Resumo A urbanização altera a cobertura do solo, o balanço hídrico e as condições climáticas locais, especialmente em áreas ambientalmente estratégicas. Este estudo analisou a evolução das superfícies impermeáveis na região norte de Goiânia e discutiu sua relação com a variabilidade temporal da temperatura média anual do ar e da umidade relativa entre 1985 e 2020. A área de estudo foi delimitada em ambiente SIG com base em dados vetoriais oficiais. A dinâmica da cobertura do solo foi analisada por meio de imagens Landsat processadas no Google Earth Engine e classificadas por abordagem supervisionada. As tendências climáticas foram avaliadas utilizando o teste de Mann-Kendall e regressão linear. Os resultados indicaram tendência de aumento da temperatura média anual do ar e tendência de redução da umidade relativa ao longo da série histórica, com ajuste moderado para a temperatura ($R^2 = 0,5778$) e menor ajuste para a umidade relativa ($R^2 = 0,2484$). A área impermeável apresentou tendência geral de crescimento quando considerada a média móvel de 5 anos ($R^2 = 0,7226$). Entretanto, as correlações lineares entre área impermeável e variáveis climáticas foram fracas, indicando que a variabilidade termo-higrométrica observada não pode ser explicada exclusivamente pela impermeabilização do solo. Conclui-se que a região norte de Goiânia passou por um processo de transformação territorial compatível com a expansão urbana, acompanhado por aquecimento local e redução da umidade relativa, em interação com forçantes climáticas regionais. Os resultados destacam a importância do planejamento urbano orientado à adaptação climática e à preservação da funcionalidade ambiental dessa porção do município.

Palavras-chave: Climatologia urbana; mudanças climáticas; sensoriamento remoto; solo impermeabilizado; superfícies impermeáveis.

EXPANSION OF IMPERVIOUS SURFACES AND THERMO-HYGROMETRIC VARIABILITY IN NORTHERN GOIÂNIA (1985–2020)

Abstract: *Urbanization alters land cover, the hydrological balance, and local climatic conditions, especially in environmentally strategic areas. This study analyzed the evolution of impervious surfaces in northern Goiânia and discussed their relationship with the temporal variability of annual mean air temperature and relative humidity from 1985 to 2020. The study area was delineated in a GIS environment based on official vector data. Land cover dynamics were analyzed using Landsat imagery processed in Google Earth Engine and classified through a supervised approach. Climatic trends were assessed using the Mann-Kendall test and linear regression. The results indicated an increasing trend in annual mean air temperature and a decreasing trend in relative humidity over the historical series, with a moderate fit for temperature ($R^2 = 0.5778$) and a lower fit for relative humidity ($R^2 = 0.2484$). Impervious area showed an overall increasing trend when the 5-year moving average was considered ($R^2 = 0.7226$). Nevertheless, linear correlations between impervious area and climatic variables were weak, indicating that the observed thermo-hygrometric variability cannot be explained exclusively by soil imperviousness. It is concluded that northern Goiânia underwent a process of territorial transformation consistent with urban expansion, accompanied by local warming and reduced relative humidity, in interaction with regional climate forcings. The results highlight the importance of urban planning oriented toward climate adaptation and the preservation of the environmental functionality of this portion of the municipality.*

¹ Pós doutorado em Agronomia. Universidade de Brasília (UnB). Professora da Escola de Agronomia (UFG). Escola de Agronomia, Campus Samambaia - Rodovia Goiânia/Nova Veneza, Km 0 - Caixa Postal 131, CEP 74690-900, Goiânia, GO, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1320-3483>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9161706833327804>. E-mail: sisales@ufg.br

² Bacharel em Engenharia Florestal (UFG). Especialista em Gestão Ambiental. Mestrando em Ciências Florestais. Universidade de Brasília. (UnB). Colaborador Externo. Escola de Agronomia, Campus Samambaia - Rodovia Goiânia/Nova Veneza, Km 0 - Caixa Postal 131, CEP 74690-900, Goiânia, GO, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1133-4367>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4484926482301526>. E-mail: marcus.maluf@ufg.br

³ Doutorado em Agronomia. Universidade Federal de Goiás. (UFG). Professora da Escola de Agronomia (UFG). Escola de Agronomia, Campus Samambaia - Rodovia Goiânia/Nova Veneza, Km 0 - Caixa Postal 131, CEP 74690-900, Goiânia, GO, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8040-4341>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2369059894174254>. E-mail: helo0110@ufg.br



Keywords: *Urban climatology; climate change; remote sensing; impervious soil; impervious surfaces.*

1 Introdução

A urbanização constitui um dos principais vetores de transformação ambiental em áreas metropolitanas, promovendo alterações na cobertura do solo, no balanço hídrico e nas condições climáticas locais. Em Goiânia, Goiás, Brasil, esse processo assume especial relevância na porção norte do município, área historicamente associada à manutenção de importantes funções hidrológicas, especialmente na dinâmica do ribeirão João Leite e de outros cursos d'água estratégicos para o abastecimento hídrico e a regulação ambiental da capital (Assunção, 2012).

Nas últimas décadas, o crescimento populacional e a expansão urbana intensificaram a ocupação dessa porção do território, favorecendo a substituição progressiva de superfícies vegetadas e permeáveis por áreas urbanizadas, solo exposto e superfícies impermeáveis. Esse processo acompanha a expansão demográfica e a consolidação metropolitana de Goiânia, alterando a organização espacial da cidade e ampliando as pressões sobre áreas ambientalmente sensíveis.

Do ponto de vista conceitual, é importante distinguir cobertura do solo e uso do solo, uma vez que a primeira se refere ao revestimento físico da superfície terrestre, enquanto a segunda diz respeito à forma como essa superfície é apropriada e utilizada pelas atividades humanas. No âmbito deste estudo, o foco recai sobre a evolução da cobertura do solo, com ênfase nas superfícies urbanizadas e impermeabilizadas, tomadas como expressão espacial do processo de urbanização.

Na climatologia urbana, a cidade não é entendida apenas como suporte físico da ocupação humana, mas como elemento ativo na produção de um clima específico. Na formulação do Sistema Clima Urbano, Monteiro (1976) interpreta o clima urbano como resultado da interação entre os atributos da urbanização e a atmosfera, enquanto Sant'Anna Neto (2001) destaca a necessidade de compreender o clima em perspectiva geográfica, articulando ritmos atmosféricos, produção do espaço e processos sociais. Nesse contexto, alterações na cobertura do solo, especialmente aquelas relacionadas ao aumento de superfícies impermeáveis e à redução da vegetação, tendem a interferir no balanço de energia e água da superfície, influenciando o comportamento térmico e higrométrico em escala local.

A literatura tem demonstrado que a urbanização pode favorecer o aquecimento do ambiente urbano, principalmente por meio do aumento do armazenamento de calor, da redução da evapotranspiração e das modificações na rugosidade da superfície. Amorim *et al.* (2009) ressaltam que a intensidade e a extensão espacial das ilhas de calor urbanas dependem não apenas da densidade construída e dos materiais urbanos, mas também das condições



atmosféricas, da morfologia urbana e do uso e ocupação do solo. Paralelamente, estudos recentes têm reforçado que a expansão das superfícies impermeáveis constitui um dos indicadores mais consistentes da urbanização e de seus efeitos ambientais, devido à sua associação com o aumento do escoamento superficial, a degradação da qualidade ambiental e a intensificação do ambiente térmico urbano (Zhang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023). Em Goiânia, Nascimento e Barros (2009) identificaram diferenças térmicas expressivas entre áreas urbanas e rurais, enquanto Nascimento e Oliveira (2012) demonstraram a evolução temporal do fenômeno de ilhas de calor no município entre 1986 e 2010.

Ao mesmo tempo, a interpretação das mudanças climáticas locais não pode desconsiderar a influência dos controles regionais. Hofmann *et al.* (2021) demonstraram que o Cerrado brasileiro está se tornando mais quente e mais seco. Mais recentemente, Soares *et al.* (2025), ao analisarem municípios distribuídos pelo bioma entre 1961 e 2021, identificaram tendência de aumento da temperatura do ar em 13 das 14 localidades avaliadas e redução da precipitação em parcela expressiva da amostra, reforçando as evidências de mudança climática regional no Cerrado. Assim, tendências de aumento da temperatura e redução da umidade relativa observadas em escala local podem refletir a superposição entre processos de urbanização e mudanças climáticas de fundo em escala regional.

Além dos efeitos térmicos, a expansão das superfícies impermeáveis altera significativamente o ciclo hidrológico urbano. Em Goiânia, Luiz e Romão (2019) demonstraram que a impermeabilização, associada à intensidade das chuvas e às características fisiográficas locais, favorece o aumento do escoamento superficial e a ocorrência de alagamentos e inundações. Portanto, a discussão sobre a impermeabilização do solo na região norte de Goiânia deve ser compreendida sob uma perspectiva integrada, envolvendo simultaneamente clima urbano, dinâmica hidrológica e planejamento territorial.

Nesse cenário, o sensoriamento remoto orbital constitui ferramenta estratégica para o monitoramento multitemporal das transformações da cobertura do solo, possibilitando identificar padrões espaciais de urbanização em longas séries históricas. Estudos recentes demonstram que a análise espaço-temporal de superfícies impermeáveis utilizando séries temporais Landsat tem sido amplamente empregada para caracterizar a expansão urbana, seus padrões espaciais e seus efeitos ambientais, inclusive com a aplicação de testes de tendência e métricas de crescimento urbano (Zhao *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2018). Associada a dados meteorológicos de superfície, essa abordagem possibilita investigar como a dinâmica territorial se relaciona com tendências climáticas locais, embora tais relações devam ser interpretadas com cautela e em perspectiva multiescalar.



Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar a evolução da cobertura do solo, com ênfase na expansão das superfícies urbanizadas e impermeabilizadas na região norte de Goiânia, e discutir sua relação com a variabilidade temporal da temperatura média anual do ar e da umidade relativa.

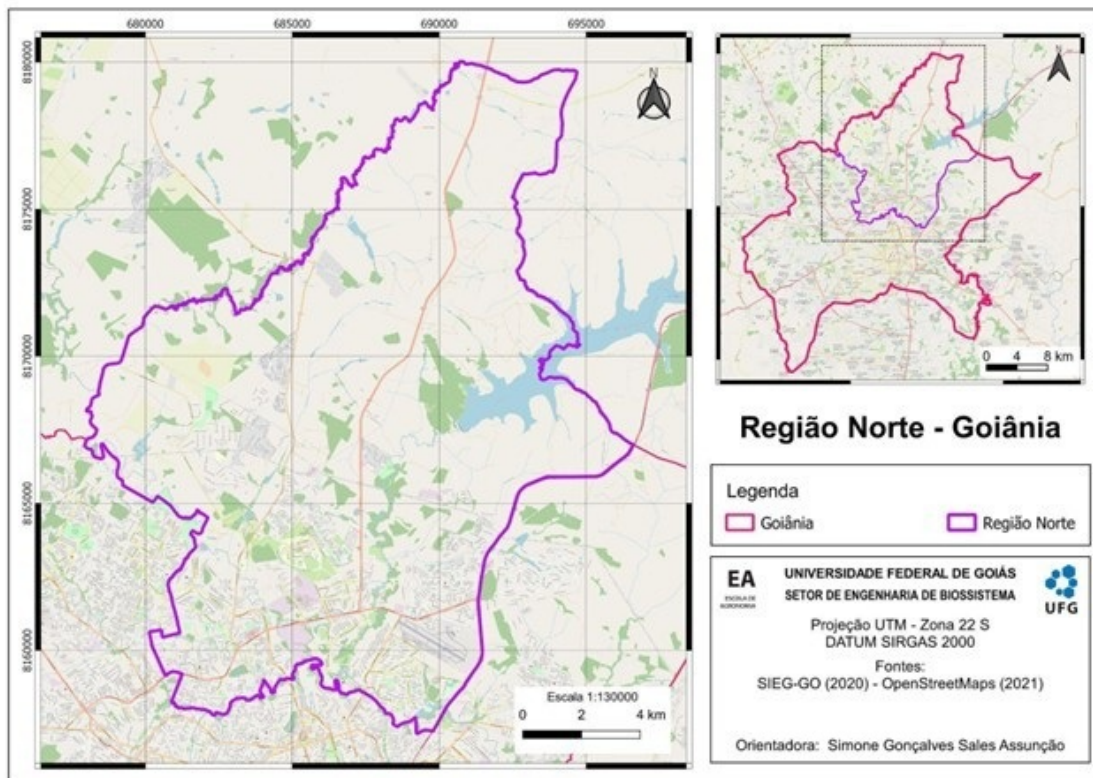
2 Materiais e métodos (Fonte Times New Roman, 12, em negrito para títulos de seção primária. Títulos de seção secundária e terciária seguem instruções abaixo).

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a região norte do município de Goiânia, delimitada pelo Aeroporto Santa Genoveva, pelo Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás e pela Estação de Tratamento de Esgoto local. A área inclui importantes corpos hídricos, como o rio Meia Ponte, o córrego Samambaia e o ribeirão João Leite, este último amplamente reconhecido por sua importância para o abastecimento hídrico da capital.

A delimitação espacial foi realizada utilizando dados vetoriais dos limites de bairros disponibilizados pela Prefeitura de Goiânia (2021) e limites municipais obtidos junto ao Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (Governo do Estado de Goiás, 2021). Os dados foram processados no QGIS, no qual os bairros pertencentes à região norte foram selecionados e integrados a áreas adjacentes não urbanizadas, formando um polígono contínuo representativo da área de estudo. A delimitação final é apresentada na Figura 1.

Figura 1. Delimitação da área de estudo utilizando o software QGIS.



Fonte: Os Autores, 2026.

2.2 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos na estação agrometeorológica da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, localizada dentro da área de estudo. Foram utilizadas séries históricas diárias de temperatura do ar e umidade relativa do ar entre 1985 e 2021. Contudo, como os dados de 2021 estão incompletos, as análises anuais de tendência e correlação foram realizadas utilizando apenas os anos completos entre 1985 e 2020.

A opção por encerrar a série analítica em 2020 decorreu da necessidade de trabalhar apenas com anos completos, garantindo comparabilidade temporal entre as médias anuais de temperatura do ar, umidade relativa e área impermeável. Embora houvesse registros parciais posteriores, sua inclusão poderia introduzir viés na análise de tendência, especialmente por se tratar de variáveis com forte sazonalidade. Assim, o recorte 1985–2020 foi mantido por reunir uma série histórica contínua e suficientemente longa para a avaliação de tendências climáticas e ambientais, em consonância com a utilização de séries pluridecadais em estudos climatológicos.

Os dados diários foram agregados em médias anuais, gerando séries temporais contínuas para análise de tendência e associação com a dinâmica da cobertura do solo.

A utilização de uma única fonte de dados meteorológicos justifica-se pela localização da estação agrometeorológica da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás no interior da área de estudo, bem como pela disponibilidade de uma série histórica longa e contínua para o período analisado. Essa escolha permitiu preservar a homogeneidade da fonte de



dados ao longo do tempo, aspecto importante para análises de tendência. Ainda assim, reconhece-se que o uso de uma única estação limita a representação da variabilidade espacial intraurbana, de modo que os resultados devem ser interpretados como indicativos da variabilidade termo-higrométrica local associada à área monitorada, e não como representação integral de todo o campo climático urbano de Goiânia.

2.3 Dados de Sensoriamento Remoto

As análises de cobertura do solo foram realizadas utilizando imagens orbitais obtidas por meio do Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017). Foram utilizadas imagens da série Landsat com resolução espacial de 30 m, permitindo a construção de uma série temporal anual consistente para o período de estudo.

Para cada ano, foi gerada uma imagem composta utilizando a mediana dos pixels disponíveis, com o objetivo de reduzir efeitos atmosféricos, ruídos e interferências de cobertura de nuvens.

A confiabilidade da série Landsat está associada à continuidade temporal do programa, à resolução espacial compatível com análises urbanas multitemporais e à disponibilidade de produtos processados de forma padronizada em ambiente de computação em nuvem. O uso de composições anuais por mediana contribuiu para reduzir interferências atmosféricas, ruídos radiométricos e contaminação por nuvens, favorecendo a obtenção de imagens representativas para cada ano analisado. Além disso, a adoção do Google Earth Engine possibilitou a aplicação uniforme dos procedimentos de seleção, composição e classificação das imagens ao longo de toda a série histórica.

2.4 Classificação da Cobertura do Solo

A classificação das imagens foi realizada por abordagem supervisionada. Foram definidas quatro classes temáticas: área impermeável, solo exposto, vegetação e corpos hídricos.

As amostras de treinamento foram obtidas por interpretação visual de imagens de alta resolução, a fim de garantir representatividade espectral das classes mapeadas. A classificação supervisionada foi fundamentada nos princípios de discriminação espectral de alvos naturais (Meneses e Madeira Netto, 2001) e em métodos consolidados de aprendizado de máquina, com referência aos algoritmos discutidos por Breiman *et al.* (1984) e Cortes e Vapnik (1995).

Como procedimento de controle de confiabilidade, a classificação foi avaliada por meio da coerência visual das classes mapeadas em relação às imagens de referência e à consistência temporal dos padrões espaciais observados. Em estudos de classificação de cobertura do solo por sensoriamento remoto, a confiabilidade pode ser mensurada por validadores como matriz de confusão, acurácia global, acurácia do produtor, acurácia do usuário e índice Kappa, amplamente



utilizados para avaliar o desempenho de mapas temáticos. No presente estudo, tais indicadores são considerados como referência metodológica para interpretação dos resultados, reconhecendo-se que a ausência de uma validação amostral independente com pontos de controle constitui uma limitação a ser considerada na leitura das estimativas anuais de área impermeável.

2.5 Estimativa da Área Impermeável

A área impermeável foi estimada a partir da quantificação dos pixels classificados como superfície impermeável. Para cada imagem anual, os pixels correspondentes à classe impermeável foram contabilizados e convertidos em área total com base na resolução espacial das imagens Landsat. A partir dessa estimativa, foi construída uma série temporal da expansão das superfícies impermeáveis na região norte de Goiânia.

2.6 Análise Estatística

A análise de tendência das variáveis climáticas foi realizada utilizando o teste de Mann-Kendall, amplamente aplicado a séries ambientais por não exigir normalidade dos dados. Adicionalmente, modelos de regressão linear simples foram ajustados para estimar a direção da tendência temporal e o coeficiente de determinação (R^2). A significância das tendências temporais foi avaliada pelo teste de Mann-Kendall, e a magnitude das mudanças foi estimada pela inclinação de Sen.

As relações entre área impermeável, temperatura média anual do ar e umidade relativa do ar também foram avaliadas por regressão linear simples, permitindo examinar a magnitude das associações entre as variáveis.

3 Resultados e Discussão

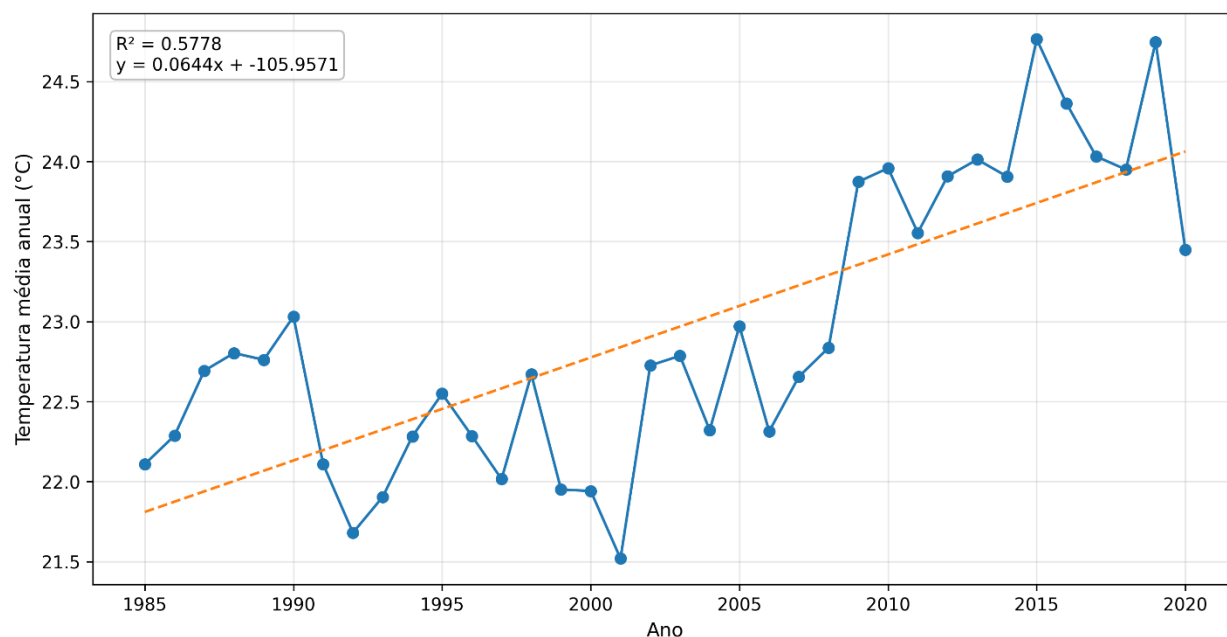
3.1 Tendências Temporais da Temperatura Média Anual do Ar e da Umidade Relativa

A análise da série histórica de 1985 a 2020 evidenciou tendência de aumento da temperatura média anual do ar e tendência de redução da umidade relativa na região norte de Goiânia. O teste não paramétrico de Mann-Kendall indicou tendência crescente estatisticamente significativa para a temperatura média anual do ar ($S = 328$; $Z = 4,454$; $p < 0,001$) e tendência decrescente significativa para a umidade relativa ($S = -190$; $Z = -2,574$; $p = 0,010$). A inclinação de Sen estimou taxas de mudança de $+0,0646$ °C por ano para a temperatura e $-0,2307$ ponto percentual por ano para a umidade relativa, correspondendo, ao longo do intervalo analisado, a uma variação estimada de aproximadamente $+2,26$ °C e $-8,07$ pontos percentuais, respectivamente.

De forma complementar, a regressão linear apresentou ajuste moderado para a temperatura ($R^2 = 0,5778$) e ajuste mais baixo para a umidade relativa ($R^2 = 0,2484$), indicando que a tendência temporal é mais consistente para a variável térmica do que para a variável

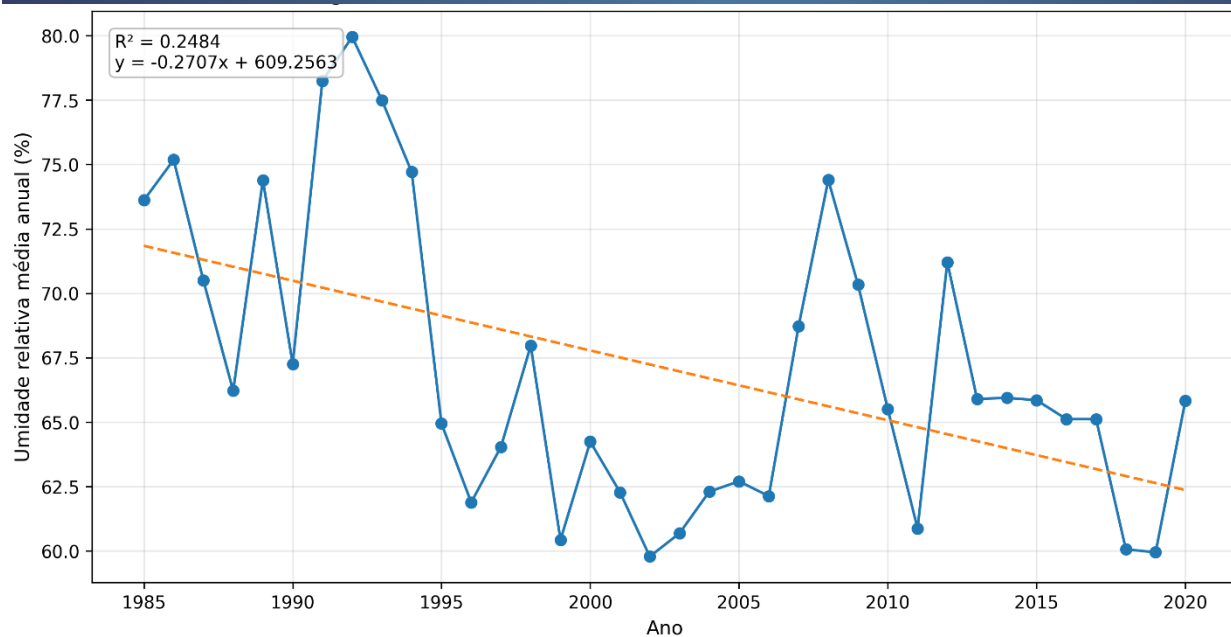
higrométrica. A evolução temporal da temperatura média anual do ar é apresentada na Figura 2, na qual se observa elevação gradual da variável ao longo da série, com intensificação do aquecimento nas décadas mais recentes. A Figura 3 mostra a variação da umidade relativa média anual, evidenciando tendência geral de redução, embora com maior variabilidade interanual.

Figura 2. Evolução temporal da temperatura média anual do ar na região norte de Goiânia entre 1985 e 2020, com linha de tendência linear e coeficiente de determinação.



Fonte: Os Autores, 2026.

Figura 3. Evolução temporal da umidade relativa média anual na região norte de Goiânia entre 1985 e 2020, com linha de tendência linear e coeficiente de determinação.



Fonte: Os Autores, 2026.

Esse comportamento é compatível com a literatura de climatologia urbana. Na formulação do Sistema Clima Urbano, Monteiro (1976) compreende o clima urbano como produto das interações entre urbanização e atmosfera, destacando o subsistema termodinâmico como componente central na geração de anomalias térmicas. Em perspectiva complementar, Sant'Anna Neto (2001) enfatiza que a análise geográfica do clima deve incorporar a produção social do espaço e os ritmos atmosféricos, reforçando a necessidade de interpretar os resultados deste estudo à luz das transformações territoriais ocorridas na região norte de Goiânia.

No caso de Goiânia, os resultados dialogam com investigações anteriores que identificaram modificações importantes no campo térmico urbano. Nascimento e Barros (2009), utilizando sensoriamento remoto, registraram diferenças de até 10 °C entre áreas urbanas e rurais, associando temperaturas mais elevadas a determinados usos antrópicos do solo e a setores mais urbanizados. Nascimento e Oliveira (2012), por sua vez, demonstraram a evolução do fenômeno de ilhas de calor no município entre 1986 e 2010, com ampliação do domínio de classes de temperatura superficial mais elevada ao longo do tempo. Assim, os resultados aqui apresentados reforçam a interpretação de que a dinâmica urbana local vem sendo acompanhada por alterações no comportamento térmico da cidade.

Entretanto, a interpretação desses resultados exige cautela. Embora exista convergência entre o aumento da temperatura e o crescimento da impermeabilização, as regressões lineares entre área impermeável e variáveis climáticas apresentaram baixo poder explicativo, especialmente no caso da umidade relativa. Esse resultado é compatível com a literatura que demonstra que a expansão das superfícies impermeáveis se associa de forma mais direta ao

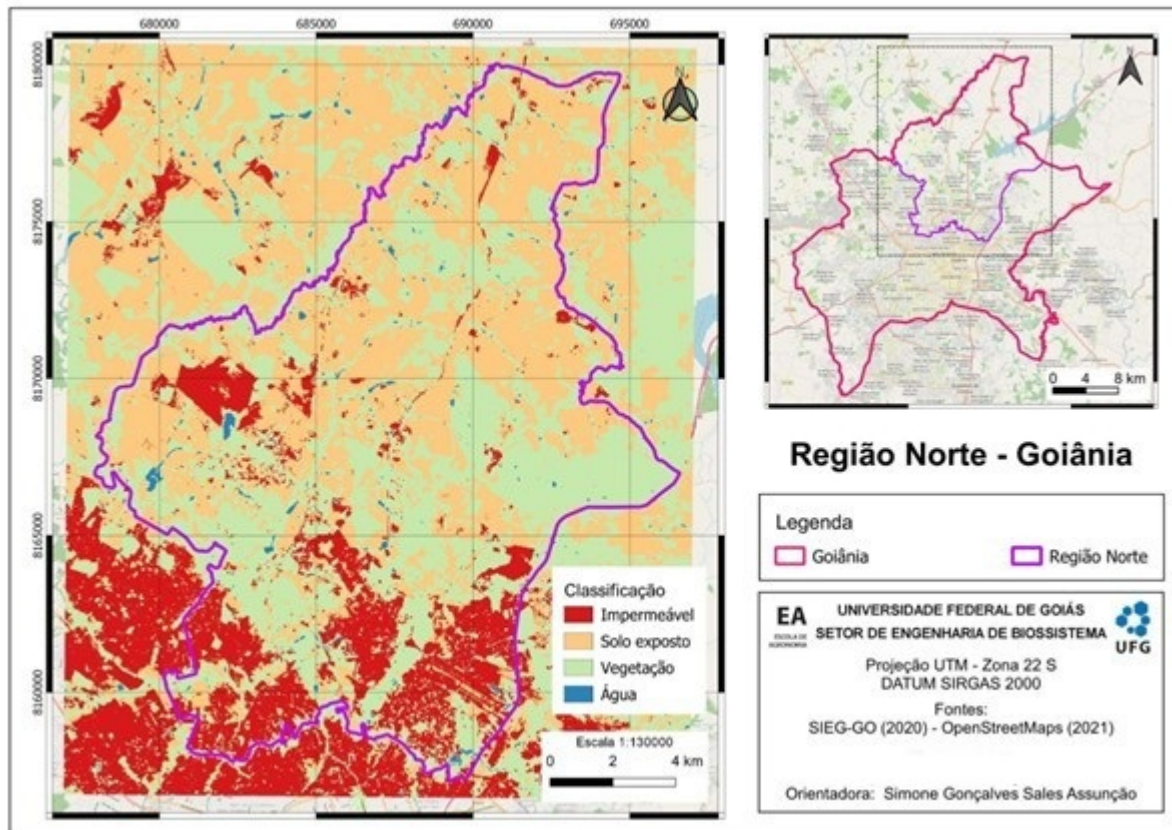


ambiente térmico de superfície e à intensificação do calor urbano do que, necessariamente, à temperatura do ar em séries anuais simples, uma vez que a resposta atmosférica também depende de controles sinóticos, da escala de observação e da configuração da paisagem (Yang *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018). Além disso, a umidade relativa responde fortemente ao comportamento térmico e à atuação de processos atmosféricos em escala regional. Nesse sentido, Hofmann *et al.* (2021) demonstraram tendência de aquecimento e secamento no Cerrado brasileiro, sugerindo que parte do sinal observado em Goiânia pode resultar tanto de mudanças locais no uso da terra quanto de um contexto climático regional mais amplo.

3.2 Impermeabilização do Solo e Dinâmica da Cobertura

A distribuição espacial das classes de cobertura do solo para o ano de 2007 é apresentada na Figura 4. Nessa classificação, as áreas impermeáveis corresponderam a 10,91% da superfície mapeada, enquanto a vegetação representou 72,91%, o solo exposto 16,07% e os corpos hídricos 0,10%. Apesar da predominância da cobertura vegetal, a presença de áreas impermeáveis e de extensas superfícies de solo exposto já revela uma paisagem em transformação, compatível com o avanço da urbanização na área de estudo.

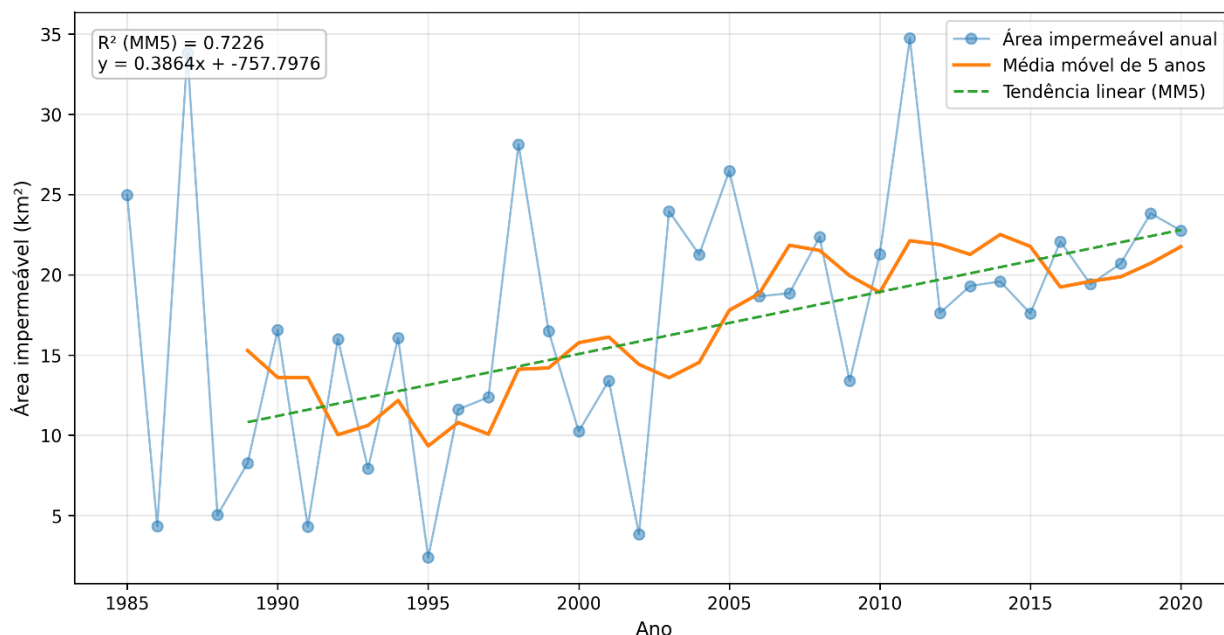
Figura 4. Classificação da cobertura do solo na região norte de Goiânia no ano de 2007.



Fonte: Os Autores, 2026.

A evolução temporal da área impermeável é apresentada na Figura 5, que mostra a série anual e a média móvel de 5 anos. A série anual apresentou variação interanual acentuada, com valores mínimos de 2,37 km² em 1995 e máximos de 34,74 km² em 2011, enquanto, em 2020, a área impermeável estimada foi de 22,75 km². O teste de Mann-Kendall indicou tendência crescente estatisticamente significativa para a área impermeável ($S = 208$; $Z = 2,820$; $p = 0,0048$), e a inclinação de Sen estimou uma taxa de expansão de +0,3755 km² por ano. Quando analisada por meio da média móvel de 5 anos, a tendência de crescimento torna-se ainda mais evidente, com ajuste linear de $R^2 = 0,7226$, indicando aumento progressivo da impermeabilização da superfície na área de estudo.

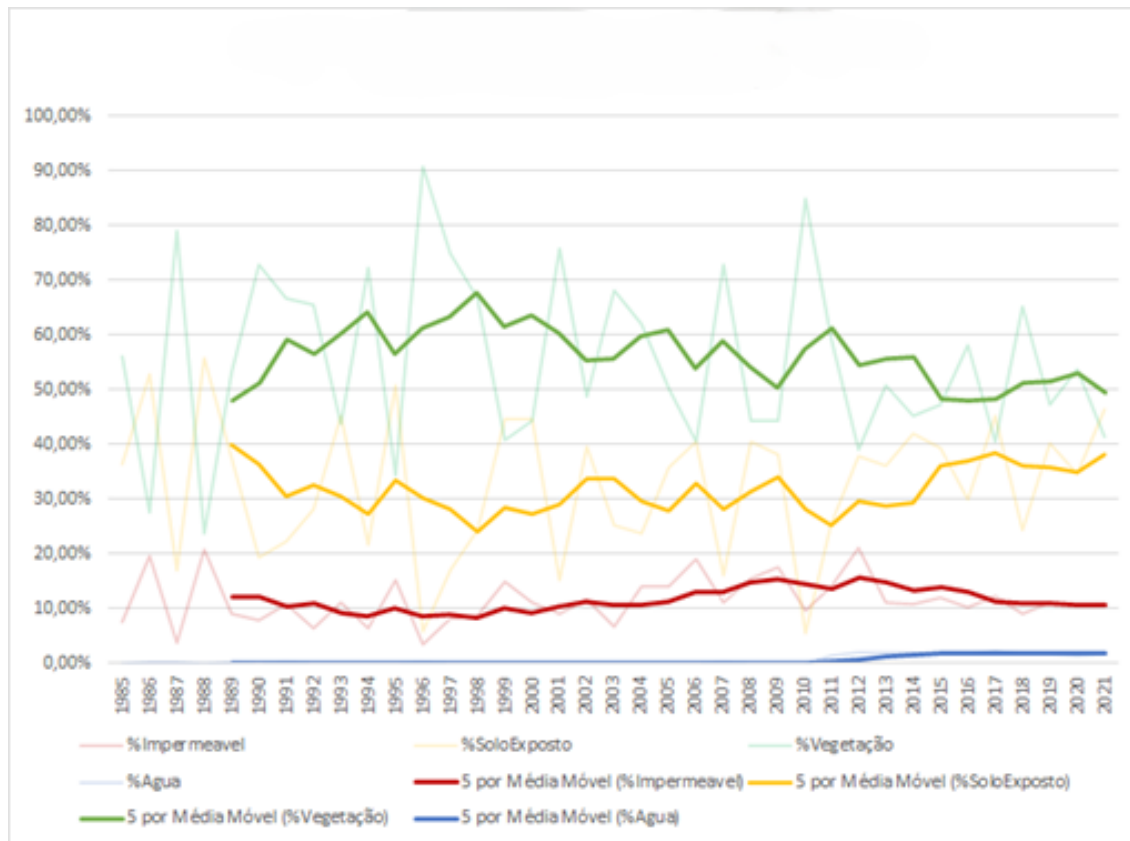
Figura 5. Evolução da área impermeável na região norte de Goiânia entre 1985 e 2020, com média móvel de 5 anos e tendência linear.



Fonte: Os Autores, 2026.

A Figura 6 mostra a evolução percentual das classes de cobertura do solo ao longo da série histórica, evidenciando uma paisagem em transição. A vegetação permaneceu como classe dominante, mas acompanhada por flutuações e crescimento relativo das superfícies impermeáveis e do solo exposto.

Figura 6. Evolução percentual das classes de cobertura do solo na região norte de Goiânia ao longo da série histórica.



Fonte: Os Autores, 2026.

Em conjunto, as Figuras 4, 5 e 6 indicam que a região norte de Goiânia passou por modificações graduais em sua configuração espacial, com aumento das superfícies urbanizadas e reorganização das demais classes de cobertura do solo.

Do ponto de vista ambiental, o aumento da impermeabilização implica a substituição de superfícies com maior potencial de infiltração e evapotranspiração por materiais urbanos que armazenam calor, reduzem a infiltração e alteram o balanço hídrico e energético da superfície. Essa interpretação é compatível com Luiz e Romão (2019), que demonstraram que a expansão das superfícies impermeáveis em Goiânia interfere diretamente nos processos do ciclo hidrológico urbano, elevando o escoamento superficial e reduzindo a eficiência da infiltração.

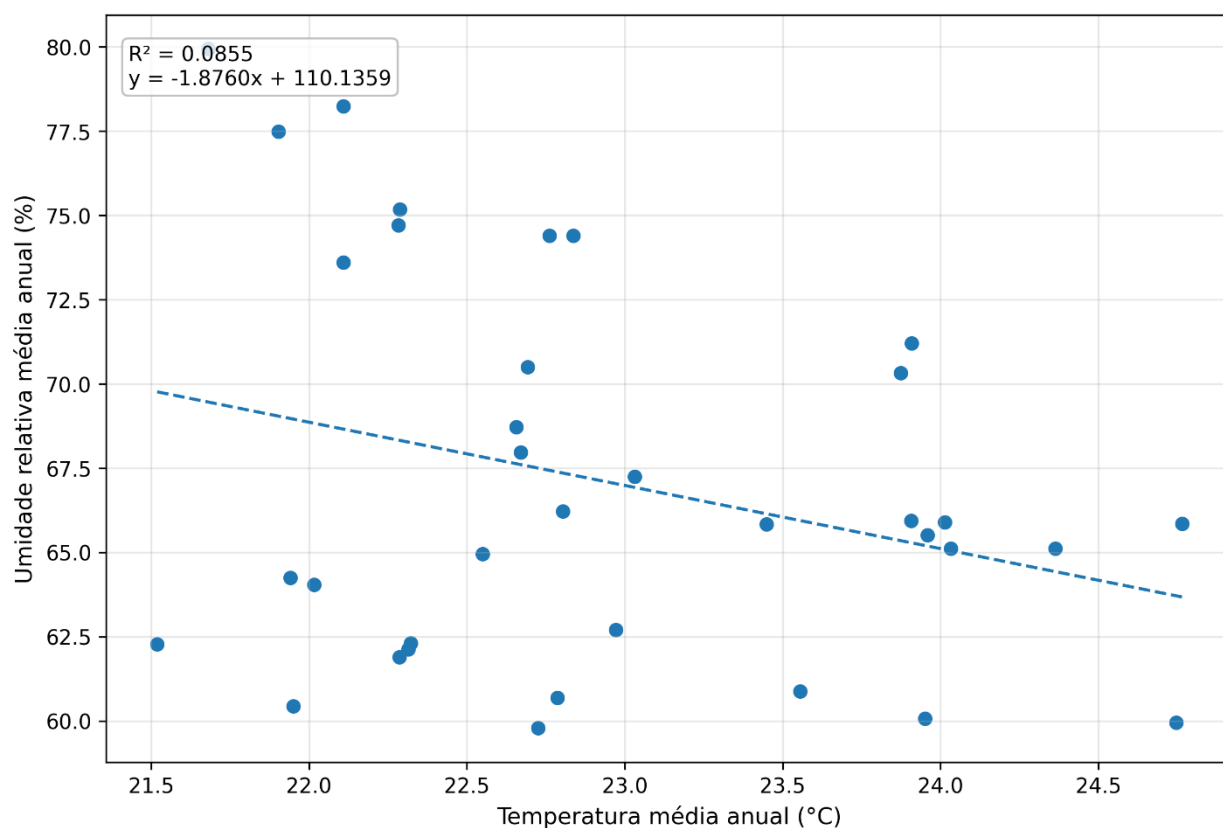
A consistência metodológica do mapeamento multitemporal também merece destaque. O uso de imagens Landsat processadas no Google Earth Engine mostrou-se adequado para a análise da dinâmica espaço-temporal da cobertura do solo, sobretudo pela possibilidade de acesso a séries históricas extensas e processamento padronizado (Gorelick *et al.*, 2017). Essa escolha está em consonância com estudos recentes que utilizam séries Landsat para monitorar a evolução de superfícies impermeáveis em escalas multitemporais, destacando a utilidade desse tipo de dado para investigar crescimento urbano, padrões de expansão e efeitos ecoambientais

associados (Xu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023). Além disso, a classificação supervisionada adotada neste estudo está alinhada aos fundamentos do sensoriamento remoto e da aprendizagem de máquina, apoiando-se tanto na discriminação espectral de alvos naturais e antrópicos (Meneses e Madeira Netto, 2001) quanto em algoritmos clássicos de classificação (Breiman *et al.*, 1984; Cortes e Vapnik, 1995).

3.3 Relações Entre Variáveis Climáticas e Impermeabilização

A Figura 7 apresenta o gráfico de dispersão entre temperatura média anual do ar e umidade relativa do ar, evidenciando uma relação inversamente proporcional entre as variáveis. Esse comportamento é fisicamente esperado, uma vez que anos mais quentes tendem a apresentar menores valores de umidade relativa.

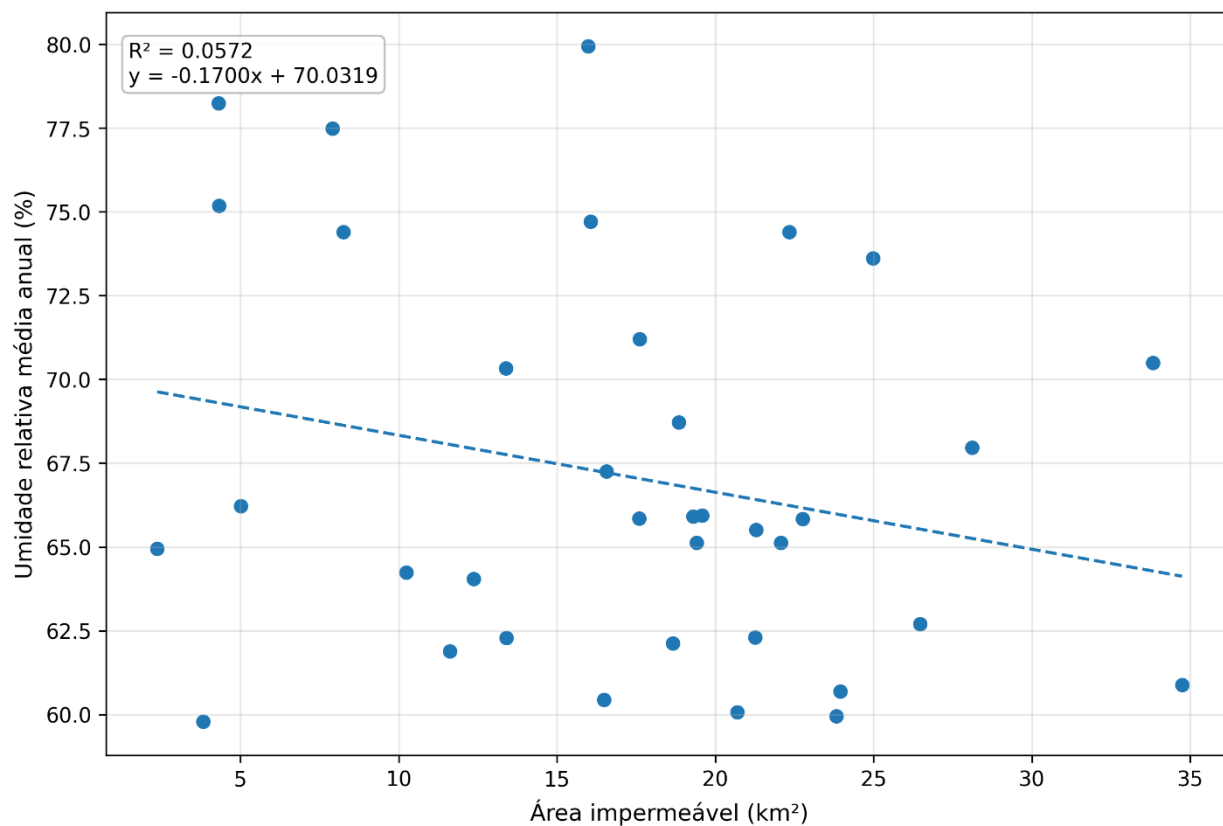
Figura 7. Gráfico de dispersão entre temperatura média anual do ar e umidade relativa média anual na região norte de Goiânia entre 1985 e 2020.



Fonte: Os Autores, 2026.

No que se refere à relação entre área impermeável e umidade relativa do ar, a Figura 8 mostra uma associação linear de baixa magnitude, com $R^2 = 0,0572$.

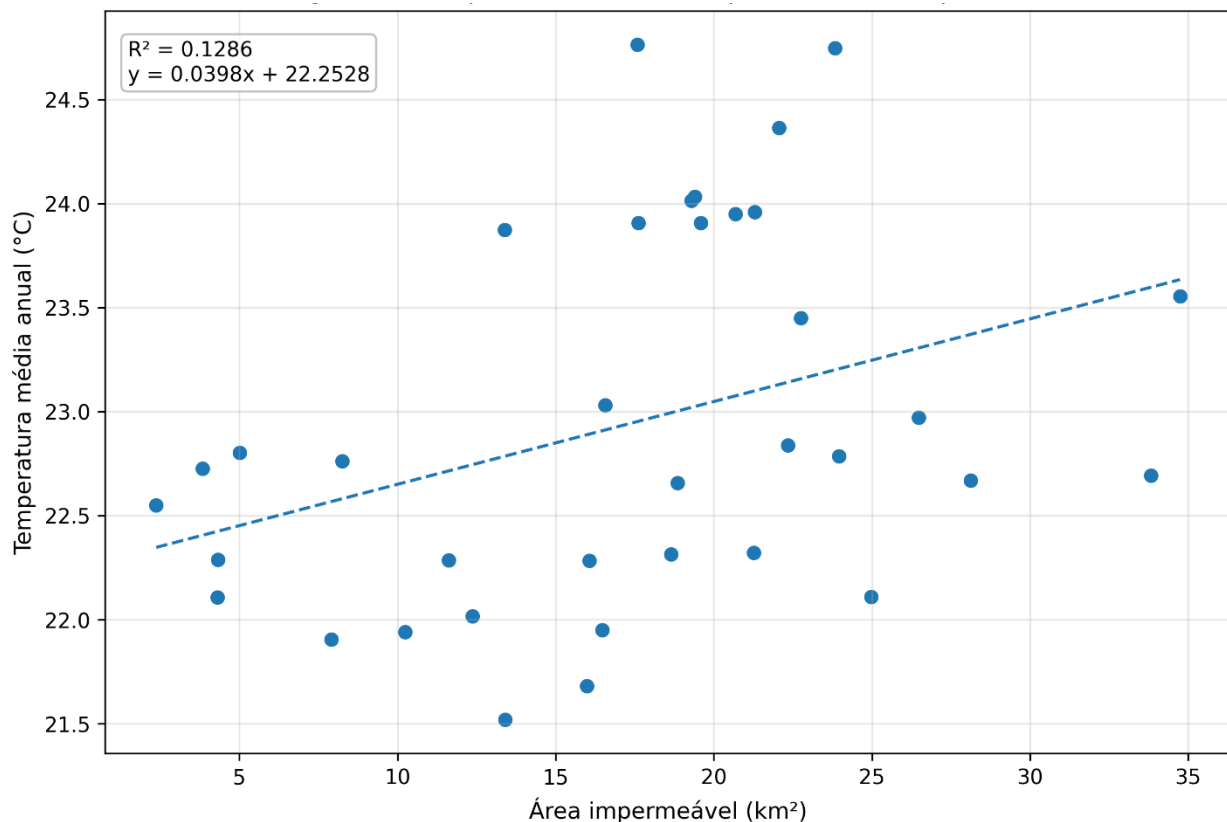
Figura 8. Gráfico de dispersão entre área impermeável e umidade relativa média anual na região norte de Goiânia entre 1985 e 2020.



Fonte: Os Autores, 2026

De forma semelhante, a Figura 9 apresenta a relação entre área impermeável e temperatura média anual do ar, com $R^2 = 0,1286$, indicando também baixo poder explicativo do modelo linear simples.

Figura 9. Gráfico de dispersão entre área impermeável e temperatura média anual do ar na região norte de Goiânia entre 1985 e 2020.



Fonte: Os Autores, 2026

Esses resultados mostram que a expansão das superfícies impermeáveis é compatível com a transformação urbana da área de estudo, mas não explica, de forma isolada, a variabilidade termo-higrométrica observada ao longo do período. Esse ponto é central para a robustez interpretativa do estudo. Em sua concepção clássica, a ilha de calor urbana não corresponde simplesmente ao aumento absoluto da temperatura em uma área urbanizada, mas ao contraste térmico entre áreas urbanas e áreas menos densamente construídas. Amorim *et al.* (2009) enfatizam que sua intensidade depende da morfologia urbana, dos materiais construtivos, das condições atmosféricas e da sucessão dos tipos de tempo. Nascimento e Barros (2009) também destacam que o fenômeno é influenciado não apenas pela cobertura do solo, mas também por fatores geocológicos e pelo sistema meteorológico regional.

Assim, os baixos valores de R^2 não invalidam a relevância da impermeabilização como componente do processo de urbanização, mas indicam que a resposta climática local é modulada por múltiplos fatores. No caso da temperatura, a associação positiva de baixa magnitude sugere que a expansão das superfícies impermeáveis participa do processo de aquecimento local, mas não o determina isoladamente. No caso da umidade relativa do ar, a associação ainda mais fraca



reforça que essa variável é particularmente sensível a controles atmosféricos em escalas superiores à escala intraurbana.

3.4 Implicações Ambientais e Urbanísticas

Os resultados obtidos possuem implicações relevantes para o planejamento urbano e ambiental. A expansão das superfícies impermeáveis, associada à tendência de aquecimento e à redução da umidade relativa, sugere um processo de transformação territorial que afeta simultaneamente o conforto térmico, a dinâmica hidrológica e a funcionalidade ecológica da área de estudo.

No contexto da região norte de Goiânia, esse aspecto é ainda mais sensível, pois se trata de uma porção da cidade historicamente importante para a regulação hídrica e ambiental do município. Assunção (2012) já havia destacado a importância de avaliar riscos ambientais em áreas urbanas da Região Metropolitana de Goiânia a partir da articulação entre processos naturais e formas de ocupação do solo. Na mesma direção, Luiz e Romão (2019) demonstram que a impermeabilização, combinada à intensidade dos episódios pluviométricos e às características fisiográficas locais, favorece o aumento do escoamento superficial e a ocorrência de alagamentos e inundações.

Do ponto de vista da adaptação climática, os resultados reforçam a necessidade de estratégias urbanísticas que preservem e ampliem áreas vegetadas, promovam a infiltração da água no solo e reduzam a continuidade espacial das superfícies impermeáveis. Essa recomendação converge com estudos que apontam a expansão das superfícies impermeáveis como componente central da degradação ambiental urbana, com implicações para o escoamento superficial, o aquecimento e a deterioração ecossistêmica, reforçando a necessidade de um planejamento territorial mais atento à estrutura espacial da urbanização (Zhang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023).

Essas ações dialogam diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 11, voltado à promoção de cidades e comunidades sustentáveis, e o ODS 13, relativo à ação contra a mudança global do clima (ONU, 2015). Nesse sentido, os resultados deste estudo não apenas descrevem tendências ambientais, mas também oferecem subsídios para o ordenamento territorial e para a formulação de políticas urbanas mais resilientes e integradas.

3.5 Análise Crítica

Em conjunto, os resultados mostram que a região norte de Goiânia passou por um processo de transformação territorial compatível com a expansão urbana, acompanhado por tendência de aumento da temperatura média anual, redução da umidade relativa do ar e crescimento da área impermeável. A interpretação desses resultados é consistente com a



literatura de climatologia urbana e com estudos previamente realizados em Goiânia e no Cerrado.

Contudo, as correlações fracas entre área impermeável e variáveis climáticas indicam que tais mudanças não devem ser atribuídas exclusivamente à impermeabilização do solo. A interpretação mais robusta, portanto, é aquela que reconhece a atuação conjunta de processos locais de alteração da superfície e de forçantes climáticas regionais, evitando reducionismos e fortalecendo a solidez analítica do manuscrito.

Além disso, os resultados se alinham a uma literatura recente que trata a superfície impermeável como um indicador-chave da urbanização e de seus efeitos ambientais, ao mesmo tempo em que indicam que a relação entre urbanização e clima deve ser interpretada de forma multiescalar, articulando a transformação local da superfície com tendências climáticas mais amplas no Cerrado (Soares *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2021).

4 Conclusão

Os resultados deste estudo demonstraram que a região norte de Goiânia passou por um processo de transformação territorial compatível com a expansão urbana ao longo do período analisado, evidenciado pelo crescimento das superfícies impermeáveis e pela reorganização das classes de cobertura do solo. Em paralelo, a série meteorológica indicou tendência de aumento da temperatura média anual e de redução da umidade relativa do ar, sinalizando modificações consistentes nas condições termo-higrométricas locais. A inclinação de Sen estimou taxas de mudança de +0,0646 °C por ano para a temperatura média anual e de -0,2307 ponto percentual por ano para a umidade relativa do ar, o que corresponde, ao longo do intervalo analisado, a uma variação estimada de aproximadamente +2,26 °C e -8,07 pontos percentuais, respectivamente.

A análise integrada entre sensoriamento remoto e dados meteorológicos permitiu identificar que a expansão da impermeabilização acompanha o processo de urbanização da área de estudo e constitui um elemento relevante para a compreensão das mudanças ambientais observadas. Contudo, os baixos coeficientes de determinação obtidos nas correlações entre área impermeável e variáveis climáticas indicam que a variabilidade da temperatura e, principalmente, da umidade relativa do ar não pode ser explicada exclusivamente pela impermeabilização do solo. Dessa forma, a interpretação mais consistente é aquela que reconhece a atuação simultânea de processos locais de alteração da superfície e de forçantes climáticas regionais.

Do ponto de vista metodológico, o uso de imagens Landsat processadas no Google Earth Engine e a aplicação de classificação supervisionada mostraram-se adequados para a análise multitemporal da dinâmica espacial da cobertura do solo, permitindo acompanhar a evolução da



urbanização em uma série histórica extensa. A utilização do teste de Mann-Kendall, da inclinação de Sen e da regressão linear também contribuiu para conferir maior robustez à análise de tendência, respondendo à necessidade de tratamento estatístico mais consistente dos dados.

Em termos aplicados, os resultados reforçam a importância da região norte de Goiânia no contexto do planejamento urbano e ambiental, especialmente por sua relevância para a dinâmica hídrica e ecológica do município. Assim, estratégias voltadas à preservação da cobertura vegetal, à ampliação de áreas permeáveis, ao controle da expansão urbana desordenada e à incorporação de soluções baseadas na natureza podem contribuir simultaneamente para a mitigação do aquecimento local, a melhoria das condições microclimáticas e a redução dos impactos hidrológicos associados à urbanização.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros avancem na comparação entre áreas urbanas e não urbanizadas, na incorporação de variáveis climáticas complementares e no uso de dados térmicos orbitais e medições intraurbanas mais detalhadas, de modo a aprofundar a compreensão das relações entre urbanização, impermeabilização e clima local em Goiânia.

5 Referências

AMORIM, M.C.C.T.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; SANT'ANNA NETO, J.L. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). **Confins**, n. 7, 2009. Disponível em: <http://confins.revues.org/index6070.html>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ASSUNÇÃO, S.G.S. **Metodologia para avaliação de riscos ambientais em áreas urbanas da Região Metropolitana de Goiânia-GO**. 2012. 232f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Curso de Ciências Ambientais – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012. Disponível em: https://ciamb.prpg.ufg.br/up/104/o/SIMONE_GONCALVES_SALES_ASSUNCAO.pdf. Acesso em: 14 abr. 2026.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.H.; OLSHEN, R.A.; STONE, C.J. **Classification and Regression Trees**. New York: Routledge, 1984.

CORTES, C.; VAPNIK, V. Support-vector networks. **Machine Learning**, v. 20, n. 3, p. 273–297, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00994018>. Acesso em: 14 abr. 2026.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Acesso em: 14 abr. 2026.

GOVERNO DO ESTADO DE GOIÁS. Sistema Estadual de Geoinformação: downloads. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

HOFMANN, G.S.; CARDOSO, M.F.; ALVES, R.J.V.; WEBER, E.J.; BARBOSA, A.A.; DE TOLEDO, P.M.; PONTUAL, F.B.; SALLES, L.O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J.L.P.; AQUINO, F.E.; OLIVEIRA, L.F.B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, n. 17, p. 4060–4073, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>. Acesso em: 14 abr. 2026.

LI, B.; WANG, W.; BAI, L.; WANG, W.; CHEN, N. Effects of spatio-temporal landscape patterns on land surface temperature: a case study of Xi'an city, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, p. 419, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6787-z>. Acesso em: 14 abr. 2026.

LUIZ, G.C.; ROMÃO, P.A. Interação solo-atmosfera e processos de inundação e alagamento na cidade de Goiânia-GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 5, p. 1891–1903, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.5.p1891-1903>. Acesso em: 14 abr. 2026.

MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: Universidade de Brasília, 2001.

MONTEIRO, C.A.F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: USP, 1976.



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**, v. 29, n. 1, p. 119–134, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v29i1.7112>. Acesso em: 14 abr. 2026.

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**, v. 31, n. 2, p. 113–127, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.V31i2.16849>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 14 abr. 2026.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Geolocalização das divisas de bairros (SHP). 2021. Disponível em: http://dadosabertos.goiania.go.gov.br/pt_PT/dataset/bairros/resource/9903a8fb-213d-4164-bee1-8af82ff97286?inner_span=True. Acesso em: 14 abr. 2026.

SANT'ANNA NETO, J.L. Por uma geografia do clima: antecedentes históricos, paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. **Terra Livre**, v. 17, p. 49–62, 2001.

SOARES, K.W.S.; BATTISTI, R.; DAPPER, F.P.; DE CARVALHO, A.P.M.; DA SILVA, M.V.; DA SILVA, J.L.B.; DE OLIVEIRA, H.F.E.; MESQUITA, M. Shifting climate patterns in the Brazilian savanna evidenced by the Köppen classification and drought indices. **Atmosphere**, v. 16, p. 849, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos16070849>. Acesso em: 14 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Escola de Agronomia. Estação Agrometeorológica. 2021. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/p/7944-estacao-agrometeorologica>. Acesso em: 14 abr. 2026.

XU, J.; ZHAO, Y.; ZHONG, K.; ZHANG, F.; LIU, X.; SUN, C. Measuring spatio-temporal dynamics of impervious surface in Guangzhou, China, from 1988 to 2015, using time-series Landsat imagery. **Science of the Total Environment**, v. 627, p. 264–281, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.155>. Acesso em: 14 abr. 2026.

YANG, C.; ZHAN, Q.; GAO, S.; LIU, H. How do the multi-temporal centroid trajectories of urban heat island correspond to impervious surface changes: a case study in Wuhan, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, p. 3865, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph16203865>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ZHANG, S.; YANG, K.; MA, Y.; LI, M. The expansion dynamics and modes of impervious surfaces in the Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area, China. **Land**, v. 10, p. 1167, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land10111167>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ZHAO, C.; ZHANG, H.; WANG, H.; ZHAO, J. Analysis of changes in the spatiotemporal characteristics of impervious surfaces and their influencing factors in the Central Plains Urban Agglomeration of China from 2000 to 2018. **Heliyon**, v. 9, e18849, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18849>. Acesso em: 14 abr. 2026.