Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

DINÂMICA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE NO MUNICÍPIO DE JOÃO MONLEVADE, MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE POR MEIO DO SENSORIAMENTO REMOTO

Dynamics of Land Surface Temperature in the Municipality of João Monlevade, Minas Gerais, Brazil: An Analysis Using Remote Sensing

Dinámica de la Temperatura de la Superficie en el Municipio de João Monlevade, Minas Gerais: Un Análisis Mediante Teledetección

Pedro Vitor Lana Gonçalves
Programa de Pós-graduação em Geografia
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, MG, Brasil
pedro.lana@ufv.br

Edson Soares Fialho
Programa de Pós-graduação em Geografia
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, MG, Brasil
fialho@ufv.br

Wesley de Souza Campos Correa
Programa de Pós-graduação em Geografia
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, ES, Brasil
weslwycamposcorrea@gmail.com

Resumo: As áreas urbanizadas vêm se expandindo em diversas regiões do planeta, substituindo áreas de vegetação natural e produção agrícola por superfícies impermeáveis e edificações, constituídas por materiais de baixa reflectância. Essas transformações alteram as propriedades da superfície e contribuem para a formação e intensificação das ilhas de calor urbanas (UHI). Este estudo analisou as mudanças no uso e cobertura da terra (LULC), a dinâmica espaço-temporal da temperatura de superfície terrestre (LST) e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), com ênfase na formação e intensificação das UHI, bem como suas relações com os fatores associados, no município, entre 2013 e 2024. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 para o cálculo da LST, do NDVI e das UHI, além de dados de LULC do MapBiomas. Os resultados evidenciaram um crescimento de 12,62% das áreas urbanizadas, que registraram as maiores médias de LST. A classe mineração apresentou a maior correlação entre LST e NDVI, com destaque para o período chuvoso, que também registrou as maiores intensidades das UHI. Os resultados contribuem para a compreensão da dinâmica térmica urbana e a identificação de áreas prioritárias para intervenção, subsidiando a gestão pública e o planejamento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas.
Palavras-chave: Uso e cobertura da terra. Ilhas de calor urbanas. Clima urbano.

Abstract: Urban areas have expanded in various regions of the world, replacing natural vegetation and agricultural land with impervious surfaces and buildings composed largely of low-reflectance materials. These changes alter surface properties and contribute to the formation and intensification of urban heat islands (UHI). This study analyzed land use and land cover (LULC) changes, the spatiotemporal dynamics of land surface temperature (LST) and the normalized difference vegetation index (NDVI), and their relationships with factors associated with UHI formation in the municipality between 2013 and 2024. Landsat 8 imagery was used to calculate LST, NDVI, and UHI, alongside MapBiomas LULC data. Urbanized areas increased by 12.62% and recorded the highest mean LST values. Mining showed the strongest correlation between LST and NDVI, particularly during the rainy season, which also presented the highest UHI intensities. These findings improve understanding of urban thermal dynamics and help identify priority areas for intervention, supporting public management and the planning of climate change adaptation strategies.
Keywords: Land use and land cover. Urban heat islands. Urban climate.

Resumen: Las áreas urbanizadas se han expandido en diversas regiones del planeta, sustituyendo la vegetación natural y las tierras agrícolas por superficies impermeables y edificaciones con materiales de baja reflectancia. Estas transformaciones alteran favorecen la formación e intensificación de las islas de calor urbanas (UHI). Este estudio analizó los cambios en el uso y cobertura de la tierra (LULC), la dinámica espacio-temporal de la temperatura de la superficie terrestre (LST) y del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), así como sus relaciones con los factores asociados a las UHI en el municipio entre 2013 y 2024. Se utilizaron imágenes Landsat 8 para calcular la LST, el NDVI y las UHI, además de datos de LULC de MapBiomas. Los resultados mostraron un crecimiento del 12,62 % de las áreas urbanizadas, que registraron las mayores medias de LST. La minería presentó la mayor correlación entre LST y NDVI, especialmente durante el período lluvioso, cuando también se registraron las mayores intensidades de las UHI. Los resultados contribuyen a comprender la dinámica térmica urbana e identificar áreas prioritarias de intervención, apoyando la gestión pública y la planificación de estrategias de adaptación al cambio climático.
Palabras clave: Uso y cobertura de latierra. Islas de calor urbanas. Clima urbano.

Submetido em: 16/10/2025
Aceito para publicação em: 05/09/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

Projeta-se que, até 2050, aproximadamente 68% da população mundial estará concentrada em áreas urbanas, enquanto, no Brasil, essa proporção deverá alcançar 90,2% até 2035 (Favoreti *et al.*, 2026). Esse processo de urbanização constitui um importante agente de transformação do uso e cobertura da terra (*land use andland cover*, LULC), promovendo alterações na composição e na configuração das superfícies urbanas que podem influenciar diretamente a temperatura de superfície terrestre (*land surface temperature*, LST). Nesse contexto, a expansão das áreas urbanizadas assume particular relevância diante da tendência global de aumento da LST, que apresentou elevação de 0,6 para 0,9 °C entre 1960 e 2015 (Duan *et al.*, 2025).

Com essa tendência, os fenômenos relacionados ao clima urbano ganham destaque, uma vez que afetam parcela significativa da população. Dentre eles, destacam-se as ilhas de calor urbanas (*urban heat island*, UHI), fenômeno caracterizado pela ocorrência de temperaturas mais elevadas nas áreas urbanas em comparação com as áreas rurais circundantes, com impactos socioeconômicos e ambientais relevantes (Li *et al.*, 2017). A intensidade da UHI constitui uma de suas principais características e está diretamente associada às transformações do LULC, especialmente à distribuição e às mudanças na composição das áreas vegetadas, dos corpos d'água e das superfícies construídas(Chen *et al.*, 2006; Oke, 2002; Fernandes *et al*., 2017; Santos; Fialho, 2020; Fialho; Santos, 2023).

A formação das UHI resulta da interação de diversos processos físicos, entre os quais se destacam a capacidade do concreto e do asfalto de absorver e armazenar radiação solar e liberá-la lentamente durante a noite (Zhao; Fan; Hong, 2025). Paralelamente, a redução da cobertura vegetal, associada à expansão das superfícies impermeáveis nas áreas urbanas, limita o sombreamento e a evapotranspiração, reduzindo o efeito de resfriamento evaporativo e, consequentemente, a capacidade de resfriamento do ambiente urbano (Allocca; Fialho, 2019; Aboulnaga *et al.*, 2024; Zhao; Fan; Hong, 2025). Esse processo contribui para a alteração no balanço de energia podendo ocasionar a formação das UHI.

Com o avanço do sensoriamento remoto e a disponibilização de imagens multiespectrais e termais, diversos estudos vêm sendo realizados para diferentes regiões do

planeta, especialmente em cidades de pequeno e médio porte, que, em geral, não contam com estações meteorológicas, dificultando a análise das ilhas de calor atmosféricas (Fialho; Santos, 2021). Segundo Fialho (2012), as UHI podem ser classificadas em atmosféricas, relacionadas às diferenças de temperatura do ar entre áreas urbanas e rurais; de superfície, identificadas pela LST terrestre por meio de imagens termais de satélite; e verticais, caracterizadas pelas variações térmicas em diferentes altitudes no espaço urbano.

Nesse contexto, cabe ressaltar, como aspecto positivo, que os satélites da família *Landsat* disponibilizam imagens multiespectrais e termais desde a década de 1980, de forma gratuita e com ampla cobertura espacial, abrangendo grande parte da superfície terrestre. Entretanto, é importante considerar algumas limitações associadas à utilização desses dados, especialmente a interferência da cobertura de nuvens e a resolução espacial de 30 m, que pode limitar a identificação de elementos de menor escala no ambiente urbano.

Nesse contexto, o município de João Monlevade, ao consolidar-se no setor siderúrgico, apresentou crescimento populacional e expansão da área urbanizada ao longo dos anos, ocasionando transformações na paisagem. Diante disso, este estudo tem como objetivos: (i) analisar as mudanças no LULC, com ênfase na expansão das áreas urbanizadas entre 2013 e 2024; (ii) examinar o comportamento espaço-temporal da LST e do NDVI; (iii) realizar análises de correlação entre LST, NDVI e LULC, a fim de compreender os fatores que condicionam a formação e a intensificação das UHI no município. Estudos dessa natureza oferecem contribuições relevantes para o planejamento urbano e para a melhoria da qualidade de vida da população, ao direcionar possíveis caminhos para gestores públicos responsáveis pela tomada de decisão.

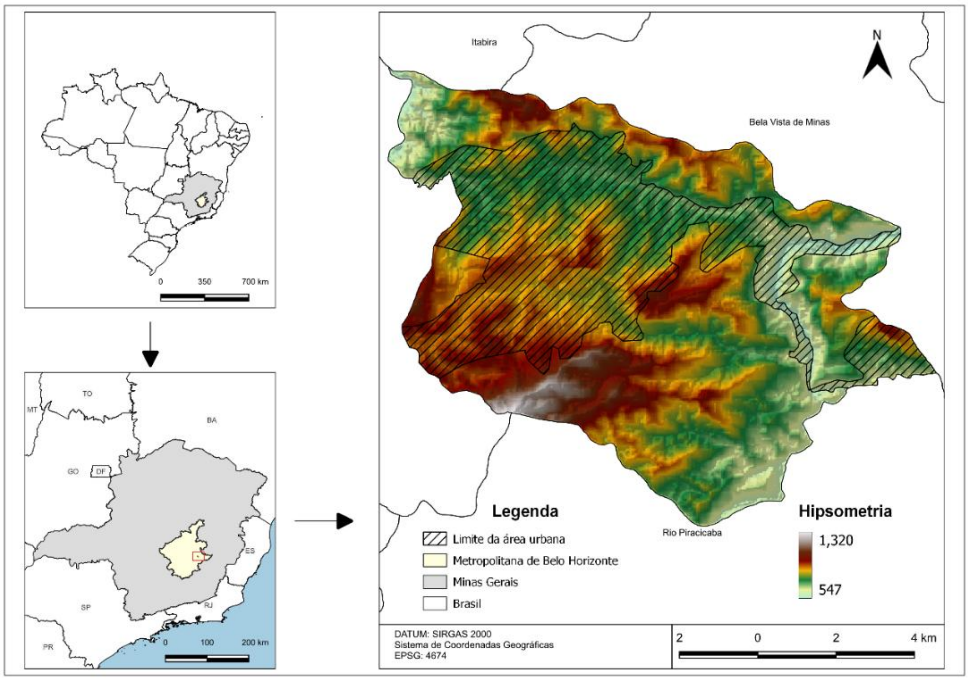
2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O município de João Monlevade (Figura 1) localiza-se na mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, aproximadamente 116,5 km da capital mineira. Sua formação histórica está intimamente ligada ao desenvolvimento da siderurgia brasileira. No início do século XIX, o engenheiro francês Jean Antoine Félix Dissandes de Monlevade, que chegou ao Brasil em 1817, fundou, por volta de 1820, uma das primeiras usinas siderúrgicas de sucesso do país na

localidade que posteriormente receberia seu sobrenome, marco importante para o início da atividade metalúrgica na região (Gusmão; Romero, 2022).

Figura 1 – Mapa de Localização do município de João Monlevade (MG).



Fonte: IBGE (2025); SRTM (2025). Elaborado pelos autores (2025).

Essa vocação industrial foi consolidada mais de um século depois, quando a abundância de minério de ferro, a disponibilidade de extensas áreas de mata para a produção de carvão vegetal e a proximidade do rio Piracicaba e da malha ferroviária levaram a Companhia Belgo-Mineira a instalar, em 1937, sua segunda grande usina siderúrgica no município (Correia, 2003). A implantação da usina impulsionou o crescimento urbano e econômico de João Monlevade, consolidando-o como um dos principais centros siderúrgicos de Minas Gerais e do Brasil.

Situado no Quadrilátero Ferrífero (QF), o município possui área de 99,158 km² e variações altimétricas entre 547 e 1.320 m, características associadas à complexa configuração geológica dessa província mineral. Reconhecido por concentrar algumas das maiores reservas mundiais de minério de ferro, além de importantes depósitos de manganês, ouro, bauxita e

rochas ornamentais, o QF constitui um dos principais polos brasileiros de extração e processamento mineral (Almeida *et al*., 2026; Vicq *et al*., 2015; Weber *et al*., 2017).

Os dados climáticos de João Monlevade caracterizam um clima tropical de altitude, com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos, conforme registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2026). A temperatura média anual é de 20,7°C, variando de 17,7°C em julho a aproximadamente 23,0°C em janeiro e fevereiro, enquanto as temperaturas máximas e mínimas atingem 29,3°C e 13,4°C, respectivamente (Tabela 1).

A precipitação média anual é de 1.401,3 mm, concentrada entre outubro e março, com máximo em dezembro (326,7 mm), enquanto a estação seca ocorre entre maio e agosto, atingindo apenas 6,3 mm em julho. Essa sazonalidade térmica e pluviométrica, associada às características de altitude e continentalidade do interior de Minas Gerais, contribui para a redução da umidade relativa do ar e o aumento da suscetibilidade a queimadas durante o período seco.

Tabela 1 - Normal Climatológica de João Monlevade, MG (1981 – 2010).

Parâmetros	Meses											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm)	232,8	125,9	193,1	68,5	29,2	14,1	6,3	13,7	43	97,8	250,2	326,7
$T_{med.}$ (°C)	23,1	23,4	22,6	21,3	19,4	17,9	17,7	18,4	19,7	21,1	21,7	22,1
$T_{Max.}$ (°C)	28,5	29,30	28,20	26,9	25,20	24	24,1	24,9	25,9	27,1	27	27,2
$T_{Min.}$ (°C)	19,10	19,20	18,80	17,4	15,3	13,8	13,4	14	15,5	17	17,9	18,5

P – Pluviosidade; $T_{med.}$ - Temperatura média do ar; T_{Max} - Temperatura máxima do ar; T_{Min} - Temperatura mínima do ar.
Fonte: INMET (2026). Elaborado pelos autores (2026).

A população de João Monlevade é de 80.187 habitantes (Tabela 2), de acordo com o mais recente censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística –IBGE- (2026), baseado no último censo do ano de 2022. Predominantemente urbana, a cidade é influenciada pelas operações das indústrias siderúrgicas e de mineração.

Com o avanço da população urbana de João Monlevade, impulsionado pelo crescimento da indústria siderúrgica, observam-se mudanças expressivas na ocupação e características da paisagem.

Tabela 2 - Evolução da população em João Monlevade.

Ano	Urbana	Rural	Total
1970	38.660	1.328	39.988
1980	47.164	1.034	48.198
1991	57.407	1.933	59.340
2000	66.372	318	66.690
2010	73.277	333	73.610
2022	-	-	80.187

Fonte: IBGE (2026). Elaborado pelos autores (2026).

Tais mudanças, como a impermeabilização do solo, alterações no ciclo hidrológico, modificações no microclima, poluição do ar e da água, além de pressões sobre a infraestrutura e os serviços públicos, quando não são cuidadosamente planejadas, podem desencadear uma série de desafios socioambientais.

No campo social, esses processos frequentemente resultam em precarização habitacional, aumento das desigualdades, segregação socioespacial e problemas de mobilidade urbana (Abubakar *et al.*, 2024). Essa interação intricada entre o desenvolvimento urbano e o meio ambiente promove a necessidade premente de abordagens sustentáveis no planejamento e na gestão urbana, principalmente em cidades ainda carentes de um maior ordenamento territorial.

2.2. Materiais e método

Esta pesquisa adota uma abordagem predominantemente quantitativa, com base na análisede imagens do satélite Landsat 8 entre os anos de 2013 e 2024, para calcular a LST, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) e a Ilha de Calor urbana de Superfície (*Surface Urban Heat Island* (SUHI), além de dados estatísticos gerados a partir das imagens.

A definição dos meses secos e úmidos foi baseada no critério de Bagnouls e Gaussen (1957), segundo o qual são considerados secos os meses em que a precipitação mensal é inferior ao dobro da temperatura média mensal (P < 2T), enquanto os meses úmidos

correspondem àqueles em que a precipitação é igual ou superior a esse valor (P ≥ 2T). A Tabela 3 descreve algumas características do produto *Landsat* utilizado neste estudo.

Tabela 3 - Características do produto Landsat 8 utilizado no estudo.

Item	Especificação
Satélite	Landsat 8
Bandas utilizadas	B4 (Vermelho), B5 (infravermelho Próximo) e B10 (Termal)
Resolução espacial	30 m (ópticas) e 100 m (Termal)
Resolução temporal	16 dias
Número total de bandas	11
Produto utilizado	Nível-2, Coleção 2
Período das imagens	2013 - 2024
Cobertura de nuvens	Até 10%
Total de imagens	87 (período seco); 60 (período chuvoso)

Fonte: USGS (2025). Elaborado pelos autores (2026).

2.2.1 Mapeamento

Esta etapa abrange a execução dos cálculos de LST, NDVI e UHI. O primeiro passo da pesquisa foi analisar o campo térmico de superfície por meio do sensoriamento remoto. Para isso, utilizou-se a plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Lançada em 2010 pela *Google*, a plataforma de computação em nuvem GEE permite o processamento de grandes volumes de dados sem exigir alto poder computacional dos usuários (Amani *et al.*, 2020; Javidan *et al.*, 2024; Ouchra; Belangour; Erraissi, 2024).

Para calcular a LST, adotou-se as recomendações do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*, USGS), aplicando o fator de escala conforme a Equações 1 (EROS, 2020).

$$ST_K = (DN * 0{,}00341802) + 149{,}0 \quad (1)$$

Em que ST_K representa a temperatura de superfície em Kelvin; e DN corresponde aos números digitais.

Já para obter a LST em graus Celsius, necessita-se subtrair do resultado obtido da Equação 1 o valor de 273,15, conforme a Equação 2.

$$ST_C = (ST_K - 273{,}15) \quad (2)$$

Em que ST_C representa a temperatura de superfície em graus Celsius; ST_K representa a temperatura de superfície em Kelvin.

Para o cálculo do NDVI, seguiu-se a proposta metodológica de Huang *et al*. (2020), conforme apresentada na Equação 3. Esse índice fornece uma escala que varia de -1 a 1, sendo que valores próximos a -1 indicam menor presença de vegetação e valores próximos a 1 indicam maior presença de vegetação.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (3)$$

Em que NDVI representa o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; NIR corresponde à reflectância do infravermelho próximo (banda 5 do *Landsat* 8); e R representa a reflectância da faixa do vermelho (banda 4 do *Landsat* 8).

Após o download das composições sazonais de LST e NDVI, realizou-se o processamento final no software QGIS, versão 3.40.8, um *software* livre e de código aberto. Nessa etapa, as composições foram reprojetadas para o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 23S, e posteriormente recortadas de acordo com os limites da área de estudo.

Para calcular a intensidade da ilha de calor, criou-se um buffer de 1 km, conforme a Figura 2, do limite urbano em direção as áreas rurais, seguindo a proposta de Shi *et al*. (2026), de acordo com a Equação 4.

$$SUHI = LST_{urban} - LST_{rural} \quad (4)$$

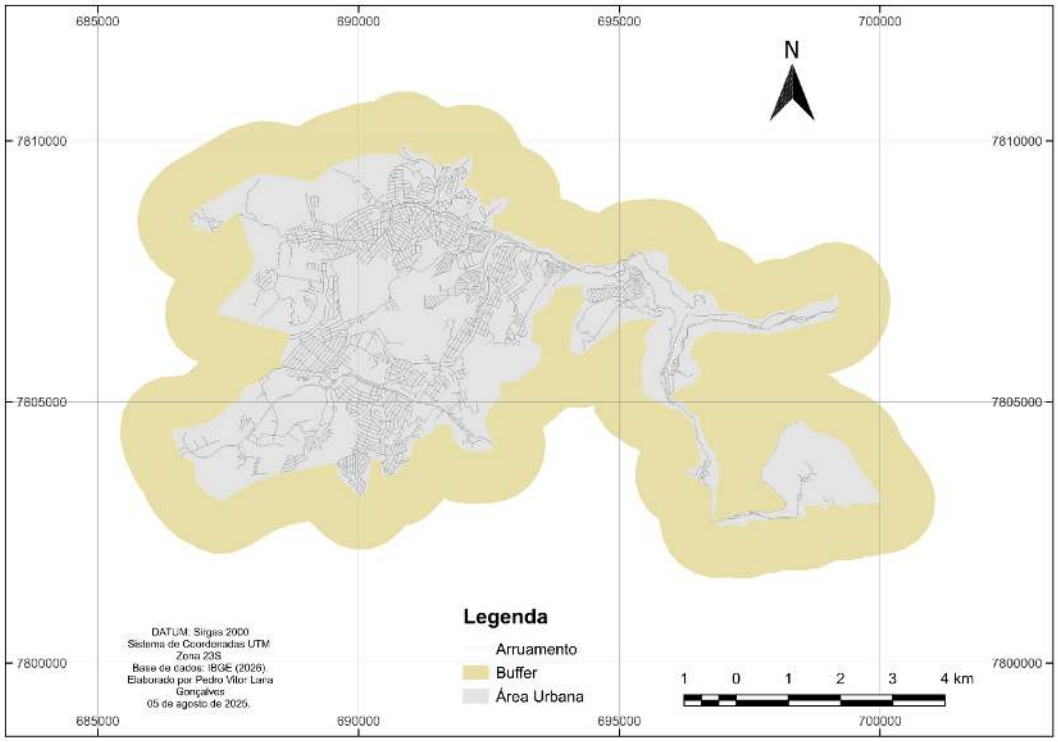
Em que SUHI representa a ilha de calor urbana de superfície; LST urbano corresponde à temperatura de superfície terrestre em cada pixel da área urbana; e LST rural representa a média da temperatura de superfície terrestre na área rural.

Os mapas de LULC utilizados nesta pesquisa foram obtidos na plataforma MapBiomas, que disponibiliza anualmente mapeamentos derivados de imagens dos satélites Landsat e

Sentinel, processadas por algoritmos de aprendizado de máquina implementados na plataforma GEE (Baeza *et al.*, 2022).

Tanto os dados quanto a metodologia adotada pelo projeto são de acesso público (https://brasil.mapbiomas.org/). Neste estudo, foram utilizados os mapas referentes aos anos de 2013 e 2024, sendo este último o mais recente disponível no momento da realização da pesquisa. Em seguida, as classes originais do MapBiomas foram reclassificadas em seis categorias analíticas: vegetação natural, agropecuária, área urbanizada, áreas não vegetadas, mineração e corpos d'água.

Figura 2 – Delimitação entre a área urbana e rural.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.2.2. Análise estatística

A correlação de Pearson entre LST e NDVI foi aplicada no software RStudio (versão 2023.12.1+402), considerando tanto o conjunto total de pontos quanto as diferentes classes de LULC. No QGIS, foi criada uma malha amostral com espaçamento de 90 m nas direções horizontal e vertical, visando reduzir a ocorrência de pontos espacialmente adjacentes em

relação à resolução de 30 m dos produtos *Landsat*. Foram obtidos 12.194 pontos válidos para os períodos seco e chuvoso, definidos pela presença simultânea de valores de LST, NDVI e LULC. Os valores dos *rasters* foram extraídos para cada ponto por meio da ferramenta "Amostrar valores do *raster*".

A análise foi realizada em duas abordagens: (i) correlação geral entre LST e NDVI, considerando todos os pontos da área de estudo; e (ii) correlação estratificada por classe de LULC. Para cada abordagem, foram calculados o coeficiente de correlação de Pearson (r), o coeficiente de determinação (R^2) e o valor de p, visando avaliar a intensidade, a proporção da variância explicada e a significância estatística da relação entre as variáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 representa as variações das classes em hectares (ha) e porcentagem (%) entre os anos de 2013 e 2024. A classe Vegetação Natural reduziu 556,78ha, correspondendo a uma perda de 10,74%. Por outro lado, a classe Agropecuária expandiu-se em 273,54 ha, representando um aumento de 10,08%. De forma semelhante, a classe Área Urbanizada também registrou um acréscimo de 238,45 ha, cerca de 12,62%, evidenciando avanço das atividades antrópicas no município.

Por outro lado, as classes Áreas não Vegetadas e Mineração apresentaram os maiores aumentos proporcionais, com expansão de 26,47 ha (82,91%) e 33,71 ha (69,46%), respectivamente. Por sua vez, a classe Água reduziu sua área em 15,39 ha, indicando uma perda de 37,95% entre os anos analisados.

Tabela 4 - Variação das classes de LULC entre 2013 e 2024.

LULC	2013	2024	Variação (ha)	Variação (%)
Vegetação Natural	5.185,77	4.628,99	-556,78	-10,74%
Agropecuária	2.713,94	2.987,48	273,54	10,08%
Área Urbanizada	1.889,16	2.127,60	238,45	12,62%
Área não vegetada	31,92	58,39	26,47	82,91%
Mineração	48,54	82,25	33,71	69,46%
Corpos D'água	40,56	25,16	-15,39	-37,95%

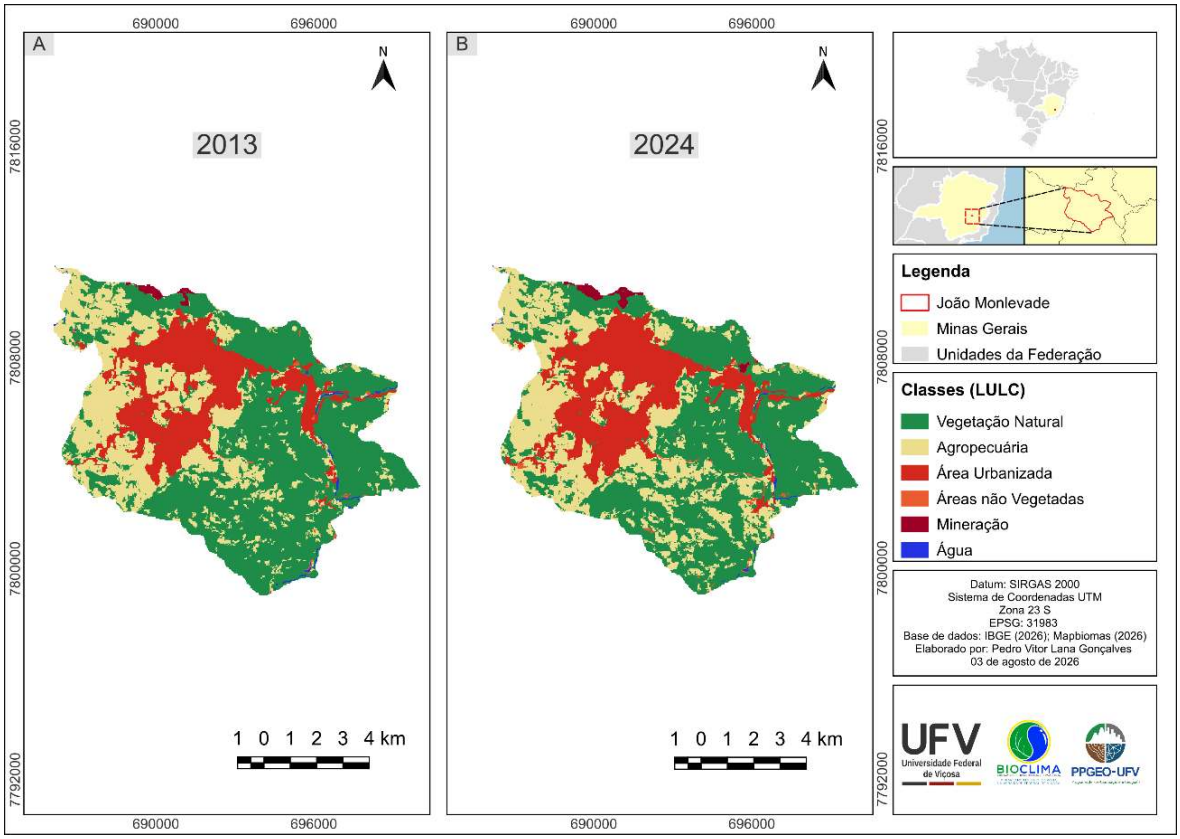
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De modo geral, a análise aponta para a redução da vegetação natural e o aumento das áreas destinadas a atividades antrópicas, caracterizando um processo de transformação da paisagem que combina crescimento urbano, expansão agropecuária e exploração dos recursos naturais. Na Figura 3, é possível analisar as variações ocorridas entre os anos de 2013 (A) e 2024 (B).

Por outro lado, as Tabelas 5 e 6 apresentam as médias da LST, do NDVI e o desvio-padrão para cada tipo de LULC, evidenciando que superfícies expostas, impermeáveis e constituídas por materiais escuros tendem a reter maior quantidade de calor sensível do que áreas arborizadas, as quais promovem maior resfriamento superficial em função da evapotranspiração e do sombreamento.

Percebe-se que, durante os períodos seco (Tabela 5) e chuvoso (Tabela 6), a classe Vegetação Natural apresenta a menor média de LST e a maior média de NDVI, indicando uma possível correlação inversa entre essas variáveis, posteriormente confirmada pelas Tabelas 7 e 8. Por outro lado, a Área Urbanizada apresenta o comportamento oposto, com a maior média de LST e a menor média de NDVI, sugerindo menor vigor da cobertura vegetal. As classes Área Urbanizada, Áreas não vegetadas e Água apresentam as maiores amplitudes térmicas, de 10,54°C, 10,22°C e 10,15°C, respectivamente. Em contrapartida, as menores amplitudes foram observadas nas classes Mineração (8,83°C), Agropecuária (8,85°C) e Vegetação Natural (8,95°C).

Figura 3 – Comparação discreta do LULC entre os anos de 2013 e 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 5 - Média e desvio padrão da LST e do NDVI para cada tipo de LULC durante o período seco.

LULC	n	Média (LST)	Desvio padrão (LST)	Média (NDVI)	Desvio Padrão (NDVI)
Vegetação Natural	5.756	22.4	1.86	0.774	0.105
Agropecuária	3.622	26.5	3.09	0.587	0.153
Área Urbanizada	2.626	28.35	2.09	0.326	0.155
Áreas não Vegetadas	65	25.69	2.33	0.47	0.148
Mineração	100	28.09	4.37	0.422	0.246
Água	25	22.86	2.04	0.464	0.27

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 6 - Média e desvio padrão da LST e do NDVI para cada tipo de LULC durante o período chuvoso.

LULC	n	Média (LST)	Desvio padrão (LST)	Média (NDVI)	Desvio Padrão (NDVI)
Vegetação Natural	5.576	31.35	2.26	0.741	0.109

LULC	n	Média (LST)	Desvio padrão (LST)	Média (NDVI)	Desvio Padrão (NDVI)
Agropecuária	3.622	35.35	2.81	0.555	0.14
Área Urbanizada	2.626	38.89	2.34	0.325	0.145
Áreas não vegetadas	65	35.91	2.05	0.451	0.146
Mineração	100	36.92	3.52	0.393	0.234
Água	25	33.01	2.36	0.454	0.27

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Tabela 7 e 8 aponta para uma correlação negativa entre a LST e o NDVI para todos os tipos de LULC. No entanto, apenas as classes Vegetação Natural, Agropecuária, Área Urbanizada e Mineração apresentaram correlações estatisticamente significativas ($p < 0,001$), enquanto Áreas não vegetadas e Água não apresentaram associação significativa ($p > 0,05$).

No período chuvoso (Tabela 7), a Mineração apresentou a correlação negativa mais forte ($r = -0,813$; $R^2 = 0,660$), indicando que aproximadamente 66,0% da variação da LST pode ser explicada pela variação do NDVI nessa classe. Em seguida, destacaram-se a Agropecuária ($r = -0,730$; $R^2 = 0,533$) e a Vegetação Natural ($r = -0,722$; $R^2 = 0,521$). A Área Urbanizada apresentou correlação negativa moderada ($r = -0,480$; $R^2 = 0,231$), sugerindo que, embora a cobertura vegetal exerça influência sobre a LST, fatores como a heterogeneidade dos materiais construtivos, o grau de impermeabilização da superfície e a morfologia urbana também contribuem para a distribuição espacial da LST.

Tabela 7 - Correlação de Pearson entre LST e NDVI por classe de LULC para o período chuvoso.

LULC	Correlação (LST - NDVI)	R^2	p valor
Vegetação natural	-0.722	0.521	$p < 0,001$
Agropecuária	-0.730	0.533	$p < 0,001$
Área urbanizada	-0.480	0.231	$p < 0,001$
Área não vegetada	-0.180	0.032	$p > 0,05$
Mineração	-0.813	0.660	$p < 0,001$
Água	-0.198	0.039	$p > 0,05$

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Durante o período seco (Tabela 8), novamente, manteve-se o padrão de correlação negativa entre as variáveis, embora com menor intensidade para algumas classes. A Mineração ($r = -0,716$; $R^2 = 0,512$) e a Agropecuária ($r = -0,711$; $R^2 = 0,505$) apresentaram as associações

mais fortes, seguidas pela Vegetação Natural (r = -0,589; R^2 = 0,346). Na Área Urbanizada, a correlação tornou-se mais fraca (r = -0,299; R^2 = 0,090), indicando que apenas 9% da variação na LST foi explicada pelo NDVI.

Tabela 8 - Correlação de Pearson entre LST e NDVI por classe de LULC para o período seco.

LULC	Correlação (LST - NDVI)	R^2	p valor
Vegetação natural	-0.589	0.346	p < 0,001
Agropecuária	-0.711	0.505	p < 0,001
Área urbanizada	-0.299	0.09	p < 0,001
Área não vegetada	-0.135	0.018	p > 0,05
Mineração	-0.716	0.512	p < 0,001
Água	-0.306	0.093	p > 0,05

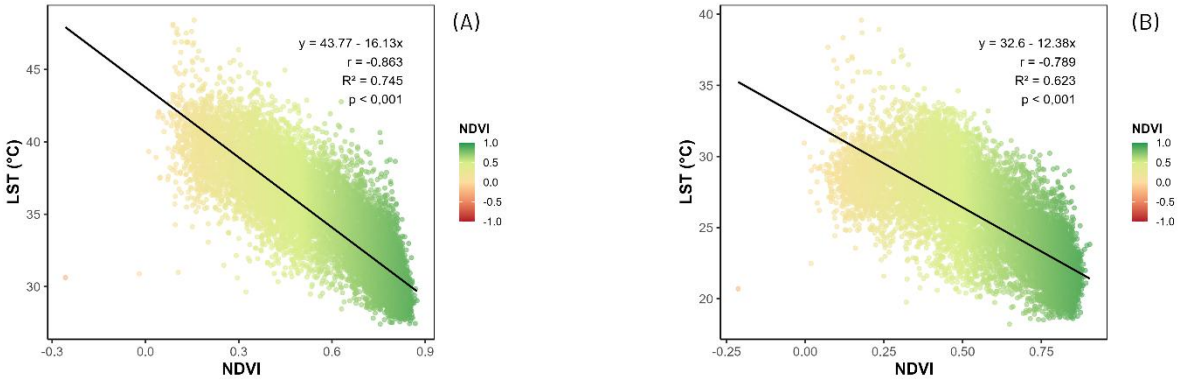
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Do mesmo modo, a Figura 4 representa a correlação entre a LST e o NDVI ao longo da série temporal analisada, sem considerar os diferentes tipos de LULC. A Figura 4A corresponde ao período chuvoso, no qual foi observado coeficiente de correlação de -0,863 e coeficiente de determinação (R^2) de 0,745, indicando que 74,5% da variabilidade da LST está associada linearmente ao NDVI.

Por sua vez, a Figura 4B, referente ao período seco, apresentou coeficiente de correlação de -0,789 e coeficiente de determinação de 0,623, indicando que 62,3% da variabilidade da LST está associada linearmente ao NDVI nesse período.

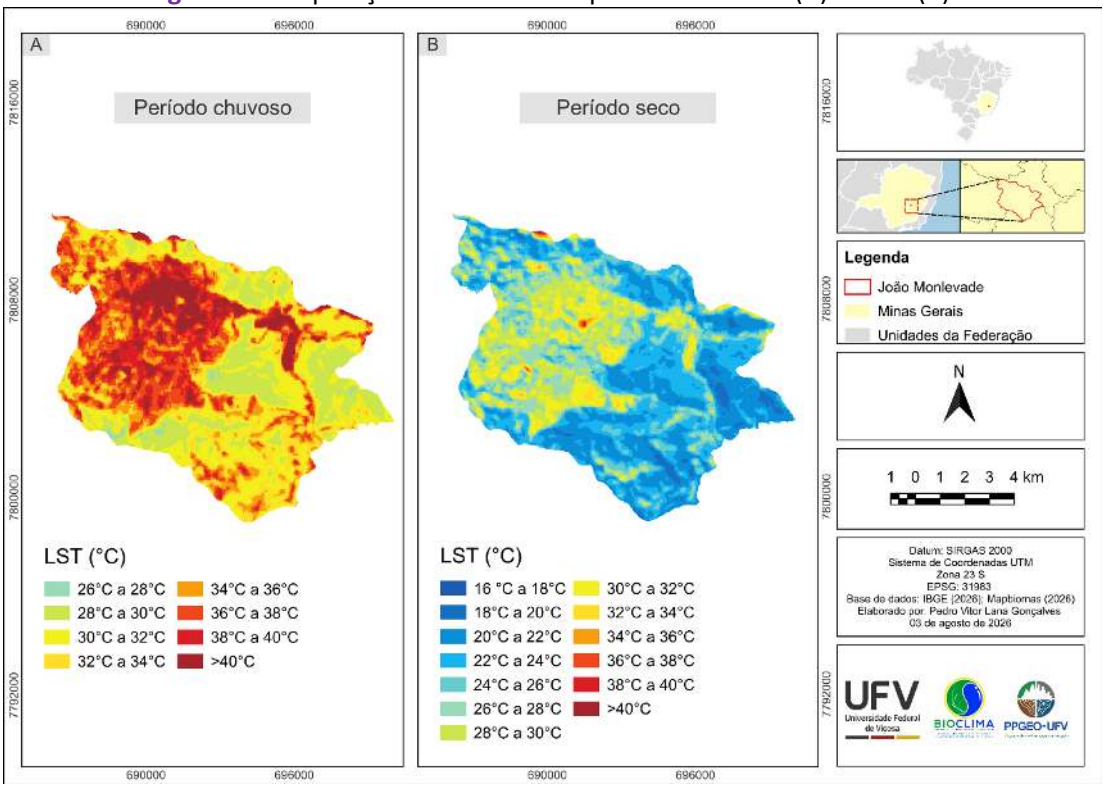
A Figura 5 apresenta a distribuição da LST nos períodos chuvoso e seco. No período chuvoso (A), correspondente ao verão, as áreas urbanizadas apresentam predominância de temperaturas superiores a 36,0°C, com diversos pontos acima de 40,0°C, enquanto as áreas de vegetação natural registram valores mais amenos, entre 26,0°C e 30,0°C. No período seco (B), correspondente ao inverno, observa-se redução geral da LST, com predominância de valores entre 28,0°C e 32,0°C, evidenciando a influência da sazonalidade sobre o campo térmico superficial do município.

Figura 4 – Correlação entre a LST e o NDVI para o município de João Monlevade (MG) entre os anos de 2013 e 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 5–Comparação da LST entre o período chuvoso (A) e seco (B).



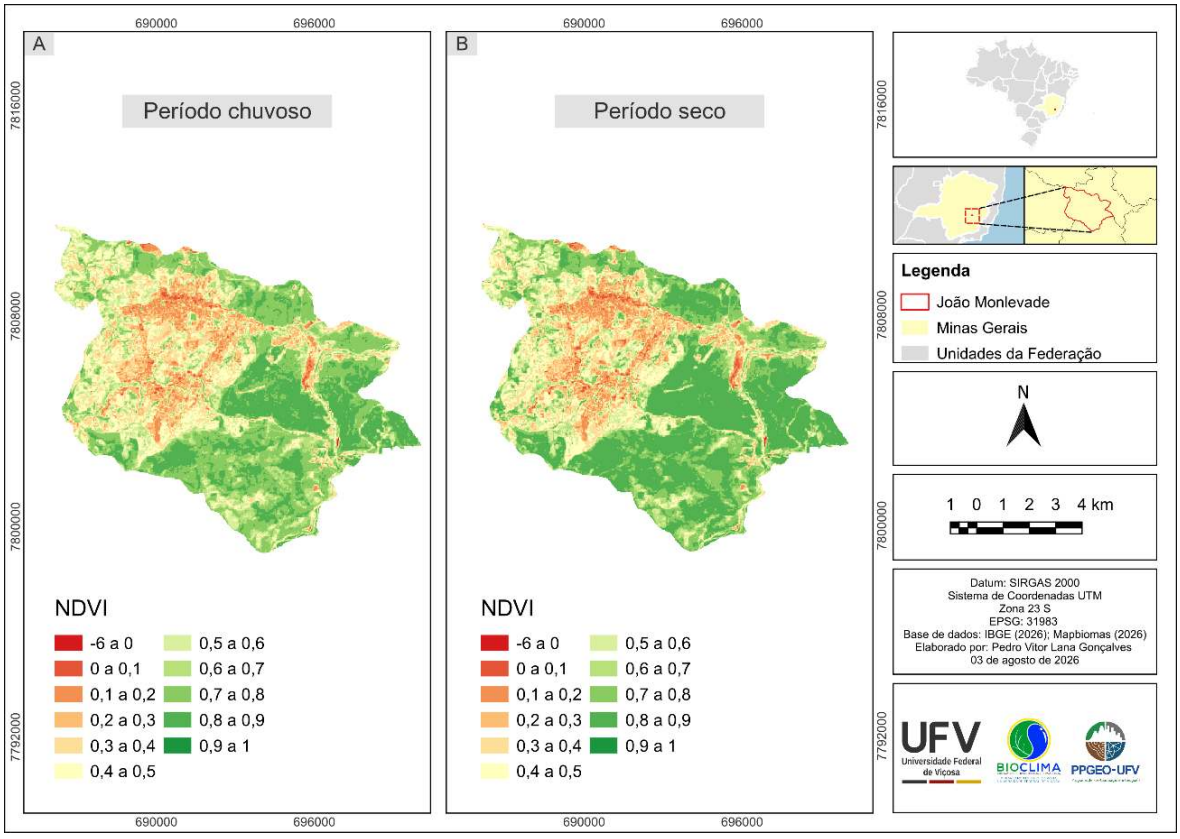
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Ademais, a Figura 6 representa a comparação do NDVI entre o período chuvoso (A) e seco (B), que quando comparada à Figura 5, evidencia-se a correlação apresentada na Figura 4, segundo a qual maiores valores de LST tendem a estar associados a menores valores de NDVI, enquanto menores valores de LST tendem a ocorrer em áreas com maiores valores de NDVI. Cabe destacar que, na Figura 6, chama a atenção o fato de muitos pontos classificados

como vegetação natural (Figura 3) apresentarem valores de NDVI inferiores no período chuvoso, o que não era esperado, considerando que a disponibilidade hídrica constitui um fator fundamental para o desenvolvimento da vegetação e para a expansão de estruturas vegetais, especialmente das folhas.

Isso ocorre porque a clorofila absorve intensamente a radiação eletromagnética na região do vermelho do espectro visível para a realização da fotossíntese, enquanto a estrutura interna das folhas apresenta elevada reflectância na região do infravermelho próximo, comportamento que fundamenta a utilização do NDVI como indicador da presença e do vigor da vegetação (Glenn *et al.*, 2008).

Figura 6 - Comparação do NDVI entre o período chuvoso (A) e seco (B).

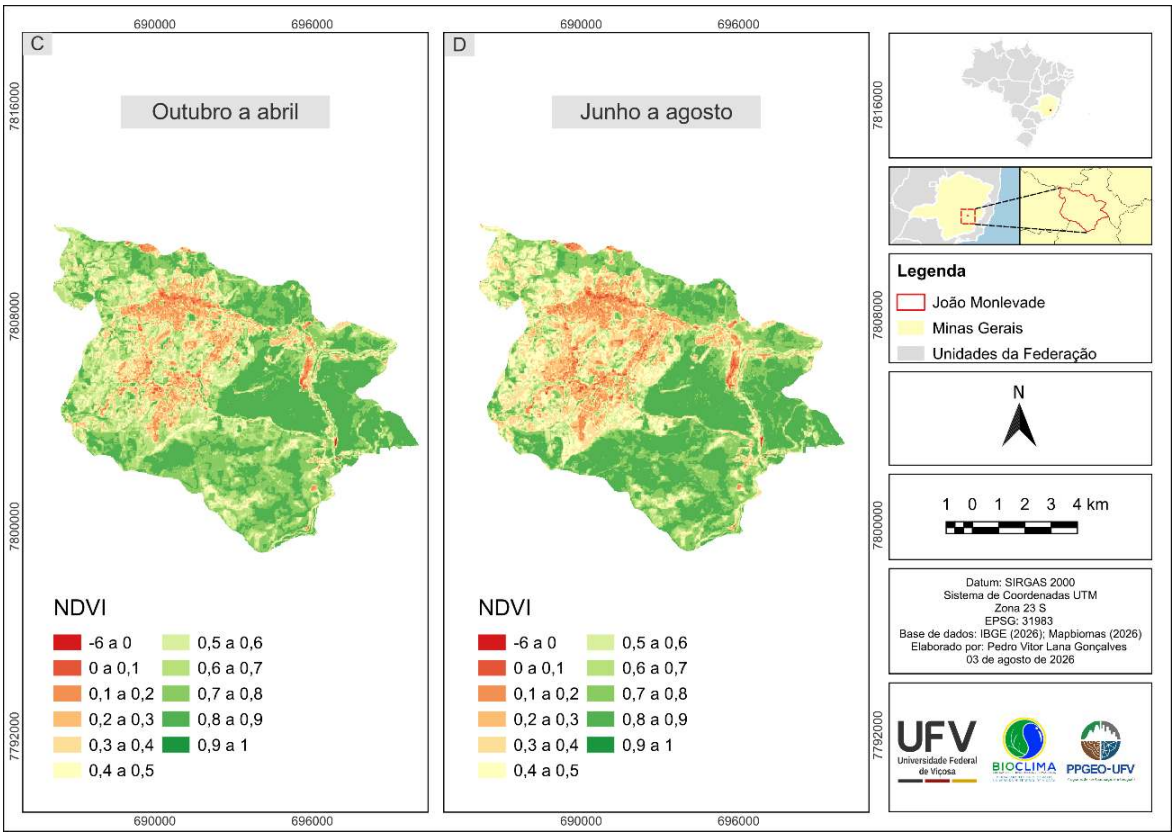


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Dessa forma, ao excluir da análise os meses de transição, especificamente setembro (Figura 7C) e maio (Figura 7D), os valores de NDVI apresentam um comportamento mais próximo do esperado, com maiores valores associados ao período de maior disponibilidade

hídrica. Portanto, observa-se que a relação inversa entre LST e NDVI identificada nas análises estatísticas também se manifesta espacialmente no município de João Monlevade.

Figura 7 - Comparação do NDVI entre o período chuvoso (C) e seco (D), excluindo os meses de transição.



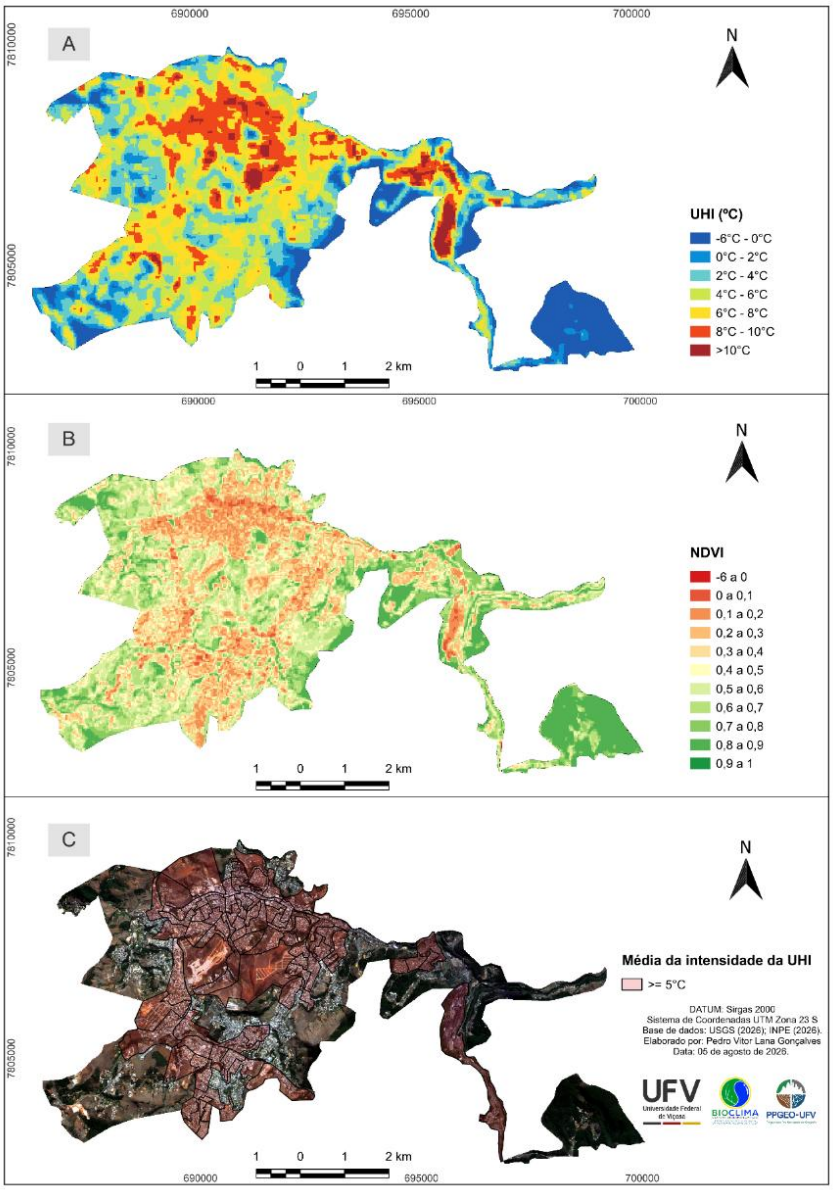
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Figura 8, observa-se a intensidade da UHI (A) durante o período chuvoso. Nota-se que, em alguns pontos, a intensidade da UHI é superior a 10,0°C, indicando um cenário, com possíveis implicações para o conforto térmico e à qualidade ambiental urbana. Entre os efeitos associados às elevadas temperaturas urbanas, destacam-se o agravamento de condições crônicas de saúde, o desconforto térmico e o aumento da demanda por energia e água (Li *et al.*, 2019; Santamouris, 2020; Yadav*et al.*, 2023).

Do mesmo modo, observa-se que as áreas que apresentam maior intensidade de UHI coincidem, espacialmente, com aquelas que possuem baixos valores de NDVI (B), evidenciando a relação entre a menor presença de vegetação e a intensificação do aquecimento urbano. Nesse contexto, a reduzida cobertura vegetal pode limitar a capacidade

de atenuação das elevadas temperaturas superficiais, contribuindo para a manutenção de condições térmicas mais intensas.

Figura 8 – Comparação entre LST (A), NDVI (B) e intensidade média de UHI (C) de setores censitários durante o período chuvoso.

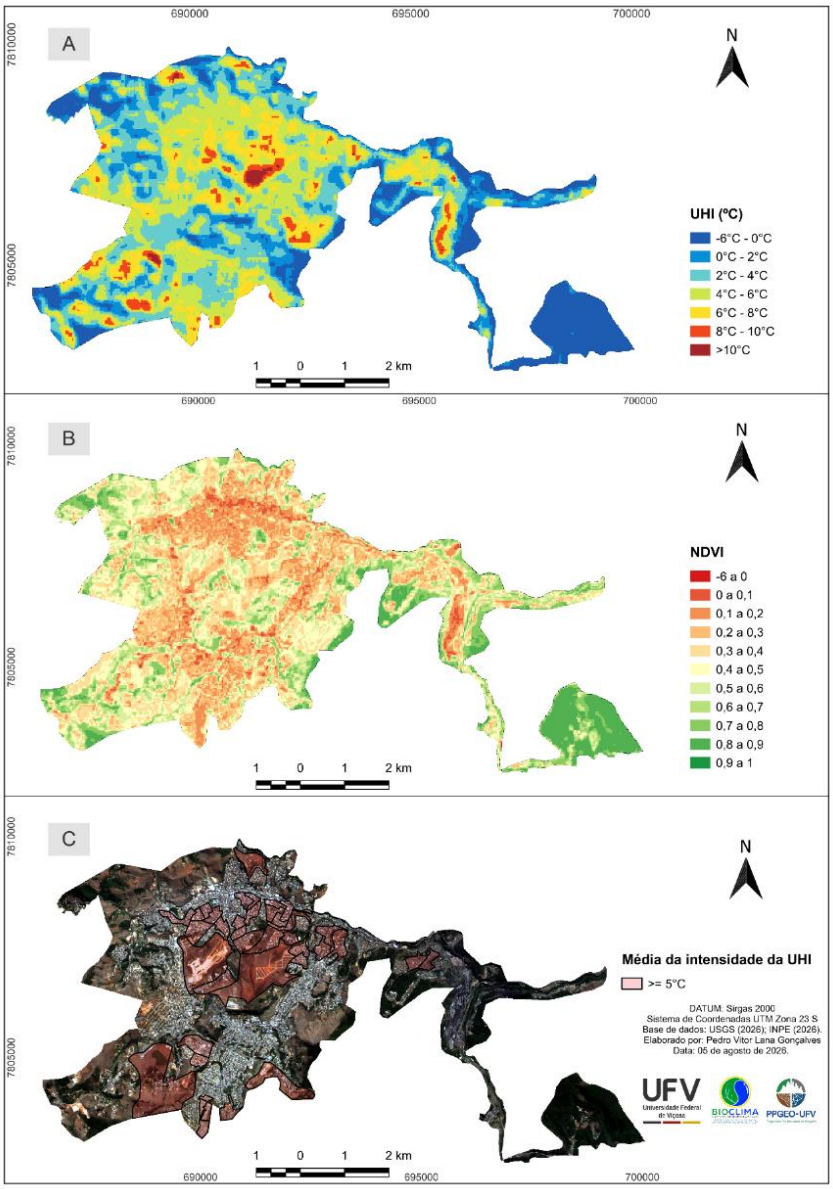


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Destaca-se ainda, na Figura 8C, que a maior parte da cidade apresenta intensidade média de UHI igual ou superior a 5,0°C, tornando esse cenário ainda mais expressivo. Por outro lado, durante o período seco (Figura 9), a UHI (A) apresenta menor média de intensidade; entretanto, grande parte da área urbanizada ainda registra valores entre 4,0°C e 8,0°C, com

alguns pontos superiores a 10,0°C. Assim como no período chuvoso (Figura 8), observa-se que as maiores intensidades permanecem concentradas na área central e em suas adjacências, embora também sejam identificados alguns pontos de elevada intensidade na periferia urbana. Cabe ressaltar que, durante o período seco, os maiores valores de intensidade (Figura 9A e 9C) estão concentrados em uma área de loteamento, caracterizada pela presença de solo exposto.

Figura 9 – Comparação entre LST (A), NDVI (B) e intensidade média de UHI (C) de setores censitários durante o período seco.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Essa condição pode favorecer o aumento da temperatura, uma vez que superfícies com pouca ou nenhuma cobertura vegetal apresentam maior exposição à radiação solar e menor capacidade de resfriamento por evapotranspiração, contribuindo para a ocorrência de temperaturas superficiais mais elevadas.

Derdouri *et al.* (2021), em uma revisão sistemática da literatura, identificaram a conversão da cobertura do solo para usos urbanos como um dos principais fatores associados ao aumento da LST e da intensidade da SUHI, enquanto a cobertura vegetal se destaca como elemento fundamental para o resfriamento urbano.

Essa relação também foi evidenciada por Kliengchuay *et al*. (2025), que observaram correlações negativas entre LST e NDVI em diferentes estações do ano na Tailândia, e por Favoreti *et al*. (2026), que demonstraram, no contexto brasileiro, a contribuição das infraestruturas verdes para a adaptação climática. Em conjunto, esses estudos reforçam que a expansão urbana e a redução da vegetação tendem a intensificar as temperaturas superficiais, ao passo que a presença de cobertura vegetal contribui para sua mitigação.

Ao quantificarem os efeitos das mudanças no LULC sobre a LST urbana durante um período de 25 anos (1993 - 2018), na cidade semiárida de Shiraz, no sul do Irã, Kamali Maskooni *et al*. (2021)verificaram que a LST média em toda a área de estudo aumentou consideravelmente ao longo do período analisado, em decorrência da urbanização, da redução das áreas verdes e da expansão das áreas industriais. Portanto, observa-se que a tendência de expansão das áreas urbanizadas, associada à substituição da vegetação natural por superfícies impermeáveis e materiais com elevada capacidade de absorção da radiação, contribui para a intensificação das UHI em diferentes partes do planeta.

Considerando estratégias de mitigação, muitos estudos apontam para a implementação de políticas que incentivem a ampliação das áreas verdes, a proteção dos corpos d'água e a utilização de materiais de maior reflectância em telhados e pavimentações (Chen *et al.*, 2006; Derdouri *et al.*, 2021; Kamali Maskooni *et al.*, 2021; Kikon *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2011; Min; Zhao; Miao, 2018; Wang *et al.*, 2016; Zhang; Estoque; Murayama, 2017; Zhou *et al.*, 2020). Além disso, Derdouri *et al*. (2021) reforçam a necessidade de considerar as características específicas da área-alvo, como as condições climáticas, a topografia local, o

tamanho da área urbana eseu contexto territorial, uma vez que a eficácia das estratégias de mitigação pode variar de acordo com essas características.

4. CONCLUSÃO

A análise evidenciou que as áreas urbanizadas de João Monlevade apresentam, predominantemente, baixos valores de NDVI associados a elevadas LST, enquanto áreas com maior vigor da vegetação registram menores valores de LST, reforçando o papel da cobertura vegetal na atenuação do aquecimento superficial urbano. Esses resultados contribuem para a compreensão da dinâmica térmica do município e podem subsidiar o planejamento de intervenções voltadas à mitigação do aquecimento urbano.

Nesse contexto, as ações devem considerar as características e necessidades específicas de cada setor urbano, priorizando estratégias como arborização de vias e espaços públicos, implantação de microparques e áreas de sombra, recuperação da cobertura vegetal e adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), além de intervenções complementares de baixo custo, como pontos de hidratação em áreas de maior exposição e circulação. Dessa forma, os resultados podem apoiar a definição de intervenções territorialmente direcionadas, favorecendo a alocação mais eficiente de recursos públicos e a promoção do conforto térmico e do bem-estar da população.

5. REFERÊNCIAS

ABOULNAGA, M. *et al.* Understanding Urban Heat Island Effect: Causes, Impacts, Factors, and Strategies for Better Livability and Climate Change Mitigation and Adaptation. **Livable Cities**, p. 283–366, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-51220-9_2.

ABUBAKAR, M. L. *et al.* Assessment of the relationship between land surface temperature and vegetation using Modis, NDVI, and LST times eries data in Kaduna metropolis, Nigeria. **Fudma Journal of Sciences**, v. 8, n. 2, p. 137–148, 2024. DOI: 10.33003/FJS-2024-0802-2305.

ALMEIDA, G. S. de *et al.* Land use controls the spatiotemporal patterns of surface water quality of the Quadrilátero Ferrífero mineral province, Brazil. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 48, n. 11, p. 474, 2026. DOI: 10.1007/s10653-026-03358-7.

ALLOCCA, R. A., FIALHO, E. S. O campo térmico no perímetro urbano de Ponte Nova-MG (Zona da Mata Mineira), em situações sazonais de verão e inverno, no ano de 2017**. Revista Brasileira De Climatologia,** *24*. 2019. https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60753

AMANI, M. *et al.* Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326–5350, 2020. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.

BAEZA, S. *et al.* Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomas Pampa initiative. **Remote Sensing Applications**: Society and Environment, v. 28, p. 100834, 2022. DOI: 10.1016/J.RSASE.2022.100834.

BAGNOULS, F.; GAUSSEN, H. Les climatsbiologiques et leur classification. **Annales de géographie**, v. 66, n. 355, p. 193–220, 1957. DOI: 10.3406/GEO.1957.18273.

CHEN, X. L. *et al.* Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n. 2, p. 133–146, 2006. DOI: 10.1016/J.RSE.2005.11.016.

CORREIA, T. de B. O modernismo e o núcleo fabril: o anteprojeto de Lúcio Costa para monlevade. **PosFAUUSP**, v. 0, n. 14, p. 80–93, 2003. DOI: 10.11606/ISSN.2317-2762.V0I14P80-93.

DERDOURI, A. *et al.* Understanding the Links between LULC Changes and SUHI in Cities: Insights from Two-Decadal Studies (2001–2020). **Remote Sensing,** v. 13, n. 18, 2021. DOI: 10.3390/RS13183654.

DUAN, X. *et al.* A geospatial and statistical analysis of land surface temperature in response to land use land cover changes and urban heat island dynamics. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 4943-, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-89167-x.

EROS. **Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]**. [*S. l.*], 2020. DOI: 10.5066/P90GBGM6.

FAVORETI, A. L. F. *et al.* The impact of land use and land cover on regulating ecosystem services provided by green infrastructures in Campinas, Brazil. **Environment, Developmentand Sustainability**, p. 1–26, 2026. DOI: 10.1007/S10668-025-07220-1.

FERNANDES, L. A.; PRADO, L. B.; FIALHO, E. S. The Relationship between the Geoecological and Anthropic Aspects for the Conformation of the Urban Climate of Viçosa-MG in the Synotic Situation of Stability in 2015" **Climate,** 5, n. 2:, 35, 2017. https://doi.org/10.3390/cli5020035

FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. **Revista ACTA Geográfica**, Edição Especial de Climatologia geográfica, p. 61–76, 2012. DOI: 10.5654/ACTAGEO2012.0002.0004.

FIALHO, E. S.; SANTOS, L. G. F. dos. A climatologia urbana e o uso do sensoriamento remoto: um estudo de caso em uma cidade de pequeno porte em clima tropical de altitude. **Geografia**, v. 46, n. 1, p. 1–28, 2021. DOI: 10.5016/GEOGRAFIA.V46I1.16047.

FIALHO, E. S.; SANTOS, L. G. F. dos. Clima, Cidade e Crescimento: Uma investigação da expansão norte da cidade de Viçosa-MG, por meio da termografia de superfície (2000-2019). **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 32, n. 19, p. 383–414. https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.15766

GLENN, E. P. *et al.* Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. **Sensors,** v. 8, n. 4, p. 2136–2160, 2008. DOI: 10.3390/S8042136.

GUSMÃO, S. L.; ROMERO, G. Memória(s) e identidade: a história de João Monlevade / Minas Gerais escovada a contrapelo. **Patrimônio e Memória**, v. 18, n. 1, p. 440–465, 2022. DOI: 10.5016/PEM.V18I1.3008.

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,** v. 32, n. 1, p. 1–6, 2020. DOI: 10.1007/S11676-020-01155-1.

IBGE, **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. João Monlevade (MG)**, Cidades e Estados | IBGE**. [*S. l.*], 2026. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/joao-monlevade.html.

INMET, **Instituto Nacional de Meteorologia - INMET**. [*S. l.*], 2026. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais.

JAVIDAN, R. *et al.* Soil properties mapping using the Google Earth Engine platform. **Remote Sensing of Soil and Land Surface Processes: Monitoring, Mapping, and Modeling**, p. 385–398, 2024. DOI: 10.1016/B978-0-443-15341-9.00022-8.

KAMALI MASKOONI, E. *et al.* Impact of spatiotemporal land-use and land-cover changes on surface urban heat islands in a semiarid region using Landsat data. **International Journal of Digital Earth**, v. 14, n. 2, p. 250–270, 2021. DOI: 10.1080/17538947.2020.1813210.

KIKON, N. *et al.* Assessment of urban heat islands (UHI) of Noida City, India using multi-temporal satellite data. **Sustainable Cities and Society**, v. 22, p. 19–28, 2016. DOI: 10.1016/J.SCS.2016.01.005.

KLIENGCHUAY, W. *et al.* Variation of vegetation cover and the relationship with land surface temperature across Thailand (2007 to 2022). **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 27823-, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-13018-y.

LI, J. *et al.* Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3249–3263, 2011. DOI: 10.1016/J.RSE.2011.07.008.

LI, X. *et al.* The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. **Science of The Total Environment**, v. 605–606, p. 426–435, 2017. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.229.

LI, X. *et al.* Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. **Energy**, v. 174, p. 407–419, 2019. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2019.02.183.

MIN, M.; ZHAO, H.; MIAO, C. Spatio-Temporal Evolution Analysis of the Urban Heat Island: A Case Study of Zhengzhou City, China. **Sustainability 2018,** v. 10, n. 6, 2018. DOI: 10.3390/SU10061992.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**: Routledge, 2002. DOI: 10.4324/9780203407219.

OUCHRA, H.; BELANGOUR, A.; ERRAISSI, A. Exploring Google Earth Engine Platform for Satellite Image Classification Using Machine Learning Algorithms. **Lecture Notes in Networks and Systems**, v. 938 LNNS, p. 271–280, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-54376-0_24/FIGURES/3.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. **Energy and Buildings**, v. 207, p. 109482, 2020. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109482.

SANTOS, L. G. F.; FIALHO, E. S. Análise da distribuição da Temperatura de Superfície em relação ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, em estação seca e chuvosa, no município de Teixeiras-MG. **Revista Ponto de Vista**, *[S. l.]*, v. 9, n. 3, p. 95–112, 2020. Disponível em: https://periodicos.ufv.br/RPV/article/view/10805.

SHI, H. *et al.* Monitoring Changes in Landsat Thermal Features in Urban and Non-Urban Interfaces from 1986 to 2023 in Two International Urban Centers: Implications for Climate and Global Issues. **Remote Sensing 2026,** v. 18, n. 4, 2026. DOI: 10.3390/RS18040590.

VICQ, R. de *et al.* Iron Quadrangle stream sediments, Brazil: geochemical maps and reference values. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 5, p. 4407–4417, 2015. DOI: 10.1007/S12665-015-4508-2.

WANG, C. *et al.* Spatio-Temporal Modeling of the Urban Heat Island in the Phoenix Metropolitan Area: Land Use Change Implications. **Remote Sensing 2016,** v. 8, n. 3, 2016. DOI: 10.3390/RS8030185.

WEBER, A. A. *et al.* Reproductive effects of oestrogenic endocrine disrupting chemicals in Astyanax rivularis inhabiting headwaters of the Velhas River, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 592, p. 693–703, 2017. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.02.181.

YADAV, N. *et al.* Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. **Urban Climate**, v. 51, p. 101622, 2023. DOI: 10.1016/J.UCLIM.2023.101622.

ZHANG, X.; ESTOQUE, R. C.; MURAYAMA, Y. An urban heat island study in Nanchang City, China based on land surface temperature and social-ecological variables. **Sustainable Cities and Society**, v. 32, p. 557–568, 2017. DOI: 10.1016/J.SCS.2017.05.005.

ZHAO, L.; FAN, X.; HONG, T. Urban Heat Island Effect: Remote Sensing Monitoring and Assessment—Methods, Applications, and Future Directions. **Atmosphere,** v. 16, n. 7, 2025. DOI: 10.3390/ATMOS16070791.

ZHOU, G. *et al.*Impacts of Urban land surface temperature on tract landscape pattern, physical and social variables. **InternationalJournalof Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 683–703, 2020. DOI: 10.1080/01431161.2019.1646939.