



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS V
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E SOCIAIS APLICADA - CCBSA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

MARIA CLARA SILVA SENA

**MODELAGEM ESPACIAL DAS ILHAS DE CALOR URBANO NA CIDADE DE
CAMPINA GRANDE**

**JOÃO PESSOA
2025**

MARIA CLARA SILVA SENA

**MODELAGEM ESPACIAL DAS ILHAS DE CALOR URBANO NA CIDADE DE
CAMPINA GRANDE**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo)
apresentado a/ao Coordenação
/Departamento do Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Ciências Biológicas.

Área de concentração: Geociências

Orientador: Prof. Dra. Célia Cristina Clemente Machado.

**JOÃO PESSOA
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S474m Sena, Maria Clara Silva.

Modelagem espacial das ilhas de calor urbano na cidade de Campina Grande [manuscrito] / Maria Clara Silva Sena. - 2025.

30 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências biológicas) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e Sociais Aplicadas, 2025.

"Orientação : Prof. Dra. Célia Cristina Clemente Machado, Coordenação do Curso de Ciências Biológicas - CCBSA".

1. Crescimento urbano. 2. Sensoriamento termal. 3. Landsat. I. Título

21. ed. CDD 307.76

MARIA CLARA SILVA SENA

MODELAGEM ESPACIAL DAS ILHAS DE CALOR URBANO NA CIDADE DE
CAMPINA GRANDE

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo)
apresentado a/ao Coordenação
/Departamento do Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Ciências Biológicas.

Área de concentração: Geociências.

Aprovada em: 25/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- Sergio Romero da Silva Xavier (***.844.704-**), em 28/06/2025 10:20:57 com chave b9ee0a08542211f0b19206adb0a3afce.
- Célia Cristina Clemente Machado (***.425.594-**), em 28/06/2025 09:57:44 com chave 7ba2872c541f11f08d7f1a7cc27eb1f9.
- Nathalia Fernandes Canassa (***.419.788-**), em 30/06/2025 13:36:26 com chave 5da127b255d011f0b3e91a1c3150b54b.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 01/07/2025

Código de Autenticação: 9b509c



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	METODOLOGIA	9
2.1	Área de estudo	9
2.2	Classificação do uso e cobertura da terra (UCT) e análise da reflectância da superfície	10
2.3	Temperatura e superfície	12
2.4	Dados de temperatura do ar e precipitação	12
2.5	Análise estatística	13
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
4	CONCLUSÃO	22
	REFERÊNCIAS	23

MODELAGEM ESPACIAL DAS ILHAS DE CALOR URBANO NA CIDADE DE CAMPINA GRANDE

THE SPATIAL MODELING OF URBAN HEAT ISLANDS IN THE CITY OF CAMPINA GRANDE

Maria Clara Silva Sena¹
Célia Cristina Clemente Machado²

RESUMO

Em 1760, a Inglaterra iniciava a revolução industrial, que resultou em um aumento populacional urbano. Esse crescimento gerou modificações na paisagem natural que acarretaram na criação de ilhas de calor urbano (ICU). Esse fenômeno, além de causar desconforto térmico, altera a taxa de evapotranspiração influenciando no balanço de energia. Campina Grande (Brasil-PB) enfrentou uma urbanização acelerada, em parte devido ao seu papel como um dos principais polos industriais da região. Isso atrai pessoas de outras localidades em busca de melhores condições de trabalho e educação, resultando em um aumento das infraestruturas, transportes públicos e saneamento básico na cidade, contribuindo para a formação das ICU. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência das mudanças no uso e cobertura da terra sobre as variações de temperatura, quantidade de biomassa verde e a umidade em Campina Grande. Para isso, utilizamos a modelagem espacial das ICU para compreender como essas transformações impactam o microclima urbano ao longo do tempo. A obtenção dos índices e temperaturas foram feitas com base em dez imagens da série Landsat, abrangendo os anos de 1984 a 2020. O MAPBIOMAS foi utilizado para observar as mudanças no uso e cobertura da terra. Ao longo dos 36 anos em análise, a substituição das superfícies naturais e pasto por infraestruturas artificiais resultou em um aumento progressivo da temperatura da superfície em Campina Grande e diminuição da umidade. A urbanização foi a preditora mais importante para explicar o aumento da temperatura da superfície em Campina Grande, enquanto as variações na precipitação acumulada e da temperatura do ar tiveram um impacto menor. O deslocamento das ICU para o extremo sudoeste da cidade, Zonas Sul e Oeste, com grande quantidade de áreas de loteamento e domiciliares, torna urgente a adoção de medidas efetivas, como adoção de políticas de uso de materiais refletivos, por parte dos líderes municipais.

Palavras-Chave: crescimento urbano; sensoriamento termal; landsat.

ABSTRACT

¹ Aluna da Graduação de Ciências Biológicas na Universidade Estadual da Paraíba – Campus V.
Email: Mariaclarasena1904@gmail.com

² Célia Cristina Clemente Machado: Doutora em Geografia, mestre em Biodiversidade e Biotecnologia Vegetal e graduada em Biologia. Tem experiência na área de Biogeografia e Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Endereço eletrônico: celiaccmachado1980@servidor.uepb.edu.br.

In 1760, England began the Industrial Revolution, which led to an increase in the urban population. This growth caused changes in the natural landscape that resulted in the formation of urban heat islands (UHIs). This phenomenon, in addition to causing thermal discomfort, alters the rate of evapotranspiration and influences the energy balance. Campina Grande, located in Paraíba, Brazil, experienced rapid urbanization, partly due to its role as one of the main industrial centers in the region. This attracted people from other areas seeking better working and educational conditions, resulting in the expansion of infrastructure, public transportation, and basic sanitation in the city, all of which contributed to the formation of UHIs. The aim of this study was to analyze the influence of land use and land cover changes on temperature variations, green biomass levels, and humidity in Campina Grande. To achieve this, spatial modeling of UHIs was applied to understand how these transformations affect the urban microclimate over time. The indices and temperature data were obtained from ten Landsat satellite images, covering the years from 1984 to 2020. The MAPBIOMAS platform was used to observe changes in land use and cover. Over the 36 years of analysis, the replacement of natural surfaces and pasture with artificial infrastructure led to a progressive increase in surface temperature in Campina Grande and a decrease in humidity. Urbanization was the most important predictor for explaining the rise in surface temperature, while variations in accumulated precipitation and air temperature had a smaller impact. The shift of UHIs toward the southwestern part of the city, particularly in the South and West Zones with a high concentration of residential and subdivision areas, underscores the urgent need for effective measures such as the implementation of policies promoting the use of reflective materials by municipal authorities.

Keywords: urban growth; thermal remote sensing; landsat.

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial teve início na Inglaterra por volta de 1760, impulsionada pela invenção da máquina a vapor e outras inovações tecnológicas que marcaram o início da industrialização em escala global (CAVALCANTE et al., 2011). Esse processo transformou profundamente as estruturas econômicas e sociais, provocando um intenso crescimento das cidades e um aumento significativo da população urbana. A urbanização acelerada foi alimentada pela migração de moradores das zonas rurais, especialmente de camadas mais pobres da população, que buscavam melhores condições de vida e novas oportunidades de trabalho nas áreas urbanas (FONSECA et al., 2015).

Desde então, o aumento populacional e a intensificação das atividades econômicas vêm desempenhando um papel central nas mudanças ambientais, sobretudo no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2023). No Brasil, essa tendência também é evidente: segundo o Censo de 2022 do IBGE, a população do país atingiu 203,1 milhões de habitantes, um aumento de 6,5% em relação a 2010. A expansão urbana que acompanha esse crescimento tem gerado impactos significativos sobre o meio ambiente e sobre a qualidade de vida nas cidades.

Entre os efeitos mais evidentes desse processo estão a poluição do ar, a contaminação do solo e dos recursos hídricos, a perda de habitats naturais, a impermeabilização do solo e o descarte inadequado de resíduos. Esses fatores não apenas degradam o ambiente urbano, como também contribuem para a

intensificação de fenômenos como as ilhas de calor urbano (ICU) zonas em que as temperaturas são sistematicamente mais elevadas do que nas áreas rurais vizinhas (Zipperer et al., 2020; IPCC, 2021).

As ICU são especialmente comuns em grandes centros urbanos e resultam da substituição de áreas vegetadas por superfícies artificiais, como asfalto, concreto e telhados, que absorvem e armazenam grandes quantidades de radiação solar durante o dia, liberando esse calor à noite (Chakraborty e Lee, 2019; Leal Filho et al., 2021). Estudos indicam que a temperatura em áreas urbanas pode superar em 4°C nas regiões periféricas, podendo ultrapassar em 10° C no seu ápice (Santamouris, 2020).

A formação dessas ilhas de calor decorre da interação entre diversos fatores, incluindo a emissão de calor pelas atividades humanas, a morfologia urbana, as condições climáticas locais, a poluição atmosférica e, principalmente, a predominância de materiais que acumulam calor. A transformação de áreas naturais, como terrenos com vegetação e solo permeável, em superfícies urbanas como concreto, asfalto e telhados altera significativamente o comportamento térmico das cidades. Esses materiais artificiais possuem alta massa térmica e baixa refletividade, o que significa que absorvem mais calor do que superfícies naturais, como vegetação ou água, e liberam esse calor de forma gradual durante a noite. A ausência de vegetação compromete também o balanço energético local, reduzindo os processos de evapotranspiração (calor latente) e aumentando o aquecimento do solo e do ar (calor sensível) (Imran et al., 2019; Vujovic et al., 2021). Nesse sentido Qiu, Yan e Liu (2023) destacam que a ausência de vegetação altera o balanço energético local, uma vez que a evapotranspiração pode ser reduzida, sendo ele o processo responsável pela transferência de calor latente da superfície para a atmosfera. Logo, aumenta o fluxo de calor sensível, que aquece o solo e o ar. No ambiente urbano ou com ausência de cobertura vegetal, uma menor evapotranspiração aumenta as temperaturas da superfície e intensifica o fenômeno das ilhas de calor, pois uma quantidade reduzida de energia é utilizada para a evaporação da água, resultando em mais energia sendo transformada em aquecimento direto do entorno. Além disso, a impermeabilização do solo e a forma das edificações contribuem para o aprisionamento do calor, dificultando sua dissipação (Liu et al., 2020; Wang et al., 2019).

Essas alterações climáticas locais impactam diretamente o conforto térmico e a saúde da população, intensificando a evaporação do solo, reduzindo a umidade do ar e, em muitos casos, alterando o regime de chuvas. Em regiões tropicais e áridas, os efeitos das ICU são ainda mais severos, agravando doenças respiratórias e aumentando a mortalidade em períodos de calor extremo, sobretudo entre grupos vulneráveis (Ho et al., 2023).

A primeira identificação registrada de ICU foi realizada por Rao (1972), que utilizou sensores embarcados em satélites para detectar contrastes térmicos entre áreas urbanas e rurais. No contexto brasileiro, Lombardo (1985) se destacou como um dos pioneiros ao aplicar dados de sensoriamento remoto na análise do aquecimento urbano e de sua relação com os diferentes tipos de uso do solo na cidade de São Paulo. Desde então, o Brasil tem expandido o uso de tecnologias orbitais, recorrendo a sensores como o TIRS (Thermal Infrared Sensor), presente nos satélites Landsat; os sensores do CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres); e o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), instalado nos satélites Aqua e Terra, para acompanhar a ocorrência e evolução das ICU em diversas cidades do país (Dorigon e Amorim, 2019; Souto e Cohen, 2021; Monteiro

et al., 2021; Porangaba et al., 2021). Esses trabalhos têm sido essenciais para compreender as variações espaciais e temporais das temperaturas nas áreas urbanizadas e subsidiar ações públicas voltadas à mitigação dos impactos das ilhas de calor.

Campina Grande, situada no estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, consolidou-se como um importante polo industrial da região, sendo o município com a segunda maior participação na indústria estadual, representando 19,5% do setor em 2021. Esse desempenho é impulsionado principalmente pela indústria de transformação, com crescimento significativo nas unidades locais de fabricação de bebidas (100%) e produtos têxteis (5,6%), além de concentrar 52,6% das unidades locais do ramo de artefatos de couro, artigos para viagem e calçados no estado, mantendo-se estável em número de unidades em relação ao ano anterior (SEPLAG-PB/IBGE, 2021). Entre 2010 e 2022, o município registrou um expressivo crescimento populacional urbano, com acréscimo de 34.642 habitantes, o que representa um aumento de 9% (IBGE, 2023). Esse avanço urbano tem sido impulsionado pelo fortalecimento do setor industrial e pela expansão do ensino superior, fatores que atraem migrantes em busca de melhores condições de vida e trabalho. Como consequência, a cidade passou a demandar mais infraestrutura urbana, como transporte, habitação e saneamento (Grismino e Silva, 2023), provocando a substituição gradual de áreas vegetadas por superfícies construídas. Essa dinâmica tem contribuído para a intensificação das ilhas de calor urbanas e seus impactos ambientais e sanitários (Lee et al., 2019).

Este trabalho teve como foco a área urbana de Campina Grande no período de 1984 a 2020, visando os seguintes objetivos: (1) analisar os efeitos das mudanças no uso e na cobertura da terra sobre a temperatura da superfície, a biomassa verde e a umidade; (2) identificar os padrões espaciais da temperatura superficial; e (3) investigar a influência da precipitação, da temperatura do ar e da expansão urbana como possíveis preditores das variações espaço-temporais da temperatura da superfície. Para este propósito, foram levadas em conta as hipóteses a seguir: H1: nas regiões centrais da cidade de Campina Grande, as ilhas de calor urbano (ICU) têm uma intensidade mais elevada, devido à maior concentração de construções e à redução da vegetação; H2: o crescimento urbano descontrolado tem aumentado a temperatura da superfície terrestre (LST) na cidade, agravando o fenômeno das ilhas de calor urbano ao longo dos anos.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Situada na região oriental do Planalto da Borborema (Figura 1), Campina Grande apresenta um clima de transição do tipo As e BSh, sendo clima tropical quente e úmido com chuvas de inverno e clima quente semiárido, respectivamente (ALVARES et al., 2013).

Em 1697 foi fundada e em 1864 Campina Grande foi elevada à categoria de cidade, tendo um desenvolvimento sócio-econômico motivado pela implementação da malha ferroviária do Nordeste e posteriormente pelo cultivo do algodão. Atualmente a segunda maior cidade do Estado alcançando a marca de 418.140 habitantes (IBGE, 2022), sendo economicamente a mais dinâmica do interior, destacando-se nos ramos da educação e industrial.

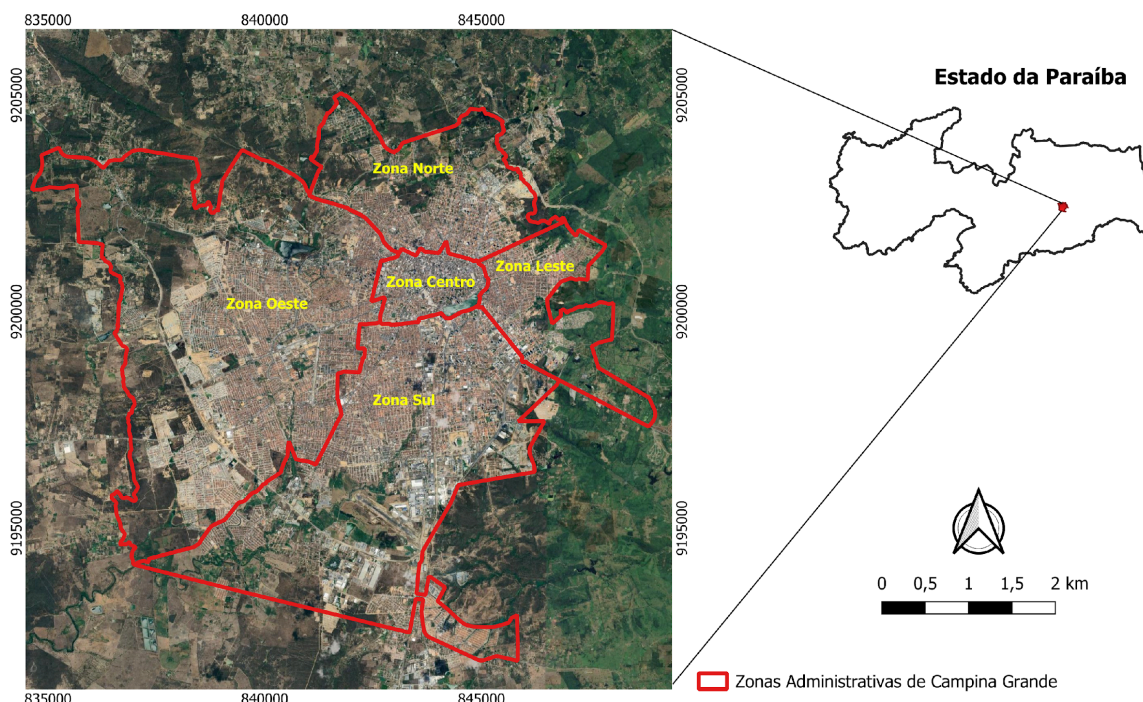


Figura 1. Localização da área urbana de Campina Grande e suas zonas administrativas.

2.2 Classificação do uso e cobertura da terra (UCT) e análise da reflectância da superfície

As mudanças espaço-temporais no uso e cobertura da terra (UCT) foram analisadas a partir da Coleção 6 do Mapbiomas (1985 a 2020), que disponibiliza mapas anuais da Paraíba com resolução espacial de 30 metros (MAPBIOMAS, 2023). A análise concentrou-se nas categorias de formação natural, pastagens e infraestruturas urbanizadas. Os dados raster foram obtidos por meio da plataforma Google Earth Engine.

Para estimar a quantidade de biomassa verde e o nível de umidade da superfície, utilizaram-se os índices NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Diferença Normalizada da Água), respectivamente. As análises foram baseadas em imagens da série Landsat com baixa cobertura de nuvens sobre Campina Grande-PB. O programa Landsat foi escolhido espacial devido à sua capacidade de fornecer dados de alta resolução temporal e espacial para análises detalhadas das mudanças ambientais, além do seu acesso aberto (Wulder et al. 2022). No total, foram empregadas dez cenas, todas da órbita/ponto 214/65, com datas de aquisição em: 10/06/1984, 10/07/1989, 11/07/1995 e 29/08/2007 (Landsat 5); 29/05/2000 (Landsat 7); e 26/04/2014, 07/11/2015, 12/11/2017, 11/08/2018 e 17/09/2020 (Landsat 8). Após o recorte das imagens para o perímetro urbano de Campina Grande e a remoção de nuvens e sombras, foi calculada a reflectância no topo da atmosfera. Para as imagens do Landsat 8, utilizou-se a equação de reflectância recomendada pelo United States Geological Survey (USGS, 2015):

$$\rho_{\lambda} = \frac{FM \times ND + FA}{\sin(\theta_{SE})}$$

em que FM representa o fator multiplicativo e FA o fator aditivo, ambos específicos para cada banda espectral e disponíveis no arquivo de metadados da respectiva imagem. Já θ_{SE} refere-se ao ângulo de elevação solar (sun elevation), expresso em graus, o qual indica a posição do Sol acima do horizonte no instante em que a imagem foi capturada.

Para os dados obtidos pelos sensores dos satélites Landsat 5 e 7, foi necessário realizar a conversão dos valores de número digital (ND) de cada pixel em radiância espectral monocromática ($L_{\lambda,i}$, expressa em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), conforme a equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND$$

Nessa equação, a e b representam os coeficientes de calibração disponíveis nos arquivos de metadados das imagens, correspondendo respectivamente às radiâncias espectrais mínima e máxima (em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$). ND refere-se ao valor digital do pixel (variando entre 0 e 255), enquanto i indica as bandas dos sensores TM e ETM+ dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente.

Em seguida, a refletância nas imagens dos Landsat 5 e 7 foi estimada por meio da equação proposta por Chander e Markham (2003):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta \cdot dr}$$

em que $L_{\lambda i}$ representa a radiância espectral da banda analisada, enquanto $ESUN_{\lambda}$ corresponde à irradiância solar espectral no topo da atmosfera ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$). O ângulo θ refere-se ao ângulo zenital solar, calculado a partir do ângulo de elevação solar (θ_{SE}) por meio da fórmula $\theta = 90^\circ - \theta_{SE}$, sendo esse valor obtido diretamente no arquivo de metadados da imagem. O termo dr representa o inverso do quadrado da distância relativa entre a Terra e o Sol para o dia da aquisição da imagem (DSA), variando entre 0,97 e 1,03, sendo uma grandeza adimensional.

O NDVI foi calculado utilizando a razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e da banda do vermelho (ρ_V) pela soma dessas duas refletâncias (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v}$$

O NDWI foi obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do infravermelho médio (ρ_{IVM}) e a soma de ambos (Gao, 1996):

$$NDWI = \frac{\rho_{iv} - \rho_{ivm}}{\rho_{ivm} + \rho_{iv}}$$

2.3 Temperatura da superfície - TS

Para determinar a temperatura da superfície (TS) nas áreas urbanas, foram utilizadas as bandas de infravermelho térmico dos sensores da série do Landsat: banda 6 do TM e ETM+ Landsat 5 e 7 (120 e 60 metros de resolução espacial, respectivamente) e banda 10 do TIRS Landsat 8 (100 metros de resolução espacial).

Converteu-se os ND de cada pixel da banda termal em radiância espectral monocromática, como explicado acima. Para as imagens do Landsat 8, a fórmula é diferente:

$$L_{\lambda i} = M_i \times ND + A_i$$

onde, M_i é o fator multiplicativo da banda específica (RADIANCE_MULT_BAND_i) e A_i o fator aditivo (RADIANCE_ADD_BAND_i), existentes no ficheiro de metadados da imagem (USGS, 2015).

Posteriormente, realizou-se a conversão da radiancia para a temperatura de brilho (TB):

$$TB (^{\circ}C) = (K2/\ln((K1/L_{\lambda i})+1)) - 273,15$$

onde, $K1$ e $K2$ são as constantes de conversão termal da banda específica, disponível no ficheiro de metadados.

Por fim, calculou-se a temperatura da superfície, segundo a equação:

$$Ts = (TB / (1+(0.00115 * TB / 1.4388)*\ln(\epsilon)))$$

onde ϵ é a emissividade calculada a partir da proporção da vegetação (P_v):

$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

$$P_v = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2$$

2.4 Dados de temperatura do ar e precipitação

As informações de temperatura do ar foram obtidas por meio da plataforma Climate Engine.org, utilizando-se os dados diários do modelo ERA5 AG, com resolução espacial de 9,6 km. Esses dados são derivados das estimativas horárias produzidas pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF ERA5), ao nível da superfície. Considerou-se a temperatura média do dia correspondente à data do imageamento. Diversos estudos já validaram a confiabilidade desses dados em diferentes regiões do mundo (Velikou et al., 2022; Yilmaz, 2023; Choudhury et al., 2023).

As informações sobre precipitação também foram extraídas do Climate Engine.org, por meio do produto CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations), que oferece estimativas diárias com resolução de 4 km. Para esta análise, foi utilizado o total acumulado de chuva nos 180 dias anteriores ao imageamento, como forma de representar melhor as condições de umidade do

ambiente. A acurácia dos dados do CHIRPS já foi amplamente testada e comparada com outras fontes, apresentando bons resultados (Popovych e Dunaieva, 2021).

2.5 Análise estatística

O teste de Mann-Kendall foi utilizado para identificar tendências monotônicas na série temporal de 1985 a 2020, envolvendo variáveis como TS, NDVI e NDWI e áreas de cobertura natural, pastagem e infraestruturas urbanas em Campina Grande. Este teste é amplamente utilizado para detectar tendências em séries temporais ambientais e climáticas, sendo não paramétrico e robusto a diferentes distribuições de dados (Hamed e Rao, 1998).

Para capturar a variabilidade espacial de Campina Grande, permitindo detectar padrões locais, optou-se por criar uma grade com 28 quadrículas de 1,5 km sobre o polígono da área urbana de Campina Grande, tamanho adequado para a variabilidade de usos e cobertura observada na classificação do MAPBIOMAS, e assim evitar a ocorrência de classificações sem representação nas quadrículas, o que poderia causar um enviesamento nas análises estatísticas. A média simples de toda a área poderia mascarar variações locais e favorecer o surgimento de *outliers* que podem distorcer a média geral da área. As análises descritas a seguir, de correlação e regressão, usaram as médias zonais das variáveis analisadas de cada uma das 28 quadrículas ($N=28 \text{ quadrículas} \times 10 \text{ imagens} = 280$).

Com o objetivo de analisar a intensidade e a direção da relação entre o crescimento das infraestruturas artificiais (variável preditora) e as variações observadas na TS, NDVI e NDWI (variáveis respostas), aplicou-se a correlação de Spearman, uma vez que os dados não apresentaram distribuição normal, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk. Para estimar o impacto da variável preditora sobre cada uma das variáveis respostas, foi empregado o modelo de regressão aditiva generalizada (GAM), que oferece maior flexibilidade ao permitir o ajuste de relações não lineares por meio de funções suavizadas, sem exigir pressupostos rígidos sobre a distribuição dos resíduos.

Para entender os fatores que influenciam a variação da TS em Campina Grande, foi realizada uma regressão linear múltipla, considerando como variáveis preditoras a temperatura do ar, a precipitação (acumulado de 180 dias) e a área de infraestrutura urbana. Devido à resolução espacial relativamente baixa dos dados climáticos (4 e 9,6 km), não foi possível utilizar a abordagem por grade, resultando em um número de observações igual a 10 ($N=10$). Para garantir a validade do modelo, foram verificados os pressupostos da regressão linear: a normalidade dos resíduos foi testada com o teste de Shapiro-Wilk; a presença de outliers nos resíduos foi avaliada visualmente; a independência dos resíduos foi checada pelo teste de Durbin-Watson; e a homocedasticidade, pelo teste de Breusch-Pagan. A multicolinearidade entre as variáveis explicativas foi analisada por meio do fator de inflação da variância (VIF). Por fim, os coeficientes padronizados foram extraídos para identificar qual das variáveis preditoras teve maior peso na explicação da TS.

Todas as imagens foram processadas utilizando o software QGIS, versão 3.28.1-Firenze. O processamento estatístico foi conduzido no RStudio, versão 1.1.453.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo dos 36 anos em análise, verificou-se uma tendência significativa de aumento da TS e infraestrutura urbana (Mann-Kendall: valor-p 0,02 e $<0,0001$, respectivamente), estes achados indicam que ocorreu um aumento constante da temperatura na região urbana de Campina Grande, possivelmente causado pelo aumento da ocupação do solo e pela troca de áreas de vegetação por superfícies impermeáveis e construções, argumentos que são abordados por Chapman et al. (2017). Por outro lado, constatou-se uma tendência significativa de diminuição de NDVI, NDWI, pastagem e cobertura natural (Mann-Kendall: valor-p 0,01, 0,007, 0,0003 e 0,02, respectivamente), esses resultados podem ser explicados por Taylor, Spracklen e Arnold (2012), onde explicam que a vegetação afeta os padrões de precipitação ao mediar os fluxos de umidade e energia entre a superfície e a atmosfera. (Anexo 1).

A modelagem temporal do NDVI espacializada na área urbana de Campina Grande torna evidente significativas mudanças na densidade da cobertura vegetal para o intervalo de 36 anos em análise (Figura 2). Até o ano de 2000, os menores valores de NDVI, que correspondem a menor quantidade de biomassa verde, se concentravam principalmente na Zona Centro da cidade. Nos anos posteriores, os menores valores de NDVI se espalharam na direção sudoeste, ocupando os bairros da Zona Oeste e Sul da cidade. Em relação às médias espaciais (Figura 3) nota-se um decréscimo considerável dos valores até 2015-2017 e, nas últimas duas imagens, um leve aumento.

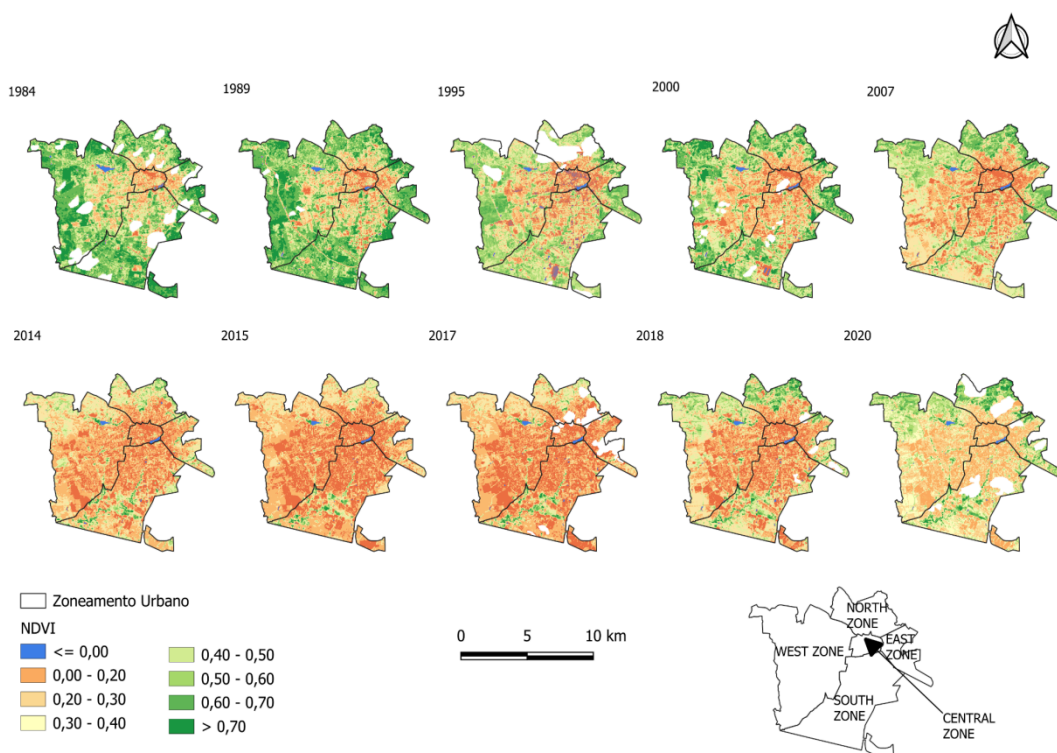


Figura 2. Modelagem espaço-temporal do NDVI na área urbana de Campina Grande, com a limitação dos bairros da cidade. Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

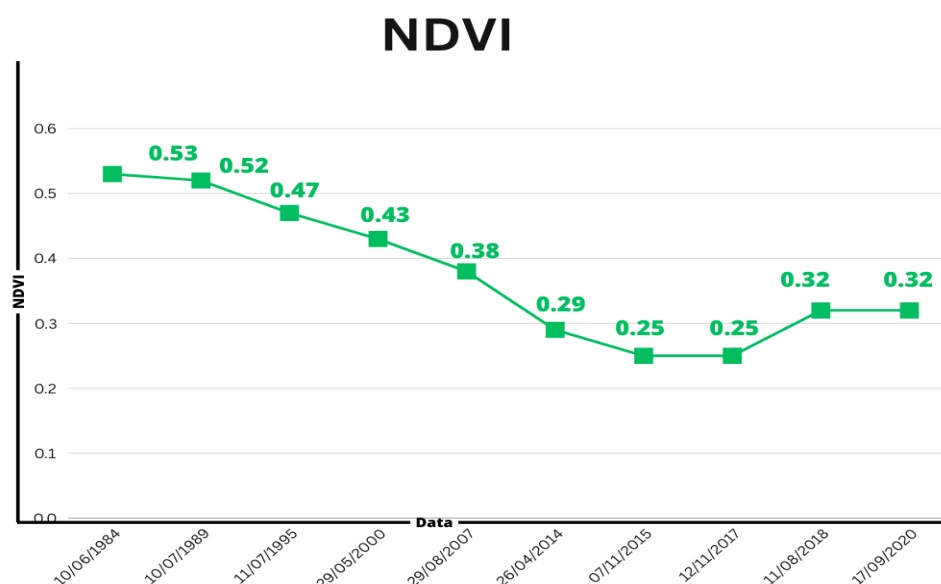


Figura 3. Médias zonais do índice de vegetação da diferença normalizada em cada ano analisado na área urbana de Campina Grande. Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

O NDWI apresentou comportamento semelhante ao NDVI (Figuras 4 e 5). Portanto, observa-se uma clara substituição da vegetação natural e dos pastos por infraestruturas urbanas ao longo das últimas décadas na área urbana de Campina Grande, justificando a diminuição evidente da biomassa verde. Esse aumento das infraestruturas urbanas e consequente impermeabilização do solo, resulta em diminuição de água armazenada nas esferas solo-vegetação, justificando a diminuição da umidade no sistema. A permeabilidade dos solos urbanos depende de fatores como textura, estrutura, profundidade e teor de matéria orgânica, que influenciam sua capacidade de armazenamento de água. A infiltração superficial diminui com a redução da cobertura vegetal e o aumento da impermeabilização. Isso reduz a evapotranspiração e aumenta o escoamento superficial, elevando as temperaturas urbanas e o risco de enchentes. Assim, a impermeabilização do solo compromete a absorção de água e afeta os microclimas urbanos (OLIVEIRA; SALLES, 2020, p. 4).

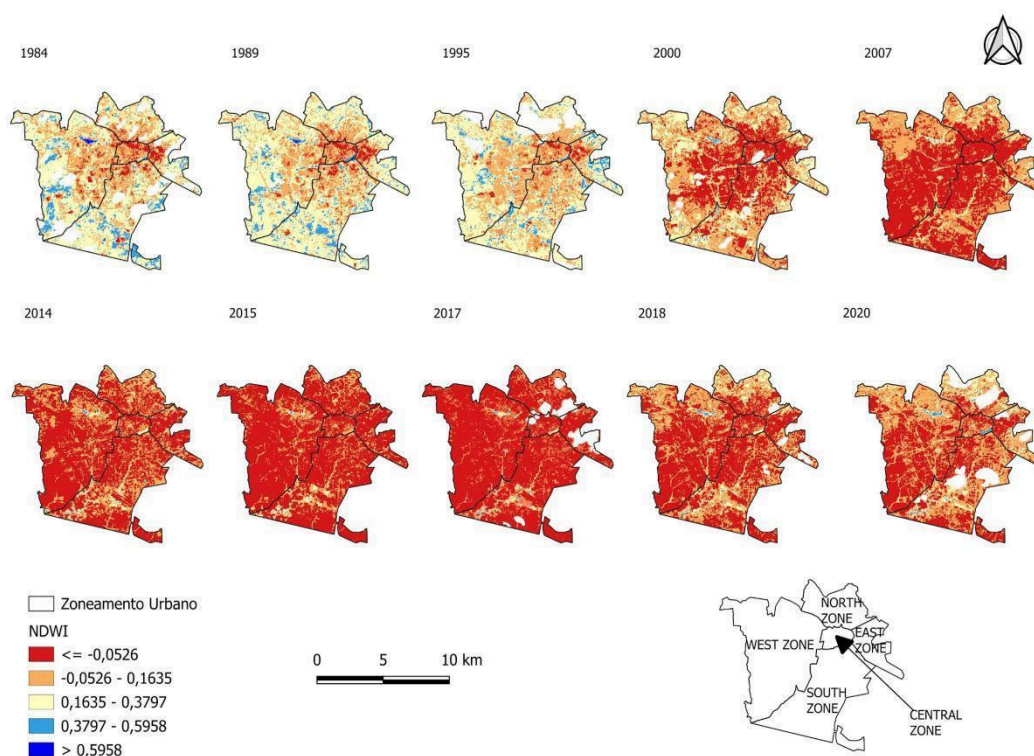


Figura 4. Modelagem espaço-temporal do NDWI na área urbana de Campina Grande, com a limitação dos bairros da cidade. Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

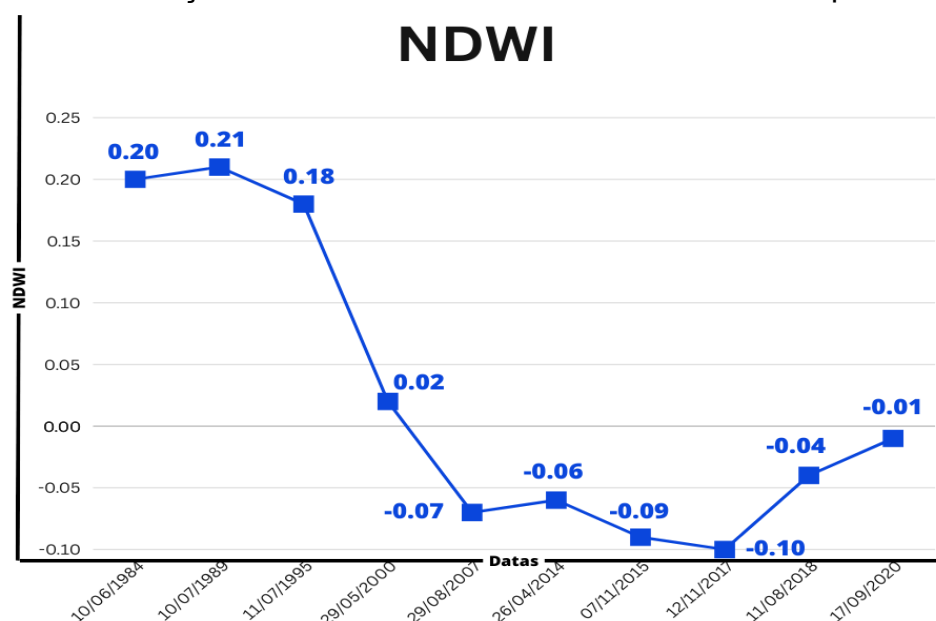


Figura 5. Médias zonais do índice de umidade da diferença normalizada em cada ano analisado na área urbana de Campina Grande. Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Na modelagem temporal da temperatura da superfície espacializada na cidade (Figura 6), as áreas com maior NDVI, ou seja, com mais cobertura vegetal, apresentam temperaturas de superfície mais baixas. Por outro lado, no centro urbano, onde há maior concentração de superfícies asfaltadas e de concreto, a temperatura da superfície é mais elevada. Esse comportamento é esperado, pois as infraestruturas urbanas, como telhados, pavimentos e calçadas, são compostas por

materiais pouco reflexivos e de baixo albedo, o que faz com que acumulem mais energia. Essa energia é então liberada na forma de calor tanto no fluxo de calor sensível do ar quanto no solo, elevando as temperaturas e intensificando o efeito das ICU (TAHA, 1997).

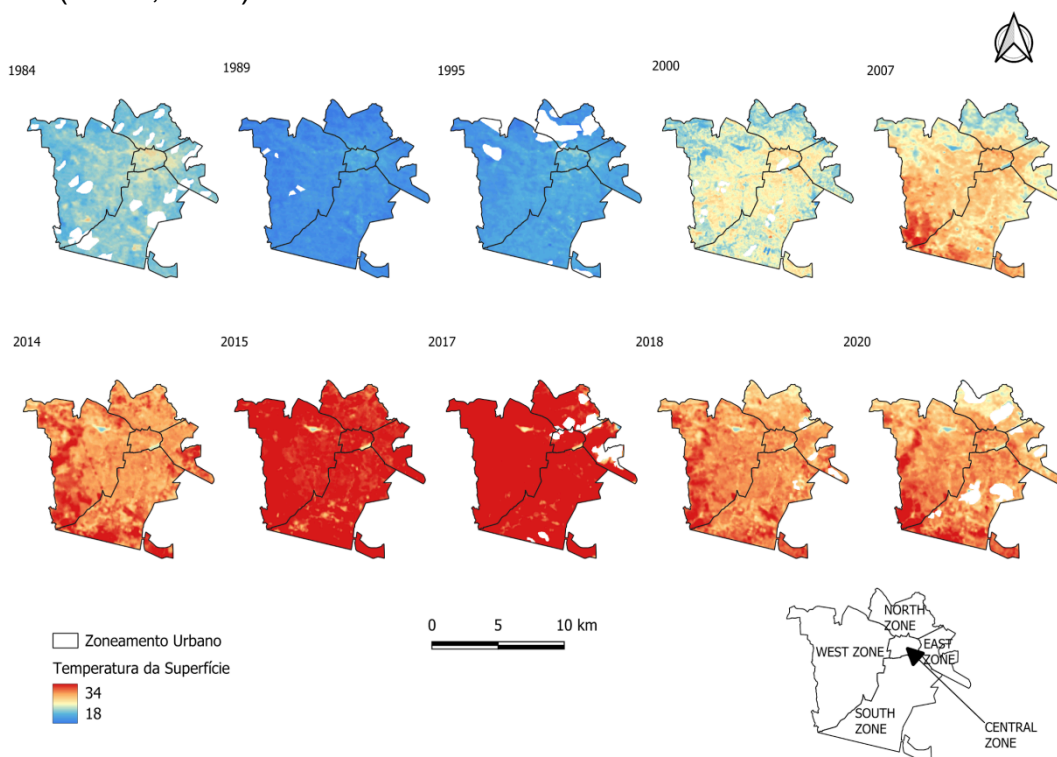


Figura 6. Modelagem espaço-temporal da temperatura da superfície (°C), na área urbana de Campina Grande, com a limitação dos bairros da cidade. Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Com o avanço da urbanização e a consequente substituição de áreas naturais, como formações savânicas e campestres, e pastagens por infraestruturas artificiais, observou-se um aumento gradual das temperaturas, atingindo 35,8 °C em 2017 (Figuras 6 e 7), resultados confirmados com Imran et al. 2022 onde aponta que a intensa urbanização altera o microclima e a ecologia das cidades ao converter superfícies naturalmente vegetadas e permeáveis em superfícies impermeáveis construídas. Essas superfícies artificiais impermeáveis reequilibram o balanço energético da superfície ao armazenar calor solar devido à sua maior condutividade térmica e, conseqüentemente, elevam a Temperatura da Superfície Terrestre (LST).

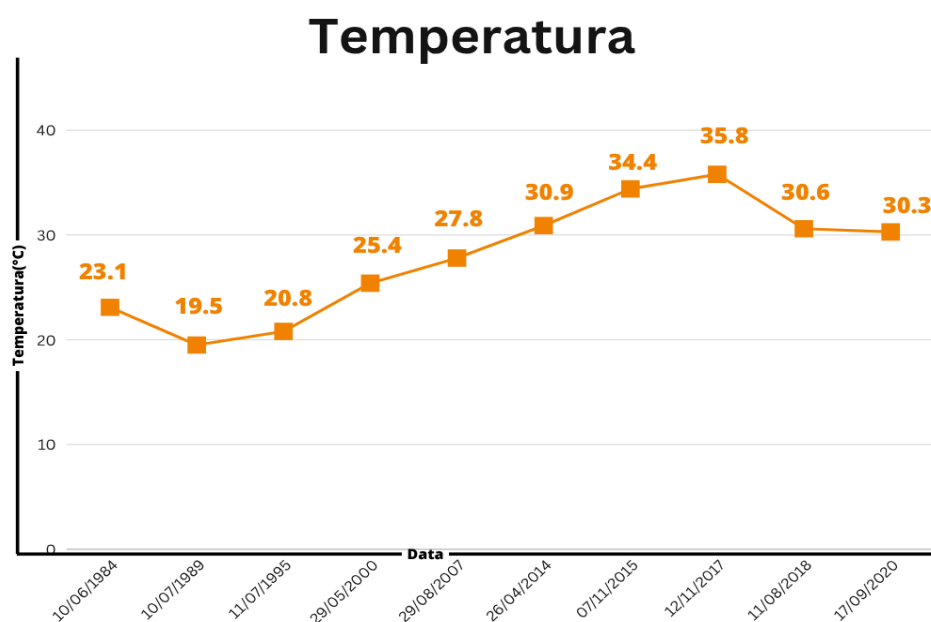


Figura 7. Médias zonais da temperatura da superfície (°C) em cada ano analisado na área urbana de Campina Grande. Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Até o ano 2000, as ICU encontravam-se concentradas predominantemente na Zona Central de Campina Grande. Posteriormente, observa-se que as regiões com maior acúmulo de calor migraram em direção ao sudoeste da cidade, abrangendo principalmente as Zonas Oeste e Sul. Esse deslocamento pode estar associado às limitações impostas pelo relevo acidentado ao norte, que atua como barreira natural à expansão urbana. Além disso, há uma tendência crescente de conurbação física entre Campina Grande e os municípios vizinhos de Lagoa Seca e Queimadas (Gurgel, 2017), o que reforça a pressão sobre essas áreas periféricas.

Particularmente, a porção sudoeste da cidade vem se expandindo em direção à zona rural, favorecida pela maior disponibilidade de espaço para novos empreendimentos, o que tem atraído a atenção do setor imobiliário. Nessa região, destaca-se a presença significativa de solo exposto, o que pode explicar os valores elevados de temperatura observados. Embora geralmente as áreas de solo descoberto apresentem temperaturas inferiores às de regiões densamente edificadas, fatores como a coloração e a composição do solo podem reduzir seu albedo, aumentando a absorção da radiação solar. Além disso, solos com baixa condutividade térmica tendem a reter mais calor na superfície, promovendo o aquecimento do solo e da atmosfera próxima. Dessa forma, mesmo sendo predominantemente residencial e afastada do centro urbano, essa região apresentou os maiores registros de temperatura da cidade. A realidade é que não existe uma tendência de crescimento uniforme nas cidades do Brasil, onde o padrão radial típico de cidades planejadas é raro, com exceção das capitais Aracaju-SE, Boa Vista-RO e o Distrito Federal-Capital do Brasil. No entanto, ao longo do tempo, essa característica radial está se transformando e perdendo suas características de planejamento (Bianchi, 2021; Posca, 2022).

Ao analisarem a evolução da temperatura e da formação de ilhas de calor na cidade do Crato-CE entre os anos de 1995 e 2019, Silva et al. (2024) identificaram um padrão semelhante ao observado em outras cidades brasileiras: o aumento da temperatura acompanha a expansão urbana e a consequente substituição da

cobertura vegetal por áreas construídas. Segundo os autores, esse aquecimento estava inicialmente concentrado no centro da cidade, mas, com o passar dos anos, foi se expandindo para as regiões onde o crescimento urbano se intensificou.

Além do uso predominante de materiais urbanos com baixo albedo, a supressão da vegetação contribui significativamente para o desequilíbrio energético nas cidades. Segundo Nuruzzaman (2015), essa alteração reduz a taxa de evapotranspiração e o fluxo latente, comprometendo a eficiência do sistema natural de resfriamento urbano e, por consequência, elevando as temperaturas da superfície. Em outras palavras, a menor presença de vegetação e umidade implica em uma menor parcela do saldo de radiação direcionada aos processos evapotranspirativos, concentrando-se, portanto, nas componentes sensível e do solo, que aquecem o ar e o solo.

A substituição de áreas vegetadas por estruturas urbanas é uma realidade nas cidades brasileiras, especialmente para fins habitacionais. Exemplos dessa dinâmica urbana podem ser observados em Belo Horizonte (MG), Teresina (PI), Marabá (PA) e Recife (PE), onde a expansão urbana tem avançado sobre áreas verdes (Paes e Garcia, 2022; Silva, Loureiro e Souza, 2021; Santos et al., 2023).

Outro ponto observado foi o leve aumento do NDVI e NDWI e a redução das temperaturas nas imagens mais recentes (2018 e 2020), o que pode estar associado a maiores índices pluviométricos registrados nesses anos, influenciados pelo fenômeno La Niña e que impulsionou a formação de maior biomassa verde, assim como no estudo de Nogueira, Pereira, Gomes e Rocha (2019) foi possível observar que, em 2018, houve um aumento no NDVI e na umidade do solo, atribuídos à atuação de uma La Niña fraca, o que contribuiu para melhorias nas condições ambientais e na disponibilidade hídrica na região de Coremas. De acordo com o relatório NOAA (2024), os anos de 2018 e 2020 foram anos de La Niña fraco a moderado. Começando em 2020, ocorreu o chamado “episódio triplo”, causado principalmente pela atuação dos Modos Meridionais do Pacífico Norte e Sul em fase consecutiva negativa, que intensificaram as interações tropicais-extratropicais, promovendo anomalias negativas de temperatura da superfície do mar e ventos alísios mais fortes no Pacífico equatorial (Shi et al., 2023).

Os elevados valores de TS na imagem de 1984, quando comparado com 1989 e 1995, possivelmente resultam do anômalo fenômeno El Niño de 1982-1983, categorizado como muito forte pelo Índice Oceânico de Niño (ONI) (NOAA, 2024). Esse evento foi chamado de “El Niño do século” (Glantz, 2002) originando desastres naturais intensos em diversas partes do globo (Philander, 1983), como graves secas no Nordeste brasileiro (Campos, 2009; Rocha e Leite, 2020).

Os resultados da correlação de Spearman (Tabela 1) apontam associações altamente significativas entre o aumento das áreas de infraestrutura urbana e as demais variáveis analisadas (TS, NDVI e NDWI). As correlações negativas com NDVI e NDWI revelam que as regiões mais urbanizadas tendem a apresentar menor cobertura vegetal e umidade como resultado da transformação de áreas naturais em áreas impermeáveis, isso modifica os processos eco hidrológicos e diminui a evapotranspiração, contribuindo para o aumento da temperatura do solo e a aparição do fenômeno das ilhas de calor (HAO et al., 2018).

Os resultados do modelo de regressão aditiva generalizada (GAM) reforçam esses achados, demonstrando relações não lineares significativas entre o crescimento da infraestrutura urbana e as variáveis ambientais analisadas. A urbanização explica uma parcela substancial da variabilidade observada na

temperatura de superfície, na biomassa verde e na umidade (Tabela 1), evidenciando seu impacto direto sobre a dinâmica ambiental urbana.

Tabela 1. Resultados da análise de correlação de Spearman (ρ) e valor de p (significância) e do modelo de regressão aditiva generalizada (R^2 Ajustado, desvio explicado e valor de p) para os pares de variáveis área de infraestrutura urbana (Urbano: variável independente) e temperatura da superfície (TS), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) índice de umidade (NDWI) e índice de construção (BU).

Variáveis	Análise de Correlação de Spearman		Modelo de Regressão Aditiva Generalizada		
	Rho	Valor p	R^2 Ajustado	Desvio explicado (%)	Valor p
Urbano - TS	0,477	$P < 0,001$	0,377	39,3	$P < 0,001$
Urbano - NDVI	-0,816	$P < 0,001$	0,763	76,9	$P < 0,001$
Urbano - NDWI	-0,724	$P < 0,001$	0,716	72,3	$P < 0,001$

$P < 0,001$ Altamente significativo

Ao investigarem a relação entre as ilhas de calor urbanas (ICU) e o uso e ocupação do solo em João Pessoa, no período de 2013 a 2022, Medeiros et al. (2023) identificaram uma correlação inversa entre o NDVI e a TS. Utilizando o coeficiente de correlação de Pearson, os autores observaram que, à medida que a TS aumenta, os valores de NDVI diminuem, refletindo uma relação negativa com coeficientes r variando entre -0,8 e -0,6, dependendo da zona da cidade analisada. Esses resultados reforçam a ideia de que a remoção da cobertura vegetal está diretamente associada ao aumento das temperaturas superficiais.

Ao se analisar a relação entre a presença de infraestrutura urbana e a temperatura da superfície, observou-se que, embora haja uma correlação significativa, $R^2 = 0,377$, esse baixo valor sugere que outros fatores devem também contribuir para a variação da TS. Zhang et al. (2020) confirmam essa restrição, mostrando que a influência das superfícies impermeáveis na temperatura da superfície muda de acordo com o ambiente climático e a escala espacial. Eles sugerem a incorporação de variáveis climáticas extras, como a temperatura do ar e a precipitação, para uma compreensão mais aprofundada dos padrões observados. Portanto, conduziu-se uma análise de regressão linear múltipla, levando em conta o impacto adicional dessas variáveis ambientais. Diante disso, foi realizada uma análise de regressão linear múltipla, considerando a influência adicional da temperatura do ar e da precipitação acumulada nos 180 dias anteriores ao imageamento.

Os resultados indicaram que, entre as variáveis independentes consideradas, apenas a área de infraestrutura urbana apresentou um efeito estatisticamente significativo sobre a TS. O modelo geral mostrou-se significativo e explicou uma parcela substancial da variação da temperatura da superfície ($R^2 = 0,79$), evidenciando a importância da urbanização como fator determinante no aumento das temperaturas em áreas urbanas, de acordo com Wicki & Parlow (2017) chegaram a conclusões parecidas ao utilizar regressão linear múltipla para analisar dados de temperatura de superfície e uso do solo em contexto urbano. Eles descobriram que a proporção de área urbanizada é um dos principais fatores para o

crescimento da TS, com modelos que alcançam valores elevados de R^2 e coeficientes estatisticamente significativos para variáveis da cidade.

A análise dos coeficientes padronizados reforça essa conclusão: a variável “Infraestrutura Urbana” foi a mais influente no modelo, seguida pela temperatura média do ar, enquanto a precipitação acumulada teve o menor impacto, com efeito negativo. Esses resultados confirmam que o processo de urbanização tem um peso considerável na elevação das temperaturas de superfície, enquanto fatores climáticos, como a precipitação, têm um papel secundário, embora ainda relevante.

Tabela 2. Estatísticas da regressão linear múltipla para a variável dependente temperatura da superfície (TS)

Variável	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	Valor p	Coef. Padronizado
Intercepto	-3,9852	20.5380	-0.194	0.8525	N/A
Precipitação (180 dias)	-0.0131	0.0119	-1.098	0.3143	-0.237
Temperatura do ar	1.2727	0.7764	1.639	0.1523	0.330
Infraestrutura Urbana	0.0016	0.0005	3.306	0.0163*	0.574
Estatística do modelo					Valor
R² Ajustado					0.794
Desvio Padrão dos Resíduos					2.499
F-statistic					12.59
P-value (F-statistic)					0.005*

* Significativo

Resultados semelhantes foram observados por Amorim, Dubreuil e Cardoso (2015), que modelaram espacialmente a ilha de calor urbana em Presidente Prudente – SP. Os autores identificaram uma forte correlação entre a temperatura da superfície (TS) e as classes de uso da terra, especialmente a classe correspondente a áreas construídas, com um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,74$. De maneira análoga, Silveira et al. (2023), ao analisarem as cidades de Joinville, Criciúma e Lages, em Santa Catarina, verificaram que as ilhas de calor se formam principalmente em regiões com altos índices de densidade urbana e baixos valores de NDVI. Esses achados reforçam que a supressão da vegetação em favor da expansão urbana está diretamente associada ao aumento da TS e à intensificação das ICU.

Diante do cenário evidenciado em Campina Grande-PB, uma das estratégias recomendadas seria a reformulação do plano diretor do município, incorporando diretrizes voltadas para o enfrentamento das mudanças climáticas. Isso inclui a criação e ampliação de áreas verdes, como parques e praças arborizadas através da plantação adequada de árvores nas vias, tanto em áreas residenciais quanto comerciais, é essencial, pois é nesses locais que a população passa a maior parte do dia, contribuindo para a regulação térmica urbana, conforme a pesquisa conduzida por Silva e Ferreira (2022), a vegetação tem um papel crucial na atenuação das Ilhas de Calor Urbana através de vários mecanismos. Ela funciona como um mecanismo de regulação da temperatura do ar, absorvendo e refletindo a radiação solar, além de proporcionar sombra que minimiza a exposição direta à

radiação em zonas urbanas. Além disso, a capacidade das plantas de transpirar eleva a umidade do ar, auxiliando de maneira significativa na redução da temperatura do ambiente e favorecendo um microclima mais agradável. Esses processos em conjunto contribuem para a diminuição do impacto das Ilhas de Calor, aprimorando as condições ambientais em zonas urbanas, particularmente quando aplicados em projetos de arborização e preservação de áreas verdes. Outra medida promissora seria a adoção do Imposto Predial e Territorial Urbano Verde (IPTU Verde). Segundo Silva e Oliveira (2024), esse instrumento estimula práticas ambientalmente sustentáveis, como a instalação de telhados verdes – que ajudam a absorver o calor e reduzir a temperatura – e oferece incentivos fiscais, como descontos no IPTU para imóveis que adotarem tais soluções.

4 CONCLUSÃO

A finalidade desta pesquisa foi analisar os efeitos das mudanças no uso e na cobertura do solo na temperatura da superfície, na biomassa verde e na umidade em Campina Grande, no período de 1984 a 2020. Os achados indicaram uma tendência significativamente maior de elevação da temperatura da superfície e expansão da infraestrutura urbana, como evidenciado pelo teste de Mann-Kendall. Estes dados indicam que a urbanização é o principal impulsionador do aquecimento local, possivelmente ligado à troca de áreas de vegetação por superfícies impermeáveis. Adicionalmente, observou-se uma redução significativa nos índices de vegetação (NDVI), umidade (NDWI), pastagens e cobertura natural, o que reflete a diminuição de vegetação e umidade, elementos que impactam diretamente os padrões de chuva e o balanço energético regional.

O segundo objetivo, que visava determinar os padrões espaciais da temperatura superficial, mostrou que, ao contrário da hipótese H1, as maiores intensidades das ilhas de calor urbanas não se encontram nas áreas centrais da cidade, mas sim na parte sudoeste. Esta descoberta sugere que a dinâmica das ilhas de calor urbanas está ligada ao desenvolvimento e às particularidades das regiões em crescimento, e não somente à densidade de construção do núcleo urbano. Neste cenário, a transferência das ICU para as zonas Sul e Oeste, repletas de áreas de loteamento e residências, intensifica o impacto da expansão urbana nesses padrões de temperatura. Os materiais refletivos empregados em concretos e materiais cimentícios englobam pigmentos brancos, tais como o dióxido de titânio (TiO₂), vidro de resíduos e aditivos que contêm esferas de vidro ou prismas, que favorecem a reflexão da luz solar. Esses elementos contribuem para diminuir consideravelmente a absorção de calor pelas superfícies edificadas, auxiliando na mitigação dos impactos das ilhas de calor nas cidades e promovendo espaços urbanos mais sustentáveis.

Por fim, o terceiro objetivo, que analisou o impacto da chuva, temperatura do ar e crescimento urbano como indicadores das variações espaço-temporais da temperatura da superfície, confirmou a hipótese H2. A avaliação da regressão linear múltipla revelou que a área de infraestrutura urbana teve o efeito estatisticamente mais relevante na TS, explicando 79% da variação observada ($R^2 = 0,79$), enquanto as variáveis climáticas tiveram um impacto secundário. Estes achados destacam que a expansão urbana descontrolada tem intensificado o fenômeno das ilhas de calor em Campina Grande.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2020.
- AMORIM, M. C. T. Climatologia e gestão do espaço urbano. Mercator - Revista de Geografia da UFC, v. 9, n. 1, p. 71-90, 2010. Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273620609006>.
- Bianchi, R., 2021. Estudo de caso: percurso histórico – investigativo sobre o DNA. Revista Mimesis 42, 92-123.
- CAMPOS, N. A., 2009. A grande seca de 1979 a 1983: um estudo de caso das ações do governo federal em duas sub-regiões do estado do Ceará (Sertão Central e Sertão dos Inhamuns). Teoria & Pesquisa Revista de Ciência Política 1, 133-166.
- CAVALCANTE, Z. V.; SILVA, M. L. S. A importância da Revolução Industrial no mundo da tecnologia. In: **ANAIIS DO VIII ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR**. Maringá: Centro Universitário de Maringá, 2011. ISBN 978-85-8084-055-1.
- CHAKRABORTY, T., LEE, X., 2019. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 74, 269–280.
- CHAPMAN, S.; WATSON, J.; SALAZAR, Á.; THATCHER, M.; McALPINE, C. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. Landscape Ecology, v. 32, p. 1921-1935, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>.
- CHOUDDHURY, D., NISHANT, N., VIRGILIO, G., 2023. Evaluation of ERA5-Simulated Temperature and Its Extremes for Australia. Atmosphere 14, 913. <https://doi.org/10.3390/atmos14060913>.
- DORIGON, L. P., AMORIM, M. C. C. T., 2019. Spatial modelling of an urban Brazilian heat island in a tropical continental climate. Urban Climate 28, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100461>
- DORIGON, L. P.; AMORIM, M. C. C. T. Variabilidade espacial da temperatura do ar com uso de transectos móveis em Jundiaí/SP. Revista Brasileira de Climatologia, v.

16, n. 27, p. 349-367, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/73202>.

FONSECA, W. L.; FONSECA, W. J. L.; OLIVEIRA, A. M. D.; VOGADO, G. M.; SOUSA, G. G. T.; SOUSA, T. D. O.; LUZ, C. S. Causas e consequências do êxodo rural no nordeste brasileiro. *Nucleus*, v. 12, n. 1, p. 233-240, 2015.

GLANTZ, M. H., 2002. *La Niña and Its Impacts: Facts and Speculation*. United Nations University Press.

GRISMINO, M. H. V., SILVA, W. P., 2023. Metodologia para avaliação dos impactos socioespaciais da expansão urbana: um estudo de caso na cidade de Campina Grande-PB. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional* 19, 508-528. <https://orcid.org/0000-0001-6000-4458>

GURGEL, A. P. C., 2017. As metrópoles do interior do Nordeste: a caracterização de um tipo metropolitano regional. *Cadernos Metrópole* 19, 841-864. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2017-4007>

HAMED, K. H., RAO, A.R., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204, 1-4, 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)

HAO, L.; HUANG, X.; QIN, M.; LIU, Y.; LI, W.; SUN, G. Ecohydrological processes explain urban dry island effects in a wet region, Southern China. *Water Resources Research*, v. 54, n. 9, p. 7004–7018, 2018. DOI: 10.1029/2018WR023002.

HO, J. Y.; SHI, Y., LAU, K. K. L., NG, E. Y. Y., REN, C., GOGGINS, W.B., 2023. Urban heat island effect-related mortality under extreme heat and non-extreme heat scenarios: A 2010–2019 case study in Hong Kong. *Science of the total environment* 858, 159791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159791>

IBGE – **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. Censo demográfico 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>.

IMRAN, H. M., KALA, J., Ng, A. W. M., MUTHUKUMARAN, S., 2019. Impacts of future urban expansion on urban heat island effects during heatwave events in the city of Melbourne in southeast Australia. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 145, 2586–2602. <https://doi.org/10.1002/qj.3580>

IMRAN, H. M.; HOSSAIN, A.; SHAMMAS, M. I.; DAS, M. K.; ISLAM, M. R.; RAHMAN, K. Land surface temperature and human thermal comfort responses to land use dynamics in Chittagong city of Bangladesh. *International Journal of Environmental Health Research*, v. 32, n. 12, p. 2283–2312, 2022. DOI: 10.1080/19475705.2022.2114384.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

LEAL FILHO, W., WOLF, F., CASTRO-DÍAZ, R., Li, C., OJEH, V. N., GUTIERREZ, N. ... BOENECKE, J., 2021. Addressing the Urban Heat Islands Effect: A Cross-Country Assessment of the Role of Green Infrastructure. Sustainability 13.

LEE, K., KIM, Y., SUNG, H. C., RYU, J., & JEON, S. W., 2019. Trend Analysis of Urban Heat Island Intensity According to Urban Area Change in Asian Mega Cities. Sustainability 12, 112. <https://doi.org/10.3390/su12010112>

LIU, Y., LI, T., YU, L., 2020. Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. Journal of Cleaner Production 244, 118938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>

LOMBARDO, M. A., 1985. Ilha de calor nas metrópoles o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec.

MEDEIROS, M., PATRIOTA, E., SILVA, L., COELHO, V., 2023. A relação entre ilhas de calor urbana superficial, ocupação do solo e conforto térmico: um estudo da cidade de João Pessoa, Brasil. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído 17, 1-10. <https://doi.org/10.46421/encac.v17i1.3756>

MONTEIRO, F. F., GONÇALVES, W.A., ANDRADE, L. M. B., VILLAVICENCIO, L. M. M., Silva, C. M. S., 2021. Assessment of urban heat island in Brazil based on MODIS remote sensing data. Urban Climate 35, 100726. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100726>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2024. El Niño and La Niña Years and Intensities, Based on Oceanic Niño Index (ONI). Disponível em: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.

Nogueira, V. F. B., Pereira, J. D. A., Gomes, F., & Rocha, D. S. (2019). Mapeamento da temperatura da superfície e do índice de vegetação em anos de El Niño/La Niña no município de Coremas-PB. Revista Científica, (p. 13-14).

NURUZZAMAN, M.D., 2015 Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, v. 3, n. 2, p. 67-73, 2015. DOI: 10.11648/j.ijema.20150302.15.

OLIVEIRA, Emanuela Lopes de; SALLES, Mara Telles. Relações entre o subsolo urbano e mudanças climáticas em diferentes bairros do Rio de Janeiro. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 23, p. 1-21, 2020. DOI: 10.1590/1809-4422ednsf54382.

PAES, B. R. S., GARCIA, ALEXANDRINO R., 2022. Dinâmica temporal da vegetação urbana com aplicação de NDVI no município de Belo Horizonte - Minas Gerais. 20, 387-409. <https://doi.org/10.5016/estgeo.v20i3.16922>

PARAÍBA. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão – SEPLAG; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Boletim Informativo: Produto Interno Bruto dos Municípios do Estado da Paraíba – Resultados 2021. João Pessoa, 2023. Disponível em: https://fundac.pb.gov.br/diretas/secretaria-de-planejamento-orcamento-e-gestao/arquivos/pib-municipios/boletim-informativo-_produto-interno-bruto-dos-municipios-paraibanos-2021.pdf.

PHILANDER, S. G. H., 1983. Anomalous El Niño of 1982-83. *Nature* 305, 16. <https://doi.org/10.1038/305016a0>

POPOVYCH, V. F., DUNAIEVAD, L. A., 2021. Assessment of the GPM IMERG and CHIRPS precipitation estimations for the steppe part of the Crimea. *Meteorology Hydrology and Water Management* 9, 1-13. <https://doi.org/10.26491/mhwm/133088>

PORANGABA, G. F. O., TEIXEIRA, D. C. F., AMORIM, M. C. C., SILVA, M. H. S., Dubreuil, V., 2021. Modeling the urban heat island at a winter event in Três Lagoas, Brazil. *Urban Climate* 37100853. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100853>

QIU, Guo Yu; YAN, Chunhua; LIU, Yuanbo. Urban evapotranspiration and its effects on water budget and energy balance: Review and perspectives. *Earth-Science Reviews*, v. 246, p. 104577, nov. 2023. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104577.

RAO, P. K., 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society* 53, 647-648. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-53.7.648>

ROCHA, C. C., LEITE, M. A., 2020. A seca de 1979 a 1983 no Semiárido Piauiense: reflexões a partir da Construção da Barragem de Bocaína, Picos- PI. *Vozes, Pretérito & Devir Dossiê Temático* 11, 88-110.

SANTAMOURIS, M., 2020. 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* 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>

[SHI, L, DING, R., HU, S., LI, X., LI, J., 2023. Extratropical impacts on the 2020–2023 Triple-Dip La Niña event. *Atmospheric Research* 294, 106937.](#)

SILVA, Fernando Diniz Abreu; FERREIRA, Marcio Antônio Couto. Ilha de calor urbana: diagnóstico como ferramenta de gestão ambiental urbana nas cidades de

pequeno e médio porte. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, n. 23, p. 215–243, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35265/2236-6717-233-12602>.

SILVA, J. M. O., LUNA, V. F., GOMES, J. F., OLIVEIRA, M. M., de SOUSA LOPES, J. L., 2024. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da evolução das ilhas de calor de superfície na cidade do Crato-CE. *Revista Tamoios* 20, 2, 231-247. <https://doi.org/10.12957/tamoios.2024.76870>

SILVA, J. P. S., LOUREIRO, G. E., SOUSA, I. de, 2021. Spatio-temporal analysis of the earth's surface temperature in Marabá City, Pará, Brazil. *Research, Society and Development* 10, 7, e41710716718. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16718>

SILVA, R. F., OLIVEIRA, P. P., 2024. Eficiência de telhados verdes nos centros urbanos: uma abordagem analítica. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro* 6, 1-15. <https://doi.org/10.61164/rmnm.v6i1.2516>

SILVEIRA, P. C., CAMPOS, C. G. C., SÁ, E. A. S., BIFFI, L. J., DALRI, J. C., 2023. 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* 33, 329-353. <http://dx.doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16322>

SOUTO, J. I. O., COHEN, J. C. P., 2021. Spatiotemporal variability of urban heat island: influence of urbanization on seasonal pattern of land surface temperature in the Metropolitan region of Belém, Brazil. *Revista Brasileira de Gestão Urbana* 13, 1-17. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200260>

TAHA, H., 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings* 25, 99-103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)

TAYLOR, C.; SPRACKLEN, D.; ARNOLD, S. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, v. 489, p. 282-285, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature11390>.

VELIKOU, K., LAZOGLU, G., TOLIKA, K., ANAGNOSTOPOULOU, C., 2022. Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water* 14, 543. <https://doi.org/10.3390/w14040543>

VUJOVIC, S.; HADDAD, B.; KARAKY, H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M. Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng*, v. 2, p. 459-484, 2021. DOI: 10.3390/civileng2020026.

WANG, Q., FAN, Y., LI, Y., 2019. Interacting urban heat island circulations as affected by weak background wind. *Building and Environment* 160, 106224. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106224>.

WICKI, Andreas; PARLOW, Eberhard. Multiple Regression Analysis for Unmixing of Surface Temperature Data in an Urban Environment. *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, p. 684, 2017. DOI: [10.3390/rs9070684](https://doi.org/10.3390/rs9070684).

WULDER, M. A. et al. *Remote Sensing of Environment*, v. 280, p. 113195, 2022.

YAMAMOTO, Y. Measures to Mitigate Urban Heat Islands. *Science & Technology Trends Quarterly Review*, n. 18, p. 65-83, jan. 2006.

YILMAZ, M., 2023. Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land. *Science of the total environment* 856, 159182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159182>

Zhang, Y., Aslani, F., Dyskin, A., & Pasternak, E. (2023). A review on reflective materials for cementitious composites. *Journal of Photochemistry*, 2023, Article 114752. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114752>

ZHANG, Qiang et al. Variable Urbanization Warming Effects across Metropolitans of China and Relevant Driving Factors. *Remote Sensing*, v. 12, n. 9, p. 1500, 2020. DOI: [10.3390/rs12091500](https://doi.org/10.3390/rs12091500).

ZIPPERER, W. C., ROBERT, N., ANDREU, M., 2020. Urban development and environmental degradation. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. 1-25. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.97>

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha orientadora, Professora Célia Cristina Clemente Machado, pela orientação dedicada, paciência e incentivo ao longo deste trabalho.

À banca avaliadora, meu sincero reconhecimento pelas contribuições valiosas.

Aos meus pais, por todo apoio, amor e confiança em cada etapa da minha jornada. Aos meus amigos, pelo carinho, pelas conversas, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim.

E, por fim, agradeço a mim, pela resiliência, esforço e por não desistir mesmo diante dos desafios.

ANEXO 1

RESULTADOS DO TESTE DE MANN-KENDALL

Mann-Kendall trend test **TS**

data: tabeladados\$TS
 z = 2.3255, n = 10, **p-value = 0.02004**
 alternative hypothesis: true S is not equal to 0
 sample estimates:
 S varS **tau**
 27.0 125.0 **0.6**

Mann-Kendall trend test **URBAN AREA**

data: tabeladados\$URBAN
 z = 3.9355, n = 10, **p-value = 8.303e-05**
 alternative hypothesis: true S is not equal to 0
 sample estimates:
 S varS **tau**
 45 125 **1**

Mann-Kendall trend test **NDVI**

data: tabeladados\$NDVI
 z = -2.5044, n = 10, **p-value = 0.01227**
 alternative hypothesis: true S is not equal to 0
 sample estimates:
 S varS **tau**
 -29.0000000 125.0000000 **-0.6444444**

Mann-Kendall trend test **NDWI**

data: tabeladados\$NDWI
 z = -2.6833, n = 10, **p-value = 0.00729**
 alternative hypothesis: true S is not equal to 0
 sample estimates:
 S varS **tau**
 -31.0000000 125.0000000 **-0.6888889**

Mann-Kendall trend test **PASTAGEM**

data: tabeladados\$FARM
 z = -3.5777, n = 10, **p-value = 0.0003466**
 alternative hypothesis: true S is not equal to 0
 sample estimates:
 S varS **tau**
 -41.0000000 125.0000000 **-0.9111111**

Mann-Kendall trend test **COBERTURA NATURAL**

```
data: tabeladados$NAT
z = -2.3255, n = 10, p-value = 0.02004
alternative hypothesis: true S is not equal to 0
sample estimates:
  S varS tau
-27.0 125.0 -0.6
```