



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Modelagem Espacial das Ilhas de Calor Urbano na Cidade de Campina Grande (Brasil – Paraíba)¹

Célia Cristina Clemente Machado¹, Maria Clara Silva Sena², Janaina Barbosa da Silva³, Elânia Daniele Silva Araújo⁴, Cleber Ibraim Salimon⁵

⁽¹⁾ Dra. em Geografia, Professora do Laboratório de Geoinformática, Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Rua Horácio Trajano de Oliveira – Cristo Redentor 58070-450, João Pessoa, Paraíba. E-mail: celiacmachado1980@servidor.uepb.edu.br; ⁽²⁾ Graduanda em Ciências Biológicas, Bolsista de Iniciação Científica (PIBIC), Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Rua Horácio Trajano de Oliveira – Cristo Redentor 58070-450, João Pessoa, Paraíba. E-mail: maria.sena@aluno.uepb.edu.br; ⁽³⁾ Dra. em Geografia, Professora do Laboratório de Cartografia, Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Rua Aprígio Veloso, 882 – Universitário, 58429-900, Campina Grande, Paraíba. E-mail: janaina.barbosa@ufcg.edu.br; ⁽⁴⁾ Doutora em Geografia, Pós-doutoranda do Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Cidade Universitária 58051-900, João Pessoa – Paraíba. E-mail: elania.araujo@professor.pb.gov.br ⁽⁵⁾ Dr. em Ciências, Professor do Laboratório de Ecologia (LABECO), Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Rua Horácio Trajano de Oliveira – Cristo Redentor 58070-450, João Pessoa, Paraíba. E-mail: clebsal@suite.uepb.edu.br.

RESUMO

Os últimos relatórios do IPCC apontam que mais de dois terços da população mundial viverão em áreas urbanas até 2050. Um dos principais problemas ambientais dessas áreas são as ilhas de calor urbanas (ICU), que trazem consequências negativas, como degradação ambiental, desbalanceamento hidroclimático e desconforto térmico. Em Campina Grande (PB), a urbanização acelerada e desordenada, impulsionada pelo desenvolvimento industrial e educacional, tem intensificado o fenômeno das ICU. Este estudo teve como objetivo analisar como as mudanças no uso e cobertura da terra em Campina Grande, entre 1984 e 2023, impactaram a temperatura da superfície, a umidade e a biomassa verde, bem como identificar os padrões espaciais da temperatura superficial e seus principais preditores. Para isso, foram utilizadas oito imagens da série Landsat para a obtenção das temperaturas e índices, enquanto as mudanças no uso e cobertura da terra foram avaliadas com base nos dados do MAPBIOMAS. Ao longo dos 40 anos analisados, a substituição das formações naturais e pasto por infraestruturas artificiais resultou na diminuição da umidade e da quantidade de biomassa verde e a um aumento progressivo da temperatura da superfície. A urbanização foi a preditora mais importante para explicar o aumento da temperatura da superfície em Campina Grande, enquanto as variações da precipitação acumulada e da temperatura do ar tiveram um impacto menor. Observou-se o deslocamento das ICU para as Zonas Sul e Oeste da cidade, áreas com grande quantidade de loteamentos, o que torna urgente a implementação de medidas de mitigação, como políticas de uso de materiais refletivos. Palavras-chave: crescimento urbano, sensoriamento remoto termal, Landsat.

Spatial Modeling of Urban Heat Islands in the City of Campina Grande (Brazil – Paraíba)

ABSTRACT

According to the latest IPCC reports, more than two-thirds of the world's population is expected to live in urban areas by 2050. One of the main environmental issues in these areas is urban heat islands (UHIs), which have negative consequences such as environmental degradation, hydroclimatic imbalance, and thermal discomfort. In Campina Grande (PB), rapid and unplanned urbanization, driven by industrial and educational development, has intensified the UHI phenomenon. This study aimed to analyze how land use and land cover changes in Campina Grande, between 1984 and 2023, impacted surface temperature, humidity, and green biomass, as well as to identify the spatial patterns of surface temperature and its main predictors. To this end,

¹ Extraído do Projeto de Iniciação Científica (PIBIC) da segunda autora.

eight images from the Landsat series were used to obtain temperature and environmental indices, while land use and land cover changes were assessed based on MAPBIOMAS data. Over the 40 years analyzed, the replacement of natural surfaces and pastures with artificial infrastructure led to a decrease in humidity and green biomass and a progressive increase in surface temperature. Urbanization was the most important predictor of surface temperature increase, while variations in accumulated rainfall and air temperature had a smaller impact. UHIs were observed to shift towards the southwestern part of the city, especially in the South and West Zones, areas with a high number of residential developments. This highlights the urgent need for mitigation measures, such as the implementation of reflective material use policies.

Keywords: urban growth, thermal remote sensing, Landsat.

Introdução

Os relatórios mais recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), projetam que as áreas urbanas abrigarão mais de dois terços da população global até 2050. Embora as cidades desempenhem um papel crucial como centros socioeconômicos-culturais, elas também exercem um impacto considerável sobre o meio ambiente e os serviços ecológicos que os seres humanos obtêm dos ecossistemas naturais. Entre os efeitos negativos decorrentes do rápido e desordenado crescimento urbano estão a poluição do ar, a liberação de gases de efeito estufa, a contaminação do solo e dos recursos hídricos, a perda de habitats e biodiversidade, a impermeabilização do solo e o descarte inadequado de resíduos, que resultam em alagamentos, na acidificação das chuvas e na formação de ilhas de calor (Zipperer et al., 2020; IPCC, 2021).

Ilhas de calor urbano (ICU) caracterizam-se pelas maiores temperaturas nas cidades em relação às áreas rurais próximas, sendo comuns e particularmente problemáticas em grandes centros urbanos (Chakraborty e Lee, 2019). Esse fenômeno ocorre conforme grandes áreas de terreno natural são substituídas por superfícies artificiais, resultando na absorção de grandes quantidades de radiação solar durante o dia, que são liberadas na forma de calor à noite (Leal Filho et al., 2021). Santamouris (2020) destaca que diversos dados experimentais indicam que o aumento médio da temperatura em centros urbanos pode ultrapassar 4-5 °C, chegando a superar 10 °C nos momentos de pico.

As ICU resultam da interação de múltiplos fatores, incluindo a emissão de calor por atividades humanas, condições climáticas locais e regionais, poluição atmosférica, topografia e, especialmente, a presença de superfícies que absorvem e retêm grande quantidade de calor, aumentando a radiação solar total absorvida (Chakraborty e Lee, 2019). A combinação desses fatores cria um microclima urbano distinto, com temperaturas

significativamente mais altas do que nas áreas rurais vizinhas.

A substituição de superfícies naturais, como solos permeáveis e vegetação, por materiais urbanos, como concreto, asfalto e telhados, resulta em uma maior capacidade de absorção e armazenamento de radiação solar durante o dia. Esses materiais têm 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 lentamente à noite, elevando as temperaturas noturnas nas cidades. O balanço de energia é também afetado pois, na ausência de vegetação, o saldo de radiação não será gasto nos processos evapotranspirativos (calor latente), sendo gasto no aquecimento do solo e do ar (calor sensível) (Imran et al., 2019; Vujovic et al., 2021). Além disso, a presença de superfícies impermeáveis limita a infiltração de água no solo, reduzindo o resfriamento por evapotranspiração, o que contribui ainda mais para o aquecimento (Liu et al., 2020). A forma e a densidade das edificações também influenciam o fenômeno, pois criam “cânions urbanos” que aprisionam o calor e bloqueiam a dissipação do ar quente pelo vento (Wang et al., 2019).

As ICU causam degradação ambiental, desbalanceamento hidroclimático e aumentam o desconforto térmico para a população. Esse fenômeno eleva as temperaturas, intensifica a evaporação do solo, reduz a umidade do ar e pode alterar o regime de chuvas, especialmente durante o verão. Nas regiões tropicais e áridas, as altas temperaturas agravam problemas de saúde, como doenças respiratórias, e intensificam o desconforto térmico, aumentando a mortalidade durante ondas de calor, afetando particularmente os grupos vulneráveis (Ho et al., 2023).

Além disso, a elevação das temperaturas nos centros urbanos eleva a demanda por sistemas de refrigeração, como o ar-condicionado, o que aumenta o consumo de energia. Esse aumento no consumo energético está associado a maiores emissões de gases de efeito estufa, exacerbando as mudanças climáticas. O descarte inadequado de equipamentos de ar-condicionado pode liberar

substâncias tóxicas e gases refrigerantes que contaminam o solo e a água, contribuindo para a poluição ambiental (Errebaei et al., 2022).

A primeira observação documentada de ICU foi realizada por Rao (1972), utilizando sensores em satélites para identificar a diferença térmica entre áreas urbanas e rurais. No Brasil, Lombardo (1985) foi um pioneiro no uso de dados de sensoriamento remoto para estudar o aquecimento urbano e suas relações com diferentes usos do solo na cidade de São Paulo. Desde então, o país tem avançado no uso de diversas tecnologias e sensores, como o sensor TIRS (Termal Infrared Sensor) do satélite Landsat, os sensores do CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite), e o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) dos satélites Aqua e Terra, para monitorar as ICU em várias cidades brasileiras (Dorigon e Amorim, 2019; Souto e Cohen, 2021; Monteiro et al., 2021; Porangaba et al., 2021). Esses estudos têm sido fundamentais para entender a variabilidade espacial e temporal das temperaturas urbanas e para orientar políticas públicas voltadas à mitigação dos efeitos das ICU.

Campina Grande, localizada no estado da Paraíba, Brasil, destaca-se como um dos principais polos industriais do Nordeste, apresentando um crescimento populacional urbano expressivo entre 2010 e 2022, com um aumento de 34.642 habitantes ou 9% (IBGE, 2023). Esse processo de urbanização acelerada é impulsionado pelo desenvolvimento industrial e pela expansão educacional, atraindo migrantes em busca de maiores oportunidades socioeconômicas. Consequentemente, a demanda por infraestrutura urbana, incluindo transporte público, saneamento básico e habitação, aumentou significativamente (Grismino e Silva, 2023), resultando na conversão progressiva de áreas verdes em terrenos urbanos.

Esses fatores têm intensificado o fenômeno das ilhas de calor urbanas e suas implicações ambientais e de saúde pública (Lee et al., 2019).

Desta forma a identificação e espacialização das ICU em Campina Grande são fundamentais para delimitar as áreas mais intensamente afetadas pelo fenômeno, oferecendo subsídios essenciais para autoridades e planejadores urbanos no desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação.

Este trabalho teve como foco a área urbana de Campina Grande e o período de 1984 a 2023, 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.

Material e métodos

Área de Estudo

Campina Grande, localizada no Planalto da Borborema, a 130 km de João Pessoa (Figura 1), possui um clima de transição entre o tropical úmido (As) e o semiárido quente (BSh) (Alvares et al., 2013). Fundada em 1697 e elevada a cidade em 1864, seu desenvolvimento socioeconômico foi impulsionado pela malha ferroviária e pela produção de algodão, atendendo à demanda do setor têxtil. Atualmente, com 418.140 habitantes, é a segunda maior cidade da Paraíba e se destaca pelos setores educacional e industrial (IBGE, 2023).

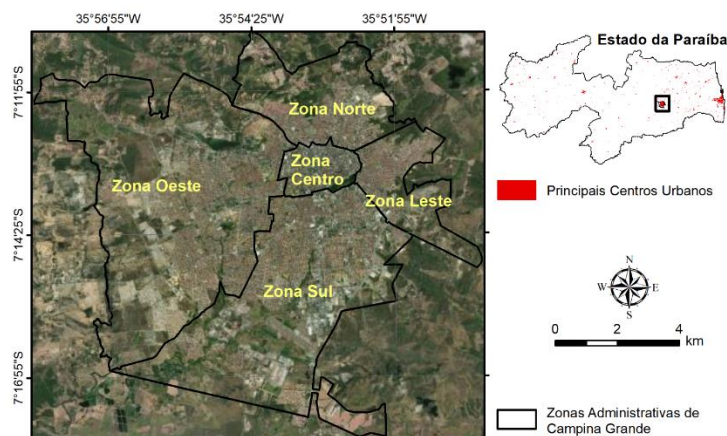


Figura 1. Localização da área urbana de Campina Grande e suas zonas administrativas.

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

As informações sobre as mudanças espaço-temporais de UCT foram extraídas da Coleção nove do Mapbiomas (1985 a 2023), mapas anuais de uso e cobertura da terra da Paraíba com resolução de 30 m (MAPBIOMAS, 2023). Focou-se nas classes relativas à formação natural, pastagem e infraestruturas urbanas. O *download* dos raster foi realizado a partir do *Google Earth Engine*.

A análise de reflectância da superfície para estimar (1) a quantidade de biomassa verde, através do NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) e (2) a umidade, através do NDWI (índice de umidade), foi realizada usando imagens dos sensores da série Landsat com baixa cobertura de nuvens sobre Campina Grande-PB. Utilizaram-se no total oito imagens de órbita e ponto 214/65 e datas de passagem em: 10-06-1984, 10-07-1989, 11-07-1995, 29-08-2007 (Landsat 5), 29-05-2000 (Landsat 7), 26-04-2014, 12-11-2017 e 21-11-2023 (Landsat 8). Após recortados os raster para os limites da área urbana de Campina Grande e removidas as nuvens e suas sombras, realizou-se o cálculo da reflectância no topo da atmosfera. Para cálculo da reflectância das imagens do Landsat 8, seguiu-se a seguinte equação, disponibilizada pelo United States Geological Survey (USGS, 2015):

$$\rho_{\lambda} = \frac{FM \times ND + FA}{\sin(\theta_{SE})} \quad 1$$

sendo FM o fator multiplicativo específico de cada banda e FA o fator aditivo específico de cada banda, ambos disponíveis no ficheiro de metadados da imagem. θ_{SE} é o ângulo de elevação solar (sun elevation), em graus, que indica a altura do Sol no céu em relação ao horizonte no momento da captura da imagem.

Para as imagens do Landsat 5 e 7 foi necessário converter o número digital (ND) de cada pixel da imagem original em radiância espectral monocromática ($L_{\lambda,i}$ - $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), a partir da equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda,i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad 2$$

onde a e b são os coeficiente de calibração encontrados nos ficheiros de metadados das imagens. Correspondem às radiâncias espectrais mínima e máxima, respectivamente ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), ND é a intensidade do pixel (valor inteiro entre 0 e 255) e i corresponde às bandas dos sensores TM

e ETM+ (Landsat 5 e 7, respectivamente).

Posteriormente, a reflectância para as imagens de Landsat 5 e 7 foi computada através da seguinte equação (Chander e Markham, 2003):

$$\rho_{\lambda,i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda,i}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta \cdot dr} \quad 3$$

onde $L_{\lambda,i}$ é a radiância espectral de cada banda, $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($W m^{-2} \mu m^{-1}$), θ é o ângulo zenital solar, calculado a partir do ângulo elevação solar θ_{SE} ($\theta = 90^\circ - \theta_{SE}$), obtido no próprio ficheiro de metadados da imagem e dr é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol em um dado dia do ano (DSA) que varia entre 0,97 e 1,03 (adimensional).

O NDVI foi obtido através da razão entre a diferença das refletividades do Infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V) e a soma de ambos (Rouse et al, 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad 4$$

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):

$$NDWI = \frac{\rho_{iv} - \rho_{ivm}}{\rho_{ivm} + \rho_{iv}} \quad 5$$

Temperatura da superfície-TS

Para obter as superfícies contínuas da TS na área urbana em estudo, utilizaram-se as bandas de infravermelho térmico de vários sensores da série de satélites 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). A banda termal 11 do Landsat 8 apresenta inconsistência e não é recomendada para uso (USGS, 2015).

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:

$$L_{\lambda,i} = M_i \times ND + A_i \quad 6$$

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):

$$TB (^{\circ}C) = (K2/\ln((K1/L\lambda i)+1)) - 273,15 \quad 7$$

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:

$$Ts = (TB / (1+(0.00115 * TB / 1.4388)*Ln(\varepsilon))) \quad 8$$

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

$$\varepsilon = 0.004 * Pv + 0.986 \quad 9$$

$$Pv = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2 \quad 10$$

Dados de temperatura do ar e precipitação

Os dados de temperatura do ar foram obtidos do *Climate Engine.org*, optando-se pelos dados meteorológicos de superfície diários do ERA 5 AG, de 9,6 km de resolução, baseados nos dados horários do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF ERA5) ao nível da superfície com 9,6 km de resolução. Utilizou-se a temperatura média do dia do imageamento. A acurácia dos dados de temperatura do ERA5 foi verificada por várias pesquisas em diversas regiões do mundo (Velikou et al., 2022; Yilmaz, 2023; Choudhury et al., 2023).

Os dados de precipitação também foram obtidos do *Climate Engine.org*, através do produto *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations* (CHIRPS), dados de precipitação diária (mm), com 4 km de resolução. Utilizou-se o acumulado de precipitação 180 dias antes do imageamento, dando uma maior percepção da condição de umidade do sistema. Os dados CHIRPS têm sido avaliados e comparados com outros produtos, tendo-se verificado a sua boa acurácia (Popovych e Dunaieva, 2021).

Análise estatística

O teste de *Mann-Kendall* foi utilizado para avaliar se existe evidência estatisticamente significativa de tendência monotônica (crescente ou decrescente) entre 1984 e 2023 na TS, NDVI, NDWI e nas áreas de cobertura natural, pastagem e infraestrutura urbana de Campina Grande. Esse teste é uma ferramenta comum e eficaz para avaliar

tendências temporais em séries de dados, especialmente em séries temporais hidrológicas, climáticas e ambientais. Ele é robusto e não paramétrico, o que significa que não requer suposições sobre a distribuição dos dados, sendo adequado para uma ampla variedade de situações (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 quadrículas * 8 imagens = 224).

Para medir a força e a direção da relação entre o aumento das infraestruturas artificiais (variável preditora) e as mudanças na TS, NDVI e NDWI (variáveis respostas), averiguada a não normalidade dos dados pelo teste de *Shapiro-Wilk*, utilizou-se a correlação linear de *Spearman*. Para avaliar o quanto as variáveis respostas são afetadas pela variável preditora, utilizou-se o modelo de regressão aditiva generalizada (GAM). O modelo GAM é flexível e pode modelar relações não lineares com funções suaves, independentemente da distribuição dos resíduos.

De forma a entender a variação da TS em Campina Grande (variável resposta), avaliou-se o efeito das variáveis preditoras temperatura do ar, precipitação (acumulado de 180 dias) e expansão urbana através da regressão linear múltipla. Aqui, a resolução espacial dos dados climáticos (4 e 9,6 km) não permitiu usar a grade, pelo que N=8. Para a verificação dos pressupostos da regressão linear múltipla, observou-se a normalidade dos resíduos através do teste de *Shapiro-Wilk*, a presença de *outliers* nos resíduos, a independência dos resíduos (teste de *Durbin-Watson*), a presença de homocedasticidade - por meio do teste de *Breusch-Pagan* e o teste de multicolinearidade (VIF). Por fim, obtiveram-se os coeficientes padronizados para observar qual preditora mais importante.

Todas as imagens foram processadas através do *software* QGIS, versão 3.28.1-*Firenze*. Os tratamentos estatísticos foram realizados pelo *RStudio*, versão 1.1.453.

Resultados e discussão

Ao longo dos 40 anos em análise, verificou-se uma tendência significativa de aumento da TS e da infraestrutura urbana (*Mann-Kendall*: valor-p/tau 0,004/0,857 e <0,0008/1,000, respectivamente). Por outro lado, constatou-se uma tendência significativa de diminuição de NDVI, NDWI e de pastagem + cobertura natural (*Mann-Kendall*: valor-p/tau 0,002/-0,929, 0,004/-0,857, 0,009/-0,785 e 0,001/-1,000, respectivamente).

A análise temporal do NDVI espacializado na área urbana de Campina Grande evidencia alterações substanciais na densidade da cobertura vegetal ao longo dos 40 anos avaliados (Figura 2). Até o ano 2007, os menores valores de NDVI, indicativos de menor quantidade de biomassa verde, estavam predominantemente concentrados

na zona central da cidade. Nos anos seguintes, esses baixos valores de NDVI se expandiram para o sudoeste, abrangendo os bairros das zonas oeste e sul. Em termos das médias espaciais (Figura 3), observa-se uma queda significativa nos valores até 2017, seguida por um leve aumento na imagem de 2023. O NDWI apresentou comportamento semelhante ao NDVI (Figura 3 e 4). Estes resultados refletem a 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.

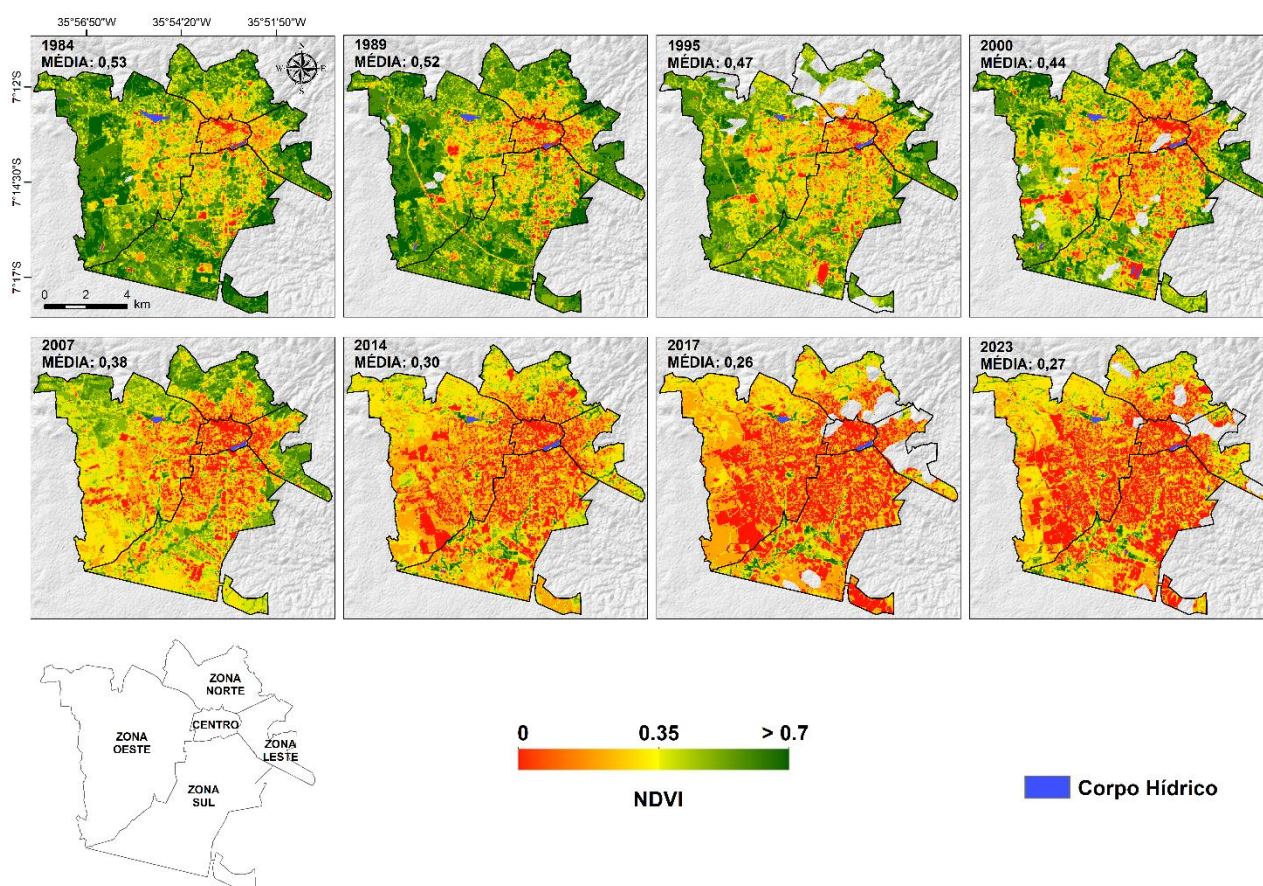


Figura 2. Modelagem espaço-temporal do NDVI na área urbana de Campina Grande entre 1984 e 2023, com a limitação das zonas da cidade.

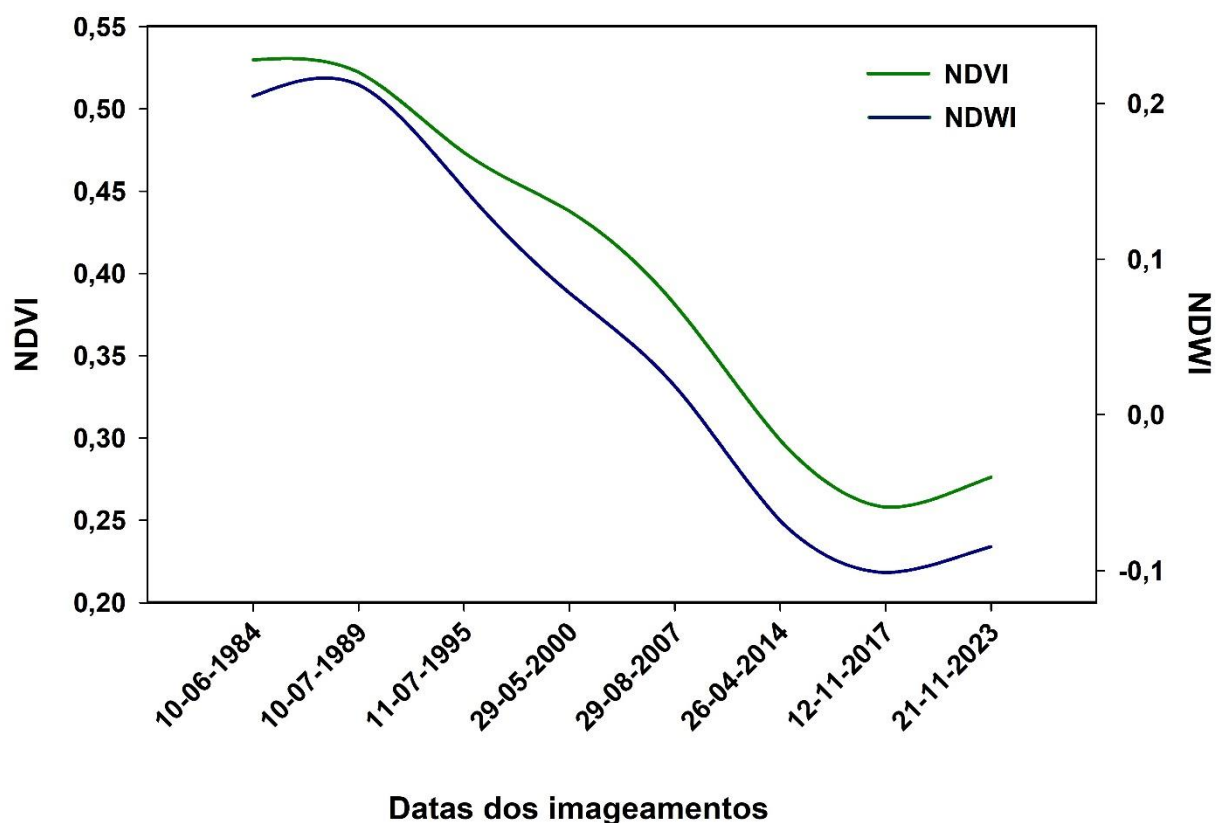


Figura 3. Médias zonais do NDVI e do NDWI em cada ano analisado na área urbana de Campina Grande.

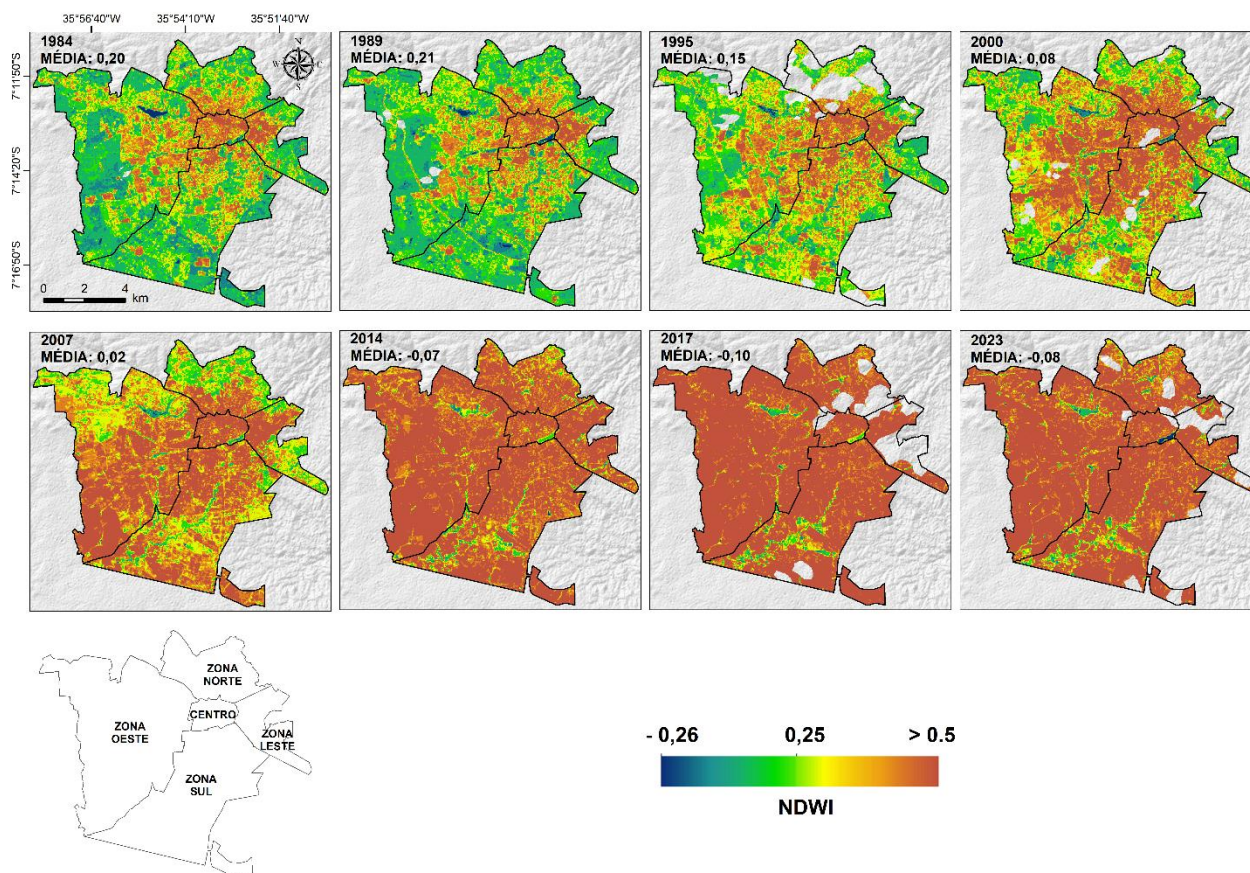


Figura 4. Modelagem espaço-temporal do NDWI na área urbana de Campina Grande entre 1984 e 2023, com

a limitação das zonas da cidade.

A modelagem temporal da temperatura da superfície espacializada na área urbana revela, de modo geral, que regiões com maior NDVI e NDWI, associadas a uma cobertura vegetal mais densa e a maior umidade, apresentam temperaturas de superfície mais baixas. Por outro lado, no centro urbano, onde há maior concentração de superfícies asfaltadas e concretadas, as temperaturas da superfície são significativamente mais elevadas. Este padrão é esperado, dado que as infraestruturas urbanas, como telhados, pavimentos e calçadas, são compostas por materiais de baixo albedo e baixa refletividade, os quais acumulam mais energia solar e a liberam predominantemente como calor. Menos vegetação e menor umidade no sistema também se traduz em menor evapotranspiração, contribuindo para o aumento do

fluxo de calor sensível (H) e de calor no solo (G). Esses fatores intensificam as temperaturas e promovem o efeito das ICU, conforme descrito por Taha (1997).

A medida que a área urbana foi aumentando, pela substituição das formações naturais (formações florestais savânica e campestre) e das pastagens por infraestruturas artificiais, observou-se um aumento progressivo nas temperaturas da superfície (Figura 5 e 6), chegando a média de 36,1°C na imagem de 2023.

Até o ano de 2000, a ICU se encontrava nitidamente na Zona Centro, mas nas restantes imagens, as áreas de maiores temperaturas se deslocaram para sudoeste, na Zona Oeste e Sul da cidade.

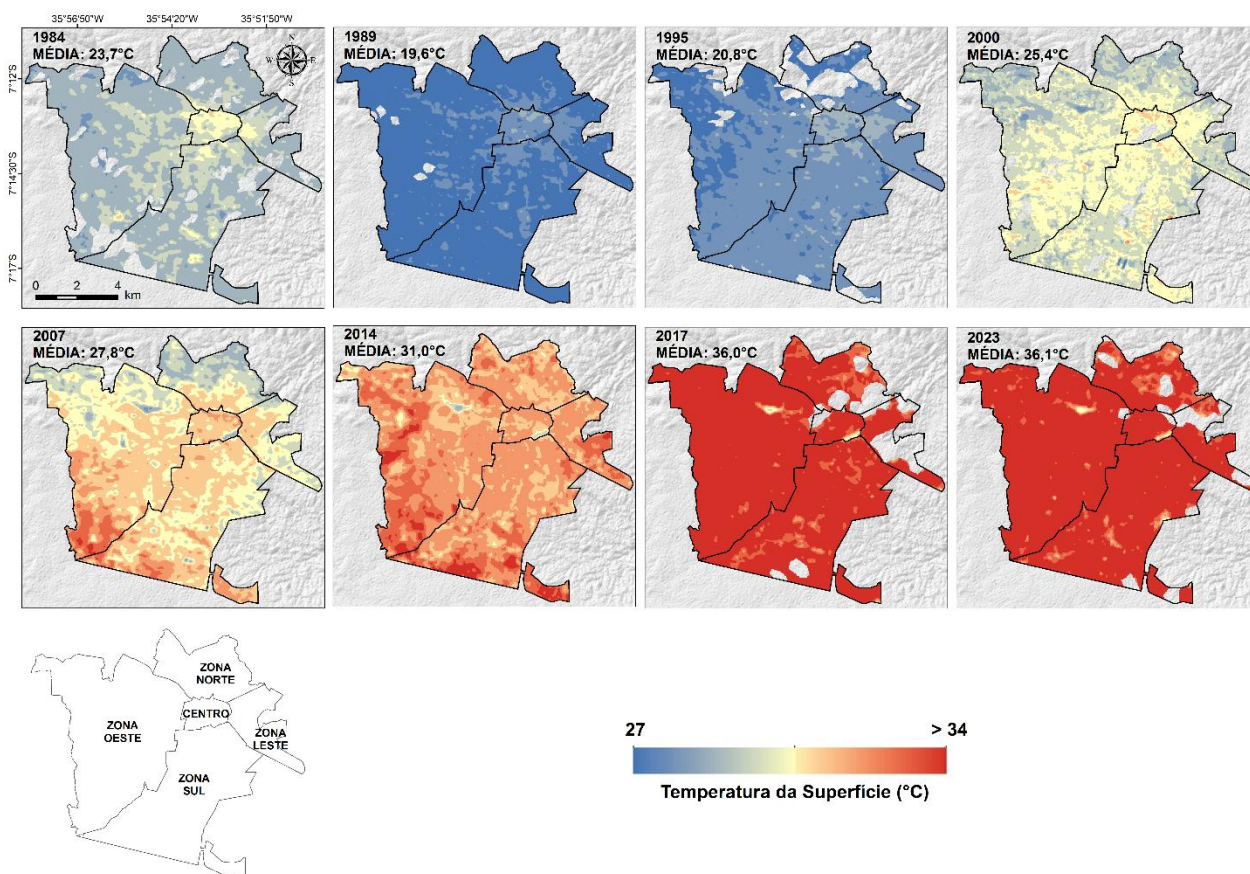


Figura 5. Modelagem espaço-temporal da temperatura da superfície (°C), na área urbana de Campina Grande entre 1984 e 2023, com a limitação das zonas da cidade.

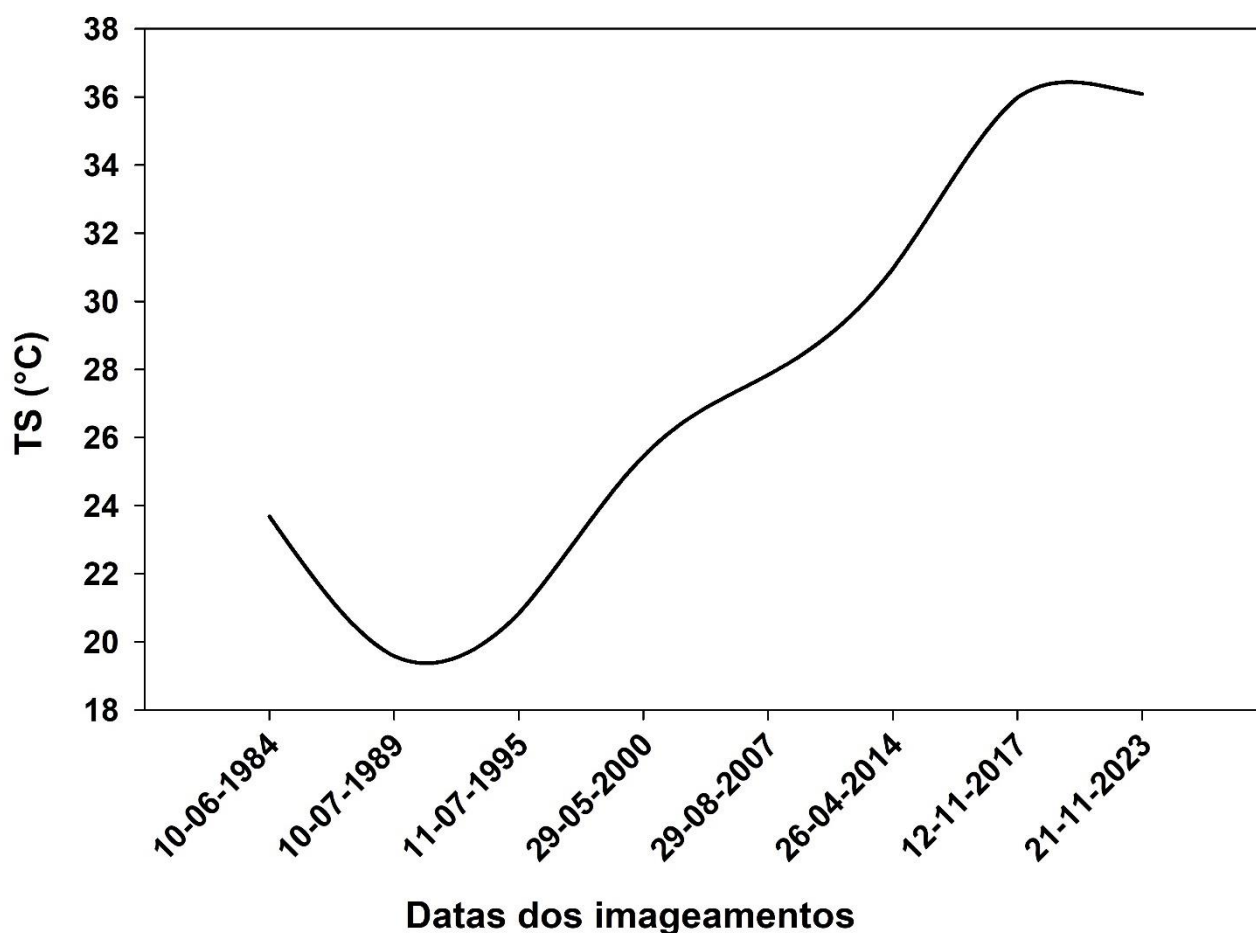


Figura 6. Médias zonais da temperatura da superfície em cada ano analisado na área urbana de Campina Grande.

Portanto, para o intervalo analisado referente aos últimos 40 anos, a área urbana de Campina Grande teve um franco aumento na direção sudoeste, sendo as formações naturais e pastos progressivamente substituídos pelas infraestruturas urbanas (Figura 7). A direção da expansão urbana não se realizou de forma radial equitativa em todas as direções, tendo um claro movimento preferencial pela direção sudoeste, provavelmente por limitações impostas pelo relevo acidentado a norte (Figura 8). Além disso, há uma

forte tendência de conurbação física entre a área urbana de Campina Grande e os municípios de Lagoa Seca e Queimadas (Gurgel, 2017), fazendo com que não haja mais espaço para crescimento em direção a essas áreas, diferentemente da porção sudoeste da cidade que está se expandindo em direção a zona rural de Campina Grande, com elevado potencial para ampliação, o que tem despertado o interesse de diversos empreendimentos imobiliários (Figura 8).

MapBiomias - Uso e Cobertura da Terra na Área Urbana de Campina Grande

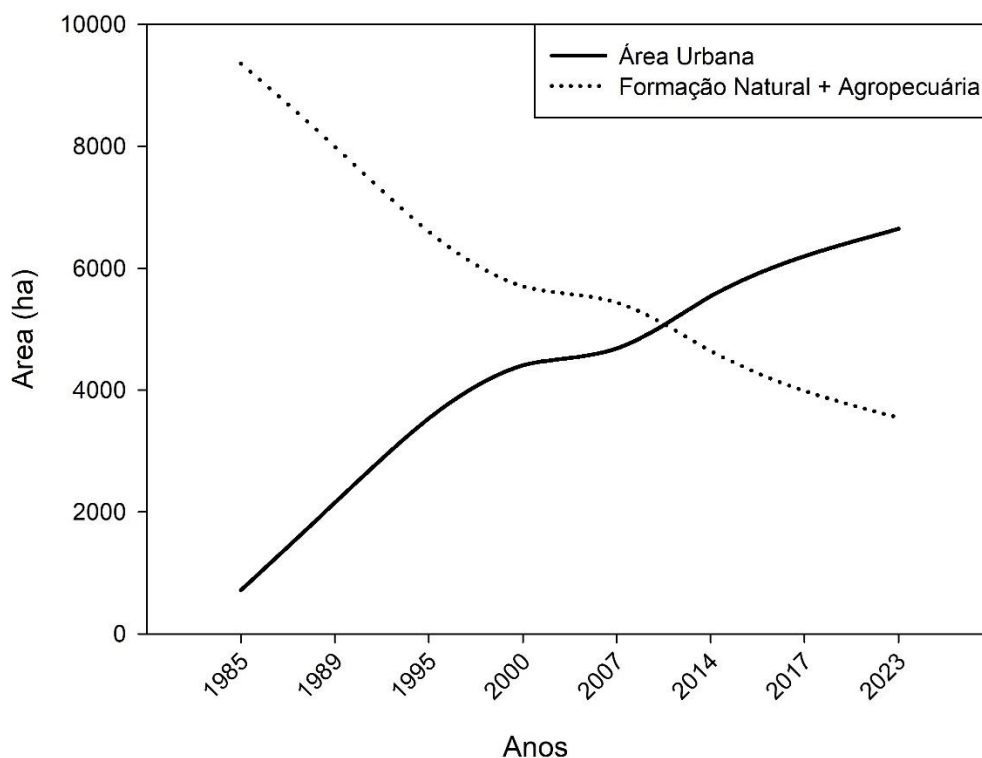


Figura 7. Área de ocupação por formações naturais (formação florestal, savânica e campestre) + agropecuária (maioritariamente pastagens e reduzida representação de cana de açúcar e outros usos) e área urbana entre 1985 e 2023 na área urbana de Campina Grande, de acordo com dados do MapBiomias, coleção nove (MAPBIOMAS, 2023).

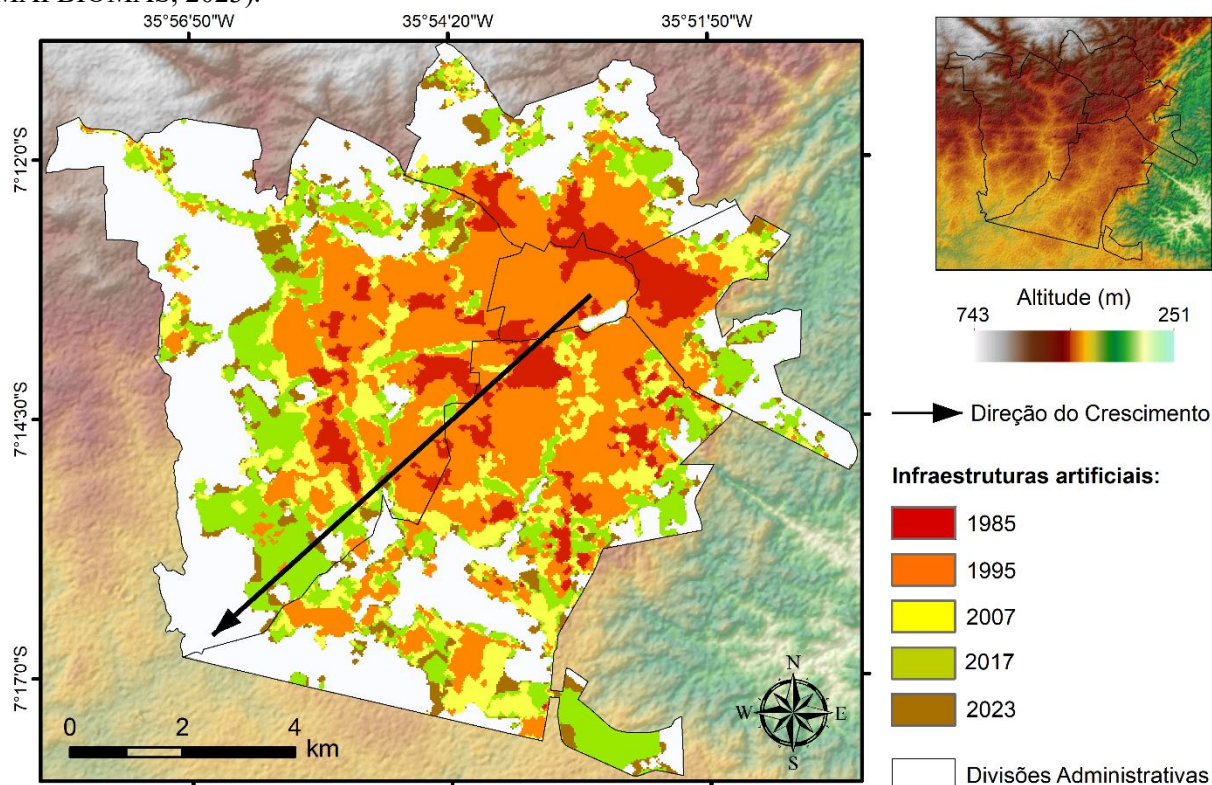


Figura 8. Direção do crescimento das infraestruturas urbanas em Campina Grande ao longo das últimas 4 décadas, demonstrando o relevo da região através do modelo digital de elevação do *Shuttle Radar Topography*

Mission (SRTM). MAPBIOMAS (2023).

Silva et al. (2024), ao analisarem a evolução da temperatura e das ilhas de calor na cidade do Crato-CE entre 1995 e 2019, também observaram que o aumento da temperatura está relacionado à expansão urbana e à consequente substituição da vegetação. Os autores afirmam que inicialmente esse aumento de temperatura estava concentrado na zona central da cidade e que foi se expandindo com o passar dos anos para as áreas onde o crescimento urbano foi se acentuando mais.

O fato é que não há um padrão de crescimento nas cidades brasileiras, onde o modelo radial típico de cidades planejadas não é o mais comum, com excessões das Capitais Aracajú-SE, Boa Vista-RO e o Distrito Federal-Capital do Brasil, contudo, ao longo do tempo essa característica radial está alterando e perdendo as características de planejamento (Bianchi, 2021; Posca, 2022).

A supressão da vegetação em cidades brasileiras é uma realidade, e o fator principal é a substituição dessas por áreas construídas, principalmente para moradias. São exemplos dessa problemática cidades como Belo Horizonte-MG, Terezina-PI, Marabá-PA, Recife-PE (Paes e Garcia, 2022; Silva et al., 2021, Santos et al., 2023).

O emprego de materiais de baixo albedo e a destruição (supressão) da cobertura vegetal contribui para o desbalanceamento energético na cidade, pois segundo Nuruzzaman (2015) essa situação resulta em uma menor evapotranspiração, menor parcela no fluxo latente e, portanto, a uma menor eficiência do sistema de resfriamento nas cidades, justificando o aumento significativo das temperaturas da superfície. Por outras palavras, menor cobertura vegetal e menor umidade leva a que uma menor parcela do saldo de radiação seja gasta em processo evapotranspirativos, sendo então a energia gasta nas parcelas H e G (aquecimento do ar e solo).

Outra particularidade interessante é o fato de, contrariamente ao esperado, a partir da imagem de 2007, as maiores temperaturas da superfície não se concentram mais na Zona Central e passam a se focar na referida área de expansão, no extremo sudoeste da cidade. Essa área corresponde a loteamentos, bairros domiciliares, com uma quantidade de infraestruturas artificiais inferior ao encontrado na Zona Central, no entanto, com uma quantidade considerável de solo exposto.

Tal como nas áreas com alta concentração de infraestrutura, o solo exposto em zonas urbanas tende a registrar temperaturas de superfície

significativamente elevadas (Porangaba et al., 2021; Silva et al., 2022). A cor e composição do solo pode explicar a sua menor refletividade e, portanto, a sua maior temperatura. Quando a radiação solar atinge o solo, uma parte significativa dela pode ser absorvida e promover aquecimento do solo e da baixa atmosfera. Além disso, a condutividade térmica do solo descoberto é baixa, restando mais calor na superfície. A condutividade térmica do solo depende do conteúdo hídrico, da textura, quantidade de matéria orgânica, volume de ar no solo (Lunt et al., 2022). Assim, a partir da imagem de 2007, uma região domiciliar, mais afastada do centro, apresentou as maiores temperaturas da cidade.

O ligeiro aumento do NDVI na imagem de 2023 pode estar relacionado com o maior índice pluviométrico sentido nesse ano influenciado pelo fenômeno La Niña e que impulsionou a produção de mais biomassa verde. De acordo com o relatório NOAA (2024), os anos de 2020 a 2023 foram anos de La Niña fraco a moderado. Nesse anos 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 maiores 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 parte do globo (Philander, 1983), como graves secas no Nordeste brasileiro (Campos, 2009; Rocha e Leite, 2020).

Os resultados das correlações de *Spearman* (Tabela 1) mostram associações altamente significativas entre o aumento da área de infraestruturas urbanas e as demais variáveis analisadas (TS, NDVI, NDWI). As correlações negativas com NDVI e NDWI indicam que áreas mais urbanizadas tendem a ter menor cobertura vegetal e menor umidade.

Os resultados do GAM sugerem que há uma forte e significativa relação não-linear entre a área de infraestrutura urbana e as variáveis estudadas (TS, NDVI, NDWI). A urbanização explica uma proporção substancial da variabilidade nessas variáveis, o que sugere que mudanças na

infraestrutura urbana têm um impacto significativo sobre a temperatura da superfície, a quantidade de

biomassa verde e a umidade (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados da análise de correlação de Spearman (rho) 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) e índice de umidade (NDWI).

Variáveis	Análise de Correlação de Spearman		Modelo de Regressão Aditiva Generalizada		
	Rho	Valor p	R^2 Ajustado	Desvio explicado (%)	Valor p
Urbano - TS	0,543	P < 0,001	0,379	39,9	P < 0,001
Urbano - NDVI	-0,850	P < 0,001	0,783	79,0	P < 0,001
Urbano - NDWI	-0,776	P < 0,001	0,726	73,5	P < 0,001

P < 0,001 Altamente significativo

Ao analisarem a relação entre as ICU e a ocupação do solo em João Pessoa, entre os anos de 2013 e 2022, Medeiros et al. (2023) encontraram uma relação inversamente proporcional entre o NDVI e a TS, os autores utilizaram o método de correlação de *Pearson* e identificaram que a medida que a TS aumenta o NDVI diminui, indicando uma correlação negativa com valores de $r = -0,8$ e $-0,6$ para zona diferentes da cidade, corroborando a discussão de que com a retirada da vegetação há um aumento na TS.

Ao observar a relação entre infraestrutura urbanas e a temperatura da superfície ($R^2 = 0,379$), entende-se que outras variáveis devem contribuir para a variabilidade da TS. Por esse motivo, testou-se a influência da temperatura do ar e da precipitação acumulada através de uma regressão linear múltipla. O modelo geral é significativo e explica uma grande proporção da variabilidade em TS ($R^2 = 0,78$) (Tabela 2). Os coeficientes padronizados mostram que a variável “Urbano” é a preditora mais importante no modelo, seguida pela precipitação. Essa análise confirma a relevância da urbanização no aumento da temperatura da superfície, enquanto a precipitação acumulada tem um impacto menor e negativo. Para cada aumento de 1 m^2 na área urbanizada, a TS aumenta em $0,00145 \text{ }^\circ\text{C}$, mantendo as outras variáveis constantes. Embora o coeficiente seja pequeno, o p-valor (0,155) sugere que a relação é marginalmente mais próxima da significância, mas ainda não significativa. Para cada aumento de 1 mm na precipitação acumulada, mantendo as

outras variáveis constantes, a TS diminui em $0,01988 \text{ }^\circ\text{C}$. No entanto, o p-valor (0,325) indica que essa relação não é estatisticamente significativa.

Resultados semelhantes foram encontrados por Amorim et al. (2015), ao efetuarem a modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente – SP, os autores observaram a relação entre a temperatura e as classes de uso da terra e constataram que há uma relação muito forte entre a TS e a classe de construções, com um $R^2 = 0,74$. Silveira et al. (2023), efetuaram uma análise para Joinville, Criciúma e Lages, cidades do estado de Santa Catarina e observaram que as ilhas de calor se formam em áreas que apresentam valores elevados de índice de construção (BU) e reduzidos de NDVI, ou seja, a supressão da vegetação em detrimento da expansão urbana aumenta a TS e proporciona o surgimento das ICU.

Vale ressaltar que com um número pequeno de observações ($N=8$), é difícil atingir significância estatística para os coeficientes individuais, mesmo quando o modelo como um todo é significativo. Isso pode estar ocorrendo, por exemplo, porque testes individuais exigem mais dados para detectar efeitos menores. Já o teste F (significância global do modelo) é mais robusto e pode indicar significância para o modelo como um todo mesmo com poucas observações.

Tabela 2. Estatísticas da regressão linear múltipla para a variável dependente temperatura da superfície (TS). A negrito são destacados os valores de relevancia.

Variável	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	Valor p	Coef. Padronizado
Intercepto	3,128	25,945	0,121	0,910	N/A
Precipitação (180 dias)	-0,020	0,018	-1,121	0,325	-0,341
Temperatura do ar	1,091	0,955	1,143	0,317	0,269
Urbano	0,001	0,001	1,751	0,155	0,461
Estatística do modelo					Valor
R² Ajustado					0,780
Desvio Padrão dos Resíduos					2,990
F-statistic					9,248
P-value (F-statistic)					0,028*

* Significativo

É importante reconhecer que, apesar da robustez dos sensores orbitais na detecção de padrões térmicos e de vegetação em escala urbana, existem limitações metodológicas inerentes ao uso de dados derivados de satélite, especialmente em análises de séries temporais longas. O uso de variáveis como TS, NDVI e NDWI é eficaz e vantajoso, sobretudo em regiões onde a coleta de dados locais é limitada, mas ainda assim apresenta restrições importantes. Como apontado por Chakraborty et al. (2020), essas estimativas são válidas apenas sob condições de céu limpo e podem apresentar vieses em regiões com alta nebulosidade — como é o caso de Campina Grande-PB, onde apenas oito imagens representativas puderam ser utilizadas ao longo de 40 anos de análise. Essa limitação compromete a completude da série e exige cautela na interpretação dos resultados, uma vez que não se trata de uma média climatológica, mas de recortes pontuais em anos específicos. Além disso, o NDVI pode não captar com precisão o efeito de resfriamento de diferentes tipos de vegetação urbana, e a TS nem sempre reflete a temperatura percebida ao nível humano, o que reduz sua aplicabilidade em estudos de conforto térmico e estresse por calor. Com o intuito de superar algumas dessas limitações, Zheng et al. (2021) propuseram uma abordagem aprimorada para o monitoramento de áreas urbanizadas, combinando dados de luz noturna (Nighttime Light – NTL), obtidos pelo sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), a bordo do satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP), com os índices NDVI, NDWI e NDBI. Essa metodologia é potencialmente interessante para análises futuras em Campina Grande, especialmente por incorporar múltiplas variáveis que podem complementar as limitações dos

métodos baseados exclusivamente em sensores ópticos e térmicos.

Frente ao cenário apresentado nesta pesquisa, uma estratégia que pode ser adotada em Campina Grande-PB é uma reformulação do seu plano diretor, incluindo planejamento para o enfrentamento as mudanças climáticas. Investimento em áreas verdes como parques e praças arborizadas. Outra opção é o chamado Imposto Predial e Territorial Urbano Verde, segundo Silva e Oliveira (2024) esse incentiva práticas ambientais diversas, incluindo telhados verdes com plantas que absorvem o calor, diminuindo assim a temperatura e descontos do IPTU para quem adere a proposta. Outra solução promissora é a adoção do conceito de “cidades-esponja”, originado e implementado na China desde 2013 (Wang et al., 2018), e que vem despertando o interesse de outros países, como Estados Unidos, Índia e Dinamarca, pelos seus potenciais benefícios na mitigação de alagamentos urbanos e regulação térmica (Hamidi et al., 2021). Essa abordagem propõe o uso de estruturas permeáveis, jardins de chuva e sistemas naturais de drenagem para reduzir alagamentos urbanos e contribuir para a regulação da temperatura nas cidades. De acordo com Ma et al. (2020), a implementação dessas estratégias aumenta significativamente a resiliência das áreas urbanas frente aos eventos climáticos extremos, promovendo o armazenamento e reaproveitamento da água da chuva, além de ampliar as áreas verdes, elementos essenciais para a mitigação dos efeitos das ICU.

Assim, a incorporação de dados geoespaciais e de sensoriamento remoto, aliada a políticas públicas que integrem essas abordagens sustentáveis, mostra-se essencial para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas nas

cidades brasileiras.

Considerações finais

A substituição das superfícies naturais e das pastagens por infraestruturas artificiais tem promovido um aumento progressivo da temperatura da superfície em Campina Grande. A expansão urbana é 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 têm um impacto menor.

As maiores temperaturas sentidas no extremo oeste da cidade, áreas de solo exposto, demandam estudos posteriores sobre as características particulares dos solos locais.

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.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, pela atribuição de bolsa PIBIC/CNPq-UEPB, Editais 04/2022 e 03/2023 – PRPG/UEPB.

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., Dubreuil, V., Cardoso, R., 2015. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP), Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia* 16, 29-45. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v16i0.40585>
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>
- Chakraborty, T., Hsu, A., Manya, D., Sheriff, G., 2020. A spatially explicit surface urban heat island database for the United States: Characterization, uncertainties, and possible applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168, 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.021>
- Chander, G., Markham, B. L., 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 2674–2677. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464>
- Choudhury, 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>
- Errebai, F. B., Strebel, D., Carmeliet, J., Derome, D., 2022. Impact of urban heat island on cooling energy demand for residential building in Montreal using meteorological simulations and weather station observations. *Energy and buildings* 273, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112410>
- Gao, B., 1996. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- 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)
- Hamidi, A., Ramavandi, B., Sorial, G. A., 2021. Sponge City — An emerging concept in sustainable water resource management: A scientometric analysis. *Resources, Environment and Sustainability* 5, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100028>
- 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, 2023. Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE.
- 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>
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.
- Leal Filho, W., Wolf, F., Castro-Díaz, R., Li, C., Ojeh, V. N., Gutierrez, N. ... Boencke, J., 2021. Addressing the Urban Heat Islands Effect: A Cross-Country Assessment of the Role of Green Infrastructure. *Sustainability* 13, 753. <http://dx.doi.org/10.3390/su13020753>
- 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.
- Lunt, P. H., Fuller, K., Goodhew, S., Murphy, T.R., 2022. Comparing the thermal conductivity of three artificial soils under differing moisture and density conditions for use in green infrastructure. *Soil Use and Management* 39, 260-269. <https://doi.org/10.1111/sum.12841>
- Ma, Y., Jiang, Y., Swallow, S., 2020. China's sponge city development for urban water resilience and sustainability: A policy discussion. *Science of The Total Environment* 729, 139078. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139078>
- MapBiomas – Coleção [9] da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 2023, acessado em novembro 2024, através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/>.
- Markham, B. L.; Barker, L. L., 1987. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing* 8, 517-523. <https://doi.org/10.1080/01431168708948658>
- 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>.
- Nuruzzaman, M. D., 2015. Urban Heat Island: causes, effects and mitigation measures – a review. *International Journal of Environment Monitoring and Analysis* 3, 67-73. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>
- 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>

- 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* 37, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100853>
- Posca, L. M., 2022. Cidades planejadas e imaginários: contrastes entre o planejamento urbano com a tríade cidade vista, marcada e imaginada. *Textos e Debates* 28, e7937. <http://dx.doi.org/10.18227/2317-1448ted.v28i01.7937>
- 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. *Voices, Pretérito & Devir Dossiê Temático* 11, 88-110.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I*, 309-317.
- 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>
- Santos, I. S., Silva, M. C. C., Azevedo, G. A., Lafayette, K. P. V., Silva, S. R., 2023. Avaliação espaço-temporal do processo de uso e ocupação de uma encosta no bairro de Macaxeira - Recife/PE – Brasil. *Revista de Geografia (Recife)* 40, 334-358. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.257514>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106937>
- Silva, R. S., Silva, R. M., Freitas, A. F., Santos, J. S., Santos, C.A.G., Lima, E.R.V., 2022. Thermal comfort conditions at microclimate scale and surface urban heat island in a tropical city: A study on João Pessoa city, Brazil. *International Journal of Biometeorology* 66, 1079-1093. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02260-y>
- 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, 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, 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/rnm.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)
- USGS. Sistema Geológico dos Estados Unidos, 2015. Using the USGS Landsat 8 Product.
- Velikou, K., Lazoglou, 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., 2021. Urban Heat Island: Causes, 3821

- Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng* 2, 459-484. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>
- Wang H., Mei C., Liu J.H., Shao W.W., 2018. A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city. *Science China Technological Sciences* 61, 317-329. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9170-5>
- 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>
- 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>
- Zheng, Y., Tang, L., Wang, H., 2021. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production* 328, 129488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>
- 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>