

ILHAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIAIS EM CAJAZEIRAS-PB

Maria Iriany Braga Martins

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Cajazeiras, PB, Brasil
maria.iriany@academico.ifpb.edu.br

João Victor Rocha de Souza

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Cajazeiras, PB, Brasil
joao.rocha@academico.ifpb.edu.br

Telma Lucia Bezerra Alves Aires

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Cajazeiras, PB, Brasil
telma.aires@ifpb.edu.br

Teobaldo Gabriel de Souza Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Cajazeiras, PB, Brasil
teobaldo.souza@ifpb.edu.br

Jacinta Ferreira dos Santos Rodrigues

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Cajazeiras, PB, Brasil
jacinta.rodrigues@ifpb.edu.br

RESUMO

O estudo teve como objetivo o diagnóstico de ilhas de calor urbanas por meio dos valores de temperatura de superfície terrestre (TST) e espacialização do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), comparando o espaço intraurbano e arredores da cidade de Cajazeiras, estado da Paraíba. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, faixa do infravermelho termal (temperatura) e faixas do vermelho e infravermelho próximo (índice de vegetação). Com os resultados obtidos observou-se que os valores mais elevados de temperatura estão presentes na área central do perímetro urbano, e o entorno da cidade, que contém áreas mais vegetadas, apresentou temperaturas mais amenas.

Palavras-chave: Temperatura da superfície. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. Sensoriamento remoto.

URBAN SURFACE HEAT ISLANDS IN CAJAZEIRAS-PB

ABSTRACT

The study aimed to diagnose urban heat islands by means of land surface temperature (TST) values and spatialization of the normalized difference vegetation index (NDVI), comparing the intra-urban space and the surroundings of the city of Cajazeiras, Paraíba state. Images from Landsat 8 satellite, thermal infrared band (temperature) and red and near infrared bands (vegetation index) were used. With the results obtained it was observed that the highest values of temperature are present in the most central area of the urban perimeter, and the surroundings of the city, which contains more vegetated areas, presented milder temperatures.

Keywords: Surface temperature. Normalized Difference Vegetation Index. Remote sensing.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tem sido reconhecido mundialmente nas últimas décadas, caracterizado pelo aumento da população em áreas urbanas e decorrente de múltiplos fatores, contribuindo para um quadro de transformações intensas nas cidades. No Brasil, esse processo foi acelerado, ou seja, rapidamente o país deixou de ser caracterizado por elevada população rural para apresentar grandes aglomerações urbanas. O planejamento do ambiente não precedeu esse crescimento urbano, ocasionando problemas complexos. Nesse contexto, Mendonça (2015) afirma que:

Um dos motivos da especial atenção destinada pela ciência às cidades decorre do fato de que, na atualidade, mais de 50% da população humana vive em áreas urbanas. Entrementes, não é a condição demográfica em si que coloca a importância do estudo da cidade em relevo, mas, sim, a complexidade de vida que nelas se manifesta para a maioria dos homens. As áreas urbanas atestam, especialmente nos países não desenvolvidos, indicadores gritantes de degradação da qualidade da natureza e da sociedade nos ambientes a elas circunscritos (MENDONÇA, 2015, p. 155).

Conti (2011) apresenta que, no Brasil, o recenseamento de 1940 registrou 30,24% de população urbana, ante 69,8% rural. O censo mais recente – realizado em 2010 – mostrou uma situação inversa: 84,3% urbana e 15,7% rural.

Esse processo de urbanização nas últimas décadas ocorreu de forma acelerada, comprometendo a estrutura e organização das cidades além de promover alterações ambientais que afetam o clima intraurbano. A esse respeito, um aspecto relevante a ser analisado é o mecanismo do clima urbano, no qual a cidade, ainda segundo Conti (2011 p. 47), “pode ser considerada um sistema aberto por onde circulam fluxos de energia, sofrendo processos de absorção, difusão e reflexão”.

Na década de setenta foi elaborada a proposta do Sistema Clima Urbano – SCU (Monteiro, 1976), com destaque para o estudo das cidades, em particular pela geografia. A colocação do clima urbano em termos definidos é evitada, no entanto, apresenta-se como enunciado básico que o clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização, que deve servir mais como resposta à pergunta: “Como devemos denominar um sistema singular, que abrange um clima local (fato natural) e a cidade (fato social)?”

O SCU tem orientado pesquisas no âmbito da climatologia geográfica brasileira. Mendonça (2015) ressalta os três subsistemas de interesse do estudo no SCU: físico/químico, termodinâmico e hidrometeorológico. Os dois últimos destacam-se como de maior interesse da climatologia brasileira. Na década de 2001/2010, aproximadamente 80% dos estudos realizados em âmbito nacional foram relacionados ao subsistema termodinâmico, que se expressam através do calor, ventilação e umidade nos referenciais básicos a essa noção. É um filtro perceptivo bastante significativo, pois afeta a todos permanentemente. Constitui, seja na climatologia médica, seja na tecnologia habitacional, assunto de investigação de importância crescente (MONTEIRO e MENDONÇA, 2013).

O desconforto térmico no espaço urbano, por exemplo, tem sido estudado em diversas cidades brasileiras. O adensamento de prédios, as pavimentações, a ausência de áreas verdes, a impermeabilização do solo, o calor antropogêneo (WANG et al. 2021) e alguns materiais utilizados pela construção civil são apontados como indutores do aumento de temperatura nas cidades, ocasionando amplitudes térmicas elevadas, conforme variação da cobertura do solo, ocasionando as Ilhas de calor urbanas (ICU).

As ilhas de calor urbanas (ICU) estão inseridas no subsistema termodinâmico e, sobre elas, apresentam-se três conceitos, que resguardam consensos:

- Mudanças superficiais e atmosféricas, devido à urbanização, geralmente levam a um campo térmico modificado, mais quente que as áreas não urbanizadas ao redor, principalmente à noite, ocasionando o fenômeno da ICU (VOOGT e OKE, 2003);
- Anomalia térmica positiva, que caracteriza a atmosfera das cidades em relação às áreas vizinhas (CONTI, 2011);
- Área mais quente do que seus arredores. Ela é calculada considerando-se a diferença da temperatura entre o ambiente construído e o não construído no mesmo instante (AMORIM, 2017);

Amorim (2017) elenca ainda os tipos de ICU citadas e detalhadas na literatura e as metodologias utilizadas para identificação:

- 1 – a ilha de calor superficial, diagnosticada por meio do sensoriamento remoto;
- 2 – a ilha de calor atmosférica inferior, compreendida entre o nível do solo e o nível médio dos telhados. Neste caso, as temperaturas são medidas abaixo do nível do topo dos edifícios, por meio de diferentes procedimentos, tais como, transectos móveis (medidas itinerantes com veículos) e pontos fixos por meio de uma rede de estações meteorológicas inseridas na malha urbana e no ambiente rural ou apenas com registradores automáticos de temperatura instalados em locais escolhidos no intraurbano e rural, de acordo com os objetivos e características das áreas;
- 3 – a ilha de calor da atmosfera urbana superior. Esta se sobrepõe a anterior e se estende por vezes até a atmosfera livre. Trata-se, portanto, da parte superior da camada limite urbana (AMORIM, 2017, p. 116).

Os estudos sobre ilhas de calor urbanas podem ser realizados por meio de imagens de satélites ou por sensores termais instalados em aeronaves. Nesta proposta, será objeto de análise a ICU superficial, diagnosticada por meio do sensoriamento remoto (SR), com identificação de temperaturas aparentes. O SR possibilita uma compreensão espacial do fenômeno e permite um monitoramento temporal da temperatura da superfície e da vegetação, dentre outras variáveis, com possibilidades de predição, como pode ser observado em AL KAFY et al. (2020). Além disso, observam-se melhorias crescentes na resolução espacial e temporal dos produtos (imagens), potencializando o uso dessa ferramenta na detecção de ICU.

Voogt e Oke (2003) corroboram explicando que, com o advento do controle e tecnologia de detecção térmica remota, a observação de forma distanciada de ICU tornou-se possível usando plataformas de satélite e aeronaves e forneceu novos caminhos para estudos dessa temática.

Amorim (2017 p. 117) diz que o sensoriamento remoto tem sido utilizado para avaliar temperaturas e outras características das superfícies, tais como: tipos de coberturas e pavimentos, vegetação e solo nu. “Isso é possível por meio da medição de energia refletida e emitida a partir dos objetos presentes na superfície. Mede-se com esses sensores a energia visível refletida e a radiação infravermelha térmica emitida pelos alvos”.

Em relação ao sensoriamento da vegetação, Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich (2012) afirmam que diversos índices de vegetação têm sido propostos na literatura com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Os autores explicam que quanto maior for a densidade da cobertura vegetal de uma determinada área, maior será a absorvância na região do visível, em razão da maior oferta de pigmentos fotossintetizantes. Por outro lado, maior será a reflectância verificada na região do infravermelho próximo, por causa do espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética na estrutura foliar das plantas.

Cabe ressaltar que a temperatura, um dos elementos do clima, é influenciada pelos fatores climáticos, tais como: cobertura vegetal e relevo (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007; AL-SAAD; JABER; AL-JIBOORI, 2020). A análise desses fatores auxilia na explicação de padrões espaciais de distribuição da temperatura.

Nos últimos anos, muitos estudos de detecção e monitoramento remoto da temperatura da superfície e seus condicionantes têm sido realizados em cidades de diferentes latitudes e tipos, em diversos países: Senanayake; Welivitiya; Nadeeka (2013) criaram um índice definido para identificar áreas críticas na cidade de Colombo, Sri Lanka, com base na distribuição de temperatura da superfície e

disponibilidade de cobertura vegetal, utilizando o NDVI (*Normalized Difference vegetation Index*). Marando et al. (2019) caracterizaram a ICU na cidade de Roma, Itália, utilizando dados termais do Landsat 8 e analisaram a influência de infraestruturas verdes na atenuação das temperaturas e MENG et al. (2017) que utilizaram uma série de dados MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), 12 anos, para gerar temperaturas de superfície terrestre e caracterizar a intensidade da ICU superficial de Pequim, na China, considerando critérios espaciais de delimitação do espaço urbano e identificando tendências temporais diárias e sazonais da temperatura.

Também no Brasil (SOUZA e BAPTISTA, 2005; STEINKE; STEINKE; SAITO, 2010; COELHO e CORREA, 2013 e SANTIAGO e GOMES, 2016) estudaram as ilhas de calor urbanas com dados de temperatura da superfície obtidos de sensores remotos infravermelhos térmicos. Destaque também tem sido dado para os estudos realizados em cidades médias e pequenas.

Prina e Trentin (2016) analisaram a correlação existente entre o mapeamento do uso da terra e da temperatura da superfície (em graus Celsius), utilizando imagens do satélite Landsat 8, tendo como área de estudo o município de Jaguari/RS/Brasil, evidenciando correlação entre áreas urbanizadas (caso da área urbana de Jaguari) com a formação de manchas de calor (maiores temperaturas).

Amorim (2017) analisou as ilhas de calor nas cidades que fazem parte da Raia Divisória São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul (Presidente Prudente - SP, Rosana - SP, Paranaíba - PR e Nova Andradina - MS), utilizando imagens de satélite Landsat 8, evidenciando alterações na superfície que produziram ilhas de calor superficiais. Ressaltou ainda que a população de baixa renda tem sua situação agravada na medida em que, por falta de opção, se utiliza de materiais construtivos pouco adequados, além de ocuparem lotes pequenos, completamente construídos, impermeabilizados e sem cobertura vegetal nas calçadas e no interior dos lotes.

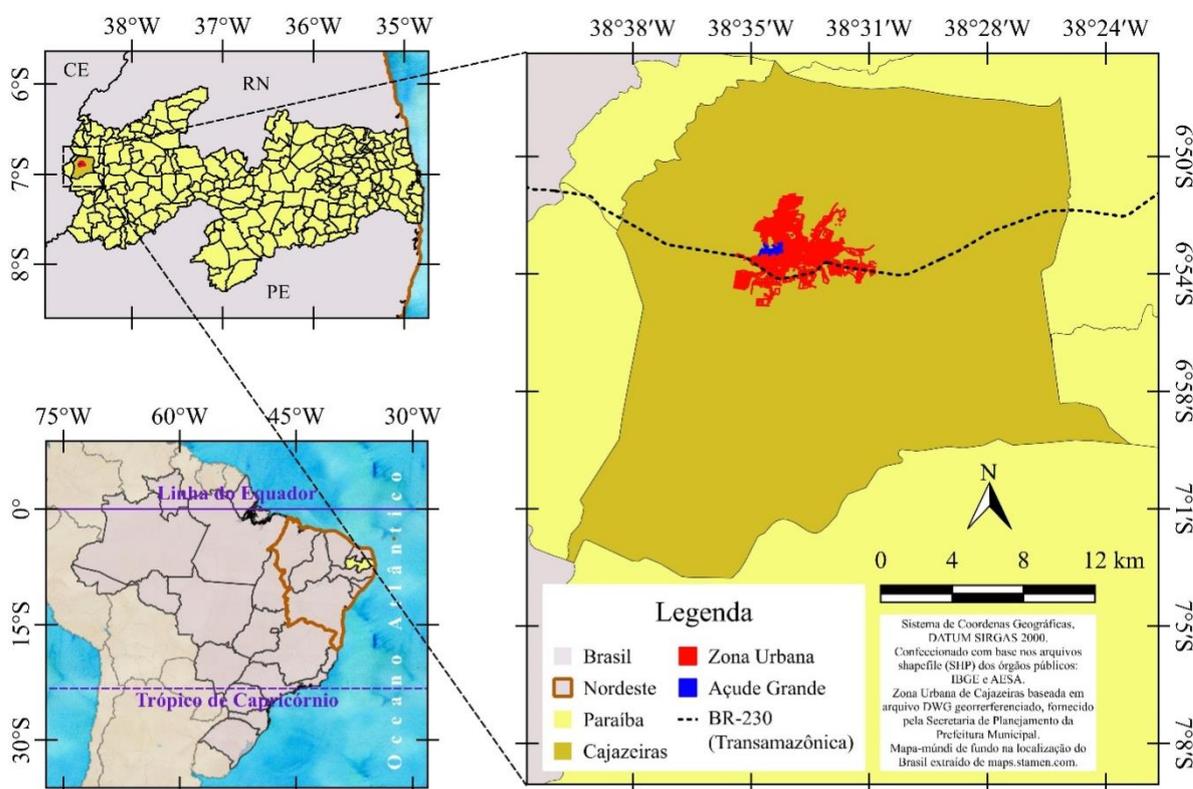
Diante do exposto, convém ressaltar ainda que o fenômeno das ICU tem sido pouco estudado em cidades médias e pequenas do semiárido brasileiro, que já são naturalmente quentes (balanço de energia positivo em todas as estações do ano) e que podem ter o campo térmico potencializado pelo processo de urbanização crescente.

Nesse contexto, o recorte territorial escolhido para estudo foi a cidade de Cajazeiras-PB, que está localizada no alto sertão do estado da Paraíba, semiárido brasileiro, e apresenta naturalmente temperaturas elevadas ao longo do ano. O presente estudo tem como objetivo identificar a formação de ilhas de calor urbanas, com base na comparação entre os valores de temperatura da superfície terrestre da mancha urbana e seu entorno, considerando o índice de vegetação por diferença normalizada, na cidade de Cajazeiras-PB.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Cajazeiras está localizado na região Oeste do estado da Paraíba e faz parte do semiárido brasileiro, distando cerca de 465 km da capital, João Pessoa (Figura 1).

Figura 1 - Localização do município de Cajazeiras – PB no estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil.



A população contabilizada no município tem aumentado nas últimas décadas, e no censo demográfico de 2010 foi de 58.446 habitantes, sendo 47.501 de residentes na zona urbana (IBGE, 2010) (Tabela 1). Para o ano de 2020 a estimativa foi de 62.289 habitantes (IBGE, 2020).

Tabela 1 - População de Cajazeiras – PB.

População	1970	1980	1991	2000	2010	2020*
Total	41.693	46.448	51.273	54.715	58.446	62.289
Urbana	24.935	31.566	38.329	41.964	47.501	-

Fonte - IBGE – Censos Demográficos. *Estimativa.

O Plano Diretor da cidade (1978) mostrou que Cajazeiras estava crescendo na direção Leste e Sul, e na saída para o município de Sousa-PB também houve ocupação. Além disso, a cidade já apresentava edificações importantes, como um hospital, um campo de futebol e de pouso. Os serviços educacionais oferecidos em Cajazeiras têm atraído muitos jovens residentes em municípios próximos, e até de outras regiões do país. O município conta com *Campus* da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), além de faculdades particulares. A cidade destaca-se ainda por oferecer serviços médico-hospitalares, comerciais e rodoviários aos municípios da região imediata.

Em relação à geomorfologia, Cajazeiras está situada na unidade denominada Depressão Sertaneja. Segundo Ab' Saber (1954), a morfologia das depressões semiáridas intermontanas do interior do Nordeste Brasileiro é inconfundível por si própria. Na maior parte dos casos são baixadas semiáridas, onduladas e extensivas, parcialmente rochosas e parcialmente coalhadas de detritos pouco espessos, embutidas entre os maciços antigos e cuevas ou ladeiras de chapadas. Entre o Ibiapaba e a Borborema e, em especial, entre o Araripe e a extremidade ocidental da Borborema, estenderam-se as

principais calhas de desnudação marginal, que correspondem às depressões sertanejas. A Figura 2 evidencia a paisagem sertaneja na cidade de Cajazeiras - PB.

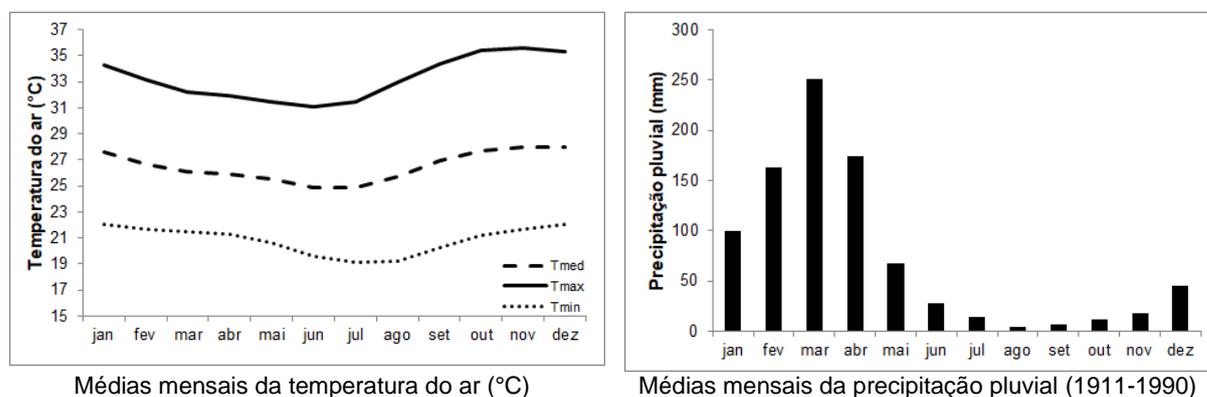
Figura 2 - Vista panorâmica da cidade de Cajazeiras, localizada na Depressão Sertaneja do estado da Paraíba.



Fonte - Arquivo dos autores.

Com relação à classificação climática para a região, identificou-se o tipo As (Clima Tropical), segundo a classificação de Koppen, realizada por Alvares et al. (2014) para todo o território nacional. O tipo As apresenta intensa estação seca na primavera (setembro a dezembro), temperatura média anual superior a 18°C, com verão seco. O município localiza-se na faixa tropical da Terra, a uma latitude de 06° S, próximo à área da Linha do Equador, na região intertropical que recebe grande quantidade de insolação. Os dados referentes à temperatura do ar e precipitação pluvial para o município de Cajazeiras são evidenciados na Figura 3. Observa-se baixa variabilidade da temperatura média do ar ao longo do ano, com valores entre 25 e 28 °C. A estação chuvosa está concentrada entre os meses de janeiro e abril, com valores médios anuais de 1.000 mm.

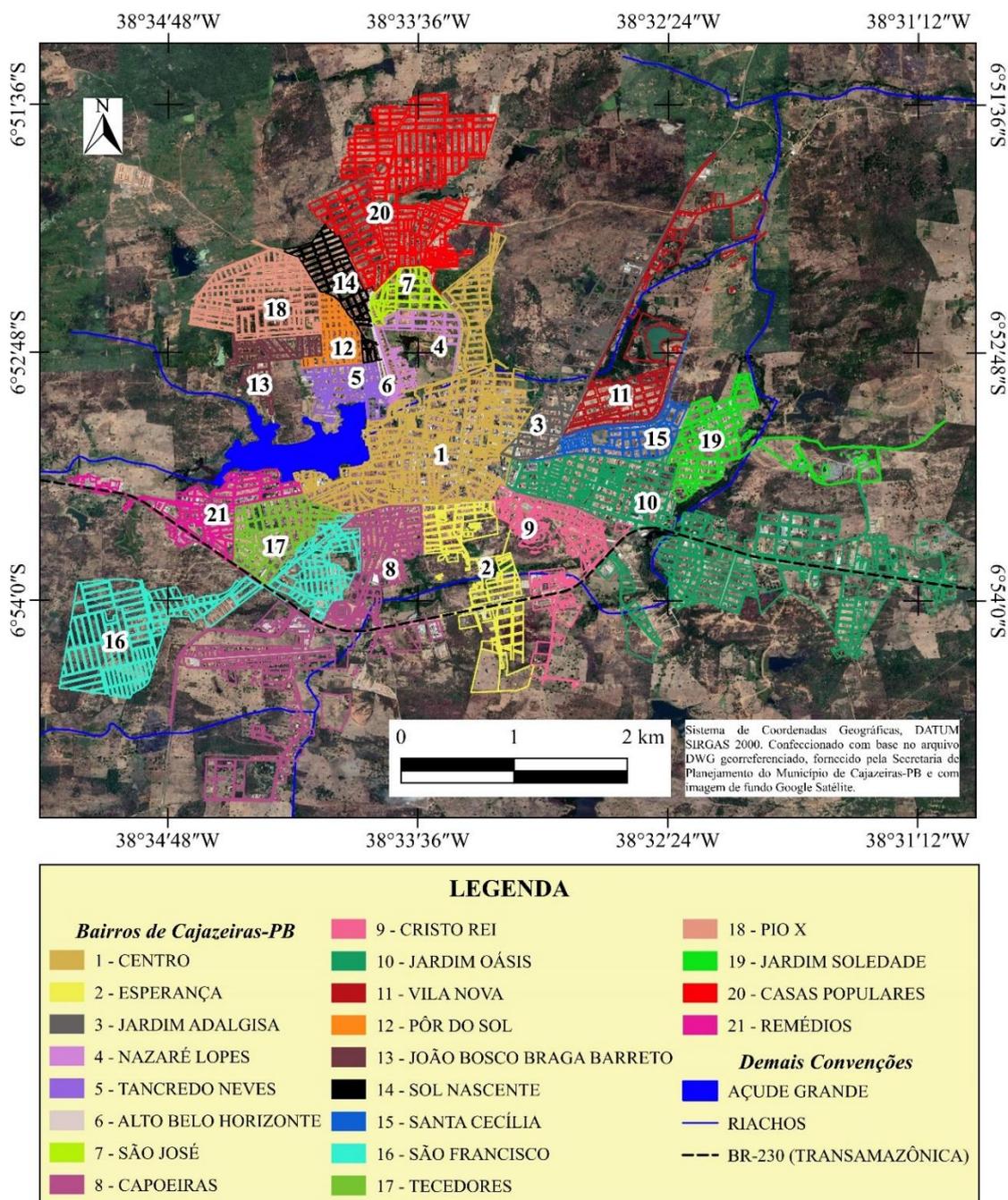
Figura 3 - Dados climáticos para o município de Cajazeiras - PB (6°53' S 38°34' W).



Fonte - DCA – UFCG.

Na Figura 4, observa-se a delimitação dos bairros da cidade de Cajazeiras, a drenagem principal e o Açude Grande, importante corpo hídrico, ao redor do qual a cidade está organizada.

Figura 4 - Área urbana de Cajazeiras - PB, com destaque para os bairros.



Fonte - Prefeitura Municipal de Cajazeiras, 2016.

METODOLOGIA

DADOS ORBITAIS

As imagens utilizadas são do satélite Landsat 8, sensores OLI/TIRS, padrão de Nível 1 (ortorretificados), o formato de saída dos dados é GeoTIFF, acompanhados de um arquivo metadados

(MTL). A resolução radiométrica entregue é de 16 Bits e o Datum é WGS 1984, projeção Universal Transversa de Mercator - UTM, sendo necessária reprojeção para sul, Datum SIRGAS 2000 (USGS, 2020).

Para estimar a temperatura da superfície terrestre (TST), foi utilizada a imagem do infravermelho termal do sensor TIRS (banda 10), com resolução de 100m e reamostrada para 30m. As imagens do vermelho e infravermelho próximo do sensor OLI (bandas 4 e 5, respectivamente) foram usadas para a geração do NDVI, com resolução espacial de 30m. As imagens foram obtidas gratuitamente pelo *Earth Explorer* e selecionadas considerando-se alguns critérios, como: ausência de nuvens e comparação de imagens da mesma estação do ano. As imagens do Landsat 8, órbita 216, ponto 65 utilizadas e suas características estão listadas no Quadro 1. Para dar suporte à análise da imagem, foram identificados os dados de precipitação pluvial (mm) de 1, 10 e 30 dias antes da obtenção da imagem.

Quadro 1 - Descrição das imagens utilizadas.

Data	Horário UTC	Ocorrência de Chuva (mm) antes do imageamento	Condições do tempo atmosférico na data do imageamento
06/06/2018	12:40:12	1 dia - 0 10 dias - 7,1 30 dias - 39,7	Estáveis. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) atua sobre o Oceano Atlântico entre 06°N/05°N.
13/07/2020	12:41:17	1 dia - 0 10 dias - 1,1 30 dias - 27,6	Chuvas concentradas no leste do Nordeste. A ZCIT atua em torno de 05°N e 06°N no Atlântico.

Fonte - AESA (2020a); CPTEC (2021).

As imagens de satélite dos meses da estação chuvosa para a região (jan-fev-mar-abr) estavam sempre comprometidas pelo efeito da cobertura de nuvens. Já as imagens das estações da primavera e verão não retratam a cobertura vegetal e sua atenuação da temperatura, devido à sazonalidade do bioma Caatinga.

GEOPROCESSAMENTO

Foi utilizado o QGIS 2.18.28 *Las Palmas*, software livre, para o tratamento das imagens e obtenção da TST e NDVI, bem como a edição final dos mapas, em ambiente de sistema de informações geográficas (SIG). O datum definido foi o SIRGAS 2000.

Também foi empregado o complemento RS&GIS, desenvolvido pelo Departamento de Mecânica Aplicada e Hidráulica, do Instituto Nacional de Tecnologia, Karnataka, Surathkal - NITK, da Índia, disponível no software QGIS. Utilizaram-se, ainda, as malhas dos setores censitários do IBGE (2017), malhas urbanas da secretaria de planejamento urbano da prefeitura municipal de Cajazeiras – PB e rede de drenagem principal do estado da Paraíba (AESA, 2020b).

TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE - TST (°C)

Para estimar a temperatura da superfície terrestre, foi utilizada a imagem do infravermelho termal (banda 10), do satélite Landsat-8, uma vez que “todos os corpos que apresentam temperatura acima do chamado zero absoluto ou zero Kelvin (-273,15°C) emitem radiação eletromagnética” (BAPTISTA, 2012, p. 47).

Inicialmente os dados do Landsat Nível 1 foram convertidos em radiância espectral, usando os fatores de redimensionamento da radiância contidos no metadados (MTL) da imagem (USGS, 2020), conforme equação 1:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Onde: L_{λ} = Radiância Espectral em (Watts / (m² srad μ m)); M_L = Fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10; Q_{cal} = Valores de pixel quantificados e calibrados do produto padrão (DN) = Imagem banda 10; A_L = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10.

A radiância espectral é convertida em temperatura (Kelvin) e, posteriormente, em temperatura graus Celsius (°C), equação 2:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (2)$$

Onde: T_B = Temperatura de brilho ou aparente registrada pelo sensor do satélite em Kelvin (K), originalmente; K_2 = Constante de calibração 2; K_1 = Constante de calibração 1; L_{λ} = Radiância Espectral em (Watts / (m² srad μ m)).

Após essa etapa, foi considerada a correção para emissividade, com base na Lei de Planck, conforme Artis e Carnahan (1982), de acordo com a equação 3:

$$TST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda * T_B}{\rho}\right) \text{LN } e} \quad (3)$$

Onde: TST = Temperatura da Superfície Terrestre; T_B = Temperatura de brilho ou aparente; λ = Comprimento de onda médio do infravermelho termal em μ m; $\rho = h * c / j$ - (h = constante de Planck (6,626176 x 10⁻³⁴ J.s); c = velocidade da luz no vácuo (2,997925 x 10⁸ m/s); j = constante de Boltzmann (1,380662 x 10⁻²³ J/K); $\text{LN } e$ = logaritmo da emissividade da superfície.

As emissividades utilizadas no algoritmo RS&GIS são obtidas com base no NDVI, e estabelecidas para as classes de NDVI. Como produto de saída, obtiveram-se as imagens de temperatura de superfície, que foram reclassificadas em sete classes com intervalo de 2 °C.

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Para obtenção do índice de vegetação, os valores digitais das bandas 4 e 5 foram convertidos em reflectância, utilizando-se os coeficientes de redimensionamento das bandas 4 e 5, conforme equação 4:

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho} \quad (4)$$

Onde: ρ_{λ} = reflectância espectral; M_{ρ} = fator multiplicativo da reflectância para a banda correspondente; Q_{cal} = valores quantizados e calibrados do pixel (número digital); A_{ρ} = fator aditivo da reflectância para a banda correspondente.

Após isso, foi calculado o índice de vegetação por diferença normalizada, proposto por Rouse; Schell e Deering (1973), que normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1, equação 5:

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

Onde: NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*; NIR – é a reflectância no infravermelho próximo - banda 5; VIS – é a reflectância vermelho (visível) – banda 4.

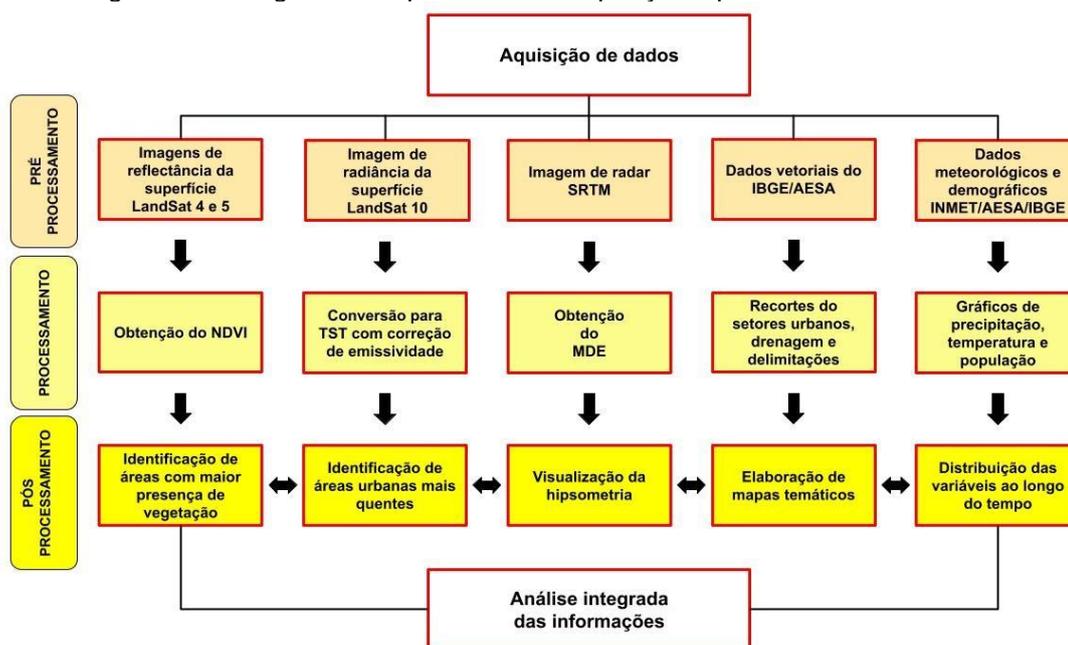
Como produto de saída são geradas as imagens de NDVI, que foram reclassificadas em 6 classes com intervalo de 0.2.

VARIAÇÃO HIPSOMÉTRICA (ALTITUDE)

Para elaboração do mapa hipsométrico do município, foi utilizada a imagem digital orbital da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, disponibilizada após refinamento e processamento, em formato GeoTiff (.tif), contendo Modelo Digital de Elevação (MDE), correspondente ao TOPODATA – Banco de dados geomorfométricos do Brasil. A imagem apresenta 30 metros de resolução e foi recortada com o *shapefile* do município.

Todas as informações sobre pré-processamento, processamento e pós – processamento dos dados estão resumidas no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma dos processos de aquisição e processamento de dados.



As etapas detalhadas evidenciam o conjunto de dados utilizados e processados na análise integrada do espaço urbano da cidade de Cajazeiras e seu entorno, considerando aspectos do relevo e da cobertura do solo e seus efeitos na temperatura de superfície terrestre.

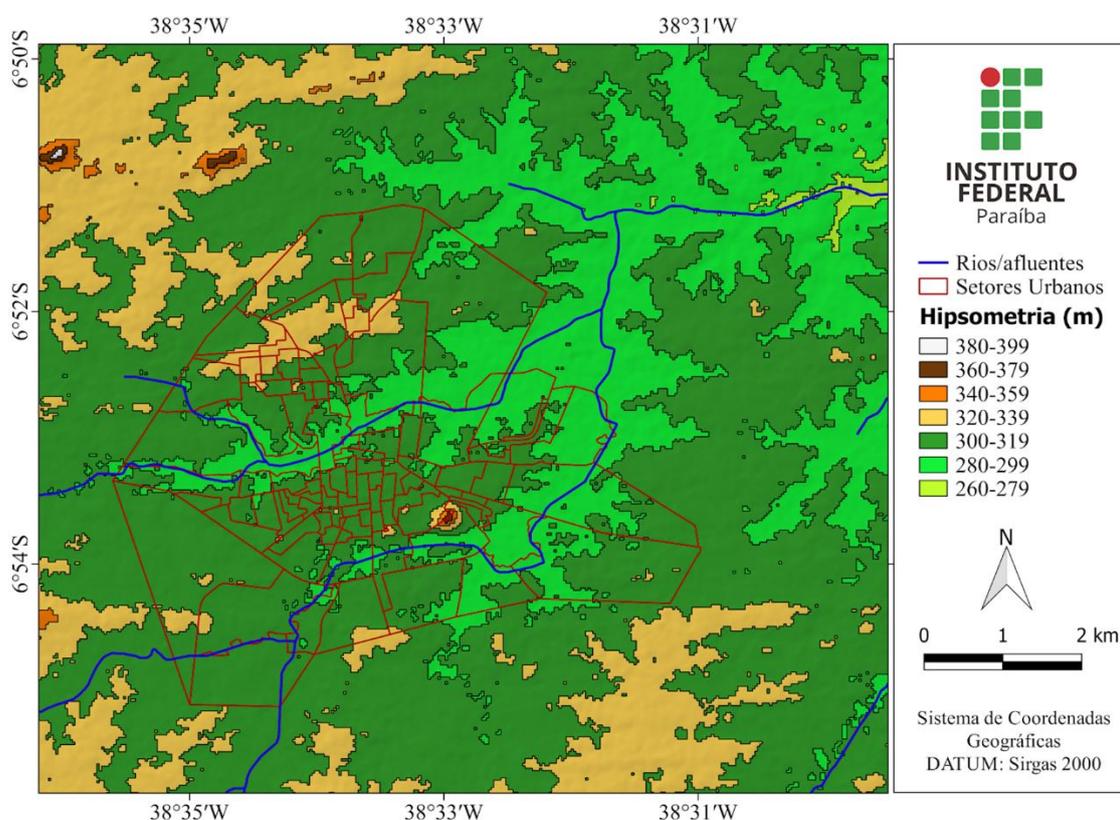
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para compreender o relevo da área de estudo, foram identificadas as faixas hipsométricas, as cotas máximas e mínimas de altitude. A Figura 6 evidencia o detalhamento da hipsometria. Verifica-se que a cidade está situada predominantemente entre as cotas altimétricas de 280-320 m de altitude. Na região mais ao norte, nas proximidades do *Campus* da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG ocorrem as cotas mais elevadas (320 a 339 m).

Outro destaque é para o ponto com maior elevação (sudeste), denominado "Morro do Cristo", local com grande importância por ser estratégico para o setor de telecomunicações, ponto turístico e atrativo religioso. Seu topo está na faixa de 360 a 379 m de altitude.

A elaboração de um mapa hipsométrico é relevante ao estudar o clima urbano, já que possibilita a observação da variação altimétrica. O relevo é um fator importante na análise do clima das cidades, porque os elementos climáticos são influenciados diretamente pela variação deste (MONTEIRO, 1976). Entretanto, a hipsometria de Cajazeiras não revelou diferenças consideráveis, e não influencia a variação dos elementos climáticos. Não é identificado na cidade a presença de vales profundos e serras que barrem a circulação dos ventos.

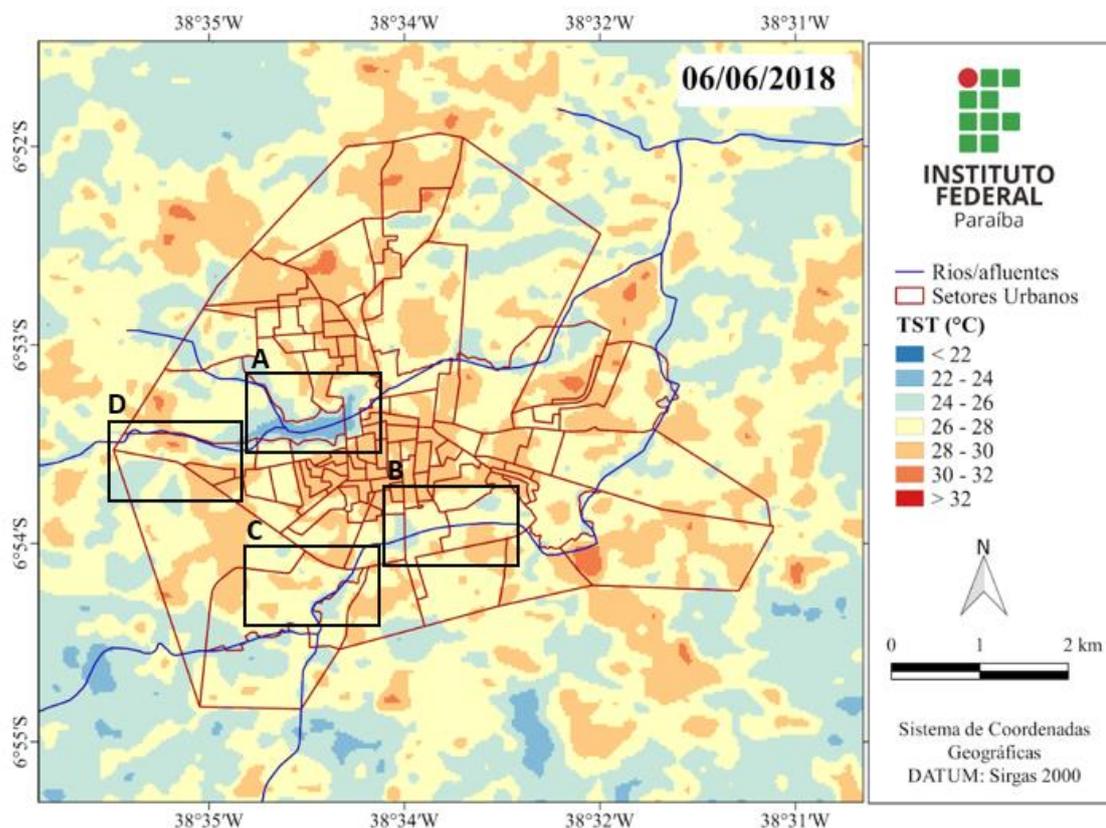
Figura 6 - Detalhamento da hipsometria para a área urbana de Cajazeiras - PB.



A Figura 7 apresenta os valores de temperatura de superfície (TST) obtidos após o processamento da imagem e os subrecortes A, B, C e D. Os resultados menos elevados foram identificados no entorno da zona urbana (22-24°C). Já os mais elevados foram observados no espaço intraurbano, sobretudo, na parte mais central e norte da cidade, com temperaturas em alguns pontos atingindo 32 °C. Os valores amostrados no recorte apresentaram uma amplitude térmica de 10°C. É uma diferença considerável, e ressalta-se que a captura da imagem foi realizada em junho - outono austral, época do ano em que as condições climáticas estão naturalmente um pouco mais amenas na região.

Observa-se que as áreas com água apresentam baixas temperaturas (A), corpo hídrico artificial conhecido localmente como Açude Grande de Cajazeiras e áreas com solo exposto (D), temperaturas mais quentes. Algumas das áreas com solo exposto são terrenos sem cobertura vegetal, que estão sendo loteados para a construção de unidades habitacionais. Os bairros Pio X e Casas Populares, localizados mais ao norte, apresentaram temperaturas mais elevadas. No centro há uma mancha contínua com temperaturas entre 28°C e 30°C, indicando uma possível consolidação de ICU.

Figura 7 - Análise da TST e NDVI para o ano de 2018 da zona urbana de Cajazeiras - PB e seu entorno.



A – Bairro Tancredo Neves; B – Bairro Esperança; C – Bairro Capoeiras; D – Bairro Remédios.

Na Figura 8 é possível constatar áreas específicas, como o Açude Grande e parte do centro da cidade, áreas com presença de solo exposto, com vegetação mais densa e cursos d'água (riachos ou córregos). O Açude Grande pode ser identificado por meio do seu formato, textura lisa e cor. Esta massa de água apresentou temperaturas menos elevadas que o seu entorno.

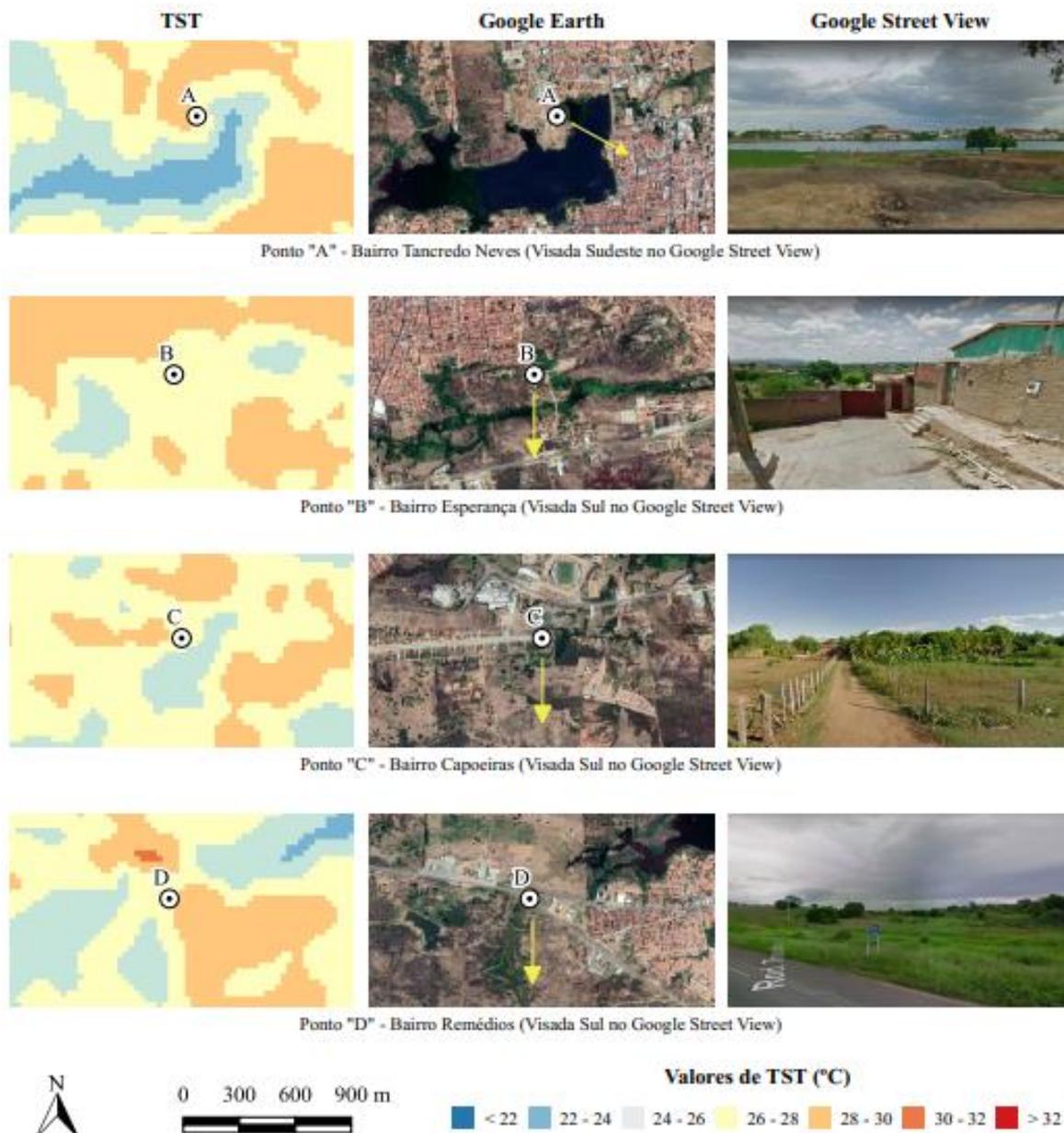
Próximo ao açude, identifica-se a área central da cidade, com muitas edificações, poucas áreas verdes, e com valores mais elevados de temperatura de superfície. Na zona em que se localiza o bairro das Casas Populares, onde existem loteamentos, ocorre a presença de solo exposto – com valores entre 30-32°C. Marando et al. (2019), estudando mitigações de ilhas de calor urbanas, identificaram áreas mais quentes onde ocorrem solos expostos e associaram à baixa capacidade de condutividade de calor desses solos, que são rapidamente aquecidos pelo sol da manhã.

De acordo com Pereira; Angelocci e Sentelhas(2007), os solos desnudos ficam sujeitos a grandes variações térmicas diárias nas camadas mais superficiais, em dias de alta irradiância. A existência de cobertura com vegetação ou com resíduos vegetais modifica o balanço de energia, pois a cobertura intercepta a radiação solar antes dela atingir o solo. Também Souza (2020) aponta que, com a perda de folhas das plantas da Caatinga, grande parte da radiação solar disponível é usada para aquecer o solo e o ar, o que causa um aumento da temperatura do ambiente. Quando o solo fica exposto, por razões naturais ou antrópicas, há um aumento de temperatura superficial.

Em relação à vegetação mais densa (Leste), nota-se uma relação direta com as temperaturas mais amenas, para as condições da imagem analisada. Tal condição verifica-se também nos cursos de água (riachos/córregos), que apresentam um formato quase linear, com temperaturas entre 24 e 26 °C.

Segundo Christopherson e Birkeland (2017), o calor sensível é inferior nas florestas urbanas em relação a outras partes da cidade por causa da sombra das copas das árvores e de processos vegetais, como a transpiração, que aportam umidade ao ar e as diferenças das temperaturas diurnas entre parques florestais e áreas urbanizadas podem atingir 10°C.

Figura 8 - Temperatura da superfície *versus* cobertura do solo na cidade (fotointerpretação) para os subrecortes A, B, C e D - Imagem: 06/06/2018.



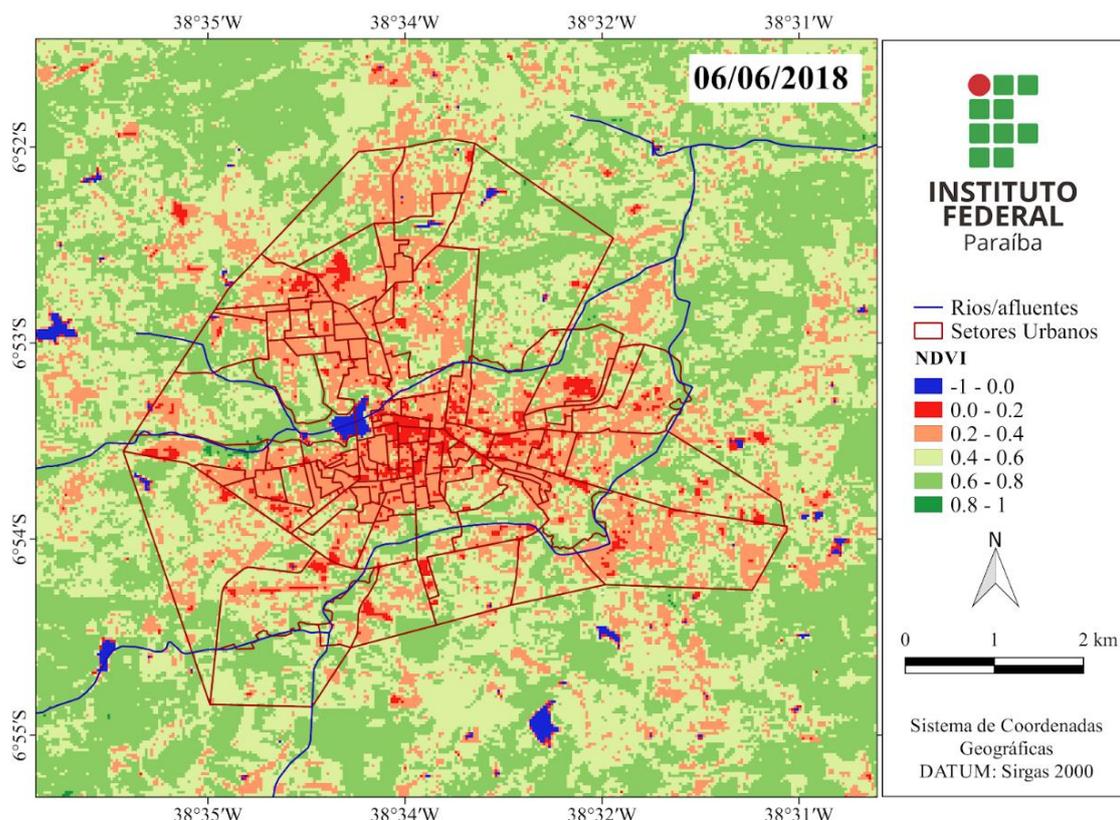
Fonte - Imagens *Google Earth*.

Os valores do NDVI são observados na Figura 9, e as áreas do espaço intraurbano apontam valores muito baixos (0,0 a 0,4), caracterizando a baixa presença de vegetação. Nos fluxos d'água ocorre a presença de vegetação ciliar, caracterizada por valores entre 0,6 a 0,8. As áreas com valores negativos de NDVI correspondem a corpos hídricos. Comparando-se as figuras 7 e 9, é visível a relação entre

presença de vegetação e temperaturas mais amenas. Essa relação ocorre porque há um efeito de resfriamento ocasionado pela evaporação e transpiração vegetal.

Conti (2011) explica que, com a redução da evaporação de superfícies líquidas e vegetadas, diminui também o consumo de energia (cal/g) utilizado nesse processo; isso significa mais energia disponível no ambiente, aumentando a sensação de desconforto térmico.

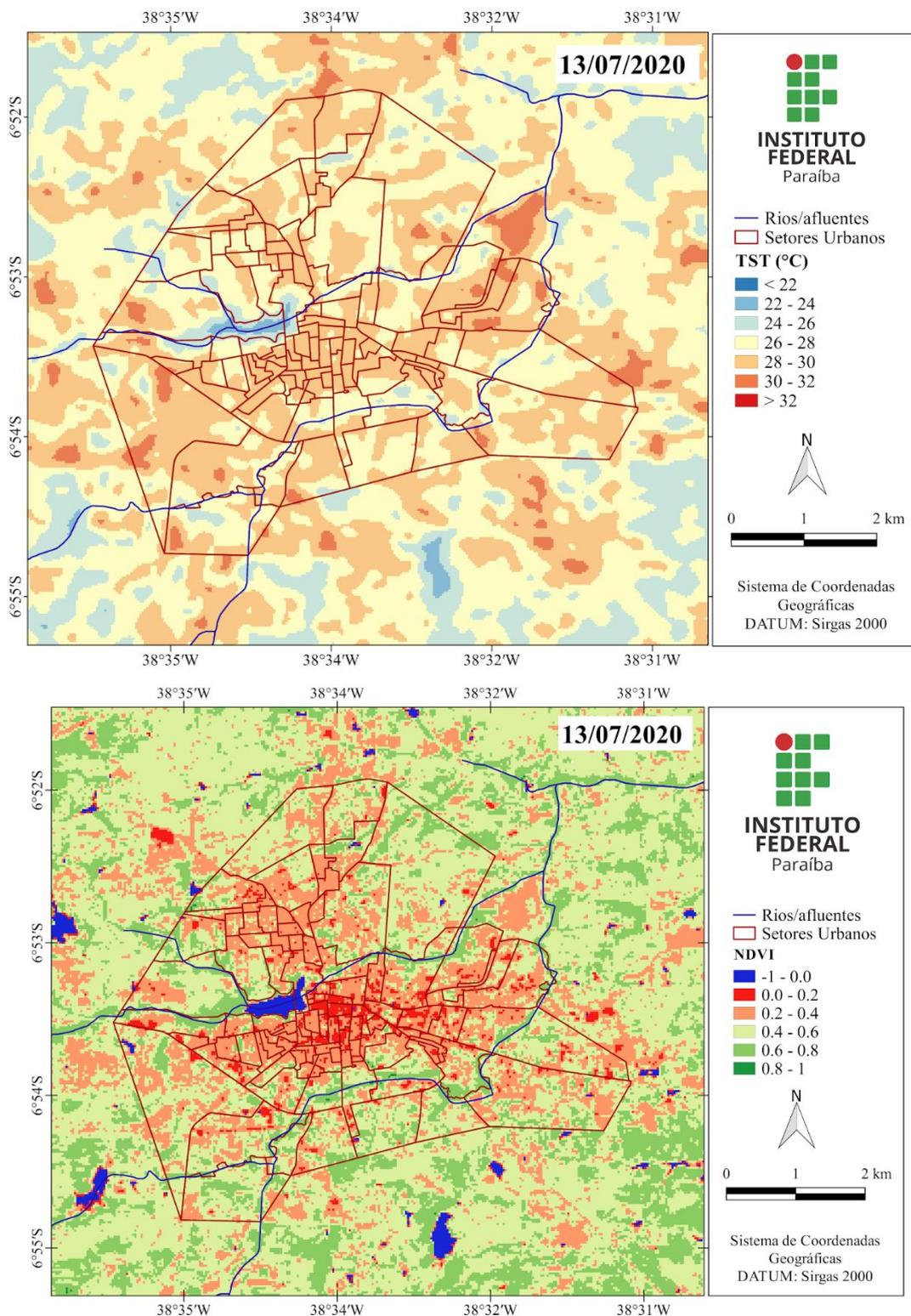
Figura 9 - Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) da zona urbana de Cajazeiras - PB e seu entorno.



A Figura 10 exibe os valores de TST e NDVI para uma imagem de julho/2020. Observa-se uma maior extensão das áreas com temperaturas mais elevadas. Esses valores permanecem no espaço intraurbano, mas também afetam os arredores, atingindo 32°C em alguns locais. Nas cidades e, sobretudo, nas áreas centrais, ocorre um aquecimento antropogênico derivado dos veículos automotores, fábricas, utilização dos condicionadores de ar, etc.

Os valores de NDVI predominantes no recorte são entre 0,4 – 0,6, evidenciando uma mudança da vegetação, quando comparado ao ano de 2018, que apresentou muitas áreas com valores de 0,6 a 0,8, valores também apontados por Barbosa e Kumar (2016) e Cunha et al. (2015), localidades da região semiárida brasileira. Vale salientar que a captura da imagem de 2020 ocorreu no mês de julho, mais distante da estação chuvosa da região, o que pode ocasionar redução da biomassa (perda de folhas), uma característica natural do bioma Caatinga, devido a sua forte característica sazonal, aspectos concordantes com Erasmi et al. (2014). O desenvolvimento da vegetação nativa na região é condicionado à variabilidade das chuvas. A baixa cobertura vegetal observada no centro da cidade acentua as temperaturas elevadas.

Figura 10 - Análise da TST e NDVI para o ano de 2020 da zona urbana de Cajazeiras - PB e seu entorno.



Ainda segundo Christopherson e Birkeland (2017), a remoção da vegetação ou ausência de biomassa e o aumento da produção de materiais de fabricação humana que retêm calor são duas das causas

mais significativas das ICU. E aponta: “as superfícies urbanas (metal, vidro, concreto, asfalto) conduzem até três vezes mais energia do que o solo úmido e arenoso”. A radiação que incide nessas superfícies se acumula na forma de energia durante o dia e a noite é liberada para a atmosfera, o que muitas vezes intensifica as ilhas de calor no período da noite, causando desconforto para os cidadãos, especialmente àqueles de baixo poder aquisitivo, que não possuem condições de minorar essas consequências.

As superfícies urbanas frequentemente possuem albedo baixo, o que contribui para absorção e retenção de calor. Nesse sentido, Mello; Martins e Sant’anna Neto(2009) ressaltam a importância do tipo de material construtivo utilizado nas edificações urbanas. Os autores observaram que a cobertura de fibrocimento apresentou maior acúmulo de calor na superfície do material, devido a um albedo inferior, em comparação com a cobertura de cerâmica, por exemplo, que possui albedo mais elevado, tendo assim, maior capacidade de reflexão e temperatura menor no interior da residência. Os autores destacam ainda que outros fatores como: áreas verdes, intensidade de pavimentação e adensamento de edificações não são pensados para proporcionar melhor qualidade de vida à população.

Dessa forma, os estudos sobre a cidade precisam considerar todos os aspectos que interferem na produção do clima urbano. Aspectos sobre o relevo da cidade, cobertura do solo e composição dos materiais construtivos e implantação de infraestruturas urbanas verdes (Gómez-Villarino; Gómez Villarino e Ruiz-Garcia 2021) auxiliam no planejamento e produção de cidades mais sustentáveis e confortáveis, do ponto de vista térmico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A urbanização crescente da cidade de Cajazeiras – PB tem sido acompanhada por rápidas modificações na paisagem e no sistema climático urbano. Este último, embora menos perceptível, talvez não tenha destaque nas agendas de gestores e planejadores do espaço urbano. No entanto, o conhecimento do problema das ilhas de calor urbanas, suas causas e consequências, é relevante quando se almeja uma cidade mais sustentável e confortável.

O presente estudo identificou áreas superficiais urbanas mais quentes que o entorno, com presença de cobertura vegetal. Na mancha urbana, ganha destaque a região central, o que pode indicar a formação de uma ICU. O adensamento urbano, comum à maioria das cidades brasileiras e também identificado na cidade em análise, tem provocado alterações climáticas urbanas, identificadas nas condições instantâneas das imagens analisadas. Essas alterações são preocupantes porque a cidade já é caracterizada como muito quente, dadas as suas características geográficas de localização (relevo, continentalidade, efeitos da latitude, etc.).

A amplitude máxima observada na imagem de 2018, entre área urbana e rural, se aproxima de 10°C. O NDVI identificou áreas com vegetação no entorno e como esse fator influenciou na ocorrência de temperaturas menores. Logo, é imprescindível que as cidades considerem a ampliação/manutenção de áreas verdes e que a vegetação nativa nas adjacências seja preservada. A contribuição deste estudo reside, portanto, na abordagem de uma cidade intermediária, conforme descrição realizada por Dantas e Clementino (2013), localizada no semiárido, e que pode ter um crescimento melhor conduzido.

O sensoriamento remoto se mostrou uma ferramenta essencial para a espacialização das variáveis principais - temperatura da superfície terrestre e índice de vegetação - viabilizando a análise das diferentes coberturas do solo, considerando aspectos espaciais e temporais.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras*, à Pró-Reitoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação e ao apoio financeiro decorrente do Edital Interconecta IFPB - N^o 01/2020. Agradecemos também aos dois revisores anônimos pelas sugestões que nos ajudaram a melhorar a qualidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AB’SABER, A. N. Depressões periféricas e depressões semiáridas no nordeste do Brasil. **Boletim Paulista de Geografia - BPG**, n. 22, 1954.

- AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Dados meteorológicos.** Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/>. Acesso em: 17 mar. 2020a.
- _____. **Geoportal - Shapefiles.** Disponível em: <<http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento>>. Acesso em: 17 mar. 2020b.
- AL KAFY, A.; RAHMAN, M. S.; AL- FAISAL, A.; HASAN, M. M.; ISLAM, M. Modelling future land use land cover changes and their impacts on land surface temperatures in Rajshahi, Bangladesh. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100314>
- AL-SAAD, L. M.; JABER, S. H.; AL-JIBOORI, M. H. Variation of urban vegetation cover and its impact on minimum and maximum heat islands. **Urban Climate**, 34, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100707>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, M. C. C. T. Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil. **Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia**, v. 105, p. 111-133, 2017. <https://doi.org/10.18055/Finis6888>
- ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 12, p. 313-329, 1982. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8)
- BAPTISTA, G. M. de M. Sensores Imageadores na Faixa Termal (8 – 14 µm). In: MENESES, P. R. ALMEIDA, T. (Orgs.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** UNB: 2012. p. 47 -55.
- BARBOSA, H.A.; KUMAR, T.V.L. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 124, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>
- CAJAZEIRAS (Município). Prefeitura Municipal. **Plano Diretor da cidade de Cajazeiras.** Cajazeiras: Grafset, 1978.
- CHRISTOPHERSON, R. W.; BIRKELAND, G. H. **Geossistemas: uma introdução à geografia física.** 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.
- COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura De Superfície Celsius Do Sensor Tirs/Landsat-8: Metodologia E Aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica/RGA**, v.7, p. 31-45, 2013. <https://doi.org/10.18227/1678-7226rga.v7i1.2996>
- CONTI, J. B. **Clima e meio ambiente.** 7 ed. São Paulo: Atual, 2011. 96 p.
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – (2016). **Boletim Técnico do dia 06/06/2018 e 13/07/2020.** Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso em 17 mar. 2021.
- CUNHA, A.P.M.; ALVALÁ, R.C.; NOBRE, C.A.; CARVALHO, M.A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.010>
- DANTAS, J. R. de Q.; CLEMENTINO, M. do L. M. O papel das cidades (inter) médias para o desenvolvimento regional: um estudo a partir dos centros sub-regionais (Pau dos Ferros-RN, Cajazeiras-PB e Sousa-PB). **GeoUERJ**, v. 1, n. 24, 2013. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2013.6915>
- DCA/UFMG. Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). **Clima.** Disponível em <http://www.dca.ufcg.edu.br/clima/dadospb.htm>. Acesso em 10 ago. 2020.

ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M. P.; MATSCHULLAT, J. Vegetation Greenness in Northeastern Brazil and Its Relation to ENSO Warm Events. **Remote Sensing**, v. 6, p. 3041-3058, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6043041>

GÓMEZ-VILLARINO, M.T.; GÓMEZ VILLARINO, M.; RUIZ-GARCIA, L. Implementation of Urban Green Infrastructures in Peri-Urban Areas: A Case Study of Climate Change Mitigation in Madrid. **Agronomy**, v. 11, n. 31.2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010031>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 08 out. 2020.

_____. **Estimativas de população**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/estimapop/tabelas> Acesso em: 20 maio 2021.

_____. **Malha de Setores Censitários 2017**. Disponível em: www.ibge.gov.br/geociencias/malhas-territoriais Acesso em: 30 ago. 2020.

MARANDO, F.; SALVATORI, E.; SEBASTIANI, A.; FUSARO, L.; MANES, F. Regulating Ecosystem Services and Green Infrastructure: assessment of Urban Heat Island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. **Ecological Modelling**, v. 392, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011>

MELLO, M. A. R. de; MARTINS, N.; SANT'ANNA NETO, J. L. A influência dos materiais construtivos na produção do clima urbano. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.5, 2009.

MENDONÇA, F. de A. O Estudo do SCU – Sistema Clima Urbano – no Brasil: aplicações e avanços. In: MONTEIRO, C. A. de F.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MENDONÇA, F.; ZAVATINI, J. A. (Org.) **A construção da climatologia geográfica no Brasil**. Campinas: Alínea, 2015. p. 155 – 166.

_____.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Noções Básicas e Climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 208 p.

MENG, Q.; ZHANG, L.; SUN, Z; MENG, F.; WANG, L.; SUN, Y. Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. **Remote Sensing of Environment**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.019>

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e clima urbano**. Tese (Livre Docência em Geografia) FFLCH/ USP, São Paulo, 1976.

_____.; MENDONÇA, F. de A. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2013. 192 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

PRINA, B. Z.; TRENTIN, R. Análise da temperatura da superfície por meio de imagens landsat-8: estudo de caso para o município de Jaguari/RS/Brasil. **Formação (on-line)**, v. 3, n. 23, p. 264 – 285, 2016.

ROUSE, J. W., R. H.; SCHELL, J. A.; D. W. DEERING. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, Greenbelt: NASASP, 351, p. 3010-3017, 1973.

SANTIAGO, D. de B.; GOMES, H. B. Estudo de Ilhas de Calor no Município de Maceió/AL usando Dados Orbitais do Landsat 5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 793-803, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160053>

SENANAYAKE, I. P.; WELIVITIYA, W.D.D.P.; NADEEKA, P.M. Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. **Urban Climate**, v.5, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.07.004>

SOUZA, D. D. **Adaptações de plantas da Caatinga**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

SOUZA, O. D.; BAPTISTA, M. M.G. Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** INPE, 2005. p. 4525-4530.

STEINKE, V. A.; STEINKE, E. T.; SAITO, C. H. Estimativa da temperatura de superfície em áreas urbanas em processo de consolidação: reflexões e experimentos em Planaltina-DF. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 6, p. 37-56, 2010. <https://doi.org/10.5380/abclima.v6i0.25604>

WANG, Z.; MENG, Q.; ALLAM, M.; HU, D.; ZHANG, L.; MENENTI, M. Environmental and anthropogenic drivers of surface urban heat island intensity: A case-study in the Yangtze River Delta, China. **Ecological Indicators**, v. 128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107845>

USGS – United States Geological Survey. **Landsat Missions**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370 - 384, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

Recebido em: 31/03/2021

Aceito para publicação em: 06/07/2021