Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E A MORFOLOGIA URBANA COM BASE NO ZONEAMENTO CLIMÁTICO LOCAL DE OLINDA-PE

Relation between land surface temperature and urban morphology based on local climate zones in Olinda-PE

Relación entre la temperatura de la superficie terrestre y la morfología urbana a partir de la zonificación climática local de Olinda-PE

Ariadne Fernanda Ferraz Vieira
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
ariadne.vieira@ufpe.br

Cristiana Coutinho Duarte
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
cristiana.duarte@ufpe.br

Edmário Marques de Menezes Júnior
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
edmario.menezes@capufpe.com

Ayobami Badiru Moreira
Universidade de Friburgo, Alemanha
ayo.badiru@hotmail.com

Ranyére Silva Nóbrega
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
ranyere.silva@professor.ufcg.edu.br

Resumo: Este estudo teve como objetivo estimar a suscetibilidade à ocorrência de Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUsup) por meio do mapeamento e caracterização das Zonas Climáticas Locais (LCZ) no campo térmico do município de Olinda-PE. Como quinto município mais populoso do estado de Pernambuco e parte da Região Metropolitana do Recife (RMR), Olinda acompanhou o processo de expansão urbana dessa região, refletindo em desigualdades socioambientais expressas em sua pa

isagem. O crescimento urbano acelerado e desordenado, associado ao adensamento populacional, resulta em respostas térmicas diferenciadas da superfície, como a formação de ICUsup. A metodologia aplicada envolveu a delimitação das LCZ do município e mapeamento térmico com dados do satélite Sentinel-3 para identificar áreas suscetíveis a ICUsup. Os resultados foram apresentados em fichas técnicas descritivas das LCZ identificadas em pontos específicos, destacando a influência de fatores como fluxo antropogênico, tipo de cobertura do solo e registro de temperatura de superfície terrestre (TST). Este estudo apresenta um potencial significativo para subsidiar políticas de planejamento urbano voltadas à mitigação de anomalias térmicas e promoção de ambientes urbanos mais resilientes, além de oferecer ferramentas para estratégias de adaptação às mudanças climáticas em cidades brasileiras com características históricas e paisagísticas semelhantes às de Olinda.
Palavras-chave: Clima urbano. Zonas climáticas locais. Ilhas de Calor Superficiais.

Abstract: This study aimed to estimate the susceptibility to the occurrence of Surface Urban Heat Islands (SUHI) through the mapping and characterization of Local Climate Zones (LCZ) within the thermal field of the municipality of Olinda-PE. As the fifth most populous municipality in the state of Pernambuco and part of the Recife Metropolitan Region (RMR), Olinda has experienced the region's urban expansion process, reflected in socio-environmental inequalities throughout its landscape. Rapid and unplanned urban growth, combined with population densification, results in differentiated thermal responses of the surface, such as the formation of SUHI. The applied methodology involved the delineation of LCZs in the municipality and thermal mapping using data from the Sentinel-3 mission to identify areas susceptible to SUHI. Results were presented in descriptive technical sheets for each LCZ identified at specific points, highlighting the influence of factors such as anthropogenic flow, land cover type, and land surface temperature (LST) records. This study holds significant potential for supporting urban planning policies aimed at mitigating thermal anomalies and promoting more resilient urban environments, as well as providing tools for climate adaptation strategies in Brazilian cities with historical and landscape characteristics similar to those of Olinda.
Keywords: Urban climate. Local climate zones. Surface urban heat islands.

Resumen: Este estudio tuvo como objetivo estimar la susceptibilidad a la ocurrencia de Islas de Calor Urbanas Superficiales (ICUsup) mediante el mapeo y la caracterización de las Zonas Climáticas Locales (LCZ) en el campo térmico del municipio de Olinda-PE. Como el quinto municipio más poblado del estado de Pernambuco y parte de la Región Metropolitana de Recife (RMR), Olinda ha experimentado el proceso de expansión urbana de esta región, reflejado en desigualdades socioambientales presentes en su paisaje. El crecimiento urbano acelerado y desordenado, junto con la densificación poblacional, genera respuestas térmicas diferenciadas de la superficie, como la formación de ICUsup. La metodología aplicada incluyó la delimitación de las LCZ del municipio y el mapeo térmico utilizando datos de la misión Sentinel-3 para identificar áreas susceptibles a ICUsup. Los resultados se presentaron en fichas técnicas descriptivas de las LCZ identificadas en puntos específicos, destacando la influencia de factores como el flujo antropogénico, el tipo de cobertura del suelo y el registro de la temperatura de la superficie terrestre (TST). Este estudio tiene un potencial significativo para apoyar políticas de planificación urbana orientadas a la mitigación de anomalías térmicas y la promoción de entornos urbanos más resilientes, además de ofrecer herramientas para estrategias de adaptación al cambio climático en ciudades brasileñas con características históricas y paisajísticas similares a las de Olinda.
Palabras clave: Clima urbano. Zonas climáticas locales. Islas de calor urbanas superficiales.

Submetido em: 20/07/2024
Aceito para publicação em: 14/11/2024
Publicado em: 19/11/2024

1. INTRODUÇÃO

A expansão demográfica mundial, impulsionada pelos avanços tecnológicos, resultou em um crescimento urbano intenso nos últimos 200 anos. A substituição da cobertura superficial por materiais e edificações impermeáveis é um dos reflexos desse aumento populacional, que gerou e continua gerando problemas, como as mudanças climáticas e ambientais (Borges et al., 2022).

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), as cidades são as principais propulsoras das mudanças climáticas, ao passo que são as mais impactadas por essas consequências. Dessa forma, o clima local tem passado por alterações no fluxo de matéria e energia, sendo possível correlacionar as diferenciações morfológicas da cidade com anomalias de temperatura, como o efeito da Ilha de Calor Urbana (ICU) (Voogt e Oke, 2003; Stewart e Oke, 2012).

A ICU se refere à diferença de temperatura das áreas densamente povoadas da cidade para as áreas rurais circunvizinhas, sendo uma anomalia térmica que pode ter dimensões verticais, horizontais e temporais distintas (Oke, 1982). Estas podem ser classificadas em diferentes tipos, de acordo com seu alcance vertical (Oke, 1973): Subsuperficiais (ICUsub), consistindo nas diferenças de temperatura abaixo da superfície; Superficiais (ICUsup), abrangendo o gradiente de temperatura das superfícies urbanas, capazes de serem identificadas por meio de sensores fixados na superfície ou por sensoriamento remoto; Atmosfera Inferior (ICUatm), bolsões de ar quente decorrentes da capacidade diferenciada dos materiais da superfície de armazenar e refletir energia, produzindo calor antropogênico, ocorrendo da superfície até a camada do dossel e identificada por sensores em pontos fixos ou transectos móveis; e, finalizando, Atmosfera Superior (ICUubl), resultante da diferença da temperatura do ar do topo da camada do dossel até o limite da atmosfera (Oke et al, 2017).

As temperaturas de superfície e do ar exercem influência entre si e se diferem pelos fluxos promovidos no balanço de radiação. A temperatura do ar possui um balanço de radiação convectivo de calor sensível, enquanto a temperatura de superfície possui balanço de radiação por condução de calor na superfície (Castro, 2022). Na promoção de Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUSup), por exemplo, Cilek e Cilek (2021) destacam áreas com solo

pouco permeável, exposto e com vegetação escassa, que, por possuírem baixa inércia térmica, registram temperaturas de superfície elevadas.

Nos espaços urbanos com alta densidade de construção e baixa quantidade de áreas verdes, os eventos de temperatura extrema e ondas de calor ampliam o impacto das ICU sobre a população (Matzarakis, 2021). Deste modo, os estudos relativos às ICU demandam o conhecimento de características locais e elementos morfológicos existentes. Como forma de relacionar morfologia e temperatura, Stewart e Oke (2012) propuseram um parâmetro internacional de classificação zonal de um clima local: as Zonas Climáticas Locais (do inglês *Local Climate Zones*, LCZ). Essa classificação, por sua vez, reúne um complexo conjunto de propriedades climáticas de superfície em sua análise, bem como estrutura, cobertura, tecido e metabolismo da localidade, dividindo a paisagem urbana em 17 classes de contexto morfológico e de temperatura, facilitando, dessa maneira, a definição de medidas de mitigação/adaptação.

Entretanto, estudos em cidades tropicais devem atentar-se para diversos fatores: maior instabilidade atmosférica, maior intensidade dos efeitos relativos às mudanças climáticas, processo de expansão urbana não ou mal planejado e desigualdades socioespaciais existentes (Stewart e Oke, 2012). Por isso, sugere-se a validação dos dados por fotointerpretação, por exemplo, e o detalhamento da paisagem na descrição das LCZ por fichas técnicas (Cardoso e Amorim, 2017).

O município de Olinda, área de estudo desta pesquisa, está na faixa tropical litorânea e passou por um processo de urbanização desordenado e influenciado pelos dinamismos metropolitanos, o que propiciou grandes substituições de áreas verdes por habitações (Santos, 2016). Desta forma, em função das características do município estudado, as adaptações propostas por Cardoso e Amorim (2017) às LCZ apresentadas anteriormente serão aplicadas nesta pesquisa.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022), Olinda é o quinto município mais populoso do estado de Pernambuco e possui pelo menos 98% da sua população residindo em área urbana (Prefeitura de Olinda, 2012). A ausência de planejamento adequado para o rápido crescimento populacional gerou modificações na paisagem, mau uso do solo, mudanças no sistema de drenagem e um crescente índice de verticalização capazes de alterar também o comportamento climático local (Souza, 2017).

Apesar de ser evidente a relação dos efeitos climáticos com o crescimento urbano, pouco se é feito de forma prática para melhoria de ambos, sobretudo no panorama brasileiro, em que o processo de urbanização é complexo, tornando-se ainda mais desafiador quando associado às condições climáticas tropicais. Dito isso, Olinda apresenta, do ponto de vista termodinâmico, a temperatura do ar como reflexo das transformações da superfície, seguindo o processo de expansão urbana de Recife, capital do estado de Pernambuco e cidade vizinha. Moreira et al. (2022), por exemplo, realizaram um estudo do clima urbano do Recife e apresentaram a importância da realização de estudos em cidades com processos históricos de urbanização similares a fim de sistematizar esses estudos climáticos.

Em face ao exposto, torna-se necessário o uso de metodologias que ampliem a compreensão da influência da paisagem urbana no campo térmico no município de Olinda, como, por exemplo, as que fazem uso de classificação da paisagem (Stewart e Oke, 2012; Castro, 2022). Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar e espacializar a relação entre a temperatura de superfície e a morfologia urbana, identificando-se as áreas suscetíveis à ocorrência de Ilhas de Calor Urbanas superficiais em Zonas Climáticas Locais.

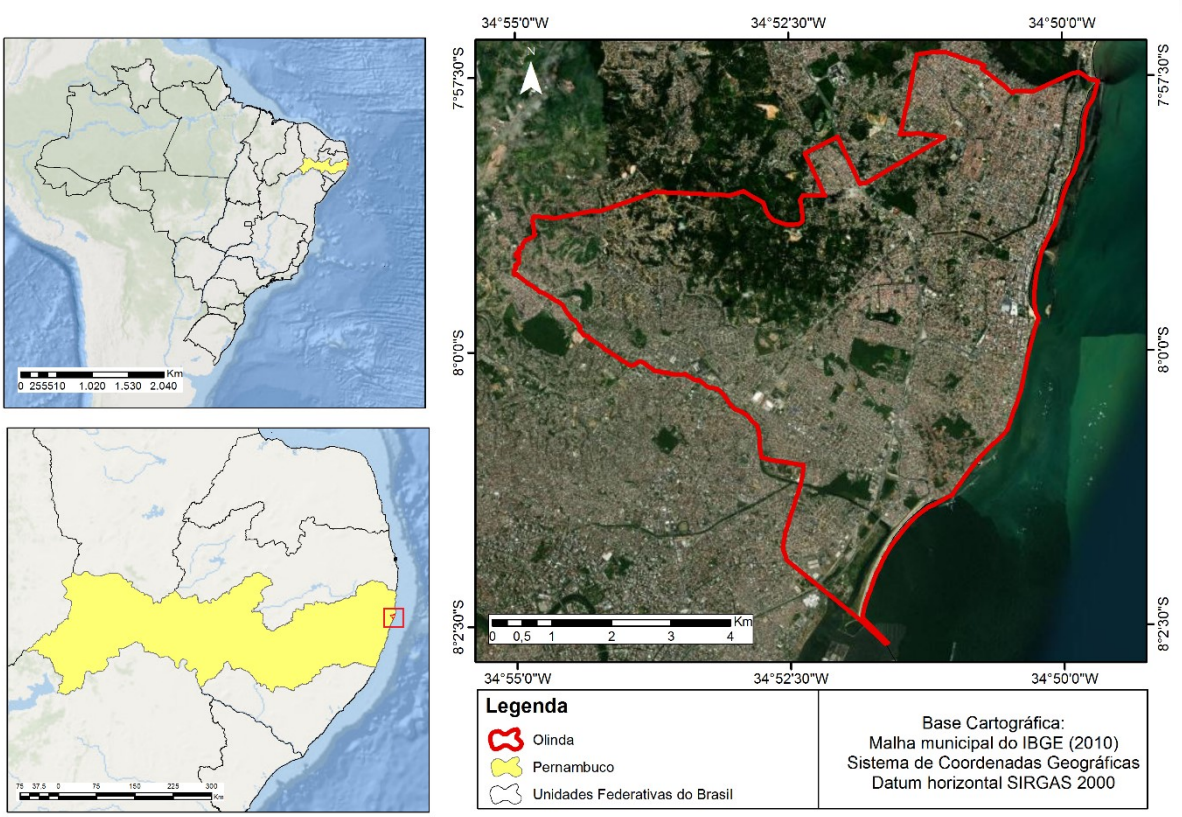
Assim, além da seção introdutória, o texto traz uma breve apresentação da área estudada, bem como dos procedimentos metodológicos realizados para a obtenção dos resultados e posterior discussão. A delimitação e caracterização das LCZ, correlacionadas com a análise espacial das ICU, são apresentadas nos tópicos mencionados e visam subsidiar o melhor entendimento desse campo térmico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O município de Olinda, apresentado na Figura 1, pertence à Região Metropolitana do Recife (RMR), no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (NEB). Com 349.976 habitantes, distribuídos em uma área de 41,30 km² (IBGE, 2022), possui mais de 96% dos seus setores censitários urbanos e sua maior concentração vegetal está localizada nos setores rurais, a noroeste do município (IBGE, 2010).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com altitude média de 16 metros acima do nível do mar, o relevo de Olinda é formado a partir de colinas e planícies e está inserido no bioma Mata Atlântica (Prefeitura de Olinda, 2012). A classificação climática de Köppen-Geiger é de clima tropical, quente e úmido (As'), caracterizado por uma estação seca de pequena duração e outra quadra chuvosa com precipitações abundantes entre os meses de abril e julho (Golfari, Caser e Moura, 1978; COMDECOL, 2005).

Quanto ao panorama médio do comportamento térmico, de acordo com os dados da série 1991-2021 disponíveis na plataforma global *Climate-Data.org*, a área de estudo que está em posição litorânea na zona tropical mantém temperaturas médias mensais superiores a 24 °C. As temperaturas médias mais altas são registradas na casa dos 29 °C entre novembro e abril, enquanto as médias mínimas chegam à casa dos 22 °C entre julho e setembro.

As características climáticas de Olinda estão associadas aos sistemas atmosféricos que atuam no leste do Nordeste do Brasil (ENEB). Os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), também denominados de Ondas de Leste (OL), modulam a estação chuvosa desta região do NEB com chuvas abundantes. Os DOL se formam na faixa tropical no campo de pressão

atmosférica sob influência dos ventos alísios e se deslocam de leste para oeste até o ENEB (Ferreira e Da Silva Mello, 2005).

Outros sistemas atmosféricos presentes no regime de precipitação de Olinda são: os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), atuantes, principalmente, entre outubro e março; as Linhas de Instabilidade (LI), com mais recorrência de formação durante o verão/outono; as Brisas Marinhas (BM), que são mais significativas no inverno, e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), ativos, sobretudo, em maio (Ferreira e Da Silva Mello, 2005).

Vale destacar ainda que as anomalias de temperatura de superfície do mar (ATSM) são influentes na Circulação Geral da Atmosfera (CGA) e estabelecem relações *multi-proxies* com os sistemas atmosféricos mencionados, tanto na sua espacialização quanto na sua intensidade. O El Nino Oscilação Sul (ENOS) — representado pela ocorrência de El Niño e La Niña no Oceano Pacífico — e os Dipolos do Atlântico (positivo e negativo) são as principais ATSM influentes no ENEB, podendo inibir ou favorecer os sistemas citados anteriormente (Girão et al., 2006).

2.2. Delimitação das LCZ e identificação da suscetibilidade à ICUsup

As propriedades da estrutura tridimensional urbana — principalmente edificações, larguras e espaçamento de vias — e a cobertura das superfícies (construída, pavimentada, com cobertura vegetal, solo descoberto e água) foram consideradas como forma de compreender a interação entre o espaço urbano e o campo térmico (Stewart e Oke, 2012).

Para tal, utilizou-se o protocolo de mapeamento digital do projeto *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT), licença CC BY-NC-SA 4.0, e a ferramenta de classificação supervisionada *LCZ Generator* (Demuzere, Kittner e Bechtel, 2021), que contempla também arranjos físicos e o metabolismo das unidades padronizadas da paisagem urbana, permitindo interpretações do espaço intraurbano como viés do clima.

No protocolo, foram consideradas as propriedades descritas por Stewart e Oke (2012) e Bechtel et al. (2015) na Figura 2, onde: 1= Razão entre a área da planta do edifício e a área total da planta (%); 2= Razão entre a área da planta impermeável (pavimentada, rocha) sobre a área total da planta (%); 3= Razão da superfície permeável sobre a área total da planta (%); 4= Rugosidade, que é a razão da altura/largura média dos desfiladeiros das ruas, (LCZ 1-7) e

espaçamento das edificações (LCZ 8-10); 5= Razão entre a quantidade de céu visível a partir do nível do solo e a de céu obstruído por construções, relevo ou vegetação (fator visão do céu); 6= Média geométrica da altura dos edifícios (m); 7= Admissão térmica de materiais, que é a capacidade da superfície de aceitar ou liberar calor (varia com a umidade do solo e a densidade do material) (J·m–2·s–1/2·K–1); 8= Densidade média do fluxo de calor (W·m–2) da combustão de combustível e da atividade humana (transporte, resfriamento/aquecimento de ambientes, processamento industrial, metabolismo urbano), que varia significativamente com a latitude, estação do ano e densidade populacional; 9= Classe de rugosidade do terreno (baseado em Davenport et al., 2020); 10= Albedo de superfície.

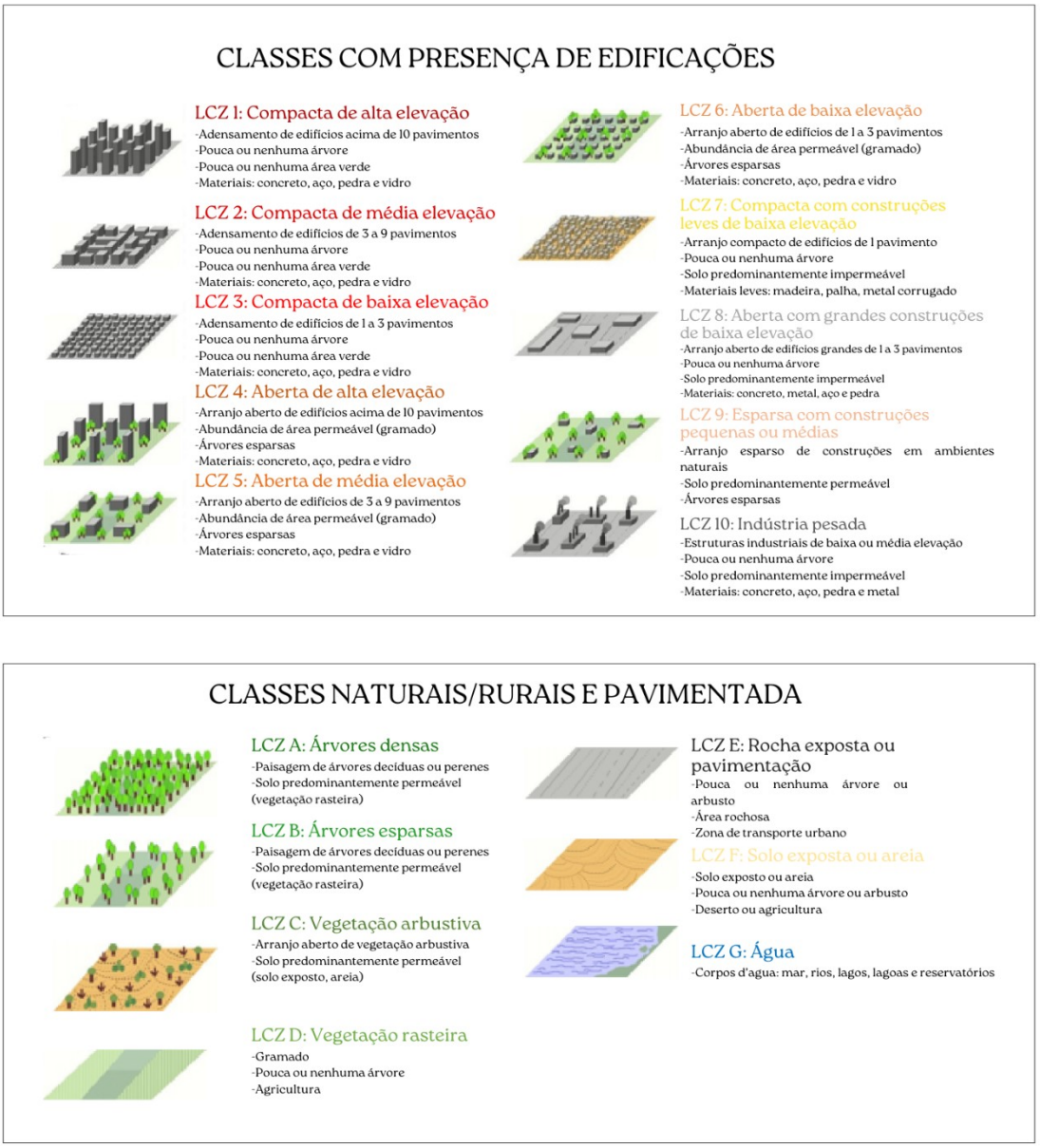
Figura 2 - Propriedades físicas das Zonas Climáticas Locais.

ZCL	1 (%)	2 (%)	3(%)	4 (H/W)	5 (%)	6 (M)	7 (J·M–2·S–1/2·K–1)	8 (W·M–2)	9	10
ZCL 1	40-60	40-60	<10	>2	0,2-0,4	>25	1100-1200	50-300	8	0,10-0,20
ZCL 2	40-70	30-50	<20	0,75-2	0,3-0,6	10-25	1000-2200	<75	6-7	0,10-0,20
ZCL 3	40-70	20-50	<30	0,75-1,5	0,2-0,6	3-10	1000-2200	<75	6	0,10-0,20
ZCL 4	20-40	30-50	30-40	0,75-1,25	0,5-0,7	>25	1100-2000	<50	7-8	0,12-0,25
ZCL 5	20-40	10-50	20-40	0,3-0,75	0,5-0,8	10-25	1000-2200	<25	5-6	0,12-0,25
ZCL 6	20-40	20-50	30-60	0,3-0,75	0,6-0,9	3-10	1000-2200	<25	5-6	0,12-0,25
ZCL 7	60-90	<20	<30	1-2	0,2-0,5	2-4	400-800	<35	4-5	0,15-0,35
ZCL 8	30-50	40-50	<20	0,1-0,3	>0,7	3-10	1000-2000	<50	5	0,15-0,25
ZCL 9	10-20	<20	60-80	0,1-0,25	>0,8	3-10	1000-2200	<10	5-6	0,12-0,25
ZCL 10	20-30	20-40	40-50	0,2-0,5	0,6-0,9	5-15	1000-2500	>300	5-6	0,12-0,20
ZCL A	<10	<10	>90	>1	<0,4	3-30	N/A	0	8	0,10-0,20
ZCL B	<10	<10	>90	0,25-0,75	0,5-0,8	3-15	1000-1800	0	5-6	0,15-0,25
ZCL C	<10	<10	>90	0,25-1	0,7-0,9	<2	700-1500	0	4-5	0,15-0,30
ZCL D	<10	<10	>90	<0,1	>0,9	1	1200-1600	0	3-4	0,15-0,25
ZCL E	<10	>90	<10	<0,1	>0,9	<0,25	1200-2500	0	1-2	0,15-0,30
ZCL F	<10	<10	>90	<0,1	>0,9	<0,25	600-1400	0	1-2	0,20-0,35
ZCL G	<10	<10	>90	<0,1	>0,9	N/A	1500	0	1	0,02-0,10

Fonte: Adaptado de Stewart e Oke (2012); Bechtel et al. (2015).

As LCZ geradas a partir da plataforma correspondem ao sistema de classificação da paisagem de Stewart e Oke (2012) adaptado por Werneck (2022), apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Sistema de classificação da paisagem por meio de Zonas Climáticas Locais (LCZ).



Fonte: Werneck (2022) adaptado de Stewart e Oke (2012).

O procedimento foi realizado em três passos: a) coleta de dados dos locais de amostra; b) definição de uma zona para medições do campo térmico; c) seleção da LCZ que melhor se encaixa nas observações das estruturas das classes.

Uma vez que as classes individuais do produto obtido por meio do WUDAPT terão propriedades espectrais diferentes a depender do local do mundo estudado, é necessário validar e/ou refinar tais dados no pós-processamento (Bechtel et al., 2015).

Por isso, após a classificação das propriedades de cobertura e estrutura, realizou-se a estimativa da temperatura de superfície terrestre (TST) a partir dos dados secundários das imagens do satélite *Sentinel-3* — datadas de 23/03/2023 em função da disponibilidade e da ausência de nuvens para processamento — descritas no Quadro 1, para aferir se os tipos construtivos indicados correspondem às respectivas temperaturas.

Quadro 1- Dados das imagens *Sentinel-3*.

S3A_2_TST		
Turno	**Data**	**Código**
Noturno (0h)	23/03/2023	20230323T004835
Diurno (12h)	23/03/2023	20230323T115029

Fonte: Organizado pelos autores (2024).

As imagens foram coletadas no *Copernicus Open Access Hub* da Agência Espacial Europeia (ESA), nas duas passagens do satélite (0h e 12h). A TST foi gerada a partir do sensor SLSTR, a bordo do *Sentinel 3A*, tendo sido utilizadas imagens do infravermelho termal diurna e noturna. O sensor SLSTR possui resolução espacial de 500 metros para as bandas espectrais do visível e da região do infravermelho próximo, abrangendo um intervalo de comprimento de onda de λ = 553 nm até λ = 2.255 nm. Enquanto a banda espectral do infravermelho térmico possui uma resolução espacial de 1 km e opera na faixa de comprimento de onda de λ = 3.742 nm até λ = 10.854 nm (ESA, 2020).

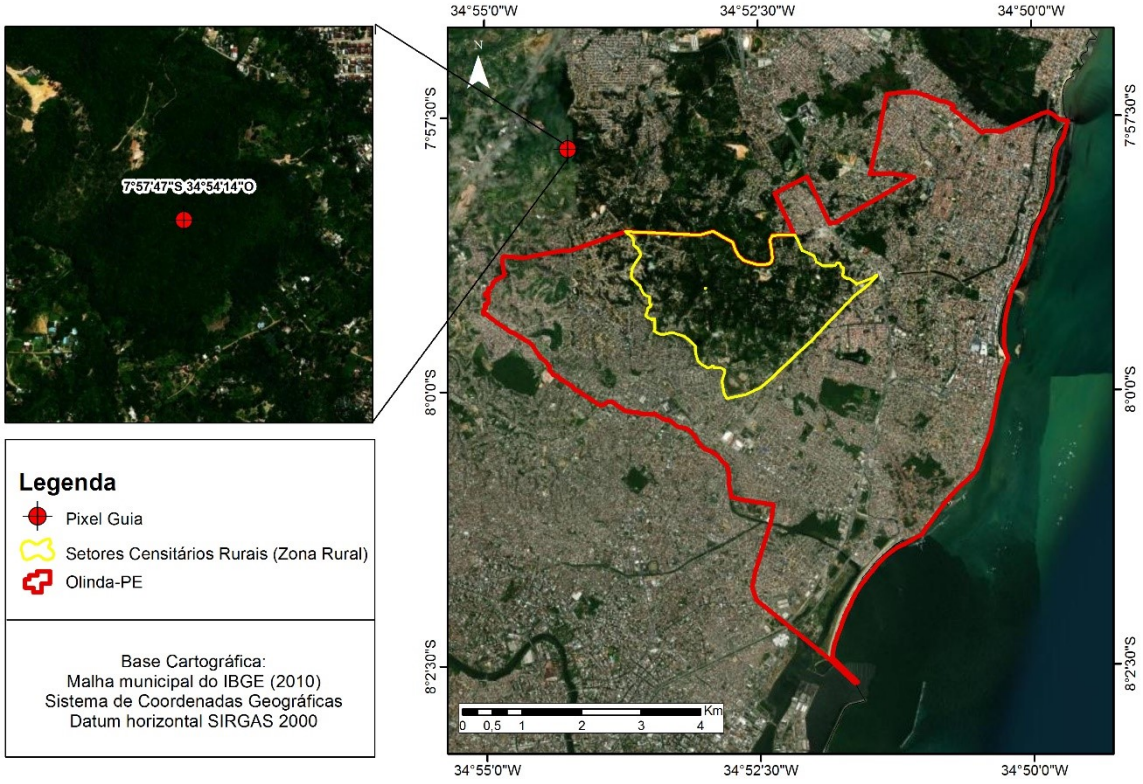
Quanto ao processamento das imagens do *Sentinel-3*, utilizou-se o *SIG ArcGIS PRO* com a licença educacional do Grupo de Estudos em Climatologia Tropical – Tropoclima UFPE (*Educational Academic Departmental Small Term License*). Inicialmente, houve a conversão de temperatura de Kelvin para Celsius (°C=K-273,15) e, em seguida, gerou-se o mapa de estimativa da temperatura de superfície (Figura 6).

Posteriormente, foi escolhido um pixel que, a partir do *Google Earth Pro*, correspondeu a uma área com características rurais no entorno do município, à noroeste (Figura 4). Em seguida, o ponto foi geolocalizado nas imagens do *Sentinel-3* como referência para estimar a variação da temperatura no perímetro urbano de Olinda nas duas passagens do satélite. Para

o período noturno (0h), o pixel “guia” correspondeu a 22,37 °C e para o período diurno, 23,22 °C.

A partir da álgebra de mapas (subtração dos valores de temperatura dos pixels “guia” pelos valores de temperatura do *raster*) na calculadora *raster*, foram obtidos os valores de variação (Figura 7) que subsidiaram as análises da descrição das LCZ quanto à suscetibilidade de ocorrência de ICU.

Figura 4 - Mapa de localização do pixel “guia”.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir dos pontos de maior e menor concentração de temperatura, somados às unidades de paisagem homogêneas características das LCZ, foram escolhidas as áreas a serem descritas com maior detalhamento na etapa seguinte. As coordenadas correspondentes aos pontos estão apresentadas na Tabela 1 e foram plotadas nos mapas de TST, LCZ e MDT — este último gerado a partir dos dados do Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D, 2013), com 1 m de resolução espacial.

2.3. Descrição das LCZ

A descrição dos perfis de cada classe foi realizada por meio da ficha técnica proposta por Stewart e Oke (2012), cuja versão em português foi apresentada por Cardoso e Amorim (2017, p. 81). A ficha proposta contém: identificação do nome da classe e o código; definição com as características morfológicas da superfície, cobertura da terra e fluxo antropogênico; função — se comercial, residencial ou agrícola; localização — se campo, cidade, centro ou periurbano; ilustração em desenhos e/ou fotografias e as propriedades da superfície.

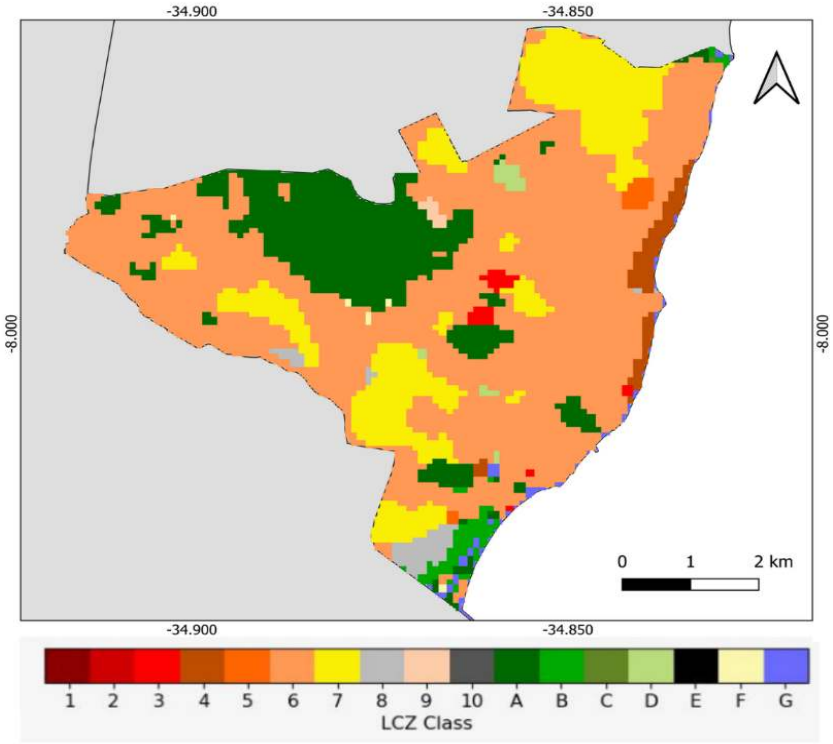
Para as ilustrações e verificação das propriedades, usou-se a base cartográfica do *Google Maps*. Os dados de temperatura do ar não foram considerados nas fichas produzidas, apenas a temperatura de superfície do polígono correspondente, mapeada na Figura 6.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Delimitação das LCZ

A partir da plataforma *LCZ Generator* foi realizada a classificação de LCZ (Stewart e Oke, 2012) no campo térmico de Olinda, tendo sido gerado, como produto de análise, o mapa apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Zonas Climáticas Locais de Olinda-PE a partir de Stewart e Oke (2012).

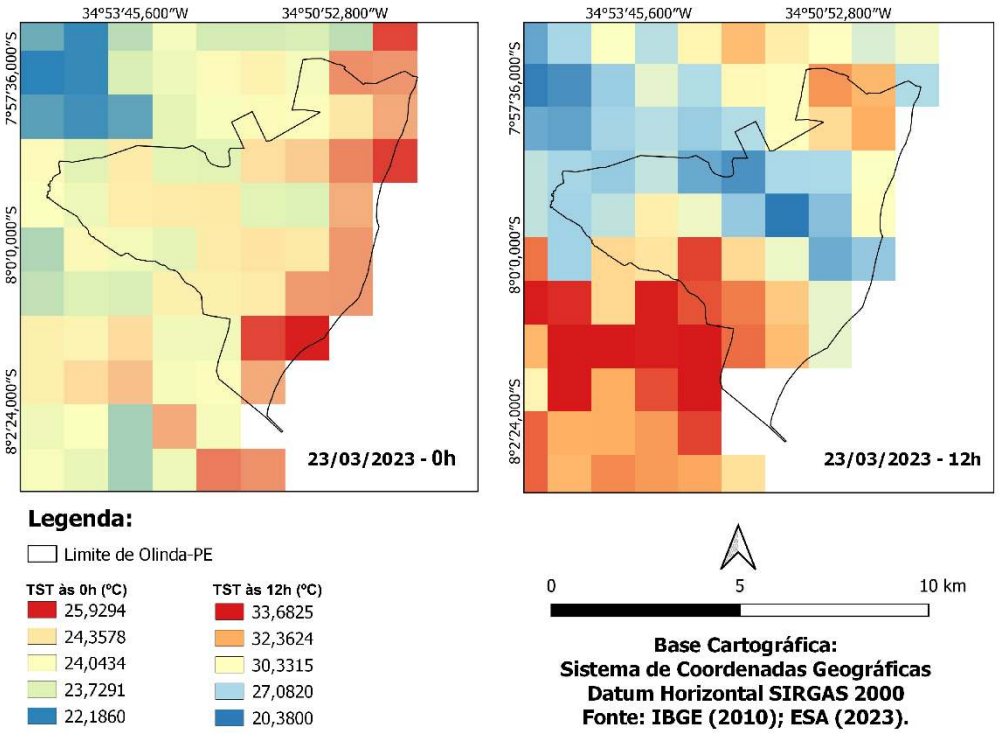


Fonte: Adaptado de Wudapt, 2024.

3.2. Estimativa da TST e identificação da suscetibilidade às ICUsup

A análise da espacialização e do comportamento da temperatura da superfície da área de estudo em relação à classificação das LCZ permite o entendimento dos impactos e respostas climáticas em relação ao ambiente construído ou natural desta localidade. Portanto, a partir do processamento das imagens *Sentinel-3*, do dia 23/03/2023, nas duas passagens do satélite (0h e 12h), gerou-se o mapa a seguir (Figura 6):

Figura 6 - Estimativa da temperatura de superfície de Olinda-PE no dia 23/03/2023 às 0h e 12h, respectivamente, a partir de imagem orbital *Sentinel-3*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir do produto gerado, analisou-se a distribuição da temperatura no campo térmico do município, não tendo sido levados em consideração os trechos com vazio de dados (N/A) nos pixels que comporiam totalmente o mosaico sobre o perímetro de Olinda.

Para o período noturno, foram identificadas temperaturas mais elevadas na costa leste em relação ao interior do município. Durante o dia, houve uma maior concentração de TST na porção sudoeste da cidade, na área de conurbação Recife-Olinda. Ainda foi observado, nos dois períodos, que há uma faixa central sentido sudeste-noroeste de TST mais baixas em comparação aos demais pixels estimados na data de análise.

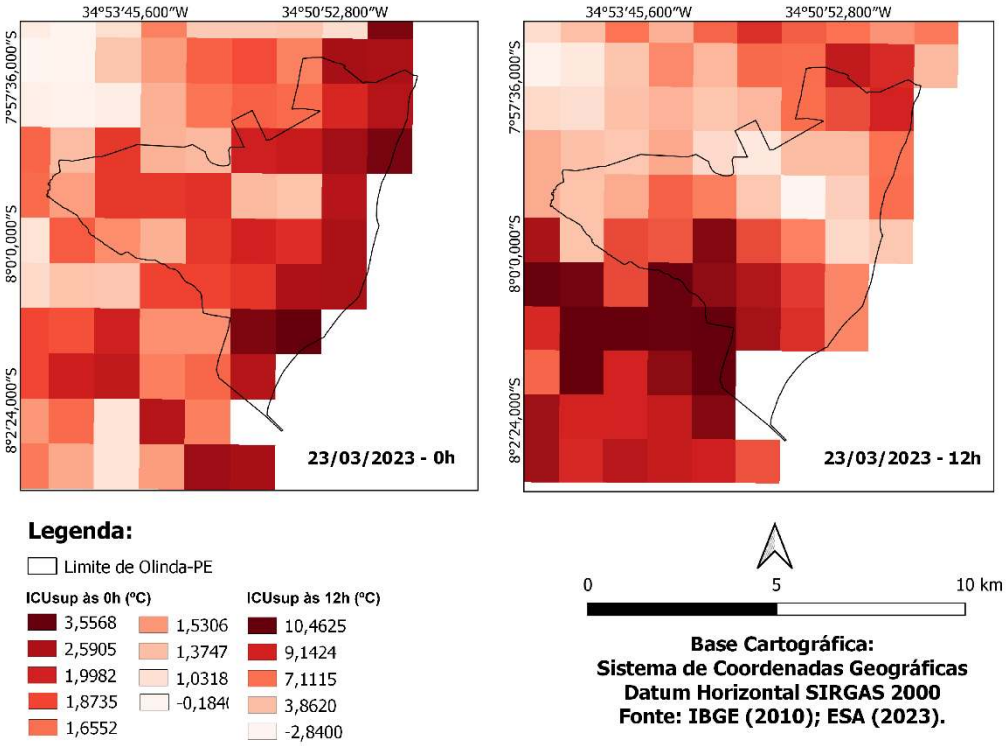
Ao comparar os valores em graus Celsius das TST estimadas, percebe-se que, para os limites municipais de Olinda, a temperatura varia (TSTmax-TSTmin) em 2,25 °C (25,95-23,70) no período noturno e em 12,94 °C (33,32-20,38) no período diurno. Diante das considerações feitas acerca das ICU, essas anomalias tendem a ocorrer principalmente no período noturno. Entretanto, para cidades litorâneas com morfologia urbana não uniforme, pode vir a acontecer ainda durante o dia, horas depois do período de maior insolação (12h), como

identificado por Oliveira (2018).

Neste estudo, por terem sido estimados valores de TST, considerou-se a suscetibilidade para ocorrência de ICUsup, mesmo que os horários das passagens do satélite não sejam exatamente nos períodos de maior ocorrência de ICU, sendo considerada, então, a resposta dos arranjos urbanos em cada porção do município para o aprisionamento de calor.

Assim, a partir do pixel "guia", com 22,37 °C (0h) e 23,22 °C (12h), e da álgebra de mapas descritos no tópico 3.2 da metodologia, foi calculada a variação de TST e gerado o mapa da estimativa da suscetibilidade na Figura 7.

Figura 7 - Estimativa da Suscetibilidade às ICUsup em Olinda-PE.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os valores apresentados na legenda variam em graus Celsius do valor da temperatura de cada horário no pixel "guia". Para o período noturno, há variação de temperatura em aproximadamente +3,5 °C da área de temperatura mais amena (simulada como rural), enquanto o período diurno registra até quase 10,5 °C a mais na área de conurbação Recife-Olinda, à sudoeste.

A partir dessa análise prévia da distribuição da temperatura de superfície de Olinda em

23/03/2023, buscou-se relacionar as maiores e menores TST estimadas com as LCZ para cada área destacada e, para tal análise, foram escolhidos sete pontos, apresentados na Tabela 1.

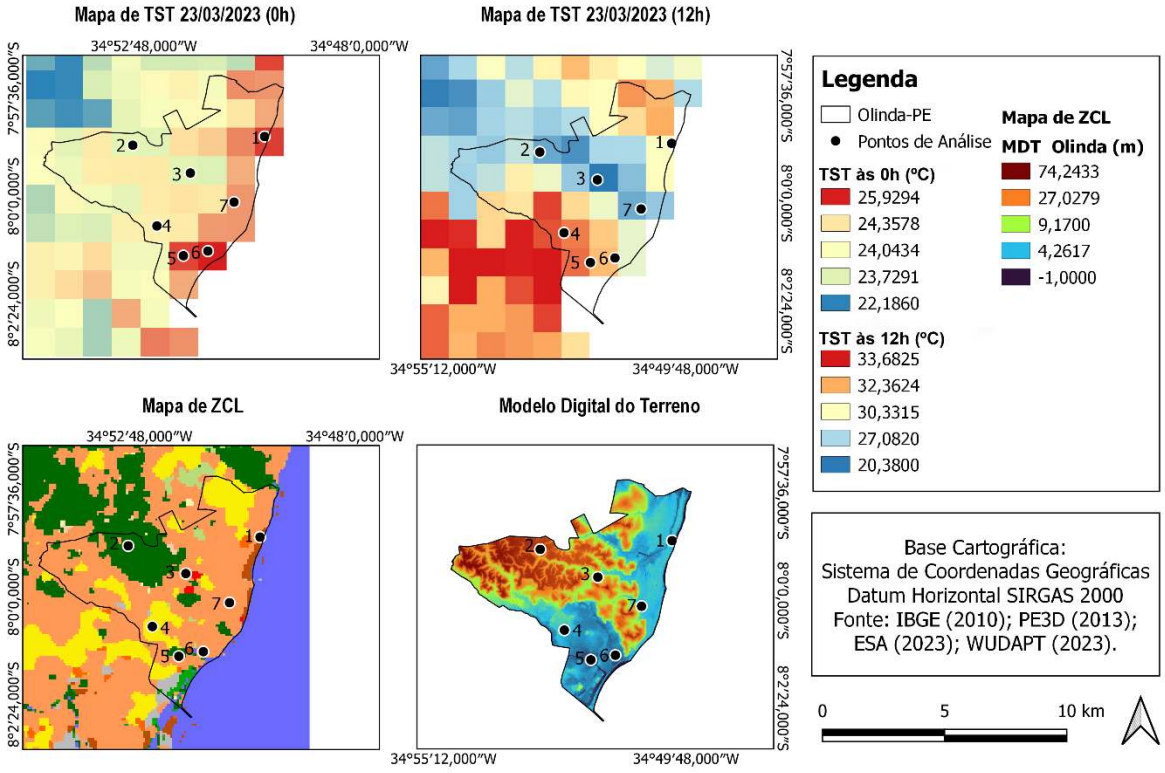
Tabela 1- Coordenadas dos pontos de análise dos dados.

Ponto	Latitude	Longitude
1	7° 58' 38,510"S	34° 50' 4,655"O
2	7° 58' 49,715"S	34° 53' 1,955"O
3	7° 59' 28,637"S	34° 51' 46,112"O
4	8° 0' 39,388"S	34° 52' 32,049"O
5	8° 1' 18,13"S	34° 51' 56,286"O
6	8° 1' 12,082"S	34° 51' 22,392"O
7	8° 0' 6,108"S	34° 50' 46,154"O

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os pontos correspondem às coordenadas exatas que foram plotadas igualmente nos mapas de TST, LCZ e MDT, processados em *SIG*, apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Indicação das áreas de análise dos dados de TST, LCZ e MDT.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

3.3. Descrição das Zonas Climáticas Locais

O ponto 1 (Figura 9) se caracteriza como uma LCZ 4 - aberta de alta elevação. O perfil construtivo da LCZ 4 é marcado pela presença de área impermeável, com árvores pontuais, tendo como principais materiais concreto, aço, pedra e vidro alternados entre altas, médias e baixas edificações, responsáveis pela absorção da radiação incidida e irradiada pela atmosfera. A radiação de onda longa que se acumula nas alvenarias e retarda o resfriamento por irradiação noturna, somada à camada de poluentes em função do fluxo urbano nos bairros litorâneos, explica os maiores valores de temperatura registrados quando comparados aos valores mais baixos do setor noroeste de Olinda.

Figura 9 - Ficha técnica do ponto de análise 1.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O ponto 2 (Figura 10) corresponde à LCZ A e é marcado por árvores densas e solo predominantemente permeável. Dessa forma, a presença de vegetação indica que, ao longo do dia, há a absorção de calor, assim como uma rápida dissipação por irradiação noturna. Esse contexto, portanto, é reflexo das características de área vegetada, a mais de 50 m acima do nível do mar, recebendo diretamente os ventos alísios.

Figura 10 - Ficha técnica do ponto de análise 2.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O ponto 3 (Figura 11) corresponde a uma LCZ 6, cuja característica principal é reunir construções abertas e de baixa elevação, com presença esporádica de vegetação e de outros materiais como concreto, madeira, tijolo, aço, pedra e cerâmica. Localizado no bairro de Ouro

Preto, o ponto está numa área que recebe corredores de vento no sentido preferencial dos alísios de sudeste.

Figura 11 - Ficha técnica do ponto de análise 3.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O ponto 4 (Figura 12) em Jardim Brasil corresponde à LCZ 7: compacta, com construções leves de baixa elevação. Com pouca ou nenhuma árvore, apresenta solo predominantemente impermeável e construções de materiais leves. Na fotointerpretação realizada pelo *Google Earth* e *Google Maps*, percebeu-se que também existiam muitas construções cujo material predominante era concreto, madeira, tijolo, aço, pedra e cerâmica.

Figura 12 - Ficha técnica do ponto de análise 4.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A coordenada exata do ponto 5 (Figura 13), corresponde ao Parque Sítio Novo, no bairro de Peixinhos, sendo considerada uma LCZ A. Entretanto, a área do pixel composta por esse ponto apresenta, ainda, perfis construtivos correspondentes a LCZ 6, com elevações predominantemente baixas e materiais que alternam entre concreto, madeira, tijolo, aço, pedra e cerâmica, acumulando temperatura ao longo do dia e culminando no retardamento da perda de calor por irradiação noturna, semelhantemente ao ponto 1.

Figura 13 - Ficha técnica do ponto de análise 5.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O ponto 6 e o ponto 7 (Figuras 14 e 15, respectivamente) também correspondem à LCZ 6. Apesar de terem sido classificados pela mesma LCZ, apresentam grande diferença na temperatura da superfície, que pode ser explicada pela própria configuração urbana e resposta térmica dos materiais, visto que as LCZ são delimitadas por homogeneidade e não por padrões idênticos. Além disso, vale ressaltar que a posição na cidade influencia no recebimento de ventos e brisas de direção predominantemente de Sudeste e Leste e que o histórico de expansão do Bairro Novo é diferente do Varadouro.

O bairro do Varadouro, na Figura 14, compõe a Região Político Administrativa (RPA) 8, enquanto Bairro Novo está na RPA 7. De acordo com os dados de Lopes (2019), a RPA 7 possui

cerca de 73% de infraestrutura, ao passo que a RPA 8 tem, aproximadamente, 48%. Esses dados estão atrelados ao processo de urbanização moderna de Olinda, que se iniciou por volta de 1930, no Bairro Novo. Em função da alta especulação imobiliária — crescente, sobretudo, entre as décadas de 50 e 70 do século XX —, a porção leste litorânea do município concentra a renda mais elevada (IBGE, 2010) e topografia predominantemente plana. Diferentemente do Varadouro, na porção sudeste, em que há habitações de menor poder aquisitivo e infraestrutura (Santos, 2016).

Figura 14 - Ficha técnica do ponto de análise 6.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 15 - Ficha técnica do ponto de análise 7.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Uma vez que há uma tendência constante de urbanização e consequentemente mudança das propriedades climáticas de uma área, podem ocorrer, em alguns pontos de suscetibilidade, a ocorrência de ICUsup. Na avaliação realizada, os pontos destacados para o alerta são 1, 4, 5 e 6 nas figuras 9, 12, 13 e 14, respectivamente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados das análises, verificou-se que as diferentes feições dos espaços intraurbanos geram processos com intensidades distintas de aquecimento da camada de ar em que se inserem, bem como campos térmicos heterogêneos. O calor sensível liberado

para o ar pelas atividades de produção, somado às temperaturas de superfície resultantes dos tipos construtivos, contribui para a geração de ilhas de calor.

Olinda, enquanto área de estudo, não apresenta intensas ICUsup. Entretanto, o processo histórico e contínuo de urbanização que a cidade sofre tende a aumentar os arranjos construtivos favoráveis às ocorrências dessas anomalias térmicas, que são cada vez mais alertadas pelos relatórios do IPCC diante do cenário iminente de mudanças climáticas.

A partir do estudo da estrutura, cobertura e do valor da temperatura, foi possível identificar, em alguns pontos de análise, a suscetibilidade às ICUsup. Demanda-se, em tais pontos, maior atenção dos responsáveis pelo planejamento e gestão do ordenamento territorial do município, visando intervir nas áreas para atuar na possível ocorrência de anomalias prejudiciais à saúde.

A metodologia do zoneamento climático local ainda foi considerada eficaz na classificação da cobertura e estrutura atreladas ao contexto morfológico de Olinda. Entretanto, vale ressaltar que, para municípios localizados em região tropical, como o estudado nesta pesquisa, a aplicação da metodologia precisa considerar a maior instabilidade atmosférica, a maior intensidade dos efeitos relativos às mudanças climáticas, a expansão urbana não ou mal planejada e as desigualdades socioespaciais.

Dessa forma, a classificação da cobertura e estrutura, a partir do Projeto *Wudapt* e da ferramenta *LCZ Generator* ou de outras ferramentas, demandam a utilização de metodologias de validação dos dados e detalhamento da paisagem durante a descrição das ZCL, como, por exemplo, a fotointerpretação. Por utilizar o *Google Earth*, a ferramenta *LCZ Generator* foi considerada eficaz, visto que a fotointerpretação foi feita simultaneamente à delimitação.

REFERÊNCIAS

BECHTEL, B. et al. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information** , v. 4, n. 1, pág. 199-219, 2015.

BORGES, V. O. et al. Zonas climáticas locais e as ilhas de calor urbanas: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 98-127, 2022.

CARDOSO, R.; AMORIM, M. Estimativa da distribuição espacial da temperatura do ar com base em zonas climáticas locais (LCZ) e modelos de regressão. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**. Lisboa, n. 12, p. 75-99, 2017.

CASTRO, L. G. de. **Zonas climáticas locais em cidades pequenas:** relação entre temperatura e morfologia urbana. 2022. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CILEK, M. U.; CILEK, A. Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data. **Sustainable Cities and Society**, v. 69, p. 102877, 2021.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima:** Olinda. Disponível em: https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/olinda-5041/. Acesso em: 10 jun. 2024.

COMDECOL, Defesa Civil de Olinda. **Relatório 2 - Mapeamento de risco e avaliação preliminar das ações estruturais e não estruturais**. Olinda-PE, 83 p, 2005.

DEMUZERE, M., KITTNER, J., BECHTEL, B. LCZ Generator: uma aplicação web para criar mapas de Zonas Climáticas Locais. **Frontiers in Environmental Science** 9:637455, 2021.

FERREIRA, A. G.; DA SILVA MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

GIRÃO, O.; CORRÊA, AC de B.; GUERRA, A. J. T. Influência da climatologia rítmica sobre áreas de risco: o caso da região metropolitana do Recife para os anos de 2000 e 2001. **Revista de Geografia**, Recife, v. 23, n. 1, p. 3-40, 2006.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2a aproximação).** Brasília: PRODEPEF: PNUD/FAO/IBDF/BRA45, 1978. 66p. (Série Técnica, 11).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br. Acesso em: 15 set. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br. Acesso em: 15 set. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Second part of the Sixth Assessment Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK; New York, NY: **Cambridge University Press**, 2022.

LOPES, I. J. C. **Determinação da cobertura vegetal de Olinda-PE:** um subsídio a gestão florestal urbana**.** 2019. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

MATZARAKIS, A. Comments about Urban Bioclimate Aspects for Consideration in Urban Climate and Planning Issues in the Era of Climate Change. **Atmosphere**, 12(5), p. 546, 2021.

MOREIRA, A. B.; NÓBREGA, R. S.; WANDERLEY, L. S. de A.; DOS ANJOS, R. S. ZAMPARONI, C. A. G. P. Os estudos de Clima Urbano e o seu desenvolvimento na cidade do Recife - PE: campos de estudo, técnicas de investigação e perspectivas futuras. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, MG, v. 23, n. 90, p. 230–251, 2022.

OLINDA. **Dados Socioeconômicos**, 2012. Disponível em: www.prefeituradeolinda.gov.br. Acesso em: 27 set. 2023.

OLIVEIRA, W. D. **O campo térmico do distrito de Carapina-Serra-ES:** Estudo de caso em áreas litorâneas**.** 200 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Humanas e Naturais da UFES. Vitória, 2018.

OKE, T. R. City size and urban heat island. **Atmospheric environment**, New York, v. 7, n. 8, p. 769–779, 1973.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN A.; VOOGT, J. A. Urban heat island. In: **Theoretical and Applied Climatology**. **Urban Climate.** Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

SANTOS, M. K. M. **A expansão da verticalização no bairro de Casa Caiada, Olinda/PE (1990 a 2015)**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

SOUZA, R. S. de. Município de Olinda (PE-Brasil): processo nos anos 1950 com efeitos na morfologia urbana atual. In: **XVI - Encuentro De Geógrafos De América Latina.** La Paz: EGAL, v. 1. p. 1-15, 2017.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston/Washington, v. 93, p. 1879-1900, dez. 2012.

VOOGT, J. A., OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote sensing of environment**, New York-EUA, v. 86, n. 3, p.370-384, 2003.

WERNECK, D. R. **Variabilidade da temperatura de superfície diurna entre as zonas climáticas locais (LCZ):** um estudo para a área urbana do Distrito Federal. 2022. 174 f., il. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.