Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ANÁLISE DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E O MAPEAMENTO TÉRMICO DO MUNICÍPIO DE BELÉM/PA

Analysis of local climate zones and thermal mapping in the municipality of Belém, Pará, Brasil

Análisis de las zonas climáticas locales y el mapeo térmico del municipio de Belém, Pará, Brazil

Eduardo da Silva Margalho
Instituição: Universidade Federal do Ceará
E-mail: margalhoddma@gmail.com

Maria Elisa Zanella
Instituição: Universidade Federal do Ceará
E-mail: elisazv22@gmail.com

Letícia Karyne da Silva Cardoso
Instituição: Universidade Federal do Ceará
E-mail: leticiakscardoso@gmail.com

Resumo: O presente estudo tem o intuito de analisar a cobertura da superfície e os tipos de construções presentes no município de Belém, capital do estado do Pará, através de um conjunto de dados meteorológicos oriundos de transecto móvel e somado com a metodologia de classificação das zonas climáticas locais (ZCL). A classificação da ZCL possui duas classificações, tipo de edificações/construções e tipo de cobertura da terra, a primeira é dividida em sete com intervalos de 1 a 10 e a segunda é dividida também em sete, porém intervalos de A a G. Visto isso, observou-se que as ZCL 2 e 3 estão mais presentes nos bairros pertencentes aos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta, tais tipologias são, respectivamente, compacta de média elevação e compacta de baixa elevação. Por outro lado, os distritos de Outeiro e Mosqueiro apresentam em sua maioria, ZCL dos tipos 6 (aberta de baixa elevação) e A (Vegetação arbórea densa). Em relação ao campo térmico, o estudo apresenta valores máximos de temperatura do ar nas ZCL's com maior densidade de construção

(aglomeração de estruturas edificadas e ausência de vegetação) com intervalos de valores de 28,0 °C a 29,3 °C e nas áreas que apresentam tipos de construções mais abertas e residenciais, apresentando maior espaço entre as construções e com presença de vegetação os valores de temperatura do ar ficam em torno de 26,5 °C e 27,0 °C.
Palavras-chave: Clima Urbano. Geoprocessamento. Campo térmico.

Abstract: The objective of the present study is to analyze land cover and construction typologies in the municipality of Belém, capital of the state of Pará, using a meteorological dataset derived from mobile transects integrated with the Local Climate Zones (LCZ) classification methodology. The LCZ framework comprises two main categories: building types and land cover types. The former consists of ten classes (numbered 1 to 10), while the latter includes seven classes (labeled A to G). The results indicate that LCZ 2 (Compact Mid-rise) and LCZ 3 (Compact Low-rise) predominate in neighborhoods located in the districts of Guamá, Belém, and Sacramenta. Conversely, the districts of Outeiro and Mosqueiro are primarily characterized by LCZ 6 (Open Low-rise) and LCZ A (Dense Trees). Regarding the thermal field, the highest air temperatures were observed in LCZs with higher building density, characterized by a concentration of built structures and limited vegetation cover, with values ranging from 28.0 °C to 29.3 °C. In contrast, areas with more open urban layouts, greater spacing between buildings, and the presence of vegetation exhibited lower air temperatures, ranging from 26.5 °C to 27.0 °C.
Keywords: Urban Climate. Geoprocessing. Thermal Field.

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo analizar la cobertura superficial y las tipologías constructivas en el municipio de Belém, capital del estado de Pará, mediante un conjunto de datos meteorológicos obtenidos a través de transectos móviles, integrados con la metodología de clasificación de las Zonas Climáticas Locales (ZCL). El sistema de clasificación ZCL comprende dos categorías principales: tipos de edificación y tipos de cobertura del suelo. La primera se subdivide en clases numeradas del 1 al 10, mientras que la segunda se divide en siete categorías identificadas de la A a la G. A partir de este análisis, se observó que las ZCL 2 y 3 predominan en los barrios pertenecientes a los distritos de Guamá, Belém y Sacramenta; dichas tipologías corresponden, respectivamente, a la clase compacta de altura media y a la clase compacta de baja altura. Por el contrario, los distritos de Outeiro y Mosqueiro presentan mayoritariamente ZCL de tipo 6 (abierta de baja altura) y A (vegetación arbórea densa). En lo que respecta al campo térmico, se registraron los valores máximos de temperatura del aire en las ZCL con mayor densidad constructiva —caracterizadas por la aglomeración de estructuras edificadas y la ausencia de vegetación— con intervalos que oscilan entre 28,0 °C y 29,3 °C. En cambio, en las zonas que presentan tipologías constructivas más abiertas y residenciales, con mayor espaciamiento entre edificaciones y presencia de vegetación, los valores de temperatura del aire se situaron entre 26,5 °C y 27,0 °C.
Palabras clave: Clima urbano. Geoprocesamiento. Campo térmico.

Submetido em: 26/03/2025
Aceito para publicação em: 03/05/2026
Publicado em: 24/07/2026

1. INTRODUÇÃO

As configurações do terreno em uma região urbana são um dos principais fatores que influenciam a formação do clima urbano, especialmente quando há homogeneização das estruturas construtivas, ou seja, quando uma determinada área apresenta um tipo específico de edificação, seja ela residencial ou comercial. Nesse contexto, Stewart e Oke (2012) desenvolveram um conjunto de classificações baseadas nas configurações e características da cobertura do solo, incorporando posteriormente fatores meteorológicos para o estudo do clima urbano. Essa classificação foi denominada zonas climáticas locais (ZCL).

As zonas climáticas locais são um mecanismo para estudar o clima urbano a partir das estruturas urbanas e naturais. São áreas divididas com cobertura superficial uniforme que abrangem uma grande extensão horizontal. Segundo Monteiro (2018), os processos de ocupação do solo nas regiões urbanas e os padrões na composição das estruturas influenciam a intensificação e a distribuição espacial da temperatura do ar. Dessa forma, as ZCL possibilitam uma análise mais detalhada das propriedades da cobertura terrestre associadas à distribuição da temperatura do ar (STEWART e OKE, 2009).

Esse sistema classificatório da paisagem urbana, por sua consistência e aplicabilidade, vem sendo amplamente referenciado e adotado em estudos climatológicos urbanos. Por exemplo, Krüger e Pereira (2020) empregaram a classificação das ZCL para investigar as diferenças térmicas intraurbanas na malha urbana de Londres, associando os dados de temperaturas e insolação para compreender as dinâmicas térmicas locais. Além disso, a aplicação das ZCL está intimamente relacionada à análise do fenômeno atmosférico conhecido como ilha de calor urbana (ICU), caracterizado pelo aumento significativo das temperaturas em áreas densamente urbanizadas. Segundo Souza et al. (2020) e Pinton et al. (2021), a metodologia das ZCL é essencial para medir quantitativamente a magnitude e a intensidade das ICUs, sendo alvo constante de aprimoramentos metodológicos para aumentar sua precisão e abrangência.

Dessa maneira, o emprego das zonas climáticas locais representa uma abordagem integrada para a compreensão dos processos microclimáticos urbanos, permitindo identificar como variações na cobertura do solo, aliadas a fatores meteorológicos, influenciam a qualidade ambiental e o conforto térmico nas cidades. Considerando tais aspectos, o presente

estudo tem por objetivo avaliar a distribuição da cobertura superficial no município de Belém, analisando de forma detalhada o comportamento térmico associado aos diferentes tipos de cobertura do solo, para uma melhor compreensão das dinâmicas climáticas urbanas em regiões amazônicas.

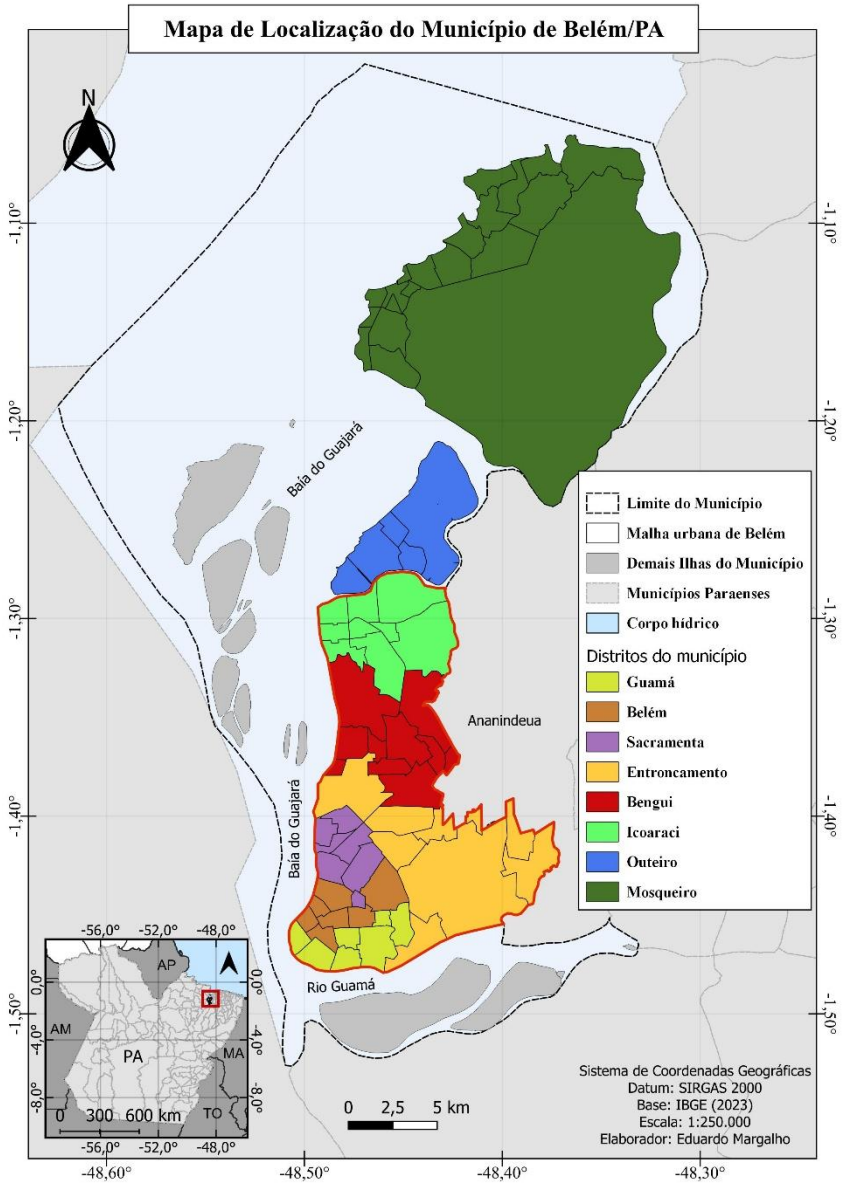
2. METODOLOGIA

2.1. Local de Estudo

O presente estudo tem como área de análise o município de Belém, localizado na Região Norte do Brasil e capital do estado do Pará (Figura 1). O município encontra-se subdividido em oito distritos administrativos: Guamá, Belém, Sacramenta, Entroncamento, Benguí, Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro. Segundo dados do Censo Demográfico de 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Belém possui uma população estimada em aproximadamente 1.303.389 habitantes. A estrutura urbana da cidade é marcada por uma mistura de áreas densamente urbanizadas e vastas regiões com cobertura vegetal remanescente, sobretudo nas ilhas adjacentes, como Mosqueiro e Outeiro, que apresentam características socioambientais diferenciadas.

Além disso, a componente populacional distribui-se de maneira desigual entre os distritos, refletindo variações no uso e ocupação do solo. Essas particularidades tornam Belém um objeto de estudo relevante para compreender os impactos da urbanização sobre o clima urbano, especialmente no contexto amazônico, onde fatores naturais e antrópicos interagem de forma complexa.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O regime climático do município de Belém é caracterizado por apresentar dois períodos distintos ao longo do ano, que refletem diretamente nas condições ambientais. O primeiro período corresponde à estação chuvosa, que se estende de dezembro a junho, quando a precipitação é significativamente elevada. Durante essa fase, a incidência de chuvas intensas e frequência elevada de eventos meteorológicos podem gerar impactos como alagamentos e transtornos. O segundo período, que vai de julho a novembro, é classificado como estação menos chuvosa, apresentando menor volume pluviométrico, além de

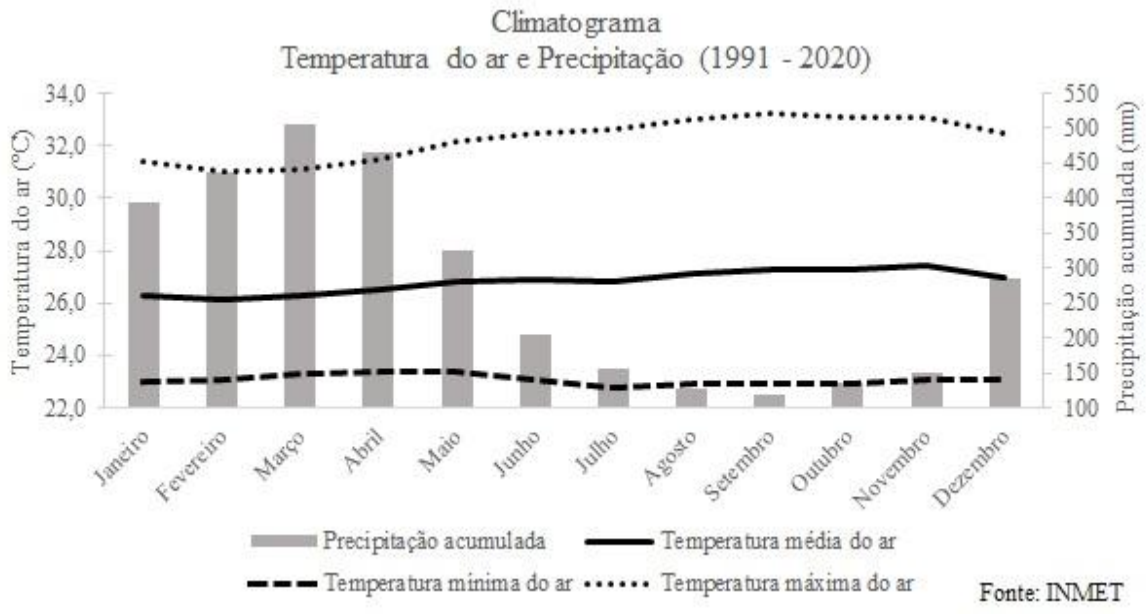
influenciar os padrões térmicos e a atuação dos sistemas meteorológicos locais. Essa alternância sazonal de chuvas é um dos principais fatores determinam o clima equatorial.

Conforme a classificação climática de Köppen e Geiger, Belém possui clima tropical úmido, também denominado como clima tropical ou equatorial úmido ou clima tropical chuvoso de floresta (Af) (Beck et al., 2018). No que diz respeito à energia térmica, o município apresenta baixa amplitude térmica anual, variando entre 8,0 e 10,0 °C. O período com as temperaturas médias mais baixas corresponde aos meses de janeiro a junho, quando ocorrem maiores volumes pluviométricos, enquanto as temperaturas médias mais elevadas concentram-se no intervalo de julho a dezembro, período de menor precipitação (Costa et al., 2013; Dubreuil et al., 2018; Margalho, 2019).

De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média anual no município é de 26,8 ºC, com temperatura mínima média de 23,1 °C e máxima média de 32,3 °C. A umidade relativa do ar apresenta um valor médio anual de 84,1%, enquanto a precipitação acumulada anual alcança aproximadamente 3.308,3 mm. Na Figura 2, encontram-se o climatograma que relaciona temperatura do ar e precipitação acumulada, referentes ao período da normal climatológica de 1991 a 2020.

Segundo Cardoso et al. (2022), os principais sistemas meteorológicos que atuam sobre a região de Belém e influenciam diretamente os padrões de precipitação são: A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), as linhas de instabilidade atmosférica e as brisas locais. A ZCIT, posicionada mais ao sul da linha do Equador, promove a convergência de ventos alísios e a elevação de massas de ar úmidas, gerando chuvas frequentes e intensas. O VCAN, um sistema de baixa pressão em altos níveis da atmosfera, age reforçando a convecção, o que intensifica episódios de precipitação significativa. As linhas de instabilidade atmosférica são faixas de instabilidades que se deslocam pela região, provocando temporais e variações abruptas na precipitação. Além disso, as brisas locais influenciam a circulação do ar próximo à superfície, alterando as condições de temperatura e umidade em níveis locais. A combinação desses fenômenos mantém o regime característico de chuvas e temperaturas em Belém, impactando os processos ambientais e as atividades humanas na região.

Figura 2 - Climatograma Temperatura do ar e da Precipitação acumulada do município de Belém/PA.

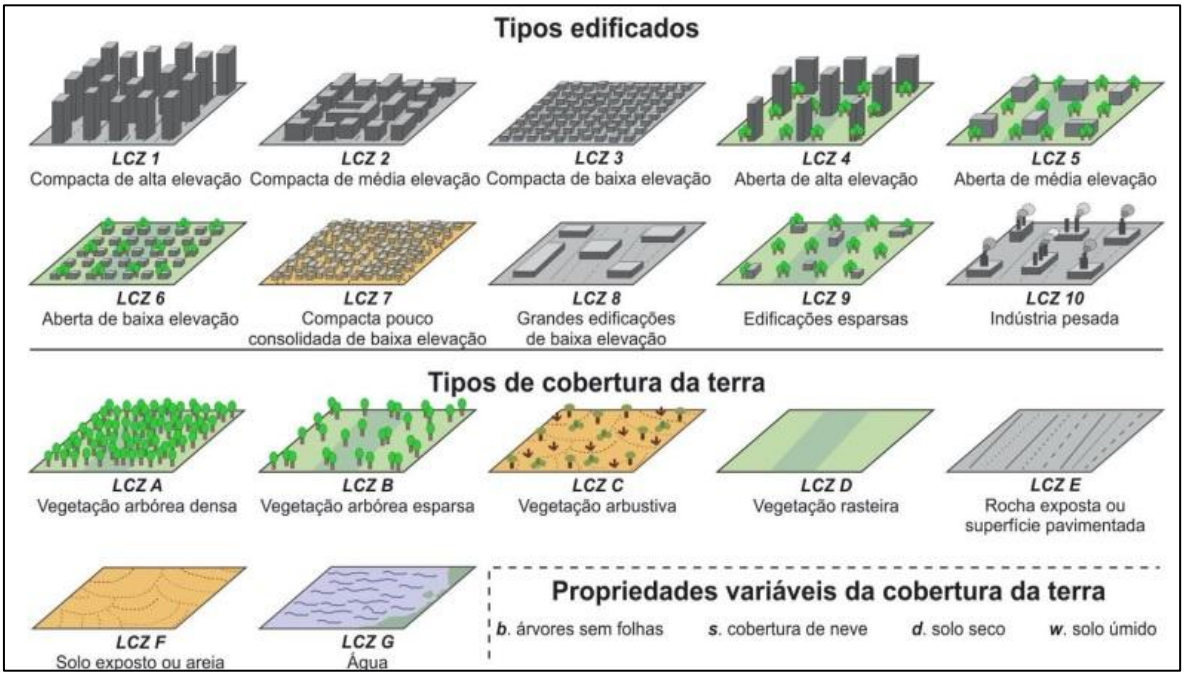


Fonte: INMET.

2.2. Classificação ZCL

O sistema de classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL), denominado em inglês Local Climate Zones (LCZ), organiza-se em dois grupos principais, totalizando 17 classes distintas (Figura 3). O primeiro grupo agrupa dez classes, numeradas de 1 a 10, que são definidas com base nos diferentes tipos de estruturas construídas e características do ambiente urbano. O segundo grupo compreende sete classes, designadas pelas letras de A a G, organizadas em ordem alfabética, as quais são caracterizadas pelos diversos tipos de cobertura do solo presentes na paisagem.

Figura 3 - Classificação e tipos de Zonas Climáticas Locais.



Fonte: Pinton et al. (2021).

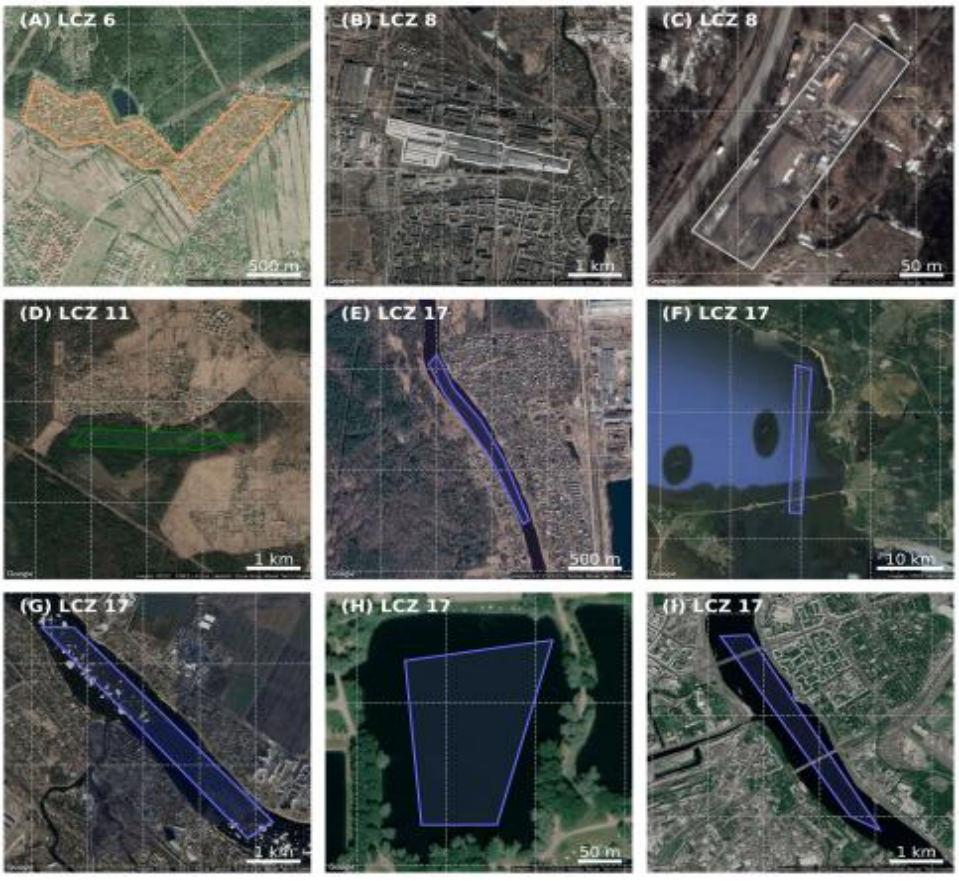
O presente estudo adotou o método proposto por Demuzere et al. (2021), que utiliza uma ferramenta denominada LCZ Generator, a qual permite a geração da classificação das Zonas Climáticas Locais. O ponto inicial do processo consiste na delimitação das áreas correspondentes a cada classe de ZCL, realizada por meio da análise de imagens de satélite obtidas pelo Google Earth Pro, com o objetivo de identificar os tipos de cobertura do solo e as categorias de edificações presentes na região de estudo.

Esse procedimento está alinhado às diretrizes do projeto World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), iniciativa internacional voltada à padronização e disponibilização de informações urbanas para aplicações em climatologia urbana. Tem como base o conceito de classificação das Zonas Climáticas Locais. O WUDAPT propõe uma metodologia estruturada em três níveis, sendo o primeiro nível voltado à produção de mapas LCZ a partir de dados de sensoriamento remoto e treinamento supervisionado utilizando o LCZ Generator (https://lcz-generator.rub.de/), esse processo envolve a delimitação manual de áreas homogêneas de treinamento, etapa fundamental para assegurar a representatividade espectral e morfológica (Demuzere et al., 2021). O WUDAPT busca criar um banco de dados urbano global aberto, permitindo a integração dos mapas LCZ em modelos climáticos urbanos, estudos de ilhas de calor, planejamento urbano e análises ambientais.

A demarcação das áreas na interface do LCZ Generator é feita através da criação de polígonos, que correspondem espacialmente a cada classe de ZCL. Esses polígonos devem respeitar regras de definição para assegurar a homogeneidade e representatividade das áreas classificadas. Entre essas regras, destaca-se a necessidade de que as áreas poligonais não excedam uma superfície aproximada de 1,5 km², para evitar a inclusão de heterogeneidades excessivas que comprometeriam a acurácia da classificação (Bechtel et al., 2015; Ferreira et al., 2023). Além disso, os polígonos devem ser delimitados considerando a uniformidade estrutural da cobertura do solo, observando aspectos como a densidade construtiva, altura das edificações, uso do solo e presença de vegetação, de modo a garantir a coerência entre os elementos observados por sensoriamento remoto e a realidade local.

Essa delimitação é fundamental para a confiabilidade dos mapas de ZCL, uma vez que eles serão utilizados como base para análises climáticas urbanas. A Figura 4 exemplifica o processo de demarcação desses polígonos, mostrando a espacialização das diferentes classes de ZCL conforme as diretrizes estabelecidas na metodologia.

Figura 4 - Polígonos para demarcação para classificação das ZCL's.



Fonte: Demuzere et al. (2021)

O arquivo contendo a demarcação das Zonas Climáticas Locais é posteriormente salvo em formato KML e importado para a interface do LCZ Generator. Essa plataforma oferece a vantagem da geração automatizada das ZCL, por meio da integração de conjuntos de dados provenientes de diversos satélites, como Landsat e Sentinel, associados à plataforma Google Earth Engine (GEE). Além de permitir o processamento abrangente e eficiente de grandes volumes de dados espaciais, o LCZ Generator proporciona uma sustentação estatística para a classificação, evidenciada por meio de métricas de precisão que avaliam a acurácia dos resultados (Gorelick et al., 2017; Demuzere et al., 2020). A Tabela 1 apresenta as métricas de precisão que sustentam a qualidade da classificação realizada, assegurando a validade dos resultados para fins científicos e de planejamento urbano.

Tabela 1 - Precisão métrica da interface LCZ Generator.

AO	Precisão Geral das ZCL	Representa a acurácia global da classificação, considerando todas as classes de Zona Climática Local (ZCL). Indica a proporção total de acertos em relação ao número total de amostras avaliadas.
OA_u	Precisão Geral apenas para as classes urbanas das ZCL	Corresponde à acurácia calculada exclusivamente para as classes urbanas, desconsiderando as classes naturais. Essa métrica é útil para avaliar o desempenho do classificador nas áreas mais densamente edificadas.
OA_{bu}	Precisão Geral das classes construídas vs Classes naturais	Mede a capacidade do modelo em distinguir corretamente as classes construídas (edificações, pavimentos, etc.) das classes naturais (vegetação, solo exposto, corpos hídricos). É uma métrica de contraste entre o ambiente urbano e o natural.
OA_w	Precisão ponderada	Refere-se à acurácia ajustada pelo peso de cada classe, levando em consideração a proporção de amostras em cada categoria. Dessa forma, evita se que classes com maior número de pixels influenciem de forma desproporcional o resultado geral.

Fonte: Demuzere et al. (2020)

2.3. Transecto móvel

A etapa subsequente à classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL's) consiste no registro térmico, isto é, na captação das variáveis meteorológicas, executada neste estudo por meio de transectos móveis. As variáveis meteorológicas coletadas incluíram a temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), temperatura de orvalho (°C) e pressão atmosférica (hPa).

Contudo, para a elaboração do mapeamento térmico, a variável adotada foi a temperatura do ar (°C).

Quanto aos instrumentos utilizados para a aquisição dos dados, empregou-se um termohigrômetro do tipo datalogger (Figura 5), equipamento equipado com memória interna que permite a leitura, registro e armazenamento contínuo das variáveis meteorológicas. Importa destacar que esse equipamento realiza o registro simultâneo de todas as variáveis disponíveis, sem a possibilidade de seleção individual durante a coleta.

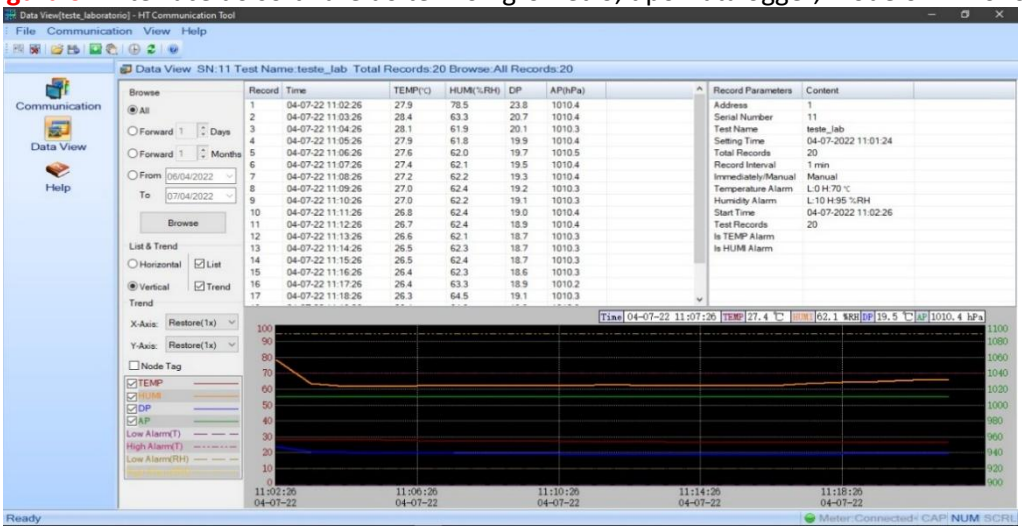
Adicionalmente, o termohigrômetro possui um software dedicado, cuja interface é apresentada na Figura 6, que possibilita a visualização gráfica dos dados coletados, bem como a exportação dos arquivos para formatos compatíveis com planilhas eletrônicas, facilitando a análise estatística e a manipulação dos dados para estudos posteriores.

Figura 5 – Termohigrômetro utilizado, tipo Datalogger, modelo HT-4010.



Fonte: Autor (2022)

Figura 6 - Interface do software do termohigrômetro, tipo Datalogger, modelo HT-4010.



Fonte: Autor (2022)

A construção de um abrigo meteorológico (Figura 7) mostrou-se necessária para a proteção do instrumento durante as coletas, prevenindo avarias e, sobretudo, assegurando que as leituras não fossem afetadas por condições adversas. Os registros das variáveis meteorológicas foram realizados em intervalos de 5 segundos, contudo, para análise, foram considerados os dados agregados por minuto, registrados juntamente com a posição georreferenciada obtida pelo GPS do smartphone no instante correspondente.

As coletas ocorreram durante o período de uma hora, das 20h30 às 21h30, ao longo de três dias consecutivos, com o propósito de abranger toda a malha urbana do município de Belém. A escolha desse intervalo se justifica porque é um período em que não há influência da radiação solar direta, o que minimiza interferências nas medições de temperatura do ar devido ao aquecimento solar. Além disso, trata-se de resfriamento, quando as variações térmicas refletem mais diretamente a influência da cobertura do solo e das estruturas urbanas (Grigoletti et al., 2018).

Para garantir a qualidade e padronização dos dados coletados, a velocidade do veículo durante os transectos móveis seja mantida entre 20 e 30 km/h, velocidade adotada no estudo, o que favorece leituras estáveis e representativas. Além disso, o tempo total de percurso entre o ponto inicial e final do transecto não deve ultrapassar uma hora, pois minimiza a influência da variação do tempo (Junior et al., 2020).

A altura de instalação dos sensores é outro aspecto fundamental para a acurácia dos dados. A posição do termohigrômetro em torno de 1,5 a 1,7 metros de altura, como adotado no veículo deste estudo, é recomendada para representar as variações e coleta das variáveis, em conforme os estudos realizados por Fialho et al. (2016) e Porangaba et al. (2017).

Essa metodologia, corroborada por pesquisas anteriores (Amorim et al., 2009; Castro, 2022), permite uma amostragem espacial da temperatura do ar, facilitando a identificação das variações térmicas intraurbanas e contribuindo para a análise das ilhas de calor e o planejamento ambiental urbano. A conjugação do abrigo meteorológico, controle da velocidade do veículo e adequada posição do sensor oferece confiabilidade e qualidade aos dados coletados durante os transectos móveis.

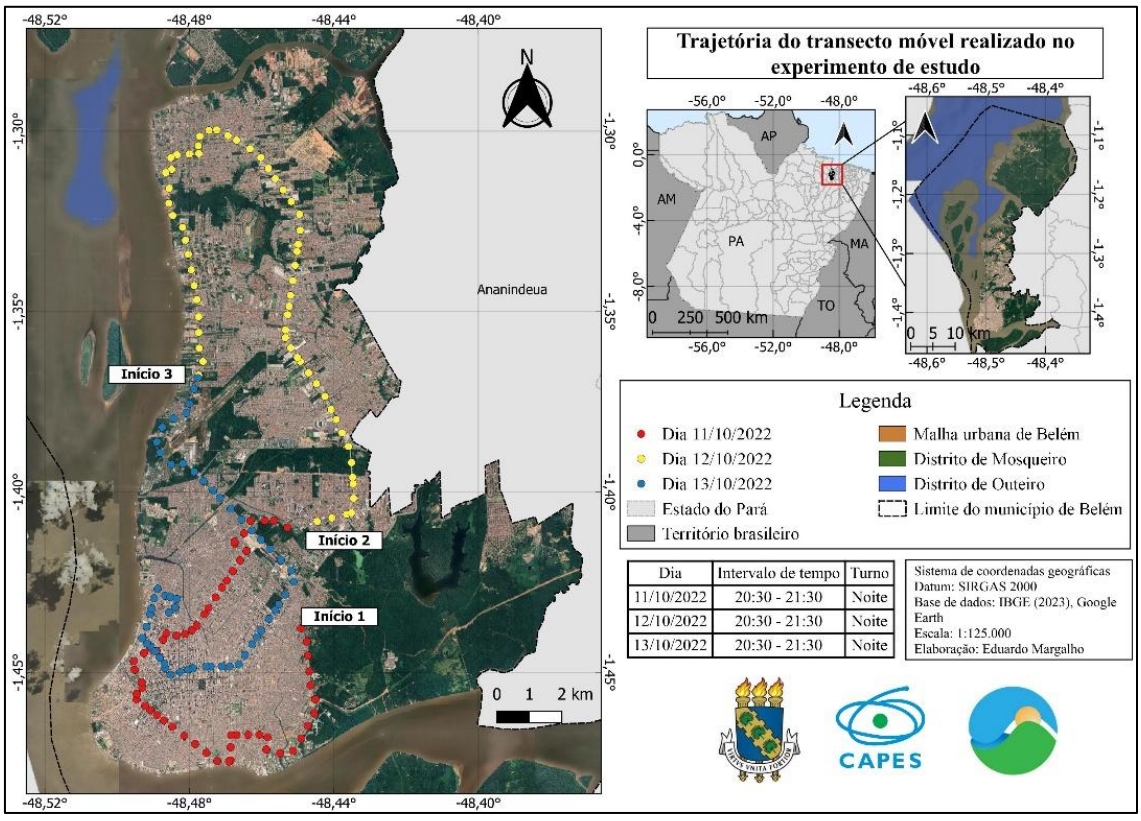
Figura 7 - Abrigo meteorológico para o termohigrômetro, tipo Datalogger, modelo HT-4010.



Fonte: Autor (2025)

Conforme descrito anteriormente, a metodologia do transecto móvel foi aplicada exclusivamente na malha urbana do município de Belém. A Figura 8 ilustra o trajeto percorrido durante o experimento, indicando os dias e os horários em que as variáveis meteorológicas foram captadas. Essa visualização facilita a compreensão espacial do percurso realizado e a temporalidade da coleta dos dados.

Figura 8 - Trajetória do transecto móvel.



Fonte: Autor (2025)

2.4. Processamento dos dados

Os dados meteorológicos oriundos do transecto móvel foram processados por meio de planilhas eletrônicas e de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software livre e gratuito QGIS, versão 3.28, para a análise geoestatística e a geração do mapeamento térmico. Além disso, usou-se o ambiente SIG para a aplicação da interpolação, tal procedimento consistiu, primeiramente, na geração de pontos amostrais (transecto móvel), em que cada ponto apresentou um valor específico de temperatura do ar. A partir desses pontos, foi realizada a interpolação de superfície utilizando o método Regularized Spline with Tension (RST), que cria uma camada raster contínua e suave. Segundo Bertolini et al. (2021), este método minimiza a curvatura geral da superfície a partir dos pontos de controle, proporcionando uma representação precisa e visualmente coerente da distribuição espacial da temperatura.

Este método se consolidou como uma alternativa para a representação da variabilidade térmica intraurbana, permitindo capturar nuances locais e preservar transições de valores mesmo em áreas com alta heterogeneidade de uso e cobertura do solo. Conforme Mitas & Mitasova (1999), o RST proporciona maior precisão do que métodos polinomiais globais ou simples médias, tornando-se fundamental para a geração de mapas contínuos capazes de evidenciar diferenças microclimáticas sutis dentro do espaço urbano.

Para a identificação e processamento das Zonas Climáticas Locais (ZCL), empregou-se o software LCZ Generator, especializado na classificação automática dessas zonas. Os produtos gerados por essa ferramenta foram posteriormente importados e manipulados no QGIS, possibilitando a integração espacial e a análise dos dados urbanos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

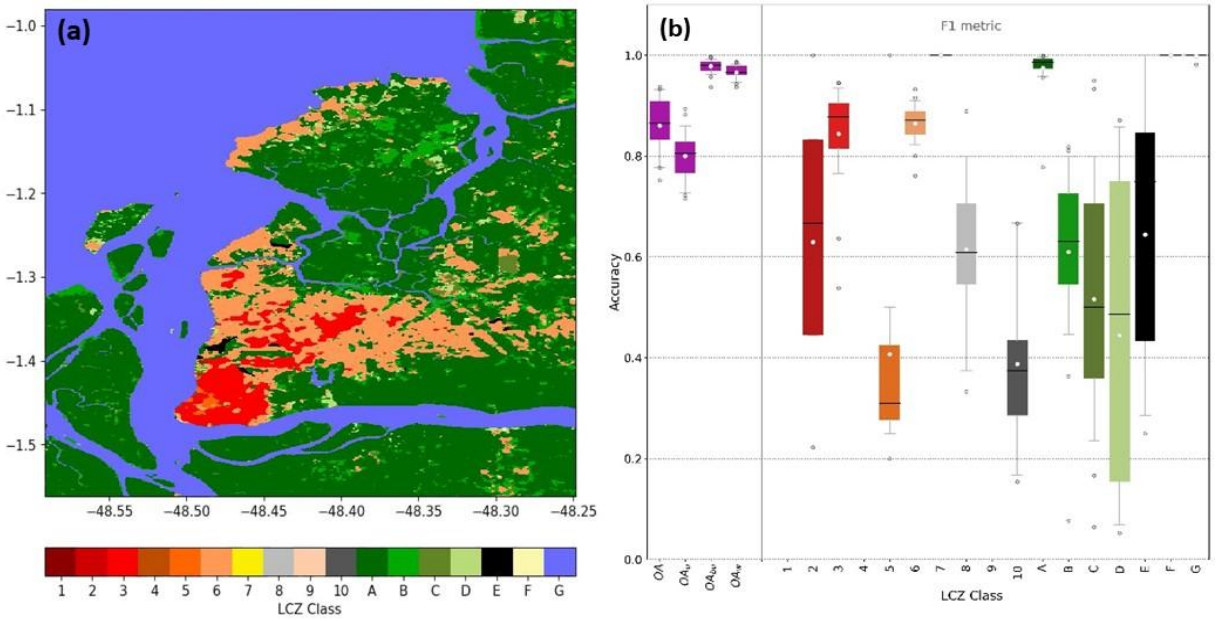
3.1. Análise das Zonas Climáticas Locais (ZCL)

No presente estudo, as métricas estatísticas de precisão apresentaram valores superiores a 0,8 (80%) de acurácia. Destaca-se que a métrica O_{Abu} (Precisão Geral das classes construídas e Classes naturais) demonstrou o maior índice de precisão, enquanto a precisão geral (AO), em média, foi de 85%. As classes com maior acurácia foram a ZCL-F e a ZCL-G,

correspondentes, respectivamente, aos tipos de cobertura de solo exposto/areia e de corpo hídrico (água).

A Figura 9 apresenta a classificação das ZCL's (a) e os níveis de acurácia (b) para todas as classes obtidas via interface do LCZ Generator para o município de Belém/PA. Em termos gerais, a classificação obteve um desempenho satisfatório, com acurácia superior a 80% em todas as categorias analisadas, evidenciando a confiabilidade do método aplicado para o mapeamento das zonas climáticas locais na área estudada.

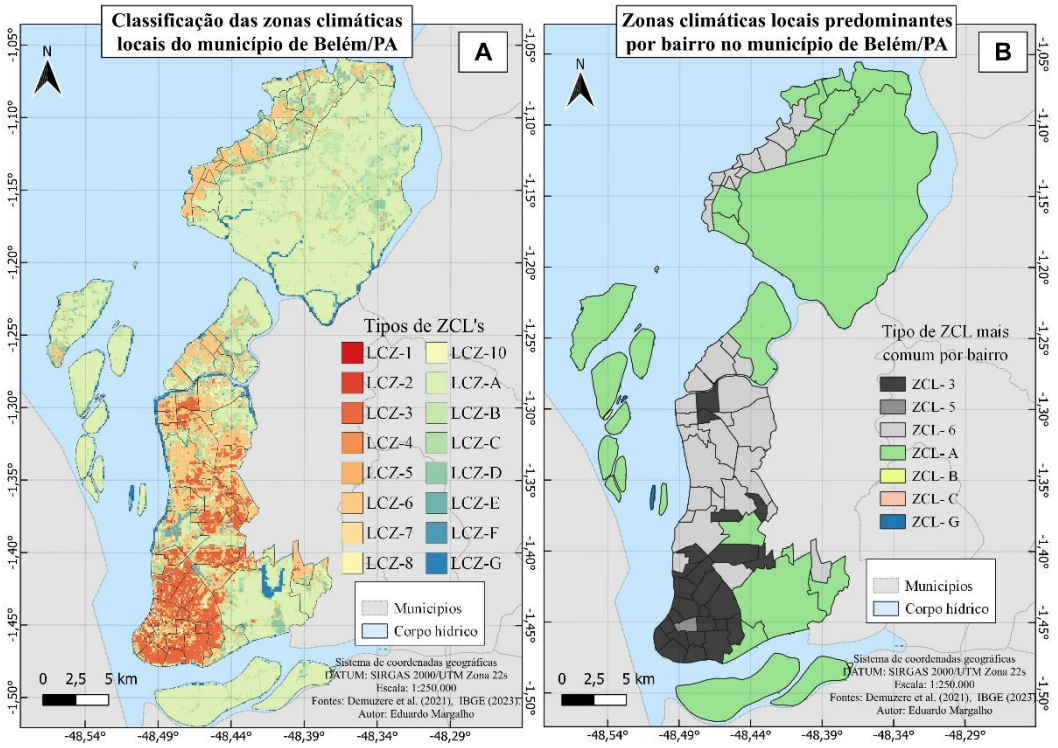
Figura 9 - Classificação das classes geradas pela interface LCZ Generator (a), métricas de precisão (b)



Fonte: LCZ Generator (2022)

Na Figura 10, apresenta-se a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL), referente ao município de Belém/PA no ano de 2022.

Figura 10 - Classificação das zonas climáticas locais do município de Belém/PA, distribuição das Zonas Climáticas Locais (A) e Zonas Climáticas Locais com maior frequência.



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 10A, observa-se a distribuição espacial dos tipos de construção e cobertura do solo, destacando-se os distritos de Outeiro e Mosqueiro, onde predominam duas classes principais de ZCL: ZCL-6, que representa construções abertas de baixa elevação, e ZCL-A, associada a cobertura do solo com vegetação arbórea espaçada. Tal distribuição indica que ambos os distritos ainda apresentam processo de expansão urbana, sendo que Outeiro, devido à sua maior integração com a malha urbana de Belém, tende a um crescimento urbano mais acelerado nos próximos anos. Por sua vez, Mosqueiro pode experimentar redução da cobertura vegetal ao longo do tempo, visto que a maior parte de sua área está classificada entre ZCL-A e ZCL-B.

Em contraponto, a malha urbana mais consolidada, representando maior heterogeneidade na classificação das ZCL, está situada nos distritos de Guamá, Belém e Sacramenta. Nestes, as classes predominantes são ZCL-2 (compacta de média elevação), ZCL-3 (compacta de baixa elevação), ZCL-4 (aberta de alta elevação) e ZCL-5 (aberta de média elevação), destacando-se a presença exclusiva da ZCL-2 no distrito de Belém. Esses distritos caracterizam-se por áreas urbanas consolidadas, concentrando os maiores volumes

edificados, enquanto a expansão urbana direcionou-se principalmente para outros distritos.

Ainda, observa-se que os distritos de Entroncamento, Bengui e Icoaraci apresentam maior diversidade de classes ZCL, incluindo tipologias como ZCL-3, ZCL-4, ZCL-5, ZCL-6, ZCL-7 (compacta pouco consolidada de baixa elevação), ZCL-8 (grandes edificações de baixa elevação), ZCL-10 (industrial), bem como as coberturas de vegetação densa, esparsa e arbustiva (ZCL-A, ZCL-B e ZCL-C) e solo exposto (ZCL-F). Esses distritos combinam edificações residenciais variadas, presença significativa de vegetação e constituem áreas importantes de crescimento e expansão urbana da cidade.

A Figura 10B detalha as ZCL mais frequentes por bairro, evidenciando que as classes edificadas ZCL-3 e ZCL-6 são as predominantes, enquanto a ZCL-A se sobressai na cobertura vegetal. Nos distritos de Guamá, Belém e Sacramenta, a ZCL-3 caracteriza áreas urbanas consolidadas, especialmente nos bairros do Reduto, Jurunas, Guamá e Pedreira. Já os distritos de Bengui e Icoaraci apresentam maior frequência da ZCL-6, enquanto os bairros do Bengui, Cabanagem (distrito de Bengui), Agulha e Campina do Icoaraci abrigam predomínio da ZCL-3, evidenciando áreas urbanas consolidadas distintas no interior desses distritos.

O distrito de Entroncamento apresenta a maior diversidade nas classes ZCL dos seus bairros, devido à presença de áreas de preservação ambiental, como o Parque do Utinga, e pela sua proximidade com o município vizinho de Ananindeua, onde se observa intensificação do processo de urbanização em bairros de fronteira, como Aurá (ZCL-6) e Marambaia (ZCL-3).

Os distritos de Outeiro e Mosqueiro, por sua vez, ainda são caracterizados por extensas áreas de vegetação arbórea densa e construções abertas de baixa elevação, indicando um processo de urbanização incipiente.

Embora o município de Belém apresente significativa cobertura vegetal, principalmente nos distritos de Outeiro e Mosqueiro, que demandam um planejamento urbano equilibrado entre a preservação ambiental e a expansão construtiva, os distritos de Bengui e Icoaraci apresentam avanço no processo de urbanização, expandindo-se para áreas que ainda mantêm estruturas residenciais associadas à vegetação arbórea. Já os distritos de Guamá, Belém e Sacramenta configuram áreas urbanas consolidadas, com limitada disponibilidade para expansão horizontal e potencial para verticalização, representando aumento populacional por edificações verticais.

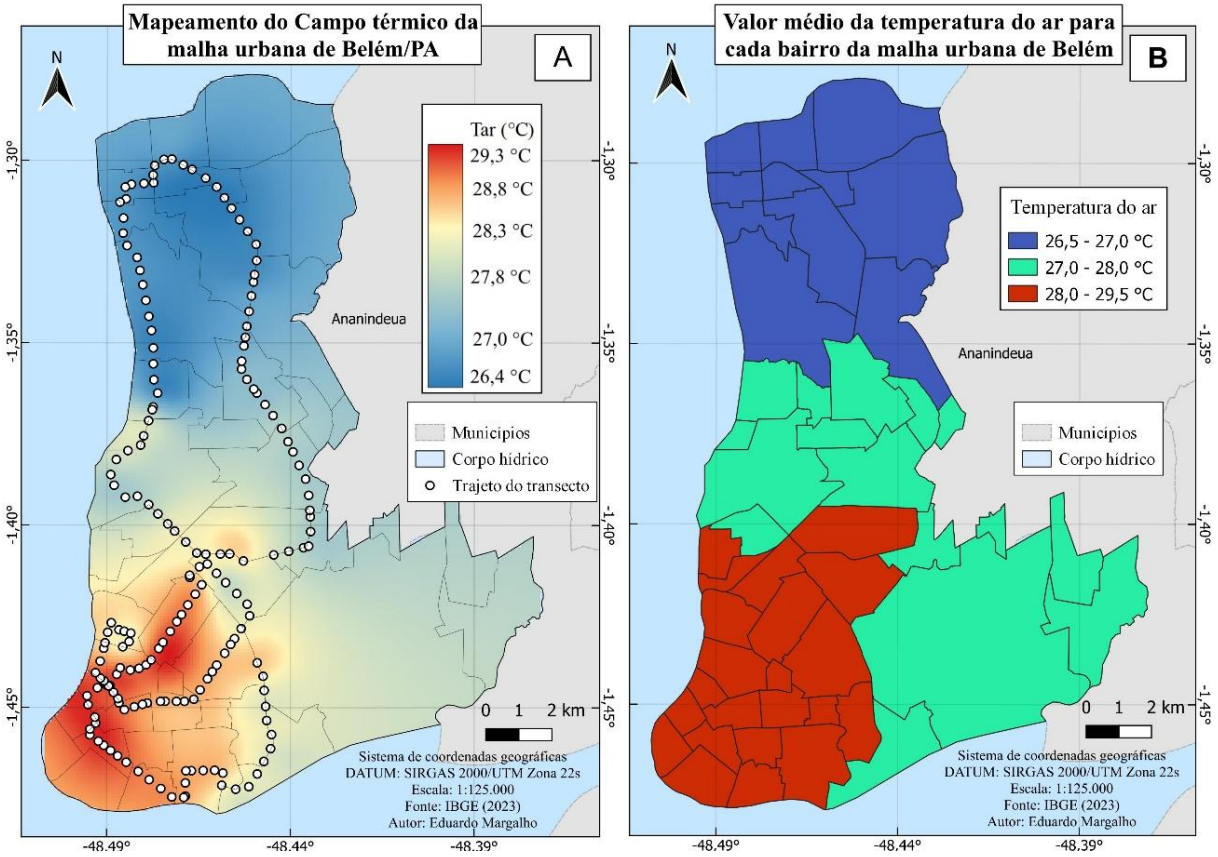
3.2. Análise do mapeamento térmico

O mapeamento térmico foi realizado por meio de transecto móvel, abrangendo exclusivamente a malha urbana do município de Belém, com exclusão das pequenas ilhas e dos distritos de Outeiro e Mosqueiro, devido a limitações de acesso e restrições temporais para a coleta das variáveis meteorológicas. As medições das variáveis temperatura do ar e umidade relativa foram efetuadas durante o período noturno, das 20h30 às 21h30.

A partir desses dados, realizou-se a interpolação espacial por meio do método de superfícies regulares suavizadas por tensão (Regularized Spline with Tension – RST) em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), resultando em uma camada raster contínua e suave. Segundo Bertolini et al. (2021), o RST permite ajustar o grau de suavização por meio de um parâmetro de tensão, controlando a flexibilidade da superfície e minimizando oscilações abruptas; assim, superfícies mais rígidas aproximam-se de um comportamento planar, enquanto superfícies mais flexíveis enfatizam variações locais. Essa característica é especialmente útil em estudos ambientais e urbanos, pois possibilita representar gradientes térmicos de forma realista, preservando tendências gerais e evitando distorções na interpolação (Szymanowski e Kryza, 2009).

Os resultados são apresentados em duas figuras: a Figura 11A ilustra a interpolação espacial da temperatura do ar, enquanto a Figura 11B evidencia a temperatura média por bairro. Na Figura 11A, observa-se que os bairros situados nos distritos de Guamá, Belém e Sacramenta apresentam as maiores temperaturas, variando entre 27,8 °C e 29,3 °C, sendo o bairro de Maracangalha o que registra os menores valores nessa região. No distrito do Entroncamento, caracterizado como área de transição, a temperatura oscila entre 27,5 °C e 28,5 °C. Destaca-se o bairro Curió-Utinga, que abriga uma extensa área de vegetação preservada, incluindo um parque de conservação; essa característica pode levar a uma superestimação das temperaturas nas áreas adjacentes durante a interpolação, especialmente em regiões com cobertura vegetal densa, uma vez que o transecto não percorreu essa área específica.

Figura 11 - Mapeamento térmico da Malha urbana de Belém/PA



Fonte: Autor (2025)

Nos distritos de Bengui e Icoaraci encontram-se os valores mais baixos de temperatura, entre 26,4 °C e 28,3 °C, com as mínimas registradas nos bairros Pratinha, Tapanã e Parque Guajará, e as máximas em Bengui, Cabanagem, Mangueirão, Parque Verde e Una.

A Figura 11B apresenta três padrões térmicos médios por bairro: o primeiro inclui bairros com temperatura média acima de 28,0 °C, como Batista Campos, Campina, Reduto e Fátima (valores entre 29,1 °C e 29,2 °C), localizados predominantemente nos distritos de Guamá, Belém e Sacramenta, exceto Marambaia e Souza (distrito do Entroncamento). O segundo padrão abrange bairros com temperatura média entre 27,1 °C e 28,0 °C, incluindo Val-de-Cães (27,9 °C) e São Clemente (27,1 °C), localizados nos distritos de Entroncamento e Bengui. O terceiro padrão corresponde aos bairros com menores temperaturas médias (26,5 °C a 27,1 °C), como Agulha, Águas Negras e Parque Guajará.

Esses padrões evidenciam diferentes estágios do processo de urbanização na malha urbana de Belém, principalmente no que tange à estrutura física e ao adensamento urbano, sendo essas características determinantes para as variações térmicas observadas.

Não obstante, os resultados do mapeamento térmico correlacionam-se com a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) previamente obtidas. Bairros com maior temperatura média localizam-se predominantemente em áreas classificadas como ZCL-3 (Compacta de baixa elevação), típicas dos distritos de Guamá, Belém e Sacramenta. Em contraste, bairros com prevalência da ZCL-6 (Aberta de baixa elevação) apresentaram menores temperaturas médias. Tal correlação confirma estudos anteriores, como o de Silva et al. (2021), que indicam que áreas urbanas densas e estruturadas tendem a registrar temperaturas superiores em relação a áreas com maior cobertura vegetal ou menor densidade edificada.

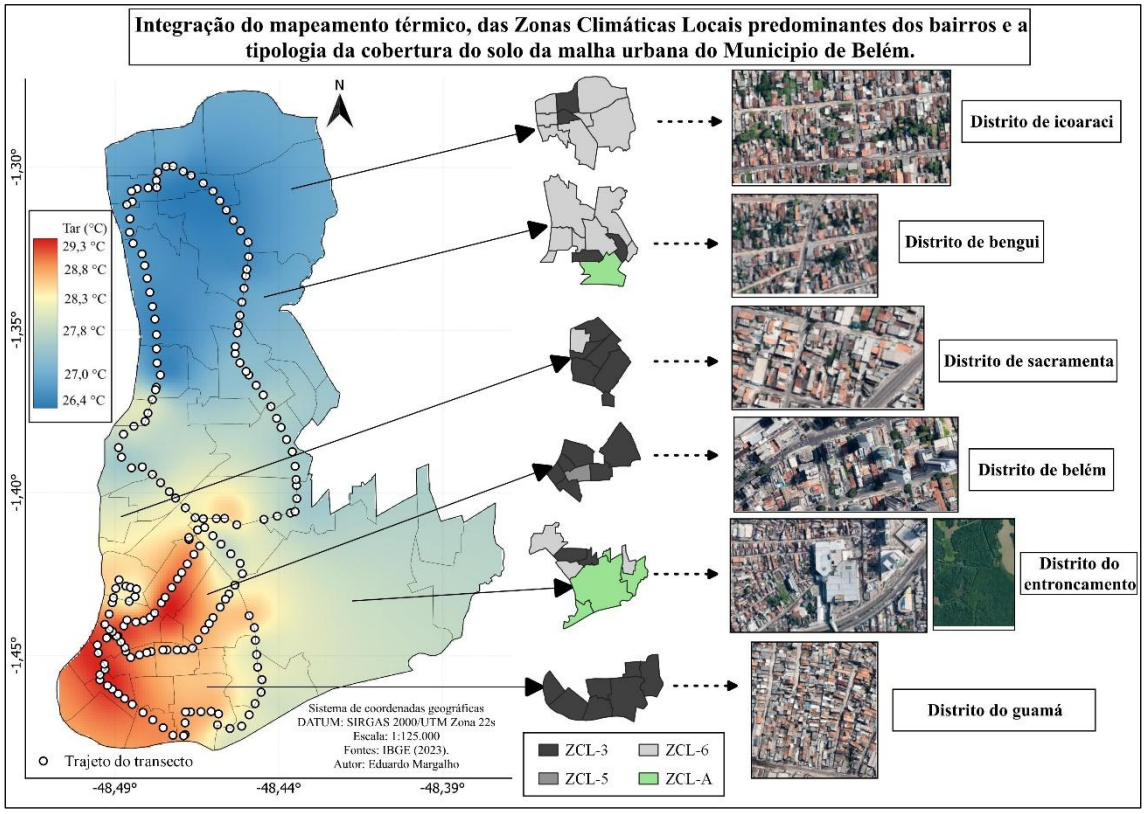
No entanto, ressalta-se que bancos com ZCL menos densas, como Nazaré (ZCL-5), podem não apresentar necessariamente temperaturas mais baixas devido à influência térmica dos bairros vizinhos com tipologias urbanas mais compactadas (ZCL-3).

Devido a restrições de horário e segurança, os transectos móveis não foram realizados nos distritos de Outeiro e Mosqueiro. Contudo, considerando as características urbanas dessas regiões — marcadas por menor consolidação da malha urbana, ampla cobertura vegetal (classificada como ZCL-A) e baixa densidade edificada (classificada como ZCL-6) — espera-se que apresentem temperaturas médias inferiores às observadas nos demais distritos de Belém. Essa expectativa baseia-se nos resultados obtidos na malha urbana, que indicam que a predominância de áreas verdes e a menor ocupação construída contribuem para a redução da temperatura local em comparação às áreas mais urbanizadas.

Os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) indicam ausência de precipitação nos horários das 21h durante os dias das coletas, com temperaturas de 25,6 °C (11/10/2022), 26,0 °C (12/10/2022) e 27,3 °C (13/11/2022), confirmando que os registros foram realizados em condições atmosféricas estáveis.

Por fim, com o objetivo de integrar e interpretar os resultados obtidos, a Figura 12 apresenta a distribuição térmica interpolada da temperatura do ar, juntamente com os respectivos pontos de medição, as classes predominantes de Zonas Climáticas Locais (ZCL) e registros fotográficos representativos do ambiente urbano. Essa integração possibilita uma análise comparativa entre a configuração morfológica urbana e o comportamento térmico observado, conforme proposto na abordagem das Local Climate Zones (Stewart & Oke, 2012).

Figura 12 – Integração do mapeamento térmico e as Zonas Climáticas Locais da Malha urbana de Belém/PA



Fonte: Autor (2025)

Observa-se que os bairros pertencentes aos distritos da Sacramenta, Belém e Guamá apresentam predominância da classe ZCL-3 (compacta de baixa elevação), caracterizada por alta densidade construtiva, reduzida permeabilidade do solo e menor presença de vegetação. Essas áreas registraram os maiores valores de temperatura do ar, com variações entre 28,3 °C e 29,5 °C. Esse comportamento térmico é consistente com estudos que demonstram que áreas urbanas compactas favorecem o armazenamento de calor e a intensificação da ilha de calor urbana, devido à maior capacidade térmica dos materiais e à redução da ventilação (Margalho, 2019).

Em contrapartida, os bairros do distrito de Icoaraci apresentam maior ocorrência da ZCL-6 (aberta de baixa elevação), cuja morfologia urbana é marcada por menor densidade edificada e maior espaçamento entre construções. Nessas áreas foram registrados valores mais baixos de temperatura do ar, variando entre 26,4 °C e 27,0 °C, sugerindo maior eficiência na dissipação térmica e influência significativa de áreas permeáveis e cobertura vegetal, conforme apontado por Bechtel et al. (2015) e Demuzere et al. (2021).

Destaca-se ainda o distrito do Entroncamento, onde se localiza o Parque Estadual do Utinga, classificado como ZCL-A (vegetação arbórea densa). Essa tipologia, caracterizada por cobertura vegetal contínua e elevada fração de sombreamento, tende a apresentar menores temperaturas do ar em comparação às áreas densamente urbanizadas, em função dos processos de evapotranspiração e sombreamento (Stewart & Oke, 2012). Entretanto, os valores interpolados indicaram possível superestimação térmica nas proximidades do parque, o que pode estar relacionado à limitação espacial do transecto móvel e à menor densidade amostral, influenciando o desempenho do método de interpolação.

De modo geral, os resultados evidenciam que a predominância de determinada classe de ZCL exerce influência significativa sobre os padrões térmicos intraurbanos, reforçando a relevância da morfologia urbana e da cobertura do solo na modulação do microclima local. Tais evidências corroboram a aplicabilidade do sistema LCZ como ferramenta eficaz para análises espaciais da variabilidade térmica em ambientes urbanos (Stewart & Oke, 2012).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, verificou-se que a metodologia de classificação das zonas climáticas locais (ZCL) é uma ferramenta eficaz para compreender os efeitos das características urbanas sobre o clima, especialmente em análises relacionadas à componente térmica, como no caso em questão. Os resultados indicam que áreas com maior densidade urbana estão fortemente associadas ao aumento da temperatura do ar durante o período noturno, fenômeno decorrente da absorção e retenção de calor pelas superfícies construídas, que transformam a energia solar recebida em calor irradiado para o ambiente urbano.

Observou-se, também, que as ZCL referentes aos tipos de construção favorecem a elevação da temperatura, enquanto o acoplamento de classes distintas pode contribuir para a mitigação do calor noturno. Estes padrões térmicos identificados por meio das ZCL auxiliam na compreensão dos processos urbanos relacionados ao clima, fundamentando estratégias e projetos urbanos direcionados à redução dos impactos climáticos causados pela urbanização. Assim, os estudos baseados em ZCL podem apoiar o planejamento e desenvolvimento de cidades mais resilientes, capazes de enfrentar as alterações climáticas e fenômenos meteorológicos intensificados pela ação antrópica.

Essas conclusões estão em consonância com achados recentes que demonstram a importância das zonas climáticas locais na determinação do comportamento térmico urbano e reforçam a necessidade de inclusão de tais parâmetros na formulação de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento urbano sustentável e adaptativo

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), à CAPES pelo apoio financeiro através de bolsas de estudo e ao Laboratório de Climatologia Geográfica e Recursos Hídricos (LCGRH) do departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e seus membros (Coordenadores e alunos).

REFERÊNCIAS

AMORIM, M. C. C. T.; NETO, J. L. S.; DUBREUIL, V. Estrutura térmica identificada por transectos móveis e canal termal do Landsat 7 em cidade tropical. **Revista de Geografía Norte Grande**, n. 43, p. 65-80, 2009.

BECHTEL, B.; ALEXANDER, P. J.; BÖHNER, J.; CHING, J.; CONRAD, O.; FEDDEMA, J.; MILLS, G.; SEE, L.; STEWART, I. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 199 219, 2015.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 180214, 2018.

BERTOLINI, W. Z.; DEODORO, S. C.; ZAMBOT, N. ANÁLISE MORFOMÉTRICA DO RELEVO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DA VÁRZEA–ALTO RIO URUGUAI (RS): Morphometric Analisys of Várzea's Hydrographic Region–Upper Uruguay River (RS). **Geosciences= Geociências**, v. 40, n. 1, p. 83-99, 2021.

CARDOSO, L. K. S.; JESUS, N. D. V. G.; SILVA, L. M.; VIEIRA, A. C. Avaliação dos Índices Termodinâmicos na Previsibilidade de Chuvas em Belém-PA: o Uso Alternativo de Sondagens Atmosféricas por Satélite. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, p. 1-14, 2022.

CASTRO, L. G. **Zonas Climáticas Locais em Cidades Pequenas: Relação entre Temperatura e Morfologia Urbana**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. 2022.

COSTA, A.C.L.; SILVA JUNIOR, J.D.A.; CUNHA, A.C.; FEITOSA, J.R.P.; PORTELA, B.T.T.; SILVA, G.G.C.; COSTA, R.F. Índices de conforto térmico e suas variações sazonais em cidades de diferentes dimensões na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.6, n.3, p.478-87, 2013.

DEMUZERE, M., HANKEY, S., MILLS, G., ZHANG, W., LU, T., BECHTEL, B. Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2020.

DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator: A web application to create Local Climate Zone maps. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 637455, 2021.

DUBREUIL, V.; Fante, K. P.; Planchon, O.; Neto, J. L. S. A. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. Confins. **Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 37, 2018.

FERREIRA, L. S.; FERRETTO, D.; DUARTE, D. H. S. Mapeando a morfologia urbana: aplicações do método Local Climate Zones (LCZ) em diferentes escalas do projeto. **PosFAUUSP**, v. 30, n. 56, p. e197563-e197563, 2023.

FIALHO, E. S.; CELESTINO, E. J.; QUINA, R. R. O campo térmico em situação episódica de primavera em uma cidade de pequeno porte, na zona da mata mineira: um estudo de caso em Cajuri-MG. **Revista de Geografia**. Recife –PE, v. 33, n. 4, p. 299 -318, 2016.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

GRIGOLETTI, G. C.; LAZAROTTO, G.; WOLLMANN, C. A. Microclima urbano de áreas residenciais no período noturno: Estudo em Santa Maria, RS. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, p. 140-163, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bases cartográficas e malhas territoriais do Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/ . Acesso em: 03 mar. 2024.

JÚNIOR, M. O. V.; MOURA SANTOS, F. M. Levantamento bibliográfico da utilização de transectos em pesquisas de clima urbano no Brasil e recomendações de padronização nos procedimentos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.

KRÜGER, E.; PEREIRA, N. H. G. Avaliação dos efeitos microclimáticos de diferentes zonas climáticas locais em cidade de clima temperado. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020019, 2020.

LCZ GENERATOR. Fast and easy Local Climate Zone mapping. Disponível em: https://lcz-generator.rub.de/. Acesso em: 02 maio 2022.

MARGALHO, E. S. **Avaliação da ilha de calor urbana na localidade de Belém-PA a partir de técnicas de sensoriamento remoto e dados observacionais**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.

MITAS, L.; MITASOVA, H. **Spatial interpolation**. In: LONGLEY, Paul; GOODCHILD, Michael; MAGUIRE, David; RHIND, David (Org.). Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications. Wiley: Hoboken, NJ, USA. v. 1, p. 481-492, 1999.

MONTEIRO, V. S. **Zonas Climáticas Locais e a relação com a morfologia urbana. Estudo de caso: Campinas/SP**. Dissertação (Mestrado em Sistema de infraestrutura urbana) – Universidade Católica de Campinas (PUC), Campinas, São Paulo, Brasil. 2018.

PINTON, L. G.; RIBEIRO, M. C. A.; SUIZU, T. M.; AMORIM, M. C. D. C. T. Magnitudes do fenômeno da ilha de calor urbana em sacramento (mg): perspectivas de aplicação do sistema das zonas climáticas locais em cidade de pequeno porte. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia-MG. v. 22, n. 79, 2021.

PORANGABA, G. F. O.; AMORIM, M. C. C. T. Análise de ilhas de calor diagnosticas por meio de transectos móveis em Assis, Cândido Mota, Maracaí e Tarumã (SP). **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 33, 2017.

SILVA, M. T.; MARGALHO, E. D. S.; SERRÃO, E. A. D. O.; SOUZA, A. C. D.; SOARES, C. D. S.; SANTOS, C. A. C. D.; SILVA, B. B. D. Application of Spatial Modeling of Biophysical Variables in an Urbanized Area in the Amazon: The Case of the Metropolitan Area of Belém-Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 271-283, 2021.

SOUZA, C. A.; PARANHOS FILHO, A. C.; GUARALDO, E. Estudo bibliométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 51-69, 2020.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Newly developed “thermal climate zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In: **Eighth Symposium on Urban Environment**, Phoenix, AZ. 2009.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.

SZYMANOWSKI, M.; KRYZA, M. GIS-based techniques for urban heat island spatialization. **Climate Research**, v. 38, n. 2, p. 171-187, 2009.