



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE

EDUARDO DA SILVA MARGALHO

AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E O CONFORTO TÉRMICO: UMA ANÁLISE
DO CLIMA URBANO DO MUNICÍPIO DE BELÉM, PARÁ

FORTALEZA

2025

EDUARDO DA SILVA MARGALHO

AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E O CONFORTO TÉRMICO: UMA ANÁLISE DO
CLIMA URBANO DO MUNICÍPIO DE BELÉM, PARÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientador: Prof.^a Dra. Maria Elisa Zanella.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M28z Margalho, Eduardo da Silva.
 As zonas climáticas locais e o conforto térmico : Uma análise do clima urbano do município de Belém, Pará / Eduardo da Silva Margalho. – 2025.
 99 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza, 2025.
 Orientação: Profa. Dra. Maria Elisa Zanella.
1. Clima urbano. 2. Climatologia urbana. 3. Campo térmico. 4. Geoprocessamento. 5. Meteorologia. I. Título.

CDD 333.7

EDUARDO DA SILVA MARGALHO

AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E O CONFORTO TÉRMICO: UMA ANÁLISE DO
CLIMA URBANO DO MUNICÍPIO DE BELÉM, PARÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 29 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Elisa Zanella (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Marta Celina Linhares Sales
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Francisca Mairla Gomes Brasileiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Antonio Ferreira Lima Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. José Felipe Gazel Menezes
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Dedico a minha querida esposa Leticia Cardoso e aos meus amados pais, Miguel dos Santos Cardoso Margalho e Elza da Silva Margalho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À Deus e a Jesus Cristo, por me concederem força nos momentos de dificuldades e persistência nos momentos de fraqueza.

À minha Esposa, Letícia Karyne da Silva Cardoso “Margalho”, por todo o seu apoio, amor, carinho e, principalmente, pelo companheirismo nesses últimos anos onde passamos sozinhos uma época obscura da humanidade que foi a pandemia do coronavírus. Além disso, por sempre acreditar no meu potencial que às vezes eu não acredito.

Aos meus pais, Elza da Silva Margalho e Miguel dos Santos Cardoso Margalho, por todo o amor, afeto e esforço realizado para me proporcionar o real sentido e motivo de estarmos nessa vida. Obrigado por tudo!

As minhas irmãs, Danielle da Silva Margalho e Adriana da Silva Margalho e as minhas sobrinhas Eduarda Margalho e Yasmim Margalho, por todo o apoio e carinho.

Agradeço especialmente a minha querida orientadora, Prof^a. Dra Maria Elisa Zanella, pela orientação e compreensão durante esse período e principalmente pela força, humanidade e um exemplo para a docência brasileira.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, pois seus ensinamentos passados por eles tem uma grande parcela na nossa pesquisa e que se leva para vida.

Aos meus amigos e colegas que pude conhecer nessa jornada no Ceará, em especial aos meus amigos Frank Bruno Baima, Francisco Agostinho Brito, as minhas colegas da turma de doutorado de 2020, a todos meus colegas do Laboratório de Climatologia Geográfica e Recursos Hídricos.

Agradecer aos funcionários de toda a UFC, os atendentes das lanchonetes, do RU, os funcionários da limpeza, as secretárias e secretários. Em especial agradecer a secretária da coordenação do PRODEMA da UFC, Sônia Almeida que é um amor de pessoa e excelente profissional, principalmente no meu caso que não sou da região e tirei muitas dúvidas com ela.

Nossos animais de estimação têm vida tão curta e, ainda assim, passam a maior parte do tempo esperando que voltemos para casa todos os dias. É impressionante quanto amor e alegria eles trazem para nossas vidas, e quanto nos aproximamos uns dos outros por causa deles.

(Grohan, John; Marley e Eu)

RESUMO

O presente estudo busca analisar de que forma as modificações e estruturas urbanas impactam o clima e o conforto térmico do município de Belém, capital do estado do Pará, através de um conjunto de dados e variáveis/parâmetros, somados com diferentes mecanismos metodológicos para compreender quais possíveis fatores estão associados ao impacto supracitado. A metodologia da pesquisa inicia-se na obtenção das imagens do sistema de satélite LANDSAT, para estimar índices espectrais/ambientais (NDVI, NDBI) com intuito de analisar a cobertura do solo, e ademais estimar a Temperatura da Superfície (TS) de forma espacial e temporal. Por seguinte, realiza-se a classificação das Zonas climáticas Locais (ZCL) para a área de estudo, utilizando metodologia consolidada para, posteriormente, com o auxílio do transecto móvel, realizar medições de temperatura do ar e assim verificar as influências das estruturas urbanas no campo térmico. Na terceira parte da pesquisa, determina-se o índice de desconforto de Thom (IDT) utilizando dados tanto da série histórica, quanto dos dados do transecto móvel, com o objetivo que verificar o impacto do clima urbano na saúde da população e analisar quais zonas climáticas locais apresentam maior desconforto para os indivíduos. Visto isso, observou-se que a temperatura da superfície apresenta aumento de acordo com o processo de expansão urbana, principalmente em bairros mais populosos e menores valores em áreas com presença de vegetação e estruturas residenciais com baixa densidade de edificações. Observa-se que as ZCL 2 e 3 estão mais presentes nos bairros pertencentes aos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta. Por outro lado, os distritos de Outeiro e Mosqueiro apresentam em sua maioria, ZCL dos tipos 6 e A, apresentando menores valores de TS. Em relação ao campo térmico, apresenta valores máximos de temperatura do ar nas ZCL's com maior densidade de construção (aglomeração de estruturas edificadas e ausência de vegetação) e menores valores em áreas que apresentam tipos de construções mais abertas e residenciais, apresentando maior espaço entre as construções e com presença de vegetação. Por fim, a partir da utilização dos dados históricos observados e de testes estatísticos, nota-se que houve uma mudança climática nos índices de conforto associados com a intensificação do processo urbano, além disso nota-se que o município de Belém apresenta estágios de urbanização e estruturas urbanas diferentes, influenciando no conforto térmico, ou seja, as áreas da malha urbana de Belém com predomínio da ZCL-3 apresenta maior desconforto, as áreas de predomínio da ZCL-6 apresenta conforto parcial. Logo, a partir dessa análise da malha urbana, se deduz que os distritos de Outeiro e Mosqueiro, que possuem predominância da ZCL-A, apresentam maior conforto térmico.

Palavras-chave: Climatologia urbana; campo térmico; geoprocessamento.

ABSTRACT

This study aims to analyze how urban modifications and structures impact the climate and thermal comfort in the municipality of Belém, the capital of the state of Pará. The analysis is conducted using a set of data and variables/parameters, combined with different methodological approaches to identify the possible factors associated with these impacts. The research methodology begins with the acquisition of satellite images from the LANDSAT system to estimate spectral/environmental indices (NDVI, NDBI), with the goal of analyzing land cover and estimating Land Surface Temperature (LST) in both spatial and temporal dimensions. Next, the classification of Local Climate Zone (LCZ) for the study area is carried out using a consolidated methodology. Subsequently, with the aid of a mobile transect, air temperature measurements are performed to assess the influence of urban structures on the thermal field. In the third phase of the research, the Thom Discomfort Index (TDI) is determined using both historical data and data collected from the mobile transect. This aims to evaluate the impact of the urban climate on public health and to identify which Local Climate Zones present the highest levels of discomfort for individuals. The findings reveal that land surface temperature increases in accordance with the process of urban expansion, especially in densely populated neighborhoods, while lower LST values are observed in areas with vegetation and low-density residential structures. LCZs 2 and 3 are predominantly found in neighborhoods within the districts of Guamá, Belém, and Sacramenta. Conversely, the districts of Outeiro and Mosqueiro mostly feature LCZ types 6 and A, which are associated with lower LST values. Regarding the thermal field, maximum air temperatures are observed in LCZs with high building density (clusters of constructed structures and absence of vegetation), while lower air temperature values are recorded in areas with more open and residential construction types, characterized by wider spacing between buildings and the presence of vegetation. Finally, based on historical data and statistical tests, the study identifies a climatic shift in thermal comfort indices associated with the intensification of urbanization processes. Furthermore, it is evident that Belém exhibits varying stages of urbanization and diverse urban structures, which significantly influence thermal comfort. Specifically, areas within Belém's urban fabric dominated by LCZ-3 experience higher discomfort levels, while areas dominated by LCZ-6 show partial comfort. Consequently, the analysis concludes that districts such as Outeiro and Mosqueiro, which are predominantly classified as LCZ-A, offer greater thermal comfort.

Keywords: Urban climatology; thermal field; geoprocessing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa da Fundação de Belém e sua expansão urbana	18
Figura 2 – Estação ferroviária Belém – Bragança	19
Figura 3 – Mapa de localização do município de Belém/PA	30
Figura 4 – Climatograma Temperatura do ar e da Precipitação acumulada do município de Belém/PA	31
Figura 5 – Climatograma da amplitude térmica	32
Figura 6 – Descrição das etapas do estudo	32
Figura 7 – Classificação e tipos de Zonas Climáticas Locais.....	36
Figura 8 – Polígonos para demarcação para classificação da ZCL	37
Figura 9 – Localização da Estação Meteorológica desde de sua instalação até dias atuais .	39
Figura 10 – Termohigrômetro, tipo Datalogger, modelo HT-4010.....	40
Figura 11 – Interface do software do termohigrômetro, modelo HT-4010	40
Figura 12 – Abrigo meteorológico para o termohigrômetro	41
Figura 13 – Trajetória do transecto móvel.....	41
Figura 14 – Distribuição do índice NDVI do município de Belém/PA. Dos dias 20/07/1993 (A), 14/08/2008 (B), 27/07/2013 (C) e 18/08/2021 (D)	45
Figura 15 – Distribuição do índice NDBI do município de Belém/PA. Dos dias 20/07/1993 (A), 14/08/2008 (B), 27/07/2013 (C) e 18/08/2021 (D).....	48
Figura 16 – Distribuição da Temperatura da Superfície Continental do município de Belém/PA. dos dias 20/07/1993 (A), 14/08/2008 (B), 27/07/2013 (C) e 18/08/2021 (D).....	50
Figura 17 – Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 20/07/1993	54
Figura 18 – Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 14/08/2008	56
Figura 19 – Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 27/07/2013	57
Figura 20 – Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 18/08/2021	59
Figura 21 – Classificação das classes geradas pela interface LCZ Generator (a) e as métricas de precisão (b)	60
Figura 22 – Classificação das zonas climáticas locais do município de Belém/PA, distribuição das Zonas Climáticas Locais (A) e Zonas Climáticas Locais com maior predominância.....	62
Figura 23 – Mapeamento térmico da Malha urbana de Belém/PA	64
Figura 24 – Tendência mensal do índice de conforto térmico IDT	77
Figura 25 – Tendência horária (00 UTC) do índice de conforto térmico IDT	79

Figura 26 – Índice de Desconforto de cada ponto do transecto e variabilidade do IDT e das variáveis meteorológicas obtidas pelo transecto móvel	82
Figura 27 – Distribuição do índice de desconforto por bairro (A) e a classificação do IDT da Malha urbana de Belém/PA	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das imagens Landsat	33
Tabela 2 – Descrição das bandas, faixas espectrais e seus respectivos coeficientes de calibração (anteriores ao ano 2000 e posteriores ao ano 2000), correspondente ao Landsat 5	34
Tabela 3 – Descrição das bandas e faixas espectrais utilizadas, correspondente ao Landsat 8.	34
Tabela 4 – Precisão métrica da interface LCZ Generator	38
Tabela 5 – Classificação dos intervalos de valores de IDT e seus níveis de desconforto	42
Tabela 6 – Apresentação do teste e suas respectivas hipóteses	43
Tabela 7 – Percentual da cobertura vegetal do município de Belém.....	46
Tabela 8 – Percentual da cobertura construída e permeável do município de Belém	49
Tabela 9 – Percentual da temperatura da superfície do município de Belém.....	52
Tabela 10 – Dados do teste de Pettitt do índice IDT	78
Tabela 11 – Dados do teste de Pettitt do índice IDT no horário de 00 UTC	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores obtidos de Temperatura do ar, da Temperatura da superfície e das zonas climáticas locais para cada bairro da malha urbana do município de Belém. 67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilha de Calor Urbana
IDT	Índice de Desconforto de Thom
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
NDBI	Normalized Difference Built-up Index (Índice de área construída por diferença normalizada)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de vegetação por diferença normalizada)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
TS	Temperatura da Superfície
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCL	Zonas Climáticas Locais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1	Historicidade urbana de Belém	18
3.2	Clima urbano	21
3.3	Zonas Climáticas Locais – ZCL	24
3.4	Conforto térmico humano.....	26
3.5	Desenvolvimento e sustentabilidade urbana	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1	Caracterização da área de estudo	30
4.2	Climatologia	31
4.3	Dados orbitais	33
4.3.1	<i>Calibração radiométrica e reflectância do Landsat-5</i>	34
4.3.2	<i>Reflectância do Landsat-8</i>	35
4.3.3	<i>Determinação dos índices e estimativa da TS.....</i>	35
4.4	Definição das Zonas Climáticas Locais	36
4.5	Dados Meteorológicos.....	38
4.5.1	<i>Transecto Móvel</i>	39
4.5.2	<i>Determinação do índice de desconforto de Thom (IDT).....</i>	42
4.5.3	<i>Análise de tendência</i>	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Distribuição dos índices espectrais (NDVI, NDBI).....	44

5.2	Distribuição da Temperatura da Superfície (TS)	49
5.2.1	<i>Distribuição por bairros dos valores médios da TS.....</i>	52
5.3	Classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL)	60
5.4	Mapeamento térmico da malha urbana de Belém/PA	62
5.5	Relação das Zonas Climáticas Locais e o mapeamento térmico da malha urbana de Belém/PA.....	65
5.6	Análise do índice de desconforto de Thom (IDT).....	76
5.6.1	<i>Análise climatológica mensal do IDT.....</i>	76
5.6.2	<i>Análise climatológica horária do IDT</i>	78
5.6.3	<i>Análise do IDT a partir dos dados do transecto móvel</i>	79
6	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

A cidade representa a expressão geográfica mais significativa da atualidade, e sua importância nos aspectos espaciais, demográficos, socioeconômicos e culturais estão mais evidenciados, refletindo um mundo cada vez mais urbano. Entretanto, qual efeito essa maior evidência e crescimento das áreas urbanas proporcionam no clima?

Atualmente, as cidades abrigam metade da população mundial, e estima-se que esse número possa chegar a 70% em 2050, de acordo com Maxwell (2010). No Brasil, as estatísticas indicam que a população é majoritariamente urbana, representando 84,4% do total do país, conforme dados do instituto brasileiro de geografia e estatística.

Historicamente, a região norte, especialmente suas capitais, experimentou um intenso desenvolvimento a partir da exploração do látex na chamada "Era da Borracha", especialmente nas cidades de Belém e Manaus. De acordo com Pontes (2015), foi nessa época que o processo de urbanização do município de Belém teve início. Atualmente, a cidade de Belém apresenta uma extensa área urbanizada e uma expansão populacional e territorial significativas. Esse processo resulta na diminuição das áreas verdes e, consequentemente, afeta a vida da população residente no município.

As mudanças no uso e na cobertura do solo, ou seja, a substituição da vegetação por áreas urbanas, têm impactado o equilíbrio energético nas cidades, o que influencia diretamente o clima local. Evidências das alterações climáticas nas áreas urbanas incluem o aumento da temperatura do ar, a diminuição da umidade relativa e modificações na direção e velocidade dos ventos, entre outros fatores. Essas mudanças climáticas podem afetar de forma positiva ou negativa as atividades e o estilo de vida das pessoas. E é justamente nas áreas urbanas, especialmente nas cidades de médio porte e metrópoles localizadas em países em desenvolvimento, que os problemas ambientais, incluindo os relacionados ao clima, se manifestam de forma mais intensa (Zanella e Moura, 2013).

O clima pode gerar situações de conforto ou desconforto, influenciando diretamente a qualidade de vida dos habitantes urbanos (Lima Junior, 2018). Logo, esta pesquisa está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 - Cidades Sustentáveis e ODS 3 - Saúde e Bem-Estar, devido à estreita relação entre as questões térmicas urbanas, o conforto humano, a qualidade de vida e a saúde dos habitantes urbanos. De acordo com Andrade (2005), o conforto térmico é um indicador significativo dos impactos e riscos à saúde humana resultantes do processo de degradação da superfície urbana.

O ODS 11 tem como objetivo garantir o acesso universal a espaços urbanos seguros, inclusivos e sustentáveis por meio do planejamento urbano participativo, do desenvolvimento de infraestrutura resiliente, da proteção do patrimônio cultural e natural, da promoção da mobilidade sustentável e da criação de ambientes urbanos inclusivos para todos. Essas ações visam criar cidades que sejam capazes de lidar com os desafios ambientais e climáticos, oferecendo um ambiente saudável e confortável para seus habitantes.

Por sua vez, o ODS 3 destaca a importância da saúde e do bem-estar dos cidadãos. As condições climáticas adversas nas cidades podem ter impactos negativos na saúde física e mental das pessoas, aumentando os riscos de doenças cardiovasculares, respiratórias e outras enfermidades relacionadas ao clima. Compreender os impactos das condições térmicas urbanas e buscar soluções que garantam o conforto e a saúde dos cidadãos são aspectos cruciais para a construção de ambientes urbanos saudáveis e inclusivos.

Nesse contexto, a presente pesquisa desempenha um papel relevante ao contribuir para o avanço desses objetivos, investigando os efeitos das condições climáticas urbanas na qualidade de vida e na saúde da população de Belém. A hipótese levantada é que fatores associados ao processo de urbanização interferem no clima da cidade, tornando-o mais aquecido e impactando negativamente o conforto térmico e a qualidade de vida da população.

Ao aprofundar o conhecimento sobre esses desafios e identificar estratégias eficazes de adaptação e mitigação, será possível promover a sustentabilidade ambiental, a resiliência urbana e o bem-estar dos habitantes, garantindo um futuro mais próspero e equitativo para as cidades e seus cidadãos. Ademais, a pesquisa busca contribuir para a construção de uma cidade de Belém mais sustentável, com um clima mais ameno e condições de vida mais saudáveis para sua população.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é avaliar o campo térmico urbano da cidade de Belém (PA), com foco na identificação e mapeamento das Zonas Climáticas Locais (ZCL) e na avaliação do conforto térmico humano, visando compreender as variações espaciais da temperatura e as condições de conforto térmico em função das características do ambiente urbano.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar e analisar as variações térmicas intraurbanas e interurbanas a partir da temperatura da superfície em diferentes áreas urbanas.
- Examinar as variações espaciais a partir da relação entre os índices espectrais e o uso e cobertura do solo urbano e de suas áreas circunvizinhas.
- Classificar as Zonas Climáticas Locais (ZCL) com base em padrões de urbanização e tipos de cobertura.
- Mensurar o conforto térmico nas diferentes ZCL, avaliando o índice e identificando áreas de desconforto térmico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Historicidade urbana de Belém

A cidade de Belém foi fundada em 12 de janeiro de 1616, pelo militar português Francisco Caldeira de Castelo Branco que a partir da construção de uma fortaleza militar, denominada de forte do presépio, fundou-se a cidade e se iniciou o povoamento da região através do domínio territorial tanto militar devido a posição geoestratégica, quanto de expedições missionárias. Esse povoamento foi fortalecido com a presença da comunidade religiosa (Sacerdotes, padres e entre outros) pelas expedições missionárias, o principal vetor da expansão urbana foram as construções religiosas como: Igrejas e conventos (Figura 1). Embora o início do povoamento tenha ocorrido no século XVI, o estopim do crescimento urbano veio acontecer apenas no século XIX devido a exploração do látex, período conhecido como a era da borracha (Ferreira, 2003; Santos e Mendes, 2012; Costa e Rodrigues, 2022).

Figura 1. Mapa da Fundação de Belém e sua expansão urbana. Fonte: Penteado (1968)

No final do século XIX e início do século XX, Belém se tornou um dos principais portos de exportação do látex extraído da seringueira, árvore característica da região amazônica, época conhecida como ciclo da borracha.

Esse período proporcionou melhoria econômica e promoveu o desenvolvimento de infraestrutura urbana, como estradas, portos e edifícios públicos. A partir da elite local que era ligada ao comércio da borracha, a cidade assumiu desde características de grandes construções como seus belos palacetes e casarões a construções de ordem habitacional. Além do impacto econômico, a era da borracha também teve consequências sociais significativas em Belém. A migração de trabalhadores de outras regiões do Brasil, bem como de imigrantes estrangeiros, contribuiu para a diversificação étnica e cultural da cidade (Ventura Neto, 2012; Ventura Neto, 2020).

Segundo Fenzl et al. (2020), a extração da borracha acelerou o processo de aumento da população de Belém e região metropolitana por meio do intenso extrativismo do produto e também pela força de trabalho (mão de obra). Esses fatores impulsionou os sistemas de transportes ferroviários como a Belém (Figura 2) e portuários, com isso novos assentamentos foram criados. Em consonância, o poder público atuou na expansão e ordenamento urbano, pois em determinado período houve uma crise de moradia devido ao crescimento da população (Costa e Rodrigues, 2022).

Figura 2. Estação ferroviária Belém – Bragança (Fonte: Caccavoni, 1898).



Apesar do declínio da indústria da borracha no início do século XX, Belém manteve sua importância como centro urbano na Amazônia. Após esse declínio do ciclo da borracha, Belém vivenciou um prolongado período de expansão urbana caracterizado por um padrão desordenado. A intensa migração oriunda das zonas rurais, especialmente acentuada nas décadas de 1960 e 1970, fomentou o crescimento acelerado das áreas periféricas. Nesse contexto, diversos bairros foram formados a partir de ocupações irregulares, o que resultou em significativa precariedade habitacional, carência de infraestrutura básica e sérios impactos ambientais, como inundações recorrentes e a degradação dos igarapés (Mendes, 2018).

A intensificação do crescimento urbano em Belém está intimamente relacionada ao contexto político e econômico do período da ditadura militar no Brasil (1964–1985). Nesse intervalo, o governo militar passou a adotar uma estratégia de integração nacional voltada à Amazônia, fundamentada em grandes projetos de desenvolvimento econômico e territorial. O objetivo central dessas políticas era consolidar a soberania sobre a região amazônica, estimular a ocupação populacional e impulsionar a exploração de recursos naturais, alinhando-se ao lema “integrar para não entregar” (Dias et al., 2020).

A partir desse paradigma, foram implementados projetos voltados a diversos setores estratégicos, como o agropecuário, hidrelétrico, minerário, portuário e rodoviário. Entre as iniciativas mais emblemáticas destaca-se o Programa de Integração Nacional (PIN), lançado em 1970, que visava estimular a migração interna e promover o crescimento de cidades-polo na Amazônia. A construção e pavimentação de rodovias, em especial a rodovia Belém–Brasília (BR-010), inaugurada em 1960, e o Pólo Amazônico, estimularam fluxos migratórios internos e promoveram a abertura de novas frentes econômicas, especialmente no setor agropecuário e na exploração de recursos naturais (Becker, 2005).

Essas obras facilitaram o deslocamento de grandes contingentes populacionais vindos do Nordeste, do Centro-Oeste e do interior paraense, atraídos pela promessa de novas oportunidades econômicas, emprego em frentes de trabalho e acesso a terras disponíveis. Esse movimento migratório massivo resultou em um processo de urbanização acelerado em diversos centros urbanos amazônicos, com destaque para Belém, que funcionava como principal porta de entrada e centro de distribuição regional (Lacerda et al., 2020; Mello et al. 2020).

Em Belém, esses processos intensificaram o fenômeno da migração rural-urbana, atraindo populações oriundas do interior do Pará e de outros estados vizinhos em busca de oportunidades econômicas e melhores condições de vida.

Esse rápido crescimento demográfico, no entanto, ocorreu de maneira desordenada. A falta de políticas públicas urbanas efetivas e a fragilidade das instituições municipais em gerir

o espaço urbano resultaram na proliferação de assentamentos informais. Muitas áreas periféricas foram ocupadas de forma irregular, sem acesso adequado a serviços essenciais como saneamento, transporte público e infraestrutura viária (Araújo et al., 2012).

Portanto, o período da ditadura militar foi determinante para consolidar o perfil de crescimento urbano de Belém, caracterizado pela expansão rápida, desordenada e excludente. O legado desse processo permanece como um dos principais desafios contemporâneos da cidade, exigindo políticas públicas voltadas à requalificação das áreas degradadas, à inclusão social e à mitigação dos impactos ambientais.

3.2 Clima urbano

O clima urbano é amplamente influenciado pelas modificações resultantes da intervenção humana, como a substituição da vegetação natural por edificações e a remoção da cobertura vegetal (Oliveira, 2013; Cordeiro, 2016). Essas transformações, impulsionadas pelo crescimento da população urbana e pela atividade humana, têm um impacto significativo no clima, interferindo diretamente em suas características.

O estudo sobre o clima urbano é puramente multidisciplinar que envolve diversas áreas, como meteorologia, climatologia, planejamento urbano, arquitetura e engenharia. É necessário entender as interações complexas entre os elementos urbanos e os processos atmosféricos para melhor compreender o clima nas cidades (Freitas et al., 2021; Pascoalino e Júnior, 2021). Essas interações podem gerar microclimas distintos em diferentes partes da cidade, com variações na temperatura, umidade, velocidade do vento e qualidade do ar.

A urbanização acelerada traz consigo desafios significativos para o clima urbano. O rápido crescimento das áreas urbanas resulta em mudanças na cobertura terrestre, com a substituição de vegetação por estruturas construídas. Essa transformação leva à perda de áreas verdes, que são importantes para a regulação térmica e a evapotranspiração, processo em que as plantas liberam água na atmosfera, resfriando o ambiente (Voogt et al., 2003; Krayenhoff et al., 2021). A redução da vegetação contribui para o aumento da temperatura nas cidades e a formação das ilhas de calor.

A variação e aumento da temperatura estão diretamente associados aos impactos oriundos do processo de urbanização. Segundo Venter et al. (2020), a alteração do ambiente, através do processo urbano, provoca intensas mudanças na variabilidade da temperatura do ar, mas a desvantagem dos estudos utilizando dados observacionais é a escala espacial, devido a interpolação dos dados de temperatura do ar. Esse excesso de calor nas cidades é causado por vários fatores, como a absorção e retenção de calor pelos materiais de construção, a falta de

sombreamento adequado, o aumento do uso de energia e a liberação de calor pelos veículos e indústrias (Middel et al., 2019). Esses efeitos podem resultar em diferenças de temperatura de vários graus Celsius entre áreas urbanas e rurais, influenciando diretamente o conforto térmico dos habitantes urbanos.

Além do aumento da temperatura, as mudanças climáticas globais também afetam o clima urbano. O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera contribui para o aquecimento global, que se reflete nas cidades. As ondas de calor são mais intensas e frequentes, colocando em risco a saúde das pessoas, especialmente os grupos vulneráveis, como idosos e crianças (Masson-Delmotte et al., 2018). As mudanças nos padrões de precipitação também podem levar a eventos climáticos extremos, como enchentes urbanas, devido à capacidade limitada de absorção de água pelas superfícies impermeáveis nas áreas urbanas (Shepherd, 2013).

Para enfrentar esses desafios, são necessárias abordagens integradas que combinem ações de mitigação e adaptação. Estratégias de planejamento urbano sustentável podem incluir a criação de espaços verdes, parques e jardins, além do uso de materiais de construção com baixo teor de calor e técnicas de resfriamento passivo em edifícios (Thom et al., 2020). Além disso, o desenvolvimento de políticas de transporte sustentável, com incentivos ao uso de transportes públicos e modos de transporte não motorizados, pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do ar nas cidades (Litman e Burwell, 2006; Gossling et al., 2021).

Em última análise, o enfrentamento dos desafios do clima urbano requer uma abordagem holística e colaborativa. A colaboração entre governos, comunidades, pesquisadores e setor privado é essencial para encontrar soluções inovadoras e implementar práticas sustentáveis que melhorem a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas. Ao adotar uma visão de longo prazo e integrar o conhecimento científico às decisões de planejamento urbano, podemos construir cidades mais sustentáveis, saudáveis e habitáveis para as gerações presentes e futuras.

Estudos abrangentes sobre o clima urbano são conduzidos globalmente com o objetivo de compreender o impacto do crescimento humano no ambiente. Pesquisas realizadas na China, por exemplo, destacam o intenso processo de urbanização enfrentado pelas cidades chinesas devido ao aumento populacional e ao desenvolvimento industrial e comercial (Wang et al., 2019; Chen et al., 2020). Esse crescimento desequilibra a relação entre a paisagem artificial e o clima local, demandando a realização de estudos para mitigar os problemas associados a esse processo nas áreas urbanas.

O espaço urbano é uma construção artificial, composto por uma diversidade de elementos e características que incluem tanto elementos naturais quanto modificados pelo homem, como concreto, asfalto e edifícios (Luchiari, 2011). Dentre os fenômenos meteorológicos mais conhecidos originados nas áreas urbanas, destaca-se a Ilha de Calor urbana. Esse fenômeno refere-se ao aumento da temperatura do ar e/ou da superfície causado pela impermeabilização do solo e pela modificação da paisagem, especialmente em cidades densamente urbanizadas (Nakata-Osaki et al., 2016; Mendes et al., 2019).

Conforme mencionado anteriormente, uma das principais características do clima urbano é a alteração do balanço de energia, que está intimamente ligado ao ambiente urbano. Para Oke (1987), renomado pesquisador nesse campo, as superfícies urbanas alteram os processos de balanço de energia devido à substituição de superfícies naturais por superfícies artificiais que retêm mais energia, resultando em uma diminuição do fluxo de calor latente. Essa modificação ocorre em decorrência dos materiais utilizados nas áreas urbanas.

A superfície urbana apresenta diversas características, incluindo uma variedade de tipos de cobertura terrestre, como áreas verdes, corpos d'água e superfícies impermeáveis. Esses fatores desempenham um papel fundamental no campo térmico (Barron et al., 2018; Rafael, 2014). Essa análise corrobora com o estudo realizado por Barros e Lombardo (2016) em que a vegetação exerce uma influência significativa no campo térmico de uma área urbana. Os autores observaram que a ausência ou baixa cobertura vegetal está associada a ilhas de calor intensas, estabelecendo uma relação direta entre o campo térmico e fatores relacionados à vegetação.

Além da cobertura vegetal, outros fatores contribuem para um campo térmico mais elevado nas superfícies urbanas em comparação com áreas rurais e ambientes naturais. De acordo com Gartland (2010), os principais fatores são os materiais característicos das áreas urbanas, que absorvem e retêm mais calor, e a impermeabilização do solo. A maioria dos materiais de construção nas áreas urbanas é resistente à água, o que impede a dissipação do calor devido à falta de evaporação.

O clima urbano pode ser considerado um exemplo de mudança climática. Conforme as recomendações da OMM (Organização Meteorológica Mundial), é necessário analisar um período mínimo de 30 anos para avaliar o clima de uma região e identificar possíveis alterações nas séries temporais de variáveis específicas. No caso do clima urbano, as variáveis de destaque são a temperatura do ar (campo térmico), a precipitação e a intensidade do vento. Esses fatores intensificam desastres e têm consequências significativas nas áreas urbanas, afetando diretamente a população local.

A compreensão aprofundada do clima urbano e de suas complexas interações é essencial para o desenvolvimento de estratégias de planejamento urbano sustentável e medidas de adaptação às mudanças climáticas. A implementação de técnicas, como o aumento da vegetação urbana, o uso de materiais com baixo teor de calor e a criação de áreas verdes, pode contribuir para atenuar os efeitos negativos do clima urbano e melhorar a qualidade de vida nas cidades.

3.3 Zonas Climáticas Locais – ZCL

As configurações topográficas e morfológicas de uma região urbana são determinantes para a formação de microclimas e para o comportamento geral do clima urbano. Quando há homogeneização das estruturas construtivas, ou seja, quando uma determinada área apresenta um padrão predominante de edificação — seja em forma de residências unifamiliares, edifícios multifamiliares ou estruturas industriais — ocorrem alterações significativas nos fluxos de calor, umidade e na dinâmica do ar.

Stewart e Oke (2012) desenvolveram o conceito das Local Climate Zones ou zonas climáticas locais (ZCL), como uma tentativa de padronizar e sistematizar a análise do clima urbano em diferentes escalas e localidades. Este modelo divide a superfície urbana e natural em 17 classes, sendo 10 classes urbanas e 7 naturais, de acordo com critérios relacionados à altura média das edificações, densidade de construção, cobertura vegetal, permeabilidade do solo e albedo.

A intensificação das atividades urbanas e os processos de ocupação do solo contribuem para a heterogeneidade térmica intraurbana. O uso da ZCL permite mapear essas variações com maior precisão, facilitando o entendimento das relações entre cobertura superficial, forma urbana e distribuição térmica (Monteiro, 2018)

Pesquisas recentes mostram que as ZCL são fundamentais para avaliar e mitigar os efeitos da Ilha de Calor Urbana (ICU). Por exemplo, no estudo conduzido por Geletic et al. (2018) em Brno, República Tcheca, foram identificadas diferenças de temperatura entre zonas classificadas como ZCL 2 (áreas compactas de alta densidade) e ZCL A (áreas vegetadas). Tais resultados evidenciam o potencial das zonas climáticas locais para subsidiar estratégias de adaptação e mitigação climática.

Na América Latina, a aplicação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) tem se mostrado uma metodologia para o entendimento das variações térmicas intraurbanas e suas implicações socioambientais. O estudo realizado por Cimolai e Aguillar (2025) combinou dados dos satélites MODIS, Landsat-8 e Sentinel-2 para mapear e classificar as ZCL durante eventos de ondas de calor em três cidades da Argentina. Os resultados evidenciaram que áreas com maior

cobertura vegetal e menor impermeabilização apresentaram temperaturas superficiais consideravelmente mais baixas, destacando a importância de espaços verdes e áreas abertas no controle de extremos térmicos.

Já o estudo de Lima (2024) fez uma análise na região da Zona Norte de São Paulo, utilizando imagens Landsat de 1990 a 2022 para correlacionar temperatura da superfície (TS), vegetação (NDVI) e vulnerabilidade socioeconômica. O estudo identificou que bairros de menor renda, como Jardim Peri, sofreram temperaturas superiores a 34 °C em meados de 2005 e apresentaram ilhas de calor urbanas significativamente mais intensas. Por outro lado, áreas com maior presença de vegetação e melhor infraestrutura, como o Horto Florestal, mostraram temperaturas mais amenas, embora ainda acima dos níveis recomendados pela Organização Mundial da Saúde. Esses resultados reforçam a influência das ZCL na distribuição espacial das ilhas de calor urbanas, bem como a correlação com indicadores sociais e econômicos, revelando maior exposição ao calor em regiões vulneráveis.

A iniciativa WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools), coordenada por Bechtel et al. (2019), busca construir um banco de dados global de zonas climáticas locais, promovendo a integração de dados geoespaciais com modelos climáticos urbanos. Essa iniciativa já conta com mapeamentos em dezenas de cidades, incluindo Rio de Janeiro, Curitiba, Hong Kong, Paris e Nairóbi, reforçando a relevância do conceito para estudos comparativos inter-regionais.

Além de aplicações acadêmicas, o conceito ZCL tem sido incorporado em políticas públicas e planos diretores urbanos. Em cidades como Viena, Áustria, os dados de ZCL serviram de base para planejar intervenções de vegetação urbana e desenho de espaços públicos (Demuzere et al., 2019).

Outro aspecto relevante é a integração das ZCL em modelos de previsão climática urbana. O modelo UrbClim, por exemplo, utiliza a classificação ZCL para simular cenários futuros de temperatura e umidade em diferentes cidades (De Ridder et al., 2015). Essa integração permite avaliar antecipadamente o impacto de intervenções urbanísticas sobre o conforto térmico e a saúde pública.

De acordo com Stewart (2019), o contínuo desenvolvimento e refinamento das ZCL respondem à necessidade de uma linguagem comum entre pesquisadores, planejadores urbanos e gestores públicos, facilitando a formulação de políticas ambientais e estratégias de mitigação adaptadas à realidade local.

O conceito de Zonas Climáticas Locais se consolida como ferramenta essencial para entender, monitorar e intervir nos microclimas urbanos, representando um avanço significativo

no campo da climatologia urbana. Seu uso em diferentes escalas territoriais, aliado a dados de sensoriamento remoto, modelos climáticos e indicadores socioeconômicos, torna possível desenvolver cidades mais resilientes e adaptadas às mudanças climáticas, fortalecendo o planejamento urbano sustentável e integrativo.

3.4 Conforto térmico humano

Os estudos relacionados ao conforto térmico humano estão diretamente alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), em especial os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). Tais objetivos visam promover o uso responsável dos recursos naturais e o equilíbrio entre crescimento econômico, inclusão social e preservação ambiental, fomentando a resiliência urbana e a qualidade de vida.

Segundo Bertolino et al. (2016), o conceito de desenvolvimento sustentável é multifacetado e envolve dimensões ambientais, sociais e políticas, além de estar intimamente relacionado ao planejamento territorial e à formulação de políticas públicas. Nesse contexto, os estudos sobre clima urbano e conforto térmico ganham relevância, uma vez que fornecem subsídios para mitigar impactos ambientais e garantir ambientes urbanos mais saudáveis e inclusivos.

O conforto térmico é um aspecto essencial para a saúde, o bem-estar e a produtividade humana. De acordo com Liu et al. (2018), o desconforto térmico em ambientes urbanos pode aumentar significativamente o risco de doenças relacionadas ao calor, reduzir a disposição para atividades físicas ao ar livre e afetar negativamente a saúde mental, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação no desenho urbano.

Conforme Andrade e Santos (2008), a análise do conforto térmico pode ser dividida em duas abordagens principais: a análise pessoal/individual e a análise climato-ambiental. A primeira abordagem está relacionada à percepção subjetiva do indivíduo em relação ao ambiente térmico, considerando fatores como vestimenta, metabolismo, idade e atividades realizadas. Já a análise climato-ambiental está fundamentada em variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar), permitindo quantificar e classificar as condições térmicas e sua influência na sensação humana.

Além disso, Assis (2006) destaca que, dentro da climatologia urbana, os estudos sobre conforto térmico são um dos temas mais investigados, ficando atrás apenas das análises sobre uso do solo e morfologia urbana. Este destaque decorre do impacto direto que o ambiente térmico exerce sobre a saúde pública e a vivência urbana cotidiana.

O ser humano experimenta conforto térmico quando se encontra em equilíbrio térmico com o ambiente, isto é, quando a produção de calor metabólico é equilibrada com a perda para o meio externo. Em situações de desequilíbrio, surgem desconfortos que levam à busca de mecanismos de adaptação, como mudanças comportamentais ou uso de tecnologias de climatização (Fanger, 1970).

Nas áreas urbanas, a presença de superfícies impermeáveis, a alta densidade construtiva e a redução de áreas vegetadas contribuem para a intensificação do desconforto térmico e o aumento das ilhas de calor urbanas (Santamouris, 2015). Para mitigar esses efeitos, o planejamento urbano sustentável propõe soluções baseadas na natureza, como o incremento de áreas verdes e a criação de corredores de ventilação.

De acordo com Maia (2002), Silva et al. (2015) e Chiquetti e Faria (2022), as áreas verdes desempenham papel fundamental no aumento do conforto térmico urbano, ao proporcionarem sombreamento, reduzirem a radiação direta, aumentarem a evapotranspiração e facilitarem a circulação do ar. Estudos realizados em Singapura (Ignatius et al., 2015) e Tóquio (Irie, 2022) demonstraram que a implantação de vegetação urbana pode reduzir a temperatura superficial em até 4 °C, contribuindo para o conforto térmico e para a redução do consumo energético com refrigeração.

Outros exemplos relevantes incluem a cidade de Paris, onde a prefeitura implementou um plano de "ilhas de frescor", criando redes de áreas verdes e fontes de água para combater as ondas de calor (Coccolo et al., 2018). No Brasil, estudos em São Paulo (Benedito, 2021) mostraram que a presença de parques e corredores verdes reduz a sensação térmica em áreas adjacentes, promovendo maior uso dos espaços públicos e benefícios sociais associados.

A integração entre conforto térmico e políticas públicas é essencial para promover cidades resilientes e inclusivas. As diretrizes da ONU reforçam que medidas voltadas ao microclima urbano devem ser prioridade em planos diretores, legislação urbanística e estratégias de adaptação climática, contribuindo para mitigar desigualdades socioambientais e melhorar a saúde coletiva.

Dessa forma, a compreensão e o planejamento do conforto térmico humano em ambientes urbanos configuram-se como um eixo estratégico central para o desenvolvimento sustentável. Ao integrar soluções baseadas na natureza, infraestrutura verde e desenho urbano adaptado, torna-se possível criar espaços mais agradáveis, seguros e saudáveis para todos.

3.5 Desenvolvimento e sustentabilidade urbana

Desde a Revolução Industrial, as cidades experimentaram um crescimento exponencial, tanto em termos populacionais quanto econômicos. O desenvolvimento econômico foi o principal motor para a migração em massa e a expansão das áreas urbanas, motivado pela concentração de empregos, infraestrutura e oportunidades. Atualmente, observa-se um grau de urbanização cada vez mais elevado, com previsão de contínuo aumento populacional nas cidades. Segundo Bragança et al. (2016), estima-se que, nas próximas quatro décadas, mais de 75% da população mundial viverá em áreas urbanas, sendo que hoje esse número já ultrapassa 55%.

As cidades se consolidaram como grandes consumidoras de energia, água e recursos naturais, além de serem as principais emissoras de poluentes atmosféricos. De acordo com Lopes e Guerra (2020), a urbanização moderna foi fortemente fundamentada na exploração intensiva dos recursos ambientais, resultando em graves consequências, como degradação ambiental, poluição do ar e da água, aumento de doenças respiratórias, crescimento desordenado, segregação socioespacial e deficiência em serviços básicos.

Bragança et al. (2017) destacam que um dos fatores centrais para o elevado consumo e geração de resíduos nas cidades está diretamente relacionado à renda per capita. Quanto maior a renda, maior a produção e consumo de bens, o que potencializa a geração de resíduos sólidos e líquidos. Isso é particularmente preocupante em países em desenvolvimento, onde o crescimento urbano se dá de forma acelerada e muitas vezes desordenada, como no caso do Brasil.

O crescimento urbano desordenado intensifica problemas relacionados à gestão de resíduos e à poluição atmosférica, contribuindo para o acúmulo de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que agravam o aquecimento da troposfera e impactam diretamente o microclima urbano (Masson-Delmotte et al., 2018).

Em um estudo realizado por Margalho et al. (2019) sobre a cidade de Belém/PA, observou-se uma acentuada redução da cobertura vegetal ao longo das décadas. Essa degradação está diretamente associada ao aumento das temperaturas urbanas e à modificação dos regimes de vento, fatores que culminam na intensificação do fenômeno conhecido como ilha de calor urbana (ICU). Segundo Oke (1982) e Santamouris (2015), a ICU ocorre devido à substituição de áreas vegetadas por superfícies impermeáveis (asfalto, concreto), à emissão de calor antropogênico e à redução da ventilação natural.

A formação de ilhas de calor não apenas impacta a sensação térmica e o conforto da população, mas também potencializa riscos à saúde, como estresse térmico, desidratação e mortalidade associada a ondas de calor, principalmente entre populações vulneráveis (Loughner et al., 2012).

Nesse contexto, as mudanças climáticas globais estão intrinsecamente relacionadas às ações antrópicas, sobretudo pela expansão urbana não planejada e pela destruição de ecossistemas naturais. A perda de cobertura vegetal e a impermeabilização do solo reduzem a capacidade de resiliência das cidades frente a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, inundações e ondas de calor (Seto et al., 2012; Masson-Delmotte et al., 2018).

A sustentabilidade urbana surge, portanto, como uma resposta indispensável aos impactos negativos gerados pelo "desenvolvimento" econômico, especialmente nas últimas décadas. Estratégias baseadas em infraestrutura verde, requalificação urbana, incremento de áreas permeáveis e conservação de ecossistemas são fundamentais para mitigar os efeitos adversos da urbanização acelerada (Newman et al., 2017).

Gonçalves et al. (2020) reforçam que iniciativas de mitigação ambiental, como reflorestamento urbano, criação de parques lineares, restauração de margens de rios e sistemas de drenagem sustentável, contribuem diretamente para a redução de enchentes, contenção de ilhas de calor, melhoria da qualidade do ar e redução da vulnerabilidade a doenças transmitidas por vetores. Além disso, tais estratégias aumentam a capacidade adaptativa das cidades aos efeitos das mudanças climáticas, garantindo maior segurança, saúde e bem-estar para a população urbana.

Cabe destacar que a conservação e recuperação de ecossistemas urbanos devem ser priorizadas nas agendas de planejamento, pois, além de atenuar as consequências das mudanças climáticas, promovem benefícios ecossistêmicos importantes, como regulação térmica, purificação do ar, provisão de espaços de lazer e promoção da biodiversidade (Kabisch et al., 2015).

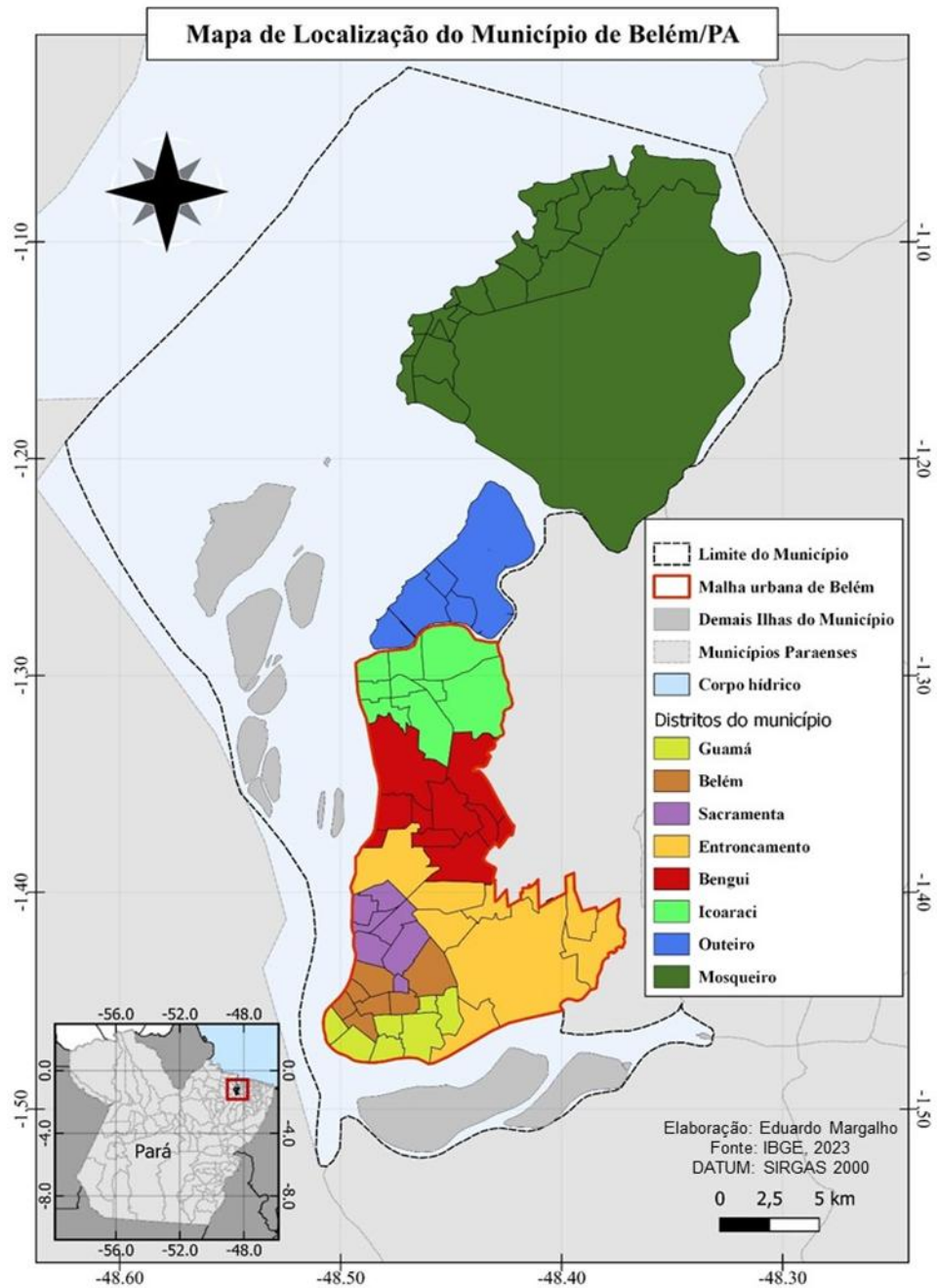
Portanto, o fortalecimento de políticas públicas integradas, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), torna-se crucial para orientar o crescimento urbano em direção a um modelo mais justo, resiliente e ambientalmente equilibrado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O referente estudo será realizado na região norte do território brasileiro, no município de Belém, capital do estado do Pará (Figura 3), no qual é dividido por 8 distritos, são eles: Guamá, Belém, Sacramento, Entroncamento, Bengui, Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro. De acordo com o censo de 2022 do instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE), a cidade de Belém possui cerca de 1.303.389 habitantes.

Figura 3. Mapa de localização do município de Belém/PA.



Fonte: IBGE

4.2 Climatologia

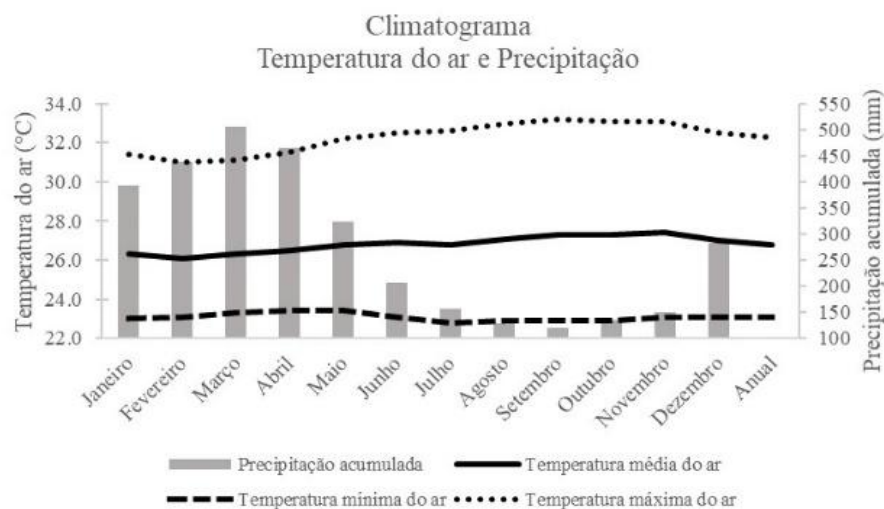
O clima do município de Belém apresenta dois períodos bem definidos: o primeiro, mais chuvoso, ocorre entre os meses de dezembro e junho; o segundo, classificado como menos chuvoso, ocorre entre julho e novembro.

De acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima de Belém é caracterizado como tropical úmido ou equatorial úmido, também denominado clima tropical chuvoso de floresta (Af). Em relação à energia térmica, o município apresenta baixa amplitude térmica, variando entre 8,0 e 10,0 °C ao longo do ano. O período de menores temperaturas médias ocorre entre janeiro e junho, quando o volume de precipitação é maior, enquanto as maiores temperaturas médias registram-se entre julho e dezembro, período de menor ocorrência de chuvas (Costa et al., 2013; Dubreuil et al., 2018; Margalho, 2019).

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média anual do município é de 26,8 °C, a temperatura mínima média é de 23,1 °C e a temperatura máxima média é de 32,3 °C. Quanto à umidade relativa e à precipitação acumulada, observam-se valores médios anuais de 84,1% de umidade no ar e 3308,3 mm de precipitação acumulada. Nas Figuras 4 e 5, são apresentados, respectivamente, o climatograma da temperatura do ar com a precipitação acumulada e o climatograma da amplitude térmica, referentes à normal climatológica de 1991 a 2020.

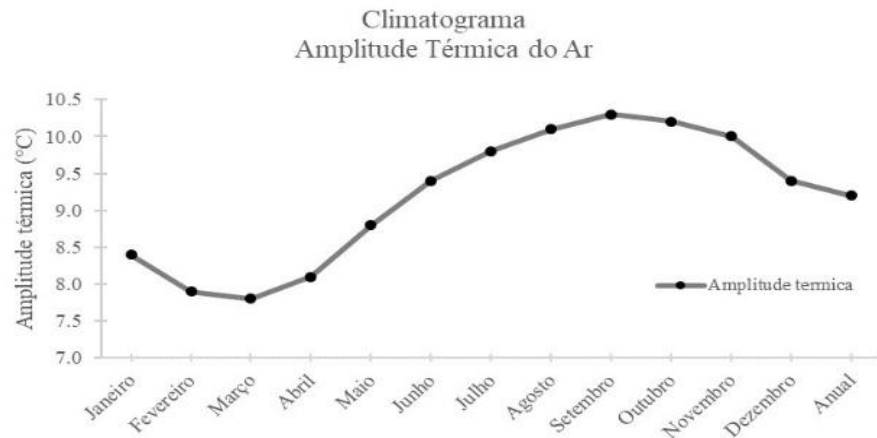
De acordo com Cardoso et al. (2022), os principais sistemas meteorológicos responsáveis pelas precipitações na região de estudo são: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), linhas de instabilidade e brisa costeira.

Figura 4. Climatograma Temperatura do ar e da Precipitação acumulada do município de Belém/PA.



Fonte: INMET

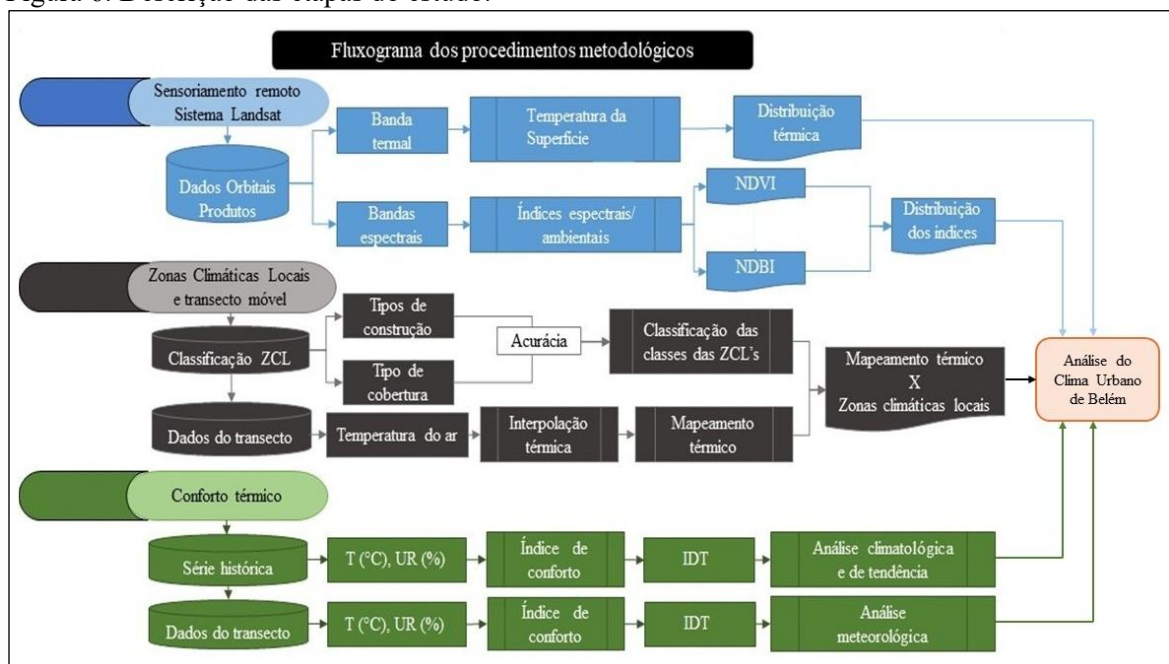
Figura 5. Climatograma da amplitude térmica.



Fonte: INMET

Para melhor entendimento dos processos aplicados no estudo, na figura 6 é apresentado o fluxograma das etapas realizadas.

Figura 6. Descrição das etapas do estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Dados orbitais

Para a realização da pesquisa, foram utilizados dados orbitais do sistema de satélites Landsat, que permitem estimar a temperatura da superfície (TS) e calcular índices espectrais, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o NDBI (Normalized Difference Built-Up Index). Esses índices são fundamentais para verificar alterações no uso e cobertura do solo e analisar o comportamento da temperatura da superfície em relação às características da vegetação e áreas construídas.

Todas as imagens empregadas no estudo correspondem ao período menos chuvoso, devido à menor presença de nebulosidade. Além disso, as aquisições ocorreram entre 09:45 e 10:25, nos meses de menor cobertura de nuvens, garantindo maior qualidade e consistência dos dados. Na tabela 1 está disposto as características das imagens utilizadas na presente pesquisa e suas respectivas datas.

Tabela 1. Características das imagens Landsat.

Datas	Órbita	Ponto	Landsat/sensor
20/07/1993	223	61	5/TM
14/08/2008	223	61	5/TM
27/07/2013	223	61	8/OLI, TIRS
18/08/2021	223	61	8/OLI, TIRS

Fonte: USGS.

O processamento das imagens foi realizado nos softwares livres e gratuitos GRASS (versão 7.8) e QGIS (versão 3.10.7). Nas Tabelas 2 e 3, apresentam-se as características dos sensores TM do Landsat-5 e dos sensores TIRS e OLI do Landsat-8. As descrições de cada banda e os respectivos coeficientes foram utilizados para a calibração dos produtos, para a determinação dos índices espectrais e para a estimativa da temperatura da superfície (TS).

As imagens de TS foram reprojetaadas para uma resolução espacial de 30 metros, considerando que as bandas termiais possuem resoluções de 100 metros (Landsat-8) e 120 metros (Landsat-5), enquanto as demais bandas, utilizadas para o cálculo dos índices espectrais, apresentam resolução espacial de 30 metros.

Tabela 2. Descrição das bandas, faixas espectrais e seus respectivos coeficientes de calibração (anteriores ao ano 2000 e posteriores ao ano 2000), correspondente ao Landsat 5.

Bandas	Características	Faixa espectral (μm)	Coeficientes calibração				Resolução espacial (m)
			< 2000		> 2000		
			a	b	a	b	
1	Azul	0,45 – 0,52	- 1,50	152,1	- 1,765	178,9	30
2	Verde	0,53 – 0,61	-2,80	296,8	- 3,576	379,1	30
3	Vermelho	0,62 – 0,69	- 1,20	204,3	- 1,502	255,7	30
4	Infrav. próximo	0,78 – 0,90	- 1,50	206,2	- 1,763	242,3	30
5	Infrav. médio	1,57 – 1,78	- 0,370	27,2	- 0,411	30,2	30
6	Infrav. termal	10,4 – 12,5	1,238	15,6	1,238	15,6	120
7	Infrav. médio	2,08 – 2,35	- 0,150	14,4	- 0,137	13,2	30

Fonte: Waters et al. (2002), adaptado pelo autor

Tabela 3. Descrição das bandas e faixas espectrais utilizadas, correspondente ao Landsat 8.

Bandas	Característica	Faixa espectral (μm)	Resolução espacial (m)	ϖ_n	ESUN $_{\lambda,b}$
2	Azul	0,45 – 0,52	30	0,300	2011,3
3	Verde	0,53 – 0,60	30	0,277	1853
4	Vermelho	0,63 – 0,68	30	0,233	1532,8
5	Infravermelho próximo	0,85 – 0,89	30	0,143	956,4
6	Infravermelho médio	1,56 – 1,66	30	0,036	237,8
7	Infravermelho médio	2,10 – 2,30	30	0,012	80,2
10	Infravermelho termal	10,6 – 11,2	100	-	-

Fonte: Silva et al. (2016), adaptado pelo autor

4.3.1 Calibração radiométrica e reflectância do Landsat-5

A radiância refletida é detectada pelo sensor do satélite e registrada pelo mesmo e a estação receptora converte este registro em número digital (ND). No processamento das imagens, a calibração radiométrica é realizada por meio do cálculo da radiância espectral ($L_{\lambda i}$) de cada banda, conforme proposto por Markham & Baker (1987) e expressa na Equação 1.

$$L_{\lambda i} = a + \left(\frac{b - a}{255} \right) \times ND \quad (1)$$

em que: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral das bandas; a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$), detectadas pelo sensor TM – Landsat 5; ND é a intensidade do pixel ou número digital que tem um intervalo de 0 a 255 e i corresponde às bandas do Landsat 5.

A reflectância ($\rho_{\lambda i}$) de cada banda é definida pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente. Para o Landsat-5, a reflectância é calculada pela Equação 2, conforme Waters et al. (2002).

$$\rho = \frac{L_{\lambda} \times \pi}{K_{\lambda} \times \cos Z \times d_r} \quad (2)$$

em que: L_{λ} é a radiância espectral de cada banda, K_{λ} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar e d_r é a distância relativa Terra-Sol que equivale a 1.

4.3.2 Reflectância do Landsat-8

Para as imagens do Landsat-8 (sensores OLI/TIRS), a reflectância pode ser obtida a partir da conversão direta do número digital (ND), conforme Zanter (2016) expressa pela Equação 3.

$$\rho_{\lambda,b} = \frac{H_{\rho} \times Q_{CAL} + A_{\rho}}{\cos(\theta_{SE})} \quad (3)$$

em que: $\rho_{\lambda,b}$ é a reflectância, H_{ρ} é redimensionamento multiplicativo específico de cada banda (2^{-5} , constante), A_{ρ} é o fator aditivo (-0,1), Q_{CAL} é o valor digital ou número digital (ND) e θ_{SE} é o ângulo azimutal, calculado pela expressão (Equação 4):

$$\theta_{SE} = 90 - \theta_{SZ} \quad (4)$$

em que: θ_{SZ} é o ângulo de elevação do sol, disponibilizado nos metadados.

4.3.3 Determinação dos índices e estimativa da TS

O NDVI estimado a partir da equação 1, é um índice de vegetação da diferença normalizada, isto é, este índice é utilizado para expressar a densidade da vegetação (Guha et al., 2018). Os valores deste índice variam de -1 a +1; no qual para solo com vegetação os valores variam de 0 a 1 e para solo com água os valores são negativos (< 0).

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

em que, ρ_{NIR} é a reflectância da banda do infravermelho próximo; ρ_{RED} é a reflectância da banda do vermelho.

O NDBI (Zha et al., 2003) será utilizado no presente estudo, no qual é sensível à área construída e expressa pela equação 6. Sendo que os intervalos de valores vão de -1 a +1, na qual valores positivos denotam presença de área de construção e solo impermeável.

$$NDBI = \frac{(\rho_{MIR} - \rho_{NIR})}{(\rho_{MIR} + \rho_{NIR})} \quad (6)$$

em que, ρ_{MIR} é a reflectância da banda do infravermelho médio; ρ_{NIR} é a reflectância da banda do infravermelho próximo.

Para determinar a temperatura da superfície (TS), será utilizado o modelo apresentado por Waters et al. (2002), pela equação 8:

$$TS = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda_{thermal}}} + 1\right)} \quad (8)$$

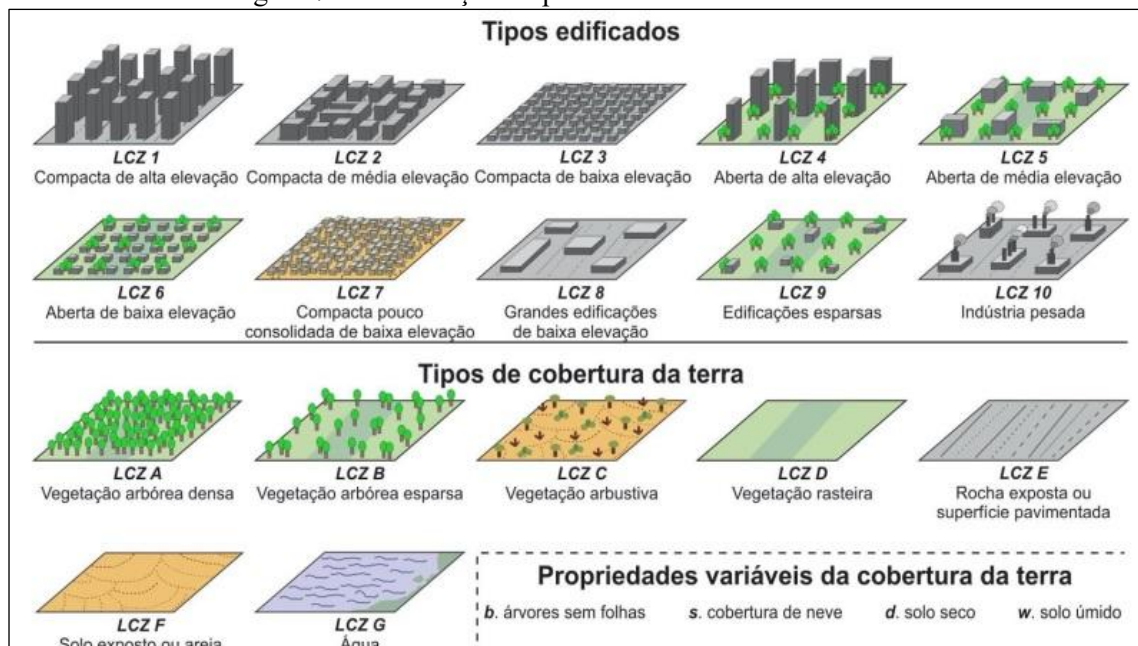
em que, K_1 e K_2 são constantes da banda termal do Landsat e ε_{NB} a emissividade, na qual consideramos uma constante (= 1).

4.4 Definição das Zonas Climáticas Locais

A classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) foi baseada nos estudos de Stewart e Oke (2009; 2012). Essa classificação considera os tipos de cobertura do solo, sendo todas as zonas identificadas por meio de sensoriamento remoto, a partir de imagens.

O sistema de classificação das ZCL (Figura 7) é organizado em dois grupos principais, totalizando 17 classes. O primeiro grupo compreende 10 classes, numeradas de 1 a 10, e é caracterizado por diferentes tipos de construções. O segundo grupo inclui 7 classes, identificadas pelas letras de A a G, correspondendo a distintos tipos de cobertura do solo.

Figura 7. Classificação e tipos de Zonas Climáticas Locais.

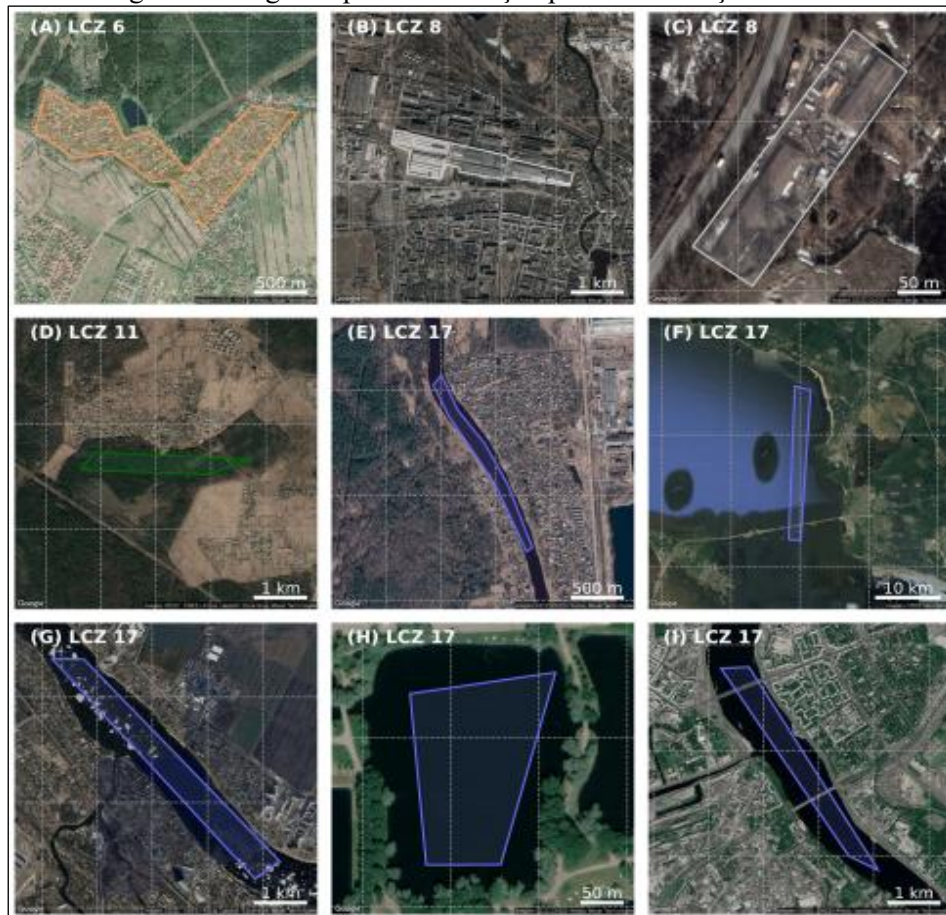


Fonte: Pinton *et al.* (2021).

O presente estudo adotou o método proposto por Demuzere et al. (2021), que utiliza uma interface denominada *LCZ Generator*, permitindo gerar a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL). O ponto de partida do processo consiste na demarcação das áreas de cada ZCL, utilizando imagens de satélite obtidas pelo Google Earth Pro para identificar os tipos de cobertura do solo e as características das edificações presentes na região de estudo.

Na interface do *LCZ Generator*, a demarcação é realizada por meio de polígonos, que permitem visualizar as áreas associadas a cada tipo de ZCL. De acordo com Demuzere et al. (2021), a utilização dos polígonos requer a aplicação de regras específicas, garantindo que cada tipo de cobertura e estrutura urbana seja corretamente representado, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Polígonos para demarcação para classificação da ZCL.



Fonte: Demuzere et al. (2021)

Posteriormente, o arquivo de demarcação das ZCL é salvo em formato KML e enviado para a interface do *LCZ Generator*. Essa ferramenta apresenta como vantagem a geração automática das zonas, utilizando conjuntos de dados de diversos satélites (Landsat, Sentinel, entre outros) integrados à plataforma Google Earth Engine (GEE). Além disso, o método

fornece suporte estatístico (Tabela 4), por meio de métricas de precisão, garantindo maior confiabilidade na classificação das ZCL (Gorelick et al., 2017; Demuzere et al., 2020).

Tabela 4. 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.

4.5 Dados Meteorológicos

Foram realizados transectos móveis para a obtenção de dados meteorológicos utilizando um termohigrômetro, instrumento que mede a temperatura do ar, umidade relativa e temperatura de orvalho. O objetivo dessas medições foi gerar o mapeamento térmico da malha urbana de Belém, associando os dados às Zonas Climáticas Locais (ZCL) e avaliando a influência dos tipos de ZCL no desconforto térmico da população.

Além dos dados coletados nos transectos móveis, foram utilizados dados de série histórica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados pela estação climatológica de Belém. Essa estação foi fundada em 1923 nas coordenadas 01°27'S, 48°28'O e, em 2006, transferida para 01°26'09"S, 48°26'14"O (Figura 9). A série histórica, portanto, contempla dados obtidos em duas localizações distintas da cidade, garantindo consistência temporal e espacial para a análise climática urbana, conforme informações do Distrito de Meteorologia de Belém (DISME/INMET).

Figura 9. Localização da Estação Meteorológica desde de sua instalação até dias atuais.



Fonte: INMET

4.5.1 Transecto Móvel

O instrumento utilizado nos transectos móveis para a captação das variáveis meteorológicas foi um termohigrômetro do tipo datalogger (Figura 10), equipado com sistema de leitura, registro e armazenamento de dados, garantindo maior precisão e facilidade na manipulação das informações.

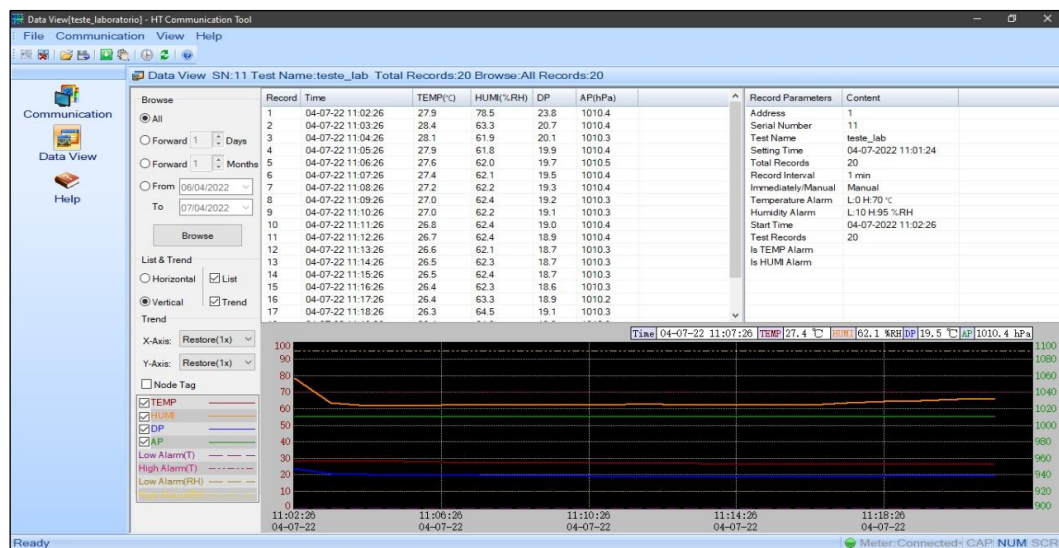
As variáveis meteorológicas registradas durante os transectos foram: temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), temperatura de orvalho ($^{\circ}\text{C}$) e pressão atmosférica (hPa). Para os objetivos deste estudo, foram utilizadas apenas a temperatura do ar, para a geração do mapa térmico urbano, e a umidade relativa do ar, para avaliação do conforto térmico da população.

Figura 10. Termohigrômetro, tipo Datalogger, modelo HT-4010.



O termohigrômetro também possui uma interface (Figura 11) que possibilita manusear os dados em planilha eletrônica após o dado ser baixado.

Figura 11. Interface do software do termohigrômetro, modelo HT-4010.



Não obstante, foi necessária a construção de um abrigo meteorológico (Figura 12) para proteger o instrumento e, sobretudo, evitar interferências nas leituras. Como os dados foram captados durante a noite, o abrigo teve função apenas de proteção física e de prevenção contra efeitos do vento.

Os registros foram coletados a cada 1 minuto, com o veículo em movimento a 30 km/h, durante uma hora, das 20h30 às 21h30. O experimento foi repetido em três dias consecutivos, de modo a abranger toda a malha urbana de Belém.

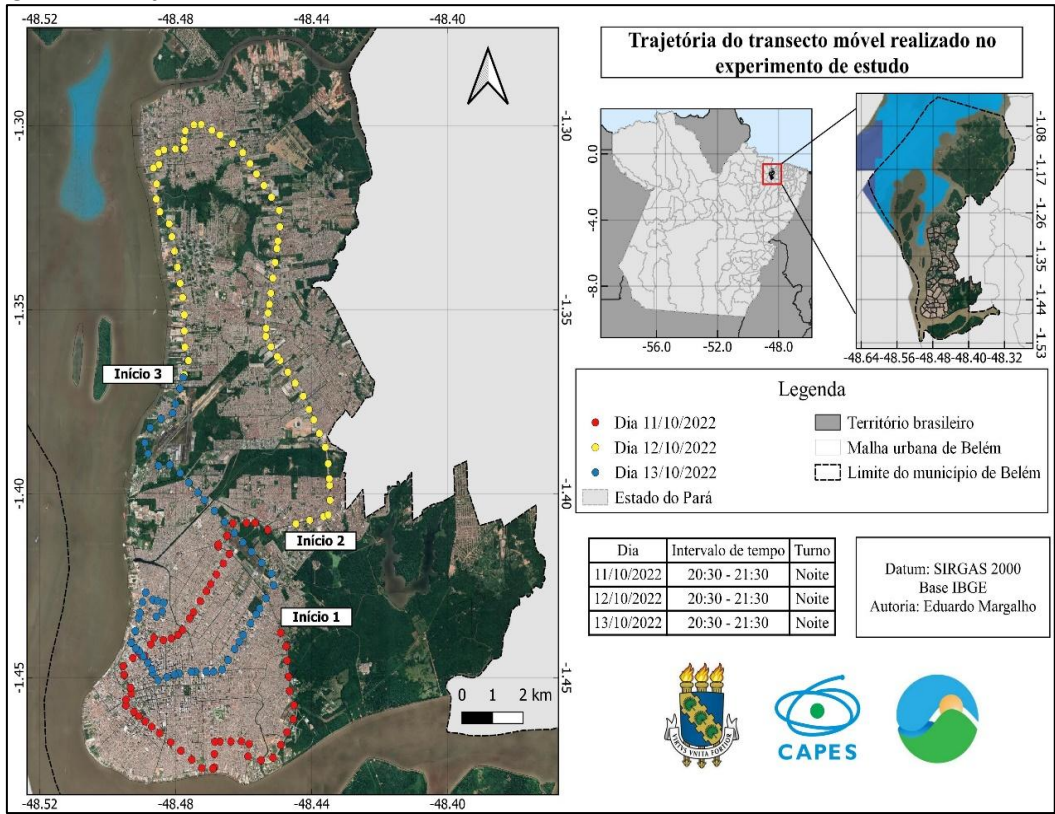
Esse procedimento está em consonância com estudos que utilizam transectos móveis para o mapeamento térmico urbano, como os trabalhos de Amorim et al. (2009), Porangaba et al. (2017) e Castro (2022).

Figura 12. Abrigo meteorológico para o termohigrômetro.



Como supracitado, o experimento foi realizado apenas na malha urbana de Belém, na Figura 13 é mostrado o trajeto do experimento e captação das variáveis, além dos dias e horários do percurso.

Figura 13. Trajetória do transecto móvel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Determinação do índice de desconforto de Thom (IDT)

Para dar continuidade à pesquisa, tornou-se necessário avaliar a influência do clima urbano na saúde da população urbana. Para isso, foi empregado o Índice de Desconforto Térmico (IDT), utilizado para analisar os efeitos do processo de urbanização sobre o conforto térmico.

O Índice de Desconforto de Thom permite medir o grau de desconforto que uma pessoa pode experimentar em função das condições climáticas de um determinado ambiente, neste caso, um ambiente urbano. Esse índice quantifica a sensação térmica por meio da Equação 9, proposta e adaptada por Santos (2011) para regiões de clima tropical úmido.

$$IDT = T - (0,55 - 0,0055 \times UR) \times (T - 14,5) \quad (9)$$

Em que, T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); UR é a umidade relativa (%).

Na tabela 5, estão dispostas as informações dos níveis de desconforto associados com os intervalos de valores do IDT.

Tabela 5. Classificação dos intervalos de valores de IDT e seus níveis de desconforto.

IDT ($^{\circ}\text{C}$)	Níveis de desconforto
$IDT < 24$	Confortável
$24 \leq IDT \leq 26$	Parcialmente confortável
$26 < IDT < 28$	desconfortável
$IDT > 28$	Muito desconfortável

Fonte: Santos (2011)

4.5.3 Análise de tendência

Para a análise climatológica, foi necessário utilizar um teste estatístico não paramétrico para verificar tendências no Índice de Desconforto Térmico (IDT) em Belém/PA. Nesse contexto, o teste de Pettitt constitui uma ferramenta estatística capaz de identificar se uma série histórica apresenta alterações ou tendências significativas ao longo do tempo (Liu et al., 2013; Melo et al., 2018).

A fórmula é baseada em um teste não paramétrico, derivado do teste de Mann–Whitney (Richardson et al., 2022), através das Equação 10 e 11:

$$K_T = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}| \quad (10)$$

Onde,

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (11)$$

O teste baseia-se em duas hipóteses:

- Hipótese nula (H_0): a série apresenta homogeneidade na média histórica, ou seja, não há alteração nem tendência;
- Hipótese alternativa (H_1): a série apresenta uma quebra ou alteração, indicando a existência de uma tendência ao longo do tempo.

Na Tabela 6, são apresentadas as informações do teste, incluindo hipóteses e critérios de decisão, considerando um nível de significância de 5%.

Tabela 6. Apresentação do teste e suas respectivas hipóteses.

Teste Pettitt
H_0 : A série temporal é homogênea
H_1 : Há quebra ou alteração na série temporal, série não homogênea
Tomar decisão: se o p-valor for maior do que α , por exemplo $p > 0,05$ (não rejeita H_0).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Distribuição dos índices espectrais (NDVI, NDBI)

As distribuições dos índices espectrais NDVI e NDBI estão diretamente associadas às Zonas Climáticas Locais (ZCL), uma vez que, conforme Demuzere et al. (2021), a classificação dessas zonas considera esses índices. Como o estudo utiliza os tipos de cobertura mais recentes, torna-se relevante analisar como os valores desses índices se comportavam em anos anteriores, a fim de compreender a evolução da distribuição espacial da cobertura vegetal e das áreas construídas na região de interesse.

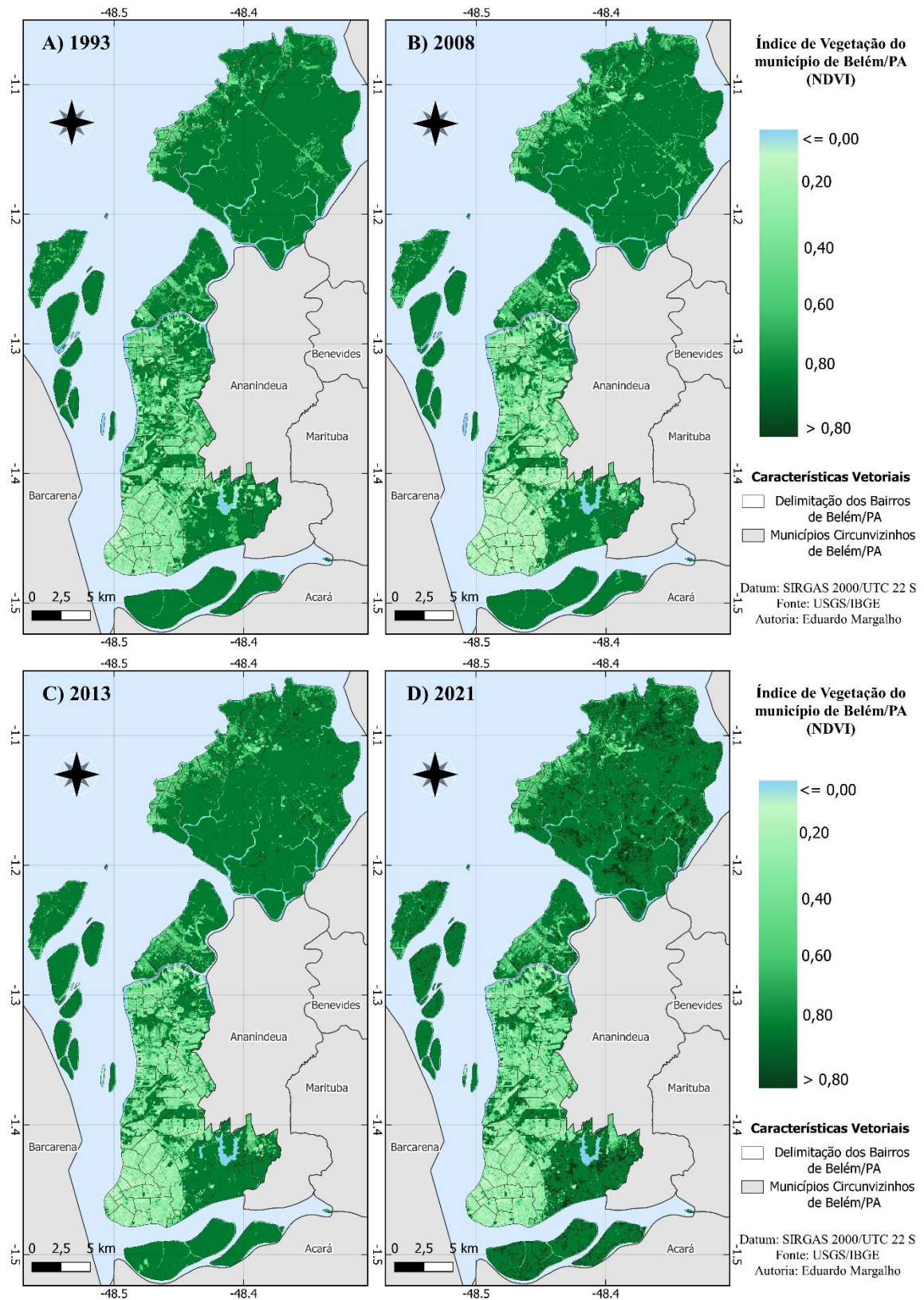
Na Figura 14A, é apresentada a distribuição do NDVI (Índice de Diferença Normalizada de Vegetação) em 1993, evidenciando a substituição gradual da cobertura vegetal por áreas urbanizadas em Belém ao longo dos anos. A ausência de vegetação é notável em distritos como Guamá, Belém e Sacramenta, que lideraram a expansão urbana. Em contrapartida, os distritos de Outeiro e Mosqueiro apresentam alta densidade vegetal, com NDVI acima de 0,5, indicando menor impacto da urbanização até aquele período.

A Figura 14B, referente a 2008, revela uma redução acentuada da vegetação nas áreas que ainda mantinham cobertura em 1993. A expansão urbana, especialmente em Outeiro, resultou em NDVI abaixo de 0,1, evidenciando crescimento urbano significativo. Em Mosqueiro, anteriormente com alta densidade vegetal, também ocorre declínio da vegetação, principalmente nas áreas litorâneas que abrigam as principais praias do município.

Na Figura 14C, referente a 27/07/2013, observa-se uma recuperação parcial da vegetação em áreas que, em 2008, estavam desprovidas dela. Essa recuperação é mais evidente nos distritos de Mosqueiro e Icoaraci, enquanto Guamá, Belém e Sacramenta permanecem com alta densidade urbana, sem sinais de aumento de cobertura vegetal.

Em 2021 (Figura 14D), o distrito de Mosqueiro apresenta expansão da substituição de cobertura vegetal para áreas internas, indicando uma nova fase de urbanização afetando regiões mais centrais do distrito, além das áreas litorâneas previamente impactadas.

Figura 14. Distribuição do índice NDVI do município de Belém/PA. Dos dias 20/07/1993 (A), 14/08/2008 (B), 27/07/2013 (C) e 18/08/2021 (D).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 apresenta a proporção da cobertura do solo em Belém com base nos valores de NDVI, evidenciando uma redução da cobertura vegetal ao longo do período analisado: de 75% em 1993 para 73% em 2021. Por outro lado, a área com ausência ou baixa densidade de vegetação aumentou de 22% em 1993 para 25% em 2021, confirmando o impacto do crescimento urbano sobre a vegetação ao longo das décadas.

Vale ressaltar que as ilhas que compõem o município de Belém foram incluídas nos cálculos da porcentagem.

Tabela 7. Percentual da cobertura vegetal do município de Belém.

Data	Presença de vegetação contagem NDVI > 0.5	Ausência/baixa presença NDVI (0.0-0.2) / (0.2-0.5)
20/07/1993	75%	22%
14/08/2008	70%	27%
27/07/2013	73%	24%
18/08/2021	73%	25%

Outro índice utilizado para a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) é o Índice de Diferença Normalizada de Construção (NDBI) (Figura 15), que permite identificar áreas com cobertura construída e analisar a expansão urbana ao longo do tempo. O NDBI varia de -1 a +1, sendo que valores negativos indicam áreas com predominância de vegetação ou superfícies não construídas, enquanto valores positivos refletem maior presença de construções, como edifícios e infraestrutura urbana.

Na imagem de 1993 (Figura 15A), os distritos com valores positivos de NDBI, indicando maior adensamento de cobertura construída, coincidem com áreas de menor vegetação, incluindo Guamá, Belém e Sacramento, regiões já em processo de urbanização consolidada. Por outro lado, os distritos de Bengui, Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro apresentam valores negativos mais elevados, sugerindo menor densidade urbana e maior cobertura vegetal, correspondendo a áreas periféricas com menor intervenção construtiva.

Em 2008 (Figura 15B), observa-se intensificação da expansão urbana, especialmente nos distritos de Bengui e Icoaraci, com aumento significativo de NDBI nas regiões fronteiriças ao município de Ananindeua. Em contraste, Mosqueiro e Outeiro mantêm valores negativos elevados, preservando maior vegetação e sofrendo poucas alterações.

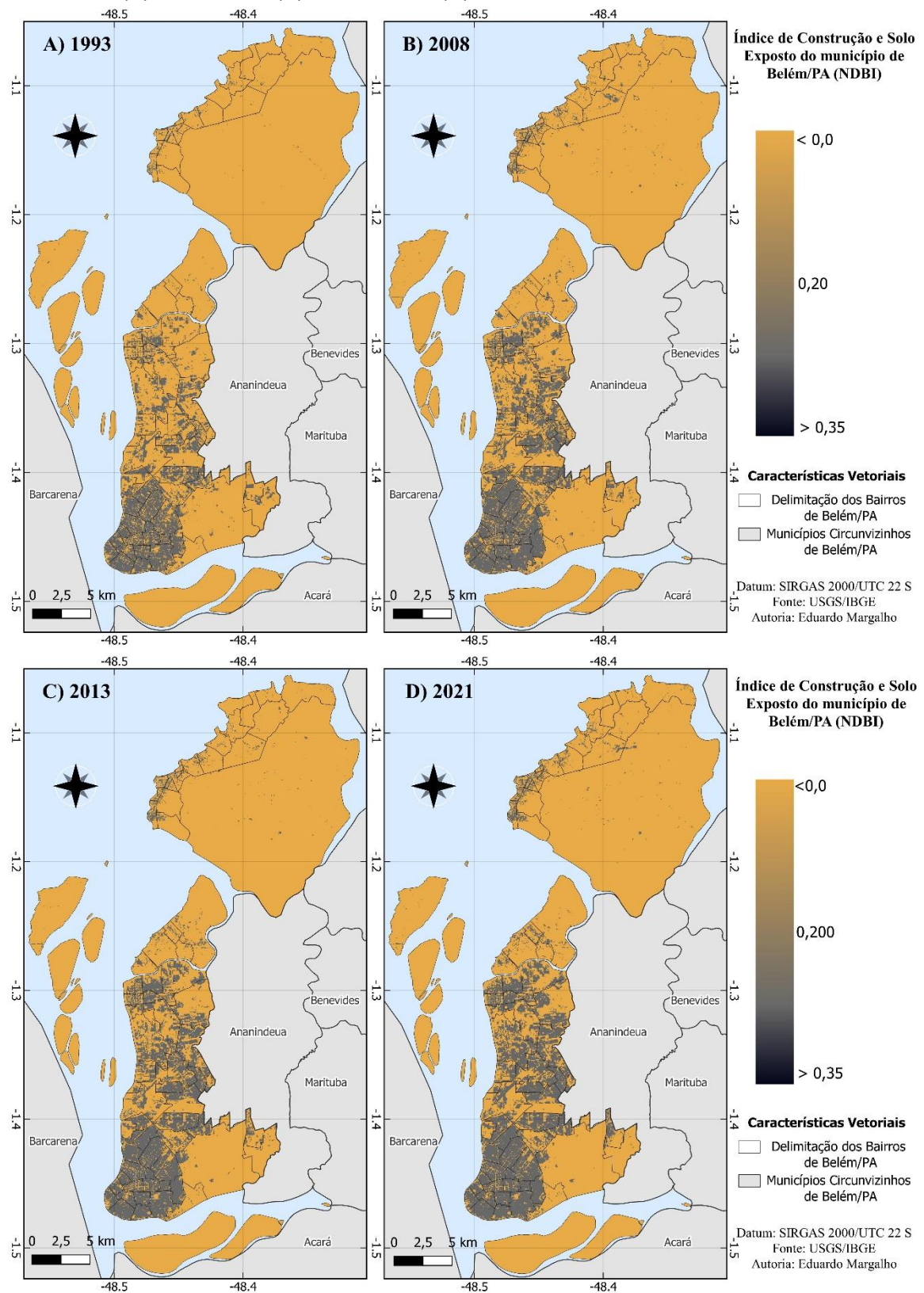
Na imagem de 2013 (Figura 15C), a expansão da cobertura construída torna-se mais consolidada, com características de densificação em bolsões urbanos. Áreas como Entroncamento, Bengui e Icoaraci apresentam urbanização concentrada em núcleos de alta densidade, enquanto Guamá, Belém e Sacramento mantêm padrões já consolidados. Outeiro e

Mosqueiro iniciam uma leve intensificação na cobertura construída, indicando expansão gradual.

Em 2021 (Figura 15D), observa-se continuidade na expansão urbana, sobretudo nos bolsões de densificação de Entroncamento, Bengui e Icoaraci, com maior adensamento da cobertura construída e ainda potencial para crescimento adicional. Em Mosqueiro, a expansão foi mais notável do que em Outeiro, possivelmente impulsionada por investimentos em infraestrutura ou mudanças na demanda por moradia.

Ao longo do período analisado, é evidente a tendência de expansão urbana em Belém, com progressiva ocupação de áreas periféricas e densificação das zonas já consolidadas. A análise do NDBI permite compreender os padrões de ocupação do solo, a dinâmica do crescimento urbano e as tendências futuras, evidenciando migração da urbanização para periferias e intensificação nos centros urbanos entre 1993, 2008, 2013 e 2021.

Figura 15. Distribuição do índice NDBI do município de Belém/PA. Dos dias 20/07/1993 (A), 14/08/2008 (B), 27/07/2013 (C) e 18/08/2021 (D).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta a proporção da cobertura do solo em Belém com base nos valores de NDBI, evidenciando o aumento das áreas construídas ao longo do período analisado. A cobertura de áreas construídas aumentou de 22% em 1993 para 25% em 2021, enquanto a área com ausência ou baixa densidade de construção diminuiu de 75% em 1993 para 73% em 2021, confirmando o impacto do crescimento urbano sobre o solo.

Vale ressaltar que as ilhas que constituem o município de Belém foram incluídas nos cálculos da porcentagem.

Tabela 8. Percentual da cobertura construída e permeável do município de Belém.

Data	Proporção de área não construída NDBI < 0	Proporção de área construída NDBI > 0
20/07/1993	90%	10%
14/08/2008	87%	13%
27/07/2013	85%	15%
18/08/2021	83%	17%

5.2 Distribuição da Temperatura da Superfície (TS)

A temperatura da superfície (TS) não é um parâmetro diretamente utilizado para a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL), como ocorre com os índices NDVI e NDBI. Entretanto, compreender a distribuição da TS é importante para associá-la aos índices de cobertura e comparar com as ZCL e o mapeamento térmico obtido pelos transectos móveis.

Na Figura 16A (1993), observa-se que a área urbana consolidada, formada pelos distritos de Guamá, Belém e Sacramento, apresenta valores mais elevados de TS em comparação aos demais distritos. Essa tendência é consistente com os índices de cobertura, que indicam baixa vegetação (NDVI) e alta cobertura construída (NDBI) nessas áreas. Os valores de TS em 1993 variam entre 20,0 °C e 27,0 °C, sendo os maiores concentrados nos distritos citados. Os distritos de Outeiro e Mosqueiro apresentam valores mais baixos, devido à maior cobertura vegetal.

Em 2008 (Figura 16B), nota-se aumento da TS nos distritos de Entroncamento, Bengui e Icoaraci, refletindo a expansão urbana ocorrida entre 1993 e 2008, especialmente nos bairros fronteiriços com o município de Ananindeua. No distrito de Mosqueiro, observa-se elevação da TS nas áreas litorâneas, mantendo-se mais altas que em outros bairros. Os valores de TS variam entre 20,0 °C e 30,0 °C, com expansão das áreas acima de 25,0 °C, enquanto Outeiro ainda registra temperaturas abaixo de 25,0 °C.

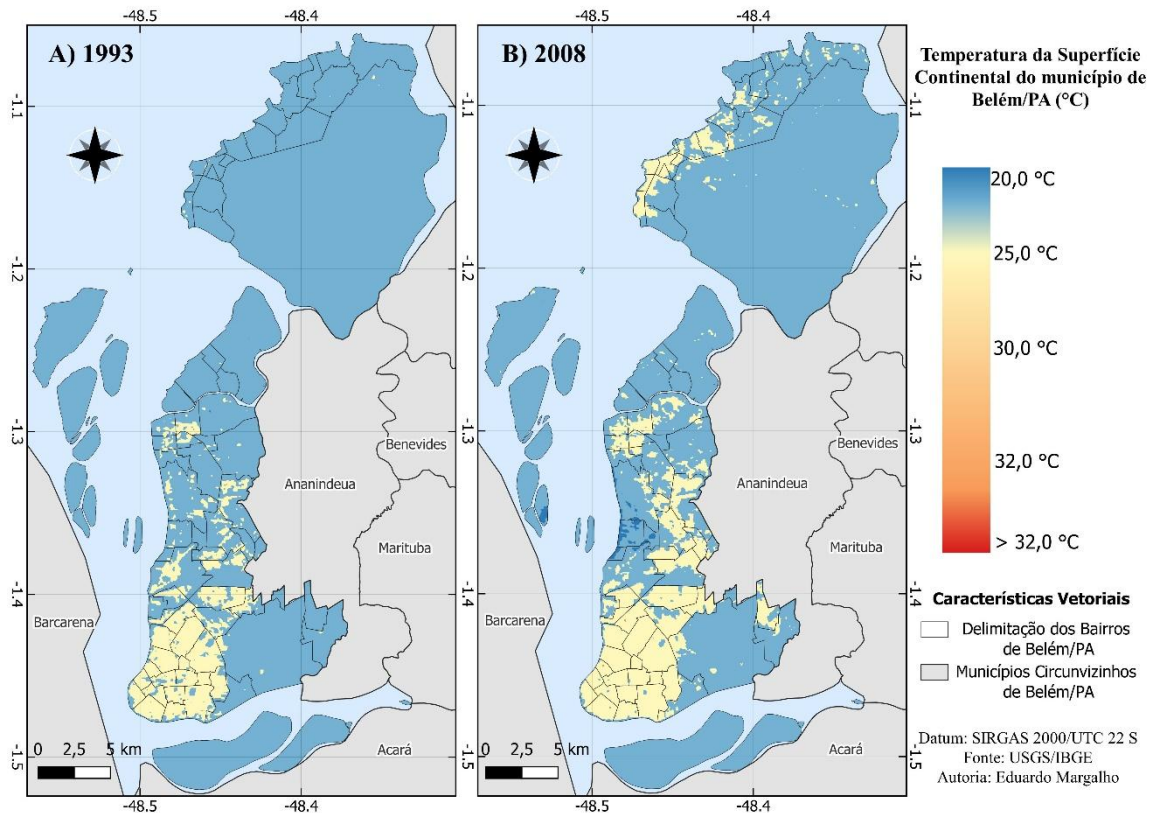
Na imagem de 2013 (Figura 16C), os valores de TS em todos os distritos situam-se entre 25,0 °C e 30,0 °C, indicando aumento geral da temperatura. Apenas as áreas com maior

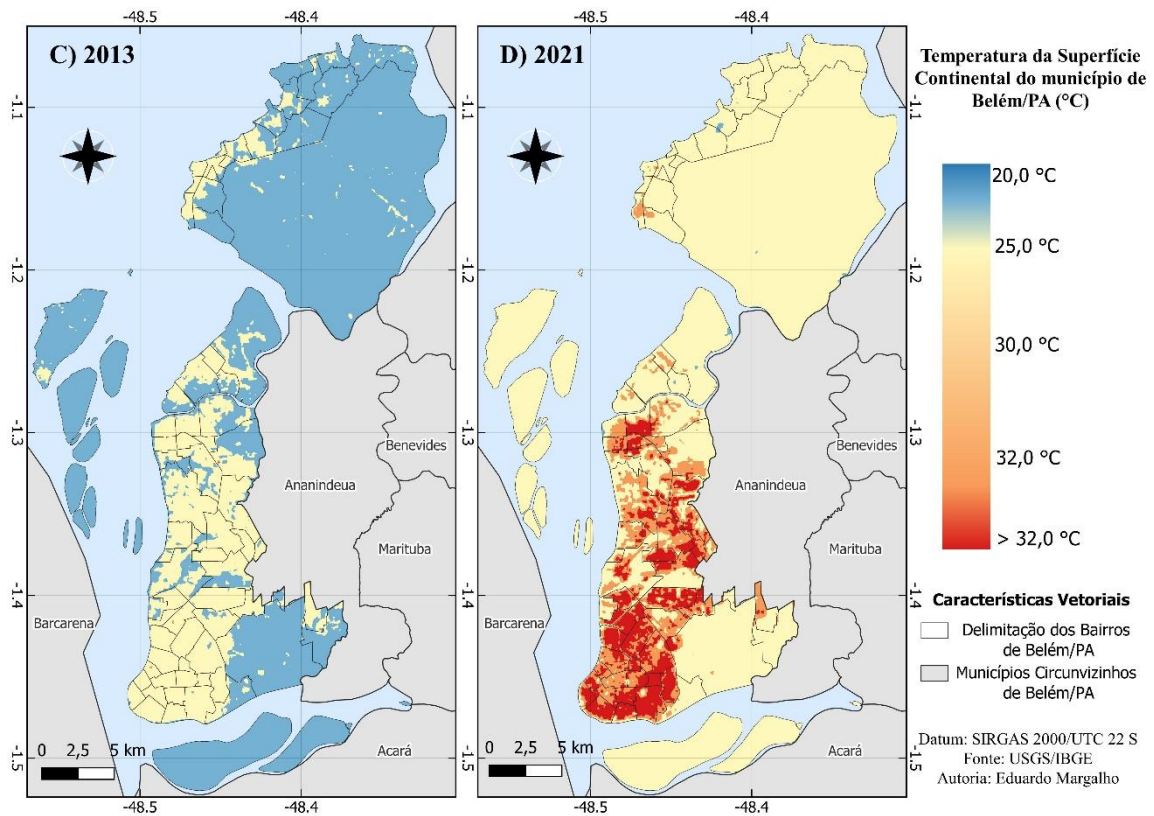
cobertura vegetal, localizadas em Entroncamento, Bengui, Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro, apresentam TS abaixo de 25,0 °C. É importante salientar que a imagem de 2013 foi obtida por outra versão do satélite Landsat, mas mantém padrão de TS compatível com as imagens anteriores.

Em 2021 (Figura 16D), observa-se intensificação das áreas mais urbanizadas, corroborando os padrões observados nos índices NDVI e NDBI. Os distritos consolidados de Guamá, Belém e Sacramenta apresentam TS a partir de 32,0 °C, assim como os bairros fronteiriços com Ananindeua, situados nos distritos de Entroncamento e Bengui. No distrito de Icoaraci, os bairros de Campina de Icoaraci e Agulha apresentam valores elevados de TS, sugerindo um possível polo urbano em consolidação.

Além dos fatores de cobertura, observa-se que, em 2021, mesmo áreas com maior vegetação registraram aumento da TS em relação a 2013. Esse fenômeno pode estar relacionado a fatores atmosféricos de maior escala, como a dinâmica do ENOS, cuja fase influencia a intensidade das estações menos chuvosas e, conseqüentemente, a temperatura da superfície.

Figura 16. Distribuição da Temperatura da Superfície Continental do município de Belém/PA. Dos dias 20/07/1993 (A), 14/08/2008 (B), 27/07/2013 (C) e 18/08/2021 (D).





Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 apresenta a proporção da distribuição da temperatura da superfície (TS) ao longo do período analisado, considerando todas as áreas do município de Belém, incluindo as ilhas. Os dados revelam uma tendência clara de aumento da TS ao longo das décadas.

Em 1993, a maior parte do município (89,5%) apresentava TS entre 20,0 °C e 25,0 °C, enquanto apenas 10,5% da área registrava TS entre 25,1 °C e 30,0 °C. Valores superiores a 30 °C não foram observados nesse período, indicando que a maior parte da cidade ainda mantinha temperaturas relativamente baixas, associadas a áreas com maior cobertura vegetal, como os distritos de Outeiro e Mosqueiro.

Em 2008, observa-se uma redução da área com TS entre 20,0 °C e 25,0 °C (81,1%) e um aumento das áreas com TS entre 25,1 °C e 30,0 °C (18,4%), refletindo a expansão urbana em distritos como Entroncamento, Bengui e Icoaraci. Isso confirma o avanço da urbanização nas áreas periféricas e a correlação entre o aumento da cobertura construída (NDBI) e a elevação da TS.

Na imagem de 2013, a tendência de aquecimento é ainda mais evidente, com 70,6% da área apresentando TS entre 20,0 °C e 25,0 °C e 29,4% entre 25,1 °C e 30,0 °C. A diminuição progressiva da área com temperaturas mais baixas reforça o efeito da urbanização sobre o

aumento da TS, especialmente nos distritos em crescimento urbano, enquanto áreas de maior vegetação continuam a manter TS mais baixas.

Em 2021, o cenário muda significativamente: apenas 0,2% da área apresenta TS entre 20,0 °C e 25,0 °C, 80,8% da superfície está entre 25,1 °C e 30,0 °C, 10,9% entre 30,1 °C e 32,0 °C e 8,2% acima de 32,0 °C. Esse aumento expressivo da TS nas áreas urbanizadas consolidadas, como Guamá, Belém e Sacramenta, e nos bairros fronteiriços de Entroncamento, Bengui e Icoaraci, demonstra claramente o impacto da expansão urbana e da densificação da cobertura construída. Além disso, mesmo áreas com maior cobertura vegetal apresentaram elevação da TS, indicando influência de fatores de escala atmosférica, como a dinâmica do ENOS.

Portanto, ao longo de quase três décadas, a cidade de Belém experimentou aumento progressivo da temperatura da superfície, refletindo a expansão urbana e a transformação da cobertura do solo, conforme corroborado pelos índices NDVI e NDBI.

Tabela 9. Percentual da temperatura da superfície do município de Belém.

Data	TS 20,0 °C a 25,0 °C	TS 25,1 °C a 30,0 °C	TS 30,1 °C a 32,0 °C	TS Acima de 32,0 °C
20/07/1993	89,5%	10,5%	-	-
14/08/2008	81,1%	18,4%	-	-
27/07/2013	70,6%	29,4%	-	-
18/08/2021	0,2%	80,8%	10,9%	8,2%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Distribuição por bairros dos valores médios da TS

Os resultados apresentados a seguir correspondem aos valores médios de temperatura da superfície (TS) obtidos para cada bairro do município de Belém. A Figura 17, referente à imagem do Landsat-5, datada de 20 de julho de 1993, mostra temperaturas médias variando entre 22,6 °C e 26,4 °C, com amplitude térmica de 3,8 °C. O bairro do Aurá apresentou a menor TS (22,6 °C), enquanto o bairro do Reduto registrou o maior valor (26,4 °C), refletindo o baixo grau de urbanização em algumas áreas e o potencial de expansão urbana ainda presente à época.

Entre os distritos, Mosqueiro e Outeiro destacaram-se por apresentarem as menores temperaturas médias. Outeiro registrou valores entre 23,1 °C e 23,8 °C, enquanto Mosqueiro variou entre 22,9 °C e 24,0 °C, indicando menor urbanização e maior presença de vegetação. Por outro lado, os distritos de Guamá, Belém e Sacramenta apresentaram os maiores valores

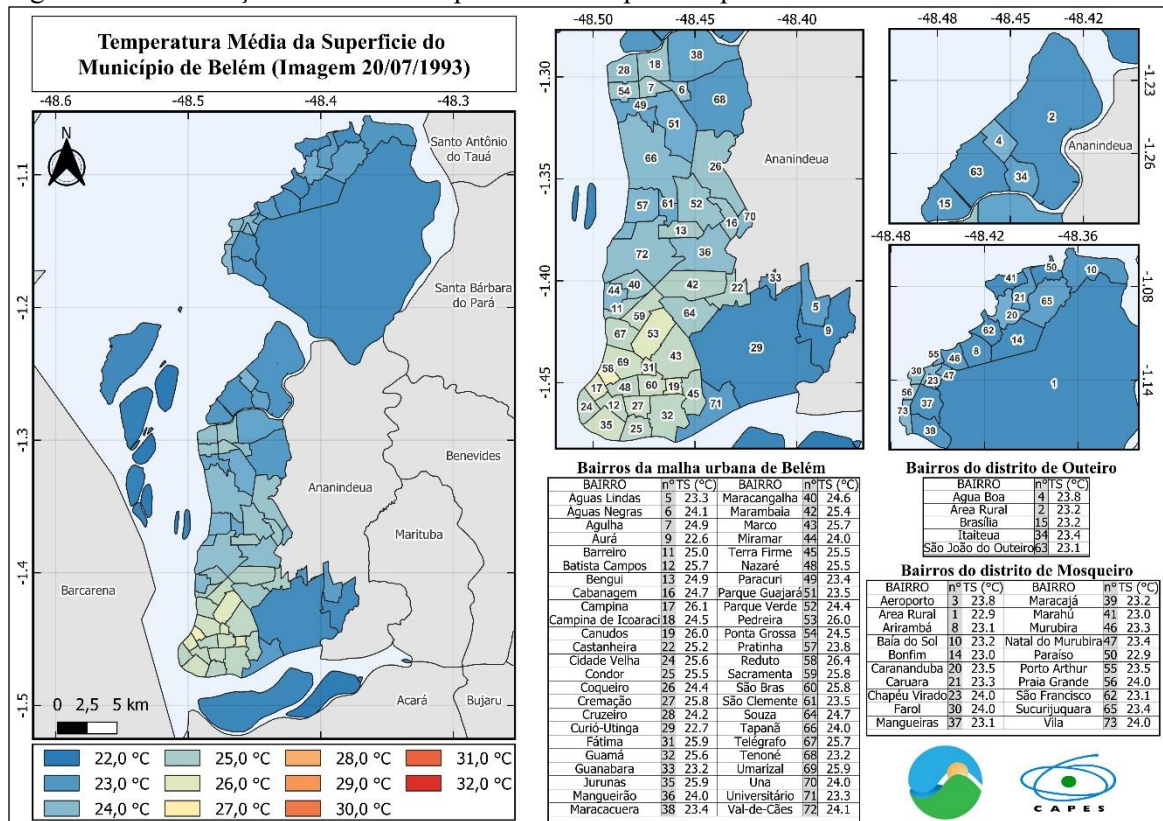
médios de TS, com variações entre 25,0 °C (bairro do Barreiro) e 26,4 °C (bairro do Reduto). Dessa forma, a amplitude térmica entre os bairros com menor e maior TS foi de 3,8 °C.

Os bairros localizados na malha urbana consolidada, caracterizados por alta densidade populacional e elevada ocupação do solo, apresentaram os maiores valores médios de TS, superiores a 25,5 °C. Destacam-se: Cidade Velha, Guamá, Batista Campos, Marco, Telégrafo, Cremação, Sacramento, São Braz, Fátima, Jurunas, Umarizal, Canudos, Pedreira, Campina e Reduto. Esses bairros apresentam grande concentração populacional, extensos quarteirões, baixa arborização e predominância de estruturas residenciais de baixa e média verticalização, fatores que contribuem para a elevação da TS.

Nos bairros de Guamá, Jurunas e Pedreira, predominam edificações horizontais com grande extensão territorial e baixa densidade de vegetação, enquanto Canudos e Reduto apresentam padrões distintos: Canudos é majoritariamente residencial, e o Reduto possui edificações verticais e áreas comerciais, o que potencializa a absorção de energia e contribui para valores mais elevados de TS.

Nos distritos insulares, Outeiro e Mosqueiro, observa-se que ambos apresentavam, em 1993, baixo grau de urbanização, evidenciado pelos valores reduzidos de TS. No distrito de Outeiro, o bairro de São João de Outeiro apresentou o menor valor médio (23,1 °C), enquanto Água Boa registrou o maior (23,8 °C). Já em Mosqueiro, os bairros do Paraíso e área rural exibiram TS de 22,9 °C, e os bairros Chapéu Virado, Farol, Praia Grande e Vila, valores próximos de 24,0 °C. Esse padrão sugere que o processo de ocupação urbana em Mosqueiro teve início antes de Outeiro, provavelmente devido ao caráter turístico e balneário da ilha, que favoreceu ocupações mais precoces nas áreas litorâneas.

Figura 17. Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 20/07/1993.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18 é apresentada a temperatura da superfície (TS) média, determinada a partir da imagem do Landsat-5 de 14 de agosto de 2008. Observa-se um aumento dos valores em relação à figura anterior (Figura 17), com TS variando entre 20,6 °C e 27,7 °C. O bairro da Pratinha apresentou o menor valor de TS, possivelmente devido à presença de nuvens ou solo úmido e exposto.

Em relação à amplitude térmica, que representa a diferença entre a temperatura máxima e mínima, o valor observado foi de 7,1 °C, possivelmente associado à maior heterogeneidade da cobertura do solo, incluindo áreas com alta densidade edificada, zonas de transição entre superfícies permeáveis e impermeáveis e regiões com cobertura vegetal.

Os bairros com valores médios superiores a 26,5 °C incluem: Cidade Velha, Jurunas, Maracangalha, Barreiro, Batista Campos, Telegrafo, Campina, Umarizal, Marco, Pedreira, São Braz, Cremação, Guamá, Reduto, Fátima, Terra Firme, Sacramento e Canudos. Esses resultados são compatíveis com o estudo de Bezerra et al. (2018), que indicou, para 2006, valores de TS entre 23 °C e 30 °C.

A maioria desses bairros apresenta características urbanísticas semelhantes: alto volume populacional, grande impermeabilização do solo, baixa cobertura vegetal e elevada densidade de construções, fatores que contribuem para a maior absorção de calor. Esses bairros estão

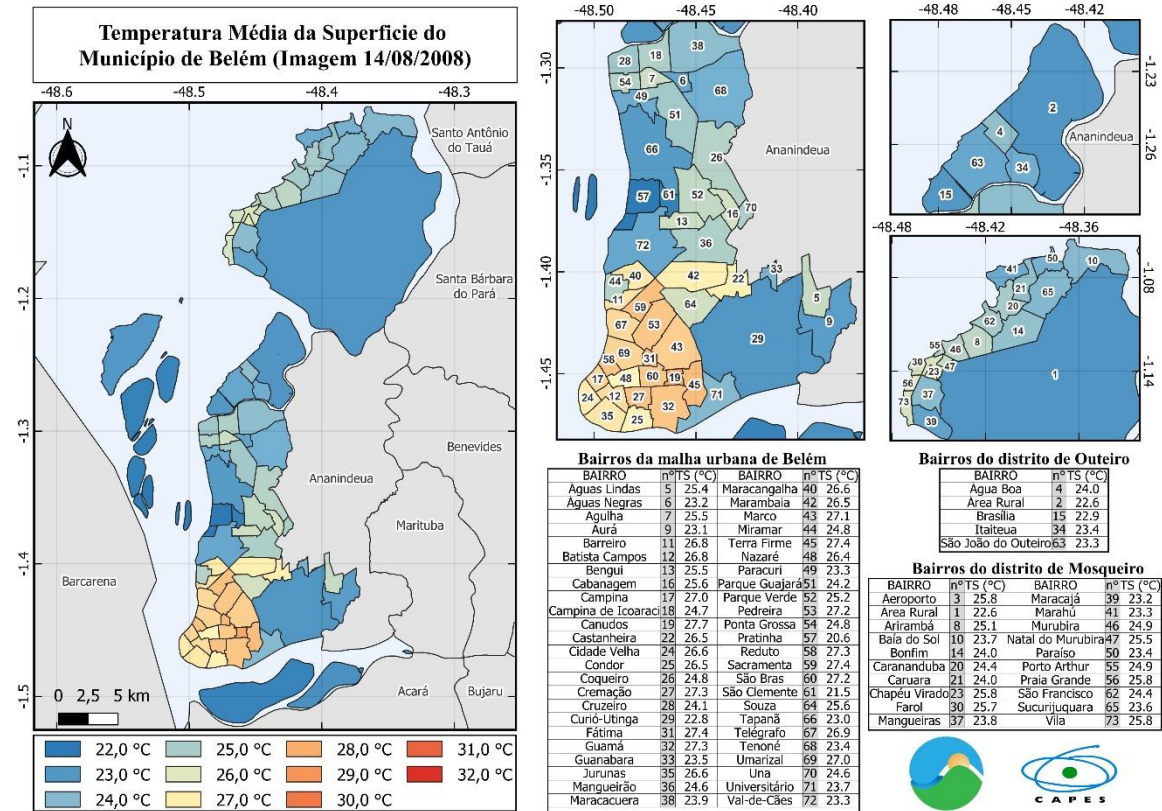
localizados em áreas urbanas consolidadas, correspondentes aos distritos de Guamá, Belém e Sacramenta, historicamente os primeiros a serem ocupados, servindo como núcleo para a expansão urbana posterior da cidade.

Os bairros que fazem fronteira com o município de Ananindeua também apresentaram aumento da TS, possivelmente devido à conurbação, ou seja, expansão urbana simultânea de Belém e Ananindeua, refletindo-se nos bairros do Castanheira, Coqueiro, Mangueirão e Una.

O distrito de Outeiro manteve valores relativamente baixos de TS em comparação com os distritos da malha urbana consolidada. Em relação à imagem de 1993, os valores permanecem “padrão”, o que demonstra que, mesmo considerando anos e meses diferentes, áreas com baixo crescimento urbano pode ser identificado e comparado para planejamento urbano. Os valores médios de TS em Outeiro variam entre 22,9 °C e 24,0 °C, evidenciando baixa densidade edificada, residências cercadas de vegetação e uma zona rural com ampla cobertura vegetal.

Por outro lado, o distrito de Mosqueiro mostra continuidade na expansão urbana e populacional, com aumento da TS nos bairros destacados na Figura 18. Como área turística praiana, a faixa litorânea apresenta maior variação de TS, entre 23,0 °C e 26,0 °C, enquanto as áreas rurais, com maior cobertura vegetal, registram 22,6 °C. Esses dados confirmam que o tipo de cobertura do solo influencia diretamente na retenção e emissão de calor, interferindo na temperatura do ambiente.

Figura 18. Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 14/08/2008.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 19, produto do satélite Landsat-8 OLI/TIRS do dia 27 de julho de 2013, observa-se um aumento nos valores médios de TS, que variam de 23,6 °C a 28,4 °C, sendo que a área rural do distrito de Mosqueiro apresentou o menor valor e o bairro da Pedreira, localizado na malha urbana de Belém, obteve o maior valor de TS. A amplitude térmica média foi de 4,8 °C, possivelmente associada à homogeneidade das características urbanas, contrastando com a amplitude térmica observada na imagem de 1993, que, embora baixa, refletia homogeneidade de cobertura vegetal e menor densidade urbana.

A análise da TS da malha urbana de Belém indica que o processo de expansão urbana e populacional, anteriormente limitado aos distritos de Guamá, Belém e Sacramento, começou a afetar novos distritos. Na Figura 19, nota-se que o crescimento urbano se expandiu para os distritos de Entroncamento, Bengui e Icoaraci, atingindo bairros que anteriormente não apresentavam valores elevados de TS.

No distrito de Icoaraci, destaca-se o aumento da TS em bairros como: Campina de Icoaraci (27,1 °C), Ponta Grossa (27,2 °C) e Agulha (27,8 °C), indicando a formação de um novo polo urbano com potencial para se tornar uma área consolidada. Além disso, os bairros que fazem fronteira com o município vizinho, como Águas Lindas (26,0 °C), Una (26,3 °C) e

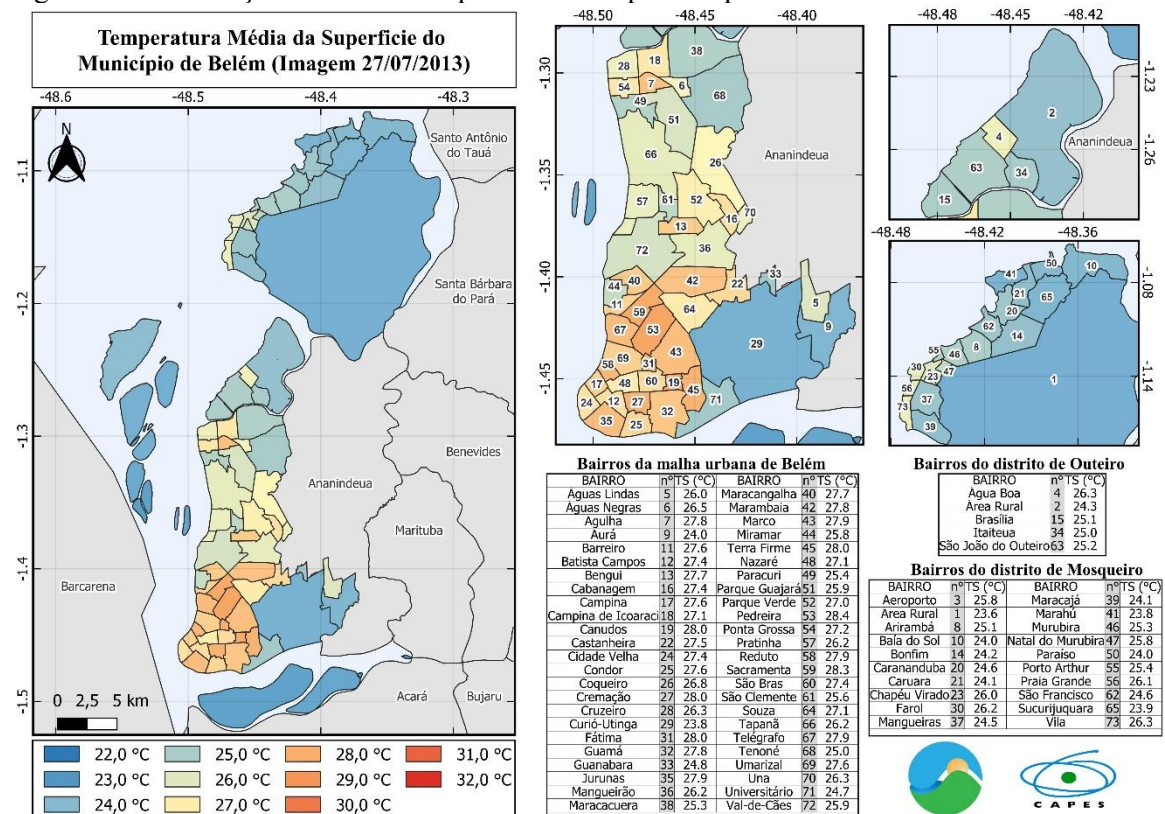
Coqueiro (26,8 °C), apresentaram intensificação da TS, provavelmente associada à conurbação mencionada anteriormente.

O bairro do Curió-Utinga, na malha urbana, mantém valores baixos de TS (23,8 °C), devido à presença de um parque estadual de preservação ambiental, que preserva características nativas e elevada cobertura vegetal. Este exemplo evidencia a importância da manutenção de áreas com vegetação na superfície para o equilíbrio térmico urbano.

No distrito de Outeiro, apenas o bairro de Água Boa apresentou TS acima de 26,0 °C (26,3 °C), representando um acréscimo de 2,3 °C em relação à imagem de 2008 (Figura 18). Esse aumento reflete alterações na cobertura do solo nesse bairro, enquanto a área rural, que também possui preservação ambiental, manteve o menor valor de TS do distrito (24,3 °C).

Quanto ao distrito de Mosqueiro, observa-se um possível equilíbrio entre desenvolvimento urbano e cobertura vegetal. Os valores médios de TS apresentaram pouca alteração em comparação com a imagem de 1993, o que pode ser explicado pela ausência de edificações verticais, ruas não totalmente impermeabilizadas e residências espaçadas com quintais e jardins. Esses fatores contribuem para o equilíbrio térmico da superfície, demonstrando o papel da vegetação e da baixa densidade urbana na mitigação do calor.

Figura 19. Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 27/07/2013.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para finalizar os resultados obtidos a partir dos produtos de sensoriamento remoto, a Figura 20 apresenta a média da TS dos bairros do município de Belém no dia 18 de agosto de 2021, obtida pelo Landsat-8, sensor OLI/TIRS.

De modo geral, observa-se temperaturas médias variando de 26,1 °C a 32,8 °C, sendo que a área rural do distrito de Mosqueiro apresentou o menor valor de TS. A amplitude térmica foi de 6,7 °C, representando a segunda maior amplitude dentre as imagens analisadas. Entretanto, diferentemente da imagem de 2008, que apresentou amplitude de 7,1 °C, a imagem de 2021 evidencia maior cobertura urbana e menor presença de vegetação, ou seja, o inverso do padrão de 2008. Esses resultados indicam que a expansão urbana ao longo do município intensificou a temperatura da superfície, corroborando o estudo de Ahmed (2018), que constatou que áreas com maior densidade urbana apresentam TS elevada.

A malha urbana de Belém apresenta, na maioria dos bairros, valores acima de 30,0 °C, seguindo um padrão semelhante às imagens do Landsat-5, porém com temperaturas mais elevadas. O bairro do Curió-Utinga mantém valores significativamente mais baixos (26,7 °C), ratificando a importância de grandes áreas com cobertura vegetal e florestal para o equilíbrio térmico.

Em contrapartida, os bairros mais populosos localizados na área urbana consolidada apresentam elevados valores de TS, destacando-se: Terra Firme, Pedreira, Guamá, Cremação, Sacramento e Canudos. Esses bairros possuem grande extensão territorial, elevado número populacional, baixa presença de áreas verdes, construções densas e desordenadas, além de planejamento urbano precário, fatores que contribuem para a intensificação da TS. Os Bairros em fase de consolidação urbana, como Campina de Icoaraci (30,8 °C) e Agulha (32,0 °C), também apresentam valores elevados de TS, demonstrando que áreas em expansão urbana sofrem efeitos térmicos semelhantes aos de áreas consolidadas.

Os bairros que fazem fronteira com o município de Ananindeua apresentam grande densidade populacional de ambos os municípios. O ordenamento urbano desorganizado, ou seja, residências e construções sem planejamento adequado, favorece a concentração de calor nessas áreas de conurbação.

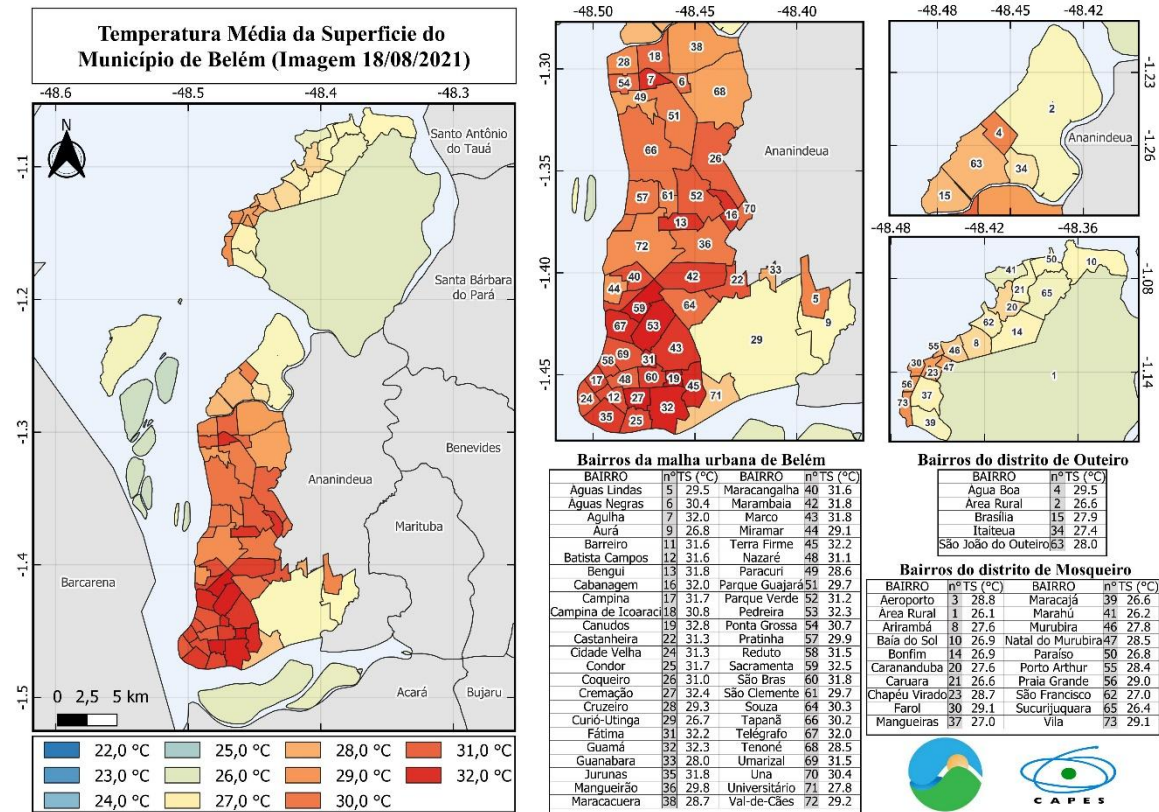
No distrito de Outeiro, observa-se crescimento da TS, com valores variando de 26,6 °C na área rural a 29,5 °C no bairro de Água Boa, indicando que este distrito ainda apresenta baixa urbanização.

No distrito de Mosqueiro, os bairros Chapéu Virado, Praia Grande, Farol e Vila continuam apresentando valores elevados de TS, entre 28,7 °C e 29,1 °C. Outros bairros, como

Murubira, Porto Arthur, Natal do Murubira e Aeroporto, mostram indícios de aumento da TS devido à alteração da cobertura do solo.

Dessa forma, é possível concluir que bairros com maior densidade populacional e maior extensão territorial tendem a apresentar intensificação dos efeitos urbanos na TS, evidenciando a forte relação entre urbanização, cobertura do solo e aumento da temperatura da superfície.

Figura 20. Distribuição média da Temperatura da Superfície por bairros. Dia 18/08/2021.



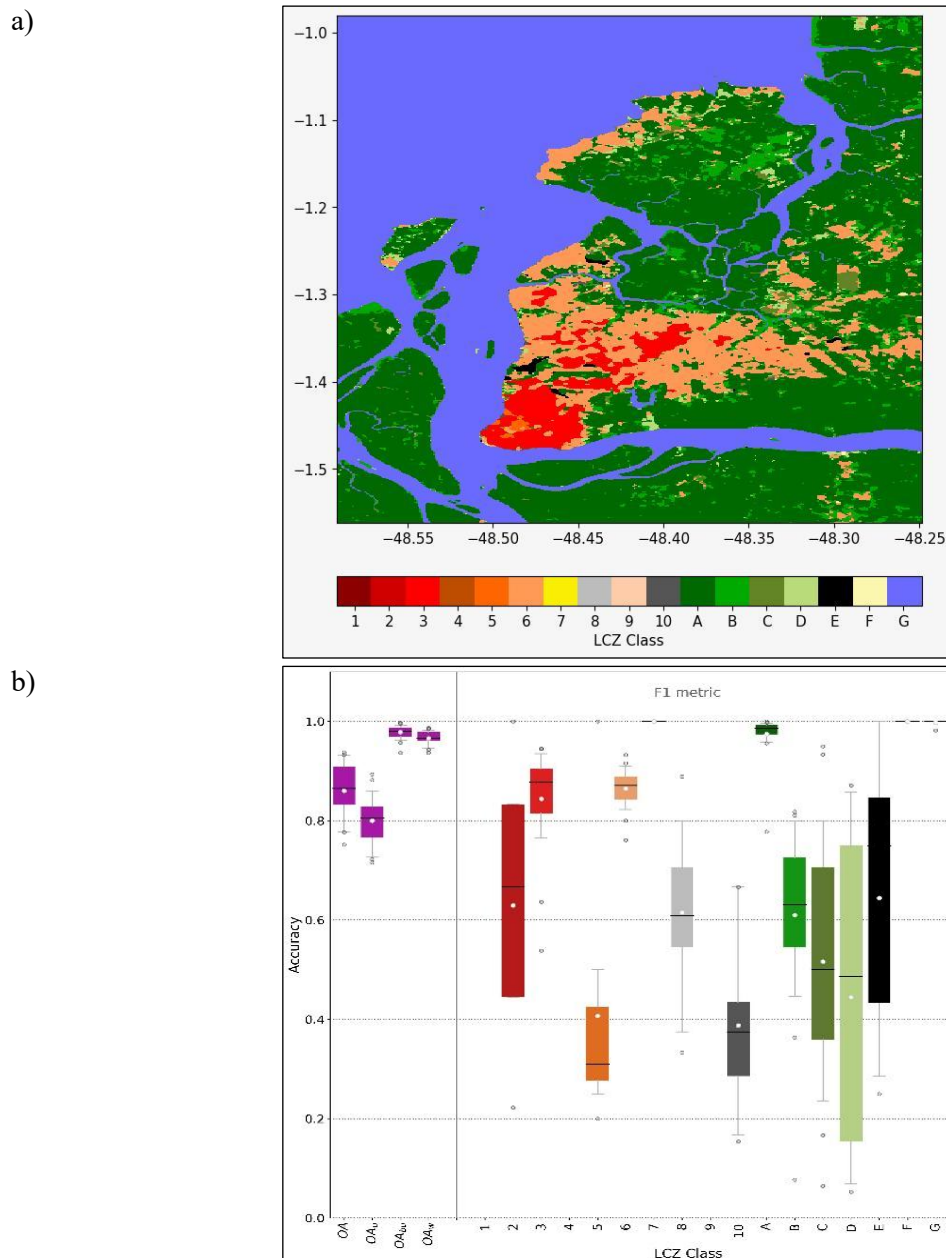
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos a partir dos produtos de sensoriamento remoto apresentados nesta pesquisa corroboram estudos anteriores de Pontes et al. (2017), Margalho et al. (2020) e Souto e Cohen (2021), que evidenciam a relação entre a expansão urbana e o aumento da temperatura da superfície (TS) no município de Belém/PA. Nos trabalhos citados, observa-se que as imagens referentes à década de 1990 apresentam menor densidade de edificações e valores mais baixos de TS, enquanto as imagens da década de 2000 revelam intensa cobertura urbanizada associada a valores elevados de TS.

5.3 Classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL)

No presente estudo, as métricas de precisão estatística apresentaram valores acima de 0,8 (ou 80% de acurácia). A precisão mais elevada foi observada na OAbu, enquanto a precisão geral (AO) apresentou média de 85%. As classes com melhor acurácia foram ZCL-F e ZCL-G, correspondentes, respectivamente, à cobertura de solo exposto/areia e à cobertura de corpo hídrico (água). A Figura 21 apresenta, de forma detalhada, a classificação das ZCLs (a) e os níveis de acurácia (b) para todas as classes obtidas por meio da interface LCZ Generator para o município de Belém/PA.

Figura 21. Classificação das classes geradas pela interface *LCZ Generator* (a) e as métricas de precisão (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

No próximo resultado é apresentada a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) para o município de Belém/PA (Figura 22), realizada por meio da interface LCZ Generator, conforme o método proposto por Demuzere et al. (2021), referente ao ano de 2022.

Na Figura 22A, observa-se a distribuição espacial dos tipos de construção e de cobertura do solo. Destaca-se que os distritos de Outeiro e Mosqueiro apresentam predominantemente duas classes de ZCL: ZCL-6, referente a construções abertas de baixa elevação, e ZCL-A, que indica cobertura vegetal arbórea espaçada. Esses resultados demonstram que ambos os distritos ainda estão em processo de expansão urbana. Entre eles, o distrito de Outeiro, devido à maior proximidade com a malha urbana de Belém, provavelmente apresentará um crescimento mais acelerado nos próximos anos. Já em Mosqueiro, a predominância de vegetação (ZCL-A e ZCL-B) sugere que a cobertura natural pode sofrer redução com o tempo, caso a urbanização avance.

A malha urbana central, composta pelos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta, apresenta grande heterogeneidade em termos de ZCL. Nesses distritos predominam as classes 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), indicando alta densidade de edificações, especialmente no caso da ZCL-2, presente apenas no distrito de Belém. Esses distritos representam áreas urbanas consolidadas, com menor espaço disponível para expansão horizontal, concentrando as principais construções da cidade.

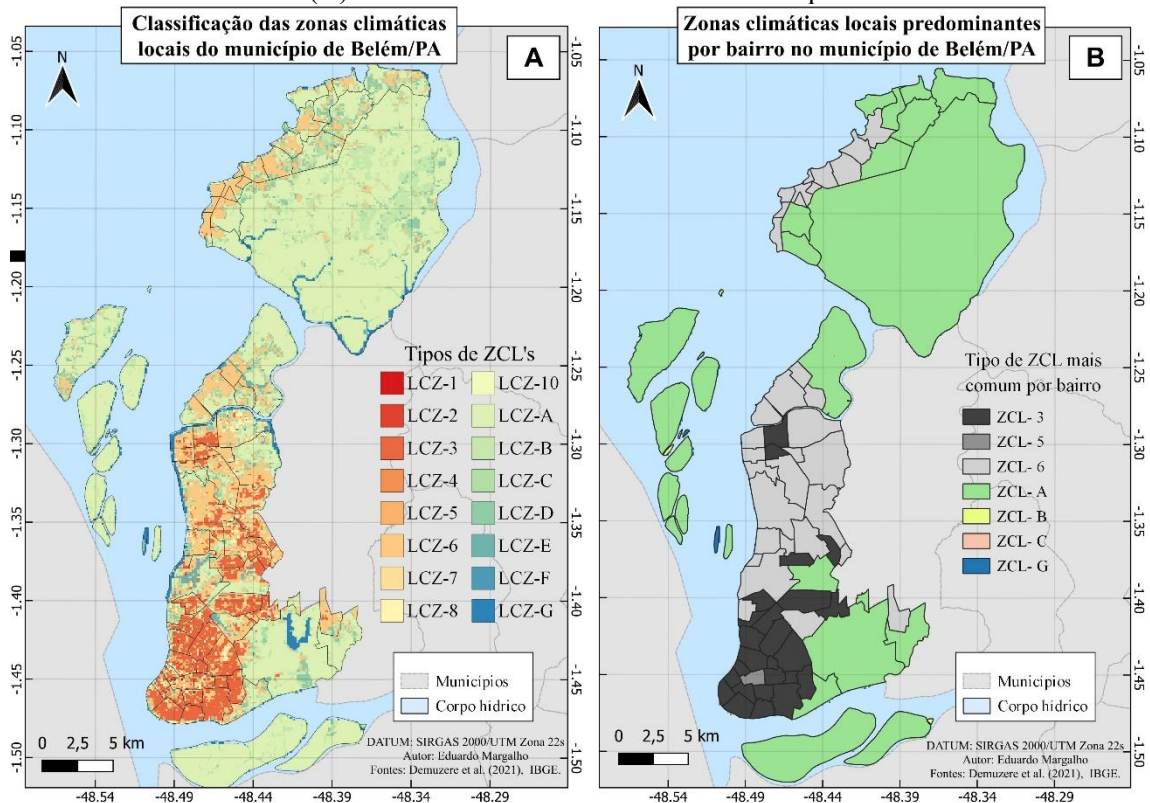
Nos distritos de Entroncamento, Bengui e Icoaraci, observa-se maior diversidade de classes de ZCL, incluindo: ZCL-3, ZCL-4, ZCL-5, ZCL-6, ZCL-7, ZCL-8, ZCL-10, e classes de cobertura vegetal como ZCL-A, ZCL-B, ZCL-C e ZCL-F. Essa diversidade indica que esses distritos possuem construções residenciais variadas, áreas com baixa densidade de edificações, presença significativa de vegetação e setores ainda em expansão urbana. Esses bairros foram historicamente utilizados como áreas de crescimento da cidade, funcionando como alternativas de expansão para a malha urbana consolidada.

A Figura 22B detalha as ZCL predominantes por bairro. Entre as classes de edificações, as mais frequentes são ZCL-3 e ZCL-6, enquanto a cobertura vegetal predominante é ZCL-A. Nos distritos centrais, como Guamá, Belém e Sacramenta, a ZCL-3 caracteriza áreas densamente construídas, enquanto nos distritos periféricos, como Bengui e Icoaraci, a ZCL-6 indica maior espaçamento entre construções e presença de vegetação. Já em Outeiro e Mosqueiro, a cobertura vegetal (ZCL-A) é predominante, evidenciando que a urbanização ainda é incipiente nessas regiões.

De modo geral, Belém apresenta uma combinação de áreas urbanas consolidadas com forte densidade de edificações, áreas em expansão urbana e regiões com elevada cobertura

vegetal. Os distritos centrais (Guamá, Belém e Sacramento) concentram os padrões mais intensos de urbanização, enquanto os distritos periféricos (Bengui, Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro) apresentam diversidade de ocupação e ainda preservam significativa cobertura natural. Esses resultados destacam o equilíbrio variável entre expansão urbana e manutenção da vegetação, fornecendo subsídios importantes para o planejamento urbano sustentável da cidade.

Figura 22. Classificação das zonas climáticas locais do município de Belém/PA, distribuição das Zonas Climáticas Locais (A) e Zonas Climáticas Locais com maior predominância.



. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Mapeamento térmico da malha urbana de Belém/PA

O mapeamento térmico foi obtido a partir do transecto móvel, realizado exclusivamente na malha urbana de Belém, excluindo as pequenas ilhas e os distritos de Outeiro e Mosqueiro devido a limitações de acesso e ao tempo disponível para captação das variáveis meteorológicas. As medições de temperatura do ar e umidade relativa ocorreram no período noturno, entre 20:30 e 21:30 horas, garantindo maior estabilidade térmica e minimizando interferências de variações diurnas. O procedimento consistiu na geração de pontos amostrais, 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.

Os resultados estão apresentados em duas figuras: a Figura 23A, que mostra a interpolação da temperatura do ar, e a Figura 23B, que apresenta os valores médios por bairro. Na Figura 23A, observa-se que os bairros localizados nos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta registram as maiores temperaturas, variando de 27,8 °C a 29,3 °C, sendo o bairro da Maracangalha o de menor valor. Os bairros do distrito do Entroncamento apresentaram variação intermediária, entre 27,5 °C e 28,5 °C, com destaque para o bairro do Curió-Utinga, que abriga uma grande área de vegetação e um parque de preservação, o que pode ter superestimado os valores interpolados nas áreas verdes. Já nos distritos do Bengui e Icoaraci, os bairros apresentaram os menores valores de temperatura, variando entre 26,4 °C e 28,3 °C, com os valores mais baixos concentrados nos bairros da Pratinha, Tapanã e Parque Guajará, enquanto os mais altos se encontraram em Bengui, Cabanagem, Mangueirão, Parque Verde e Una.

A Figura 23B evidencia três padrões de temperatura média nos bairros da malha urbana. O primeiro padrão apresenta valores acima de 28,0 °C, concentrados nos bairros de Batista Campos, Campina, Reduto e Fátima, situados nos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta, excetuando Marambaia e Souza, localizados no Entroncamento. O segundo padrão abrange bairros com valores médios entre 27,1 °C e 28,0 °C, como Val-de-Cães (27,9 °C) e São Clemente (27,1 °C), situados nos distritos do Entroncamento e Bengui. O terceiro padrão apresenta os menores valores médios, entre 26,5 °C e 27,1 °C, concentrados nos bairros de Agulha, Águas Negras e Parque Guajará, pertencentes aos distritos de Bengui e Icoaraci. Esses padrões refletem as diferentes etapas do processo de urbanização em Belém, especialmente no que diz respeito à densidade de construções, presença de áreas verdes e adensamento urbano, sendo esses fatores determinantes para as variações térmicas observadas.

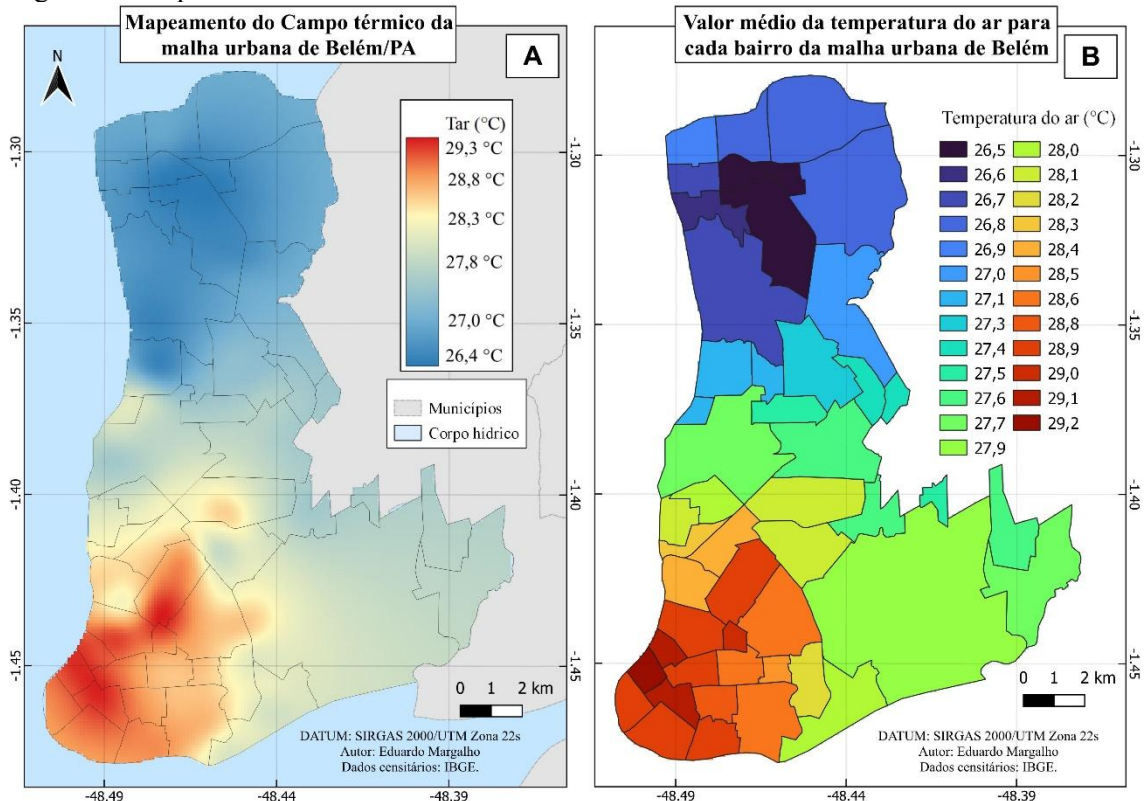
Ao relacionar os resultados do transecto com as Zonas Climáticas Locais (ZCL) previamente obtidas, verifica-se que os bairros com maiores temperaturas médias estão nos distritos mais densamente construídos, predominando a ZCL-3 (compacta de baixa elevação). Por outro lado, bairros com predominância da ZCL-6 (aberta de baixa elevação) registraram menores valores de temperatura do ar. Estes resultados corroboram Tavares et al. (2021), que evidenciam que áreas com características urbanas semelhantes tendem a apresentar temperaturas elevadas, enquanto regiões vizinhas com maior cobertura vegetal ou edificações

menos densas apresentam temperaturas mais baixas. Observa-se ainda que bairros com menor densidade de construções ou vegetação, como Nazaré (ZCL-5), podem apresentar temperaturas mais elevadas devido à influência térmica de bairros vizinhos mais densamente urbanizados.

Embora os transectos nos demais distritos não tenham sido realizados por questões de segurança e tempo, os resultados da malha urbana permitem inferir que os distritos de Outeiro e Mosqueiro apresentariam temperaturas mais baixas, considerando a maior presença de vegetação (ZCL-A) e menor densidade construída (ZCL-6). Além disso, os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) confirmam que, nos horários das medições (21:00 h, horário local), não houve ocorrência de chuva, com temperaturas registradas de 25,6 °C (11/10/2022), 26,0 °C (12/10/2022) e 27,3 °C (13/11/2022), reforçando a consistência dos dados obtidos pelo transecto móvel.

Portanto, os resultados obtidos evidenciam que a distribuição da temperatura do ar na malha urbana de Belém está fortemente associada à densidade construtiva e ao tipo de cobertura do solo, sendo possível observar diferenças térmicas significativas entre bairros com elevada urbanização e aqueles com maior presença de vegetação. Estes dados reforçam a importância do planejamento urbano e da preservação de áreas verdes para mitigar os efeitos de ilhas de calor e equilibrar a temperatura superficial nas cidades.

Figura 23. Mapeamento térmico da Malha urbana de Belém/PA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Relação das Zonas Climáticas Locais e o mapeamento térmico da malha urbana de Belém/PA.

No presente tópico, com base nos dados apresentados no Quadro 1, são discutidas as relações entre o campo térmico — considerando tanto a temperatura da superfície (TS) quanto a temperatura do ar — e os diferentes tipos de Zonas Climáticas Locais (ZCLs). O estudo do comportamento térmico urbano tem sido foco de diversas pesquisas em climatologia urbana, especialmente em cidades tropicais, onde o processo de urbanização ocorre de forma acelerada e muitas vezes desordenada, impactando diretamente o microclima local.

A análise do Quadro 1 evidencia uma relação direta entre os tipos de ZCLs e a variabilidade noturna da temperatura do ar. Os dados obtidos por meio de transectos móveis revelam significativa heterogeneidade espacial, refletindo diferenças nas tipologias construtivas, altura das edificações, densidade urbana e características de cobertura do solo. Essa heterogeneidade térmica está intrinsecamente ligada à capacidade diferenciada das superfícies urbanas em absorver, armazenar e liberar energia térmica. Durante o período noturno, especialmente entre o final da tarde e o início da madrugada, observa-se a liberação gradual dessa energia acumulada, intensificando o fenômeno da ilha de calor urbano (Oke, 1982; Rizwan et al., 2008).

A evolução da TS por bairro nos últimos 30 anos revela uma tendência preocupante de aumento térmico. Em 1993, a maior parte dos bairros apresentava temperaturas superficiais médias entre 24,0 °C e 26,5 °C; em 2021, esses valores passaram para a faixa de 30,0 °C a 32,0 °C, evidenciando um incremento médio superior a 5 °C. Entre os bairros com maiores diferenças térmicas ($\Delta T \geq 7$ °C) destacam-se Agulha (7,1 °C), Benguí (7,0 °C), Cabanagem (7,3 °C) e Maracangalha (7,0 °C). Já os bairros com menores diferenças ($\Delta T \leq 5$ °C) foram Aurá (4,2 °C), Curió-Utinga (4,0 °C), Guanabara (4,8 °C) e Universitário (4,5 °C). Essa variação está relacionada principalmente à predominância de áreas vegetadas nos bairros com menores incrementos térmicos, reforçando o papel mitigador da vegetação, enquanto bairros densamente construídos (ZCL-3) apresentaram os maiores aumentos de TS, como evidenciado em estudos de Paulino e Rodrigues (2024) e Bezerra et al. (2018).

A substituição de áreas verdes por superfícies impermeáveis, como concreto e asfalto, reduz a infiltração de água, altera a capacidade de absorção e armazenamento térmico do solo e impacta os fluxos de calor sensível e latente, favorecendo o aquecimento local. A diminuição da cobertura vegetal também reduz os processos de evapotranspiração, essenciais para o resfriamento natural do ambiente (Rizwan et al., 2008; Wai et al., 2023). Nesse contexto, observa-se que áreas com construções densas e compactas (ZCL-3 e ZCL-5) concentram os






maiores valores de TS. Em 2021, dos 27 bairros com TS igual ou superior a 31,0 °C, 20 estavam localizados nos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta, destacando-se Barreiro, Batista Campos, Campina, Canudos, Cidade Velha, Condor, Cremação, Fátima, Guamá, Jurunas, Maracangalha, Marco, Terra Firme, Nazaré, Pedreira, Reduto, Sacramenta, São Brás, Telégrafo e Umarizal. Todos são classificados como ZCL-3, exceto Nazaré, classificado como ZCL-5. O bairro de Canudos apresentou o maior valor médio de TS, atingindo 32,8 °C, confirmando a relação entre densidade construtiva e elevação térmica (Paulino et al., 2024).






Os valores de temperatura do ar obtidos pelos transectos móveis confirmam a influência da configuração espacial urbana. Bairros com cobertura predominante do tipo ZCL-6 apresentaram temperaturas médias entre 26,5 °C e 27,7 °C, com exceção de Miramar e Souza, que registraram 28,1 °C devido à influência térmica de bairros adjacentes mais densos (ZCL-3), configurando o efeito de borda, documentado também em Fortaleza (Ribeiro et al., 2023). Já os bairros classificados como ZCL-3 apresentaram temperaturas do ar variando entre 27,5 °C e 29,2 °C, com exceção de Agulha (26,5 °C) e Campina de Icoaraci (26,8 °C), próximos aos valores de bairros ZCL-6, evidenciando a importância das áreas verdes vizinhas no controle microclimático (Cardoso & Amorim, 2018).






Bairros com predominância de ZCL-A, como Curió-Utinga e Aurá, apresentaram os menores valores médios de TS em 2021 (26,7 °C e 26,8 °C, respectivamente). Estas áreas, com grandes fragmentos vegetados e zonas de preservação, atuam como reguladores térmicos, promovendo resfriamento por sombreamento e evapotranspiração (Nunes et al., 2017; Barata et al., 2024). Estudos recentes reforçam este papel: Paulino et al. (2024) mostraram que a substituição da vegetação no bairro Jurunas aumentou significativamente a TS, enquanto Bezerra et al. (2018) confirmaram a relação inversa entre NDVI e TS em Belém. Barata et al. (2024) evidenciaram que áreas com maior cobertura vegetal possuem maior capacidade de dissipação de calor, reforçando o potencial das soluções baseadas na natureza para mitigar as ilhas de calor urbanas.






Assim, a análise integrada do campo térmico urbano evidencia que os padrões de uso e ocupação do solo, representados pelas ZCLs, influenciam de forma determinante a distribuição espacial da temperatura da superfície e do ar. A manutenção e recuperação de áreas vegetadas, a implementação de corredores verdes, políticas de incentivo à arborização urbana e o controle do adensamento desordenado surgem como medidas urgentes para a mitigação das ilhas de calor, com impactos diretos na qualidade de vida e na saúde pública, conforme evidenciado por estudos nacionais e internacionais (Aboulnaga et al., 2024).






Quadro 1. Valores obtidos de Temperatura do ar (Transecto), da Temperatura da superfície e das zonas climáticas locais para cada bairro da malha urbana do município de Belém.






Bairro	Temperatura do ar (°C)	Temperatura da superfície (°C)				ZCL Predominante
Águas Lindas 	27,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,3	25,4	26,0	29,5	
Águas Negras 	26,5	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,3	25,4	26,0	29,5	
Agulha 	26,5	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		24,9	25,5	27,8	32,0	
Aurá 	27,7	1993	2008	2013	2021	ZCL-A
		22,6	23,1	24,0	26,8	
Barreiro 	28,3	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,0	26,8	27,6	31,6	






Batista Campos 	29,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,7	26,8	27,4	31,6	
Bengui 	27,5	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		24,9	25,5	27,7	31,8	
Cabanagem 	27,4	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,7	25,6	27,4	32,0	
Campina 	29,2	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		26,1	27,0	27,6	31,7	
Campina de Icoaraci 	26,8	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		24,5	24,7	27,1	30,8	






<p>Canudos</p> 	28,5	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		26,0	27,7	28,0	32,8	
<p>Castanheira</p> 	27,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,2	26,5	27,5	31,3	
<p>Cidade Velha</p> 	28,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,6	26,6	27,4	31,3	
<p>Condor</p> 	28,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,5	26,5	27,6	31,7	
<p>Coqueiro</p> 	27,0	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,4	24,8	26,8	31,0	






<p>Cremação</p> 	28,8	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,8	27,3	28,0	32,4	
<p>Cruzeiro</p> 	26,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,2	24,1	26,3	29,3	
<p>Curió Utinga</p> 	27,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-A
		22,7	22,8	23,8	26,7	
<p>Fátima</p> 	29,0	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,9	27,4	28,0	32,2	
<p>Guamá</p> 	28,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,6	27,3	27,8	32,3	




Guanabara 	27,5	1993	2008	2013	2021	ZCL-A
		23,2	23,5	24,8	28,0	
Jurunas 	28,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,9	26,6	27,9	31,8	
Mangueirão 	27,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-A
		24,0	24,6	26,2	29,8	
Maracacuera 	26,8	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,4	23,9	25,3	28,7	
Maracangalha 	28,0	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		24,6	26,6	27,7	31,6	

<p>Marambaia</p> 	28,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,4	26,5	27,8	31,8	
<p>Marco</p> 	28,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,7	27,1	27,9	31,8	
<p>Miramar</p> 	28,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,0	24,8	25,8	29,1	
<p>Montese/Terra Firme</p> 	28,2	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,5	27,4	28,0	32,2	
<p>Nazaré</p> 	28,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-5
		25,5	26,4	27,1	31,1	

Paracuri 	26,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,4	23,3	25,4	28,6	
Parque Guajará 	26,5	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,5	24,2	25,9	29,7	
Parque Verde 	27,3	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,4	25,2	27,0	31,2	
Pedreira 	28,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		26,0	27,2	28,4	32,3	
Ponta Grossa 	26,7	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,5	24,8	27,2	30,7	

Pratinha 	27,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,8	20,6	26,2	29,9	
Reduto 	29,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		26,4	27,3	27,9	31,5	
Sacramento 	28,4	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,8	27,4	28,3	32,5	
São Brás 	28,6	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,8	27,2	27,4	31,8	
São Clemente 	27,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,5	21,5	25,6	29,7	

<p>Souza</p> 	28,1	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,7	25,6	27,1	30,3	
<p>Tapanã</p> 	26,7	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,0	23,0	26,2	30,2	
<p>Telégrafo</p> 	28,4	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,7	26,9	27,9	32,0	
<p>Tenoné</p> 	26,8	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		23,2	23,4	25,0	28,5	
<p>Umarizal</p> 	28,9	1993	2008	2013	2021	ZCL-3
		25,9	27,0	27,6	31,5	

<p>Una</p> 	27,4	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,0	24,6	26,3	30,4	
<p>Universitário</p> 	28,0	1993	2008	2013	2021	ZCL-A
		23,3	23,7	24,7	27,8	
<p>Val-de-Cães</p> 	27,7	1993	2008	2013	2021	ZCL-6
		24,1	23,3	25,9	29,2	

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Análise do índice de desconforto de Thom (IDT)

5.6.1 Análise climatológica mensal do IDT

Na Figura 24 apresenta-se o gráfico de tendência temporal do Índice de Desconforto Térmico (IDT) para o município de Belém (PA), evidenciando um comportamento crescente nas últimas décadas. Entre os anos de 1970 e meados da década de 1990, a média do IDT manteve-se em torno de 25,9 °C, enquadrando-se na faixa classificada como parcialmente confortável ($24\text{ °C} \leq \text{IDT} \leq 26\text{ °C}$). Entretanto, a partir do final dos anos 1990 até abril de 2022, a média elevou-se para 26,5 °C, situando-se na categoria de desconfortável ($26\text{ °C} < \text{IDT} < 28\text{ °C}$), de acordo com a classificação de conforto térmico adotada.

A detecção estatística dessa mudança foi realizada por meio do teste de Pettitt, amplamente empregado para identificar pontos de ruptura em séries temporais. Nesse contexto, a hipótese nula (H_0) de homogeneidade foi rejeitada, sendo aceita a hipótese alternativa (H_1),

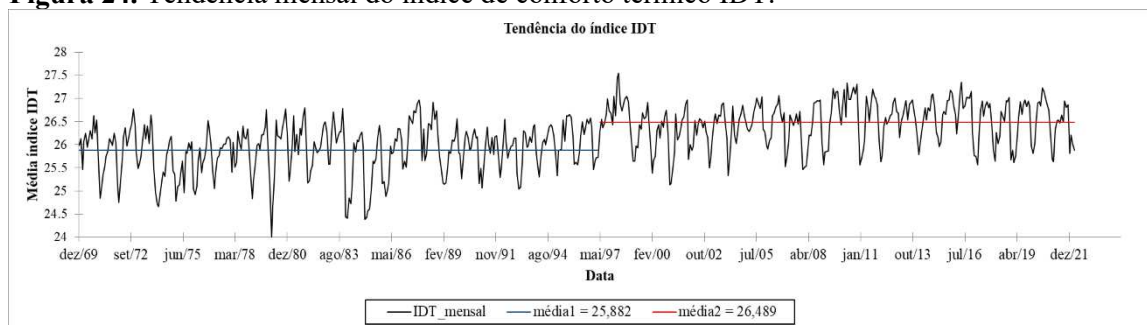
indicando a presença de uma mudança significativa na média do índice. O ponto crítico da ruptura foi identificado em abril de 1997, sugerindo o início de um novo regime térmico na série histórica.

Essa mudança de padrão está diretamente relacionada ao acelerado processo de urbanização observado em Belém a partir da década de 1990, caracterizado pela intensificação do adensamento construtivo, substituição de áreas verdes por superfícies impermeáveis e expansão desordenada dos bairros. Esses fatores contribuem para o agravamento do fenômeno das ilhas de calor urbanas, aumentando a retenção de calor nas superfícies e elevando as temperaturas médias, como evidenciado em estudos recentes (Souza et al., 2020; Rodrigues, 2024).

Adicionalmente, o crescimento populacional e a expansão horizontal sem planejamento adequado intensificam a modificação do balanço energético urbano, resultando em maiores amplitudes térmicas e aumento do desconforto para a população (Antonucci et al., 2022). A relação entre urbanização e elevação do desconforto térmico já foi amplamente documentada na região Norte, evidenciando também a vulnerabilidade socioambiental associada (Costa, 1998; Raiol et al., 2024).

Na Tabela 10 são apresentadas as estatísticas descritivas referentes ao teste de Pettitt, incluindo o valor do estatístico de ruptura, o mês de ocorrência da mudança e as médias do IDT antes e após o ponto crítico. Esses resultados reforçam a necessidade de medidas integradas de planejamento urbano e mitigação climática, com ênfase na preservação e ampliação de áreas verdes, incentivo à arborização e promoção de soluções baseadas na natureza, visando reduzir os impactos das mudanças microclimáticas urbanas e melhorar as condições de habitabilidade no município.

Figura 24. Tendência mensal do índice de conforto térmico IDT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10. Dados do teste de Pettitt do índice IDT.

Ruptura/quebra da média	Abril/1997
p-valor	0,0001
Nível de significância	0,05

5.6.2 Análise climatológica horária do IDT

Neste tópico, analisa-se a tendência do Índice de Desconforto Térmico (IDT) para o período noturno, correspondente ao horário de 00 UTC (21:00h no horário oficial de Brasília). A Figura 25 apresenta a evolução temporal do IDT noturno, evidenciando uma tendência crescente ao longo das últimas décadas. Observa-se um aumento gradual dos valores médios do índice, com destaque para uma ruptura estatística significativa identificada em setembro de 1994. Antes desse ponto crítico, a média do IDT situava-se em 24,5 °C, classificada como parcialmente confortável ($24\text{ °C} \leq \text{IDT} \leq 26\text{ °C}$). Após a ruptura, a média elevou-se para 25,1 °C, mantendo-se na mesma faixa de conforto, porém sinalizando uma degradação gradual das condições térmicas.

A aplicação do teste de Pettitt confirmou a existência dessa mudança de regime na série histórica, uma vez que a hipótese nula (H_0) de homogeneidade foi rejeitada, evidenciando a presença de uma quebra significativa na média. Esse resultado indica uma modificação estrutural nas condições noturnas, possivelmente associada às alterações no uso e cobertura do solo decorrentes do processo de urbanização e da intensificação das atividades antrópicas na cidade.

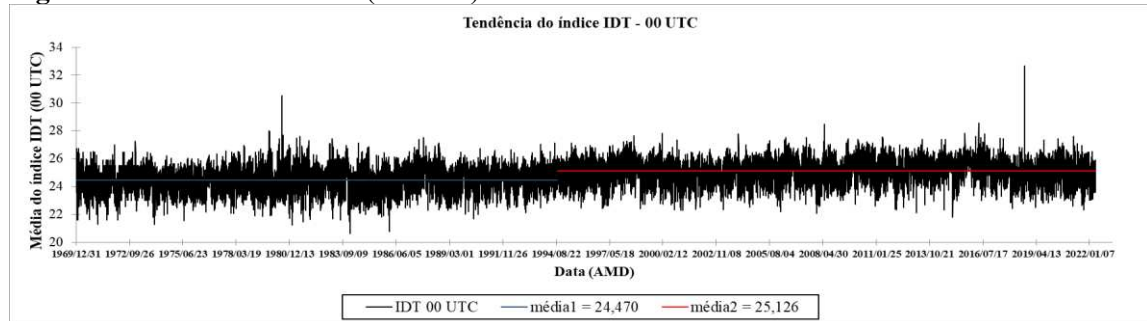
O aumento do IDT noturno pode ser atribuído, em grande parte, ao fenômeno das ilhas de calor urbanas, nas quais o calor acumulado durante o dia em superfícies impermeáveis, como concreto e asfalto, é liberado gradualmente à noite. Essa dinâmica reduz a eficiência do resfriamento natural noturno, dificultando a estabilização de temperaturas mais amenas e aumentando o desconforto térmico (Souza, 2012; Raiol et al., 2024).

Embora o nível geral de desconforto tenha permanecido classificado como parcialmente confortável, o acréscimo de 0,6 °C na média evidencia um agravamento progressivo das condições microclimáticas, com potenciais impactos na qualidade de vida, especialmente para grupos mais vulneráveis, como crianças e idosos.

Na Tabela 11, são apresentadas as estatísticas descritivas do teste de Pettitt aplicado à série noturna, incluindo o valor do estatístico de ruptura, a data exata da mudança e os valores médios antes e após o ponto crítico. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à mitigação térmica urbana, como preservação e ampliação de áreas verdes, implementação de infraestrutura verde e incentivo ao uso de superfícies permeáveis, medidas

essenciais para reduzir a intensidade das ilhas de calor e promover maior conforto térmico durante o período noturno.

Figura 25. Tendência horária (00 UTC) do índice de conforto térmico IDT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11. Dados do teste de Pettitt do índice IDT no horário de 00 UTC.

Ruptura/quebra da média	09/09/1994
p-valor	0,0001
Nível de significância	0,05

5.6.3 Análise do IDT a partir dos dados do transecto móvel

A partir dos dados obtidos por meio do transecto móvel, foi possível analisar de forma detalhada a distribuição espacial do Índice de Desconforto Térmico (IDT) na malha urbana de Belém, conforme ilustrado na Figura 26. Os resultados indicam que os bairros localizados nos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta registram os maiores valores de IDT, variando entre 26,6 °C e 27,3 °C, configurando um cenário de desconforto térmico significativo para a população. Este fenômeno está intimamente associado à alta densidade construtiva, adensamento urbano e substituição de superfícies permeáveis por áreas impermeabilizadas, como concreto, asfalto e edificações, bem como à redução da cobertura vegetal urbana, fatores que potencializam a absorção e retenção de calor acumulado durante o dia (Costa, 1998).

O intenso processo de urbanização observado nestes distritos tem caráter desordenado, muitas vezes resultando em expansão espacial sem planejamento adequado. Isso provoca a fragmentação das áreas urbanas, a redução da infraestrutura verde e limita a presença de espaços permeáveis, ampliando os impactos negativos sobre o microclima urbano. Antonucci et al. (2022) destacam que, na Região Metropolitana de Belém, a urbanização descontrolada intensifica o efeito das ilhas de calor urbanas, caracterizado pelo aumento sistemático da temperatura em áreas densamente edificadas em comparação com regiões rurais ou vegetadas próximas. Este efeito se torna ainda mais perceptível em bairros periféricos ou áreas de

ocupação irregular, nos quais a infraestrutura urbana é precária e a cobertura vegetal é insuficiente, aumentando a vulnerabilidade térmica da população.

A presença de vegetação urbana desempenha papel essencial na regulação microclimática, promovendo resfriamento por sombreamento e evapotranspiração, além de contribuir para a moderação da temperatura do ar e manutenção da umidade relativa (Costa et al., 2016). Nos distritos do Bengui e Icoaraci, os valores médios de IDT foram menores, variando entre 25,5 °C e 26,6 °C, sugerindo um ambiente térmico mais confortável. Essas regiões se destacam por possuírem maior proporção de áreas verdes, vegetação arbórea e proximidade a corpos hídricos, como manguezais, igarapés e pequenas lagoas, que funcionam como elementos mitigadores térmicos naturais. Tais áreas são frequentemente denominadas “ilhas de frescor”, capazes de reduzir a intensidade do desconforto térmico mesmo em regiões urbanizadas adjacentes.

O distrito do Entroncamento apresenta valores intermediários de IDT, entre 26,2 °C e 26,7 °C, caracterizando-o como uma área de transição térmica entre zonas mais e menos urbanizadas. Rodrigues (2024) evidencia que locais com mosaicos diversificados de uso e ocupação do solo, onde coexistem áreas construídas e vegetação residual, tendem a exibir microclimas variados. Essa heterogeneidade espacial reflete a complexidade da interação entre processos urbanos e naturais, indicando que a configuração espacial e a conectividade de áreas verdes são determinantes na mitigação das temperaturas elevadas.

A análise detalhada das variáveis meteorológicas coletadas revelou temperaturas médias do ar de 28,0 °C, variando entre 26,4 °C e 29,3 °C, com umidade relativa do ar entre 73,3% e 86,7%, e IDT oscilando de 25,5 °C a 27,3 °C, média de 26,5 °C. De acordo com Costa (1998), valores médios de temperatura do ar superiores a 26 °C já configuram níveis de desconforto térmico capazes de comprometer a saúde e o bem-estar da população. Os efeitos incluem sensação de abafamento, aumento da carga térmica corporal, maior suscetibilidade a problemas respiratórios e cardiovasculares, e impactos mais significativos sobre grupos sensíveis, como crianças e idosos.

Observa-se ainda que a heterogeneidade do IDT está relacionada com a distribuição das Zonas Climáticas Locais (ZCLs). Os bairros com predominância das ZCLs mais densas, como ZCL-3 (compacta de baixa elevação) e ZCL-5 (aberta de média elevação), correspondem às áreas com maior adensamento construtivo e registram os maiores valores de IDT. Em contrapartida, bairros com predomínio da ZCL-6 (aberta de baixa elevação) ou ZCL-A (vegetação arbórea densa) apresentaram temperaturas mais amenas, reforçando o papel

mitigador da vegetação urbana e da menor densidade construtiva na regulação microclimática (Paulino et al., 2024; Tavares et al., 2021).

Nos distritos Bengui e Icoaraci, a presença significativa de vegetação e corpos d'água não apenas reduz a temperatura do ar, mas também melhora a umidade relativa, criando microclimas mais confortáveis, mesmo quando áreas vizinhas apresentam maior densidade de construções. Esse efeito de mitigação é menos perceptível em bairros como Miramar e Souza, onde a proximidade de zonas densamente urbanizadas (ZCL-3) gera o efeito de borda, elevando as temperaturas mesmo em áreas parcialmente vegetadas, fenômeno já documentado em outras cidades tropicais, como Fortaleza (Ribeiro et al., 2023).

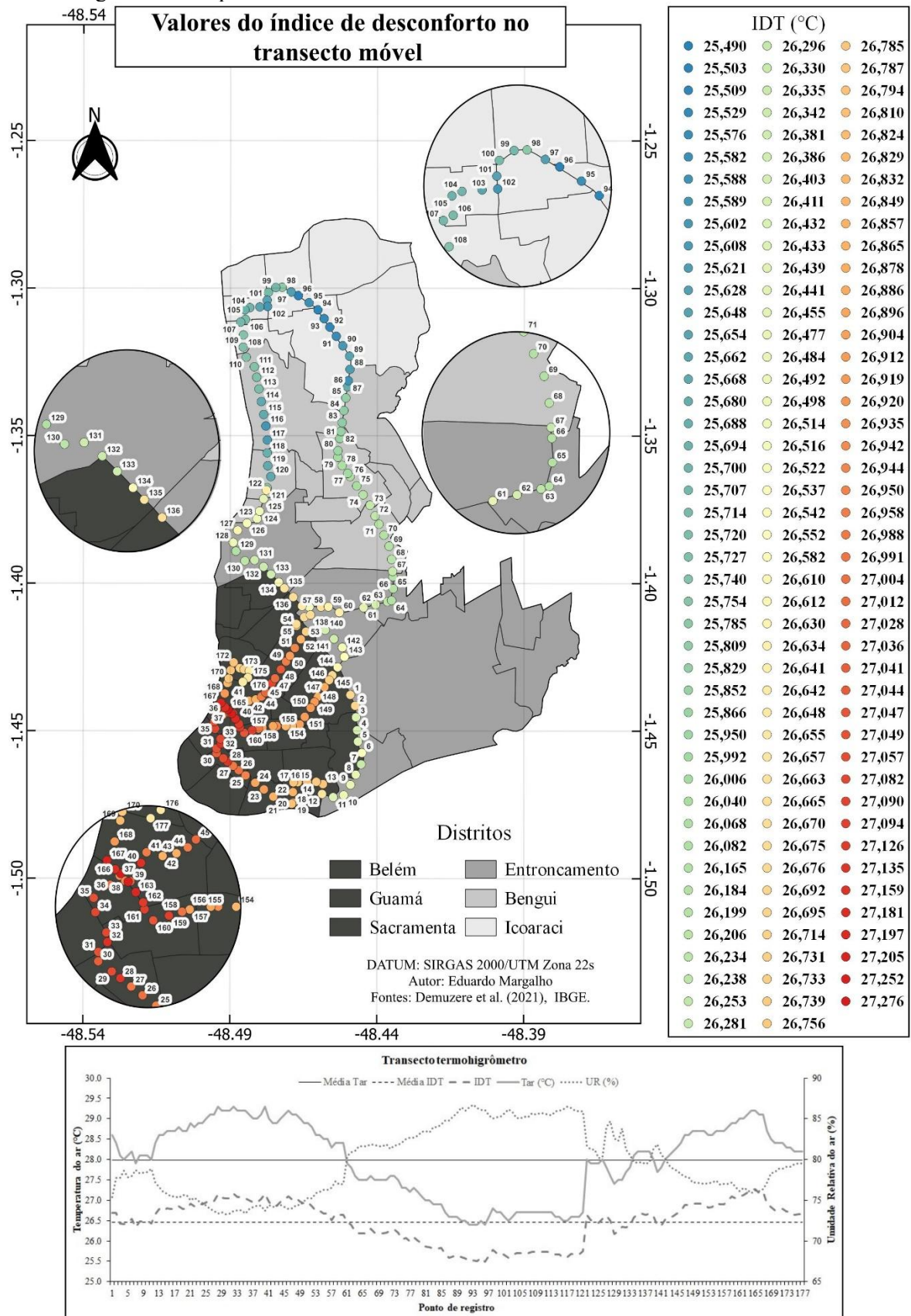
A análise temporal dos dados também revela tendências preocupantes. O incremento gradual no IDT, mesmo em regiões com alguma cobertura vegetal, evidencia que o crescimento urbano acelerado e desordenado tem efeitos cumulativos sobre o conforto térmico noturno e diurno. A substituição de áreas verdes por superfícies impermeáveis altera o balanço energético local, reduz a evapotranspiração e aumenta a retenção de calor, intensificando a formação das ilhas de calor urbanas (Rizwan et al., 2008; Wai et al., 2023).

Além disso, o estudo evidencia que políticas de planejamento urbano focadas em mitigação térmica são urgentes. Estratégias como preservação e expansão de áreas verdes, criação de corredores ecológicos, arborização de vias públicas e incentivo ao uso de superfícies permeáveis mostram-se essenciais para reduzir o desconforto térmico e os impactos das ilhas de calor. Intervenções desse tipo melhoram a qualidade ambiental urbana, favorecem o resfriamento natural, contribuem para a saúde pública e aumentam a resiliência das cidades tropicais às mudanças climáticas (Padilha et al., 2019; Werneck, 2018; Barata et al., 2024).

Em síntese, os resultados do transecto móvel e da análise das ZCLs demonstram que o desconforto térmico urbano em Belém não é uniforme, mas está diretamente relacionado à intensidade de ocupação urbana, à densidade construtiva e à presença de vegetação e corpos d'água. Áreas mais urbanizadas, densamente edificadas e com pouca vegetação apresentam os maiores níveis de IDT, enquanto distritos com maior cobertura verde e menor densidade construtiva apresentam condições microclimáticas mais favoráveis.

Portanto, é fundamental que gestores públicos, urbanistas e especialistas em meio ambiente integrem essas evidências no planejamento urbano, priorizando soluções baseadas na natureza, conservação de áreas verdes e recuperação de ecossistemas aquáticos. A implementação dessas medidas permitirá reduzir os impactos das ilhas de calor, melhorar a qualidade de vida da população, promover resiliência climática e adaptar a cidade aos desafios de um clima tropical com alta vulnerabilidade, como é característico da Amazônia.

Figura 26. Índice de Desconforto de cada ponto do transecto e variabilidade do IDT e das variáveis meteorológicas obtidas pelo transecto móvel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro resultado significativo obtido no presente estudo refere-se à interpolação espacial do Índice de Desconforto Térmico (IDT), realizada pelo método Regularized Spline with Tension (RST). Este método se consolidou como uma estratégia robusta para a representação detalhada 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. A aplicação dessa técnica possibilitou a identificação de padrões espaciais do IDT em Belém que estariam subestimados ou mesmo invisíveis em abordagens menos detalhadas, reforçando a importância de métodos avançados de interpolação para estudos de climatologia urbana.

Na análise dos resultados, a Figura 27A evidencia que os bairros do distrito de Icoaraci apresentam os menores valores médios de IDT, refletindo condições microclimáticas mais favoráveis. Tal comportamento está diretamente relacionado à predominância do tipo de cobertura ZCL-6 (aberta, baixa elevação), caracterizada por ampla presença de vegetação e menor adensamento construtivo. Estudos recentes, como o de Rodrigues (2024), demonstram que áreas urbanas com elevado índice de vegetação, medido pelo NDVI, apresentam temperaturas de superfície mais baixas e maior conforto térmico, reforçando o papel mitigador da vegetação urbana na regulação microclimática. Esses bairros, portanto, funcionam como verdadeiros corredores de resfriamento, contribuindo para o equilíbrio térmico da malha urbana e diminuindo os efeitos do desconforto térmico sobre os residentes.

Em contraste, os distritos centrais, como Guamá, Belém e Sacramenta, exibem os maiores valores médios de IDT, em grande parte associados à predominância da ZCL-3 (compactada de baixa elevação). Nessas áreas, o adensamento urbano intenso, combinado à escassez de arborização e à substituição de superfícies permeáveis por pavimentação e edificações, potencializa a formação de ilhas de calor urbanas, fenômeno amplamente documentado em estudos comparativos sobre cidades amazônicas (Souza, 2012). A análise detalhada evidencia que o aumento do IDT está intimamente ligado à organização espacial do tecido urbano e à ausência de vegetação, reforçando a necessidade de planejamento estratégico que considere tanto a densidade construtiva quanto a preservação de áreas verdes.

A Figura 27B apresenta a classificação espacial do IDT em termos de “Parcialmente confortável” e “Desconfortável”, destacando a concentração de áreas de maior desconforto nos distritos centrais e em partes do Entroncamento, enquanto bairros como Icoaraci e áreas do Bengui exibem condições mais amenas. Esta diferenciação espacial evidencia que

características físicas locais, como tipo de cobertura, densidade urbana e presença de vegetação, desempenham papel determinante na modulação do conforto térmico. Em consonância, Raiol et al. (2024) verificaram que bairros mais arborizados em Belém mantêm temperaturas até 2 °C menores que regiões densamente urbanizadas, demonstrando o efeito direto da vegetação na mitigação das ilhas de calor.

O distrito do Bengui apresenta comportamento intermediário, funcionando como zona de transição térmica. Sua heterogeneidade de usos e coberturas do solo, com coexistência de áreas densamente edificadas (ZCL-3) e zonas vegetadas (ZCL-6), cria microclimas variados e valores intermediários de IDT. Essa configuração reforça o conceito de mosaico urbano, segundo Kaiser et al. (2022), em que a interação entre diferentes tipologias construtivas e áreas verdes influencia diretamente a distribuição de calor e o conforto térmico, tornando o planejamento urbano mais complexo, porém crucial para o controle microclimático.

A urbanização desordenada, típica de processos de ocupação rápida e sem planejamento, contribui significativamente para o aumento do desconforto térmico em Belém. Antonucci et al. (2022) destacam que a expansão urbana caótica reduz a permeabilidade do solo, aumenta áreas impermeabilizadas e compromete a continuidade de corredores verdes, amplificando o efeito das ilhas de calor e elevando os valores de IDT. Bairros periféricos que ainda preservam áreas verdes apresentam maior resiliência térmica, evidenciando a importância da vegetação urbana como estratégia eficaz de mitigação. Este cenário é agravado em áreas com ocupação irregular, onde a ausência de planejamento e de espaços públicos verdes limita as opções de resfriamento natural, intensificando o desconforto para a população.

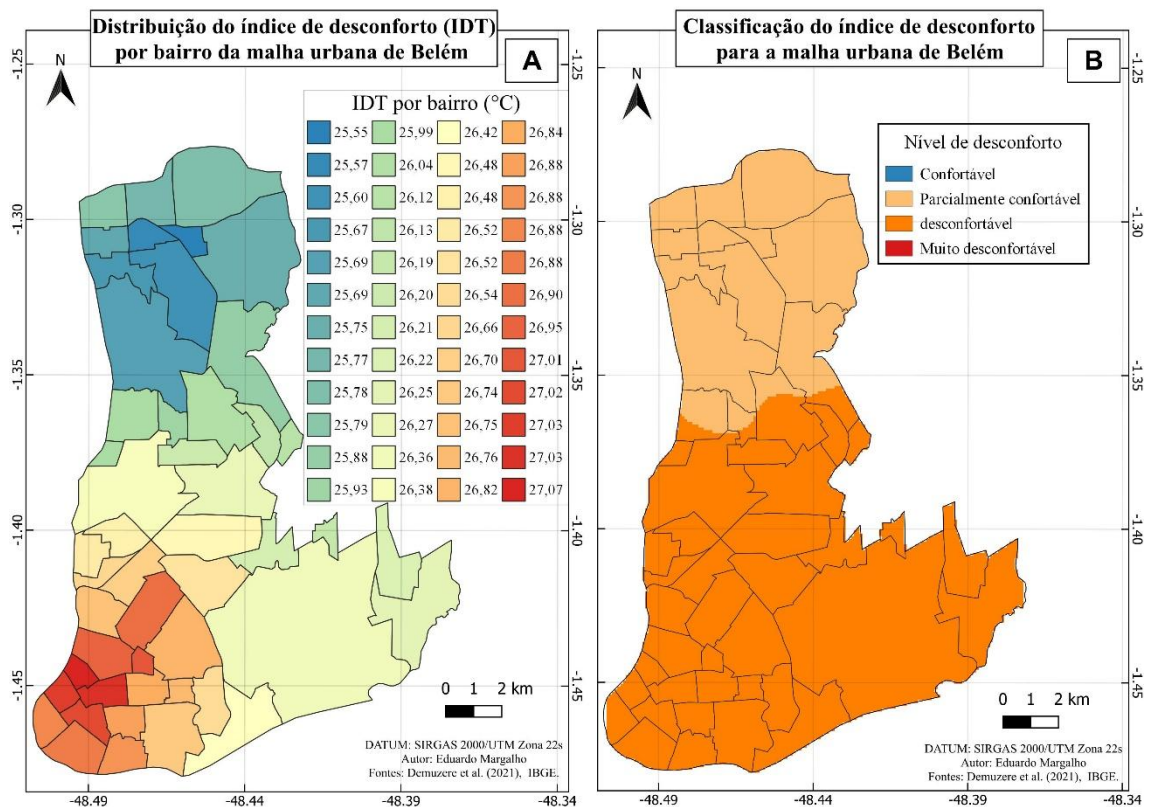
Um caso específico é o bairro Curió-Utinga, que abriga uma importante unidade de conservação. A presença de extensa cobertura vegetal sugere que os valores interpolados de IDT nesta área possam estar superestimados, devido à influência de bairros adjacentes densamente urbanizados. Em realidade, o parque ambiental do Curió-Utinga provavelmente compartilha condições térmicas mais próximas de Icoaraci, com menor adensamento urbano e maior heterogeneidade de tipos de cobertura do solo. Esse exemplo ressalta a necessidade de considerar a influência de áreas vizinhas ao interpretar dados de interpolação, especialmente em contextos urbanos complexos.

Do ponto de vista da saúde pública, o aumento do desconforto térmico está associado a maior risco de doenças relacionadas ao calor, incluindo insolação, desidratação e agravamento de condições respiratórias e cardiovasculares. Relatórios da OMS e do IPCC enfatizam que populações residentes em áreas densamente urbanizadas são mais vulneráveis a ondas de calor extremas, reforçando a urgência de políticas públicas que promovam infraestrutura verde, como

telhados e fachadas vegetadas, arborização urbana e uso de materiais refletivos em vias e edificações.

Os resultados obtidos demonstram de forma clara que os valores médios de IDT refletem diretamente a organização espacial e as tipologias construtivas predominantes. Bairros com maior presença de vegetação, como Icoaraci, mantêm condições térmicas mais confortáveis, enquanto regiões densamente edificadas, como Guamá e Sacramenta, apresentam elevados níveis de desconforto térmico. Esses achados reforçam a necessidade de políticas urbanas integradas, que combinem planejamento sustentável, conservação de áreas verdes e adaptação às mudanças climáticas, visando melhorar a qualidade de vida e a resiliência urbana nas cidades amazônicas.

Figura 27. Distribuição do índice de desconforto por bairro (A) e a classificação do IDT da Malha urbana de Belém/PA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa proporcionou concluir que o município de Belém apresentou intensa mudança da cobertura do solo, apresentando decréscimo na cobertura vegetal e aumento nas estruturas urbanas. Essa alteração da cobertura é um dos fatores do aumento da temperatura da superfície (TS), onde os bairros dos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta são destacados como uma área urbana consolidada por terem os maiores valores de TS. Os bairros que apresentaram menores valores de TS foram os situados nos distritos do Outeiro e Mosqueiro, constatando que esses bairros ainda apresentam aspectos rurais e menos urbanos.

Sobre as Zonas Climáticas Locais do município de Belém averiguou-se que o município não tem uma área caracterizada como compactada de alta elevação, os edifícios são distribuídos espaçadamente e dividindo o espaço com outros tipos de ZCL. Os tipos de ZCL de maior predominância foram os: Compacta de baixa elevação (ZCL-3), aberta de baixa elevação (ZCL-6), vegetação arbórea densa (ZCL-A) e água (ZCL-G), sendo que a classificação do tipo ZCL-6 tem maior predominância nos bairros situados nos distritos do Bengui, Icoaraci, já o tipo ZCL-3 tem maior predominância nos distritos do Guamá, Belém e Sacramenta. O distrito de Mosqueiro possui maior predominância da classificação do tipo ZCL-A, concluindo que o município de Belém apresenta uma estratificação em relação aos tipos de zonas climáticas, apresentando padrões de cobertura dependendo do grau de urbanização e de expansão. Isso mostra que o município ainda está em processo de expansão urbana, principalmente para os bairros localizados nos distritos de Outeiro e Mosqueiro.

Outro ponto, constatou-se que os bairros que possuem maior predominância de determinada cobertura afetam os bairros vizinhos a esses, que possuem outro tipo de cobertura, ou seja, existe uma relação de grandeza.

No mapeamento térmico, se pode concluir a relação direta dos tipos predominantes de cobertura com os valores de temperatura do ar, o método de interpolação mostrou que os bairros que apresentam estruturas urbanas mais compactas são os que possuem elevados valores de temperatura e os bairros que apresentam uma estrutura urbana mais espaçadas, com presença de vegetação são as que apresentam menores valores de temperatura. Desse modo, na malha urbana de Belém, os bairros mais quentes nesse período noturno foram Batista Campos, Campina e Reduto, já os bairros com menores temperaturas foram Águas negras, Agulha e Parque Guajará.

Ao analisar os resultados da série histórica do índice de desconforto de Thom, é possível constatar que as alterações que o município de Belém sofreu, influenciou na ruptura da série de dados, principalmente na variabilidade mensal, no qual passou do nível parcialmente

confortável para desconfortável a partir de abril de 1997, com tendência de aumento. A tendência positiva também é vista na variabilidade do horário de 00 UTC, ou seja, o município, com o passar dos anos, tende a ser mais desconfortável.

Não obstante, a partir da determinação do índice de desconforto (IDT) com os dados do transecto móvel para a malha urbana de Belém, concluiu-se que os bairros que possuem o tipo de cobertura ZCL-6 e que estão situados no distrito de Icoaraci e parte no distrito do Bengui, são classificados como parcialmente confortável. Em contrapartida, os bairros com predominância do tipo ZCL-3 e localizados nos distritos do Guamá, Belém, Sacramento, Entroncamento e uma parte do Bengui, são classificados como desconfortável. Além disso, os bairros classificados como desconfortável que apresentam maiores valores de IDT estão na área urbana consolidada, mais precisamente nos distritos do Guamá, Belém e Sacramento, e por outro lado o distrito de Icoaraci apresenta o melhor nível de conforto térmico.

De modo geral, os resultados da pesquisa mostram que o município de Belém possui padrões diferentes em termos de tipos de cobertura, de temperatura (Superfície e do ar) e de conforto térmico, onde os bairros que apresentam classificação parcialmente confortável são os que possuem cobertura mais aberta e vegetativa associado com edificações baixas e espaçadas. Já em relação aos bairros que apresentam maior desconforto são os bairros presentes na área urbana consolidada, no qual apresentam cobertura do tipo mais fechada, sem presença de vegetação e com edificações baixas e mais compactadas. Ademais, é possível inferir que os distritos de Outeiro e Mosqueiro, áreas mais rurais e naturais do município, são os que apresentam o melhor conforto térmico do município, pois apresentam cobertura aberta e muito mais arbórea, com pouca densidade de edificações.

Considera-se que a metodologia empregada no estudo foi bastante satisfatória, entretanto consiste em algumas limitações. Sugere-se a utilização de estações meteorológicas fixas bem distribuídas pela cidade, principalmente, nas ilhas que o transecto não pôde acessar, diminuindo a necessidade da interpolação.

Portanto, a pesquisa evidencia a importância do estudo do clima urbano de Belém, ao revelar a presença de diferentes padrões térmicos no espaço municipal. Essa heterogeneidade, associada à diversidade nos tipos de construções e cobertura do solo, indica a necessidade de ações de planejamento urbano. Assim, enquanto algumas áreas ainda podem ser planejadas de forma preventiva, outras demandam medidas de mitigação do aumento da temperatura, passíveis de integração ao plano diretor do município.

REFERÊNCIAS

- ABOULNAGA, Mohsen; TROMBADORE, Antonella; MOSTAFA, Mona; ABOUAIANA, Ahmed. Livability: The direction to mitigating urban heat islands' effect, achieving healthy, sustainable, and resilient cities, and the coverage. *In: Livable cities: Urban heat islands mitigation for climate change adaptation through urban greening*. Cham: Springer, 2024. p. 1-282. 2024.
- AHMED, Samah. Assessment of urban heat islands and impact of climate change on socioeconomic over Suez Governorate using remote sensing and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, Cairo, v. 21, n. 1, p. 15-25, 2018.
- ALONSO, Lucille; RENARD, Florenti. Integrating Satellite-Derived Data as Spatial Predictors in Multiple Regression Models to Enhance the Knowledge of Air Temperature Patterns. **Urban Science**, Basel, v. 3, n. 4, p. 101, 2019.
- AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade; NETO, João Lima Sant'Anna; DUBREUIL, Vicent. Estrutura térmica identificada por transectos móveis e canal termal do Landsat 7 em cidade tropical. **Revista de Geografia Norte Grande**, Santiago, n. 43, p. 65-80, 2009.
- AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V. A interferência da precipitação na intensidade e na distribuição espacial das ilhas de calor de superfície nas estações do ano em ambiente tropical. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 18., 2017, Santos. **Anais [...]**, São Paulo: INPE, v. 1, 2017. p. 1314-1320.
- ANDRADE, Henrique. O clima urbano-natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra**, Lisboa, v. 40, n. 80, pp. 67-91, 2005.
- ANDRADE, Henrique Oliveira de; SANTOS, Rosângela Leal. Avaliação quantitativa do conforto térmico de uma cidade em transição climática: Feira de Santana-Bahia, Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, Santiago, v. 40, p. 77-84, 2008.
- ANJOS, Max; LOPES, António; ALVES, Elis Dener Lima; LUCENA, Andrews José de. Rede climatológica de mesoescala aplicada ao estudo da ilha de calor urbano: o caso de Aracaju-SE. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 18, p. 203-216, 2017.
- ANTONUCCI, Bárbara; NEVES, Gustavo Zen de Figueiredo; ANDRADE, Nara Luísa Reis de; WEBLER, Alberto Dresch. Efeitos da Urbanização e a Relação com o Conforto Térmico em Observações de Superfície no Sul da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 39, e39240063, 2024.
- ASSIS, Eleanora Sad de. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista de Urbanismo e Arquitetura**, Salvador, v. 7, n. 1, 2006.
- BARATA, Giovanna Barroso Cavalcante; COELHO, Marcelo Brenner Correa; BELTRÃO, Norma Ely Santos; GOMES, Dênis José Cardoso. Variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração da superfície urbana na Região Metropolitana de Belém. **Brazilian**

Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium, Ituiutaba, v. 15, n. 1, p. 96-113, 2024.

BARRON, Laura; RUGGIERI, Dominique; BRANAS, Charles. Assessing Vulnerability to Heat: A Geospatial Analysis for the City of Philadelphia. **Urban Science**, Basel, v. 2, n. 2, p. 38, 2018.

BARROS, Hugo Rogério; LOMBARDO, Magda Adelaide. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **Geosp – Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 160-177, 2016.

BECHTEL, Benjamin; ALEXANDER, Paul; BECK, Christoph; BÖHNER, Jürgen; BROUSSE, Oscar; CHING, Jason; DEMUZERE, Matthias; FONTE, Cidália; GÁL, Tamás; HIDALGO, Julia; HOFFMANN, Peter; MIDDEL, Ariane; MILLS, Gerald; REN, Chao; SEE, Linda; SISMANIDIS, Panagiotis; VERDONCK, Marie-Leen; XU, Guang; XU, Yong. Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. **Urban Climate**, Amsterdã, v. 27, p. 24–45, 2019.

BENEDITO, Yago Vinicius Motta. **Influência de áreas verdes no clima local e no conforto térmico da Região Metropolitana de São Paulo avaliada com estações meteorológicas**. 2021. 132 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

BERTOLINI, William Zanete; DEODORO, Sandra Cristina; ZAMBOT, Nadialine. Análise morfométrica do relevo da região hidrográfica da várzea – Alto Rio Uruguai (RS). **Revista Geociências**, Rio Claro, v. 40, n. 1, p. 83-99, 2021.

BERTOLINO, André Mateus; MAZZIONI, Sady; POLI, Odilon Luiz. Estudo bibliométrico sobre cadeias produtivas sustentáveis. **Gestão e Desenvolvimento em Revista**, Francisco Beltrão, v. 2, n. 2, p. 77-87, 2016.

BEZERRA, Paulo Eduardo Silva; MORAES, Eiky Tatsuya Ishikawa de; SOARES, Ismael Ramalho da Costa. Análise da temperatura de superfície e do índice de vegetação no município de Belém na identificação das ilhas de calor. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 70, n. 3, p. 803-818, 2018.

BRAGANÇA, Luís; GUIMARÃES, Erika; BARBOSA, José Amarílio; ARAÚJO, Catarina; ALVAREZ, Cristina Engel de; ULIAN, Giovana. Avaliação do nível de sustentabilidade em comunidades urbanas energeticamente eficientes. In: ALVAREZ, Cristina Engel de; BRAGANÇA, Luís (Org.). **Comunidades urbanas energeticamente eficientes**. Vitória: EDUFES, 2016. p. 12-21.

BRAGANÇA, L.; CONDE, K.; ALVAREZ, C. E. Proposta de indicadores de avaliação de sustentabilidade urbana para países latino-americanos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE REABILITAÇÃO URBANA E CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2., 2017. Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: IISBE, 2017. p. 85-94.

CACCAVONI, Artur. **Album Descriptivo Annuario dello Stato del Pará**. Gênova, Itália: La Ligue Brazilian, 1898.

CARDOSO, Renata dos Santos; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Urban heat island analysis using the ‘local climate zone’ scheme in Presidente Prudente, Brazil. **Investigaciones Geográficas**, Alicante, v. 69, p. 107–118, 2018.

CARDOSO, Letícia Karyne da Silva; JESUS, Nilzele de Vilhena Gomes; SILVA, Ludmila Monteiro da; VIEIRA, Alen Costa. Avaliação dos Índices Termodinâmicos na Previsibilidade de Chuvas em Belém-PA: o Uso Alternativo de Sondagens Atmosféricas por Satélite. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 45, p. 1 – 14, 2022.

CARVALHO, D. L. R.; SOARES, C. B. S. S.; SILVA, M. M. Identificação de ilhas de calor urbana na cidade de Manaus-AM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São Paulo: INPE, 2013. p. 874-881.

CASTRO, Lidia Gomes de. **Zonas climáticas locais em cidades pequenas: relação entre temperatura e morfologia urbana**. 2022. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CIMOLAI, Caterina.; AGUILAR, Enric. Heatwave Hotspots: SUHI and Intra-Urban Surface Temperature Mapping in Three Argentine Cities. **Earth Systems and Environment**, Suíça, p. 1 – 21, 2025.

CHEN, Xiaoliang; XUA, Yong; YANG, Jinxin; WU, Zhifeng; ZHU, Hong. Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: A case study of two high-density subtropical Chinese cities. **Urban Climate**, Amsterdã, v. 31, p. 100568, 2020.

CHIQUETTI, Simone Merino; FARIA, João Roberto Gomes de. Relação entre Vegetação, Fator de Visão do Céu e Conforto Térmico: Uma Revisão Sistemática de Literatura. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, São Paulo, v. 10, n. 77, p. 51 – 64, 2022.

CORDEIRO, Maryana Cavalcante. **Ilhas de calor urbanas no nordeste brasileiro: uma avaliação com base em imagens de satélite**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

COSTA, Antonio Carlos Lôla da. **Estudo de variações termo-higrométricas de cidade equatorial devido ao processo de urbanização: o caso de Belém-PA**. 1998. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

COSTA, Antonio Carlos Lôla da; SILVA JUNIOR, João de Athaydes; CUNHA, Alan Cavalcanti da; FEITOSA, João Roberto Pinto; PORTELA, Bruno Takeshi Tanaka; SILVA, Glauber Guimarães Cirino da; COSTA, Rafael Ferreira da. Índices de conforto térmico e suas variações sazonais em cidades de diferentes dimensões na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 3, p. 478-487, 2013.

COSTA, Abnoã da Costa; RODRIGUES, Hernani José Brazão; COSTA, Jefferson Luis Oliveira; SOUZA, Paulo Fernando de Souza; SILVA JUNIOR, João de Athaydes; COSTA, Antonio Carlos Lôla da. Variações termo-higrométricas e estudo de ilha de calor urbana na cidade de Bragança-PA e circunvizinhança. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, p. 571-584, 2016.

COSTA, Léa Maria Gomes da; RODRIGUES, Jovenildo Cardoso. A formação de Belém enquanto cidade compacta ou confinada: uma análise a partir das formas de produção da moradia. **GEOfographia**, Niterói, v. 24, n. 53, 2022.

DE RIDDER, Koen; LAUWAET, Dirk; MAIHEU, Bino. UrbClim—A fast urban boundary layer climate model. **Urban Climate**, Amsterdã, v. 12, p. 21-48, 2015.

DEMUZERE, Matthias; HANKEY, Steve; MILLS, Gerald; ZHANG, Wenwen; LU, Tianjun; BECHTEL, Benjamin. Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US. **Scientific Data**, Londres, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2020.

DEMUZERE, Matthias; KITTNER, Jonas; BECHTEL, Benjamin. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 9, p. 637455, 2021.

DIAS, Luanna Costa; VALENTE, Alexandre Miguel da Cruz; FERNANDES, Lindemberg Lima. Analysis and correlation of climatological variables with climatic phenomena and urbanization in the City Belém, in the State of Pará, Northern Brazil. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 9, n. 8, p. e972986790 - e972986790, 2020.

DINTHER, Rutger de Graaf-Van; OVINK, Henk. The five pillars of climate resilience. In: DINTHER, Rutger de Graaf-Van. (eds) **Climate Resilient Urban Areas**. Palgrave Studies in Climate Resilient Societies. Palgrave Macmillan, Cham, 2021. p. 1 – 19.

DUBREUIL, Vincent; FANTE, Karime Pechutti; PLANCHON, Olivier; NETO, João Lima Sant’anna. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. Confins. **Revue franco-brésilienne de géographie**, São Paulo, n. 37, 2018.

FANGER, Povl Ole. **Thermal comfort**: Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

FENZL, Norbert; SOMBRA, Daniel; CANTO, Otávio do; FARIAS, André; NASCIMENTO, Fernanda. Os “Grandes Projetos” e o processo de urbanização na Amazônia brasileira: consequências sociais e transformações territoriais. **InterEspaço**, Grajaú, v. 6, p. 1-25, 2020.

FERREIRA, João Carlos Vicente. **O Pará e seus municípios**. 1. ed. Belém: Rede Celpa, 2003.

FRANÇA, Mauro Sergio de; MAITELLI, Gilda Tomasini; NOGUEIRA, Marta Cristina de Jesus Albuquerque; FRANÇA, Silvana Maria Bertoldo de; NOGUEIRA, José de Souza. Estimativa de índices de conforto térmico na cidade de Cuiabá/MT. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 16, n. 55, p. 141-151, 2015.

FREITAS, Ruskin Fernandes Marinho de; AZERÊDO, Jaucele de Fátima Ferreira Alves de; CRVALHO, Laís Teixeira de; COSTA, Renato Freitas da. Mapa climático como instrumento para o planejamento urbano. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, Recife, v. 23, p. 1-31, 2021.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução: Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GELETIC, Jan; LEHNERT, Michal; SAVIC, Stevan; MILOSEVIC, Dragan. Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 624, p. 385-395, 2018.

GONÇALVES, Djanny Klismara de Oliveira; MASIERO, Érico; BRAGANÇA, Luis; KAKUDA, Francis Massashi. Qualitative and Quantitative Assessment of Urban Sustainability in Social Housing Using the Casa Azul Label and SBTool Urban in Brazil. **Applied Sciences-Basel**, Basel, v. 10, p. 6246, 2020.

GORELICK, Noel; HANCHER, Matt; DIXON, Mike; ILYUSHCHENKO, Simon; THAU, David; MOORE, Rebecca. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 202, p. 18-27, 2017.

GÖSSLING, Stefan; NICOLOSI, Jessica; LITMAN, Todd. The health cost of transport in cities. **Current Environmental Health Reports**, Londres, v. 8, p. 196-201, 2021.

GUHA, Subhanil; GOVIL, Himanshu; DEY, Anindita; GILL, Neetu. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. **European Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 51, n. 1, p. 667-678, 2018.

HANAFI, Abdelhakim; ALKAMA, Djamel. Role of the urban vegetal in improving the thermal comfort of a public place of a contemporary Saharan city. **Energy Procedia**, Amsterdã, v. 119, p. 139-152, 2017.

HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira; ASSIS, Eleonora Sad de; NIKOLOPOULOU, Marialena. Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. **Building and Environment**, Kidlington, v. 107, p. 245-253, 2016.

IRIE, Teruaki. The cooling effect of green infrastructure in mitigating nocturnal urban heat islands: a case study of Yoyogi Park and Meiji Jingu Shrine in Tokyo. **Landscape Research**, Londres, v. 47, n. 5, p. 559-583, 2022.

KABISCH, Nadja; QURESHI, Salman; HAASE, Dagmar. Human–environment interactions in urban green spaces—A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. **Environmental Impact Assessment Review**, Amsterdã, v. 50, p. 25–34, 2015.

KAISER, Eduardo Andre; ROLIM, Silvia Beatriz Alves; GRONDONA, Atilio Efrain Bica; HACKMANN, Cristiano Lima; LINN, Rodrigo de Marsillac; KÄFER, Pâmela Suélen; ROCHA, Nágila Souza da; DIAZ, Lucas Ribeiro. Spatiotemporal Influences of LULC Changes on Land Surface Temperature in Rapid Urbanization Area by Using Landsat-TM and TIRS Images. **Atmosphere**, Basel, v. 13, p. 460, 2022.

KRAYENHOFF, Eric Scott; BROADBENT, Ashley; ZHAO, Lei; GEORGESCU, Matei; MIDDEL, Ariane; VOOGT, James; MARTILLI, Alberto; SAILOR, David; ERELL, Evyatar.

Cooling hot cities: A systematic and critical review of the numerical modelling literature. **Environmental Research Letters: ERL**, Bristol, v. 16, n. 5, p. 053007, 2021.

KRÜGER, Eduardo; PEREIRA, Natasha Hansen Gapski. Avaliação dos efeitos microclimáticos de diferentes zonas climáticas locais em cidade de clima temperado. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 11, p. e020019, 2020.

LACERDA, Elisângela Gonçalves; DINIZ, Alexandre Magno. Gênese urbana na Amazônia setentrional: considerações a partir do município de Rorainópolis-RR. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 14, n. 34, p. 216-241, 2020.

LANDSBERG, Helmut Erich. **The urban climate**. Amsterdã: Academic Press, 1981.

LIMA, Thiago Luiz de. **Quantificação da ilha de calor urbana e do MP2,5 na zona norte de São Paulo**. 2024. 186 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

LIMA JÚNIOR, Antonio Ferreira. **Análise espaço temporal da dengue em Fortaleza e sua relação com o clima urbano e variáveis socioambientais**. 2018. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LITMAN, Todd; BURWELL, David. Issues in sustainable transportation. **International Journal of Global Environmental Issues**, Reino Unido, v. 6, n. 4, p. 331-347, 2006.

LIU, Xiaomang; DAI, Xiangqian; ZHONG, Yidan; LI, Jinjing; WANG, Peng. Analysis of changes in the relationship between precipitation and streamflow in the Yiluo River, China. **Theoretical and Applied Climatology**, Viena, v. 114, n. 1-2, p. 183-191, 2013.

LIU, Lin; LIN, Yaoyu; XIAO, Ye; XUE, Puning; SHI, Luyang; CHEN, Xin; LIU, Jing. Quantitative effects of urban spatial characteristics on outdoor thermal comfort based on the LCZ scheme. **Building and Environment**, Kidlington, v. 143, p. 443-460, 2018.

LOPES, Anaísa Filmiano Andrade; GUERRA, Maria Elisa Alves. O Novo Urbanismo e a Sustentabilidade Urbana: Avaliação do Projeto Bairro Granja Marileusa na Cidade De Uberlândia-MG. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, São Paulo, v. 8, n. 54, p. 47-64, 2020.

LOUGHNER, Christopher; ALLEN, Dale; ZHANG, Da-Lin; PICKERING, Kenneth; DICKERSON, Russell; LANDRY, Laura. Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects: Parameterization and preliminary results. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Boston, v. 51, n. 10, p. 1775–1793, 2012.

LUCHIARI, Ailton. Identificação da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de produtos de sensoriamento remoto e de um sistema de informação geográfica. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, v. 14, p. 47-58, 2011.

MAIA, J. A.; GONÇALVES, F. L. T. Uma análise do conforto térmico e suas relações meteorotrópicas na cidade de São Paulo - Parte 1. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE

METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**, Jaboticabal: Fábrica da Palavra, 2002.

MARGALHO, E. S. **Avaliação da ilha de calor urbana na localidade de Belém-PA a partir de técnicas de sensoriamento remoto e dados observacionais**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2019.

MARGALHO, Eduardo da Silva; SILVA, Madson Tavares; CARDOSO, Letícia Karyne da Silva; OLINDA, Ricardo Alves de; MENEZES, José Felipe Gazel. Influência da Mudança do Uso e Cobertura do Solo sobre a Temperatura da Superfície Continental na Área Urbana de Belém-PA. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 43, p. 7-19, 2020.

MARKHAM, Brian; BARKER, John. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MASSON-DELMOTTE, Valérie; ZHAI, Panmao; PÖRTNER, Hans-Otto; ROBERTS, Debra; SKEA, Jim; SHUKLA, Priyaadarshi. Global warming of 1.5 C. **An IPCC Special Report on the impacts of global warming of**, Genebra, v. 1, n. 5, p. 43-50, 2018.

MAXWELL, Simon. World Development Report 2010: Development and Climate Change. **Climate and Development**, v. 2, n. 3, 299–301, 2010.

MELLO, Andréa Hentz; FEITOSA, Nathália Karolinne. Dinâmicas da ocupação territorial na Amazônia: reflexões sobre os impactos socioambientais pós-pandemia decorrentes do avanço do desmatamento. **Unifesspa: Painel Reflexão em tempos de crise**, v. 15, p. 1-11, 2020.

MELO, Maria Monalisa Mayara Silva; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; OLINDA, Ricardo Alves de; SILVA, Madson Tavares; ABRAHÃO, Raphael; RUIZ-ALVAREZ, Osias. Trends in Temperature and Rainfall Extremes near the Artificial Sobradinho Lake, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 33, n. 3, p. 426-440, 2018.

MENDES, Tamires Gabryele de Lima; ANJOS, Rafael Silva dos; SANTOS, Tânelly Neriah; MOREIRA, Ayobami Badiru; NÓBREGA, Ranyére Silva. Abordagem científica sobre ilhas de calor em Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 4, n. 1, p. 1-13, 2019.

MIDDEL, Ariane; KRAYENHOFF, Eric Scott. Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 687, p. 137-151, 2019.

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

MONTEIRO, Verônica Stefanichen. **Zonas climáticas locais e a relação com a morfologia urbana. Estudo de caso: Campinas/SP**. 2018. 167 f. Dissertação (Mestrado em Sistema de

Infraestrutura Urbana) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP, 2018.

NAKATA-OSAKI, Camila Mayumi; SOUZA, Léa Cristina Lucas de; RODRIGUES, Daniel Souto. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, p. 73-87, 2016.

NEWMAN, Peter; BEATLEY, Timothy; BOYER, Heather. **Resilient Cities: Overcoming Fossil Fuel Dependence**. 2. ed. Island Press: Washington, DC, 2017.

NÓBREGA, Ranyére Silva; LEMOS, Thiago Verçosa da Silva. O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia**, Recife, v. 28, p. 93-109, 2011.

NUNES, Lana Patrícia Martins, SANTOS, Josiane Sarmento, SILVA, Suzianny Cristina Salazar, PIMENTEL, Marcia Aparecida. Variação da temperatura do solo no leste da Amazônia. In: PEREZ FILHO, Archimedes; AMORIM, Raul Reis (Org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017.

OKE, Timothy Richard. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Reading, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

OKE, Timothy Richard. **Boundary layer climates**. 2. ed. Londres: Routledge, 1987.

OLIVEIRA, Magno Macedo de; ALVES, Washington Silva. A influência da vegetação no clima urbano de cidades pequenas: um estudo sobre as praças públicas de Iporá-GO. **Revista Territorial**, Cidade de Goiás, v. 2, n. 2, p. 61-77, 2013.

PADILHA, J. C.; GIACOMELLI, B; BENCHE, F.; MANTOVANI, P. R. A.; ECKERT, N. H.; NOGUEIRA, B. T. M. V. Estratégias de mitigação do efeito ilha de calor em centros urbanos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PAISAGISMO EM ESCOLAS DE ARQUITETURA E URBANISMO NO BRASIL, 14., 2018, Santa Maria. **Anais [...]**. Santa Maria: ENEPEA, 2018, p. 1346-1359.

PASCOALINO, Aline; JÚNIOR, Eduardo Marandola. A Vulnerabilidade na Cidade e as Escalas do Clima Urbano: o Potencial das Unidades Climáticas para o Planejamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 14, n. 5, p. 2711-2726, 2021.

PAULINO, Guilherme Sancley Costa; RODRIGUES, José Edilson Cardoso. Análise da temperatura de superfície e índice de vegetação para identificação das ilhas de calor no bairro do Jurunas, Belém-PA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA & IV ENCONTRO LUSO-AFRO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA E AMBIENTE, 20., 2024, Campina Grande. **Anais [...]**, Campina Grande: Realize, 2024. P. 1-8.

PENTEADO, Antonio Rocha. **Belém do Pará: estudo de geografia urbana**. 1. ed. Belém: Universidade Federal do Pará, 1968.

- PINTON, Leandro de Godoi; RIBEIRO, Maria Clara Aparecida; SUIZU, Tainá Medeiros; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. 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, v. 22, n. 79, 2021.
- PONTE, Juliano Pamplona Xavier. Belém do Pará: cidade e água. **Cadernos Metrópole**, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 41-60, 2015.
- PONTES, Ana Karla dos Santos; SILVA, Paulo Vinícius Caldas da; SANTOS, Joyse Tatiane Souza dos; SOUSA, Adriano Marlisom Leão. Temperatura em superfície urbanas usando sensor TIRS-Landsat 5 e 8: estudo de caso em Belém-PA. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 4, n. 9, 2017.
- PORANGABA, Gislene Figueiredo Ortiz; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Análise de ilhas de calor diagnósticas por meio de transectos móveis em Assis, Cândido Mota, Maracá e Tarumã (SP). Confins. **Revue franco-brésilienne de géographie**, São Paulo, v. 12, n. 33, 02-15, 2017.
- RAFAEL, Renata de Araújo. **Relação entre ilhas de calor urbano e mudanças no uso da terra: um estudo de caso para Manaus – AM**. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2014.
- RAIOL, Lucas Lima; ROCHA, Yuri Antonio da Silva; SANTOS, Dayla Carolina Rodrigues; LIMA, Aline Maria Meiguins de; VELASTEGUI-MONTOYA, Andrés. Assessment of Urban Heat Islands in an Eastern Amazonian city. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Hannover, v. 48, p. 437-443, 2024.
- RIBEIRO, I.; AMORIM, J. H.; JÚNIOR, A. F. L.; ZANELLA, M. E. Impact of urban vegetation on thermal comfort in the tropical coastal city of Fortaleza. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. [S. l.], 2023, p. 1-6.
- RICHARDSON, Doug; BLACK, Amanda; IRVING, Damien; MATEAR, Richard; MONSELESAN, Didier; RISBEY, James; SQUIRE, Dougal; TOZER, Carly. Global increase in wildfire potential from compound fire weather and drought. **NPJ climate and atmospheric science**, Londres, v. 5, n. 1, p. 23, 2022.
- RIZWAN, Ahmed Memon; DENNIS, Leung; LIU, Chunho. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, Pequim, v. 20, n. 1, p. 120-128, 2008.
- RODRIGUES, José Edilson Cardoso. Análise espacial da temperatura da área central da cidade de Belém (PA). **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 35, p. 529-546, 2024.
- SANTOS, Joel Silva dos; SILVA, Vicente de Paulo Rodrigues da; ARAÚJO, Lincoln Eloi de; LIMA, Eduardo Rodrigues Viana de; COSTA, Angelina Dias Leão. Análise das

condições do conforto térmico em ambiente urbano: estudo de caso em Campus universitário. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, p. 336-353, 2011.

SANTOS, A.; MENDES, R. **Evolução morfológica de Belém, Pará, Brasil: colônia, império e república**. In: Conferência da Rede Lusófona de Morfologia Urbana, 2., 2012, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: ISCTE, 2012. p. 5-6.

SANTOS, Juliete Baraúna dos; AMORIM, Ricardo; CAVALCANTE, Laiane. Análise do conforto térmico humano no município de Arapiraca, Alagoas, utilizando software MATLAB. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 7, p. 939-948, 2014.

SETO, Karen; GÜNERALP, Burak; HUTYRA, Lucy. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington D.C, v. 109, p. 16083–16088, 2012.

SILVA, Brenda Alves; XAVIER, Tatiana Camello; ALVAREZ, Cristina Engel de. A influência da vegetação no conforto térmico para a condição microclimática de Vitória (ES). **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, Tupã, v. 3, n. 8, 2015.

SILVA, Bernardo Barbosa da; BRAGA, Alexandra; BRAGA, Célia; OLIVEIRA, Leidjane; MONTENEGRO, Suzana; BARBOSA JUNIOR, Bernardo. Procedures for calculation of the Albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, p. 3-8, 2016.

SANTAMOURIS, Matthaios. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 512-513, p. 582-598, 2015.

SILVA, Madson Tavares; MARGALHO, Eduardo da Silva; SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira; SOUZA, Amanda Cartaxo de; SOARES, Carolina de Sá; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; SILVA, Bernardo Barbosa da. 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**, São José dos Campos, v. 36, n. 2, p. 271-283, 2021.

SHAKER, Richard; RYBARCZYK, Greg; BROWN, Craig; PAPP, Victoria; ALKINS, Shenley. (Re)emphasizing Urban Infrastructure Resilience via Scoping Review and Content Analysis. **Urban Science**, Basel, v. 3, n. 2, p. 44, 2019.

SHEPHERD, Marshall. Impacts of urbanization on precipitation and storms: Physical insights and vulnerabilities. In: PIELKE, Roger (Org.). **Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources**. Amsterdã: Academic Press, v. 5, 2013. p. 109-125.

SOUTO, Jefferson Inayan de Oliveira; COHEN, Julia Clarinda Paiva. Spatiotemporal variability of urban heat island: Influence of urbanization on seasonal pattern of land surface temperature in the Metropolitan Region of Belém, Brazil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 13, p. e20200260, 2021.

SOUZA, Diego Oliveira de. **Influência da ilha de calor urbana nas cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local**. 2012. 187 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

SOUZA, Camila Amparo de; PARANHOS FILHO, Antonio Conceição; GUARALDO, Eliane. Estudo bibliométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, 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*: SYMPOSIUM ON URBAN ENVIRONMENT, 8., 2009, Phoenix, AZ. **Anais [...]**. Vancouver: University of British Columbia, 2009, p. 1-6.

STEWART, Iain Douglas; OKE, Timothy Richard. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.

STEWART, Iain Douglas. Why should urban heat island researchers study history? **Urban Climate**, Amsterdã, v. 30, p. 100484, 2019.

THOM, Jasmine; SZOTA, Christopher; COUTTS, Andrew; FLETCHER, Tim; LIVESLEY, Stephen. Transpiration by established trees could increase the efficiency of stormwater control measures. **Water Research**, Kidlington, v. 173, p. 115597, 2020.

ZANTER, Karen. **Landsat 8 (L8) data users handbook**. Landsat Science Official Website, USGS - U.S. Geological Survey, Virgínia, v. 33, 2016.

VENTER, Zander; BROUSSE, Oscar; ESAU, Igor; MEIER, Fred. Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 242, p. 111791, 2020.

VENTER, Zander; KROG, Norun Hjertager; BARTON, David. Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 709, p. 136193, 2020.

VENTURA NETO, Raul da Silva. **Circuito imobiliário e a cidade: coalizões urbanas e dinâmicas de acumulação do capital no espaço intraurbano de Belém**. 2012. 239 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

VENTURA NETO, Raul da Silva. Notas sobre a formação socioespacial da Amazônia. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 30, n. 2, p. 579-603, 2020.

VOOGT, James; OKE, Timothy Richard. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 86, p. 370-384, 2003.

WAI, Cheuk Yin; TARIQ, Muhammad Atiq Ur Rehman; MUTTIL, Nitin. A systematic review on the existing research, practices, and prospects regarding urban green infrastructure for thermal comfort in a high-density urban context. **Water**, Basel, v. 14, n. 16, p. 2496, 2022.

WANG, Wang; LIU, Kai; TANG, Rong; WANG, Shudong. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. **Physics and Chemistry of the Earth**, Kidlington, v. 110, p. 168-175, 2019.

WATERS, Ralph; ALLEN, Richard; TASUMI, Masahiro; TREZZA, Ricardo; BASTIAANSSEN, Win. **Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho Implementation**. Advanced Training and User's Manual. NASA EOSDIS/Raytheon Company/Idaho Department of Water Resources, Idaho, 2002.

WERNECK, Daniela Rocha. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília–DF**. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

ZANELLA, Maria Elisa; MOURA, Marcelo de Oliveira. O Clima das cidades do Nordeste brasileiro: contribuições no planejamento e gestão urbana. **Revista da ANPEGE**, Dourados, v. 9, p. 75-89, 2013.

ZHA, Yong; GAO, Jay; NI, Shaoxiang. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 24, p. 583–594, 2003.