

UFPA

PPGEC

**Universidade Federal
do Pará**



Aline Lopes Gonçalves Porto

**Método para análise de Ilhas de
Calor em cidades de clima equatorial
úmido**

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Luiz Maurício Furtado
Maués

Belém – Pará – Brasil
2022

Aline Lopes Gonçalves Porto

Método para análise de Ilhas de Calor em cidades de clima equatorial úmido

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués

Belém, 27 de setembro de 2022

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Aline Lopes Gonçalves Porto

TÍTULO: **Método para análise de Ilhas de Calor em cidades de clima equatorial úmido.**

GRAU: Doutor

ANO: 2022

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Aline Lopes Gonçalves Porto

Conjunto Alacid Nunes, Alameda Marilda Nunes, 120

Guamá. 66.075-070

Belém – PA – Brasil.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

P839m Porto, Aline Lopes Gonçalves.
Método para análise de Ilhas de Calor em cidades de clima equatorial úmido. / Aline Lopes Gonçalves Porto. — 2022.
193 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. Clima urbano. 2. ilhas de calor urbanas. 3. Conforto térmico. 4. Envi-met. 5. Câmera termal. I. Título.

CDD 691



MÉTODO PARA ANÁLISE DE ILHAS DE CALOR EM CIDADES DE CLIMA EQUATORIAL ÚMIDO

AUTORA:

ALINE LOPES GONÇALVES PORTO E SILVA

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 27 / 09 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Aldomar Pedrini
Membro Externo (UFRN)

Prof. Dra. Norma Ely dos Santos Beltrão
Membro Externo (UEPA)

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico esta pesquisa a aqueles que se foram durante a pandemia. A ciência salva!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades me dada, e por me fazer enxergar as oportunidades e aproveitá-las.

Aos meus pais. Minha mãe que nunca largou a minha mão, e sempre priorizou os meus estudos. E meu pai por vibrar com minhas conquistas, sei que de onde ele está continuará vibrando.

Aos meus filhos, Milena, Alice e Guilherme, todos nasceram durante uma fase da minha vida acadêmica (graduação, mestrado e doutorado), não é fácil conciliar a vida e mãe e estudante, porém, é possível, além de incentivador, meus filhos, saibam que vocês são a motivação da minha vida.

Ao meu marido, que segurou a barra de ser pai e dono-de-casa para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Agradeço ao meu irmão, o maior presente que meus pais poderiam ter me dado, que tantas vezes me substituiu como “filha” e como “mãe”, obrigada por ser esse parceiro de vida.

Ao meu querido orientador de mestrado, Prof. Demarzo, que me deu a chance lá atrás, acreditando em mim e me dando a oportunidade de ser mestra.

Agradeço ao professor Alcebíades Negrão Macêdo, que também acreditou no meu potencial, e me selecionou entre tantas outras pessoas, para assim cursar o doutorado na Universidade Federal do Pará.

Agradeço a todos os meus chefes que passaram pela Comissão Regional de Obras 8, que apoiaram meus estudos, permitindo que eu ajustasse meu horário de trabalho para poder cursar simultaneamente o doutorado.

Toda minha gratidão ao meu orientador, Prof. Luiz Maurício, um professor comprometido, dedicado, compreensível, exigente, humano. Professor, saiba que és um exemplo a ser seguido, o meio acadêmico precisa de mais professores como você.

Agradeço a professora Regina Brabo pela oportunidade em exercer o estágio docente juntamente com ela.

Agradeço aos professores Alberto Sá, Aldemar Pedrini e Norma Beltrão, por sempre estarem dispostos a tirarem as minhas dúvidas em relação a esse mundo que eu resolvi estudar (conforto térmico e sensoriamento remoto).

Obrigada a todos meus amigos que de alguma forma contribuíram com a realização desse trabalho, meus amigos da época da graduação que continuaram comigo, meus amigos do mestrado, do trabalho, meus amigos da vida, para não correr o risco de esquecer alguém, não citarei nomes, porém, sintam-se abraçados.

Porém, agradeço especialmente a algumas pessoas sem as quais eu não chegaria até aqui, ao Bruno, que teve a cara e coragem para se inscrever no doutorado comigo, me incentivando, e juntamente com Larissa indo atrás de congresso para enviar artigos; à Camila, que muitas vezes me tirou dúvidas sobre georreferenciamento e QGis; aos amigos do trabalho que não desligavam meu computador, permitindo que minhas simulações rodassem; aos meus vizinhos Marília e Jr, que muitas vezes distraíram meu Gui me permitindo alguns momentos de paz; agradeço à família Oliveira Soares pelas traduções para inglês.

Sempre no meu coração, e exemplo pela profissão de professor, minha amada tia Ana, que se foi durante a pandemia, mas que sempre será minha referência.

E todos aqueles que perdi durante o trágico ano de 2021, meus tios Ronaldo, Floriano, Sérgio e meu pai Carlos, quando eu achava que não teria mais força para continuar, pensava em vocês.

RESUMO

PORTO, Aline Lopes Gonçalves. **Método para análise de Ilhas de Calor em cidades de clima equatorial úmido**. 2022. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará (2022)

A presente pesquisa aborda a influência da morfologia urbana no conforto térmico da cidade e na formação de Ilhas de Calor urbanas, tendo como objeto de estudo Belém-PA, cujo clima é equatorial úmido. Pretendeu-se elaborar uma metodologia de fácil acesso à pesquisadores, propondo o uso de equipamentos de baixo custo e softwares gratuitos. Inicia-se com o embasamento teórico referente a clima urbano, recursos computacionais aplicados ao conforto térmico, e características da cidade de Belém. No segundo momento é explanada a metodologia utilizada, que começa com a elaboração do mapa termal da cidade, por meio do software QGIS utilizando imagem do satélite Landsat 8, de onde serão selecionadas as zonas a serem estudadas. Para a caracterização das áreas escolhidas foram empregados dados obtidos por imagens de satélite e por medições realizadas com câmera termal e termohigro-anemômetro digital, sendo analisados o fator de visão do céu, fator W/H/L, superfícies construídas, rugosidade, materiais de superfície, sombreamento, adensamento e porosidade. Também foi aplicada a metodologia de Zonas Climáticas Locais através do método WUDAPT e método observacional. Por fim, foi simulado com o software ENVI-met o comportamento das áreas escolhidas a partir das variáveis obtidas (temperatura do ar, umidade e velocidade do vento). Realizou-se a análise comparativa através da correlação de variáveis por regressão linear simples, iniciando a correlação entre a Temperatura de superfície (T_s) e a Temperatura do ar (T_a), e posteriormente, a correlação entre as características de morfologia urbana com a temperatura do ar, temperatura de superfície e entre si. Resultando assim, na identificação de qual característica da morfologia urbana possui maior influência na temperatura e formação de ilhas de calor urbanas em cidades de clima equatorial úmido.

Palavras-chaves: Clima urbano, ilhas de calor urbanas, Conforto térmico, Envi-met, Câmera termal

ABSTRACT

PORTO, Aline Lopes Gonçalves. **Method for analysis of Heat Islands in cities with wet equatorial climate**. 2022. 193 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Pará, Belem, Para (2022)

His research is focused on the influence of urban morphology on a city's thermal comfort and the formation of urban heat islands. Our study case is the city of Belem-PA with its wet tropical climate. We aimed to outline a methodology that researchers could quickly adopt, with low-cost tools and free software. We start the basis of this approach with a theoretical analysis of the urban climate, city features and computational resources available regarding thermal comfort. Subsequently, we explained the methodology that starts with the design of the city's thermal map through QGIS software and imaging from the Landsat 8 Satellite. From those images, we handpick which zones to investigate. For the categorization of the chosen areas, data obtained from satellite images as well as thermal cameras and digital hygro-thermo-anemometers measurements were used. Among the analysed aspects we included the sky view factor, W/H/L factor, constructed surfaces, roughness, surface materials, shading, density and porousness. The Local Climate Zones method was also applied, through the WUDAPT and observational methods. Finally, the behaviour in the chosen areas was simulated through the ENVI-net software based on obtained variables (air temperature, humidity and wind velocity). With this data in hands, a comparative analysis was done through the correlation of variables by a simple linear regression, instigating the connection between surface temperature and air temperature, and afterwards, the correlation linking characteristics of urban morphology with air temperature and surface temperature as well as between the characteristics by itself. This resulted in the identification of which characteristic of urban morphology exerts greater influence on the temperature and the formation of urban heat islands in cities with a wet equatorial climate.

*“Nunca desista de seus sonhos.
Procure-os até o fim da estrada, se necessário,
mesmo que esteja esburacada, manchada de sangue e lágrimas,
eles estarão ali, em alguma daquelas curvas do caminho da vida.
E você saberá reconhecê-los quando os encontrar,
pois normalmente os sonhos se apresentam como uma paisagem
extasiante que se contempla com os braços abertos.”*

(Sérgio Willians)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Hipótese	23
1.2. Justificativa e problema de pesquisa	23
1.3. Objetivos	25
1.3.1. Objetivo Geral	25
1.3.2. Objetivos específicos.....	25
1.4. Estrutura do Trabalho.....	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. O CLIMA URBANO E AS MUDANÇAS DA PAISAGEM	27
2.1.1. Conceitos físicos para a análise do comportamento térmico	31
2.1.2. A influência da configuração urbana no conforto térmico.....	39
2.1.3. Ilhas de Calor Urbana.....	52
2.1.4. Zonas Climáticas Locais	57
2.1.5. Equipamentos	60
2.2. RECURSOS COMPUTACIONAIS NO ESTUDO DO CONFORTO TÉRMICO 63	
2.2.1. Sistema de Informação Geográfica	64
2.2.2. O AutoCAD na análise de superfície urbana	66
2.2.3. O uso do Sketchup para a contribuição da análise do conforto térmico	66
2.2.4. O uso do ENVI-met na análise climática urbana	67
2.3. TERRITÓRIO E CLIMA DA CIDADE DE BELÉM.....	69
2.3.1. A urbanização de Belém.....	70
3. MATERIAIS E MÉTODOS	93
3.1. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA COLETA DE DADOS 100	
3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDOS.....	102

3.2.1.	Mapa de Temperatura de superfície	102
3.2.2.	Áreas de Estudo.....	104
3.2.3.	Coleta de dados	104
3.2.4.	Classificação das Zonas Climáticas Locais em Belém	111
3.3.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	115
3.3.1.	Característica dos cenários	115
3.3.2.	Planta-Base.....	115
3.3.3.	Configurações dos dados de entrada	117
3.3.4.	Configurações dos dados de saída.....	117
3.3.5.	Geração dos mapas.....	117
3.4.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	117
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	120
4.1.	MAPA DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	120
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	121
4.2.1.	Fator de Visão do Céu (FVC).....	127
4.2.2.	Análise W/H/L	129
4.2.3.	Análise Superfície construída.....	130
4.2.4.	Análise Rugosidade.....	133
4.2.5.	Análise de materiais de superfície.....	135
4.2.6.	Sombreamento.....	142
4.2.7.	Adensamento	144
4.2.8.	Porosidade	145
4.2.9.	Classificação das LCZs Belém.....	150
4.2.10.	Medição das Variáveis Microclimáticas no local.....	157
4.3.	SIMULAÇÃO ENVI-MET.....	163
4.4.	ANÁLISE COMPARATIVA TERMAL.....	164
4.5.	ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE VARIÁVEIS	172

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	181
5.1. Principais conclusões	181
6. REFERÊNCIA.....	184

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores dos parâmetros geométricos e de cobertura do solo para as LCZs	59
Tabela 2 - Valores dos parâmetros termais, radiativos e metabólicos para as LCZ	59
Tabela 3 - Tabela com percentual domicílios por bairro em Belém	84
Tabela 4 - Dados climatológicos do dia 30/04/2021	91
Tabela 5 - Bandas e resoluções dos sensores do satélite Landsat 8	100
Tabela 6 - Níveis de correlação	118
Tabela 7 - Proporção W/H	130
Tabela 8 – Relação entre superfície permeável e superfície impermeável	131
Tabela 9 - Escala e Rugosidade predominante em cada zona	135
Tabela 10 - Densidade de cada zona	144
Tabela 11 - Comparação entre a metodologia observacional e a metodologia WUDAPT	157
Tabela 12 - Dados obtidos através das medições realizadas “in loco”	158
Tabela 13 - Temperaturas médias obtidas a partir da câmera termográfica	161
Tabela 14 - Temperatura de superfície captada pela câmera termal, e temperatura do ar captada pelo termohigrometro	173
Tabela 15 - Correlação linear de Pearson entre W/H x Ta	175
Tabela 16 - Coeficiente de correlação das Zonas idividualmente	176

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática das camadas da atmosfera para abordagem do clima urbano	29
Figura 2 - Esquema das Escalas Vertical e Horizontal, Microclima e Mesoclima	30
Figura 3 - Esquema de sombreamento por árvores e por edifícios em Cânions urbanos.	36
Figura 4 - Relação entre superfície permeável, infiltração no solo, e evapotranspiração	38
Figura 5 – Altura (H), Largura (W) e Comprimento do Cânion (L).....	42
Figura 6 - Liberação à noite do calor armazenado	44
Figura 7 - Representação do comportamento idealizado do fluxo de ar gerado no interior do cânion: (a) quando o vento no topo do dossel incide perpendicularmente ao eixo do cânion, (b) paralelamente ao eixo do cânion e (c) em ângulo com o eixo do cânion	45
Figura 8 - Exemplo de representação de FVC através de foto com lente olho-de-peixe.	46
Figura 9 - Esquema de ventilação urbana em climas úmidos: Posicionamento correto/Posicionamento habitual	47
Figura 10 - Fatores que influenciam a densidade urbana	50
Figura 11 - Vantagens e Desvantagens da Baixa e Alta Densidade.....	51
Figura 12 - Perfil da ilha de calor urbana	53
Figura 13 - Ilha de calor urbana. Esquema de troca de calor	56
Figura 14 - O uso do Sketchup na pesquisa de Torres (2017)	67
Figura 15 - Mapa da Localização do Município de Belém	69
Figura 16 - Gráfico Populacional e densidade dos bairros estudados nesta pesquisa	70
Figura 17 - Croqui do início do processo de ocupação da cidade de Belém, com espacialização das primeiras ruas (números romanos) e igrejas (números arábicos), tendo o alagado do Piry como um de seus primeiros “obstáculos” naturais à expansão urbana.	71
Figura 18 - Localização aproximada dos “Lázarus do Tucunduba”	72
Figura 19 - À esquerda, o Plano de Expansão de Belém (1883-1886), à direita, a ocupação da cidade no início do século XX.....	73
Figura 20 - Ocupações em áreas de baixada no final da década de 1960, bairro da Matinha (atual bairro de Fátima) e bairro da Terra-firme, respectivamente.....	74
Figura 21 - Folder promocional do Conjunto Satélite e Conjunto habitacional Alacid Nunes, inaugurado em 1968.....	75
Figura 22 - a) Visão da Avenida Augusto Montenegro, março de 1978. b) Imagem atual da Rodovia Augusto Montenegro.....	76
Figura 23 - Avenida Visconde de Souza Franco antes da macrodrenagem	77
Figura 24 - Mosaico de tipologias da Área de Expansão de Belém.....	78
Figura 25 - Linha do tempo da urbanização da cidade de Belém	79
Figura 26: Cotas altimétricas da área continental do Município de Belém.....	80

Figura 27 - Mapa de localização das bacias hidrográficas do Município de Belém ..	81
Figura 28 - Imagem de Belém antes do processo de verticalização, e imagem de Belém atualmente, respectivamente.	83
Figura 29 - Porcentagem de domicílios em forma de apartamento nas Capitais de Estados da Amazônia legal.....	83
Figura 30 - Porcentagem de domicílios em apartamentos por bairros de Belém (2010).	85
Figura 31 - Terreno localizado na Avenida Senador Lemos / Passagem São José / Avenida Pedro Álvares Cabral, Bairro Sacramento, anos de 2009 e 2021, respectivamente.	87
Figura 32 - Zona Bioclimática 8.....	87
Figura 33 - Gráfico temperaturas médias dos meses de setembro de 2000 a 2019....	88
Figura 34 - Gráfico com a precipitação total mensal no ano de 2021	89
Figura 35 - Gráfico com a precipitação total anual dos anos 2011 a 2021	89
Figura 36 - Média Anual da Umidade relativa do Ar de Belém (2011-2019)	90
Figura 37 - Velocidade média dos ventos durante o ano de 2021.....	91
Figura 38 - Média de Horas de Isolação por dia em 2018	92
Figura 39 - Fluxograma da primeira fase da pesquisa.....	94
Figura 40 - Segunda fase, elaboração do método proposto.....	95
Figura 41 - Terceira fase, aplicação do método proposto	96
Figura 42 - Procedimentos metodológicos.....	97
Figura 43 - Quarta fase, aplicação da classificação das Zonas Climáticas Locais....	98
Figura 44 - Fluxograma de como foram analisados os resultados obtidos	99
Figura 45 - Fluxograma geral das fases metodológicas	99
Figura 46 - Termohigro-Anemômetro Digital e Câmera termográfica, modelo HT-02D	101
Figura 47 - Informações disponíveis na imagem registrada.....	102
Figura 48: Passo-a-passo para a obtenção da imagem Landsat.....	103
Figura 49 - Representação do aplicativo da Web <i>Dynamic Overshadowing</i>	105
Figura 50 - Exemplo de dimensionamento da área do cânion urbano	106
Figura 51: Fluxograma de classificação manual de materiais de superfície	109
Figura 52 - Estações Inmet em Belém.....	111
Figura 53 - Tutorial disponível no site WUDAPT exemplificando como deverá ser feita a seleção das áreas.....	113
Figura 54 - Modelo de ficha	114
Figura 55 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos para simulação	115
Figura 56 - Interface do módulo space do software ENVI-met 5	116
Figura 57 - Mapa de Mapa de temperatura de superfície da terra, ano 2019.....	121
Figura 58 - Áreas de estudo.....	122
Figura 59 - Zona 1	123
Figura 60 - Zona 2	123
Figura 61 - Zona 3	124
Figura 62 - Zona 4	124

Figura 63 - Zona A	125
Figura 64 - Zona B	125
Figura 65 - Zona C	126
Figura 66 - Zona D	126
Figura 67 - a) Imagem gerada através do Google Earth, e b) demonstração do aplicativo da Web Dynamic Overshadowing	127
Figura 68 – Fator de Visão do céu com imagem tipo olho de peixe referente a cada zona	128
Figura 69 - Comparativo entre Zonas do Fator de Visão do Céu.....	129
Figura 70 - Relação de percepção dos edifícios e seus entornos imediatos	130
Figura 71 - Gráfico de superfície construída.....	132
Figura 72 - Relação Superfície Construída e Superfície impermeável	132
Figura 73: Porcentagem da cobertura vegetal das bacias hidrográficas da Região Metropolitana de Belém onde estão localizadas as áreas analisadas - 1984, 1999 e 2018	133
Figura 74 - Níveis de escalas nas Zonas 1, 2, 3, 4, A, B, C e D.....	134
Figura 75 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 1.....	135
Figura 76 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 2.....	136
Figura 77 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 3.....	136
Figura 78 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 4.....	137
Figura 79 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona A.....	137
Figura 80 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona B	138
Figura 81 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona C	138
Figura 82 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona D.....	139
Figura 83 - Gráfico Comparativo das Porcentagens da Classificação Supervisionada	139
Figura 84 - Gráfico Comparativo das Porcentagens de Vegetação Densa e Telha de Fibrocimento	140
Figura 85 - Comparativo NDVI e Vegetação Classificação Supervisionada.....	141
Figura 86 - Correlação entre NDVI e Porcentagem de Vegetação Densa	142
Figura 87 - Relação sobre o sombreamento meses de Abril e Novembro, Zona 3.....	143
Figura 88 - Percentual de sombreamento	143
Figura 89 - Gráfico da relação entre a densidade urbana das áreas analisadas e as temperaturas medidas	145

Figura 90 - Zona 1: Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	146
Figura 91 - Zona 2 : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	146
Figura 92 - Zona 3: Direção dos ventos - . Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	147
Figura 93 - Zona 4 : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	147
Figura 94: Zona A - Direção dos ventos. Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	148
Figura 95 - Zona B : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	148
Figura 96 - Zona C : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	149
Figura 97 - Zona D : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente	149
Figura 98 - Gráfico de precisão	151
Figura 99 - Mapa gerado pelo App Web do WUDAPT	152
Figura 100 - Características da Zona 1 aplicada a LCZ	153
Figura 101 - Características da Zona 2 aplicada a LCZ	153
Figura 102 - Características da Zona 3 aplicada a LCZ	154
Figura 103 - Características da Zona 4 aplicada a LCZ	154
Figura 104 - Características da Zona A aplicada a LCZ	155
Figura 105 - Características da Zona B aplicada a LCZ	155
Figura 106 - Características da Zona C aplicada a LCZ	156
Figura 107 - Características da Zona D aplicada a LCZ	156
Figura 108 - Gráfico de Temperaturas do ar medidas no turno vespertino.....	158
Figura 109 - Gráfico de Temperaturas do ar medidas no turno noturno	159
Figura 110 - Comparação das temperaturas do ar nos turnos vespertino e noturno	160
Figura 111 - Fachada em frente ao pondo de medição da Zona 2, respectivamente: Fotografia da fachada, imagem termal da fachada, imagem termal da via em frente ao ponto.....	161
Figura 112 - Gráfico com as Temperatura de Superfícies medidas no turno da tarde	162
Figura 113 - Gráfico com as Temperatura de Superfícies medidas no turno da noite	163
Figura 114 - Modelagem do cenário no aplicativo <i>SPACES</i>	163
Figura 115 - Geração de mapas no Leonardo.....	164
Figura 116 - Campo Térmico Zona 1	165
Figura 117 - Campo Térmico Zona 2.....	166
Figura 118 - Campo Térmico Zona 3	167
Figura 119 - Campo Térmico Zona 4.....	168
Figura 120 - Campo Térmico Zona A	169

Figura 121 - Campo Térmico Zona B	170
Figura 122 - Campo Térmico Zona C	171
Figura 123 - Campo Térmico Zona D	172
Figura 124 - Correlação entre Temperaturas de superfície x Temperatura do ar.....	173
Figura 125 - Correlação linear de Pearson entre Ta x FVC (período mais chuvoso noturno)	174
Figura 126 - Gráficos de dispersão de correlação entre superfícies de telha de fibrocimento x Temperatura do ar	178

Lista de Quadros

Quadro 1 - Relação de percepção dos edifícios e seus entornos imediatos	43
Quadro 2 - Quadro com os efeitos aerodinâmicos de vento sobre conjuntos de edifícios	48
Quadro 3 - Ilha de Calor Urbana de Superfície e Atmosférica	55
Quadro 4 - Sistema de classificação da paisagem através de zonas climáticas locais (LCZ)	57
Quadro 5 - Características das classes de materiais de superfície mapeadas	108
Quadro 6 - Correlações Área permeável x Ta e Área Construída x Ta	177
Quadro 7 - Correlações de materiais de superfície por Zona	179
Quadro 8- Quadro Correlação Ventos x Ta	180

Lista de Abreviaturas e Siglas

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta tese. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados ao longo do texto desta pesquisa.

Símbolo	Significado
FVC	Fator de Visão do Céu
QGIS	Quantum Gis
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilhas de Calor Urbanas
ITCZ	Zona de convergência intertropical
INMET	Instituto nacional de meteorologia
LCZ	Local Climate Zones
SIG	Sistema de informação geográfica
T_a	Temperatura do ar
T_s	Temperatura de superfície
UBL	Urban Boundary Layer
UHI	Urban Heat Island
UR	Umidade Relativa do Ar
USGS	United States Geological Survey
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

Lima (2018) aponta o crescimento desordenado como um dos causadores dos impactos ambientais que assolam a maioria das cidades, estes impactos incluem as ilhas de calor urbanas (ICU), inundações, deslizamentos de terra, etc. Para minimizar esses impactos são necessárias políticas urbanas que busquem equilíbrio entre as demandas de serviços e os investimentos em estrutura. Seto e Dhakal *et al.* (2015) acreditam que os próximos vinte anos serão de suma importância para mitigação dos efeitos adversos da urbanização, os autores complementam que os elementos chaves do planejamento e projeto urbano são a densidade, o uso misto do solo, a conectividade e a acessibilidade. Para Givoni (1994), políticas públicas e o desenho urbano podem interferir no clima local, influenciando o conforto térmico do ambiente externo assim como do interior das edificações.

Para compreender os fenômenos físicos que ocorrem nas cidades é necessário o entendimento da formação da paisagem como um todo, incluindo um conjunto de variáveis que compreendem os elementos construídos tanto quando os elementos naturais (MEGDA, 2020). Como principais alterações na paisagem, Rampazzo (2019) aponta a substituição da cobertura vegetal por pavimentações impermeáveis, provocando a diminuição da quantidade de água disponível para evaporação. Costa (2015) complementa ainda outro ônus causado pela substituição dos materiais de superfície do solo, que é a canalização dos corpos d'água, diminuindo a vazão, e como consequência as enchentes.

Brown e Gillespie (1986), citados por Pacifici (2019), enfatizam a necessidade dos planejadores urbanos aproveitarem ao máximo as características físicas existentes no local, para assim, gerar ambientes externos mais confortáveis aos pedestres. A cidade pensada de forma climaticamente responsável permite a convivência harmoniosa com seus moradores, permitindo a economia no uso de energia, além de aumentar o conforto dos pedestres, tendo como consequência a utilização dos espaços de convívio e até mesmo a diminuição da dependência de veículos automotores (LIMA, 2018). Gonzalez (2015) explana, baseado em trabalhos de outros autores, as questões que motivam os estudos sobre microclima urbano e Ilhas de Calor Urbanas (ou UHI, em inglês *Urban Heat Island*), como, as alterações no consumo de energia, geração de poluentes, mudanças dos padrões climáticos locais e conforto térmico. Além das questões citadas, Agathangelidis *et al.* (2019) apontam outras decorrências atribuídas às ilhas de calor urbanas, como é o caso implicações à saúde pública, ocorrendo, até mesmo mortes devido às altas temperaturas.

Rossi e Krüger (2005) entendem que dois fatores favorecem a formação das Ilhas de calor urbanas, a primeira razão é a baixa umidade existente para esvaivar o calor do sol; e a outra motivação é a combinação de dois fatores, sendo o tipo de material construtivo com alta absorvância e a presença de cânions urbanos. Nakata-Osali (2016) cita ainda outros agentes que contribuem na formação de ICU, como o calor gerado por processos industriais, a rugosidade das cidades que diminuem a circulação do vento, a poluição urbana, e a diminuição de superfícies arbóreas.

López (2020) cita três formas de medição de Ilha de Calor Urbanas: a) através da diferença de temperatura do ar entre a área urbana e rural; b) transectos espaciais; c) balanço de energia urbana. No seu conceito inicial, os dados sobre ilhas de calor são obtidos através da diferença de temperatura entre as áreas urbanas e as áreas rurais, porém, isto restringe os estudos aplicados ao clima da cidade. Desta forma, o sistema de classificação proposto por Stewart e Oke (2012), que divide a cidade em zonas climáticas locais (Local Climate Zones), auxilia na comparação de temperatura dentro da própria área urbana, esta é uma forma de analisar o clima urbano. Oke (2006) apresenta outras metodologias para análise, como as observações em campo, sensores remotos, modelos físicos (experimentos obtidos em laboratórios ou ao ar livre), modelos numéricos (simulações computacionais) e modelos empíricos (experimentos estatísticos). O mesmo autor ainda enfatiza que, para uma avaliação mais precisa, é necessário caracterizar o que compõe a paisagem urbana do local a ser medido (dimensões dos edifícios, largura das vias, tipo de material de superfície, etc.). Lucena (2019) cita como exemplo de observações de campo os dados obtidos por geotecnologias, como as estações meteorológicas, sensores remotos e transectos. Zhou et al. (2019) enfatiza que a combinação de técnicas que meçam a temperatura do ar e da superfície fornecerão um retrato mais completo do ambiente térmico urbano.

Zaidan (2017) conceitua geotecnologias como o conjunto de tecnologias que utiliza de dados e informações georreferenciadas, citando como exemplos a cartografia digital, a aerofotogrametria, geodésia, e sistema de posicionamento global (GPS). Para Megda (2020) o uso de geotecnologias nos estudos de engenharia urbana ainda tem seu potencial pouco aproveitado, podendo ser mais bem utilizadas como metodologia em estudos do clima urbano, principalmente em casos que necessitem levantamentos de grande quantidade de informações.

Outra ferramenta que vem sendo cada vez mais empregada no auxílio do desenvolvimento urbano são as simulações computacionais, tem-se como exemplo de estudo o trabalho de Barbosa (2018) que aplica simulações realizadas no software ENVI-met para

entender a influência da verticalização na sensação térmica urbana na cidade de Maringá/PR. Torres (2017) também fez uso de simulações computacionais com o ENVI-met para analisar a interferência da forma urbana e do adensamento no desempenho climático em Arapiraca/AL. O ENVI-met também é utilizado como ferramenta na tese de Lima (2018), para simular cânions urbanos em Umuarama/PR. Hen *et al.* (2012) realizaram pesquisa comparando simulações entre dois softwares, o *Steve* e o *ENVI-met*, tendo como objeto de estudo Singapura.

Pacifici (2019) aponta a necessidade de levar em consideração os estudos do ambiente climático para que seja possível prever o impacto da inserção de novas edificações na paisagem existente, e conseqüentemente, mitigar os efeitos adversos do clima, a autora ainda ressalta a importância de utilizar um estudo de caso para aplicar essa avaliação. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objeto de estudo a cidade de Belém, Pará, que apresenta clima equatorial úmido, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger.

Esta pesquisa possui caráter interdisciplinar, integrando as áreas de geociências e construção civil, com a utilização de ferramentas de geotecnologia, simulação, e correlação de variáveis encontradas que influenciam o clima urbano.

1.1. Hipótese

É possível avaliar o impacto da morfologia urbana no clima da cidade utilizando metodologias que empreguem ferramentas de baixo custo.

1.2. Justificativa e problema de pesquisa

Entender de que forma as configurações espaciais urbanas e os materiais de superfície contribuem na formação de ilhas de calor é essencial para que sejam desenvolvidas diretrizes e políticas públicas que amenizem o aquecimento das cidades de clima equatorial úmido, como é o caso de Belém. Wang; Ren e Lau (2017) e Agathangelidis, Cartalis e Santamoutis (2019) ressaltam a importância de identificar as áreas que mais sofrem influência térmica na cidade para, assim, implementar de melhor forma políticas urbanas. É interessante que durante as tomadas de decisões para criação ou atualização das legislações urbanas os seus planejadores busquem conhecer o clima urbano. Essa necessidade urgente é apresentada por Barbosa (2018), quando aponta que conforme projeções, em 2030 mais da metade das cidades existentes terão populações maiores do que 500 mil habitantes, sendo assim, se tornam necessárias políticas e planejamentos para áreas urbanas; visto que, esta população tenderá a ocupar áreas antes não ocupadas, transformando assim a paisagem (MACIEL, 2014).

Surgindo como aliadas ao melhor entendimento do clima urbano estão as novas técnicas e ferramentas computacionais, porém, como observa Vianna (2018), os acadêmicos de arquitetura e urbanismo têm dificuldade em assimilar dados de geotecnologias aplicados à formação do clima urbano, e observa-se a mesma dificuldade em estudantes e profissionais de outras áreas voltadas à construção civil. Dessa forma, entende-se a relevância de aplicar essas ferramentas na construção civil, para que sejam assim difundidas e tornem-se meio comum nesse campo de estudo.

As ferramentas de geotecnologias (como exemplo, o sensoriamento remoto) fornecem dados precisos, que podem ser empregados em paralelo com programas de simulação. Novas ferramentas e técnicas estão sendo cada vez mais usadas em pesquisas científicas referentes ao estudo do clima urbano. Megda (2020) utilizou VANT (veículos aéreos não tripulados, ou como são também conhecidos, drones) em seu trabalho sobre identificação de ICU (Ilhas de calor urbanas) em Franca/SP. Rampazzo (2020) empregou imagens de georreferenciamento para estudar a influência do clima urbano e formação de ilhas de calor urbanas de cidades do interior do Estado de São Paulo; Vianna (2018) fez uso de imagens termais do Landsat 8 para analisar o campo térmico de Brasília; López (2020) também uso deste instrumento de georreferenciamento em seus estudos sobre o clima da cidade de Quito, no Equador, e para analisar as imagens captadas a autora utilizou o software Saga Gis; Na Índia, mais especificamente em Calcutá e áreas adjacentes, Halder, Bandyopadhyay e Banik (2021) monitoraram através de sensoriamento remoto o efeito do desenvolvimento urbano na ilha de calor.

Nota-se que apesar da existência de inúmeros estudos relativos aos reflexos da configuração urbana sobre o clima da cidade, ainda são poucos os que tratam do clima de cidades amazônicas, que possuem clima equatorial, diferente da maioria das outras cidades brasileiras, que apresentam clima tropical. Estudos mais frequentes são realizados em Cingapura, que possui características climáticas semelhantes com a cidade de Belém; como exemplo, tem-se a pesquisa realizada por Yang, Wang e Kaloush (2015) que investigam o conforto térmico de uma rua cercada por arranha-céus, com foco no efeito provocado pelos cânions urbanos, simulando diferentes cenários a partir do software *ENVI-met*. Liu *et al.* (2022), em pesquisa mais recente, avaliaram o impacto de diferentes densidades de vegetação no conforto térmico em áreas residenciais de Cingapura.

Em relação a cidade de Belém, encontra-se o trabalho de Silva Júnior (2012), que realizou um estudo da presença de ilhas de calor na cidade de Belém, tendo como equipamentos

de medição climática as estações fixas, além disso, o autor compara a temperatura da área urbana com a área rural para detectar o fenômeno de ilha de calor.

Observa-se que grande parte dos estudos realizados na área de conforto térmico da cidade tem em sua metodologia o uso de equipamentos e programas computacionais caros ou de difícil acesso, fazendo com que os pesquisadores necessitem desembolsar grande recurso financeiro, ou que dependam da disponibilidade de empréstimo de instituições que possuem tais aparelhos. Logo, foram constatados dois fatores, o primeiro é que existe uma lacuna do conhecimento em relação ao estudo climático de cidades amazônicas, o que motivou a escolha da cidade de Belém-PA; o segundo ponto, é a necessidade de metodologias de baixo custo e fácil acesso em pesquisas sobre o clima urbano. Desta forma, este trabalho baseia-se na seguinte pergunta: É possível analisar os causadores de ilhas de calor urbanas em cidades de clima equatorial úmido através de métodos de baixo custo e fácil acesso?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Esta tese tem como objetivo identificar a influência da morfologia urbana e materiais de superfície na formação de ilhas de calor urbanas em cidades de clima equatorial úmido, propondo como metodologia a utilização de equipamentos e recursos de baixo custo e fácil acesso ao meio acadêmico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Elaboração do mapa termal de Belém;
- Comparar a diferença entre temperatura do ar e temperatura de superfície na cidade de Belém;
- Aplicabilidade da metodologia de Zonas Climáticas Locais na cidade de Belém;
- Identificar quais variáveis agem diretamente na formação de Ilhas de calor urbana em cidades com clima equatorial úmido;
- Contribuir com o desenvolvimento de políticas públicas voltadas a configuração urbana otimizando o conforto térmico.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho apresenta sua estrutura constituída de cinco capítulos, além das referências bibliográficas e anexos.

O capítulo 1, refere-se à introdução, onde estão inseridos a contextualização do trabalho, a justificativa e a problemática, assim como objetivos e a hipótese.

O segundo capítulo é composto pela fundamentação teórica, onde são abordados o conceito de clima, das variáveis urbanas que influenciam no conforto térmico da cidade, também são apresentados os equipamentos e recursos computacionais que auxiliam no estudo do clima e da cidade, e por fim, as características do objeto de estudo, a cidade de Belém.

Em seguida, o terceiro capítulo, refere-se aos conceitos metodológicos, materiais e métodos utilizados nessa pesquisa. Sendo abordados: os equipamentos utilizados; os procedimentos metodológicos para a obtenção das variáveis utilizadas na pesquisa; os processos para modelagem e simulação computacional

No capítulo quatro são apresentados os resultados das análises das áreas de estudo, e em seguida as correlações estatísticas entre a temperatura de superfície, temperatura do ar, materiais de superfície e morfologia urbana. Para isso, buscar-se-á o coeficiente de correlação (r) e o coeficiente de determinação (R_2).

E por fim, o último capítulo, apresenta as conclusões, além de considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O CLIMA URBANO E AS MUDANÇAS DA PAISAGEM

Oke (2006) define clima como o estudo das temperaturas, da umidade, da pressão atmosférica, do bioma local, etc.; já o “Clima urbano”, além dos fatores já citados, agrega as intervenções humanas. Os estudos relativos ao clima urbano têm seu primeiro registro com Luke Howard, que no século XIX realizou pesquisas sobre o excesso de calor na cidade de Londres, Inglaterra, em comparação com o campo, onde constatou que na cidade o calor é mais elevado em função da maior absorção da radiação solar pelas superfícies, além da falta de umidade para evaporação (VIANNA, 2018). Landsberg (1976) cita que ainda no século XIX, na França, Emilien Renou publicou trabalho relativo às alterações climáticas em Paris, analisando não só a temperatura, como a ventilação da cidade. Seguindo a linha do tempo, existem os trabalhos de Landsberg, em 1956, sobre climatologia, com o livro “The climate of towns”, este com o enfoque na poluição atmosférica; e posteriormente Chandler (1965) com o livro “The Climate of London”. No Brasil o marco dos estudos sobre clima se deu com Monteiro e Mendonça, em 1975, que definiram o SCU, Sistema Clima Urbano, classificado como um “sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”; a tese dos autores resultou em um modelo teórico para investigar o comportamento climático das cidades através da articulação com subsistemas de canais de percepção.

O termo “Ilha de Calor” foi firmado em 1960 por Gordon Manley quando fez um comparativo com um mapa topográfico onde existem cotas altimétricas de locais de maior e menor altitude, no mapa de ilha de calor acontece situação semelhante, todavia, são cotas de temperatura (FIALHO, 2012). Os estudos sobre ilhas de calor urbanas tiveram início no Brasil em 1985 com os trabalhos de Lombardo, com o uso das imagens do satélite NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) para encontrar a temperatura, e o Landsat para mapear São Paulo (VIEIRA e MACHADO, 2018).

Em 2006 foi publicado, pela World Meteorological Organization (Oke, 2005), o guia de orientações iniciais para observações meteorológicas representativas em locais urbanos, onde foram definidas as etapas de trabalho, como a seleção dos locais de implantação das estações de medições, os tipos de equipamentos, e a forma de medição dos diferentes elementos, tais como: a radiação solar, a temperatura, a umidade, o vento, e as precipitações. O Guia também disserta sobre imagens por sensoriamento remoto. Além disso, o Guia estabelece sobre

as Zonas Climáticas Urbanas (UCZ), que deu origem à classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL, ou LCZ, em inglês, *Local Climate Zones*).

Romero *et al.* (2019) citam a diferença entre elementos climáticos e fatores climáticos. Onde os elementos climáticos representam os valores relativos a cada clima, como a temperatura, a umidade do ar, as precipitações, e o movimento do ar. Já os fatores climáticos são divididos em globais (radiação solar, latitude, altitude, ventos, massas de água e terra), e os fatores climáticos locais (topografia, vegetação, superfície do solo). Em relação ao clima urbano, Vianna (2018) aponta a importância de identificar as características da cidade e seus atributos, acreditando que o campo térmico urbano é formado a partir destes fatores, e citando os edifícios como principal rugosidade das cidades. Lowry (1967), citado por Pacifi (2019), classifica as alterações das variáveis climáticas devido a cinco fatores: a) materiais altamente condutores; b) estrutura urbana em relação à energia solar; c) abundância de fontes de calor; d) redução da evapotranspiração; e) presença de partículas no ar.

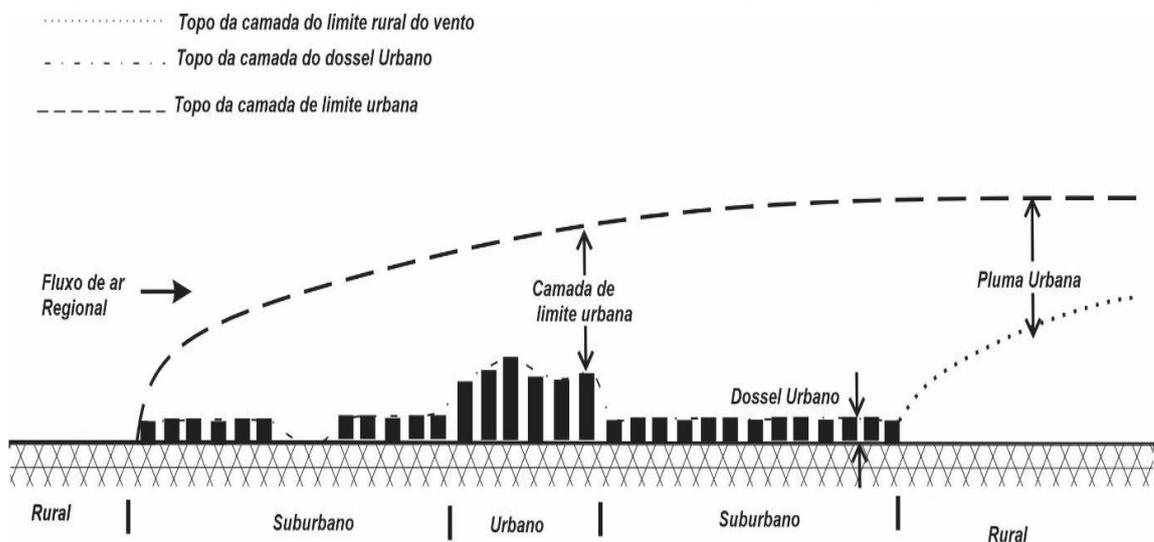
A urbanização modifica drasticamente o fluxo de calor de superfície, sendo que o principal fator que contribui para este fenômeno é a substituição da vegetação pelo asfalto e o concreto (SOUZA, SILVA e SILVA, 2016). Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016) destacam ainda como características da urbanização que contribuem para a troca de energia e condições térmicas, a poluição do ar, as superfícies impermeáveis, as propriedades térmicas dos materiais e a geometria urbana, até mesmo o aumento do número de veículos contribuem com as mudanças climáticas, aumentando o nível de CO₂ na atmosfera terrestre. Em relação à geometria urbana, ainda afirmam que esse fator é um dos principais causadores das formações de ilha de calor urbana.

As mudanças climáticas causadas pelas alterações da paisagem trazem à tona a importância da conscientização da humanidade em desenvolver ações voltadas para a sustentabilidade das cidades através da utilização de tecnologias limpas. Demuzere *et al.* (2021) apontam que a nova Agenda das Nações Unidas tem como foco a resiliência urbana, o clima e a sustentabilidade ambiental das cidades. Os autores ainda citam Masson *et al.* (2020) que apresentam dois dos quatro desafios identificados pelo Programa de pesquisa do Clima Mundial da Organização Meteorológica Mundial (OMM): Impactos nas cidades e urbanização. E conforme demonstra Castro, Venerai e Sabião (2017), a maior parte da população afetada com o aquecimento global encontra-se em países menos desenvolvidos, ratificando que somente o acesso a recursos tecnológicos poderá permitir que este problema seja enfrentado de forma eficaz.

Oke (2006), em relação ao clima urbano, dividiu as camadas da atmosfera em duas: vertical e horizontal. A escala vertical (Figura 1) se refere à altura das camadas de cobertura urbana, que se divide em:

- Camada do Dossel Urbano (em inglês, Urban Canopy Layer – UCL), que consiste na camada de ar sob os elementos de rugosidade urbana, se estende do solo até o nível de cobertura dos edifícios, compreende a microescala, é onde ocorrem os processos de troca de calor entre as superfícies construídas, é diretamente afetada pela configuração urbana e materiais construtivos;
- Camada Limite Urbana (em inglês, Urban Boundary Layer – UBL), está logo à cima da UCL, estende-se da camada entre o nível médio dos prédios até a área de influência da atmosfera, compreende a faixa da mesoescala ou de escala local.

Figura 1 - Representação esquemática das camadas da atmosfera para abordagem do clima urbano



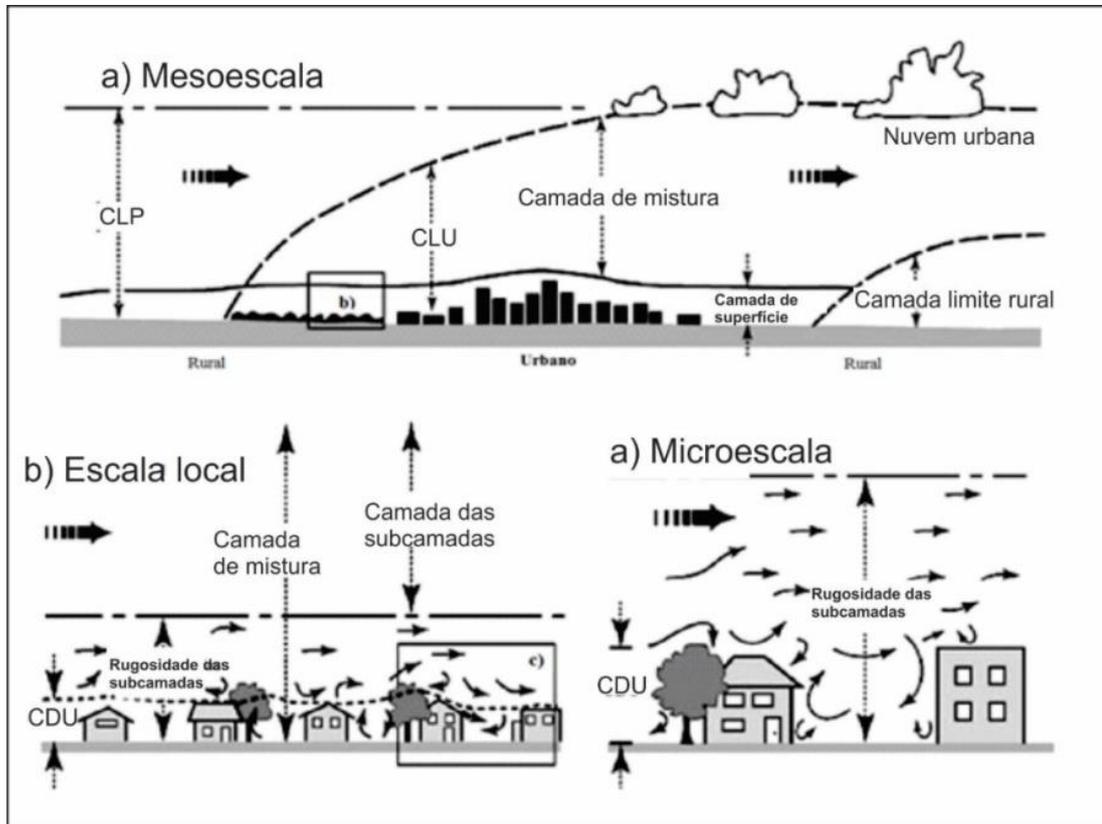
Fonte: adaptado de Oke (1976).

No sentido horizontal (Figura 2), Oke (2006) convencionou três escalas de análise:

- A mesoescala: É a cidade como um todo, com várias estações climáticas, e possui dezenas de quilômetros de extensão, é o clima regional, consequência da latitude, altitude, topografia e influências das massas de ar, abrange toda a cidade, os efeitos da ICU já são visíveis nesta escala;
- A escala local: O clima é devido às características da paisagem e do entorno, sua extensão é o bairro, variando de 0,5 km a 5 km;
- A microescala: o clima é considerado um microclima. E é definido a partir das edificações, áreas verdes e pavimentação, a extensão varia de milímetros a uma

centena de metros, representa o microclima urbano. O clima de uma cidade pode ser formado por diversos microclimas.

Figura 2 - Esquema das Escalas Vertical e Horizontal, Microclima e Mesoclima



Fonte: Baseado em Grimmond et al. (2010)

Dias e Nascimento (2014) citam a subdivisão do clima urbano em mesoclima, topoclina e microclima, onde o mesoclima corresponde à influência integrada à cidade, como as barreiras topográficas; já o microclima, corresponde à influência dos elementos urbanos, como os edifícios. Os instrumentos que realizam medições em alturas menores fornecem dados referentes ao microclima, já os instrumentos que realizam medições em alturas maiores oferecem dados do clima local.

A morfologia da cidade influencia em seu clima, seja através da sua configuração, com a disposição dos edifícios e vias, ou com os tipos de materiais construtivos utilizados nos edifícios, e até mesmo nos materiais de superfície terrestre, sejam eles naturais ou aqueles que sofreram a interferência do homem. Para o melhor entendimento deste processo, serão abordados a partir da literatura existente, os principais conceitos que envolvem o clima e a cidade, iniciando com os conceitos físicos no campo térmico.

2.1.1. Conceitos físicos para a análise do comportamento térmico

Deve-se ressaltar que além das cores, outras características dos materiais também irão influenciar na absorvência de sua superfície, como é o caso de sua composição química e rugosidade. A energia absorvida irá aquecer o material, e parte dessa energia será reemitida para a atmosfera. López (2020) destaca que as características dos materiais construtivos podem motivar a reflexão, emissão e absorção da energia solar, assim, influenciando no desenvolvimento de ICU (ilhas de calor urbanas).

2.1.1.1. Radiação Solar

Para Oke (1978) em relação ao estudo do clima, a faixa de espectro solar relevante está restrita aos comprimentos de onda de 0,10 a 100,00 μm . Estas, divididas em duas faixas bem distintas, umas que vão até 3,00 μm , designada radiação de onda curta (OC), e a outra que vai de 3 a 100 μm , denominada radiação de onda longa (OL).

- a) Radiação de ondas curtas: É a radiação a partir do sol, com comprimento de onda de 0,3 a 3,0 μm ;
- b) Radiação de ondas longas: É a radiação originada a partir de fontes com temperaturas próximas à temperatura ambiente, com comprimentos de onda superiores a 3,0 μm .

A latitude de um local define a intensidade de radiação solar que esse espaço recebe, e quanto maior a latitude, maior será a diferença de incidência de radiação recebida durante o inverno e verão, tendo seu ápice de intensidade ao meio-dia. Consequentemente, em locais próximos a linha do Equador, essa disparidade tende a ser menor durante as variadas estações do ano (SCHMITZ, 2014).

2.1.1.2. Balanço energético urbano

Balanço é a diferença entre a entrada e a saída de elementos de um sistema. Masiero (2014) afirma que o conceito de balanço energético se baseia na primeira lei da termodinâmica, onde, quando a radiação solar entra em contato com a terra, uma parte é absorvida pela superfície e outra parte é refletida de volta para o espaço. Em um solo revestido por vegetação, estas absorvem uma grande quantidade de radiação, impedindo a incidência direta na superfície, isto acontece porque na vegetação parte da energia é consumida na evaporação, o que afeta significativamente o balanço de energia. Aproximadamente 30% da radiação solar que incide no topo da atmosfera é refletida, e o restante é absorvido, provocando o aquecimento do ar. Isto

ocorre porque os materiais possuem características que irão influenciar na quantidade de radiação térmica que irradiará para a atmosfera, pois parte dessa energia será refletida, parte absorvida ou até mesmo transmitida (LIMA, 2018). Na maioria das superfícies naturais o balanço energético de ondas longas é negativo, principalmente em superfícies a céu aberto, visto que a abóboda celeste possui temperatura inferior à superfície terrestre (OKE, 1988).

Pitman (2003) aponta a energia eletromagnética emitida pelo sol como a força que movimenta o sistema climático da terra, sendo esta a responsável pelo ganho de calor nas superfícies e na atmosfera.

Alves e Vecchia (2012) definem a soma de energia radiante recebida e perdida pela superfície como balanço de energia. A compreensão do balanço energético permite a melhor caracterização do clima urbano (Megda, 2020). Para a melhor compreensão, Erell, Pearlmutter e Boneh (2014) citam a equação que descreve o balanço energético de forma simplificada em áreas urbanas (Equação 1).

$$Q_* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \quad (1)$$

Sendo:

Q_* : Radiação líquida ($W.m^{-2}$)

QF : Calor antropogênico ($W.m^{-2}$)

QH : Calor sensível ($W.m^{-2}$)

QE : Calor latente ($W.m^{-2}$)

ΔQS : Fluxo de calor armazenamento pela malha urbana ($W.m^{-2}$)

ΔQA : Variação da circulação convectiva horizontal (advecção) ($W.m^{-2}$)

Outra equação que define o balanço energético em superfícies urbanas é apresentada por Taha (1997), esta considera as atividades antropogênicas (Equação 2).

$$(1-A) E_\lambda + L_* + Q_f = H + \lambda E + G \quad (2)$$

A: albedo (refletância a radiação solar direta e difusa) _ adimensional

E_λ : Irradiância (W/m^2)

L_* : saldo de radiação de onda longa na superfície (W /m^2)

Q_f : calor antropogênico ou fluxo de calor gerado por atividade humana (W /m^2)

H: fluxo de calor sensível (W /m^2)

λE : fluxo de calor latente (evaporação e transpiração) (W /m^2)

G: fluxo de calor proveniente da superfície (W /m^2)

- a) A irradiância (E_{λ}) consiste em três componentes – direta, difusa e refletida - dependerá de alguns fatores, como a localização geográfica, dia do ano, horário e condições atmosféricas;
- b) O albedo (A) é a propriedade que determina a quantidade de radiação solar que é refletida por uma superfície. Kowalski (2019) define como o índice de espalhamento da radiação de onda curta;
- c) O saldo de radiação de onda longa na superfície (L^*) é a radiação de ondas longas emitidas pela atmosfera somada com radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre;
- d) O calor antropogênico (Q_f) seu fluxo pode variar de cidade para cidade, conforme cita Quah e Roth (2012), sendo influenciado por variáveis como densidade populacional e clima. E conforme especifica Ferreira (2020) o dimensionamento do calor antropogênico em áreas urbanas deve ser feito a partir da soma do calor gerado pelo setor industrial, pelas edificações, pelos transportes e pelo metabolismo humano, ou seja, a forma como a energia é consumida influencia na quantidade de calor antropogênico gerado;
- e) O fluxo de calor sensível (H) é a variação de temperatura dos corpos, sem que ocorram alterações físicas no mesmo, no meio urbano o fluxo de calor sensível é afetado pela morfologia das cidades;
- f) O fluxo de calor latente (λE) pode ser definido como a variação de temperatura dos corpos, e contribui para o resfriamento evaporativo de áreas urbanas;
- g) O fluxo de calor do solo (G) representa a taxa de armazenamento de calor no solo e na vegetação (FERREIRA, 2020);
- h) A emissividade (ϵ) dos materiais é definida pela NBR 15220:2005 (ABNT, 2005) como o quociente da taxa de radiação emitida pela superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura, é influenciada pelas características dos mesmos (cor, composição, rugosidade, dimensão, etc.). Da mesma forma, na maioria dos casos, materiais que possuem cores claras como características possuem albedo mais elevado, e conseqüentemente, maior refletância.

Gartland (2010) criou equações (Equação 5 e 6) que se baseiam no modelo clássico de balanço energético, considerando a primeira lei da termodinâmica – A energia nunca é perdida:

$$\begin{aligned} & \text{Convecção} + \text{Evaporação} + \text{Armazenamento de Calor} = \\ & \text{Calor Antropogênico} + \text{Saldo de Radiação} \end{aligned} \quad (3)$$

Sendo:

- Convecção: Energia transferida de uma superfície sólida para uma fluida (superfície para o ar);
- Evaporação: Energia transmitida a partir da superfície terrestre em forma de vapor d'água;
- Armazenamento de calor: Depende de duas propriedades dos materiais: a condutividade térmica e a capacidade calorífica;
- Calor Antropogênico: É o calor produzido pelas construções, equipamentos e pessoas;
- Saldo de radiação: Abrange quatro processos de radiação distintos que acontecem na superfície da terra.

$$\begin{aligned} & \text{Saldo de Radiação} = \\ & \text{Radiação Solar Global} - \text{Radiação Solar Refletida} + \text{Radiação Atmosférica} - \text{Radiação da Superfície} \end{aligned} \quad (4)$$

- Radiação Solar Global: É a quantidade de energia radiada pelo sol;
- Radiação Solar Refletida: É a quantidade de energia que é refletida a partir de uma superfície, de acordo com a refletância do material;
- Radiação Atmosférica: é o calor emitido por partículas presentes na atmosfera;
- Radiação da superfície: é o calor radiado a partir de uma superfície.

A NBR 15220:2005 (ABNT, 2005) cita que uma das características dos materiais que influenciará a radiação solar é a sua cor, onde, cores mais claras absorvem menos, e refletem mais quantidade de radiação solar do que cores escuras.

2.1.1.3. Materiais de cobertura de superfície

Givoni (1994) aponta que em cidades com grande densidade de ocupação a maior parte das trocas de calor por radiação acontece nas superfícies de cobertura, assim sendo, é interessante que ao escolher os materiais de cobertura opte-se por materiais de cores claras, que poderiam promover temperaturas de superfície mais amenas do que a temperatura do ar, e assim, o ar frio, sendo mais denso do que o ar aquecido, desce para a área em nível do pedestre.

Kowalski (2019) ratifica a importância dos materiais na redução de ganhos térmicos no ambiente urbano

Entre os fatores que o tipo de material irá influenciar está a emissividade. Um objeto de cor mais escura possui reflectância mais baixa, e sendo melhor emissor do que um objeto de coloração clara, ou seja, se a reflectância é alta, a emissividade é baixa, e vice-versa. Outro fator é o albedo, ou coeficiente de reflexão, este pode ser reduzido com a presença de umidade no material. A rugosidade do material também pode diminuir o albedo (MENESES *et al.*, 2012).

A cobertura de superfície pode ser vegetativa (seja ela rasteira, arbustiva, ou de grande porte), material impermeável (concreto, asfalto, etc.), semipermeável (blocrete, piso grama, etc.) e corpos d'água. Cada material possui características (cor, composição química, rugosidade, forma construtiva, entre outros) que irão influenciar na temperatura do ambiente. A seguir serão abordados os tipos de cobertura de superfície mais encontrados:

a) Cobertura Vegetal

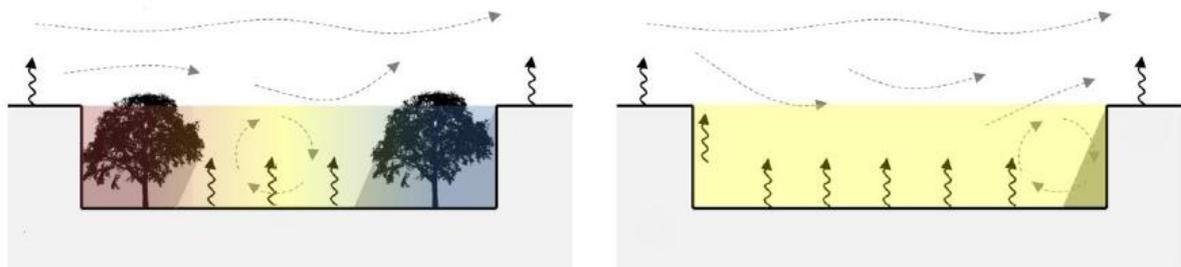
Miranda (2020) cita alguns benefícios da cobertura vegetal, como o controle da erosão do solo, controle da umidade e irradiância solar, controle na qualidade e velocidade dos ventos, controle de permeabilidade do solo e redução de temperatura. Este último quesito é ratificado por Almeida e Vasconcellos (2018) quando afirmam que a vegetação contribui para a diminuição da temperatura, seja através da evapotranspiração, através das sombras geradas pelas mesmas, ou até ainda pela influência no movimento do ar e das trocas de calor. A evapotranspiração das árvores provoca melhores sensações térmicas aos seres humanos e ao ambiente de entorno, contribuindo com o processo de termorregulação, que é a regulação da temperatura corporal de alguns seres vivos com o meio (TAKASHIMA-OLIVEIRA *et al.*, 2018). Por outro lado, Givoni (1994) explica que através da evapotranspiração ocorre a retirada do calor latente do ar, e entende que em regiões de clima quente-úmido a evapotranspiração contribui com o crescimento do nível de umidade, aumentando o desconforto humano.

Givoni (1994) indica que em vias mais largas é essencial a implantação de vegetação arbórea, pois proporcionam sombreamento, já em vias estreitas, esse sombreamento pode ser feito pelos próprios edifícios, porém, o uso de arborização proporciona temperaturas do ar com até 1°C a menos do que o sombreamento oferecido por edifícios. Este autor ainda aponta o bloqueio dos ventos gerado por árvores densas e de grande porte. Visão corroborada por Coutts *et al.* (2015), onde em seu estudo complementa que coberturas arbóreas muito densas podem dificultar a circulação de vento, além de impedir as perdas de radiação de onda longa durante a noite, dependendo da geometria do cânion. Entretanto, Voogt e Oke (1997) apontam que no

período noturno é mais nítida a diminuição de temperatura em ambientes arbóreos, devido à emissão de radiação de onda longa, essa diferença entre temperatura de áreas verdes com o entorno pode ser denominada como efeito Oásis, e é um fenômeno de “escala local”. Ainda sobre os estudos de Coutts *et al.* (2015) é indicado que as árvores sejam implantadas de forma espaçada, de maneira que permita o sombreamento e ao mesmo tempo admita o resfriamento atmosférico noturno.

Sobre o posicionamento da arborização em cânions (Figura 3), Ali-Toudert e Mayer (2007) orientam que em cânions mais profundos, localizados em ruas com orientação Leste-Oeste, essa arborização seja implantada no lado Norte, onde o sombreamento será mais bem aproveitado. Além de oferecer sombreamento, Moreira e Vitorino (2017) apontam a arborização das vias públicas como uma forma de atenuar os ruídos urbanos (veículos, pessoas, equipamentos).

Figura 3 - Esquema de sombreamento por árvores e por edifícios em Cânions urbanos.



Fonte: Lima, 2018

Em seu estudo sobre áreas verdes e temperatura, Moreira e Vitorino (2017) consideram áreas verdes urbanas todas as áreas livres da cidade que possuem características predominantemente naturais, onde prevalece a permeabilidade, independente se a vegetação for rasteira ou arbórea.

Para extrair a quantidade de área verde e gerar o índice de cobertura vegetal por habitante (ICVH), Moreira e Vitorino (2017) utilizaram a seguinte equação (Equação 3):

$$ICVH = \frac{\sum \text{das áreas verdes}}{n^{\circ} \text{ de habitantes}} \quad (5)$$

b) Corpos D'água

Manteghi, Shukri e Lamit (2019) pontuam a importância dos corpos d'água para a regulação do microclima das áreas urbanas, pois, através da evaporação mantem a temperatura

do ar mais baixa. Essa regulação do microclima também é apontada por López (2020), quando afirma que os corpos d'água, por meio da evapotranspiração ajudam a transportar o calor para fora da cidade. O resultado do estudo de Halder, Bandyopadhyay e Bank (2021) demonstrou que superfícies de corpos d'água apresentaram menores temperaturas do que superfícies construídas.

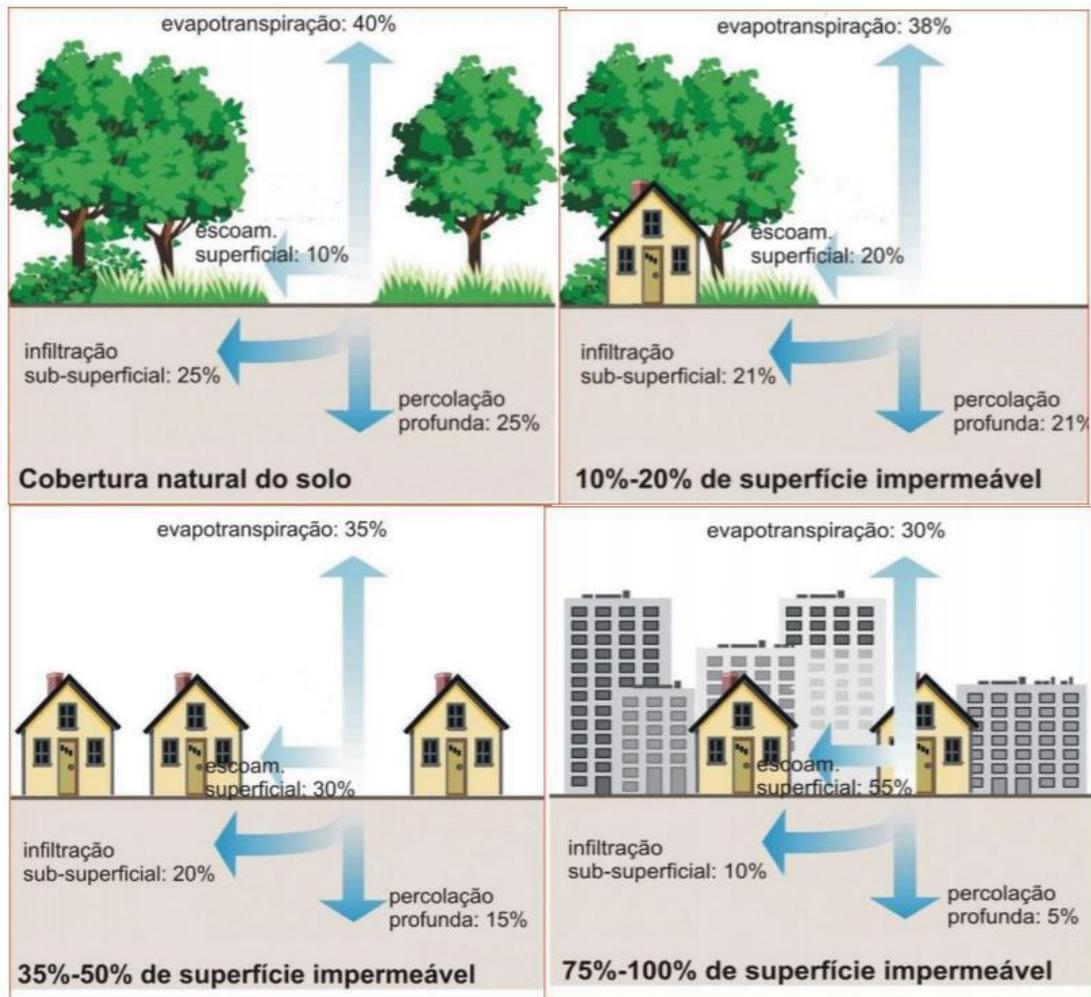
c) Telhas fibrocimento e metálicas

A telha de fibrocimento é um dos materiais construtivos para cobertura mais utilizados no Brasil (LIZ, ORDENES e GUTHS, 2018), um dos fatores que motivam essa situação é o custo comparado a outros materiais. Possuem como material base o cimento, e surgiram com a finalidade de substituir as telhas de amianto, material tóxico. A telha de fibrocimento apresenta valores de absorvência solar e transmitância térmica menores do que os recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

d) Solo exposto

Miranda (2020) ratifica a importância do solo exposto (permeável) para a manutenção das bacias hidrográficas, pois, permite a infiltração das águas da chuva. O mínimo tolerável de permeabilidade no solo é 25%, estudos de Almeida, Araújo e Guerra (2005) revelaram que valores menores do que este índice dificultam a infiltração da água pluvial no solo, ocasionando, entre outras coisas, alagamentos (Figura 4).

Figura 4 - Relação entre superfície permeável, infiltração no solo, e evapotranspiração



Fonte: Almeida, Araújo e Guerra (2005)

2.1.1.4. Albedo dos materiais construtivos

O Albedo pode ser influenciado pela composição, cor, textura dos materiais e orientação da radiação solar. Gonzalez (2015) ressalta que como a posição do sol varia durante o dia e até mesmo durante o ano, o albedo também poderá variar; Oke (1988) afirma que o albedo tende a ser maior em cânions localizados Leste/Oeste, e sofre interferência do fator H/W. O albedo poderá alterar até mesmo de um local para o outro, visto que a incidência de radiação também muda conforme a latitude da localidade.

Para Romero (2009) essa propriedade é de tamanha relevância para o desempenho térmico das cidades, pois, quanto maior o albedo, maior a porcentagem da radiação de ondas curtas incidente refletida, e conseqüentemente, menor a quantidade de energia revertida em calor. Levando em consideração que em grande parte das construções a cobertura é o elemento

com maior exposição à radiação solar, o albedo deste material terá grande influência no conforto térmico da cidade (MINAKI, 2011).

Kolokotroni e Giridharan (2008) avaliaram a relação entre as ICU e as características físicas da cidade e constataram que dentre as variáveis estudadas (razão W/H/L, área vegetativa, densidade de área vertical, albedo da superfície e massa térmica), o albedo foi a variável que mais influenciou nas mudanças de temperatura ambiente tanto no período diurno quanto noturno. Taha (1997) em suas pesquisas constatou que os revestimentos brancos (com albedo 0,72) eram até 45°C mais frios do que os revestimentos pretos (com albedo 0,08). O autor complementa que mudando o tipo de materiais com albedo de 0,25 para 0,40, por exemplo, tem-se uma redução de 4°C. Em estudos de Ferreira e Prado (2003), citados por Minaki (2011), foram avaliados o desempenho espectral de materiais de cobertura, os únicos que atingiram temperaturas superficiais mais baixas que a temperatura do ar foram as coberturas de cerâmica vermelha e cerâmica branca, mesmo apresentando albedos semelhantes aos de coberturas metálicas. Porém, observou-se que os materiais metálicos atingem temperaturas superficiais muito mais elevadas por conta da baixa emissividade, devido às perdas de calor por convecção não serem suficientes para resfriá-los.

Gonzalez (2015) aponta o uso de materiais de alto albedo como uma das estratégias para a mitigação dos efeitos de ICU, pois, estes materiais absorvem menos energia, apresentando menores temperaturas superficiais, entendendo-se que reduzindo a temperatura do material, estas aqueçam menos o ar, reduzindo o efeito de Ilha de Calor Urbana.

2.1.2. A influência da configuração urbana no conforto térmico

Conforto térmico pode ser definido como a sensação de satisfação térmica com o ambiente, e, a sensação de desconforto extremo, seja de frio ou calor, é chamada de estresse térmico. Essa satisfação térmica ocorre a partir da troca de calor com o meio, seja por condução, convecção (depende da temperatura e velocidade do ar), radiação (depende da temperatura média radiante) ou evaporação (depende da umidade e velocidade do ar) (ISO, 2005).

Silva Júnior *et al.* (2013) afirmam que o crescimento desordenado de cidades provoca mudanças na morfologia urbana, principalmente, devido às alterações das características da cobertura do solo, que irá influenciar o fluxo de ventilação, absorção de energia, e emissão de radiação de onda longa, fatores que afetam o clima urbano (GIVONI, 1994). Sobreira *et al.* (2011) complementam que tais efeitos são potencializados com o aumento da rugosidade da superfície do solo.

Krüger (2008) sugere que em lugares de clima quente-úmido os edifícios sejam espaçados entre si, favorecendo a circulação do ar, além de vias retas e prédios baixos. Já Givoni (1994) recomenda que o sombreamento das calçadas, seja através de arborização ou pelos próprios edifícios. Além disso, o autor aconselha que as grandes avenidas estejam orientadas em um ângulo oblíquo aos ventos predominantes, permitindo a entrada de ventilação pelo centro da cidade.

Oke (1978), em sua obra “*Boundary Layer Climates*”, introduz os conceitos para análise do clima urbano, como o “Sky-view fator” (fator de visão do céu), o efeito oásis, e o reflexo do uso do solo na formação de ilhas de calor urbanas. Complementando os conceitos já propostos por Oke, para avaliar a morfologia urbana em relação ao campo térmico, deve-se também analisar outras relações, como, as proporções W/H/L (onde, W é a largura da via, H a altura do edifício, e L o comprimento do Cânion urbano), os adensamentos, a rugosidade, a porosidade, e as características das superfícies dos materiais.

Landsberg (1976) aponta como características das superfícies urbanas que interferem nas condições climáticas: a rugosidade, o albedo, a condutividade dos materiais, e a permeabilidade. Higuera (1998) enfatiza a importância de conhecer as variáveis que compõem o ambiente urbano para um melhor planejamento, a autora dividiu essas variáveis em dois grupos:

- a) Variáveis do meio natural: radiação solar, vegetação, umidade do ar, vento, geomorfologia;
- b) Variáveis do meio urbano: espaço livre, redes viárias, morfologia dos lotes, morfologia das quadras (ou quarteirões) e tipologia das edificações.

O planejamento urbano pode ser uma ferramenta para melhoria das condições climáticas da cidade, junto a isso, têm o conceito de urbanismo bioclimático, que prevê o crescimento urbano aliado ao uso racional da morfologia urbana. Higuera (1998) em seu trabalho sobre urbanismo bioclimático cita alguns pontos como diretrizes para planejamento cidade:

- Soluções urbanísticas baseadas nas particularidades do terreno (clima, topografia, cultura, etc.);
- Uso misto de atividades, reduzindo assim, a necessidade de deslocamento para outras áreas da cidade;
- Priorizar projetos de espaços abertos;
- Priorizar a densidade média a alta, com o intuito de diminuir os custos com infraestrutura;

- Aproveitamento dos recursos naturais e incentivar a reciclagem de resíduos sólidos;
- Incentivar as técnicas arquitetônicas de consumo passivo de energia;
- Incentivar políticas que priorize o tráfego de pedestres.

Percebe-se que algumas características urbanas são mais recorrentes na literatura, a seguir serão explanadas o referencial teórico destas características para o melhor entendimento delas.

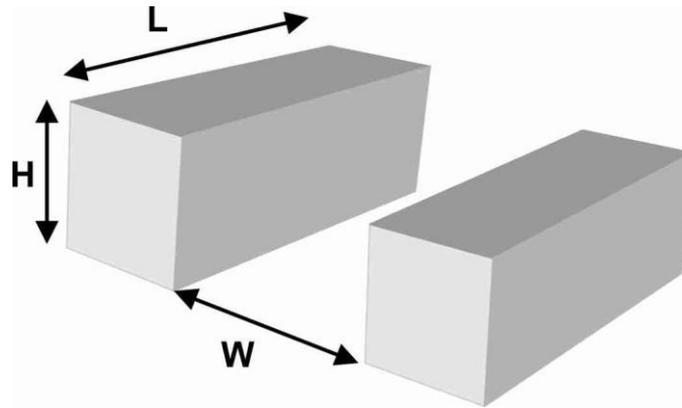
2.1.2.1. Cânions urbanos e o Fator W/H/L

Aguiar *et al.* (2017) explicam que os cânions naturais inspiraram a conceituação de cânions urbanos, estes formados por prédios adjacentes (funcionando como as falésias) e a via (desempenhando a função do vale). É de extrema importância conhecer este conceito para entender o clima urbano. Oke (1988) conceitua o cânion urbano como a menor unidade de análise dos microclimas urbanos. Em um estudo anterior, Oke (1978) descreve o funcionamento deste microclima, onde o ar dentro dos cânions urbanos é delimitado pelas paredes dos edifícios adjacentes e pela via entre eles. A configuração do cânion influencia a concentração de calor, o fluxo de ventos, o sombreamento em seu interior, estes, fatores importantes para o conforto dos pedestres.

As características do interior do cânion são fatores importantes para o conforto dos pedestres, uma vez que elas afetam a concentração de calor, o fluxo de ventos e a concentração de poluentes. Além disso, a influência da geometria do cânion na perda de calor das construções ou na demanda de refrigeração influencia na conservação de energia nas áreas urbanas. Oke (1988) demonstra que próximo ao topo dos cânions mais abertos o resfriamento é cerca de quatro vezes maior do que o que ocorre próximo ao solo.

Os cânions urbanos trabalham com o fator W/H/L, que se refere à proporção entre a largura da via (W), a altura do edifício (H) e o comprimento do Cânion urbano (L) (Figura 5). As proporções W/H/L influenciam nos fluxos dos ventos, temperaturas, insolação, sombreamento, e trocas térmicas. Para Romero (2009), só podem ser considerados cânions urbanos quando a proporção W/H for maior do que 0,7.

Figura 5 – Altura (H), Largura (W) e Comprimento do Cânion (L)



Fonte: Adaptado de Santamouris et al. (2001)

Oke (1981) utilizou a relação W/H ao desenvolver uma equação (Equação 4) que auxilia na análise da formação de ilhas de calor urbana. O modelo não suporta toda a gama de condições encontradas nas cidades, pois foca apenas na influência da geometria urbana na formação de ICU, não levando em consideração outros fatores, como a influência dos ventos, a água e a vegetação.

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \ln(H/W) \quad (6)$$

Onde:

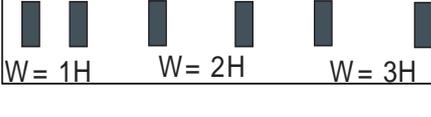
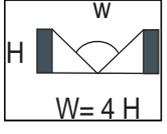
$\Delta T_{u-r(\max)}$ = a intensidade máxima da ilha de calor (°C);

H = altura das edificações do cânion urbano; e

W = a largura da rua do cânion urbano.

Romero (2009), a partir de estudos de Oke (1981), estabelece um quadro (Quadro 1) com as proporções W/H , possibilitando uma classificação tripartida dos espaços urbanos.

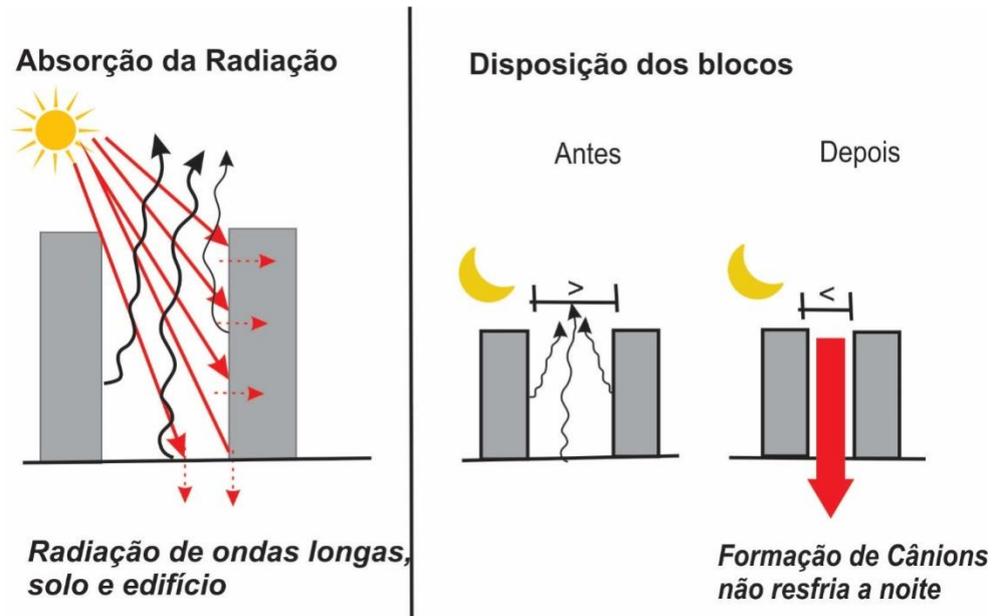
Quadro 1 - Relação de percepção dos edifícios e seus entornos imediatos

ESPAÇOS CLAUSTROFÓBICOS	ESPAÇOS DE RECOLHIMENTO	ESPAÇOS EXPANSIVOS
		
Densidade alta	Densidade média	Densidade baixa
Espaços estreitos, onde proporções verticais prevalecem, não permitem visuais amplas.	Espaços harmônicos, apartamentos para abrigar atividades sociais de convívio. Contornos marcados, definição forte.	Espaços excessivamente abertos, sem contornos definidos, as distâncias grandes enfraquecem estímulos visuais.
Absorvem calor muito acima do nível do solo	A absorção de calor se dá próxima ao nível do solo	A maior parte da radiação é refletida.
Existe um amortecimento do ciclo térmico e normalmente a temperatura permanece estável durante o dia e só é alterada por um fator extremo.	Existe uma menor possibilidade de inversão térmica, ou seja, a temperatura no interior dos edifícios tende a ser igual a da parte exterior.	A possibilidade de inversão térmica é mínima e a temperatura no interior dos edifícios tende a ser igual à exterior
Os fluxos de ar entre os edifícios são independentes.	Os fluxos de ar entre os edifícios interagem entre si.	O fluxo de ar tende a passar sobre os edifícios

Fonte: Romero, 2009

Oke (1981) explica que durante o dia com o sombreamento das edificações a quantidade de radiação que atinge o solo, e até mesmo as próprias edificações sombreadas, diminui, logo, a temperatura do ar também sofre diminuição, porém, devido à dificuldade em dissipar o calor recebido durante o dia e o acúmulo de calor proveniente de radiação de ondas curtas, no período noturno pode acontecer o aquecimento da temperatura do ar. Romero (2009) complementa tal pensamento, ao afirmar que em áreas de cânions urbanos a radiação solar atinge em sua maioria as coberturas e paredes, pouco alcançando o solo, além disso, dificulta a dissipação do calor do solo para a atmosfera, conforme ilustra a Figura 6. Ainda em relação ao sombreamento, Santos *et al.* (2010) citados por Pacifici (2019) observam que o sombreamento excessivo em um cânion urbano pode ocasionar a necessidade do maior uso de iluminação artificial. Além disso, o sombreamento favorece a umidade interna nas edificações, causando a proliferação de fungos, e conseqüentemente, resultando em doenças aos habitantes locais.

Figura 6 - Liberação à noite do calor armazenado

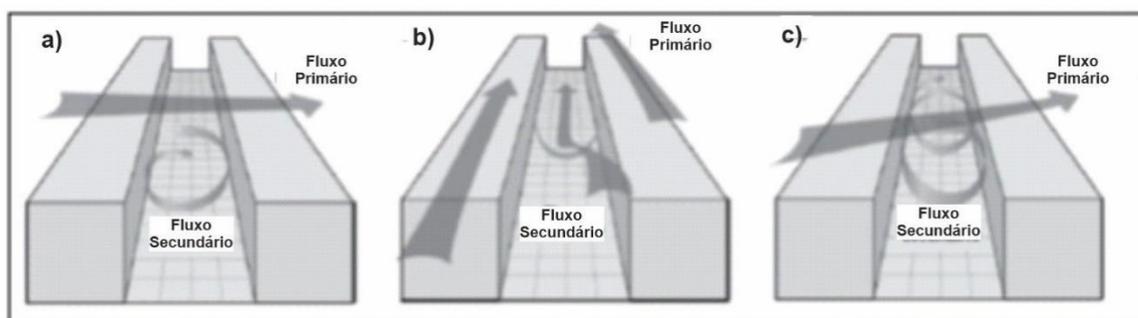


Fonte: Adaptado de Romero, 2009

O efeito provocado pelos Cânions urbanos pode ser potencializado pela orientação das vias, pois, conforme Souza *et al.* (2010) esta é uma característica da geometria urbana que influencia na formação de ilhas de calor. Oke (1988) afirma que o albedo é maior em cânions urbanos orientados no sentido Leste-Oeste.

Santamouris *et al.* (2001) realizaram um estudo comparando a velocidade do vento no interior de cânions com a velocidade dos ventos no topo do dossel urbano, onde foi constatado que no interior dos cânions é geralmente dez vezes menor (Figura 7). Aguiar *et al.* (2017) citam algumas medidas mitigatórias, como é o caso do uso de pilotis em edifícios, pois permitem o fluxo de vento próximo ao solo. Gonzalez (2015) afirma que os padrões de fluxos de vento podem variar no interior dos cânions, isso irá depender de fatores como proporção do cânion, forma, orientação em relação à direção do vento, velocidade do tempo no topo do dossel, entre outros.

Figura 7 - Representação do comportamento idealizado do fluxo de ar gerado no interior do cânion: (a) quando o vento no topo do dossel incide perpendicularmente ao eixo do cânion, (b) paralelamente ao eixo do cânion e (c) em ângulo com o eixo do cânion



Fonte: Gonzales (2015), adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

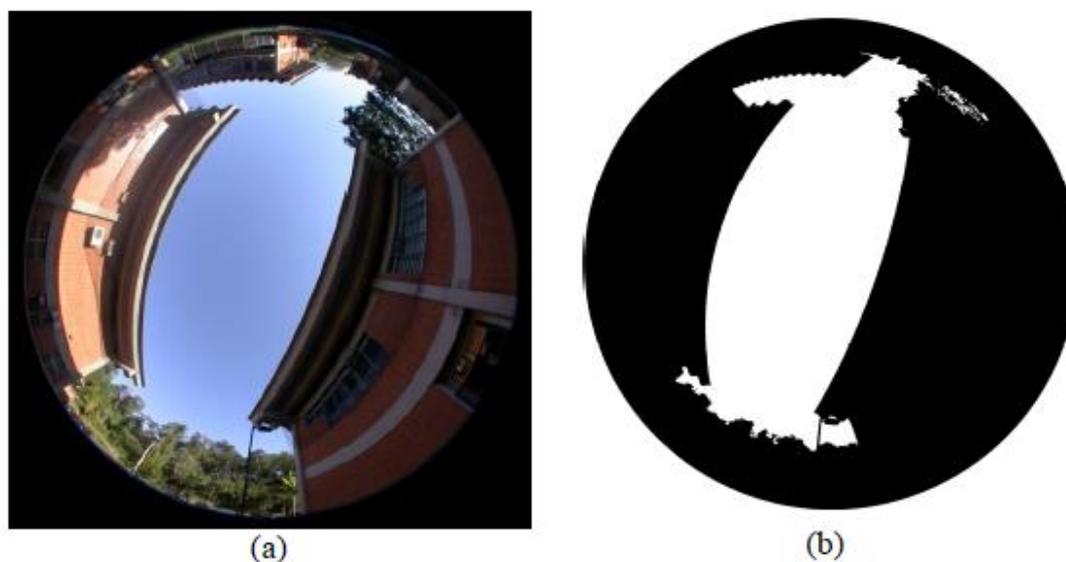
2.1.2.2. O Fator de Visão do Céu (FVC)

O Fator de Visão do Céu (FVC) é a medida da fração do céu vista de um ponto no espaço urbano, este índice revela o grau de obstrução do céu gerado pelas edificações no entorno. Este fator pode influenciar a insolação, sombreamento, e iluminação urbana, atuando nas alterações de trocas térmicas com o céu, influenciando o resfriamento das superfícies, visto que quanto maior a obstrução do céu, menor a capacidade de resfriamento da superfície urbana (SOUZA *et al.*, 2010). Para Oke (1978) o Fator de Visão do Céu está diretamente relacionado à troca de radiação entre céu e solo.

O FVC é uma razão aritmética entre zero e um, que pode ser obtido por métodos analíticos, fotográficos ou topográficos. Ele é extraído a partir de um ponto na altura do observador e representa a faixa de céu disponível para trocas térmicas em relação ao limite de céu obstruído por qualquer elemento físico, natural (vegetação) ou artificial (edifícios) (SOUZA *et al.*, 2010).

Nakata-Osaki (2016) apresenta a fotografia realizada com lente olho-de-peixe e posteriormente tratada com filtro de imagem como uma forma de calcular o FVC, conforme demonstra a Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de representação de FVC através de foto com lente olho-de-peixe.



Fonte: Nakata-Osaki, 2016

Quanto menor a visão do céu, maior é a dificuldade para a dispersão de calor acumulado na superfície (MEGDA, 2020). E diferentemente da relação $W/H/L$, o FVC considera outros elementos além do edifício, como é o caso de árvores, marquises e pérgolas.

2.1.2.3. Rugosidade

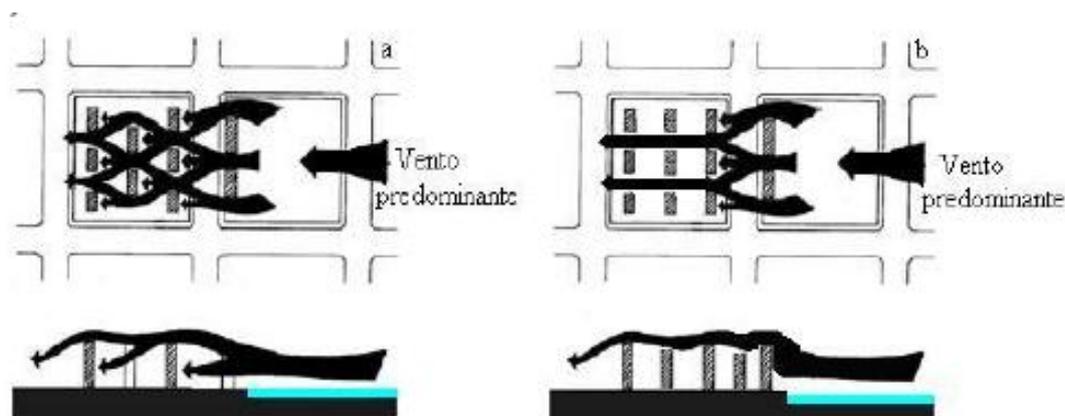
Rugosidade é definida como a diferença entre as alturas dos edifícios ou vegetações e outras superfícies horizontais (o solo, por exemplo). Monteiro e Oliveira (2013), citados por Pacifici (2019) citam a verticalização como uma das causas da rugosidade, além deste fator, a densidade, vegetação, cobertura e uso do solo também podem influenciar.

Para Chandler (1965), a rugosidade da superfície potencializa a alteração do escoamento dos ventos, fazendo com que os mesmos reduzam sua velocidade próximo à superfície, esse fenômeno é mais presente em zonas urbanas do que em zonas rurais, devido à presença de edificações de elevada altura (GAWUC, JEFIMOW e SZYMANKIEWICZ, 2020). Em alguns casos, pode ocorrer a aceleração da velocidade do vento, devido à canalização por cânions urbanos. Oke (1988) afirma que quanto maior for a rugosidade (z_0), mais intensa é a turbulência provocada por ventos.

O trabalho de Voogt e Oke (1997) reconheceu que a tridimensionalidade produz impacto térmico, pois, a geometria urbana provoca, entre outros fatores, alteração no movimento dos ventos, e a velocidade dos mesmos está diretamente ligada à rugosidade da superfície da cidade, ou seja, interfere no perfil vertical do vento, conhecido como gradiente de vento.

A rugosidade (z_0) e adensamento influenciam o Fluxo de Calor Sensível, pois, quanto maior o adensamento dos elementos construtivos entre si, maior é o comprometimento das trocas turbulentas de calor sensível; e quanto maior a rugosidade e porosidade entre os elementos construtivos, maior o turbilhonamento dos ventos e as trocas térmicas com a atmosfera (Figura 9), gerando menor temperatura do ar (FERREIRA, 2020).

Figura 9 - Esquema de ventilação urbana em climas úmidos: Posicionamento correto/Posicionamento habitual



Fonte: Silva Júnior, 2012

Oke (2006) classificou a rugosidade segundo a estrutura urbana, onde as classes 1 a 3 referem-se a estruturas do meio rural/natural. As outras classes se dividem em:

- Classe 4 ($z_0 = 0,10\text{m}$): Aproximadamente aberto: Com poucos obstáculos (edifícios, árvores, etc.). Separações de no mínimo 20 alturas do obstáculo;
- Classe 5 ($z_0 = 0,25\text{m}$): Rugoso: com obstáculos dispersos e baixos, com separações de 8 a 12 alturas do obstáculo;
- Classe 6 ($z_0 = 0,5\text{m}$): Muito Rugoso: Moderadamente coberta por edifícios baixos em separações relativas de 3 a 7 de alturas do obstáculo, sem árvores alta;
- Classe 7 ($z_0 = 1,0\text{m}$): “Skimming”: Área densamente coberta por edifícios, sem muita variação de altura;
- Classe 8 ($z_0 = 2,00$): Caótico: Área densa com edifícios de altura variada.

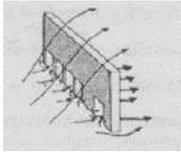
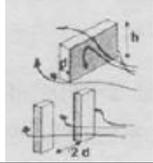
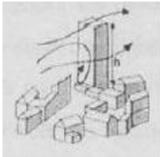
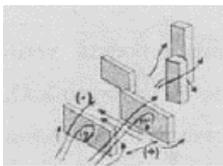
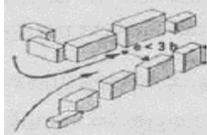
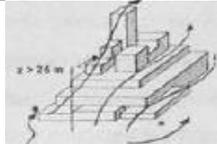
2.1.2.4. Porosidade

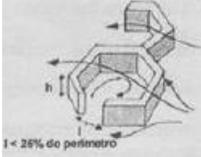
Silva, Scarione e Alvarez (2012) conceituam porosidade como o distanciamento horizontal entre obstáculos (árvores, edifícios, etc.) por onde as manifestações atmosféricas, como os ventos, circulam. Gonzalez (2015) ressalta que um elemento, mesmo que de forma isolada, pode transformar-se em barreira e desviar o fluxo de vento. Quando há espaçamento entre os edifícios, o fluxo de ar que contornou o obstáculo retorna ao nível do solo após passá-

lo. Porém, quando o espaçamento entre os edifícios é pequeno, não há espaço suficiente para o fluxo de ar retornar ao solo, deste modo, o ar acaba fluindo acima do dossel.

O Quadro 2 apresenta o resumo dos principais efeitos provocados pela ação do vento conforme a porosidade urbana.

Quadro 2 - Quadro com os efeitos aerodinâmicos de vento sobre conjuntos de edifícios

EFEITO	DEFINIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	RELAÇÕES	EXEMPLO
Efeito Pilotis	Escoamento através de pilotis que ligam as áreas em pressão positiva e negativa	Entrada de ar difusa, saída localizada	$h \geq 15m$	
Efeito de Canto	Escoamento nos ângulos do edifício	Gradiente horizontal elevado e desconfortável para o pedestre. Quanto mais alto o edifício, pior o efeito	$h \geq 15m$, para edifícios isolados; $h \geq 30m$, para conjuntos de edifícios.	
Efeito Esteira	Circulação em turbilhão atrás do edifício	Zona de turbulência incômoda na parte posterior do edifício	15m a 35m, o efeito persiste por cerca de 4h, por uma área de 2e de cada lado do edifício	
Efeito Turbilhão ao Pé do Edifício	Rolo turbilhonar ao pé da face do edifício exposta ao vento	Zona de turbulência incômoda ao pé do edifício. O efeito é reforçado pela presença de um edifício mais baixo (10 a 15m), à frente (Efeito Wise)	$h \geq 15m$	
Efeito Barreira	Desvio em espiral do escoamento, ao cruzar um edifício com ângulo de incidência de cerca de 45°	Zona de turbulência incômoda na parte posterior central do edifício. O efeito ocorre em edifícios com forma mais alongada	$h < 25m$ e $38h; d \leq h$; o efeito persiste por cerca de 2h	
Efeito Venturi	Um coletor formado pela disposição dos edifícios faz um ângulo aberto ao vento	Saída em jato, muito incômoda na área de estrangulamento	$h > 15m$; $c_1 + c_2 = 100m$	
Efeito União de Zonas de Pressão Diferentes	Escoamento entre zonas de pressão diferentes formadas pela disposição de edifícios paralelos	Influência preponderante da altura dos edifícios, provoca alteração na direção do vento	$h \geq 15m$; $d' \leq h$; $a \geq h$; para $h > 100m$, $d' = e/4$	
Efeito de Canalização	Escoamento por um conjunto construído que forma um corredor aberto	Não é, por si só, causa de incômodo, a não ser quando associado a outro efeito ou quando a velocidade do vento é muito grande	$h \geq 6m$; $d' < 2h$	
Efeito Pirâmide	Escoamento através de um conjunto de edificações destacado e de forma piramidal	Esta forma dissipa o máximo da energia eólica, em qualquer direção do vento. Alta turbulência	Áreas críticas são os cantos dos edifícios e os terraços ou varandas	

Efeito de Malha	Escoamento através de um arranjo de edifícios que forma pátios centrais ou bolsões	O pátio central pode ser protegido do vento ou, pelo contrário, há interesse em que seja ventilado	$h > e; b \leq P/4; S/h \geq 10$ para $15m \leq h \leq 25m$ (efeito de proteção)	
-----------------	--	--	--	---

Fonte: Adaptado de Prata, 2005

Segundo Peregrino (2014), alguns fatores influenciam na circulação do vento, como a porosidade e adensamento, o referido autor em suas pesquisas simulou o comportamento da ventilação através de túneis de vento, demonstrando assim a relação da ventilação com a configuração urbana.

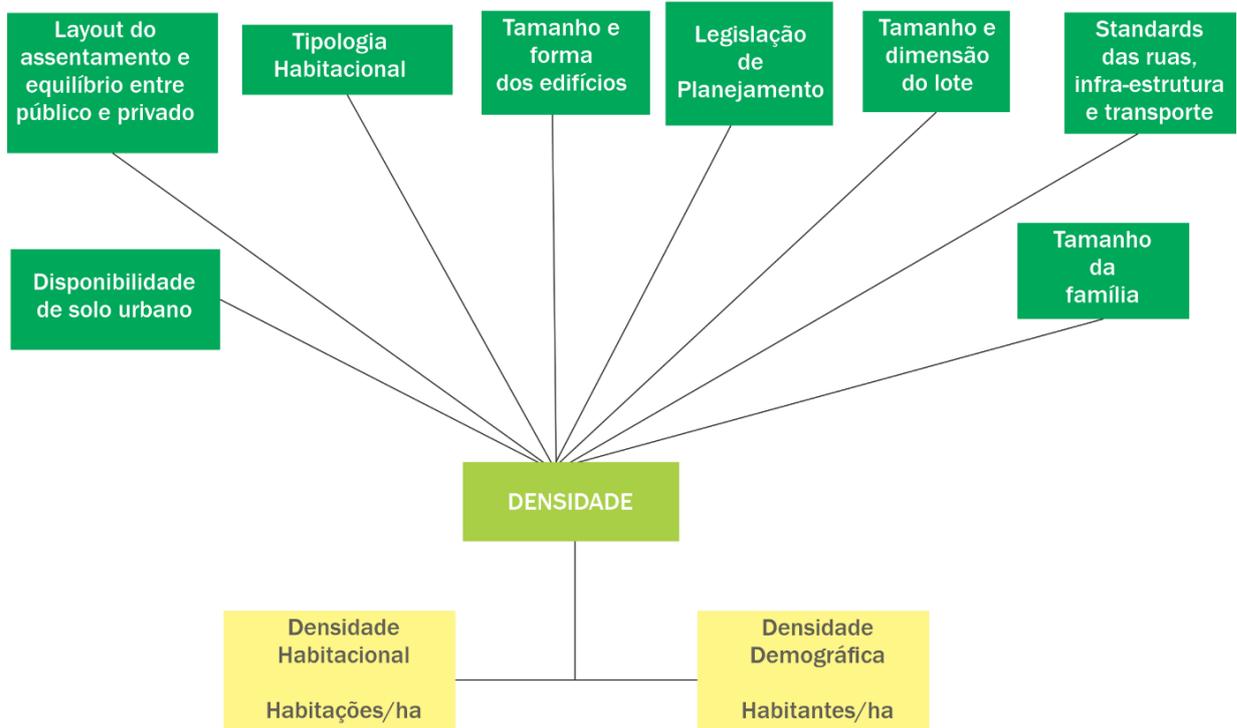
2.1.2.5. Sombreamento

O sombreamento é influenciado por vários fatores, entre eles os cânions urbanos, FVC, vegetação, etc. (ROMERO, 2009). Para Givoni (1994) o sombreamento é pré-requisito para a redução do estresse térmico em ambientes externos. O autor ainda sugere o uso de arborização para a criação de sombreamento, protegendo o pedestre da radiação solar intensa. Lima (2018) orienta que a arborização seja implantada na calçada Sul, já que a calçada Norte passa a maior parte do dia sombreada pelas edificações; já nas calçadas com orientação Norte-Sul, a arborização deverá ser implantada na calçada Leste.

2.1.2.6. Adensamento

Vianna (2018) define o adensamento como a razão entre a população que ocupa a cidade e a área ocupada, ou seja, a quantidade de habitantes por metro quadrado de área construída. Porém, o adensamento também pode ser entendido como a quantidade de habitações por metro quadrado. Acioly e Davidson (1998) ilustram no diagrama da figura 10 os fatores que influenciam a densidade urbana.

Figura 10 - Fatores que influenciam a densidade urbana



Fonte: Baseado em Aciolye Davidson (1998)

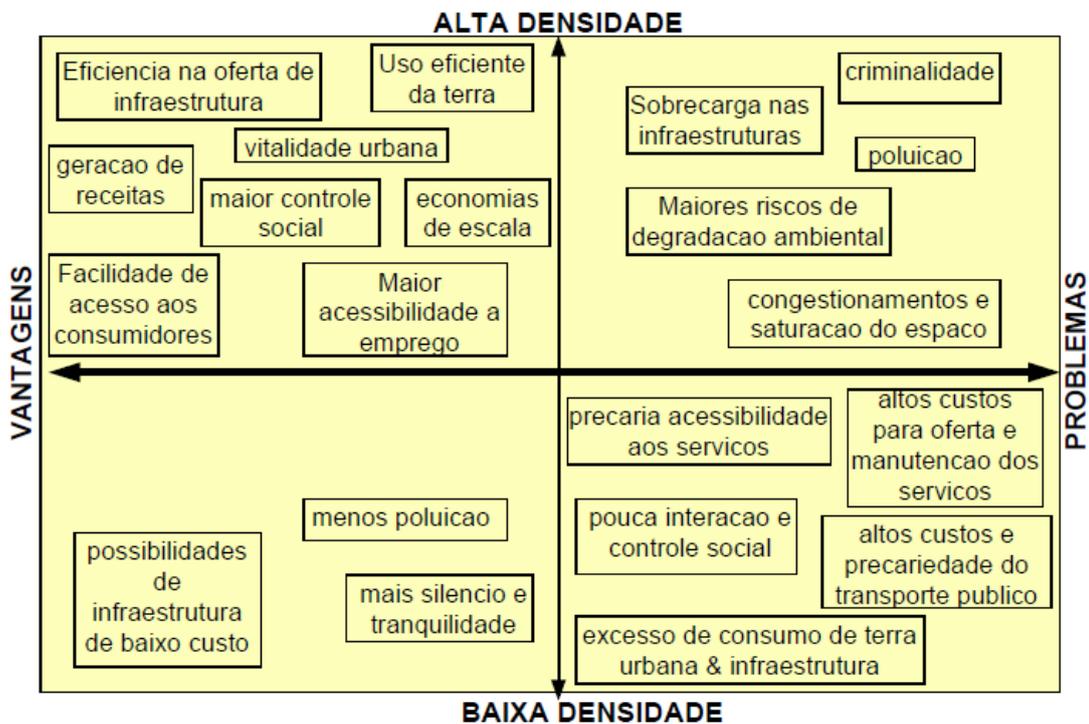
Hayes et al. (2022), a partir de simulações realizadas em estudos sobre o Canadá, concluíram que o efeito de ICU deve aumentar conforme expande a densidade das cidades, devido ao processo de urbanização e a elevação de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Em estudos realizados no Brasil, tem-se o trabalho de Assis (2000), citado por Torres (2017), que usando Belo Horizonte como estudo de caso, demonstrou que as condições de conforto térmico em áreas verticalizadas, todavia, com maior área livre, são melhores do que em áreas horizontais com maior taxa de ocupação, mesma observação feita por Sobreira et al. (2011) em seus estudos. Ainda sobre a relação de ICU e adensamento, Lombardo (1985) em sua pesquisa referente à Ilha de Calor Urbana aplicada a cidade de São Paulo constatou que as altas temperaturas são diretamente proporcionais às altas densidades

O Adensamento de áreas urbanas, além de comprometer o fluxo de ventilação, pode sobrecarregar a infraestrutura urbana, saturar o solo (principalmente pela substituição da cobertura vegetal por pavimentação) além de representar um maior risco de degradação ambiental, devido ao aumento na geração de resíduos sólidos e aumento do ruído urbano (LIMA, 2018). Em relação à radiação solar, Givoni (1994) declara que em locais muito adensados a radiação solar é absorvida pelas superfícies mais altas, diminuindo o aquecimento do ar perto do solo. Áreas urbanas de alta densidade podem provocar sobrecarga da infraestrutura urbana e causar uma saturação do solo urbano, aumentando a pressão de demanda

sobre este, produzindo um meio ambiente inadequado ao desenvolvimento urbano. A alta densidade construída representa um risco maior de degradação ambiental, principalmente pelo aumento da poluição e possibilidade de maior geração de resíduos sólidos, se não for bem gerenciada. Fator agravante é o aumento do ruído urbano, provocado pela maior concentração de pessoas.

Alguns autores defendem que o adensamento das cidades pode trazer benefícios, como a diminuição de trajetos, seja por automóveis ou caminhadas. Barbosa (2018) compreende que os custos com infraestrutura diminuem conforme a densidade aumenta, isto porque a distância entre moradia-trabalho-lazer reduz. Acioly e Davidson (1998) desenvolveram o seguinte fluxograma (Figura 11):

Figura 11 - Vantagens e Desvantagens da Baixa e Alta Densidade



Fonte: Acioly e Davidson (1998)

2.1.2.7. Fração de superfície construída e fração de superfície impermeável

A fração de superfície construída é a relação entre a área construída pela área total. Já a Fração de superfície impermeável é a relação da área impermeável pela área de superfície total (STEWART e OKE, 2012). Schmitz (2014) aponta que o processo de urbanização é um dos causadores das superfícies impermeáveis nas cidades, isto acontece quando o solo natural

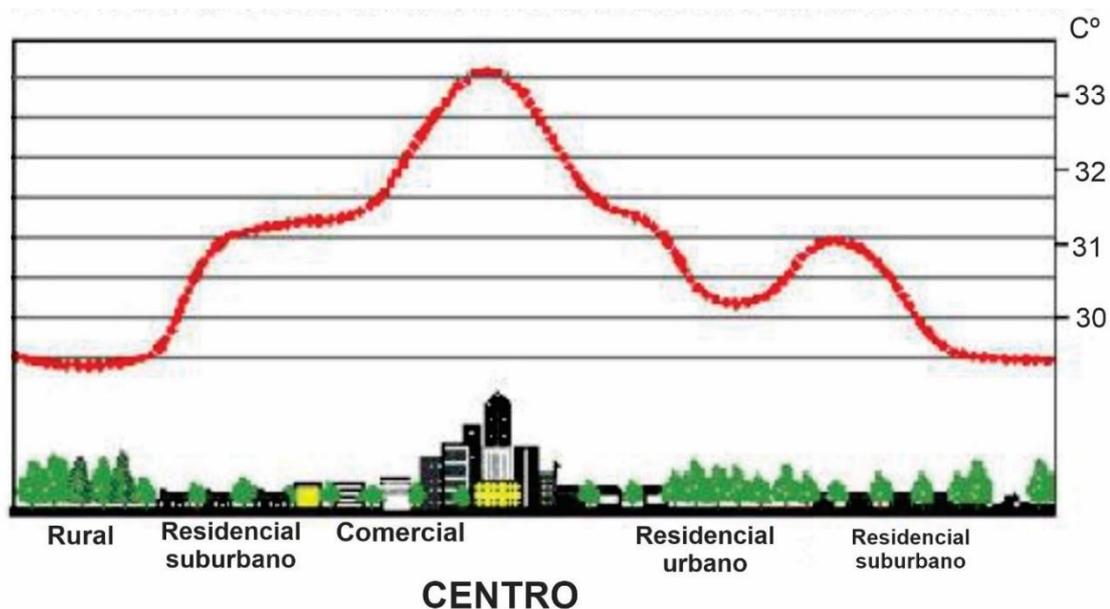
ou vegetativo é substituído por pavimentações impermeáveis, como o asfalto. Uma das consequências desse processo são as inundações, pois, a água pluvial não tem para onde escoar. Outro efeito da impermeabilização do solo é a redução da umidade relativa do ar e da evaporação.

O estudo de Rocha, Souza e Castilho (2011) demonstra que áreas com vegetação e com solo permeável apresentam temperaturas mais amenas durante a noite, se comparadas à áreas com cobertura de superfície de outros materiais. Os mesmos autores constataram que locais com maior fração de superfície construída tendem a perder menos calor após o pôr do sol. Faisal et al. (2021) em seus estudos sobre a comparação do uso e ocupação do solo durante duas décadas, na área metropolitana de Dhaka (Bangladesh), constataram que houve uma diminuição drástica de cobertura vegetal do solo, e ao mesmo tempo, a temperatura do solo, medida através dos satélites Landsat 4, 5 e 8, aumentou consideravelmente. Hayes et al. (2022) realizaram pesquisa para analisar de que forma medidas baseadas na natureza, como é o caso de superfícies vegetativas, podem mitigar os efeitos da ilha de calor urbanas durante o verão canadense.

2.1.3. Ilhas de Calor Urbana

Romero *et al.* (2019) apontam que um dos principais fatores associados ao clima urbano é a Ilha de Calor Urbana (ICU), denominação atribuída por Manley (1958) devido aos picos de calor que se assemelhavam a ilhas (Figura 12), o pesquisador também observou que a umidade era inversamente proporcional a temperatura. OKE (1981) conceitua ilhas de calor urbanas como uma anomalia térmica que tem dimensões horizontais, verticais e temporais.

Figura 12 - Perfil da ilha de calor urbana



Fonte: EPA (2003)

Para Voogt e Oke (1997) as condições de superfície (cobertura do solo, topografia atividades antrópicas) e os controladores atmosféricos são os causadores das ilhas de calor urbanas. Givoni (1989) destaca a diferença no balanço total da radiação entre a área urbana e rural, tendo como principais fatores a baixa taxa de resfriamento noturno, o armazenamento do calor gerado pelos raios solares nas edificações durante o dia e a produção de calor através das indústrias e dos transportes. Halder *et al.* (2021) entendem que as atividades antrópicas são as principais causadoras da variação de temperatura em áreas urbanas, pois alteram o uso e cobertura da terra, além de envolverem diversas atividades em um mesmo espaço.

As alterações de clima impactam na dispersão dos poluentes, na intensidade e desenvolvimento de tempestades e em outros processos químicos e físicos do ambiente urbano, ainda não quantificados apropriadamente (KHAN e SIMPSON, 2001). Para Stewart e Oke (2012), o efeito de ilha de calor urbana possui cinco causas:

- a) maior absorção de radiação solar devido à construção de superfícies verticais;
- b) maior retenção de radiação infravermelha nos cânions devido ao fator de visão do céu;
- c) aumento da absorção e conseqüente atraso na liberação de calor das superfícies pavimentadas;
- d) a maioria da radiação solar absorvida pela superfície se converte em calor sensível em vez de calor latente;

e) a queima de combustíveis, o uso de aparelhos de ar-condicionado e a poluição gerada por indústrias aumentam a liberação de calor sensível e latente na atmosfera.

Na visão de Gartland (2010) cinco fatores contribuem com a formação de ilhas de calor urbanas, que são:

- a) falta de vegetação;
- b) excesso de superfícies impermeáveis;
- c) características dos materiais de superfície;
- d) geometria urbana;
- e) aumento da poluição.

Para Romero *et al.* (2019) são três os fatores que contribuem para a formação das ilhas de calor urbanas:

- a) Diferença entre a média da radiação de áreas urbanas e imediações, principalmente a baixa taxa de resfriamento durante a noite;
- b) A baixa evaporação do solo;
- c) As fontes de calor estacionais provocadas pelo aquecimento ou resfriamento artificial (aquecedores e ar-condicionado), que são cedidos para o ar urbano.

Stewart e Oke (2012) afirmam que as ilhas de calor podem ocorrer em lugares de clima quente ou frio. E segundo Fialho (2012), este efeito é mais notável durante o período noturno, porém, estudos revelaram que apesar de inicialmente se acreditar que ocorriam entre 3 a 5 horas após o pôr do sol, demonstrou-se que pode ocorrer em até 6 ou 7 horas, ou até mesmo ter sua intensidade máxima em períodos diurnos. Estas diferenças ocorrem devido à localização geográfica da cidade. Oke (1978) observou que em áreas onde as atividades humanas são mais intensas, a temperatura do ar tende a ser mais elevada. Para Gartland (2010) o horário de pico da ICU irá depender das características dos materiais que constituem a cidade, tendo em vista que materiais que liberam calor mais rapidamente (madeira, solo seco, por exemplo) tendem a atingir picos com intensidade após o pôr-do-sol, enquanto materiais que liberam calor mais lentamente (concreto, rocha, por exemplo), podem atingir o pico somente ao amanhecer.

Oke (2006) cita dois tipos de ilha de calor: a de superfície, e a atmosférica. A Ilha de calor de superfície representa a diferença da temperatura de superfície entre as zonas rurais e urbanas, e podem ser estudados a partir de dados fornecidos por sensoriamento remoto via satélite (HALDER *et al.*, 2021). Enquanto a Ilha de Calor atmosférica representa a diferença da temperatura do ar entre as zonas rurais e urbanas., considerando os efeitos provocados no dossel os camadas limites da atmosfera (ATHUKORALA e MURAYAMA, 2021). Conforme Zhou

et al. (2019), na maioria das vezes, as ilhas de calor de superfície são mais intensas durante a noite, ao contrário do que acontece com as ilhas de calor atmosféricas, que apresentam maior intensidade no período noturno, devido a lenta liberação de calor dos edifícios

O Quadro 4 apresenta as principais diferenças entre as categorias de Ilhas de calor urbana, baseadas no desenvolvimento temporal, intensidade, método de identificação e representação. Ainda destaca que o monitoramento das temperaturas de superfície pode ser através de imagens termais de satélite, enquanto as temperaturas atmosféricas são obtidas por estações meteorológicas.

Quadro 3 - Ilha de Calor Urbana de Superfície e Atmosférica

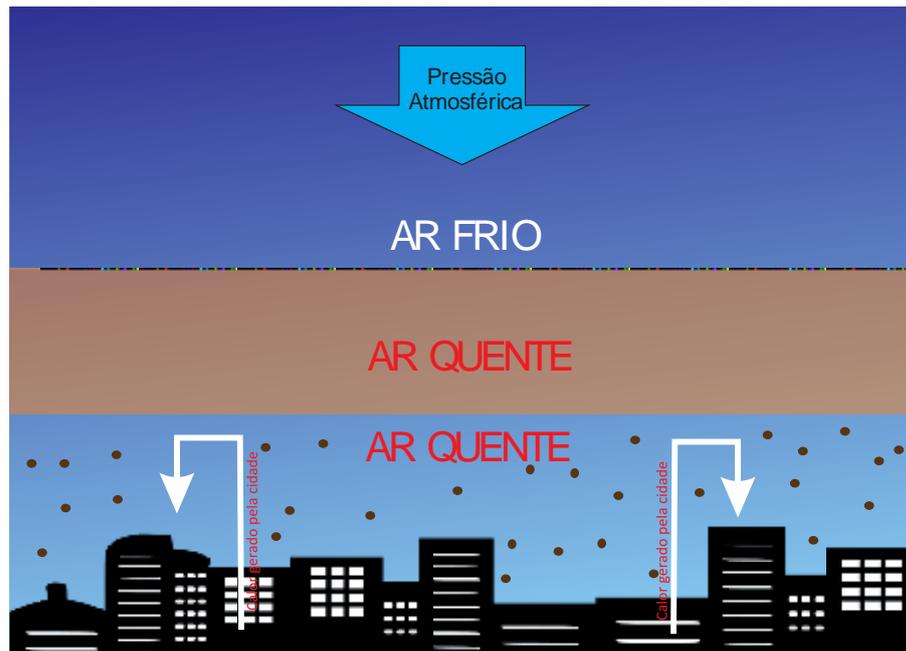
CARACTERÍSTICAS	ICU SUPERFÍCIE	ICU ATMOSFÉRICA
Desenvolvimento temporal	Presente em todas as horas do dia e da noite	Pode ser pequena ou inexistente durante o dia
	Mais intensa durante o dia e no verão	Mais intensa durante a noite e no inverno
Intensidade (amplitude térmica)	Maior variação espacial e temporal	Menor variação
	Dia: 10 a 15°C	Dia -1 a 3°C
	Noite 5 a 10°	Noite 7 a 12°
Método de identificação	Medição indireta	Medição direta
	Sensoriamento remoto	Estação meteorológica fixa
		Transectos em rede de estações móveis
Representação típica	Imagem termal	Mapa isotérmico
		Gráfico de temperatura

Fonte: EPA, 2008

Romero *et al.* (2019) afirmam que as ilhas de calor urbanas (ICU) ocasionam desconforto térmico, aumento do consumo energético (principalmente, devido ao uso de aparelhos para refrigerar o ambiente), além de gerar problemas de saúde. Um dos fatores que afetam a saúde da população é a qualidade do ar que é prejudicada pelas ICU, isso ocorre devido aos elementos poluentes serem carregados pelo ar quente, e estes se agruparem no centro da cidade. Outro fator considerado insalubre é a nebulosidade provocada pelas partículas que são carregadas pelo ar quente para as partes mais altas da atmosfera. O fenômeno que provoca esses fatores citados é denominado inversão térmica, e é explicado por Romero (2009), durante a

noite o solo perde calor por radiação, a camada que está logo em cima deveria trocar calor com a cidade, entretanto, a ICU provoca um bolsão de calor, reduzindo a troca de calor com a atmosfera, que apresenta uma temperatura mais baixa (Figura 13). Não apenas o solo perde calor, mas também as demais construções. Stewart e Oke (2012) consideram que Ilha de Calor Urbana deverá ser medida de 1 a 2 metros acima do solo.

Figura 13 - Ilha de calor urbana. Esquema de troca de calor



Fonte: Elaborado pela autora

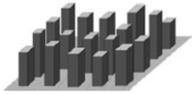
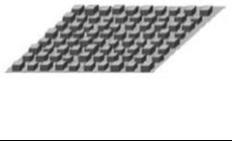
Harnack e Landsberg (1975) identificaram que o efeito de Ilha de Calor urbana é um fator gerador de chuvas. E podem ser favoráveis em climas frios, pois promove o aquecimento em edificações (visto que estudos mostram que é possível economizar de 5 a 7,5% dos custos com aquecimento artificial por aumento de 1 C°), e também para pedestres, porém, em climas quentes esse custo-benefício não existe (OKE, 1988), como é o caso de cidades em latitudes tropicais (PACIFICI, 2019).

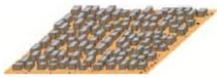
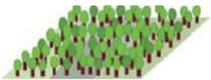
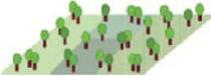
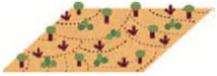
Como já citado, existem várias maneiras de analisar as Ilhas de Calor Urbanas, na maioria das vezes, essa comparação se faz entre o meio rural e urbano. Todavia, Stewart e Oke (2012) propuseram um método para analisar a formação de ICU apenas dentro do meio urbano, esse sistema foi denominado como Zonas Climáticas Locais, ou *Local Climate Zones* (em inglês), a seguir, será melhor explanada esse método, que servirá como recurso para esta pesquisa.

2.1.4. Zonas Climáticas Locais

Stewart e Oke (2012) propuseram uma forma de classificar as cidades, chamada de Local Climate Zones (LCZ), ou Zonas Climáticas Locais; onde as áreas da cidade são divididas e agrupadas pelo grau de verticalização, adensamento, material e cobertura do solo, e atividades antropogênicas que ocorrem no local (Quadro 5). Este modelo foi fundamentado a partir de experimentos feitos em diversas áreas urbanas de diversos países. São 17 LCZ divididas em dois grupos, onde um está relacionado ao tipo de construção e o outro grupo ao tipo de cobertura. As LCZs de 1 a 10 representam o tipo de construção, definidas pelas alturas das construções, materiais construtivos e pela densidade construtiva. E as LCZs de A ao G representam os tipos de cobertura do solo.

Quadro 4 - Sistema de classificação da paisagem através de zonas climáticas locais (LCZ)

ZONA	ILUSTRAÇÃO	TIPOS DE EDIFÍCIOS	DEFINIÇÃO
1		EDIFÍCIOS ALTOS AGRUPADOS	Mistura Densa de edifícios altos com 10 pavimentos. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo Pavimentada. Materiais de construção de concreto, aço, pedra e vidro.
2		EDIFÍCIOS MÉDIOS AGRUPADOS	Mistura Densa de edifícios médios de 3 a 9 pavimentos. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção de pedra, tijolo, azulejo e concreto.
3		EDIFÍCIOS BAIXOS AGRUPADOS	Mistura Densa de edifícios baixos de 1 a 3 pavimentos. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção de pedra, tijolo, azulejo e concreto.
4		EDIFÍCIOS ALTOS ABERTOS	Edifícios altos (10 pavimentos) em arranjo aberto. Cobertura do solo bastante permeável (vegetação rasteira, árvores espalhadas). Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
5		EDIFÍCIOS MÉDIOS ABERTOS	Edifícios médios (3-9 pavimentos) em arranjo aberto. Cobertura do solo bastante permeável (vegetação rasteira, árvores espalhadas). Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
6		EDIFÍCIOS BAIXOS ABERTOS	Edifícios baixos (1-3 pavimentos) em arranjo aberto. Cobertura do solo bastante permeável (vegetação rasteira, árvores espalhadas). Materiais de construção em madeira, tijolo, pedra, azulejo e concreto.

7		BAIXA DENSIDADE LEVE	Mistura densa de edifícios de pavimento térreo. Poucas ou nenhuma árvore. A cobertura do solo é dura e compacta. Materiais de construção leves (por exemplo, madeira, palha, metal ondulado).
8		BAIXA DENSIDADE AMPLA	Arranjo aberto de grandes edifícios baixos (1-3 pavimentos). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção de aço, concreto, metal e pedra.
9		CONSTRUÇÕES ESPARSAS	Arranjo disperso de pequenos ou médios edifícios em um ambiente natural. Abundância de cobertura do solo permeável (plantas baixas, árvores dispersas).
10		INDÚSTRIA PESADA	Estruturas industriais de alturas baixas e médias (torres, tanques, pilhas). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada ou dura e compacta. Materiais de construção de metal, aço e concreto.
A		ARBORIZAÇÃO DENSA	Paisagem fortemente arborizada, com árvores de folha caduca e/ou perene. Solo permeável (vegetação rasteira). A função da zona é floresta natural, cultivo de áreas ou parques urbanos.
B		ARBORIZAÇÃO DISPERSA	Paisagem levemente arborizada, com árvores de folha caduca e/ou perene. Solo permeável (vegetação rasteira). A função da zona é floresta natural, cultivo de áreas ou parques urbanos.
C		CAMPOS E ARBUSTOS	Arranjo aberto de campos, arbustos, árvores baixas e lenhosas. Solo permeável (solo ou areia). A função da zona é mata natural ou agricultura.
D		VEGETAÇÃO RASTEIRA	Paisagem com pouca expressão de grama ou plantas herbáceas / cultivos. Pouca ou nenhuma árvore. A função da zona é pastagem natural, agricultura ou parque urbano. (rocha) ou transporte urbano.
E		ROCHA EXPOSTA OU PAVIMENTADA	Paisagem com pouca expressão em pedras ou solo pavimentado. Pouca ou nenhuma árvore ou planta. A função da zona é deserto natural
F		SOLO OU AREIA EXPOSTOS	Paisagem inexpressiva de solo e areia. Pouca ou nenhuma árvore ou planta. A função da zona é deserto natural ou agricultura.
G		ÁGUA	Grandes corpos d'água abertos, como oceanos e lagos, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas.

Fonte: Stewart e Oke, 2012

O tipo de construção afeta o clima local através, principalmente, da modificação do fluxo de ar; já a cobertura do solo modifica (Tabela 1), principalmente, o albedo (Tabela 2). As Zonas foram divididas a partir de propriedades que influenciam o clima na camada do dossel urbano. O intuito deste sistema é facilitar os estudos referentes à ICU através da padronização

do comportamento climático de cada zona, facilitando assim a comparação entre elas. Além disso, conforme observação de Stewart e Oke (2012), a maioria dos estudos referentes à ilhas de calor urbanas são voltadas para a comparação do clima Urbano/Rural, e com a aplicação das Zonas Climáticas Locais, as pesquisas relativas a ICUs podem trazer ponderações mais evidentes em relação ao viés urbano no estudo climático.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros geométricos e de cobertura do solo para as LCZs

LCZ	FVC	Relação H/W	Fração de superfície edificada (%)	Fração de superfície impermeável (%)	Fração de superfície permeável (%)	Altura dos elementos de rugosidade (m)	Classes de rugosidade
LCZ 1	0.2-0.4	>2	40-60	40-60	<10	>25	8
LCZ 2	0.3-0.6	0.75-2	40-70	30-50	<20	10-25	6-7
LCZ 3	0.2-0.6	0.75-1.5	40-70	20-50	<30	3-10	6
LCZ 4	0.5-0.7	0.75-1.25	20-40	30-40	30-40	>25	7-8
LCZ 5	0.5-0.8	0.3-0.75	20-40	30-50	20-40	10-25	5-6
LCZ 6	0.6-0.9	0.3-0.75	20-40	20-50	30-60	3-10	5-6
LCZ 7	0.2-0.5	1-2	60-90	<20	<30	2-4	4-5
LCZ 8	>0.7	0.1-0.3	30-50	40-50	<20	3-10	5
LCZ 9	>0.8	0.1-0.25	10-20	<20	60-80	3-10	5-6
LCZ 10	0.6-0.9	0.2-0.5	20-30	20-40	40-50	5-15	5-6
LCZ A	<0.4	>1	<10	<10	>90	3-30	8
LCZ B	0.5-0.8	0.25-0.75	<10	<10	>90	3-15	5-6
LCZ C	0.7-0.9	0.25-1.0	<10	<10	>90	<2	4-5
LCZ D	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3-4
LCZ E	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1-2
LCZ F	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<0.25	1-2
LCZ G	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	-	1

Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Stewart e Oke (2012).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros termiais, radiativos e metabólicos para as LCZ

LCZ	Admitância da Superfície	Albedo superficial	Calor antropogênico
LCZ 1	1,500-1,800	0.10 - 0.20	50 -300
LCZ 2	1,500-2,200	0.10 - 0.20	<75
LCZ 3	1,200-1,800	0.10 - 0.20	<75
LCZ 4	1,400-1,800	0.12 - 0.25	<50
LCZ 5	1,400-2,000	0.12 - 0.25	<25
LCZ 6	1,200-1,800	0.12 - 0.25	<25
LCZ 7	800-1,500	0.15 - 0.35	<35
LCZ 8	1,200-1,800	0.15 - 0.25	<50
LCZ 9	1,000-1,800	0.12 - 0.25	<10
LCZ 10	1,000-2,500	0.12 - 0.20	>300
LCZ A	Desconhecido	0.10 - 0,20	0
LCZ B	1,000-1,800	0.15 - 0.25	0
LCZ C	700-1,500	0.15 - 0.30	0
LCZ D	1,200-1,600	0.15 - 0.25	0
LCZ E	1,200-2,500	0.15 -0.30	0
LCZ F	600-1,400	0.20 - 0.35	0
LCZ G	1,500	0.02 - 0.1	0

Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Stewart e Oke (2012).

Stewart e Oke (2012) destacam que é muito improvável que se encontre uma Zona Climática Local pura, exceto em configurações planejadas, por isso, os autores aconselham que sejam criadas subclasses, fazendo combinações entre as Zona Climática Local (LCZ), e a partir daí, nominar essas subclasses de LCZ X_{ai}, onde o “X” representa a classe mais predominante

do padrão LCZ, “a” a classe inferior, e a “i” o tipo de cobertura de solo. Os autores orientam que a zona avaliada possua um raio aproximado de 200 metros, e que se escolha a área mais homogênea possível.

Stewart e Oke (2012) elaboraram uma ficha que auxilia a avaliação da LCZ, onde devem ser consideradas as definições da Zona, imagens ilustrativas, e as seguintes propriedades:

- a) fator de visão do céu;
- b) proporção do Cânion;
- c) altura média da construção;
- d) classe de rugosidade do terreno;
- e) fração de superfície construída;
- f) fração de superfície impermeável;
- g) admitância térmica da superfície;
- h) albedo de superfície;
- i) fluxo de calor antropogênico.

Ferreira (2020) cita duas abordagens como metodologia de mapeamento das Zonas Climáticas Locais, o Top-down, ou de cima para baixo, quando são utilizados os dados de satélite; e a abordagem Botton-up, ou de baixo para cima, quando a análise é feita a partir de dados locais ou observacionais. López (2020) aborda em seus trabalhos a metodologia WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools), que utiliza o método Top-down, e a metodologia de dados observacionais, que utiliza a metodologia Botton-up.

2.1.5. Equipamentos

Para medir as variáveis climáticas (temperatura do ar, precipitação, umidade do ar, velocidade dos ventos, pressão atmosférica, evaporação e insolação), Oke (2006) destaca que o primeiro passo é locar corretamente os equipamentos de medição, para isso é necessário definir o propósito da investigação, assim como, definir a escala climática a ser abrangida. Outro fator observado por Oke (2006) é que os equipamentos de medição não deverão ser locados perto de motores, veículos e nem de superfícies de vidro, devido a emissão de calor dessas superfícies, que podem interferir no resultado.

Megda (2020) ressalta a importância da utilização de aparelhos e sensores portáteis para medição de dados climáticos em áreas urbanas, visto que, apenas as estações meteorológicas fixas não seriam eficazes, pois, retratam apenas as características de um local específico. Por isso, o autor, propõe que os dados coletados por equipamentos portáteis sejam

comparados e analisados com os dados coletados da estação fixa do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Lucena (2019) apoia essa constatação ao afirmar que as estações meteorológicas fornecem apenas dados pontuais, e nível de mesoescala. Por outro lado, Berg e Kucharik (2022) avaliam que os dados de temperatura de superfície terrestre coletados por satélite não refletem a real percepção térmica que as pessoas sentem, o que pode ser melhor analisado com a temperatura do ar.

A temperatura do ar ou de superfície pode ser mensurada através de inúmeros equipamentos, que podem ser combinados entre si, cada qual com suas vantagens e desvantagens (BERG e KUCHARIK, 2022). É importante entender quais são os equipamentos mais utilizados para a aferição de temperatura, seja do ar ou de superfície, e como estes equipamentos funcionam, e assim, avaliar qual é a melhor opção a ser utilizada para obter o resultado de estudo esperado.

2.1.5.1. Estações meteorológicas

Nem sempre os dados coletados em estações meteorológicas são representativos do microclima no interior do dossel urbano, pois a grande maioria das estações está localizada em áreas menos densamente edificadas, diferente da configuração urbana da maior parte do restante da cidade (GONZALES, 2015). Países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, apresentam escassa quantidade de estações meteorológicas, o que dificulta avaliar com precisão o efeito de ilhas de calor urbanas (FARID *et al.*, 2022)

2.1.5.2. Geotecnologias

A geotecnologia é uma eficiente ferramenta para obtenção de dados, e quando somados ao levantamento de campo se tornam ainda mais hábil nas tomadas de decisões a respeito das alterações do clima urbano (VIANNA, 2018). Romero et al. (2019) afirmam que as imagens termais geradas a partir de sensoriamento remoto são fundamentais para a pesquisa urbana, pois, permitem a análise temporal e sazonal. Além disso, essas imagens podem ser utilizadas em conjunto com outros métodos de geotecnologia, com a finalidade de identificação das superfícies urbanas, e até mesmo na estimativa da quantidade de área coberta por um determinado material, como o caso de vegetações (WETHERLEY, ROBERTS e TAGUE, 2021).

Entre as ferramentas da geotecnologia, está o sensoriamento remoto, com grande relevância, pois, consegue identificar a distribuição do calor na superfície urbana, estimando

assim a temperatura de superfície da Terra (*Land Surface Temperature*, termo em inglês) (RAMPAZZO, 2019). Com o sensoriamento remoto é possível aferir a temperatura de grandes áreas simultaneamente, e não somente em locais pontuais como acontece com sensores que medem apenas a temperatura do ar.

Tradicionalmente, para resolver esses problemas, os departamentos meteorológicos de muitos países medem regularmente a temperatura do ar em locais pontuais (SHREEVASTAVA et al., 2019). No entanto, o complexo arranjo espacial das superfícies em áreas urbanas torna difícil, ou mesmo impossível, estimar as variações locais na temperatura da superfície com base apenas nesses dados (Hu *et al.*, 2019).

Vianna (2018) destaca que o uso do sensoriamento remoto na análise de temperaturas urbanas iniciou na década de 1970, através da utilização das bandas termais dos satélites Landsat. Trata-se de uma série de satélites desenvolvidos pela Agência Espacial Americana (NASA), o primeiro produto foi denominado Landsat-1, operando de 1972 a 1978, seguido pelo Landsat-2 (1975 a 1982), Landsat-3 (1978 a 1983), Landsat-4 (1982 a 1993), Landsat-5 (1984 a 2011), Landsat-7 (iniciou em 1999, ainda está em atividade, porém com restrições), e por fim, o Landsat-8, que iniciou seus serviços em fevereiro de 2013, e está em atividade atualmente (INPE, 2022). Minaki (2011) ressalta que as imagens termais do Landsat estimam a temperatura de superfície, e não a temperatura do ar. Gawuc, Jefimow e Szymankiewicz (2020) apontam como pontos negativos dos satélites a limitação de dados obtidos por dia (no máximo duas vezes ao dia), e também, a dependência em relação a nebulosidade, o que dificulta a captação de imagens.

O grande passo nos estudos sobre ilha de calor utilizando imagens de satélite foi promovido em 1985, por Lombardo (1985), ao desenvolver um algoritmo que estabelece a relação entre os níveis cinza das imagens infravermelhas e a temperatura. Vieira e Machado (2018) após revisão bibliográfica constataram que o Landsat foi o satélite mais utilizado em pesquisas de estudo do campo térmico urbano no Brasil.

Além da análise de temperaturas, o sensoriamento remoto pode ser utilizado na análise de uso do solo, através da fotointerpretação ou através da classificação automática (MESSIAS, 2012). Moreira (2001) define fotointerpretação como o ato de extrair por observação de imagem informações de pontos da superfície terrestres obtidos através de respostas espectrais. Classificação automática é quando cada pixel de uma imagem é associado a uma classe, sendo ela supervisionada, quando feita através de amostras fornecidas pelo usuário, ou não-supervisionada, quando é o software que classifica as amostras. Farid et al. (2022), através do método de classificação supervisionada com o auxílio do software ArquiGis, analisaram a

mudança do uso e cobertura do solo ocorridas nos anos 1990, 2000, 2010 e 2020, essa análise ocorreu a partir de imagens obtidas pelos satélites Landsat-5 e Landsat-8. Faisal et al. (2021) utilizaram as imagens de satélite Landsat-4, Landsat-5 e Landsat-8 para comparar a mudança de uso e cobertura do solo nos anos 2000, 2010 e 2020 na cidade de Dhaka, Bangladesh.

2.1.5.3. Termohigro-Anemômetro Digital e Câmera termográfica

Os transectos móveis apresentam como principal vantagem a obtenção de temperaturas de diversos pontos da cidade, diferente do que acontece com as estações fixas, todavia, apresenta como uma das desvantagens a mão-de-obra empregada em cada medição, onde, fatores externos podem influenciar nos resultados (SUN et al., 2019). Ainda comparando estes dois métodos de medição, outra desvantagem dos transectos móveis, é que estes equipamentos não fornecem registro histórico de temperatura (BERG e KUCHARIK, 2022).

No presente trabalho, serão empregados dois tipos de equipamentos móveis de medição de temperatura: o termohigro-anemômetro e a câmera termográfica. O termohigro-anemômetro é um equipamento de fácil manuseio e simples transporte, além de medir a temperatura do ar, é possível, simultaneamente, realizar a medição de velocidade do vento e umidade relativa do ar.

A câmera termográfica é um equipamento que vem ganhando cada vez mais espaço na construção civil, inclusive em pesquisas científicas, como é o caso do trabalho de Vianna (2018). Este aparelho possibilita através da captura de luz infravermelha visualizar a radiação que cada superfície emite, e conseqüentemente, a temperatura que apresenta. Existem vários tipos de câmeras termográficas no mercado, inclusive, câmeras possíveis de serem acopladas em aparelhos celulares, e o valores das câmeras também variam de centenas a milhares de reais. Kowalski e Masiero (2020) pontuam a necessidade de atenção ao utilizar esse tipo de equipamento, pois, a radiação solar quando incide diretamente sobre os sensores pode comprometer os resultados.

2.2. RECURSOS COMPUTACIONAIS NO ESTUDO DO CONFORTO TÉRMICO

Silva (2013) afirma que as ferramentas computacionais são mecanismos valiosos para o monitoramento da qualidade de produção arquitetônica e urbanística atual. Permitem que o usuário crie construções tridimensionais, a fim de realizar simulações que possibilitem compreender melhor o comportamento de alguns cenários. A utilização desses instrumentos

pode ser aplicada tanto no processo de concepção de projetos, como na análise de projetos já construídos que necessitem de intervenção (ROMERO, 2009). Programas computacionais possibilitam a análise pós-ocupação de projetos, antes mesmo da execução destes (BARBOSA, 2018). Permitem simular condições climáticas, visto que, anteriormente, esses estudos eram feitos de forma manual, e com o advento da computação, esses estudos foram facilitados, sendo possível a criação até mesmo de vídeos simulando o caminho do sol, onde se pode observar a incidência solar e sombreamento (MARTINS, 2014a). Cenários futuros do microclima local também podem ser simulados, como é o caso da pesquisa de Schmitz (2014), que aplicou simulações para os anos de 2036 e 2061 para a cidade de Curitiba/PR.

Yang, Wang e Kaloush (2015) apontam a modelagem numérica por simulação computacional como uma metodologia mais confiável para pesquisas relacionadas ao conforto térmico em áreas externas. Lima (2018) acrescenta que com a simulação computacional é possível simular inúmeras configurações urbanas e seus reflexos no conforto térmico, auxiliando o planejamento da cidade, inclusive, a autora usa em sua pesquisa algum desses programas. No mercado existem muito programas computacionais direcionados a simulação climática da cidade, Lima (2018) cita o ENVI-met, o SOLWEIG e o Rayman, destes o mais utilizado no meio científico é o ENVI-met.

Silva (2013) divide os programas computacionais em dois grupos: a) voltados para modelagem e projeto; b) voltados para avaliação (simulação). Neste trabalho foram utilizados os dois grupos, sendo eles os softwares: QGis, ENVI- met, Sketch up, AutoCAD, e como programas computacionais de apoio o CorelDraw, Microsoft Excel, além dos aplicativos online Dynamic Overshadowing (para a análise de fator de visão do céu) e o *LCZ Generator* (geração de Zonas Climáticas Locais).

2.2.1. Sistema de Informação Geográfica

López (2020) especifica o Sistema de Informação Geográfica (SIG) como um programa que integra um conjunto de ferramentas, permitindo a organização, manipulação, análise, e modelagem de vários dados reais. Igualmente, em estudos urbanos permite o uso de grande quantidade de dados, gerando mapas de fácil entendimento.

Os programas de ferramenta SIG podem ser aplicados em diversas disciplinas, entre elas o urbanismo e construção civil (MARTINS, 2014a). Na presente pesquisa o Sistema de informação geográfica (SIG) utilizado será o QuantumGis (QGis), optou-se por esse software por ser gratuito e de fácil acesso a pesquisadores e profissionais, podendo ser obtido diretamente

do site oficial do programa¹, que disponibiliza a versão mais atualizada, além da versão anterior. Dentre os recursos que mais serão utilizados nesta tese dentro do QuantumGis estão o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e o índice de diferença normalizada da água (NDWI).

2.2.1.1. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI

Vianna (2018) explica que os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que indicam a presença de vegetação verde, considerando o Índice de Área Foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR).

Este índice consiste em uma equação que tem como variáveis as bandas do vermelho e infravermelho próximo. No Landsat 5 a banda 4 corresponde a faixa de infravermelho, região em que a vegetação mostra reflectância mais intensa; e a banda 3 a faixa vermelho (red), onde a vegetação possui mais alta absorção da luz solar visível devido à presença do pigmento verde clorofila, já no Landsat 8, a faixa de infravermelho corresponde a banda 5, e a faixa vermelha corresponde a banda 4. Para a obtenção do NDVI é realizada uma equação (Equação 7) com o objetivo de identificar os locais onde a fotossíntese é mais intensa, os valores obtidos estão entre -1 e 1, indicando maior ou menor presença de vegetação.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IR} - \text{R}}{\text{IR} + \text{R}} \quad (7)$$

Onde:

IR = Infrared (Infravermelho próximo);

R = Red (vermelho).

Este índice consiste em uma equação que tem como variáveis as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Consiste em uma “Álgebra de Bandas”, com o objetivo de identificar os locais onde a fotossíntese é mais intensa, os valores obtidos estão entre -1 e 1, indicando maior ou menor presença de vegetação.

2.2.1.2. Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI)

¹ <https://www.qgis.org>

Este método foi desenvolvido por Mcfeeters (1996) objetivando detectar através de sensoriamento remoto a presença de água na superfície, baseou-se no mesmo princípio do NDVI, utilizando o contraste de bandas termais, porém, em vez de utilizar a banda vermelha, ele utilizou a banda verde para obter melhores resultados. Obteve-se as seguintes fórmulas (Equação 8 e 9):

$$(Landsat5) \quad NDWI = (b2 - b4) / (b2 + b4) \quad (8)$$

$$(Landsat8) \quad NDWI = (b3 - b5) / (b3 + b5) \quad (9)$$

O Landsat 8 permite uma melhor detecção de variações de energia refletida pelo ambientes aquáticos, conforme apontam Borges *et al.* (2015).

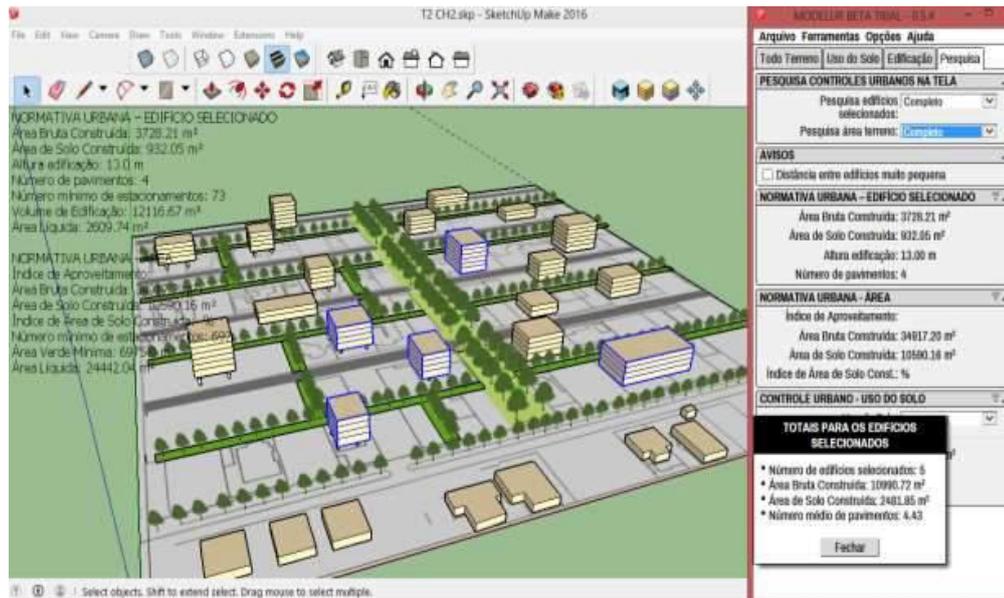
2.2.2. O AutoCAD na análise de superfície urbana

O AutoCAD é um software produzido pela empresa Autodesk, um dos programas mais utilizados por projetistas (BARBOSA, 2018), a fabricante do programa disponibiliza uma versão gratuita para estudantes, mediante cadastro com comprovação de vínculo estudantil. Ele é citado como programa de suporte utilizado por alguns pesquisadores na área de estudo urbano. Vilela (2007) cita o uso deste software como metodologia de análise do fator de visão do céu, além de ser utilizado como formato de mapa da cidade de Nova Lima, Minas Gerais.

2.2.3. O uso do Sketchup para a contribuição da análise do conforto térmico

O Sketchup é um programa computacional de domínio do Google, possui versão de teste com 30 dias gratuitos, sendo assim, de fácil acesso ao meio acadêmico. É uma ferramenta de modelagem, podendo ser utilizada em pesquisas urbanas, como é o caso do trabalho de Torres (2017), que utilizou o programa juntamente com o plugin “Modelur” (Figura 14). O Sketchup permite o uso de muitos plug-ins que abrangem ainda mais a sua utilidade na análise do conforto térmico, inclusive, existe o plug-in que trabalha em conjunto com o ENVI-met, porém, está disponível apenas para a versão anterior do Sketchup, sem versão teste gratuita, e como a presente pesquisa procura trabalhar com ferramentas de baixo custo, optou-se por não o utilizar o plug-in do ENVI-met para Sketchup.

Figura 14 - O uso do Sketchup na pesquisa de Torres (2017)



Fonte: Torres, 2017

MARTINS (2014a) utilizou o Sketchup em sua tese de doutorado para modelar o espaço urbano, simulando o potencial de energia solar a partir da disposição dos edifícios na cidade. Nugroho, Triyadi e Wonorahadjo (2022) utilizaram o Sketchup como ferramenta para identificar a relação entre a geometria dos edifícios, os materiais construtivos e o conforto térmico, na cidade de Bandung, Indonésia. É um software de grande versatilidade na análise urbana e climática, de fácil manuseio, e com vasta gama de *plug-ins* disponíveis.

2.2.4. O uso do ENVI-met na análise climática urbana

É cada vez mais frequente o uso de ferramentas numéricas com foco na interação entre cidade e clima, é uma forma simplificada de simular as interações urbanas e prever impactos futuros (PACIFICI, 2019).

O ENVI-met é um programa que trabalha com código numérico tridimensional, de domínio público, desenvolvido por Bruse e outros pesquisadores do Departamento de Geografia da Universidade de Bochum, é um modelo computacional microclimático tridimensional, sendo possível simular os fluxos de radiação, fluxo dos ventos, temperatura e umidade do ar, e até mesmo fatores relacionados à vegetação, tipos de solo e superfície. É um dos modelos mais completos para cálculo do conforto térmico. Pacifici (2019) ainda aponta como habilidade do programa o cálculo de balanço de energia de todas as superfícies, além das contribuições fisiológicas da vegetação, e os processos atmosféricos. Até a versão 3.1 o programa não levava em consideração a capacidade térmica da fachada nos cálculos de energia

e turbulência, o que mudou a partir da versão 4.0, passando a considerar propriedades físicas como reflexão, absorção, transmissão, emissividade, coeficiente de transferência de calor, espessura das paredes e capacidade térmica específica (TORRES, 2017).

O software ENVI-met funciona no sistema de superfície terrestre e superfície atmosférica, numa altitude máxima de 2.500 metros (SCHMITZ, 2014). Trabalha de modo interativo com múltiplas variáveis, sendo:

- a) No campo atmosférico: velocidade dos ventos, temperatura, umidade e poluentes;
- b) Solo: temperatura e umidade do solo, corpos d'água;
- c) Superfície: materiais de superfície;
- d) Vegetação: temperatura de folhagem, troca de calor sensível e latente.

Emmanuel et al. (2007) apontam como desvantagem do ENVI-met algumas limitações do programa, como por exemplo, parâmetros iniciais que se mantem constantes a uma altura de 2.500 metros durante a simulação, o que ocasiona temperatura do ar durante o dia subestimada. Yang, Wang e Kaloush (2015) apontam como outra desvantagem o fato de os edifícios manterem temperatura interna constante, além disso, a transmitância térmica para paredes e telhados é a mesma para todos os edifícios, limitações que podem afetar na análise de perda de radiação de onda longa. Além disso, o ENVI-met não simula o calor antropogênico, fator este, que pode causar um aumento significativo da temperatura no ambiente real (YANG; WANG e KALOUSH (2015).

Torres (2017) investigou diferentes padrões de ocupação tanto em uma abordagem empírica, como a partir de cenários hipotéticos, existentes e não existentes no universo empírico. A autora também utilizou em sua pesquisa o ENVI-met para simular o microclima urbano, tendo como objeto de estudo a cidade de Arapiraca-AL. A autora destaca que o modelo computacional é baseado a partir de cinco módulos:

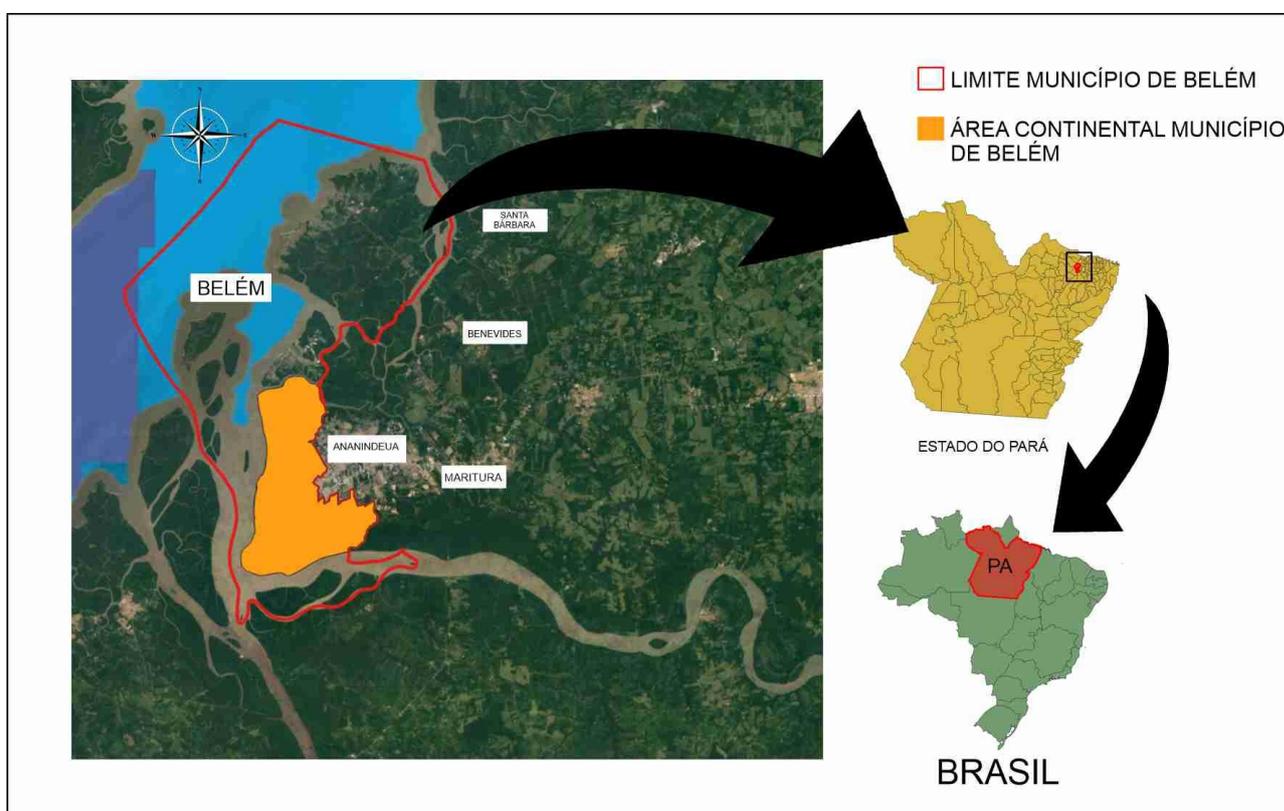
- a) atmosférico: que simula a velocidade e direção do vento, além de calcular a umidade e temperatura do ar, os fluxos de ondas curtas e radiação de onda longa;
- b) solo: calcula a temperatura de superfícies, e os processos de transmissão e absorção de radiação de onda curta em corpos d'água;
- c) vegetação: seu banco de dados disponibiliza grama e vegetações 3D, onde a temperatura da folha é calculada através do balanço de energia;
- d) ambiente construído e sistema construtivo: é possível simular construções em 3D;
- e) módulo interno: o programa é baseado na composição de malha ortogonal para representar o ambiente simulado.

2.3. TERRITÓRIO E CLIMA DA CIDADE DE BELÉM

O objeto de estudo desta tese é a cidade de Belém, no estado do Pará, e para melhor compreender a análise realizada neste estudo é necessário descrever as características locais, como, geografia, história da ocupação urbana, clima, etc.

Belém localiza-se às margens do Rio Guamá (ao sul) e da Baía do Guajará (ao oeste), entre coordenadas geográficas 1°28'03" de latitude Sul e 48°29'18" de longitude Oeste, está há 4 metros acima do nível do mar. É a capital do Estado do Pará, encontra-se na Região Norte do Brasil (Figura 15).

Figura 15 - Mapa da Localização do Município de Belém



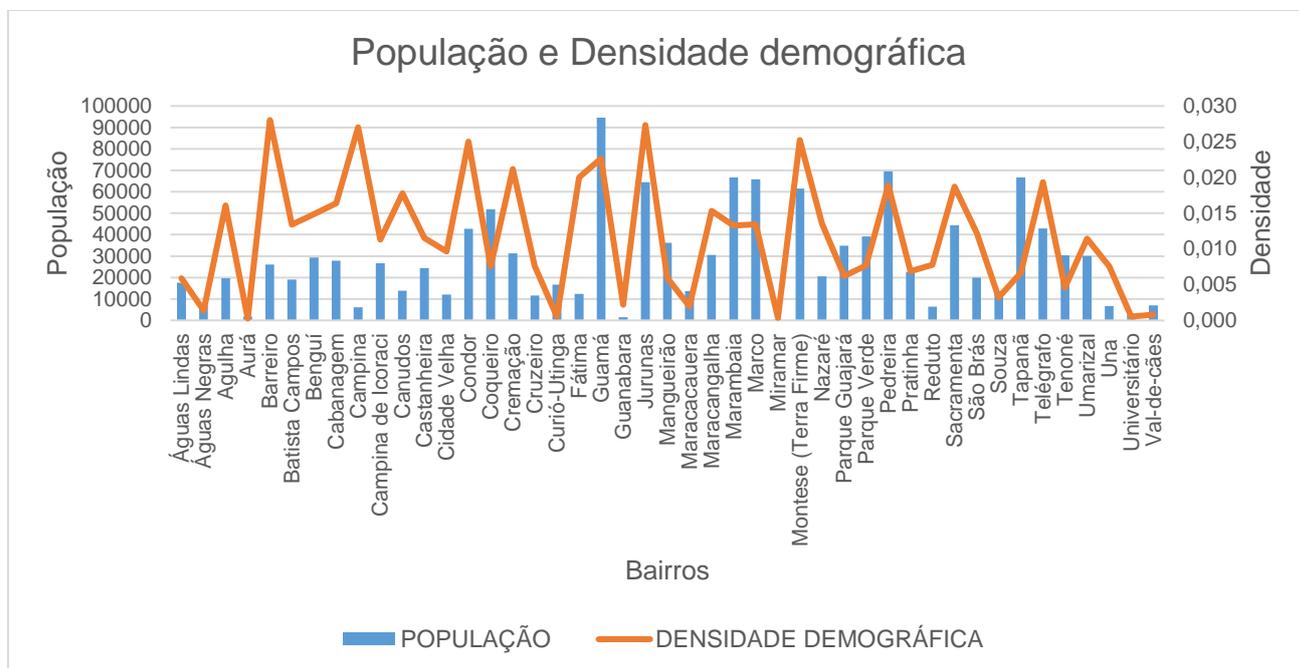
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do IBGE (2019)

Segundo o Anuário Estatístico do Município de Belém (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2012), o Município está dividido em 71 bairros e 39 ilhas, com um território de 50.582.34 ha, onde 34,36% desta área estão no continente, o restante são ilhas.

A população estimada do Município de Belém, segundo o censo 2010 (IBGE, 2019), é de 1.393.399 habitantes, e com estimativa de população para 2020 de aproximadamente 1.499.641 pessoas. A Figura 16 apresenta um gráfico com a quantidade de habitantes e a densidade demográfica dos bairros da área continental de Belém, os dados foram obtidos no

Anuário estatístico de Belém de 2011, dados de mais de uma década atrás, porém, o último disponível (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2012).

Figura 16 - Gráfico Populacional e densidade dos bairros estudados nesta pesquisa



Fonte: Prefeitura Municipal de Belém (2012)

O bairro mais populoso é o Guamá, porém, os que apresentam maior densidade populacional (habitantes x área) são os bairros do Barreiro, Jurunas e Montese (também conhecido como Terra Firme). O bairro com a menor índice populacional e densidade demográfica é Miramar, devido ser um bairro industrial, com pouca concentração de habitações (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2012).

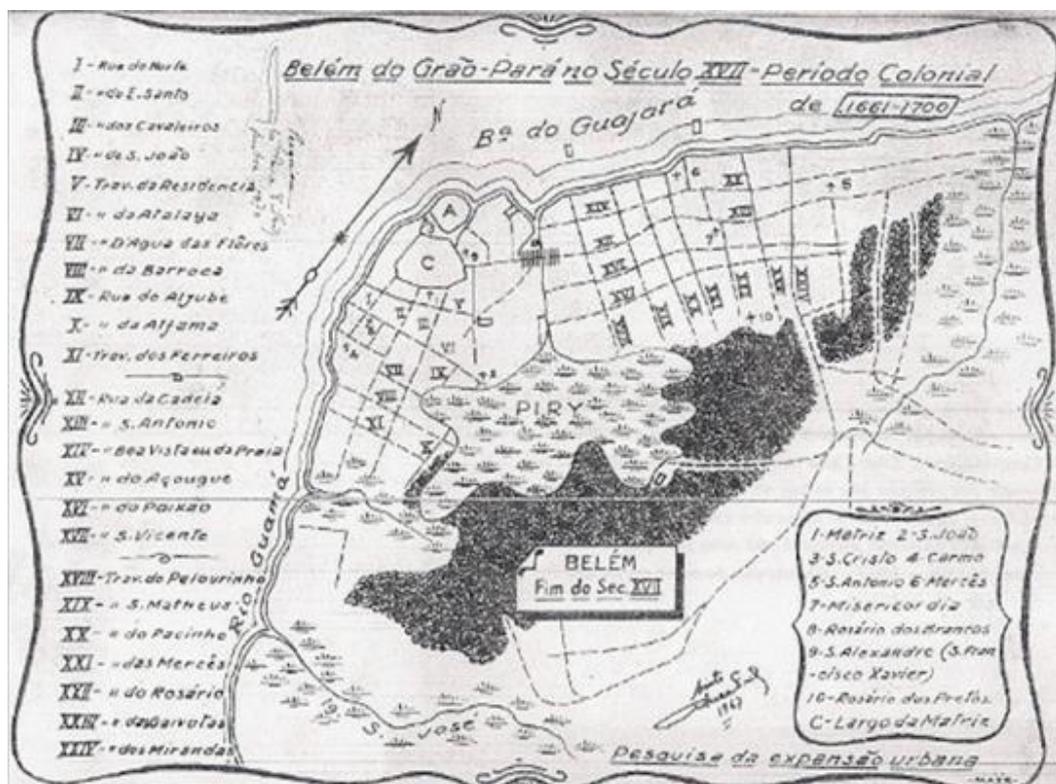
2.3.1. A urbanização de Belém

A cidade de Belém teve origem no início do século XVII, mais precisamente em 1616, a partir de um posto de defesa Portuguesa, devido a sua localização estratégica na desembocadura de grandes rios (CARDOSO e LIMA, 2015), inicialmente ocupada por índios Tupinambás (COSTA, 2014). Por essa localização estratégica, passou a ser entreposto comercial, conforme cita Corrêa (2011), e torna-se metrópole regional. Em 1872, Belém contava com aproximadamente 34.464 habitantes, compreendidos em 15,52% negros escravizados, 44,20% não brancos não escravizados, e 40,29% brancos (LAURINDO JÚNIOR, 2012).

Correa (1987) expõe dois momentos marcantes na formação socioespacial de Belém, o primeiro, em 1850, com a Lei de Terras, que instituiu a propriedade privada no Brasil, excluindo o acesso à terra para pessoas não brancas. O segundo, durante o extrativismo da borracha, a região amazônica recebeu imigrantes nordestinos para trabalhar nos seringais.

Araújo Júnior e Azevedo (2012) afirmam que a expansão inicial da cidade teve como obstáculo o alagado do Piry (Figura 17). Somente após o aterramento do alagado é que a cidade inicia a sua expansão para o interior, quando surgiu o bairro da Campina (RODRIGUES, 2013).

Figura 17 - Croqui do início do processo de ocupação da cidade de Belém, com espacialização das primeiras ruas (números romanos) e igrejas (números arábicos), tendo o alagado do Piry como um de seus primeiros “obstáculos” naturais à expansão urbana.



Fonte: Araújo Júnior e Azevedo (2012)

Em 1794 a cidade já se expandia, com a aquisição da Fazenda Tucunduba pelos padres mercedários, onde construíram uma olaria, posteriormente, estes religiosos foram expulsos pelo Marquês de Pombal, e em 07 de julho de 1816 foi criado um abrigo para hansenianos, denominado “Hospício dos Lázaros do Tucunduba” (Figura 18). Esta área faz parte do atual bairro do Guamá, que por muito tempo foi usado como “depósito social”, com a construção de hospitais, e posteriormente, cemitérios (RODRIGUES et al. 2014).

Figura 18 - Localização aproximada dos “Lázaros do Tucunduba”

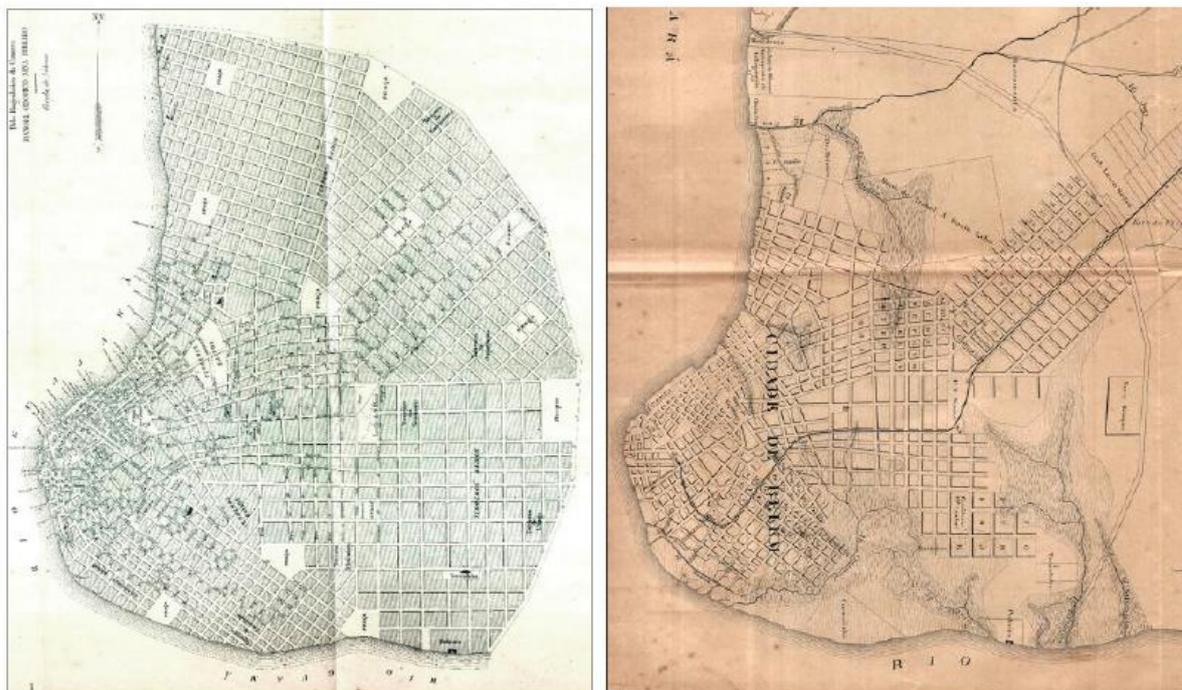


Fonte: FAU (2014a)

Na primeira metade do século XIX com a abertura da Estrada Real Bragança (hoje Avenida Nazaré) surgiu um novo aglomerado urbano, com ruas mais largas e arborizado, diferente das até então existente, baseadas em vielas estreitas (RODRIGUES, LUZ e SARAIVA, 2014).

Com o ciclo da borracha, na segunda metade do século XIX e primeira metade do século XX, a cidade prosperou e expandiu-se com a implantação da ferrovia Belém – Bragança, além disso, aconteceu o Plano de Expansão de Belém, desenvolvido por Manoel Odorico Nina Ribeiro, entre os anos de 1883 a 1886 (ABREU, 2016), que propôs malha viária regular ortogonal, mudando o cenário de vias estreitas e desalinhadas. Outros benefícios foram a implantação da rede de abastecimento de água e esgoto, drenagem urbana, arborização e iluminação pública. Porém, vale ressaltar que essas beneficias se restringiram as partes altas da cidade, onde a elite da borracha se concentrava (MOREIRA, 1966). O Plano de expansão proposto por Nina Ribeiro não considerava os elementos naturais existentes na área, sendo estes um dos motivos do plano na teoria não ser o mesmo da prática (Figura 19).

Figura 19 - À esquerda, o Plano de Expansão de Belém (1883-1886), à direita, a ocupação da cidade no início do século XX



Fonte: Abreu, Lima e Fischer (2018)

No início de 1880, o então Intendente José da Gama Malcher, abriu as primeiras ruas do bairro do Umarizal, porém, permaneceu por certo período como um bairro periférico, onde proliferavam valas, mato e alagados (RODRIGUES, 2013). Com a criação das indústrias, originou-se o bairro do Reduto, que também contava com vilas industriais (CARDOSO e LIMA, 2015). Sob a política de urbanização de Antônio Lemos (Intendente de Belém entre 1897 e 1911), Belém passou pelo processo de “embelezamento estratégico”, conforme explicam Porto *et al.* (2007), onde a população de baixa renda foi expulsa do centro da cidade para áreas da periferia, regiões alagadiças, pouco atrativas para a população mais abastada.

Durante esse processo de urbanização da cidade, o bairro do Marco ganhou melhorias e sofreu expansão, recebendo um aumento populacional. Um dos motivos para os investimentos do local foi devido a sua localização plana, longe das planícies alagadiças, estas apresentariam barreiras físicas, o que seria mais custoso ao município. A expansão urbana contou com parcelamento do solo, vias largas, implantação de rede de água e esgoto, além de arborização e iluminação de vias (MIRANDA, 2020).

Rodrigues, Luz e Saraiva (2014) contam que com o auge do ciclo da borracha, houve o crescimento populacional de Belém, e as pessoas procuraram os locais ainda não urbanizados, pois apresentavam áreas livres, desta forma, as áreas periféricas, e de baixada, como os atuais

bairros do Guamá e Terra firme, foram ocupados de forma desordenada, com ruas estreitas, de terra batida e sem o mínimo de infraestrutura.

Com a II Guerra Mundial, na década de 1940, algumas antigas fazendas foram desapropriadas e transferidas para as forças armadas, ou receberam outras finalidades, como, instalação do aeroporto internacional de Belém. Com a construção da Rodovia Belém-Brasília, na década de 1950, grandes mudanças começaram a acontecer na região Norte, pois o meio de transporte foi facilitado. No final da década de 1960, com o governo militar, foram implantados projetos de mineração e hidroelétricos, o que culminou com a migração de muitos trabalhadores em busca de emprego e até mesmo da riqueza. Este rápido crescimento demográfico não foi feito de forma planejada, resultando em um déficit habitacional, e uma configuração urbana deficiente e sem infraestrutura (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2013). Essas pessoas ocuparam as periferias, e em muitos casos, construíram casas sobre os igarapés, em palafitas (Figura 20).

Figura 20 - Ocupações em áreas de baixada no final da década de 1960, bairro da Matinha (atual bairro de Fátima) e bairro da Terra-firme, respectivamente



Fonte: Penteado (1968)

Ainda durante o governo militar, houve o incentivo para a ocupação de terras rurais na Amazônia, entretanto, isso culminou com a expulsão dos extrativistas que lá ocupavam, fazendo com que migrassem para a cidade, ocasionando o déficit de habitação, alguma dessas pessoas ocuparam as periferias de forma desordenada, áreas até então tomadas por vacarias e agricultura de subsistência, que mantinham a cobertura vegetal e permeabilidade do solo, além de assimilar a cheias dos cursos d'água, outras ocuparam o centro da cidade, em vilas construídas nos interiores dos quarteirões (VENTURA NETO e MOURA, 2019); nos dois casos, as áreas permeáveis e vegetativas foram substituídas por construções (MIRANDA, 2020).

Com a finalidade de reduzir o déficit habitacional que assolava não só Belém, mas o restante do país, houve a criação do Banco Nacional da Habitação (BNH) pelo governo Militar, com o intuito de reduzir o déficit habitacional do país, assim, no fim da década de 1960 iniciou-se a construção de conjuntos habitacionais mais distantes do centro, em Belém, como é o caso dos conjuntos construídos pela Companhia de Habitação do Estado do Pará (COHAB-PA), que viabilizava o financiamento imobiliário para funcionário do Estado (Figura 21), inicialmente, construídos na primeira légua patrimonial de Belém, porém, afastados do centro.

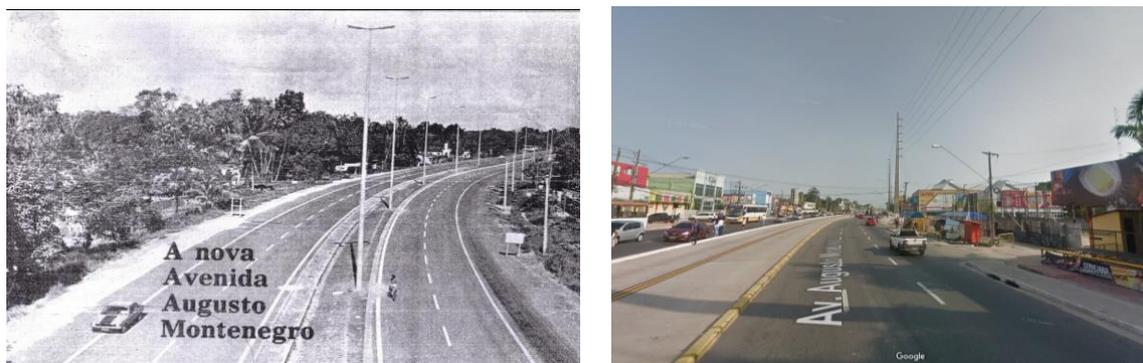
Figura 21 - Folder promocional do Conjunto Satélite e Conjunto habitacional Alacid Nunes, inaugurado em 1968



Fonte: Lima (2002) e FAU (2014b)

Segundo Lima (2002), o governo, muito mais preocupado com políticas assistencialistas do que com a qualidade de vida dos usuários, construiu os conjuntos habitacionais de forma que pudessem resultar no máximo possível de unidades em uma área, porém, com pouca ou nenhuma infraestrutura ao redor. Devido a carência de espaço na área central de Belém, esses conjuntos passam a ser construídos em glebas afastadas, como é o caso dos conjuntos localizados no perímetro da Rodovia Augusto Montenegro, que liga a primeira légua patrimonial de Belém ao Distrito de Icoaraci. Na Figura 22a, pode-se observar que a margem da rodovia ainda se encontrava com a vegetação preservada, sem muitas construções, diferente do que apresenta atualmente (Figura 22b), com todo o espaço ocupado por construções desordenadas.

Figura 22 - a) Visão da Avenida Augusto Montenegro, março de 1978. b) Imagem atual da Rodovia Augusto Montenegro.



Fonte: Mendes e Oliveira (2015) e Google (2022), respectivamente.

Miranda (2020) ressalta que esses conjuntos habitacionais não foram planejados de forma a integrar com a cidade, pois, não contaram com a estrutura necessária e acesso aos serviços, empregos e espaços públicos aos moradores, tornando-se cidades-dormitórios, visto que dependem do centro de Belém para acesso a serviços, emprego e lazer. O Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) elaborado durante o governo militar ficou restrito a primeira légua patrimonial de Belém, sendo uma das primeiras ações a macrodrenagem da bacia hidrográfica do Reduto, onde foi retificado o igarapé das Almas, localizado na atual Av. Visconde de Souza Franco, inicialmente um bairro periférico, moradia da população excluída, estes foram remanejados para os novos conjuntos habitacionais. Essas ações beneficiaram a especulação imobiliária, pois drenou as áreas de várzeas, liberando-as para a ocupação urbana de classes mais abastadas.

Um dos bairros que sofreu maiores mudanças foi o Umarizal, que inicialmente era um bairro periférico (Figura 23) de caráter residencial, a partir da década de 1990, os casarões começam a ser substituídos por altos prédios, e além disto, a área é ocupada por casas noturnas, bares e restaurantes, tornando-se um dos bairros mais caros de Belém (RODRIGUES, 2013).

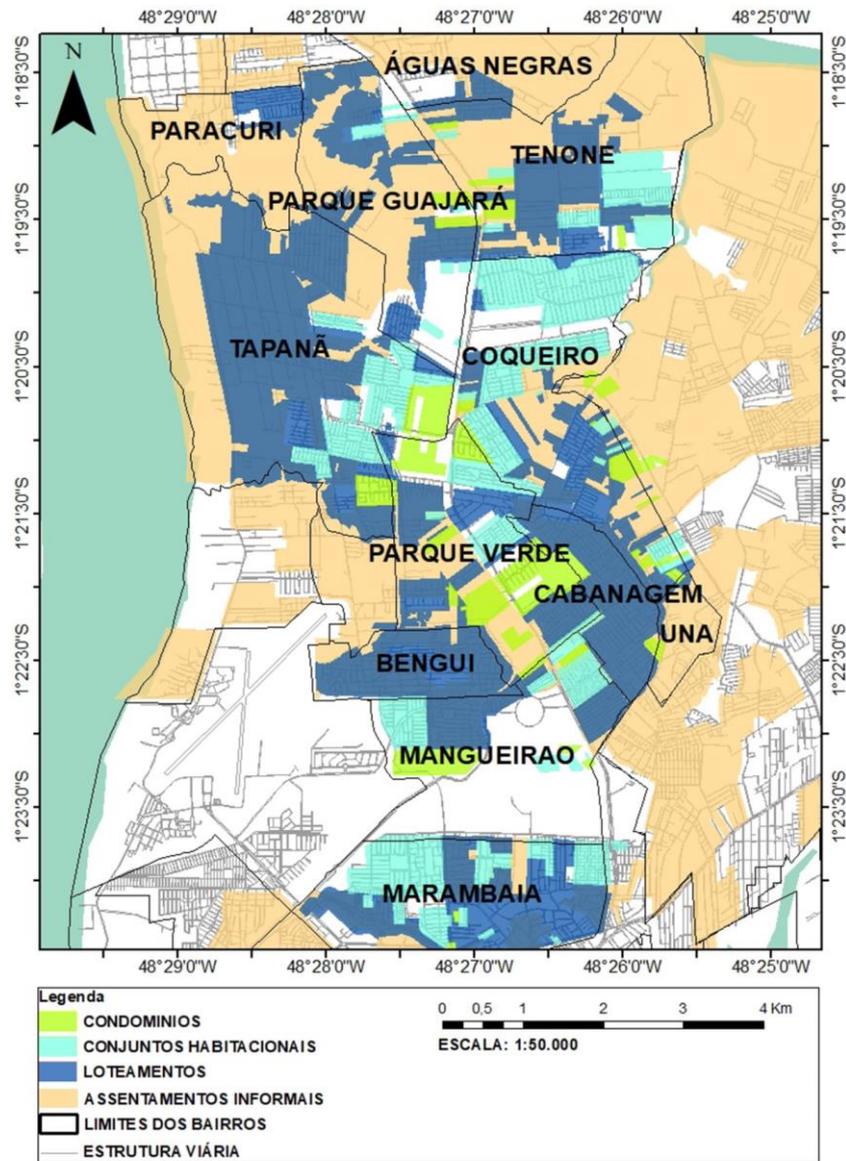
Figura 23 - Avenida Visconde de Souza Franco antes da macrodrenagem



Fonte: <https://fauufpa.files.wordpress.com/2012/05/iguara1.jpg?w=1024&h=557>

Silva Júnior *et al.* (2013) citam a mudança na paisagem ocorrida no fim do século XX, quando famílias com maior poder aquisitivo que não conseguiram se instalar em áreas centrais, começaram a ocupar edifícios ou conjuntos habitacionais em áreas mais afastadas, fazendo com que essas áreas começassem a receber maior infraestrutura, e como um ciclo, gerando maior atrativo para a migração para esses locais. Devido à localização geográfica de Belém, por ser em forma peninsular, seu crescimento nas últimas décadas se fez através da verticalização, ou com a ocupação de cidades vizinhas (Ananindeua e Marituba). A pesquisa de Miranda (2020) corrobora essa constatação, onde evidencia que a partir de 1999 o ritmo de crescimento da primeira légua patrimonial de Belém diminuiu, fato devido às poucas áreas livres que restam a serem ocupadas. A expansão passa a ocorrer em direção ao distrito de Icoaraci, fato denominado pelo setor imobiliário como “Nova Belém”, tendo seu ápice em 2010, com o aquecimento da construção civil devido ao programa “minha casa minha vida” , do Governo Federal (CARDOSO e LIMA, 2015). A Figura 24 apresenta a configuração urbana que os bairros adjacentes a essa “Nova Belém” passam a ter, sendo divididos em conjuntos habitacionais, condomínios, loteamentos e assentamentos informais (áreas de invasão de terras).

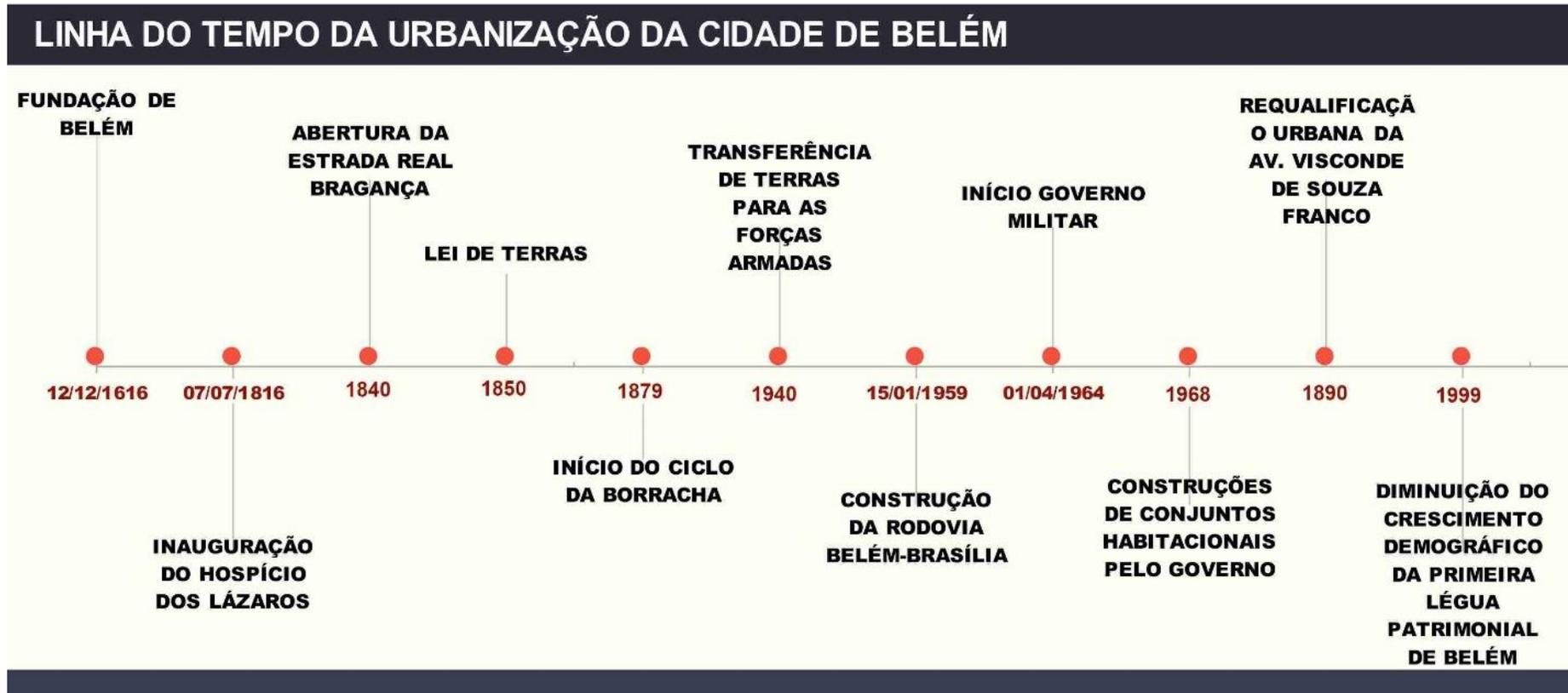
Figura 24 - Mosaico de tipologias da Área de Expansão de Belém.



Fonte: Cardoso et al., 2020

O processo de urbanização da cidade de Belém pode ser melhor entendido a partir da Figura 25, que apresenta a linha do tempo com o resumo das datas citadas nesse subcapítulo.

Figura 25 - Linha do tempo da urbanização da cidade de Belém

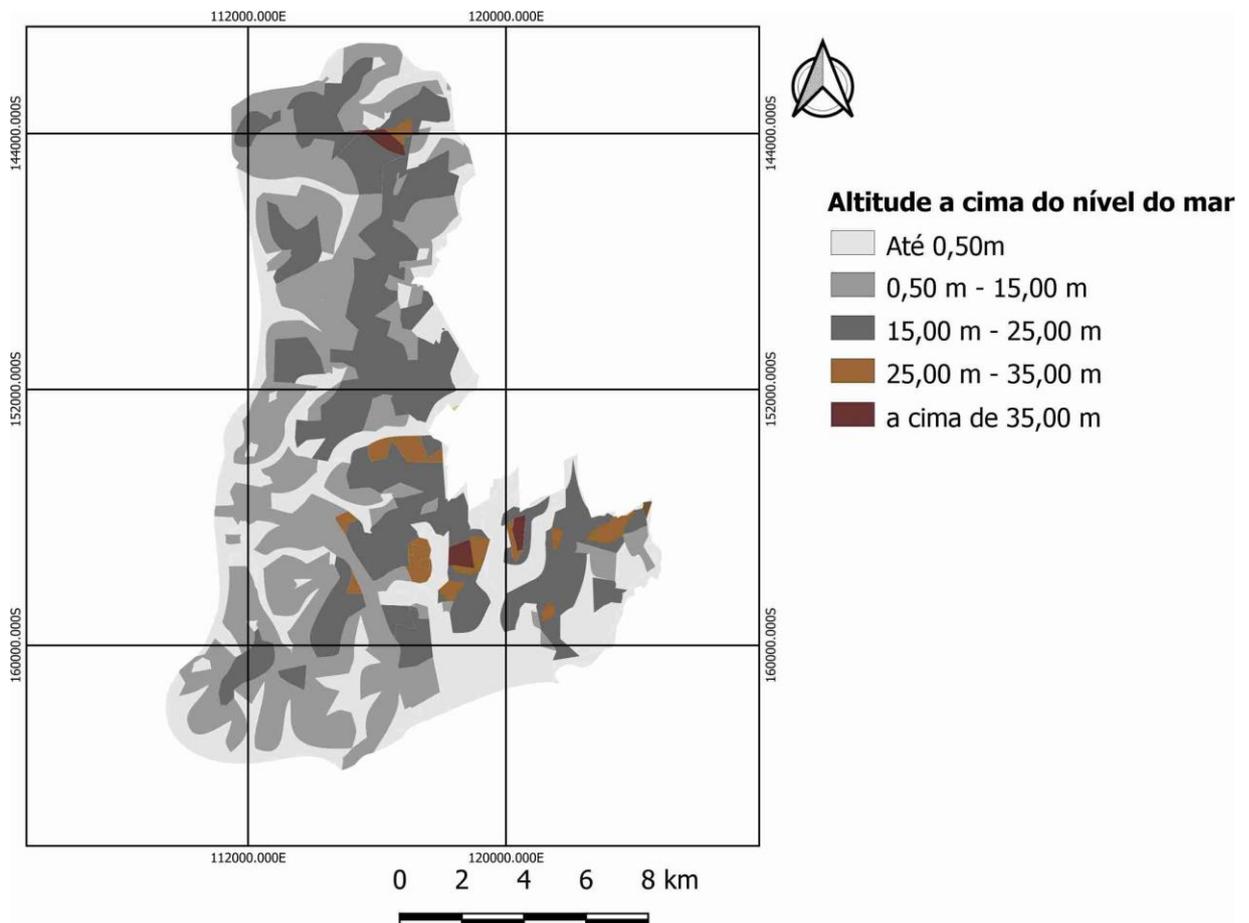


Fonte: Elaborado pela autora

2.3.1.1. Ocupação do solo da cidade de Belém

Em relação ao uso e ocupação do solo, Moraes Junior e Silva (2019) apontam que no ano de 1973 a cobertura vegetal do solo equivalia a 60,91% do território, em 1993 este valor caiu para 44,42%, e em 2018 diminuiu mais ainda, chegando a aproximadamente 40%. Os corpos d'água também sofreram redução ao longo desses anos, segundo os autores, em 2019 representam apenas 5,46% do sítio urbano. A redução ocorreu principalmente nas cotas altimétricas mais baixas, que correspondem à cobertura vegetal nos miolos de quadras e nos quintais das residências, os espaços livres privados (MORAIS JUNIOR e SILVA, 2019; MIRANDA, 2020).

Figura 26: Cotas altimétricas da área continental do Município de Belém

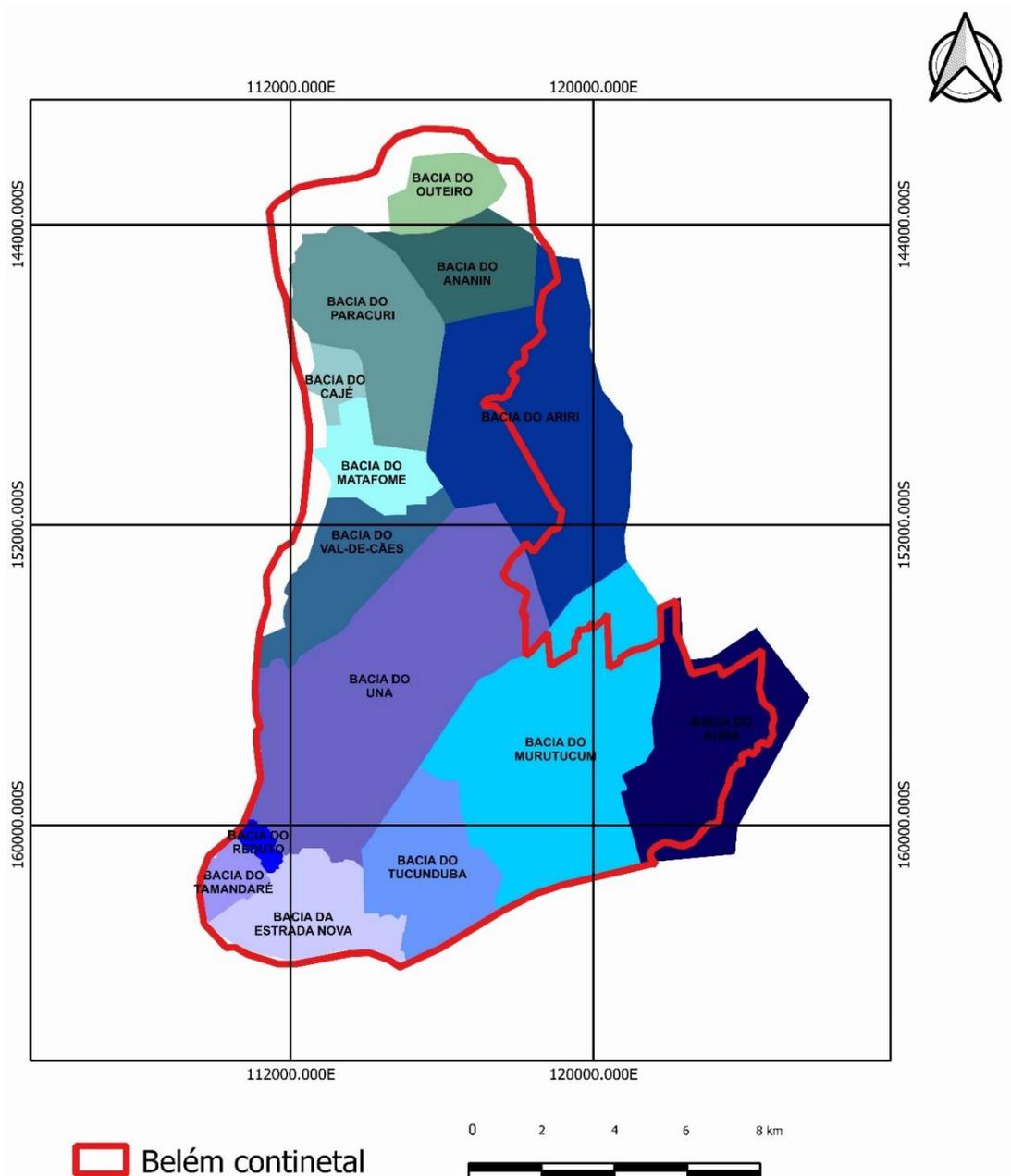


Fonte: Adaptado de Miranda (2020)

Belém conta com 14 bacias hidrográficas, conforme demonstra a Figura 27. No intervalo de 1984 a 1999, quase todas as bacias hidrográficas perderam expressiva cobertura vegetal. Porém, a redução é notadamente grave nas bacias hidrográficas que compõem a

Primeira Léguas Patrimonial de Belém. As bacias hidrográficas do Reduto, Magalhães Barata, Tamandaré e Estrada Nova já estavam em níveis críticos em 1984 e reduziram a cobertura vegetal em mais de 70% até o ano de 1999.

Figura 27 - Mapa de localização das bacias hidrográficas do Município de Belém



Fonte: Elaborado pela autora, a partir de dados da Prefeitura Municipal de Belém (2019).

Em estudos realizados por Miranda (2020), foi observado que quanto mais próximo do centro histórico de Belém, menor a quantidade de cobertura vegetal e maior quantidade de mancha urbana (fração de terra impermeabilizada por construções). O referido estudo analisou

imagens de satélite Landsat, dos anos de 1984, 1999 e 2018, e observou que com o decorrer dos anos, houve a expansão urbana, e conseqüentemente, a diminuição da camada vegetal do solo.

2.3.1.2. O processo de verticalização de Belém

Gusmão e Soares (2018) definem verticalização como a possibilidade máxima de utilização do solo através da sobreposição do espaço. Esse processo é notado mais facilmente nos centros urbanos, onde a valorização mobiliária é maior, ampliando a possibilidade de ganho financeiro. O processo de verticalização aumenta o adensamento urbano, e conseqüentemente, o número de veículos e pessoas que circulam pela área, Santos *et al.* (2015) implicam a estas alterações o aumento da concentração de dióxido de carbono, além do aumento de partículas em suspensão no ar, cita também como aspectos negativos a sobrecarga da infraestrutura urbana, a diminuição de áreas permeáveis, visto que para o aproveitamento do espaço busca-se ocupar o máximo de área dentro do terreno. Outro fator negativo observado pela verticalização é que muitas vezes os “paredões” verticais trabalham como quebra-vento impedindo o processo de ventilação natural,

Segundo Gusmão e Soares (2018), o processo de verticalização em Belém iniciou na década de 1940, a princípio, restringindo-se ao bairro da Campina (Figura 28), visto que na época, esta era a área mais alta e valorizada da cidade. Apenas nos anos seguintes, este processo de verticalização, expandiu para outros bairros vizinhos, seguindo a intensificação deste processo nas próximas décadas. Com a valorização das áreas centrais da cidade, os empreendimentos imobiliários tenderam a se implantar em bairros não centrais, como o bairro do Marco. Outro fator notório é que com o passar dos anos, os edifícios foram ficando com maior número de pavimentos, ou seja, mais altos.

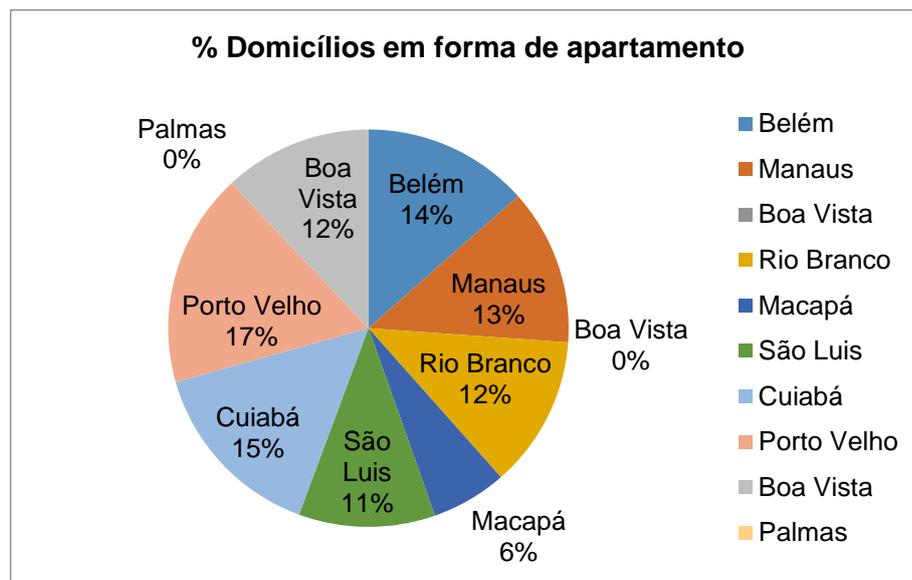
Figura 28 - Imagem de Belém antes do processo de verticalização, e imagem de Belém atualmente, respectivamente.



Fonte: Penteadó (1968) e Google Earth (2022)

Segundo o último censo do IBGE (2019), realizado em 2010, Belém é a 3ª, entre as capitais dos estados pertencentes à Amazônia legal, com maior Percentual de domicílios em forma de apartamento (Figura 29).

Figura 29 - Porcentagem de domicílios em forma de apartamento nas Capitais de Estados da Amazônia legal.



Fonte: IBGE, 2019

A tabela 3 apresenta a percentual por bairro de domicílios do tipo apartamento, os bairros onde não há número expressivo de apartamentos não foram incluídos na tabela. Santos *et al.* (2015) descrevem a verticalização como um processo que segue certos padrões, tendo sua maior incidência em áreas da cidade com infraestrutura.

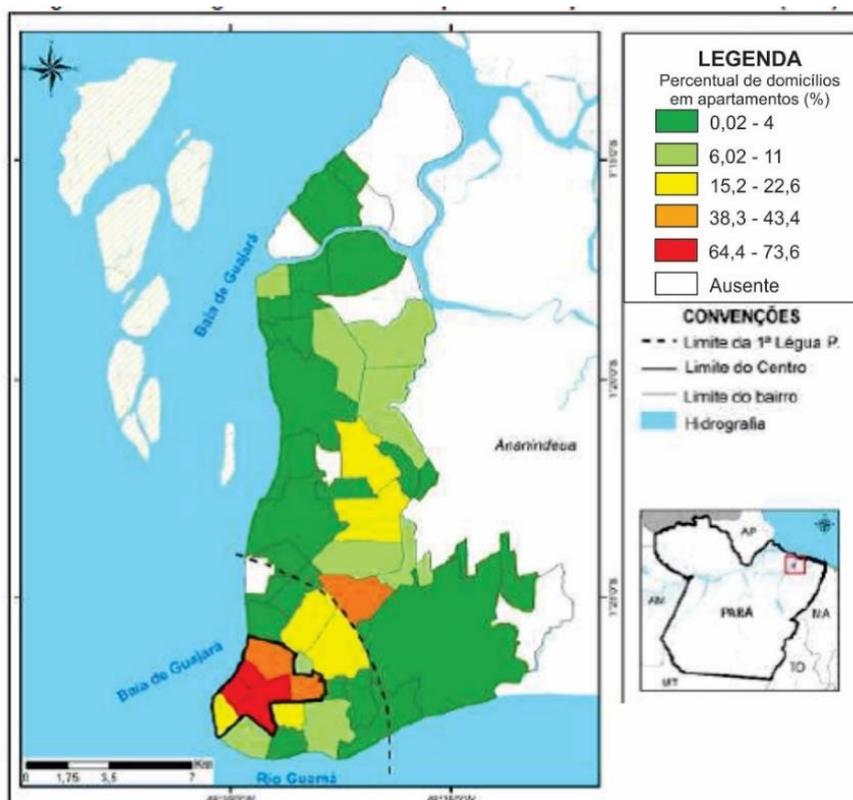
Tabela 3 - Tabela com percentual domicílios por bairro em Belém

BAIRRO	Domicílios em apartamento (%)	BAIRRO	Domicílios em apartamento (%)
Nazaré	73,6	Canudos	3,46
Reduto	68,3	Telegrafo	3,45
Campina	67,4	Condor	3,08
Batista Campos	64,4	Tapanã	2,6
Souza	43,4	Sacramenta	2,4
São Braz	38,6	Maracangalha	2
Umarizal	38,3	Curió-Utinga	2
Marco	22,59	Barreiro	1,8
Mangueirão	20,7	Ponta grossa	1,54
Cremação	18,85	Água boa	1,3
Pedreira	18	Cabanagem	1,06
Cidade Velha	15,31	Uma	0,98
Parque verde	15,19	Bengui	0,88
Castanheira	11	São João do Outeiro	0,68
Parque Guajará	8,63	Agulha	0,52
Jurunas	8,2	Campina de Icoaraci	0,51
Fátima	8,09	Val-de-cans	0,5
Tenoné	6,7	Terra firme	0,47
Cruzeiro	6,5	Universitário	0,29
Coqueiro	6,37	Paracuri	0,24
Marambaia	6,26	Maracacuera	0,22
Guamá	4,16	Pratinha	0,07
Canudos	3,46	Águas Lindas	0,02
Telegrafo	3,45		

Fonte: IBGE, 2010

Em Belém, conforme se observa no mapa (Figura 30) confeccionado por Gusmão e Soares (2018), a maior porcentagem de habitações do tipo apartamento se encontra nos bairros denominados centrais (apesar de não encontrarem-se no centro propriamente dito da cidade, são considerados assim, pois é o núcleo inicial da Belém, e a partir dele a cidade foi se expandido).

Figura 30 - Porcentagem de domicílios em apartamentos por bairros de Belém (2010).



Fonte: Gusmão e Soares (2018)

2.3.1.3. Plano Diretor de Belém

Em nível nacional, o Estatuto da cidade (BRASIL, 2001) prevê políticas que regulamentam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, esta lei estabelece a criação do Plano Diretor, que auxilia o planejamento urbano, e determina políticas urbanas que vão desde zoneamentos à mobilidade urbana, prevê a organização do espaço, e é desenvolvido a partir da avaliação da situação física, econômica, social, política e administrativa do município

É o plano diretor que determina o uso e ocupação do solo, estes estabelecem parâmetros urbanísticos que podem variar dependendo do Município implantado, os mais usuais são: a) testada, determinada pela frente do terreno que faz limite com a rua; b) coeficiente de aproveitamento, que é a relação entre área edificada e o terreno; c) taxa de ocupação, que é

a projeção horizontal da edificação no lote; d) afastamento, trata-se da distância mínima da edificação em relação ao lote vizinho, pode ser lateral, frontal e fundos; e) taxa de permeabilidade, como o nome sugere, é o percentual de área do terreno permeável; f) gabarito de altura, é a altura máxima que a edificação pode ter, geralmente estabelecida em metros (LIMA, 2018).

Segundo as estratégias de planejamento urbano bioclimático, é interessante diversificar o uso do solo, ou seja, em uma mesma zona coexistirem diversas atividades (residencial, comercial, institucional, etc.), Higuera (1998) entende que essa disposição aproxima o indivíduo do trabalho, residência, educação, área de lazer, diminuindo a necessidade de transporte motorizado, e conseqüentemente, atenuando o gasto energético, financeiro, e até mesmo a geração de poluentes. Além disso, tal arranjo manteria aquela área “viva” além das oito horas de expediente padrão de trabalho.

Em Belém, o Plano Diretor foi instituído pela Lei Municipal nº 8.655 de 30 de junho de 2008. É através dele que a cidade deve se configurar. Uma de suas ferramentas é a divisão da cidade em zonas, que possuem legislação diferenciada conforme suas características. Elas definem, entre outras coisas, a ocupação que uma edificação pode exercer no terreno, como também os afastamentos entre uma edificação e outra. Por ser uma legislação recente, as edificações anteriores a ela não se enquadram nas normas. Aproveitando-se disso, como ressaltam Barbosa, Drach e Corbella (2019), alguns construtores fazem novas edificações utilizando estruturas antigas para contornar as leis atuais.

Entre outras coisas, o intuito desta legislação é assegurar uma cidade com melhor conforto para quem ali habita. Os controles urbanísticos garantem que a cidade possa ter o mínimo de índice de permeabilidade em sua superfície, assim como espaçamentos suficientes entre edificações que permitam a circulação do vento.

Os miolos de quadra vegetados existentes na cidade de Belém eram poderosos instrumentos de drenagem urbana, favorecendo a permeabilidade do solo e abastecimento das bacias hidrográficas da região. Além dos motivos já citados anteriormente (ocupação desses espaços por vilas para suprir a necessidade de moradias), outro fator que fortaleceu a ocupação desses espaços foi a mudança das leis urbanísticas (LCCU/99 e o Plano diretor de 2008), onde os índices de coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação e permeabilidade incentivam a ocupação do lote, de forma a restarem como área não ocupada apenas canteiros ornamentais (VENTURA NETO e MOURA, 2019) (Figura 31).

Figura 31 - Terreno localizado na Avenida Senador Lemos / Passagem São José / Avenida Pedro Álvares Cabral, Bairro Sacramenta, anos de 2009 e 2021, respectivamente.



Fonte: Google Earth

2.3.1.4. Caracterização climática de Belém

O clima de Belém, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, está inserido no bioclima Af, pertence ao clima Equatorial úmido, sem ocorrência de inverno estacional (KOTTEK et al., 2006). Enquadra-se na zona Bioclimática 8 (Figura 32), segundo a NBR 15575 (ABNT, 2005).

Figura 32 - Zona Bioclimática 8



Fonte: ABNT, 2003

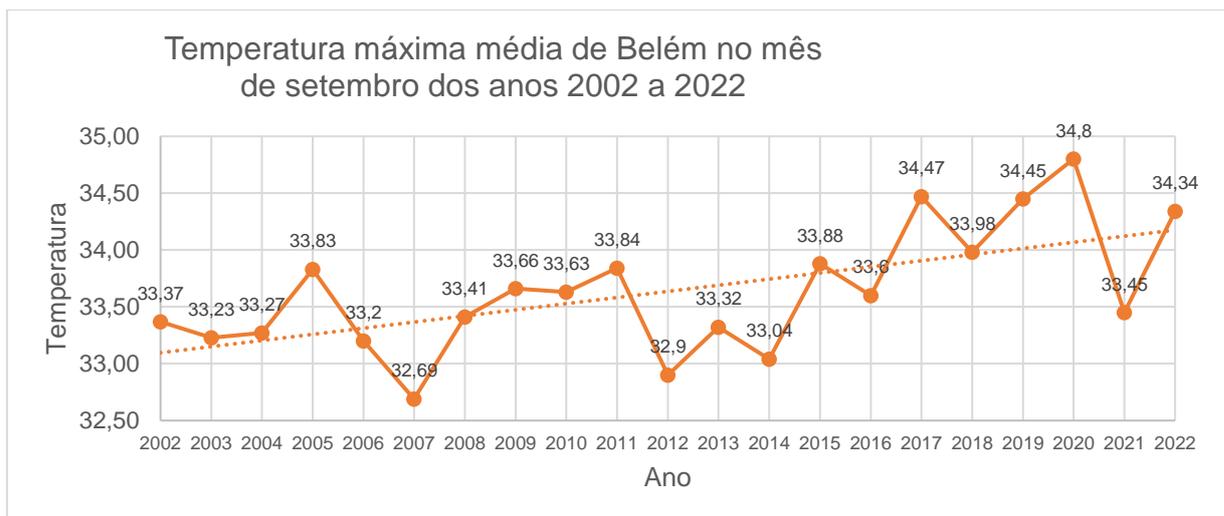
Bastos *et al.* (2002) explicam que as altas temperaturas de Belém se devem a elevada radiação solar incidente, onde parte desta energia é convertida em calor latente de evaporação

e a outra parte convertida em calor sensível, que aquece o ar; outro fator é a proximidade da linha do Equador, ainda afirmam que as chuvas em Belém são divididas em três situações:

- a) De dezembro a maio, época mais chuvosa, devido a Zona de convergência intertropical (ITCZ), provocadas pelos efeitos da mesoescala, propagando-se para o oeste;
- b) De junho a agosto, final do período chuvoso, com chuvas provocadas por efeitos locais, geralmente, vindas do Sudeste;
- c) De setembro a novembro, período de estiagem, onde a precipitação é provocada geralmente pelos fenômenos de mesoescala.

O Instituto nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza dados climáticos de diversas cidades brasileiras. Na Figura 33, estão expostas através de gráfico, as temperaturas máximas média do mês de setembro dos anos 2002 a 2022. Apesar das oscilações, de maneira geral, foi verificado um aumento na temperatura em 1 °C.

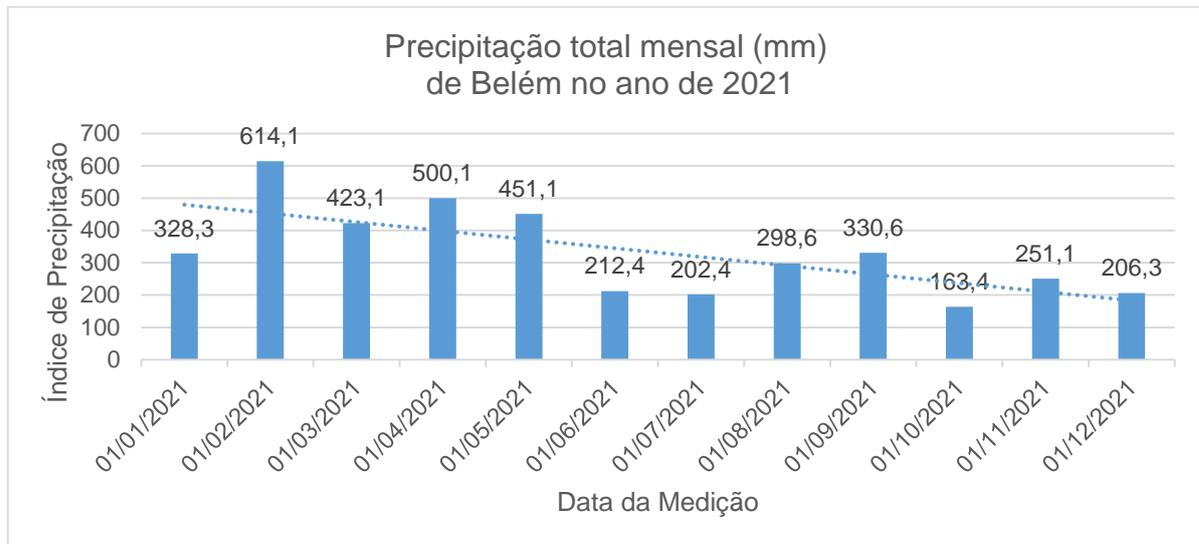
Figura 33 - Gráfico temperaturas médias dos meses de setembro de 2000 a 2019



Fonte: INMET, 2022

No Estado do Pará, popularmente, o clima é dividido em período mais chuvoso (inverno amazônico) e período menos chuvoso (verão amazônico), sendo os meses de junho a novembro os com menor incidência de chuva (Figura 34). A precipitação durante o inverno amazônico é provocada pela ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), resultando na convergência de ventos alísios de Nordeste e Sudeste, caracterizando ventos fracos e precipitações intensas (BASTOS *et al.*, 2002).

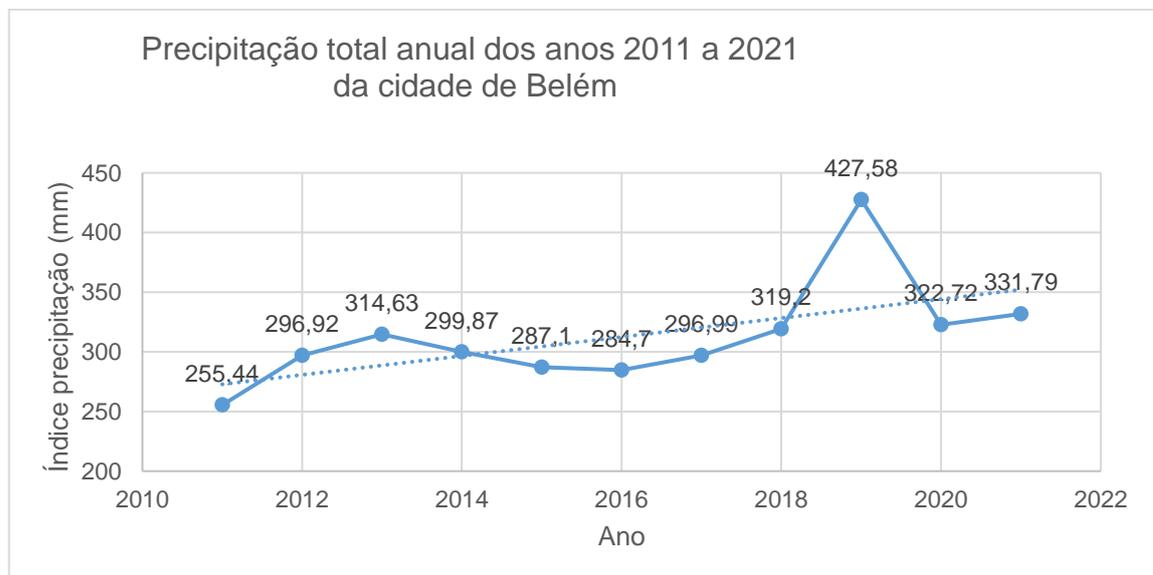
Figura 34 - Gráfico com a precipitação total mensal no ano de 2021



Fonte: INMET, 2022

A Figura 35 demonstra que os índices variam de um ano para o outro, com o aumento do volume de chuva. A troca da camada vegetal do solo por material impermeabilizante faz com que a água da chuva não seja absorvida causando frequentes alagamentos em vários pontos da cidade.

Figura 35 - Gráfico com a precipitação total anual dos anos 2011 a 2021



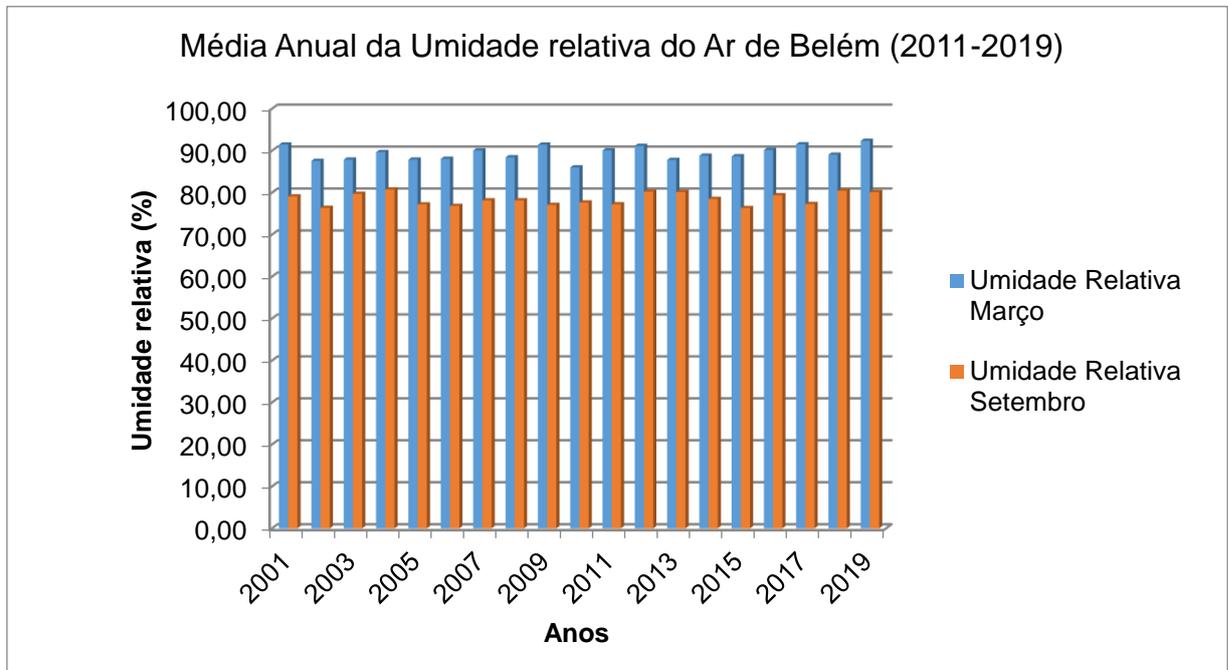
Fonte: INMET, 2022

Em estudo feito por Nechet (1994) foi observado que os horários dos picos de precipitação variam conforme o período do ano. No período mais chuvoso (dezembro a maio)

entre 14 e 15 horas, no período menos chuvoso (junho a agosto) entre 17 e 21 horas, e no período de estiagem (setembro a novembro) entre 15 a 16 horas. O autor atribui a situação à natureza das chuvas equatoriais, estimuladas pela máxima temperatura diurna, onde a chuva inicia a formação pelo período da manhã.

A Figura 36 apresenta o gráfico com os índices de umidade relativa do ar das duas últimas décadas, nos meses de março (mês com muita chuva) e setembro (mês com menos incidência de chuva). Observou-se que a umidade nas últimas duas décadas, apesar de sofrer variações, não diminuiu, ao contrário, apresentou um pequeno aumento. Observa-se também, que durante o período chuvoso a umidade relativa do ar chegou a ser maior do que 90% em alguns anos.

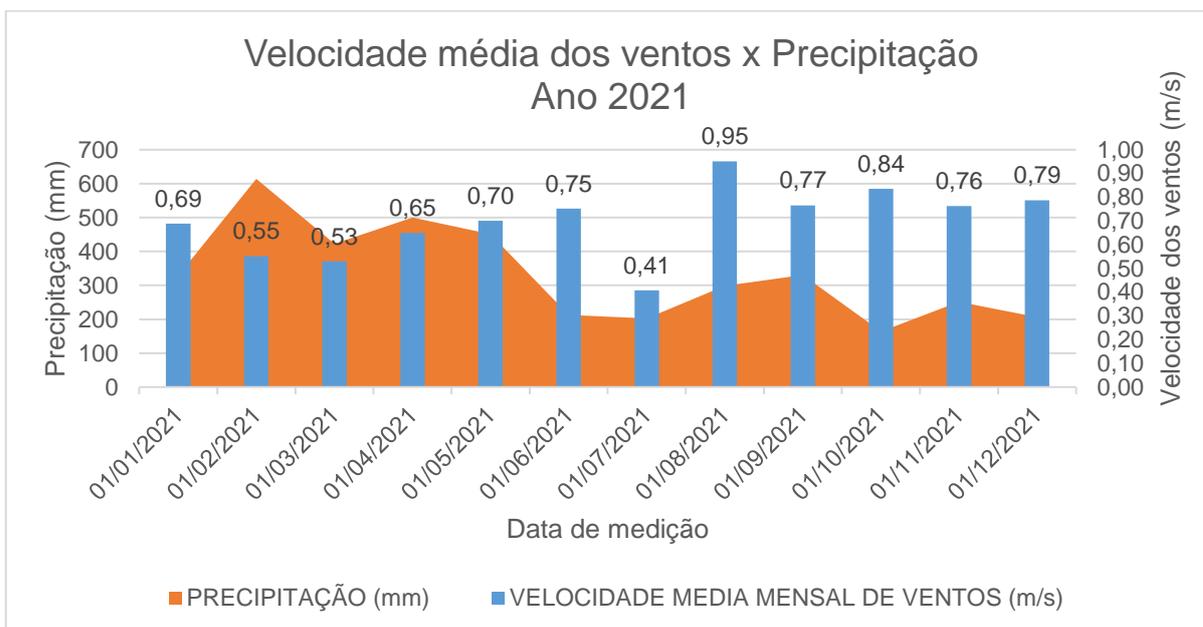
Figura 36 - Média Anual da Umidade relativa do Ar de Belém (2011-2019)



Fonte: INMET, 2022

Segundo os dados fornecidos pelo INMET (2022), a média da velocidade do vento em 2021 é de 0,70 m/s, sendo os meses de agosto o que apresenta maior média (0,95 m/s), e o mês com menor média foi julho com 0,41 m/s. Porém, percebe-se, que a tendência de maiores médias são quando há menores incidências de chuvas, e quando ocorre menor média de velocidade de ventos é durante os meses com maior índice pluviométrico (Figura 37).

Figura 37 - Velocidade média dos ventos durante o ano de 2021



Fonte: INMET, 2022

Cardenal (2017) aponta que em Belém, nos meses de março e setembro, durante os equinócios, os raios solares incidem quase perpendicularmente, e durante os solstícios (junho e dezembro) chegam a atingir o ângulo de 70° . Dados obtidos pelo INMET (2021), através da sua estação fixa, no dia 30/04/2021, demonstraram que às 15:00 horas é quando ocorre o maior índice de radiação, porém, o pico de temperatura ocorreu às 18:00 horas (Tabela 4).

Tabela 4 - Dados climatológicos do dia 30/04/2021

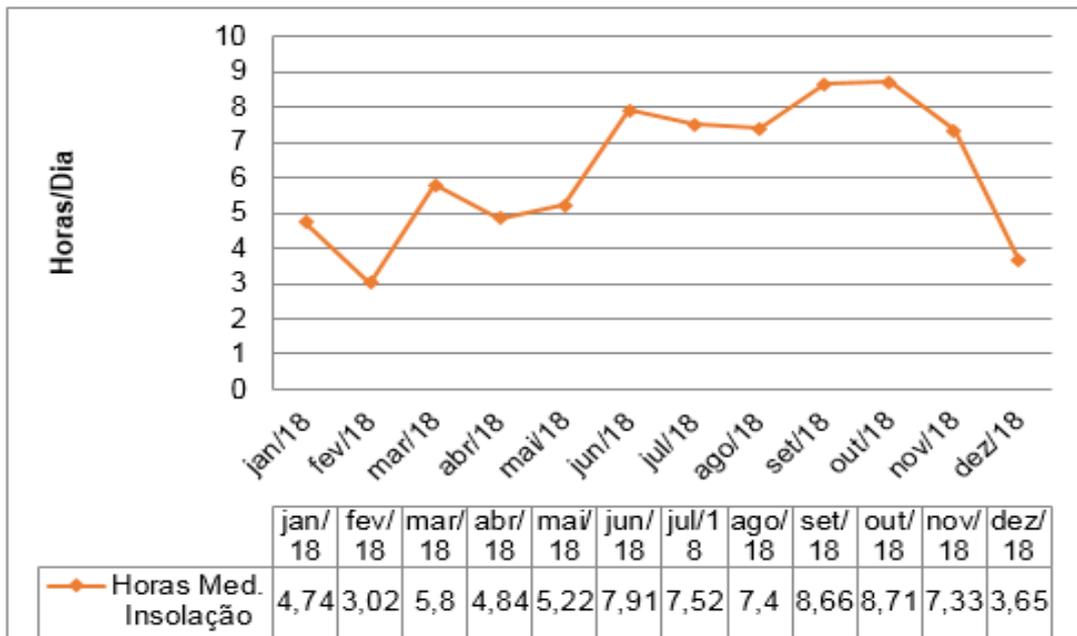
Hora Medição	Radiação Global (Kj/m \AA^2)	Temperatura do ar – Bulbo seco horaria ($\text{\AA}^\circ\text{C}$)	Umidade relativa do ar, horaria (%)	Vento, velocidade, horaria (m/s)
06:00	0,414	24	99	0
07:00	1,293	24,2	99	0,2
08:00	-1,299	23,8	99	0
09:00	-1,017	23,8	99	0
10:00	54,392	24,2	99	0
11:00	395,523	26,2	93	0
12:00	1071,99	28,8	75	0,9
13:00	1944,347	30,1	69	0,9
14:00	2089,721	30,6	68	0,8
15:00	3044,062	32,2	59	0,9
16:00	2618,634	30,9	60	1,8
17:00	1967,652	31,5	65	0,5
18:00	2334,258	32,7	50	1,4
19:00	1200,7	30,4	66	0,9

20:00	252,606	27,4	71	1,9
21:00	90,153	26,5	75	0,4
22:00	4,092	25,8	89	0,7
23:00	0,18	25,7	93	1,5

Fonte: Inmet, 2021

O fotoperíodo é o tempo que dura o dia, em relação a exposição solar, em Belém, com ausência de nuvens, é de 12 horas, porém, esse período é reduzido, devido à concentração de nuvens (principalmente no período chuvoso), aproximadamente, a metade desse valor, conforme demonstra a Figura 38. Os meses de setembro e outubro apresentam maior presença de iluminação solar. Por conta da baixa latitude de Belém, a altura do sol é sempre elevada às doze horas (BASTOS et al., 2002).

Figura 38 - Média de Horas de Isolação por dia em 2018



Fonte: INMET, 2019

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são expostos os conceitos metodológicos, a metodologia e os materiais utilizados neste trabalho.

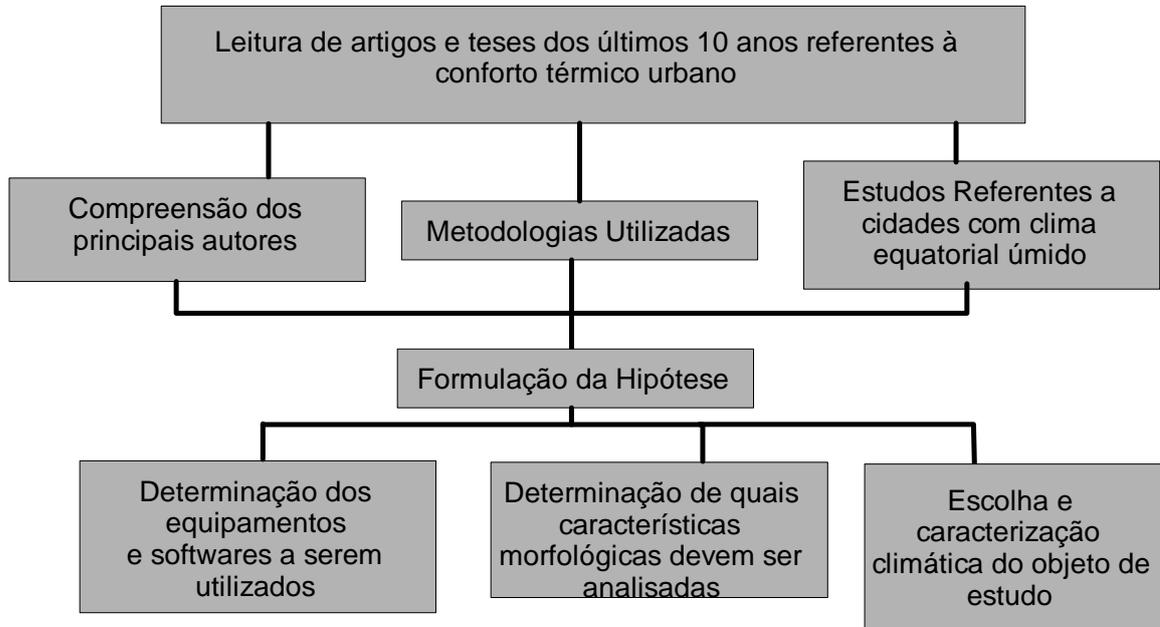
Sobre o enquadramento metodológico desta pesquisa, ela pode ser enquadrada como exploratória, descritiva e explicativa (GIL, 2002). Com as seguintes abordagens metodológicas:

- a) Bibliográfica: É realizada a partir de registro de pesquisas anteriores, através da contribuição de outros autores, tendo como fontes artigos científicos, teses, dissertações, livros, etc. (SEVERINO, 2013; GIL, 2002);
- b) Experimental: A partir de um objeto de estudo são selecionadas variáveis capazes de influenciá-lo. Essas variáveis podem ser controladas para que possa ser observado como o objeto de estudo se comporta (GIL, 2002). Entende-se que a simulação computacional enquadra-se como método experimental, visto que, este recurso simula diversas realidades, o que permite observar o comportamento do objeto estudado, características atribuídas por Severino (2013) à metodologia experimental.
- c) Pesquisa de campo: É realizada a coleta de dados em condições naturais, sem intervenção do pesquisador (SEVERINO, 2013), entretanto, Gonsalves (2001) ressalta a importância do pesquisador ir até o local onde ocorre o evento, documentando todas as informações que ali incidem;
- d) Estudo de caso: Conforme afirma Gil (2002), o estudo de caso é bastante utilizado na pesquisa exploratória, sendo recomendável o seu emprego na formulação de hipóteses. Gil ainda aponta como peculiaridade da modalidade estudo de caso, o fato de que, em muitas situações, no decorrer do estudo, o problema de pesquisa inicial acaba ficando em segundo plano, pois, outros aspectos acabam ganhando protagonismo. Segundo Severino (2013) a pesquisa que se concentra em um estudo de caso deverá representar um conjunto de casos semelhantes, de forma a ser significativo e apto a fundamentar uma generalização análoga. O objeto de estudo desta pesquisa é a cidade de Belém, no estado do Pará, que poderá ser utilizada como referência em relação a cidades com clima equatorial úmido.

Esta tese iniciou-se com a revisão bibliográfica sobre clima urbano, a influência da configuração urbana no clima, o uso de recursos computacionais no estudo do clima urbano, e por fim, a caracterização da cidade de Belém. Para esta fase, foram utilizadas algumas bases de

dados, como o Inmet, IBGE, Prefeitura de Belém, etc. Ainda seguindo a abordagem bibliográfica, buscou-se referências na literatura para a realização da coleta de dados em campo, tendo como apoio os estudos de Vianna (2018), López (2020) e Pacifici (2019). A Figura 39, apresenta o fluxograma do delineamento de pesquisa desta primeira fase.

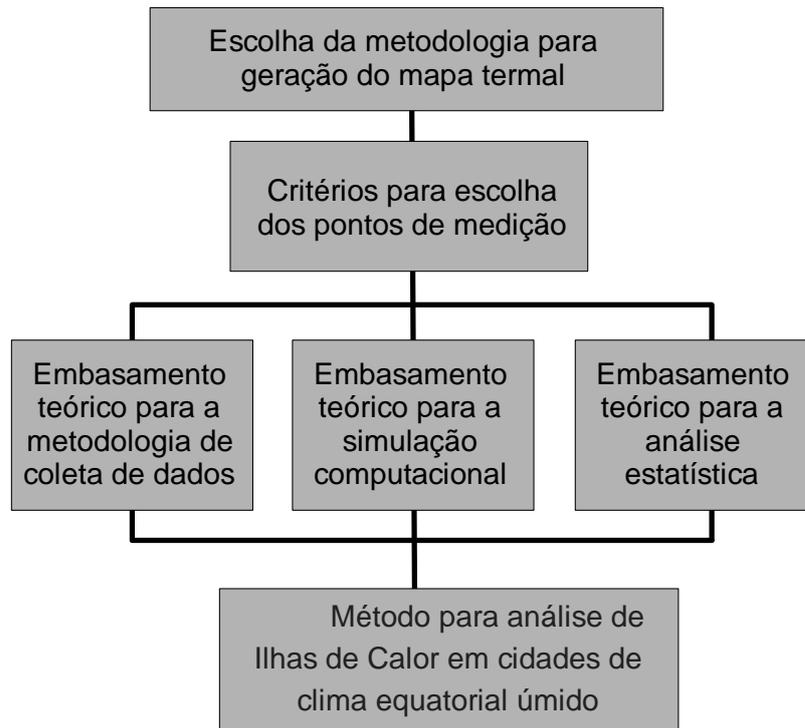
Figura 39 - Fluxograma da primeira fase da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

A segunda fase foi o delineamento metodológico, onde foram explanadas as metodologias utilizadas na obtenção dos dados relativos ao objeto de estudo. Procurou-se demonstrar de forma mais clara possível os métodos utilizados nesta pesquisa, para que possam ser reproduzidos futuramente por outros autores (Figura 40).

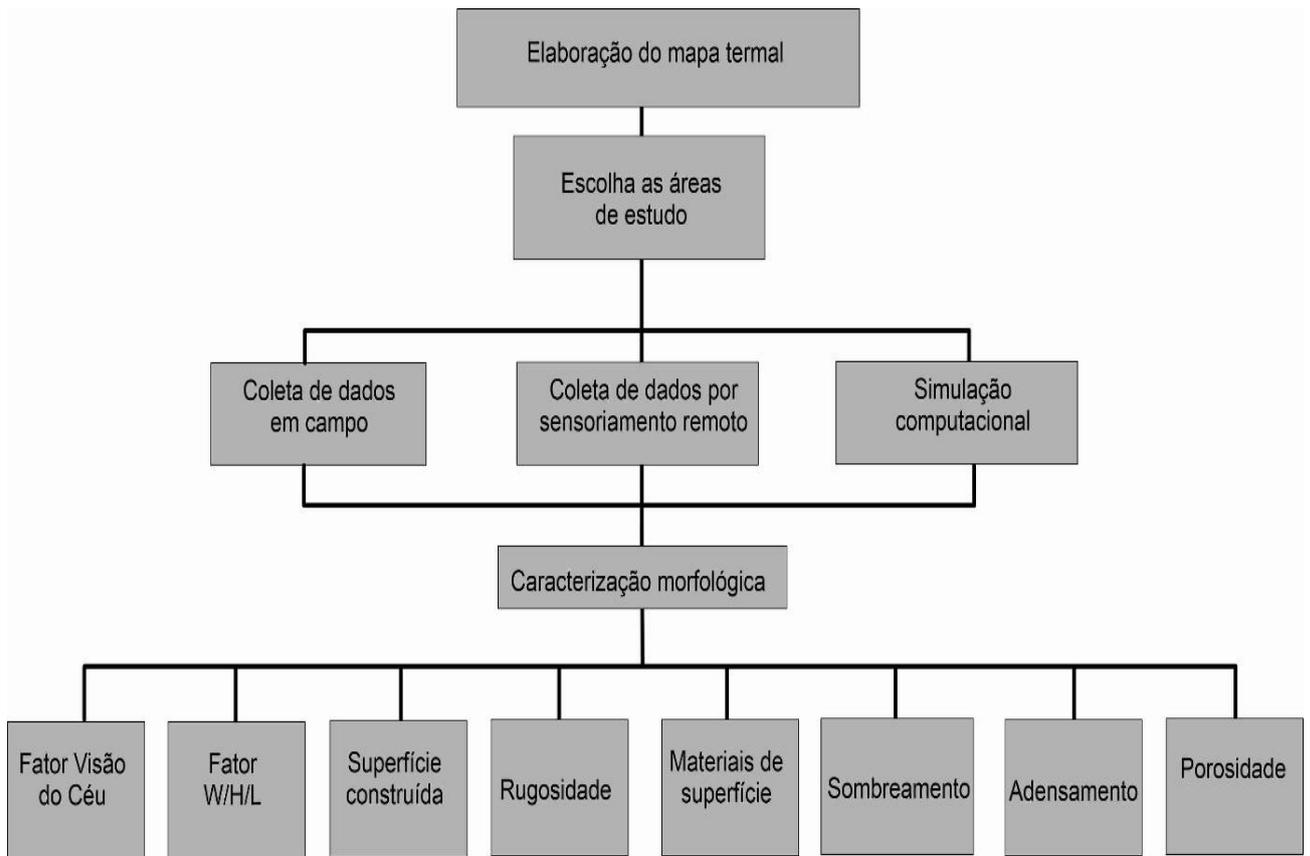
Figura 40 - Segunda fase, elaboração do método proposto



Fonte: Elaborado pela autora

A terceira fase deu início com a elaboração do mapa termal derivado das imagens de satélite Landsat 8, sendo este, um dos métodos de coleta de dados a partir de sensoriamento remoto. De posse do mapa termal, foram escolhidas 8 zonas, sendo 4 localizadas em pontos mais quentes, e 4 localizadas em pontos menos quentes. Cada Zona foi limitada à escala local, com dimensões que variam de 200 metros a 500 metros de largura, conforme orienta Stewart e Oke (2012). Também durante esta fase, foram coletados os dados necessários para a caracterização climática (Temperatura de superfície, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos, FVC, fator H/W/L, área permeável, área construída, materiais de superfície, rugosidade, escala de altura, adensamento, porosidade), sendo utilizadas duas fontes de informação: a) imagens via satélite, através de sensoriamento remoto; e b) a coleta de dados através de pesquisa em campo, com a utilização de equipamentos de medição. E ainda nesta fase, realizou-se a simulação computacional, que gerou como resultados a temperatura do ar (T_a) ao longo do dia (24 horas simuladas), circulação dos ventos, umidade relativa do ar por toda a área da zona simulada (Figura 41).

Figura 41 - Terceira fase, aplicação do método proposto



Fonte: Elaborado pela autora

Para o melhor entendimento das ferramentas utilizadas na fase três, a figura 42 apresenta os procedimentos meteorológicos utilizados, com o produto gerado por cada um deles, sendo divididos em morfologia, temperatura e materiais.

Figura 42 - Procedimentos metodológicos

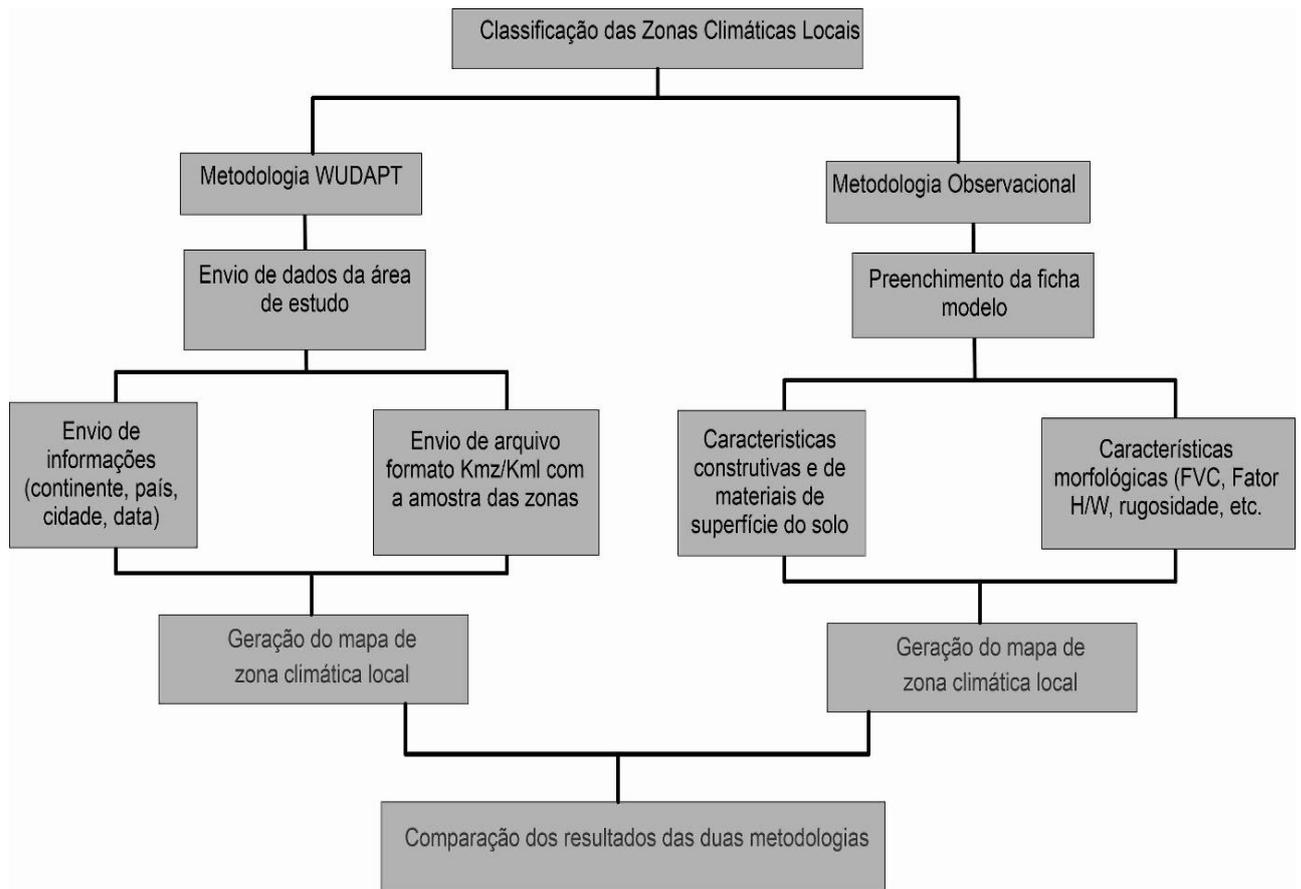
PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	PRODUTO
Sensoriamento remoto - Imagens LandSat 8	Mapa Termal
	NDVI
	NDWI
Sensoriamento remoto – Imagens Google Earth	Fator W/H
	Enquadramento LCZ
	Materiais de Superfície
Autocad	Materiais de Superfície
	Sombreamento
Dynamic Overshadowing	Fator de Visão do céu
Termohigro-Anemômetro Digital e Câmera termográfica	Dados termais da área do pedestre
	Imagens termográficas
ENVI-met	Simulação Urbana
	Porosidade
Sketchup	Sombreamento
	Rugosidade e escala
INMET	Dados Termais da cidade de Belém
Base de dados (prefeitura e IBGE)	Sombreamento
	Densidade
LCZ Generator	Enquadramento LCZ

	MORFOLOGIA
	TEMPERATURA
	MATERIAIS

Fonte: Elaborado pela autora

A quarta fase foi a aplicação das Zonas Climáticas Locais na cidade de Belém, utilizando a metodologia de Stewart e Oke (2012), e a metodologia WUDAPT, e logo após, a comparação entre ambas, o delineamento ocorre conforme apresenta a figura 43.

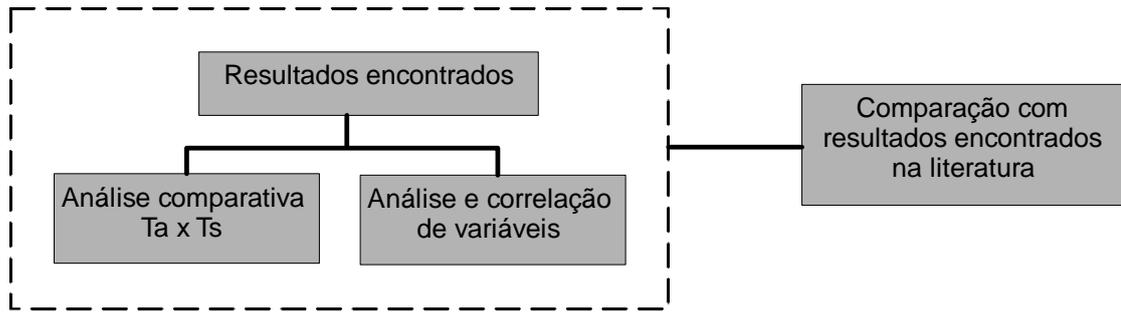
Figura 43 - Quarta fase, aplicação da classificação das Zonas Climáticas Locais



Fonte: Elaborado pela autora

A quinta fase é classificada como descritiva, conforme conceitua Gil (2002), pois procura descobrir a existência de associações entre variáveis. De posse de todos os dados coletados e simulados, realiza-se a análise de correlação estatística de variáveis, onde, primeiramente, a Temperatura de Superfície (por imagem Landsat 8) é correlacionada com a Temperatura do ar (obtida através de medições locais), posteriormente, realiza-se a correlação das variáveis encontradas (FVC, fator H/W/L, área permeável, área construída, materiais de superfície, rugosidade, escala de altura, adensamento, porosidade) com a Temperatura do ar, e nos casos onde observa-se uma variação de resultado, ou seja, onde a correlação irá existir em um período e/ou turno de medição e em outro não, será realizado correlação entre as próprias variáveis (Figura 44).

Figura 44 - Fluxograma de como foram analisados os resultados obtidos

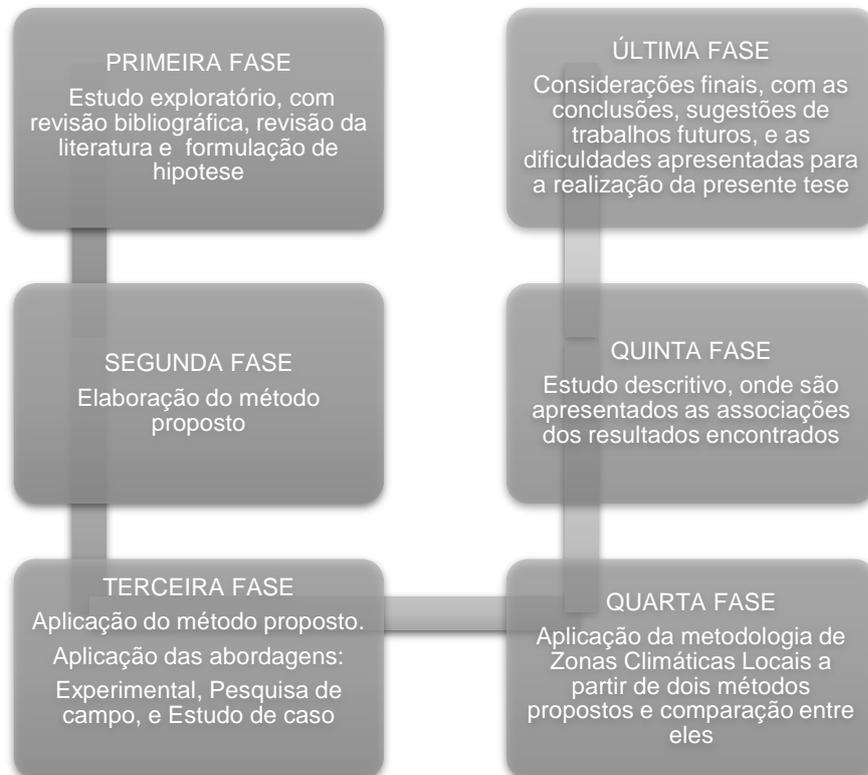


Fonte: Elaborado pela autora

E por fim, tem-se a conclusão, onde são apresentadas as considerações finais, as recomendações para trabalhos futuros, além de relatar as dificuldades encontradas para a elaboração dessa pesquisa.

Esta pesquisa é apoiada em coleta de dados em campo e simulação computacional, baseando-se no estresse térmico em nível do pedestre, através de modelagem microclimática como ferramenta computacional a partir das configurações urbanas. Essas etapas são melhor visualizadas através da figura 45:

Figura 45 - Fluxograma geral das fases metodológicas



Fonte: Elaborado pela autora

3.1. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi dividida em três etapas, a primeira através da coleta de dados termais a partir do satélite Landsat 8 (referente à órbita ponto 223/061), as imagens geradas possuem resolução espacial de 30 e 120 metros, são obtidas por dois sensores, o OLI (Operational Land Imager), que permite informações de 9 bandas espectrais (1 a 9), e o TIRS (Thermal Infrared Sensor), que permite informações em duas bandas que representam radiação infravermelha (10 e 11) (Tabela 5).

Tabela 5 - Bandas e resoluções dos sensores do satélite Landsat 8

SENSORES LANDSAT	BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (µm)	RESOLUÇÃO (m)
Operational Land Imager (OLI)	Banda 1 - Ultra azul	0,435 - 0,451	30
	Banda 2 - Azul	0,452 - 0,512	30
	Banda 3 - Verde	0,533 - 0,590	30
	Banda 4 - Vermelho	0,636 - 0,673	30
	Banda 5 - Infravermelho próximo (NIR)	0,851 - 0,879	30
	Banda 6 - Infravermelho de onda curta (SWIR) 1	1,566 - 1,651	30
	Banda 7 - Infravermelho de onda curta (SWIR)2	2,101 - 2,294	30
	Banda 8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
	Banda 9 - Cirrus	1,363 - 1,384	30
Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 10 - Infravermelho Termal (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100* (30)
	Banda 11 - Infravermelho Termal (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100 * (30)

Fonte: USGS (2014)

Na segunda etapa foram utilizados os dados da estação meteorológica automática do Instituto nacional de meteorologia (Inmet) que capta informações a cada minuto do dia. Entre os dados coletados estão: temperatura máxima do ar, temperatura mínima do ar, umidade relativa do ar, precipitação acumulada no período, radiação solar, velocidade instantânea do

vento, etc. As informações são disponibilizadas gratuitamente pelo site do Inmet², mediante solicitação.

A terceira etapa é a partir da coleta de dados com o Termohigro-anemômetro digital e a câmera termográfica (Figura 46), e por fim, a obtenção dos dados termográficos das estações fixas.

Figura 46 - Termohigro-Anemômetro Digital e Câmera termográfica, modelo HT-02D

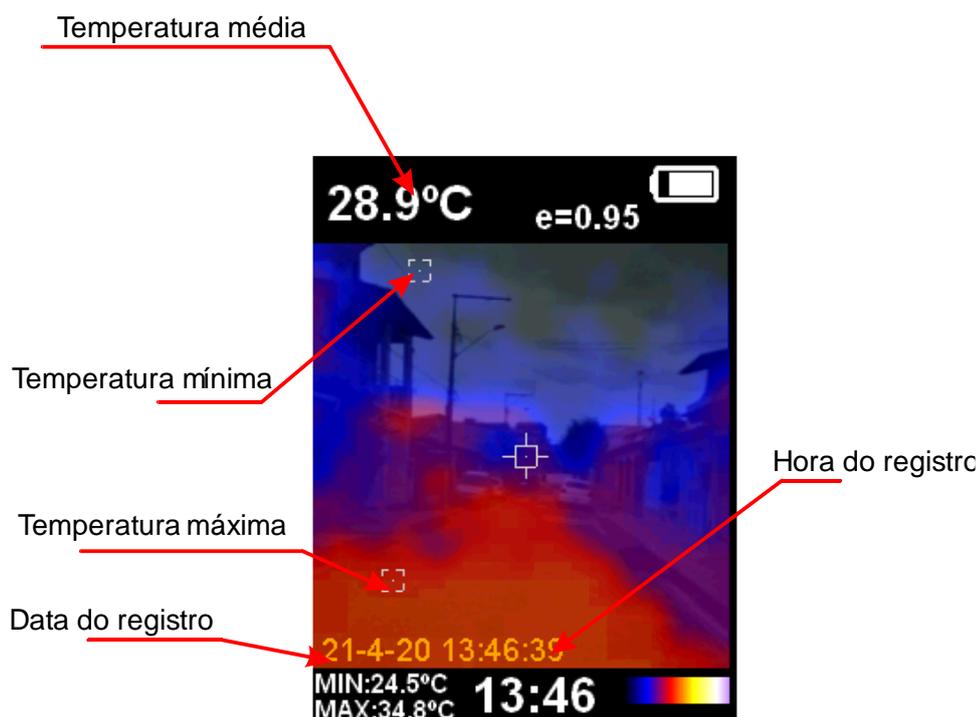


Fonte: Manual técnico dos equipamentos

Foram utilizados dois tipos de sensores portáteis, para a medição da temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar, e a velocidade do vento, utilizou-se o Termohigro-Anemômetro Digital, modelo KR825. Este equipamento é de fácil manuseio, ele fornece a temperatura do ar (T_a), umidade relativa do ar, e velocidade da rajada de vento, a calibração do equipamento é realizada conforme orientações do manual de instruções (AKROM, 2022). E para a obtenção das imagens termais foi utilizada a Câmera termográfica, modelo HT-02D, esta câmera possui termovisor infravermelho que mescla imagens visíveis e termais, com resolução de 3600 pixels, é capaz de medir temperaturas na faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, (Figura 47). A câmera gera imagem onde estão apresentados os pontos mais aquecidos e menos aquecidos da área fotografada, disponibilizam também outras informações, como: data e horário de registro, temperatura média da imagem fotografada.

² <https://bdmep.inmet.gov.br/>

Figura 47 - Informações disponíveis na imagem registrada



Fonte: Autora

Stewart e Oke (2012), em estudos referentes a Zonas Climáticas Locais, indicam que os equipamentos devem ser posicionados com altura em nível do pedestre, e distante de objetos que produzam calor, como é o caso de motores.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDOS

Conforme cita Pacifici (2019) as investigações do ambiente urbano devem combinar a mesoescala, a escala local e a microescala. No presente estudo os dados de mesoescala foram obtidos a partir da estação meteorológica do Inmet, que fornece banco de dados online disponível gratuitamente. A análise em escala local leva em consideração a topografia, o clima dos bairros, correspondendo a uma extensão de 100 m a 10 km, foi analisada a partir das LCZs. E por fim, a microescala, com dados pontuais obtidos a partir das medições locais.

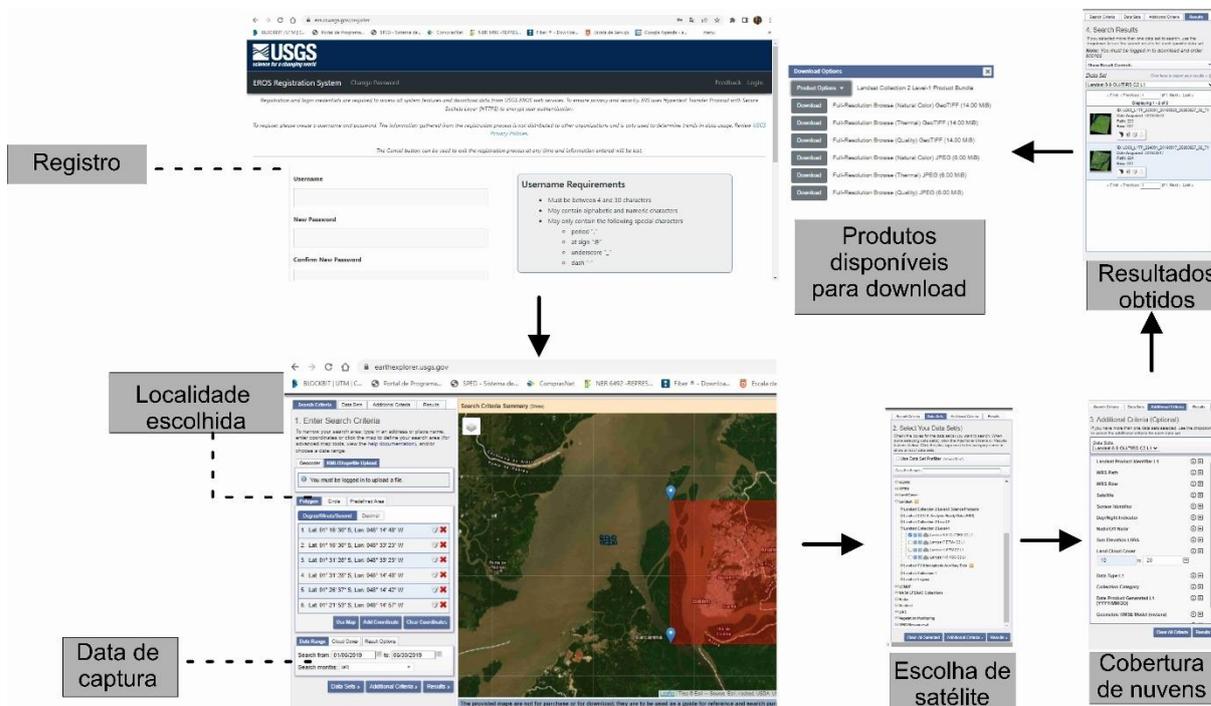
3.2.1. Mapa de Temperatura de superfície

Berg e Kucharik (2022) reforçam em suas pesquisas que os dados obtido por satélite podem ser úteis na identificação de picos de calor. Para a obtenção do Mapa Termal fez-se uso de imagem do Landsat 8, obtida através do site da USGS (United States Geological Survey³),

³ <https://earthexplorer.usgs.gov>

o acesso ao banco de dados é gratuito, sendo necessário realizar cadastro. No site você preenche algumas informações da área desejada, como: local, período de busca, satélite. A Figura 48 demonstra o passo-a-passo para obtenção da imagem de satélite desejada.

Figura 48: Passo-a-passo para a obtenção da imagem Landsat



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do site da USGS

Para a manipulação das imagens, utilizou-se o software QGIS, com o recorte da cidade de Belém sobre a imagem obtida do Landsat 8. Para a obtenção da imagem termal empregou-se a metodologia de cálculo de raster proposta por Coelho e Correa (2013), com a seguinte fórmula (Equação 10):

$$TC = (1321.08 / \ln(774.89 / (3.3420E-04 * \text{"banda10.tif"} + 0.10000) + 1)) - 273.15 \quad (1) \quad (10)$$

Onde "banda10.tif" foi substituído pelo nome do arquivo de imagem do Landsat com recorte apenas da cidade de Belém. Após esse processo, as propriedades da imagem gerada foram modificadas, com utilização de falsa cor, com as cores categorizadas por média de temperatura. O mapa produzido resulta em uma escala de cores, onde cada cor representa uma média de temperatura.

3.2.2. Áreas de Estudo

Após a obtenção do mapa de calor, foram selecionadas 8 áreas, que correspondem a 4 áreas com maior temperatura e 4 áreas com menor temperatura. Cada área gerou uma zona com extensão aproximada de 400 metros de comprimento por 400 metros de largura, conforme determina a metodologia de análise de Zonas Climáticas Termiais proposta por Stewart e Oke (2012).

3.2.3. Coleta de dados

A coleta de dados deu-se de duas formas: fontes primárias e secundárias. Os dados de fontes primárias são aqueles obtidos por meio de observação in loco e/ou instrumentos de medição. As fontes secundárias são aquelas obtidas por terceiros, ou seja, bases meteorológicas, satélites, referências bibliográficas, etc.

A coleta de dados meteorológicos não é um processo simples, pois as variáveis climáticas estão sujeitas a alterações a todo o instante, por este motivo, Oke (2006), sugere alguns cuidados:

- a) Definir corretamente as escalas temporais e espaciais utilizadas;
- b) Os pontos de medição devem representar da melhor forma a área escolhida para ser mapeada;
- c) Evitar que os instrumentos sejam posicionados próximos a fontes de calor ou superfícies refletivas;
- d) A altura das medições deve estar entre 1,25 e 2,00 metros acima do solo;
- e) Os horários das medições devem ser pouco antes do pôr do sol ou pouco antes do nascer do sol, sempre em dias calmos e sem nuvens.

Na presente pesquisa, as coletas de dados primárias das variáveis microclimáticas foram feitas em horários divergentes ao que orienta Oke (2006), pois, a intenção era representar o cenário quando há o registro de maiores temperaturas locais, entre 13:00 h e 15:00 h, conforme os dados obtidos através de Inmet, e o outro cenário é quando a literatura revela a maior probabilidade do efeito de ICU, entre 19:30 e 21:30. Tanto quanto possível, foram realizadas medições no máximo de pontos exequíveis em um mesmo dia, porém, devido à distância dos pontos, só foi possível realizar a medição de no máximo 2 pontos diariamente.

Para a coleta de dados morfológicos utilizou-se o Google Earth, imagens do satélite Landsat 8 e visitas locais, onde se obteve a altura, comprimento e recuo dos edifícios em relação à rua e orientação em relação ao Norte. A altura do edifício permite analisar o sombreamento

do prédio nas vias, além da rugosidade; já o recuo dos edifícios permite analisar a densidade da área; além desses fatores citados por Pacifici (2019), também foram caracterizados os tipos de materiais de superfície.

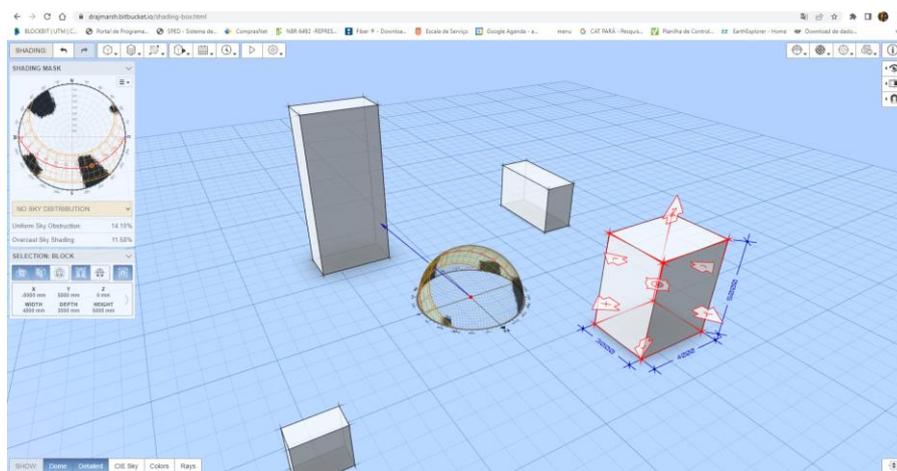
A tipologia das vias (coletora, arterial, local, etc.) foi obtida através do plano diretor de Belém. A tipologia das vias influencia no volume de tráfego, e geração de poluentes; a orientação geográfica afeta a ventilação e incidência solar (PACIFICI, 2019).

3.2.3.1. Fator de Visão do Céu

O Fator de Visão do Céu (FVC) foi obtido a partir do aplicativo da *Web Dynamic Overshadowing*⁴, onde foram inseridas as informações morfológicas do ponto analisado. Apesar de ainda pouco difundida na literatura, optou-se por essa metodologia devido a uma opção de fácil acesso, gratuita, e sem a necessidade de equipamentos especiais (como câmeras com lente tipo olho de peixe), nem a instalação de softwares, visto que se trata de um aplicativo da web.

Os blocos em forma de paralelepípedo representam as construções, que deverão ser editados com parâmetros semelhantes aos reais (largura, comprimento, altura), e posicionados conforme a sua localização (atentar para o posicionamento do Norte), automaticamente, é gerada uma imagem representativa tipo olho de peixe, e a porcentagem de obstrução do céu (Figura 49)

Figura 49 - Representação do aplicativo da *Web Dynamic Overshadowing*



Fonte: www.drajmarsh.bitbucket.io/shading-box.html

⁴ www.drajmarsh.bitbucket.io/shading-box.html

No caso do Fator de Visão do Céu (FVC), a avaliação será em nível de microescala, onde será analisada apenas a área em que o receptor está locado, em um raio de aproximadamente 100 m.

3.2.3.2. Análise H/W/L

O ponto considerado para análise foi onde aconteceram as medições de temperatura, logo, a avaliação será em nível de microescala. Para encontrar a dimensão das edificações e vias foram utilizadas imagens do Google Earth, e visitas “in loco”. Para dimensionar o comprimento do cânion foi considerado a delimitação entre as transversais (Figura 45).

Figura 50 - Exemplo de dimensionamento da área do cânion urbano



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagem Google Earth

Para a dimensão L será considerado o comprimento do quarteirão onde encontra-se o receptor. Além da análise H/W/L, também será realizada a análise H/W, e posteriormente serão comparadas, e individualmente correlacionadas com a temperatura do ar (T_a) e a temperatura de superfície (U_s) obtida através da câmera termal.

3.2.3.3. Análise de superfície construída

Nesse tópico serão analisadas as áreas permeáveis da superfície, além da fração de superfície construída. A partir da imagem Bitmap obtida do Google Earth e de visita local para confirmar se não houve modificações nas áreas trabalhadas, realizou-se a classificação manual com o software AutoCAD, através de observação visual. As áreas construídas (no caso de superfície construída), e as áreas de materiais impermeáveis (no caso de superfícies

impermeáveis) devem ser preenchidas com uma hachura, gerando a área (m²) de superfície representada por essa hachura. Após isso, foram gerados gráficos com o software Microsoft Excel. Rocha, Souza e Castilho (2011) utilizaram dessa metodologia de análise de superfície em sua pesquisa sobre a ocupação do solo e ilhas de calor noturna.

3.2.3.4. Análise Rugosidade

As alturas foram estimadas através do Google Earth e visitas locais. Seguindo a metodologia de pesquisa de Pacifici (2019) as alturas foram classificadas em quatro escalas, a escala S1, 0 andar (de 0 a 0,5 metros de altura); escala S2, 1 a 3 andares (de 0,5 a 10 metros de altura); escala S3, 4 a 9 andares (de 10 a 30 metros de altura); e escala S4, igual ou mais do que 10 andares (maior do que 30 metros). Cada escala foi associada a uma cor, sendo, S1, cor amarelo; S2, cor laranja; S3 cor vermelho; e S4 cor marrom.

A análise de rugosidade foi realizada em nível de microescala, em um quadrante de aproximadamente 100m x 100m, que englobe o ponto de localização das medições realizadas (receptor). Utilizou-se a metodologia proposta por Oke (2006), empregando somente as Classes de 4 a 8, que se aplicam ao meio urbano.

3.2.3.5. Análise de materiais de superfície

A princípio, cogitou-se em utilizar a classificação supervisionada realizada no QGis para análise de superfície, porém, encontrou-se dificuldade na obtenção de imagens com resolução suficiente para a detecção automática de materiais de superfície, por este motivo, optou-se pela classificação manual com o software AutoCAD, através de análise visual e seleção de materiais. Além do motivo já apresentado, observou-se que em alguns trabalhos há a citação de que quando utilizada a classificação automática, certos materiais apresentam comportamento espectral semelhante, fazendo com que haja confusão na identificação deles. Por esse motivo, apesar de mais trabalhosa, entende-se que a classificação manual é menos passível a erro, e quando se utiliza o software AutoCAD, torna-se um método acessível, visto que este programa possui a versão gratuita para estudantes.

Para a análise observacional das áreas foram selecionados os materiais de superfícies mais presentes, sendo divididos em 8 tipos, conforme Quadro 6:

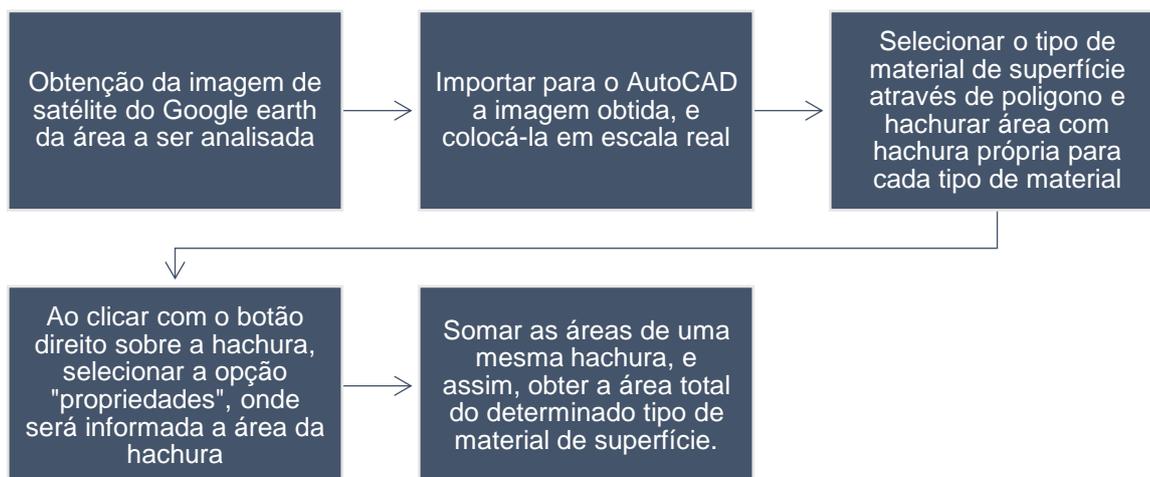
Quadro 5 - Características das classes de materiais de superfície mapeadas

CLASSE	CARACTERÍSTICA
Telha cerâmica	Nesta classe estão incluídas as áreas edificadas que possuem cobertura em telha cerâmica.
Corpos D'água	Nesta classe estão inclusas todas as áreas que compõem corpos d'água, tais como: igarapés, rios, lagos, piscinas.
Asfalto	Nesta classe estão incluídas as superfícies pavimentadas com asfalto.
Cimentado	Nesta classe estão inclusas as superfícies pavimentadas em cimento, concreto, blocrete de concreto, pedra.
Solo exposto	Nesta classe estão inclusas as áreas não pavimentadas e sem cobertura vegetal.
Telha de fibrocimento ou metálica	Nesta classe estão incluídas as áreas edificadas com cobertura em telha metálica e de fibrocimento.
Vegetação densa	Nesta classe estão inclusas as coberturas não pavimentadas, arborizadas.
Vegetação rasteira	Nesta classe estão incluídas as áreas com vegetação rasteira, tais como, pequenos arbustos, grama e capim.

Fonte: Elaborado pela autora

Através da imagem adquirida pelo Google Earth, e de confirmação da paisagem a partir de visitas às zonas, foi realizada a classificação manual, onde cada área foi demarcada e preenchida por hachuras no software AutoCAD, em seguida aferiu-se a área preenchida por cada hachura, e desta forma obteve-se a quantidade de área ocupada por cada material de superfície. Após isso, foram gerados gráficos a partir do software Microsoft Excel. O fluxograma apresentado na Figura 51 explica de forma mais detalhada os processos para obtenção da classificação manual de materiais de superfície através do AutoCAD.

Figura 51: Fluxograma de classificação manual de materiais de superfície



Fonte: Elaborado pela autora

Halder *et al.* (2021) fizeram uso da classificação supervisionada com auxílio do Google Earth na identificação do tipo de cobertura do solo, que foi dividido em cinco classes: Vegetação, corpos d'água, espaços abertos, terrenos construídos e terrenos agrícolas. Na identificação de áreas com cobertura vegetal foi utilizado a técnica de NDVI através de sensoriamento remoto.

3.2.3.6. Sombreamento

A análise de sombreamento foi executada para observar o potencial de sombreamento na área de estudo, para isso foi empregado o Sketchup, que simulou o caminho do sol ao longo de todo o dia. Foram utilizadas as mesmas datas de medição local, e o horário simulado foi às 14 horas, horário aproximado das medições vespertinas. Foram realizadas duas simulações por zona, sendo uma para o período mais chuvoso e outra para o período menos chuvoso.

Após a obtenção das simulações no software *Sketchup*, foram geradas imagens da vista superior, e salvas no formato *.bmap*, e exportadas para o AutoCAD, as áreas sombreadas foram hachuradas, e a partir daí calculado o percentual de área sombreada em relação a área total simulada.

3.2.3.7. Adensamento

O adensamento de cada zona foi obtido através de dados do Anuário Estatístico de Belém 2011 (SEGEP, 2012), através da relação habitante por hectare, onde foi considerado a densidade do bairro em que a Zona está inserida.

3.2.3.8. Análise de porosidade

A análise foi realizada por meio do software Envi-Met. A data de simulação escolhida foi a mesma das medições, e o horário às 10 horas da manhã, o mais próximo do horário de detecção de imagem do Landsat. Utilizou-se o nível de microescala, em um quadrante de aproximadamente 100 m x 100 m, que englobe o ponto de localização das medições realizadas (receptor). O valor considerado para a análise estatística é a velocidade do vento captada pelo Termohigro-anemômetro.

3.2.3.9. Medições das Variáveis Microclimáticas no local

As coletas de dados foram realizadas durante os meses de abril e maio e outubro e novembro de 2021, que representam os meses mais e menos chuvosos. As medições foram realizadas em dois horários, o primeiro horário variando de 13:00 às 15:00 horas, e o segundo horário de 19:30 às 21:30 horas, a escolha desses horários se devem ao primeiro horário ser quando há maior incidência solar na região, conforme dados do Inmet (2019) e constatações de Nechet (1994); e o segundo horário ser algumas horas após o pôr-do-sol, quando acontecem picos de ilha de calor, como afirma Gartland (2010).

Os sensores portáteis foram posicionados na altura do pedestre, de maneira fixa, para que não houvesse interferência na medição, principalmente no caso do termohigro-anemômetro digital que captura a velocidade dos ventos, temperatura e umidade do ar. Durante o inverno amazônico as chuvas tendem a coincidir com o primeiro horário de medição (de 13:00 às 14:30), e para que não houvesse interferência na coleta dos dados, os equipamentos foram protegidos com guarda-chuva, posicionados de forma que protegessem da água, mas não houvesse interferência na captação dos ventos.

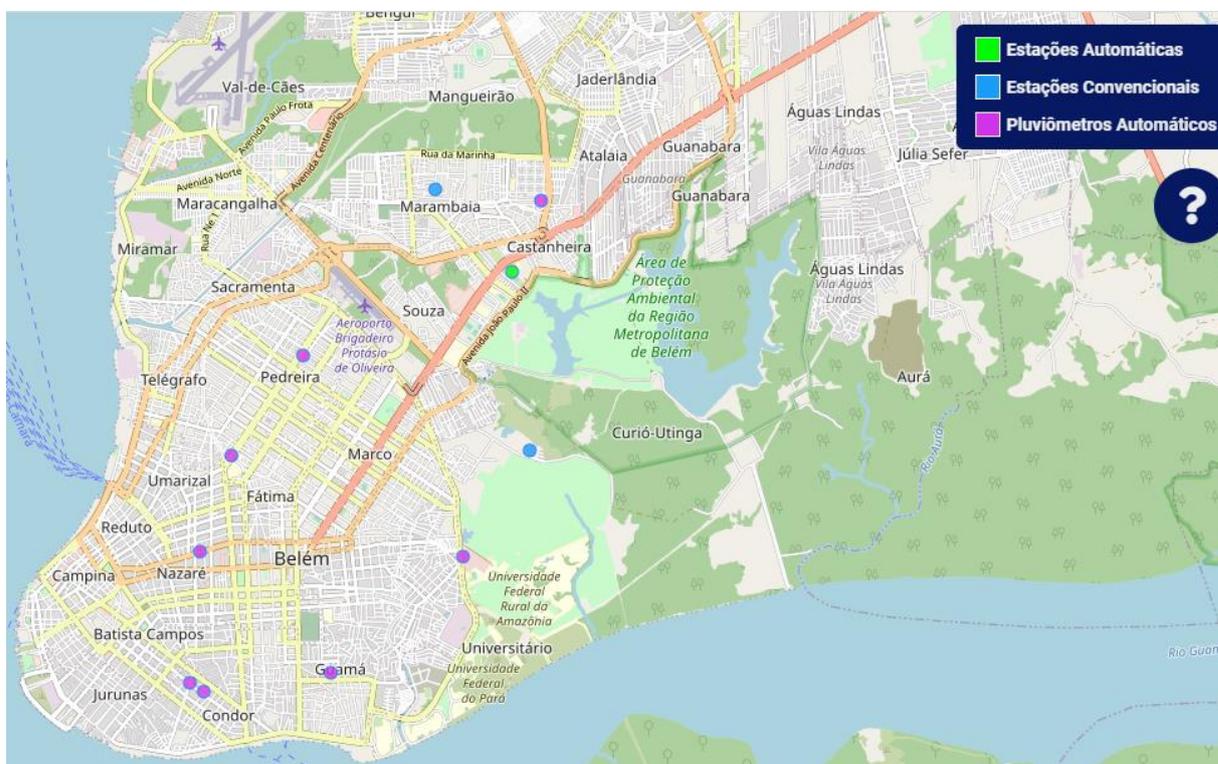
Um dos motivos das medições das variáveis microclimáticas *in loco* foi para verificar a correspondência dos valores medidos com os valores encontrados no mapa termal gerado a partir das imagens Landsat 8 e os valores dos cenários simulados.

As variáveis microclimáticas medidas foram a temperatura do ar (T_a), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (através do termohigro-anemômetro digital) e temperatura das superfícies de fachadas (com a câmera termográfica).

Além das imagens do Landsat 8, a temperatura de superfície foi medida através da câmera termográfica. As medições foram realizadas de forma que captassem simultaneamente o pavimento da via, o pavimento da calçada, e o revestimento da fachada do edifício a nível do pedestre.

Os dados de mesoescala foram obtidos pelas estações meteorológicas do INMET, em Belém, localizados conforme demonstra a Figura 52. Os dados estão disponíveis, a partir de solicitação, no site do Inmet.

Figura 52 - Estações Inmet em Belém



Fonte: INMET (2019)

3.2.4. Classificação das Zonas Climáticas Locais em Belém

Para facilitar a análise de ilhas de calor urbanas dentro da cidade, foi empregada a metodologia de Zonas Climáticas locais, utilizando os métodos Top-down (através do projeto WUDAPT) e Botton-up (através dos dados observacionais). Posteriormente, comparando o resultado dos dois métodos e analisando qual apresentou melhor resultado para o objeto de estudo em questão. Muhammad et al. (2022) também realizaram a comparação de métodos de mapeamento de LCZ em sua pesquisa aplicada a cidade de Berlim, porém, os autores utilizaram a classificação através do plugin UMEP no QGis e a abordagem WUDAPT.

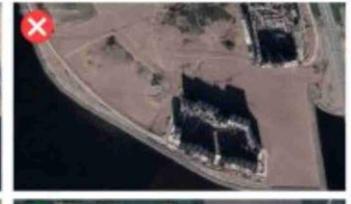
a) Metodologia WUDAPT

Desenvolvida pelo projeto World Urban Database and Access Portal Tools, foi criada com a finalidade de produzir um banco de dados mundial utilizando o sistema de classificação das Zonas Climáticas Locais através da classificação supervisionada.

O Site da web⁵ disponibiliza de forma gratuita um aplicativo denominado “LCZ Generator”, o site também oferece tutorial de como aplicar o método, com exemplos da forma correta de selecionar as áreas modelo (Figura 53), seguindo as orientações, maiores são as chances de obtenção de resultados mais precisos. O Google Earth é o aplicativo (também um recurso gratuito) utilizado para a demarcação das áreas a serem analisadas, que posteriormente deverá ser salvo no formato *.kmz* e reenviado pelo site do projeto WUDAPT. Por fim, o aplicativo “LCZ Generator” irá gerar um pacote de produtos que será enviado para o e mail informado quando se realizou o cadastro, conforme exemplificam Demuzere et al. (2021) no artigo que está disponível no site do projeto WUDAPT como forma de tutorial.

⁵ <https://www.wudapt.org/>

Figura 53 - Tutorial disponível no site WUDAPT exemplificando como deverá ser feita a seleção das áreas

Propriedades	Exemplos	
<p>Tamanho Pense em escala local, edifícios individuais não constituem LCZ. Procure grandes áreas homogêneas que tenham no mínimo 200 m de largura no ponto mais estreito. Use a ferramenta de medição do Google Earth para garantir que a área seja grande o suficiente.</p>		
<p>Forma Evite formas complexas, pois isso pode levar a informações espectrais mistas. Formas simples, no entanto, maximizarão a homogeneidade da informação espectral e o número de pixels de satélite disponíveis dentro da</p>		
<p>Homogeneidade A característica da superfície da área deve ser semelhante. Em caso de dúvida, é melhor digitalizar diferentes áreas homogêneas do que uma área muito heterogênea.</p>		
<p>Bordas Distâncias Tente manter uma distância mínima de outras LCZs ao classificar. Se polígonos de diferentes classes estiverem muito próximos uns dos outros, o classificador receberá sinais espectrais mistos que afetarão a qualidade da classificação</p>		
<p>Tente manter uma distância mínima de outras LCZs ao classificar. Se polígonos de diferentes classes estiverem muito próximos uns dos outros, o classificador receberá sinais espectrais mistos que afetarão a qualidade da classificação</p>		
<p>Persistência e Sazonalidade Evite canteiros de obras, pois eles provavelmente mudarão o tipo de LCZ durante um curto período de tempo.</p>		
<p>As características da superfície de alguns tipos de LCZ podem depender.</p>		
<p>Tenha em mente águas correntes ou sazonais, dependendo da hora do dia ou da estação do ano, os leitos dos rios podem estar secos ou cheios.</p>		

Fonte: Adaptado do Site WUDAPT

Demuzere et al. (2021) descreve o WUDAPT como uma metodologia semiautomática, universal, e de fácil acesso, por utilizar um software livre. Wang et al. (2017) ainda complementa, que tal metodologia permite a criação de mapas infinitos, ou seja, gratuitamente, pode-se criar mapas em intervalos de tempo para posterior análise do processo de urbanização.

b) Metodologia a partir de dados observacionais

É realizada a delimitação da área de interesse, com raio de aproximadamente 200 metros. E a partir de dados observacionais, feitos in loco e por imagens de satélite, a Zona Climática Local é categorizada. Foram selecionadas 08 áreas, cada uma com largura e comprimento médio de 400 metros, e suas caracterizações morfológicas foram feitas a partir de dados observacionais com o auxílio das imagens de satélite disponíveis no Google Earth. Sendo utilizadas fichas (Figura 54) proposta por Torres (2017), adaptada do modelo elaborado por Stewart e Oke (2012).

Figura 54 - Modelo de ficha

NOME DA ZONA	
LCZ	
Definição da Zona	
Forma: descrição	
Função: uso do solo	
Localização: Periferia, centro, zona	
Imagens	
Propriedade da Zona	
Fator de Visão do Céu (0.2 - 0.4):	
Proporção do Cânion (>2):	
Altura média das construções:	
Classe de rugosidade do terreno:	
Fração da superfície da construção:	
Fração de superfície permeável:	
Admitância térmica da superfície:	
Albedo de superfície:	
Fluxo de calor antropogênico:	
Tipo de Vias	

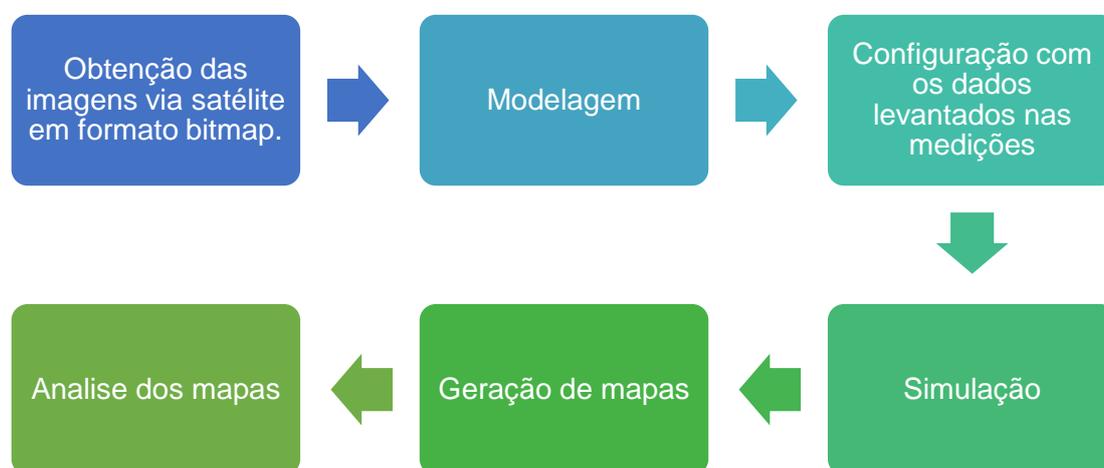
Fonte: Adaptado de Stewart e Oke (2012)

3.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A maior parte das pesquisas utiliza como data de simulação os equinócios de primavera e outono, e os solstícios de verão e inverno. Devido a localização da cidade de Belém, bem próxima a linha do Equador, essas datas não exercem tanta influência no clima local, por isso optou-se por simular com duas datas, abril/ maio (meses com maior incidência de chuva) e outubro/novembro (meses com menor incidência de chuva).

Para a melhor compreensão de como a etapa de simulação computacional pelo ENVI-met foi conduzida elaborou-se um fluxograma (Figura 55):

Figura 55 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos para simulação



Fonte: Elaborado pela autora

3.3.1. Característica dos cenários

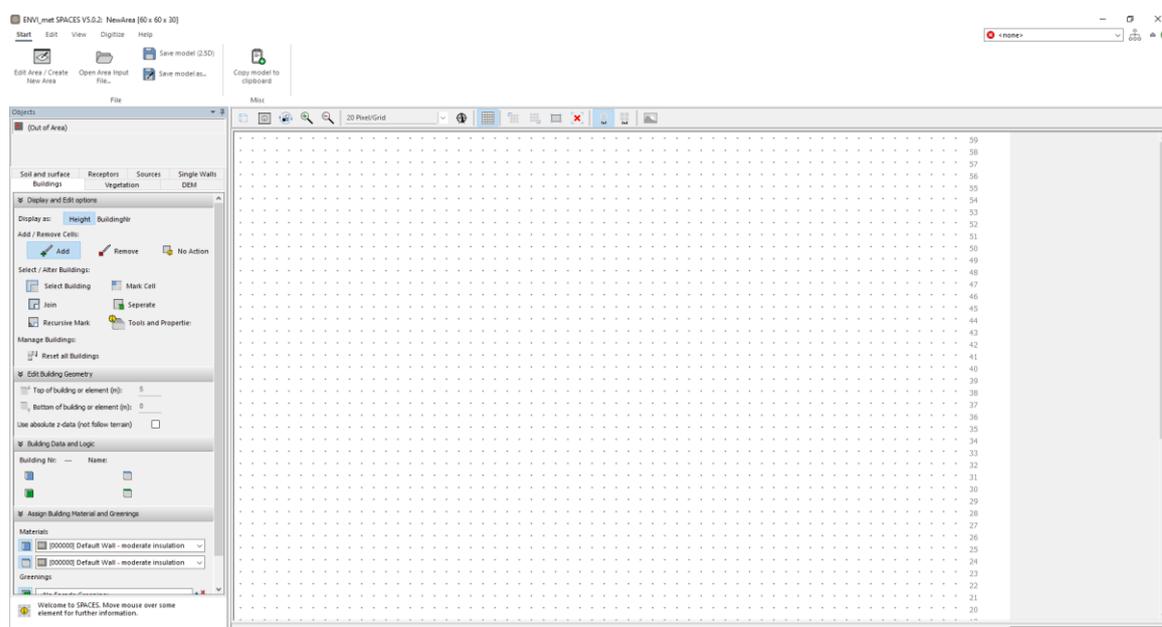
Na construção dos cenários, a configuração dos cânions urbanos se deu a partir da situação atual. A altura também levará em consideração a realidade. Em relação à arborização, considerou-se a configuração mais próxima a existente, utilizando as espécies arbóreas com características mais próximas as reais.

3.3.2. Planta-Base

A modelagem dos cânions urbanos foi realizada no módulo *Spaces* do software ENVI-met. Utilizou-se como base imagem aéreas do Google Earth (na extensão *.bmp*), em alguns casos, as imagens encontravam-se defasadas, com edificações diferentes do real quando foram realizadas as medições, nestes casos, as plantas foram atualizadas a partir de registros feitos no local. O módulo Space é organizado sobre uma malha denominada grid (Figura 56), quanto

maior o seu tamanho, mais detalhado será o modelo, porém, também demandará maior tempo de processamento, além disso, por se tratar de uma versão gratuita, há limitações nas configurações, assim, o tamanho da malha será de 50 x 50 x 40 (x, y,z). Seguindo os modelos propostos por Schimitz (2014) e Lima (2018), esta pesquisa utilizou células com 2,5 x 2,5 m e altura (z) de 2,0 m, deixando-as mais próximas das dimensões reais, sem prolongar o tempo de processamento. A altura real do edifício deve ser dividida por 2, visto que o valor atribuído no pixel Z foi 2. Bruse (2008) recomenda que para a área de borda seja configurado como material o solo argiloso, para não camuflar os dados da área principal, a quantidade de células utilizada na borda foi de 4, conforme também orientam Schimitz (2014) e Lima (2018). O Norte deverá ser configurado para que coincida com o da área simulada.

Figura 56 - Interface do módulo space do software ENVI-met 5



Fonte: Elaborado pela autora

Como um dos objetivos desta pesquisa é propor um método acessível a pesquisadores, utilizando softwares gratuitos, e a versão livre do ENVI-met possui limitações, a planta base foi inserida dentro do que a versão gratuita do programa permite.

Nas áreas permeáveis foi utilizado como tipo de solo a areia; nas calçadas e pisos impermeáveis internos ao lote, considerou-se concreto; e nas vias, foi empregado o asfalto ou o cimento (no caso de piso intertravado).

3.3.3. Configurações dos dados de entrada

As configurações dos dados de entrada são feitas no módulo *ConfigWizard* do ENVI-met. Cada cenário foi simulado em dois períodos do ano, representando os períodos mais e menos chuvosos na região, o horário estabelecido foi o mesmo das medições. Bruse (2016) aconselha que a simulação tenha duração de 24 a 48 horas, iniciando ao nascer do sol ou no período noturno. Para melhor estabilização dos dados, foram realizadas 24 horas de simulação, iniciando às 07:00h, o salvamento dos dados foi configurado para cada hora. Os dados utilizados foram os medidos, e o ponto receptor é o local das medições.

3.3.4. Configurações dos dados de saída

As configurações dos dados de saída foram iniciadas na etapa de modelagem dos cenários urbanos a partir da inserção dos receptores que representam os pedestres, a uma altura de 1,70 metros. Cada cenário gerou um arquivo com dados de variantes microclimáticas obtidas no ponto do receptor. As variáveis climáticas são: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, temperatura radiante média.

3.3.5. Geração dos mapas

O último produto do software ENVI-met a ser utilizado nesta pesquisa será o *Leonardo*, onde são gerados mapas. Os mapas gerados nesta etapa podem ser para as situações realizadas nas 24 horas simuladas, e não apenas nas datas fornecidas nos dados de entrada. Para esta pesquisa, os mapas gerados foram:

- a) mapas de temperatura do ar (°C);
- b) velocidade do vento (m/s); e
- c) mapa de umidade relativa

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Nesta tese são utilizadas as correlações estatísticas para identificar a influência da morfologia urbana e materiais de superfície na temperatura e formação de ilhas de calor urbanas, fazendo correlação entre as variáveis encontradas.

A técnica estatística utilizada é a de análise de regressão linear simples, fazendo relação entre duas ou mais variáveis, essa relação é caracterizada por um modelo matemático conhecido como equação de regressão, sendo avaliado o Coeficiente de Determinação (R^2) e o Coeficiente de Correlação (R), este assume valores entre 1 e -1, e quanto mais próximo a 1,

mais forte é a correlação, podendo ser positiva ou negativa, crescente ou decrescente. Quando o coeficiente de correlação é igual a zero significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

De posse dos dados, estes devem ser representados em um diagrama de dispersão, conforme sugere Martins (2014b), formando uma nuvem de pontos que podem demonstrar uma associação linear entre duas variáveis, podendo ser demonstrada numericamente pelo coeficiente de correlação amostral de Pearson (R) ou pelo Coeficiente de determinação (R²). O Coeficiente de Pearson pode ser calculado a partir da seguinte equação (Equação 11):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

O coeficiente de correlação assume valores entre -1 e 1, quanto mais próximo de 1, mais forte é a sua correlação, valores positivos representam uma associação linear positiva entre as variáveis (tabela 6).

Tabela 6 - Níveis de correlação

R	Definição
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Devore (2006)

Nesta pesquisa, verificou-se a análise da relação entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar, e a relação entre essas temperaturas e a morfologia urbana e os materiais de superfície. O trabalho de Alves (2020) faz uso da análise estatística para analisar a influência geourbana no clima de Iporá/GO. Gawuc, Jefimow e Szymankiewicz (2020) aplicaram modelagem estatística comparando a temperatura de superfície obtida através de estações fixas, com a temperatura de superfície obtida através de imagens termais por sensoriamento remoto, foram analisados dados de 10 anos (2008 a 2017) de Varsóvia (Polônia). Li et al. (2020)

realizaram a análise estatística da relação entre o efeito de ilha de calor urbana com a mudança do uso e cobertura do solo entre os anos de 1995 e 2026. Em seus estudos Berg e Kucharik (2022) compararam a temperatura do ar com a temperatura de superfície da terra, através de análise estatística, o estudo utilizou dados de três meses de verão durante 8 anos (2019 a 2019), em Dane, estado de Wisconsin, Estados Unidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram apresentados e discutidos em forma de quadros, gráficos e tabelas, com os dados sistematizados. Paralelamente, a apresentação dos resultados, iniciou-se a discussão e comparação dos resultados obtidos por outros autores.

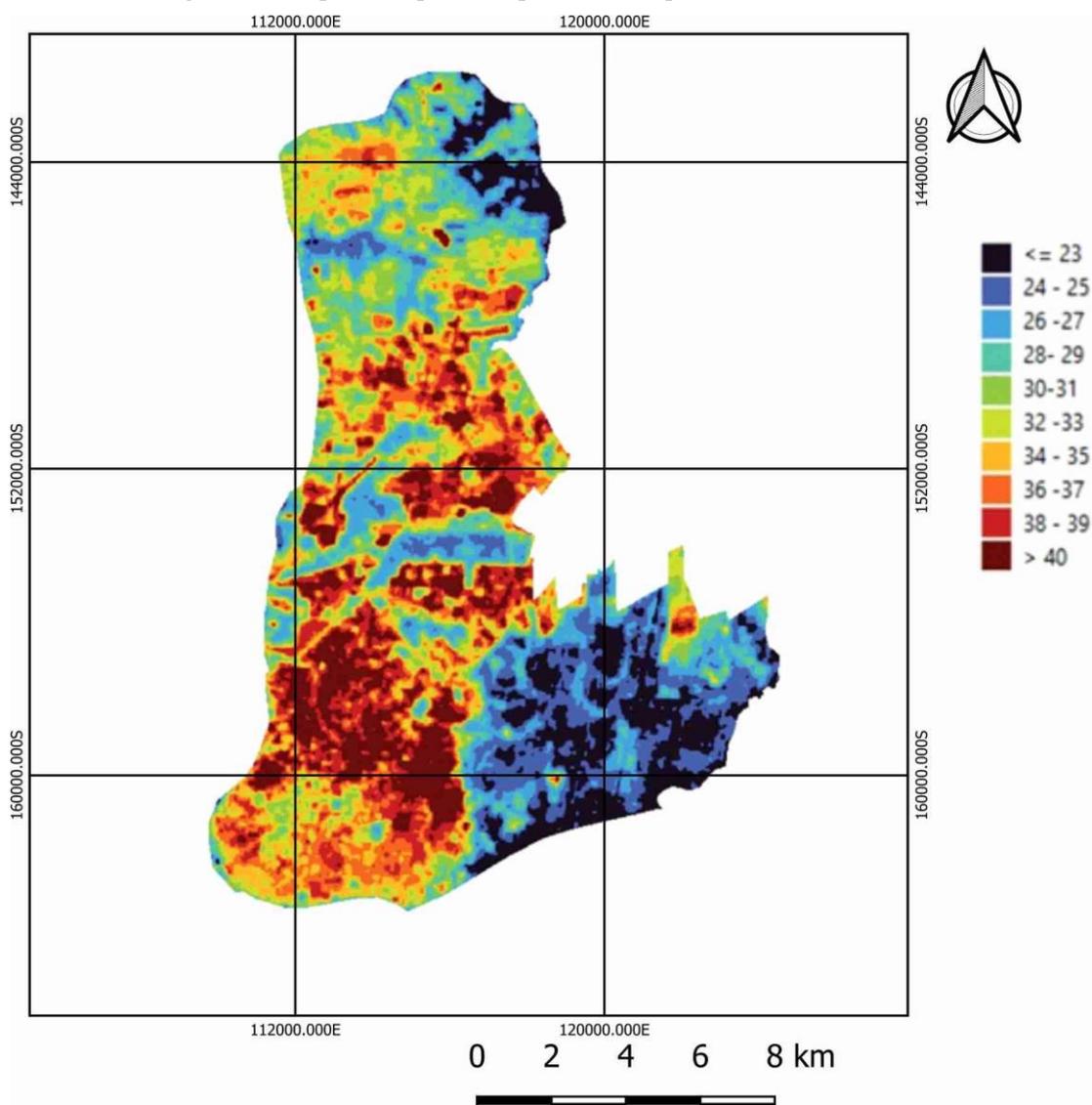
4.1. MAPA DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

A imagem Landsat 8 foi capturada em 26 de junho de 2019, horário 13:23 UTC (hora local 10:23 am), com 20% de cobertura de nuvem, a banda selecionada foi a banda 10, sensor TIRS, com resolução espacial 100 metros. Devido à grande incidência de chuvas na região, é comum a presença de nuvens, desta forma, não foi possível obter imagens com até 10% de cobertura de nuvem, o melhor resultado encontrado foi com 20% de cobertura.

Para obtenção do recorte da área da cidade de Belém, utilizou-se o arquivo do tipo shapefile disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), que foi aplicado sobre a imagem obtida do Landsat e recortado. Porém, optou-se por recortar apenas a área continental, ou seja, as ilhas foram descartadas; essa escolha foi feita devido às ilhas serem pouco urbanizadas, com muita área vegetativa intacta, o que poderia gerar um resultado desinteressante em relação às áreas mais frias, visto que esse trabalho foca na área urbana da cidade.

As cores foram substituídas e categorizadas por média de temperatura, divididas em 10 categorias: $\leq 23^{\circ}\text{C}$; 24°C à 25°C ; 26°C à 27°C ; 28°C à 29°C ; 30°C à 31°C ; 32°C à 33°C ; 34°C à 35°C ; 36°C à 37°C ; 38°C à 39°C ; $\geq 40^{\circ}\text{C}$. A categorização da temperatura foi feita utilizando os dados fornecidos pelos estudos de Corrêa (2011), com a variação de menor e maior temperatura média apresentadas na cidade de Belém. O mapa produzido resulta em uma escala de cores, onde cada cor representa uma média de temperatura, gerando o mapa representado na Figura 57.

Figura 57 - Mapa de Mapa de temperatura de superfície da terra, ano 2019.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

As áreas em vermelho mais escuro são os picos de calor, as áreas em azul escuro são os chamados vales, que representam as áreas com menores temperaturas. A partir deste mapa de calor, com os picos e vales gerados, foram escolhidas as áreas que serão estudadas.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Como já citado, considerando que a cidade de Belém possui ilhas, e extensas áreas de mata preservada, optou-se por escolher áreas dentro do perímetro urbano, com habitações, pois, acredita-se que assim torna este trabalho mais relevante para a disciplina de construção civil. Dentro da área delimitada, foram escolhidos quatro pontos com maior temperatura (marcadores vermelhos) e quatro pontos com menor temperatura (marcadores azuis), sendo as áreas de maior

temperatura denominadas de Zonas 1, 2, 3 e 4; e as áreas de menor temperatura denominadas de Zonas A, B, C e D (Figura 58).

Figura 58 - Áreas de estudo



Fonte: Google Earth

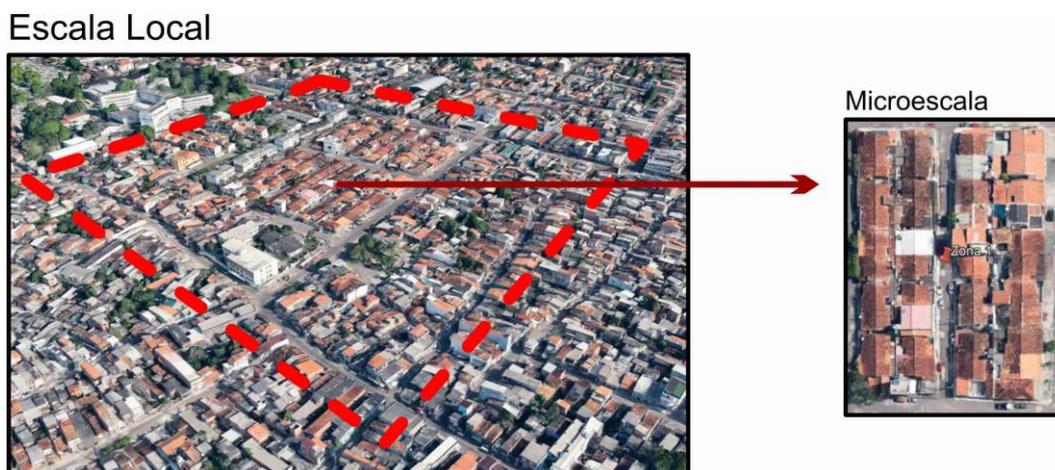
Cada ponto gerou uma zona com extensão aproximada de 400 metros de comprimento por 400 metros de largura, conforme determina a metodologia de análise de LCZs proposta por Stewart e Oke (2012). Desta forma, oito pontos localizados em várias partes de Belém foram explorados.

Neste estudo foi utilizada a escala local para análise das Zonas Climáticas Locais, análise de superfície construída, materiais de superfície, adensamento e na simulação computacional. No caso das análises das variáveis restantes, onde o ponto de localização do receptor era relevante, utilizou-se a análise em nível de microescala.

A Zona 1 (Figura 59), localiza-se no bairro Guamá, é composta por edifícios baixos, em sua grande maioria de até 3 pavimentos, pouco espaçados entre si. Os materiais construtivos encontrados são alvenaria, telha cerâmica, telha de fibrocimento, e os revestimentos de fachada são em grande parte pintura ou lajota cerâmica. Possui tráfego moderado de veículos e pessoas.

Está localizada em zona de uso misto. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}27'30.72''$ Sul e $48^{\circ}27'43.50''$ Oeste.

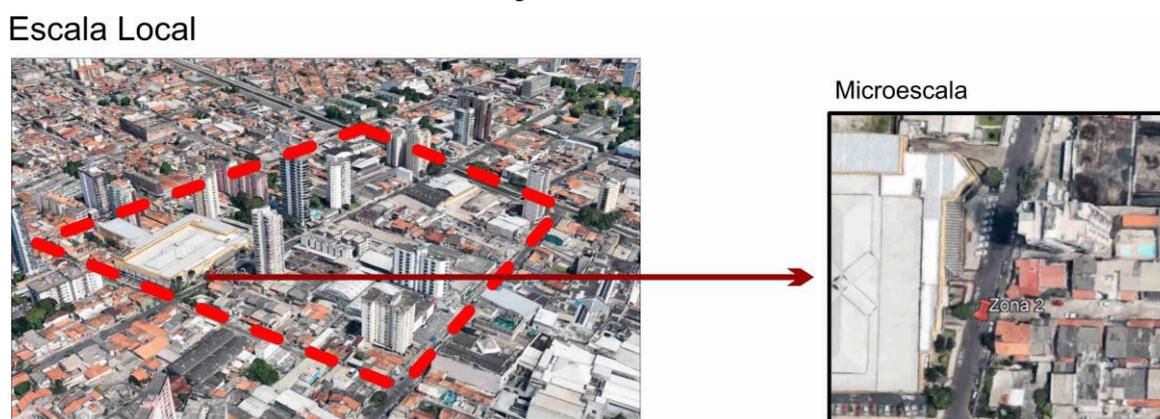
Figura 59 - Zona 1



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

A Zona 2 (Figura 60) localiza-se no bairro Batista Campos, está situada em zona de uso misto, com residências e comércios. Possui edifícios baixos, médios e altos, e considerável presença de galpões. Há pouca arborização. Os materiais construtivos mais encontrados são alvenaria, aço, telha cerâmica, telha de fibrocimento, telha metálica. Tráfego intenso de veículos e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}27'37.82''$ Sul e $48^{\circ}29'46.43''$ Oeste.

Figura 60 - Zona 2

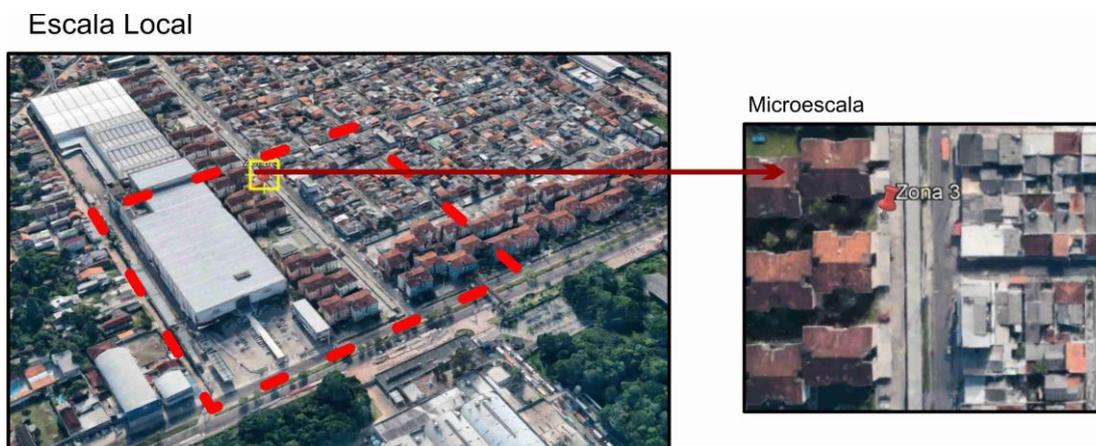


Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

A Zona 3 (Figura 61), localizada no bairro Parque Verde, está situada em zona de uso misto, com residências e comércios. Possui edifícios baixos e médios. Os materiais construtivos mais encontrados são alvenaria, aço, telha cerâmica, telha de fibrocimento, e telha metálica.

Tráfego moderado a intenso de veículos e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}21'37.16''$ Sul e $48^{\circ}26'57.33''$ Oeste.

Figura 61 - Zona 3



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

A Zona 4 (Figura 62), localiza-se no bairro Maracangalha, possui alta concentração de edifícios baixos (até 3 pavimentos). Os materiais construtivos encontrados são alvenaria, telha cerâmica, telha de fibrocimento, e os revestimentos de fachada são em grande parte em pintura ou cerâmica. Possui tráfego moderado de veículos e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}23'58.98''$ Sul e $48^{\circ}28'36.69''$ Oeste.

Figura 62 - Zona 4



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

Na Zona A (Figura 63), que está localizada no bairro Batista Campos, os edifícios se intercalam entre baixos, médios e altos. Possui considerável quantidade de área vegetativa. Materiais construtivos mais utilizados são alvenaria, vidro, concreto, telha cerâmica, telha de fibrocimento; fachadas com revestimento cerâmico, pintura e vidro. Tráfego intenso de veículos

e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}27'30.81''$ Sul e $48^{\circ}29'23.05''$ Oeste.

Figura 63 - Zona A



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

A Zona B (Figura 64), está localizada no bairro Souza, possui média densidade, com edifícios baixos e médios (na sua grande maioria baixos), com considerável área permeável e área verde, e área de densa vegetação. Materiais construtivos mais encontrados são alvenaria, vidro, concreto, telha cerâmica, telha de fibrocimento; fachadas com revestimento cerâmico, pintura e vidro. Cobertura do solo intercalando áreas pavimentadas e áreas permeáveis com vegetação. Tráfego baixo de veículos e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}24'40.03''$ Sul e $48^{\circ}26'43.67''$ Oeste.

Figura 64 - Zona B



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

A Zona C (Figura 65), localizada no bairro Marco, possui edifícios baixos (no máximo 3 pavimentos) e altos, pouco espaçados, e área de densa vegetação. Materiais construtivos utilizados são a: alvenaria, vidro, concreto, telha cerâmica, telha de fibrocimento; fachadas com revestimento cerâmico, pintura e vidro. Cobertura do solo intercalando áreas pavimentadas e

áreas permeáveis com vegetação densa. Tráfego moderado de veículos e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}25'45.56''$ Sul e $48^{\circ}27'28.28''$ Oeste.

Figura 65 - Zona C



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

A Zona D (Figura 66), está na divisão dos bairros do Jurunas e Cidade Velha, localiza-se na orla da cidade de Belém, na beira do rio. Possui edifícios baixos, e a metade de suas construções são galpões. Possui grande quantidade de área vegetativa. Materiais construtivos utilizados são a alvenaria, madeira, telha cerâmica, telha de fibrocimento; fachadas com revestimento cerâmico e pintura. Cobertura do solo intercalando áreas pavimentadas e áreas permeáveis com vegetação. Tráfego moderado de veículos e pessoas. A microescala possui o ponto de receptor (medição) como coordenadas geográficas latitude $1^{\circ}28'9.76''$ Sul e $48^{\circ}30'20.70''$ Oeste.

Figura 66 - Zona D

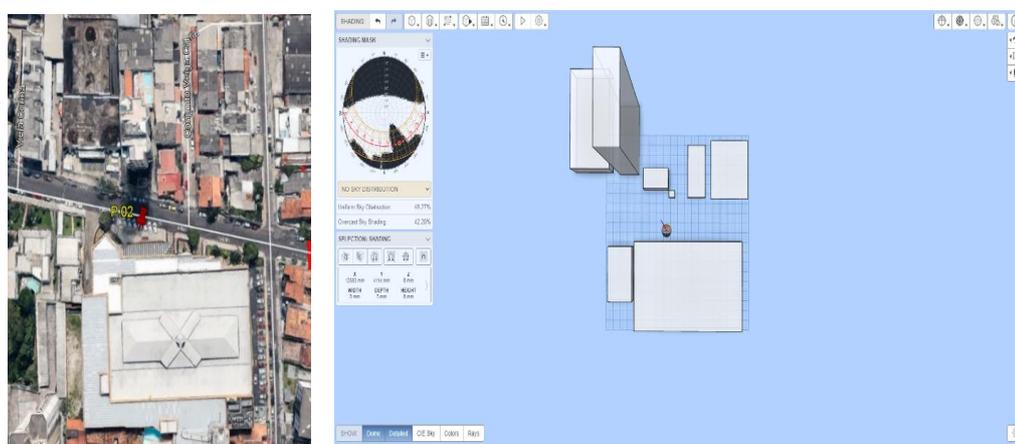


Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagens do Google Earth

4.2.1. Fator de Visão do Céu (FVC)

A partir de dados fornecidos pelo Google Earth, como altura e dimensões das construções e posição do Norte, foi simulado o FVC no aplicativo da Web *Dynamic Overshadowing*, onde as edificações foram representadas por paralelepípedos com dimensões iguais as reais, o que gerou uma imagem demonstrando a visão do céu a partir do ponto de medição, e a porcentagem de obstrução do céu (Figura 67).

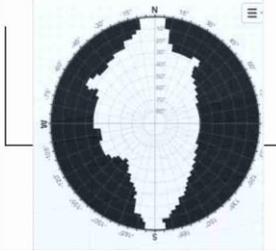
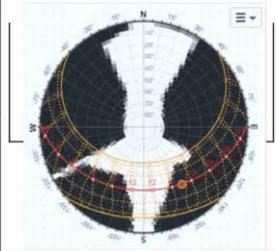
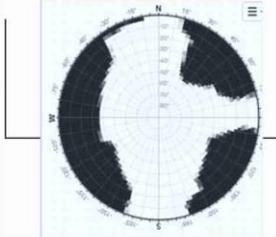
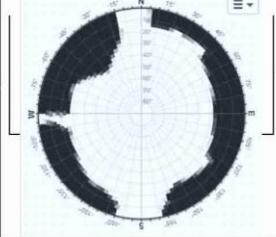
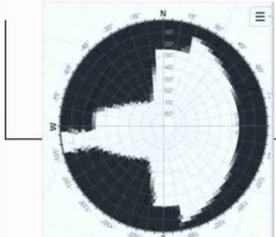
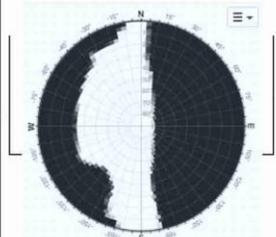
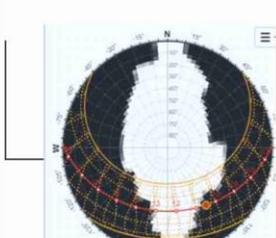
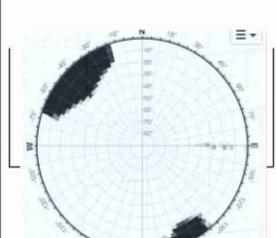
Figura 67 - a) Imagem gerada através do Google Earth, e b) demonstração do aplicativo da Web *Dynamic Overshadowing*.



Fonte: Elaborado pela autora

Para a simulação do Fator de Visão do Céu foram consideradas as edificações no cânion urbano onde está inserido o receptor (onde foram feitas as medições). O Web aplicativo *Dynamic Overshadowing* fornece a obstrução uniforme do céu, que é inversamente proporcional ao Fator de Visão do Céu. A figura 68 apresentam os dois valores, além da imagem tipo olho de peixe referente a cada zona.

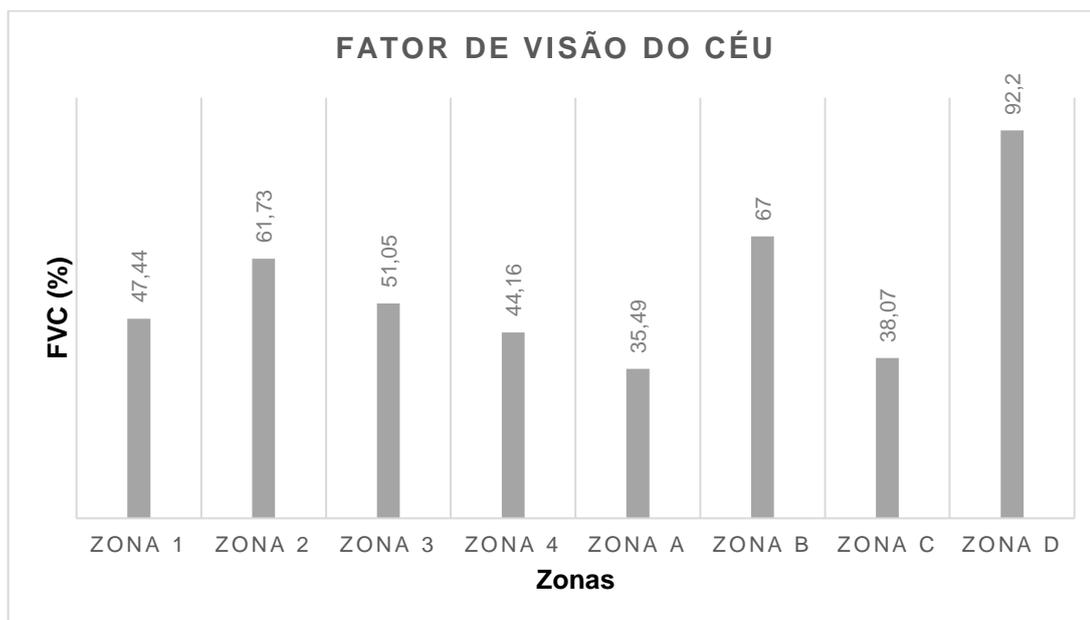
Figura 68 – Fator de Visão do céu com imagem tipo olho de peixe referente a cada zona

Zona			Imagem	Zona			Imagem
Zona 1	Obstrução uniforme do céu	52,56		Zona A	Obstrução uniforme do céu	64,51	
	Fator Visão do Céu	47,44			Fator Visão do Céu	35,49	
Zona 2	Obstrução uniforme do céu	38,27		Zona B	Obstrução uniforme do céu	33	
	Fator Visão do Céu	61,73			Fator Visão do Céu	67	
Zona 3	Obstrução uniforme do céu	48,95		Zona C	Obstrução uniforme do céu	61,93	
	Fator Visão do Céu	51,05			Fator Visão do Céu	38,07	
Zona 4	Obstrução uniforme do céu	55,84		Zona D	Obstrução uniforme do céu	7,8	
	Fator Visão do Céu	44,16			Fator Visão do Céu	92,2	

Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos dados encontrados, montou-se um gráfico (Figura 69) comparativo, onde a Zona D apresenta o maior FVC, e a Zona A o menor FVC, as duas zonas estão enquadradas como áreas que apresentaram menor temperatura.

Figura 69 - Comparativo entre Zonas do Fator de Visão do Céu



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2. Análise W/H/L

As proporções W/H e W/H/L foram medidas a partir do ponto de medição, onde se levou em consideração a largura da via (incluindo calçadas) e a altura dos edifícios perpendiculares a via. A Zona A apresentou a menor proporção, e a Zona D a maior proporção (Tabela 7). Na Zona A, onde está um dos pontos com menor temperatura, o fato de ser um espaço claustrofóbico agrega vantagem no conforto térmico, devido ao sombreamento dos prédios e árvores perpendiculares a via, entretanto, apresentou 0,42 como resultado da proporção W/H, e segundo Romero (2009), não pode ser considerado um cânion urbano, pois é menor do que 0,70. Por outro lado, tem-se a Zona 4, que também está enquadrada com um espaço claustrofóbico, porém é uma zona que apresenta um dos pontos de maior temperatura. Analisando os dois pontos, o que os difere é a quantidade de vegetação, porosidade e orientação em relação ao Norte. A Zona D, que está localizada em um ponto de menor temperatura no mapa de temperatura de superfície, apresenta uma grande proporção W/H, pois é uma área aberta, com quase nenhuma construção no entorno, é voltada para o rio, sem obstáculos, recebendo bastante ventilação.

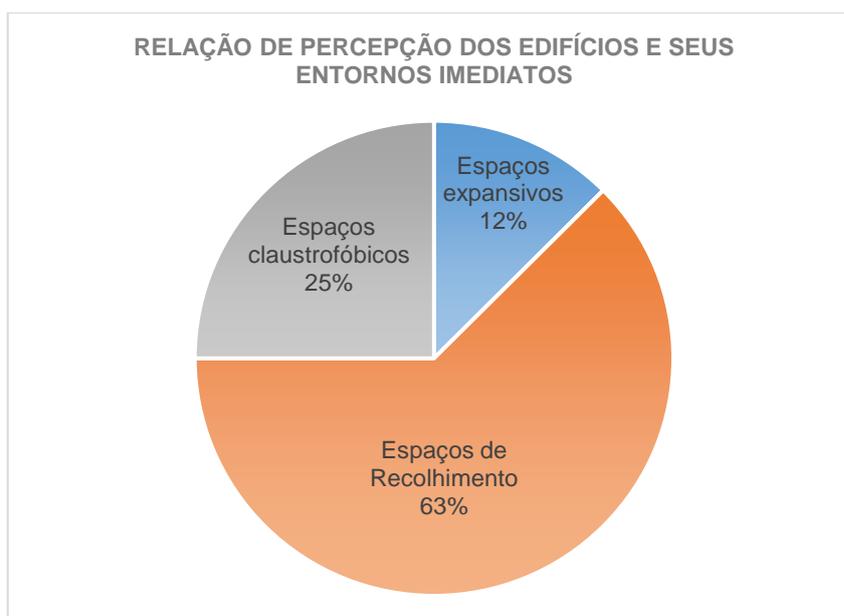
Tabela 7 - Proporção W/H

ZONA	W	H	W/H	L	W/H/L
ZONA 1	7	5	1,4	110	0,012727
ZONA 2	18	10	1,8	376	0,004787
ZONA 3	8	5	1,6	93	0,017204
ZONA 4	6	8	0,75	104	0,007212
ZONA A	25	60	0,42	194	0,002148
ZONA B	28	8	3,5	107	0,03271
ZONA C	12	10	1,2	147	0,008163
ZONA D	80	3	26,67	530	0,050314

Fonte: Elaborado pela autora

Levando em consideração a relação de percepção de edifícios e seus entornos imediatos, apresentada por Romero (2009), a maioria das zonas foi enquadrada como espaços claustrofóbicos, com proporção $W/H < 1$ (Figura 70).

Figura 70 - Relação de percepção dos edifícios e seus entornos imediatos



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.3. Análise Superfície construída

Considerou-se como superfície permeável as áreas vegetadas e o solo exposto, onde obteve-se a porcentagem da fração de superfície permeável e a fração de superfície impermeável de cada zona. Como pode-se perceber na Tabela 8, a Zona C é a que apresenta maior porcentagem de superfície permeável, nesta zona está localizado o Jardim Botânico, conhecido como Bosque Rodrigues Alves, que possui uma extensão de aproximadamente 150

mil metros quadrados de área com vegetação densa, o espaço é tombado pelo Departamento de Patrimônio Histórico e Artístico do Estado do Pará, por essa razão, a vegetação ali presente está a salvo de qualquer supressão. Em situação oposta, estão as Zonas 3 e 4, que possuem menor porcentagem de superfície permeável, das Zonas “quentes”, são as que estão mais distantes do centro de Belém.

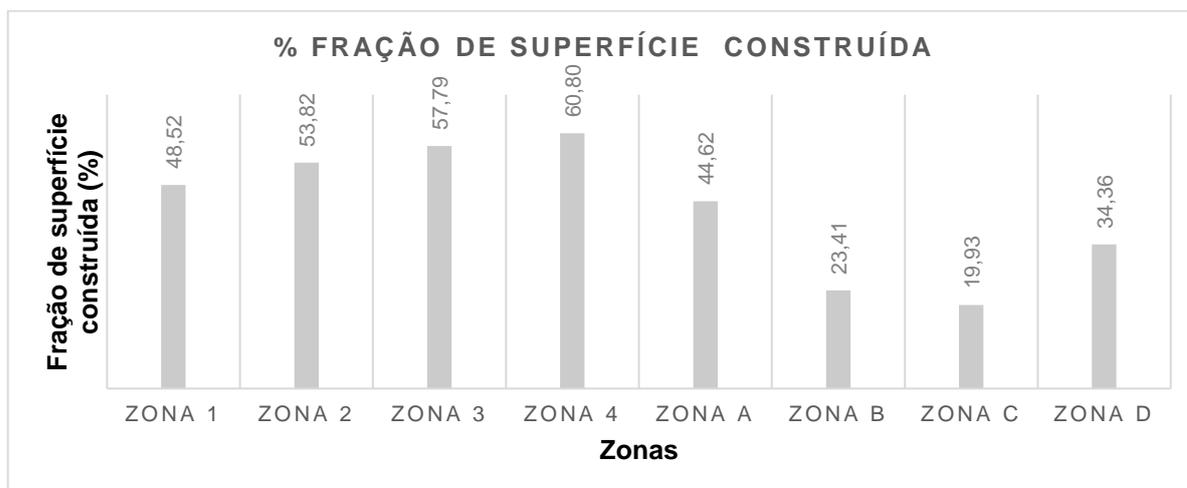
Tabela 8 – Relação entre superfície permeável e superfície impermeável

Zona	Fração de superfície permeável (%)	Fração de superfície impermeável (%)
Zona 1	11	89
Zona 2	11	89
Zona 3	9	91
Zona 4	9	91
Zona A	30	70
Zona B	54	46
Zona C	62	38
Zona D	36	64

Fonte: Elaborada pela autora

Para obtenção da porcentagem de superfície construída considerou-se todas as construções com 1 ou mais andares, e conforme mostra a Figura 71, a Zona 4 foi a que apresentou maior porcentagem de fração de superfície construída, a zona está localizada em um conjunto habitacional popular, que possui pouco ou nenhum afastamento entre as construções. A Zona B é a que apresenta a menor porcentagem de superfície construída, esta zona também se insere em um conjunto habitacional, porém, neste caso, apresenta afastamento entre as construções, além disso, grande parte da Zona B pertence às forças armadas, e possui área de mata preservada.

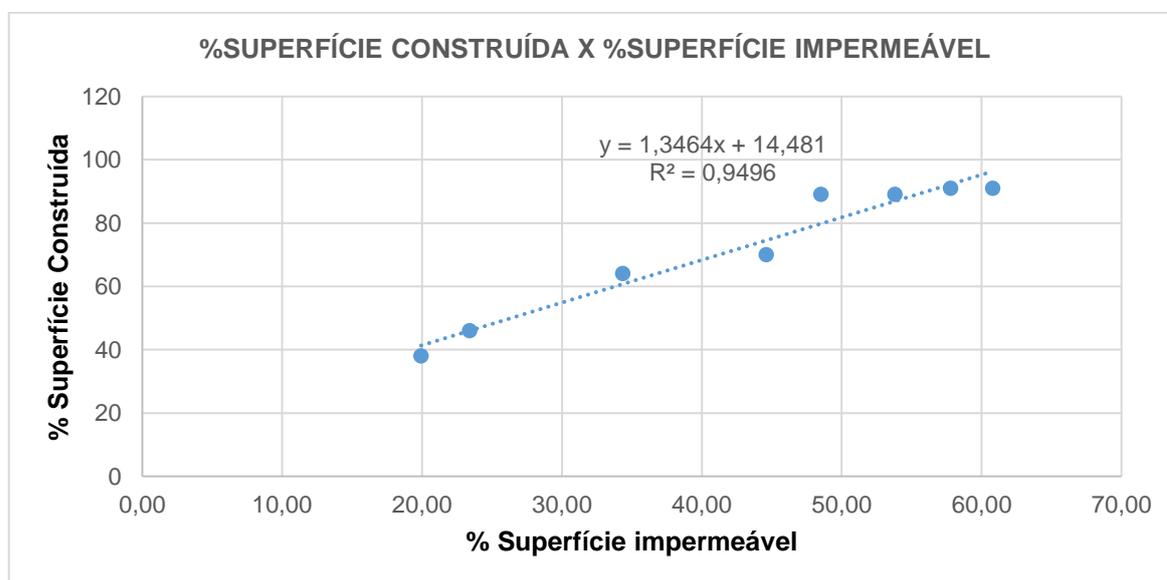
Figura 71 - Gráfico de superfície construída



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 72 demonstra o gráfico de dispersão da relação entre a porcentagem de superfície construída pela porcentagem de superfície impermeável, onde observa-se a correlação positiva muito forte, com $R = 0,97$. Ou seja, quanto maior a superfície construída, maior será a superfície impermeável.

Figura 72 - Relação Superfície Construída e Superfície impermeável

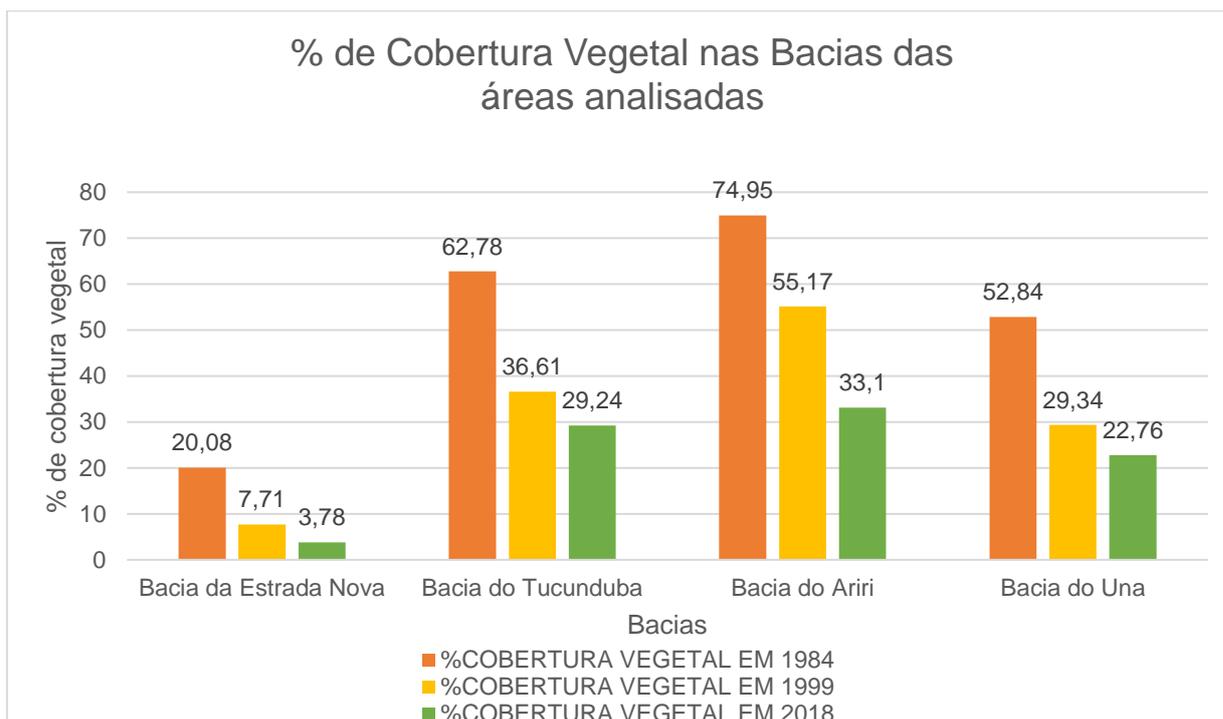


Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 73 apresenta um gráfico adaptado do estudo realizado por Miranda (2020), de onde foram selecionadas apenas as bacias hidrográficas localizadas nas zonas que esta tese está tratando: Bacia da Estrada Nova (Zona 2, Zona A e Zona D), Bacia do Tucunduba (Zona 1), Bacia do Ariri (Zona 3), Bacia do Una (Zona 4, Zona B e Zona C). Na bacia da Estrada Nova

a cobertura vegetal é quase inexistente, as Zonas A e D estão localizadas nesta bacia, e entre as zonas que apresentam menores temperaturas são as que tem porcentagem de superfície permeável abaixo de 50%. Muito do que ainda existe de vegetação na bacia do Una se deve às áreas pertencentes às forças armadas, inclusive, o ponto do receptor da Zona B se encontra em um desses terrenos.

Figura 73: Porcentagem da cobertura vegetal das bacias hidrográficas da Região Metropolitana de Belém onde estão localizadas as áreas analisadas - 1984, 1999 e 2018

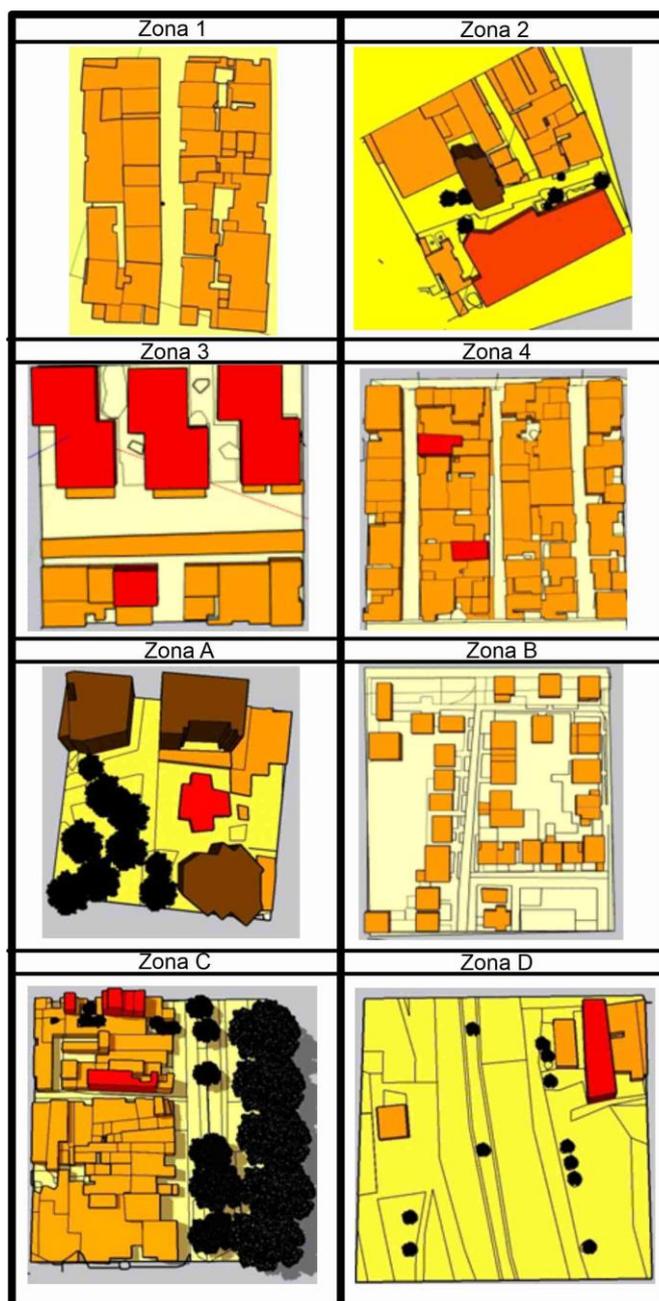


Fonte: Adaptado de Miranda (2020)

4.2.4. Análise Rugosidade

Conforme a metodologia de Pacifici (2019), onde foram utilizadas 4 escalas para determinar a altura das construções, tem-se as escalas S1 (amarela), S2 (laranja), S3 (vermelha) e S4 (marrom). A análise foi aplicada a nível de microescala, sendo geradas as imagens apresentadas na Figura 74.

Figura 74 - Níveis de escalas nas Zonas 1, 2, 3, 4, A, B, C e D



Fonte: elaborado pela autora

A partir da análise individual de cada área, observou-se qual a escala de maior predominância e o grau de rugosidade, esses dados estão apresentados na Tabela 9. A escala S2 (construção de 0,50 a 10 metros) é a que apresenta maior relevância na maioria das zonas (4 zonas entre as 8). Em relação a rugosidade, a que apresentou maior frequência foi a Classe 8, ambientes caóticos, com área densa e edifícios de altura variada.

Tabela 9 - Escala e Rugosidade predominante em cada zona

ZONA	ESCALA	RUGOSIDADE
Z1	S2	Classe 7
Z2	S2	Classe 8
Z3	S3	Classe 6
Z4	S2	Classe 7
ZA	S4	Classe 8
ZB	S1	Classe 5
ZC	S2	Classe 8
ZD	S1	Classe 4

Fonte: Elaborada pela autora

4.2.5. Análise de materiais de superfície

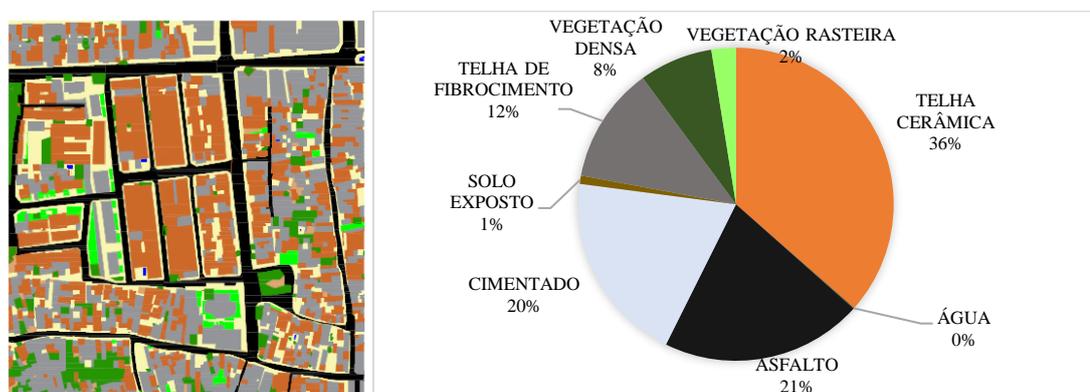
Neste item são abordados os materiais de superfície através da metodologia de classificação supervisionada, com abordagem dos diversos materiais que compõem a superfície. Além desse método, as áreas verdes e corpos d'água foram calculados pela metodologia NDVI e NDWI, respectivamente.

4.2.5.1. Classificação supervisionada

Cada zona gerou um mapa e um gráfico demonstrando a porcentagem do tipo de material de superfície utilizado. Conforme já dito anteriormente, os materiais de superfície foram divididos em: a) telha cerâmica; b) corpos d'água; c) asfalto; d) cimentado; e) solo exposto; f) telha de fibrocimento ou metálica; g) vegetação densa; h) vegetação rasteira.

As superfícies de telha cerâmica representam 16% do total da área da Zona 1, seguido por asfalto (21%) e cimentado 20%. A menor porcentagem identificada foi de solo exposto, com 1% (Figura 75).

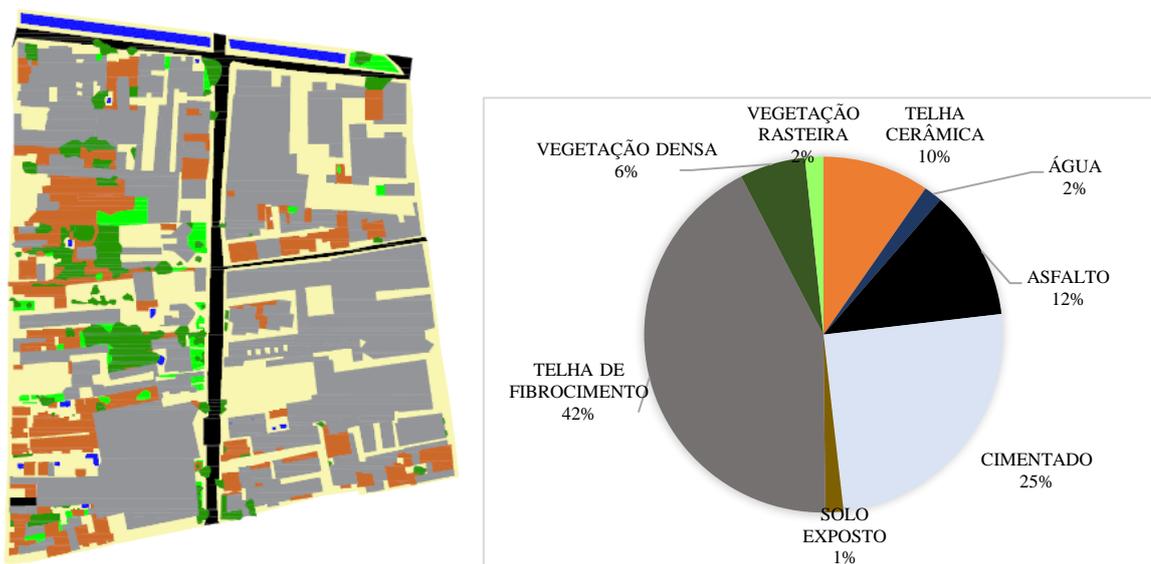
Figura 75 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 1



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 76 apresenta os materiais de superfície da Zona 2, com 42% da área total ocupado por cobertura de telha de fibrocimento. Como material de menor relevância está o solo exposto, com apenas 1%.

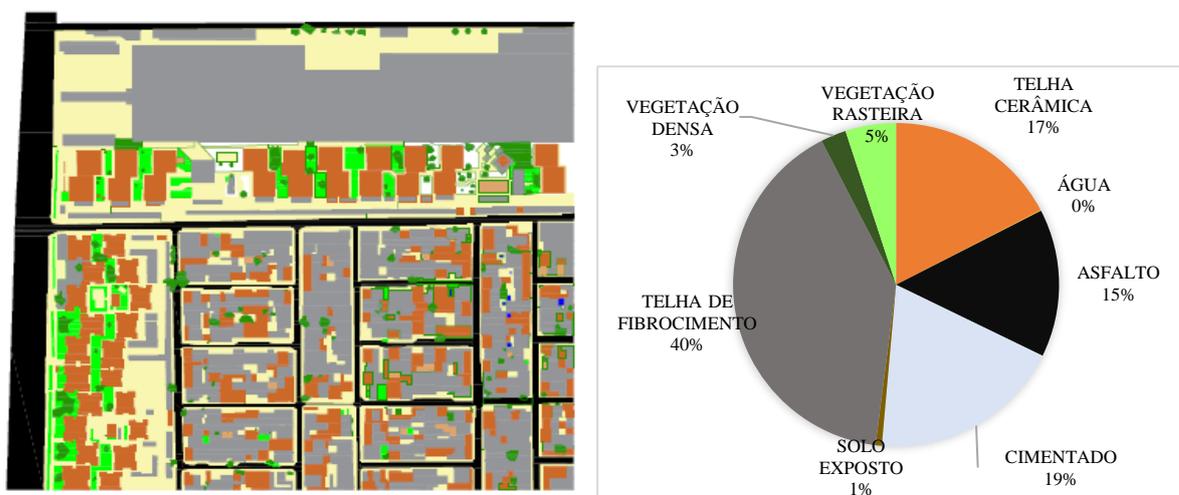
Figura 76 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 2



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona 3 apresenta 40% da sua área composta pela cobertura de superfície de telha de fibrocimento, seguido por 19% de material cimentado, e 17% de cobertura de telha cerâmica (Figura 77).

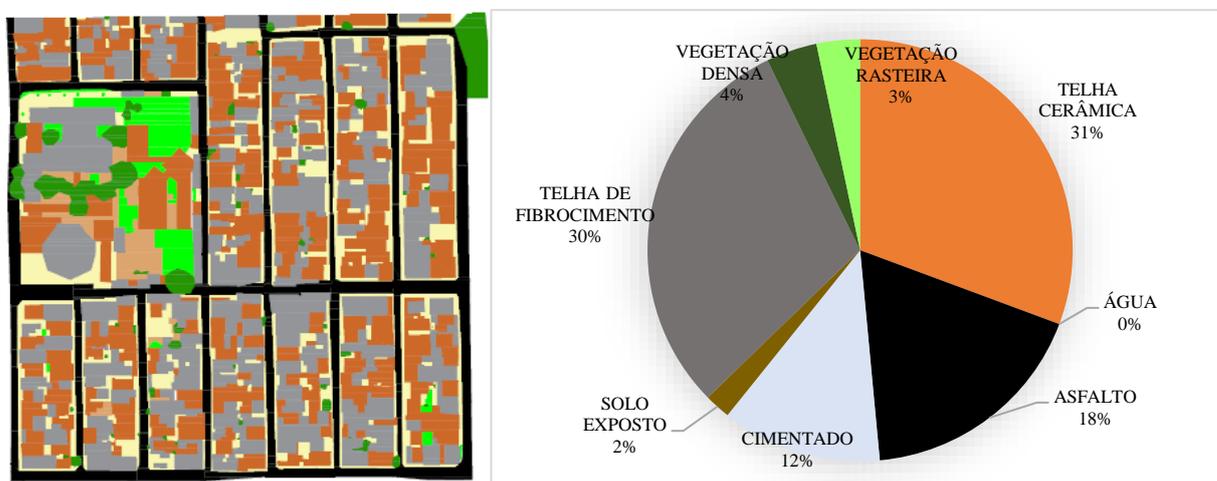
Figura 77 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 3



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme demonstra a Figura 78, os materiais de cobertura de telha cerâmica e telha de fibrocimento apresentam percentual bem próximos, com 31% e 30%, respectivamente, sendo os materiais de superfície de maior relevância da Zona 4.

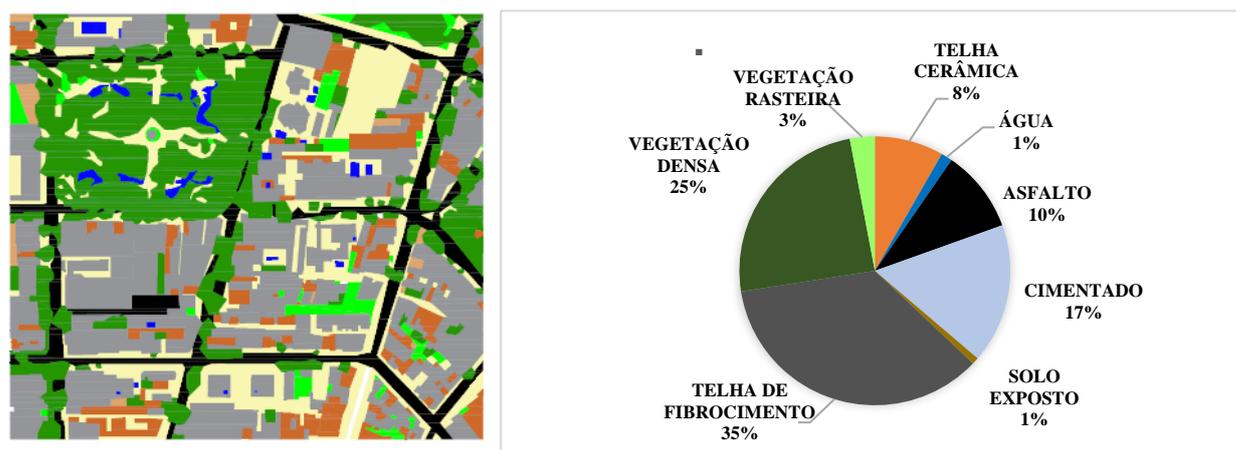
Figura 78 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona 4



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 79 apresenta a classificação supervisionada da Zona A, que apresentou as coberturas em telha de fibrocimento como o material de maior relevância, com 35% da área, em seguida, apresenta as áreas de vegetação densa com 25%, o material de superfície com menor relevância são os corpos d'água, com 1%.

Figura 79 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona A

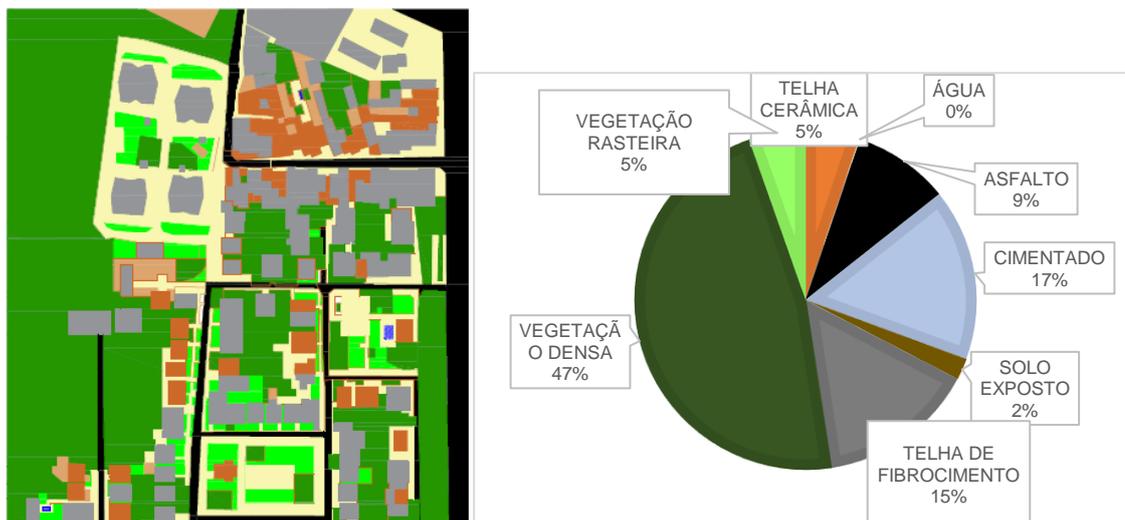


Fonte: Elaborado pela autora

Conforme apresenta a Figura 80, o material de superfície com maior relevância na Zona B são as áreas de vegetação densa, com 47%, o que correspondem a quase metade da

superfície total. A superfície com menor relevância são os corpos d'água, que não correspondem nem a 1%.

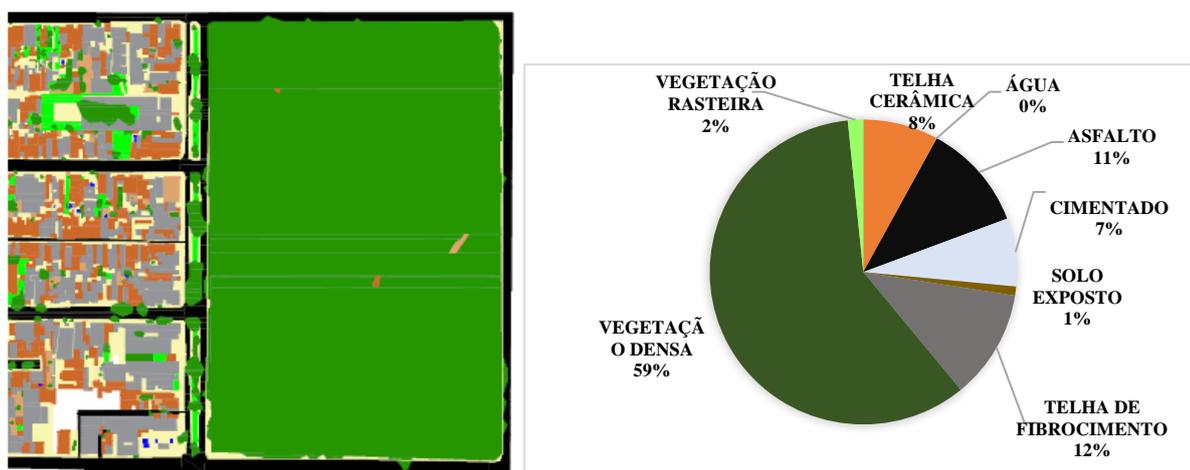
Figura 80 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona B



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona C, possui mais da metade de sua área preenchida por vegetação densa (59%), em segundo lugar, aparece as superfícies de cobertura de fibrocimento, com 12% da área total. E como materiais de superfície com menor relevância tem-se a água (0%) e o solo exposto, com 1% (Figura 81).

Figura 81 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona C

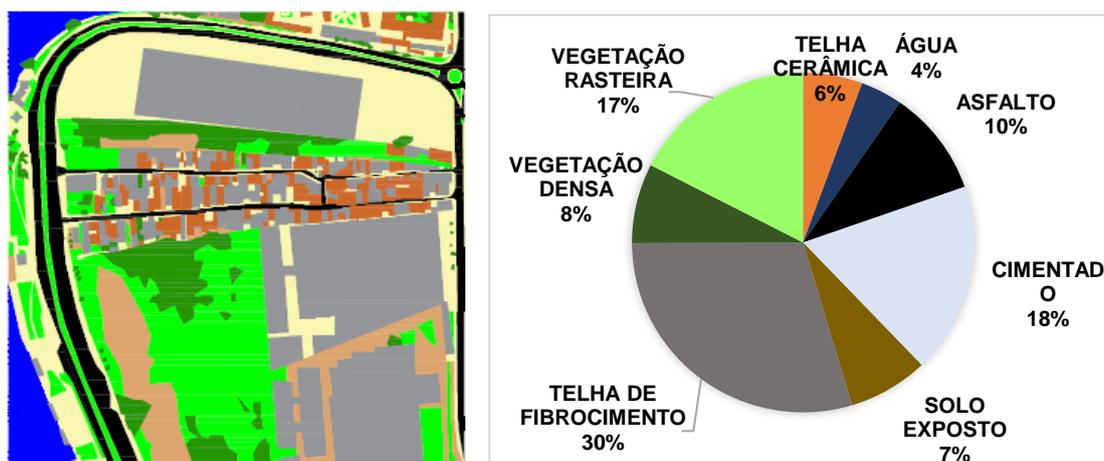


Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 82 mostra a classificação de materiais de superfície da Zona D, que apresenta 30% de sua área de cobertura de telha de fibrocimento, principalmente devido à grande quantidade de galpões existentes na área. De todas as zonas é a que apresenta maior percentual

de vegetação rasteira, com 17% da área total, nesse caso, devido à grande área sem construções existente.

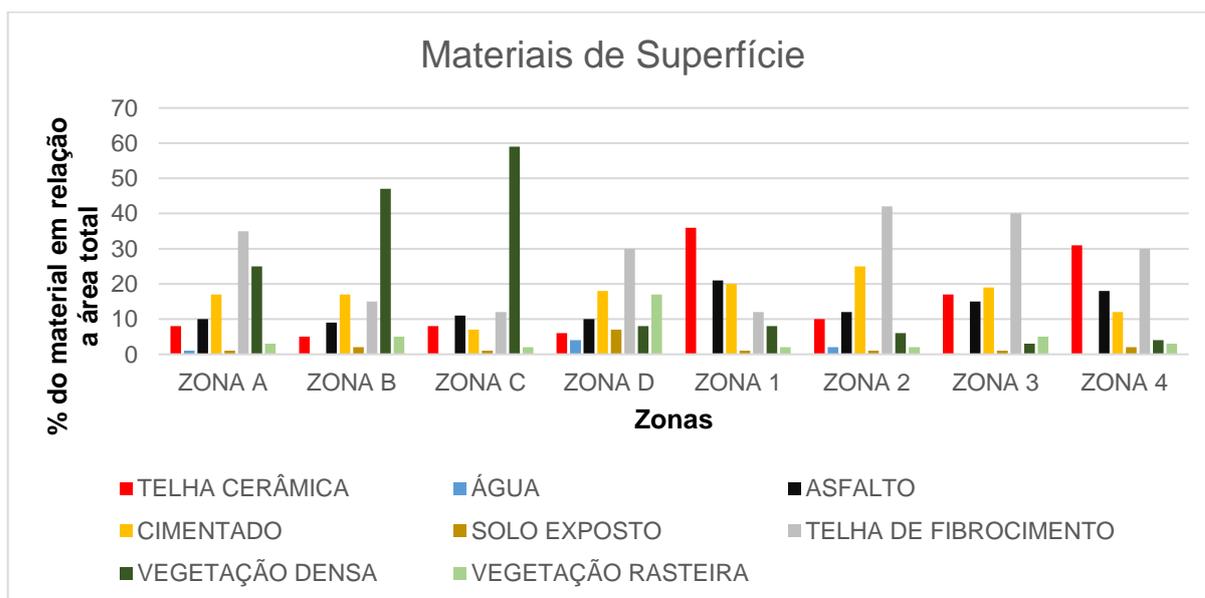
Figura 82 - Classificação Supervisionada e porcentagem de materiais de superfície Zona D



Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, de posse do mapeamento dos materiais de superfície de todas as oito zonas, gerou-se um gráfico onde é possível identificar as zonas em que cada material é mais relevante (Figura 83).

Figura 83 - Gráfico Comparativo das Porcentagens da Classificação Supervisionada

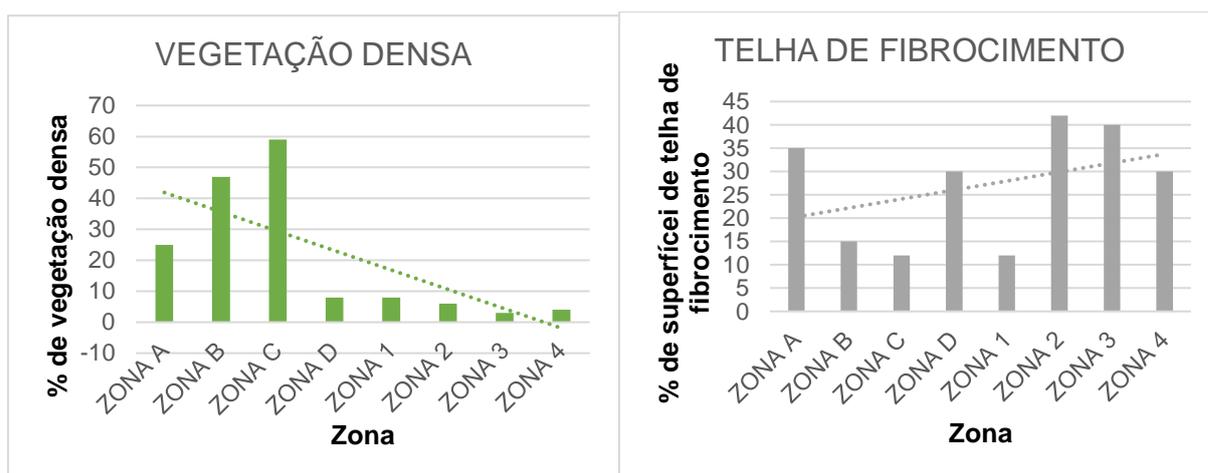


Fonte: Elaborado pela autora

Nas zonas de menor temperatura é predominante as superfícies de vegetação densa, o que confirma o resultado dos estudos de Soltani e Sharifi (2017), que por meio da medição da temperatura através de transectos móveis em Adelaide, Austrália, evidenciou que em áreas arborizadas as temperaturas tendem a ser menores. Entre as Zonas com menores temperatura, a Zona D foi a única que não apresentou como material de superfície mais relevante as vegetações densas, mas sim, as superfícies de telha de fibrocimento.

Já nas zonas de maior temperatura o material de superfície dominante é a cobertura de telha de fibrocimento, com exceção da Zona 1, que apresenta como material predominante cobertura de telha cerâmica. Em todas as zonas os materiais com menor presença foram os corpos d'água e solo exposto, este último, em média representando apenas 1% da área total, com exceção da Zona D, onde a presença de solo exposto é de 7% (Figura 84).

Figura 84 - Gráfico Comparativo das Porcentagens de Vegetação Densa e Telha de Fibrocimento

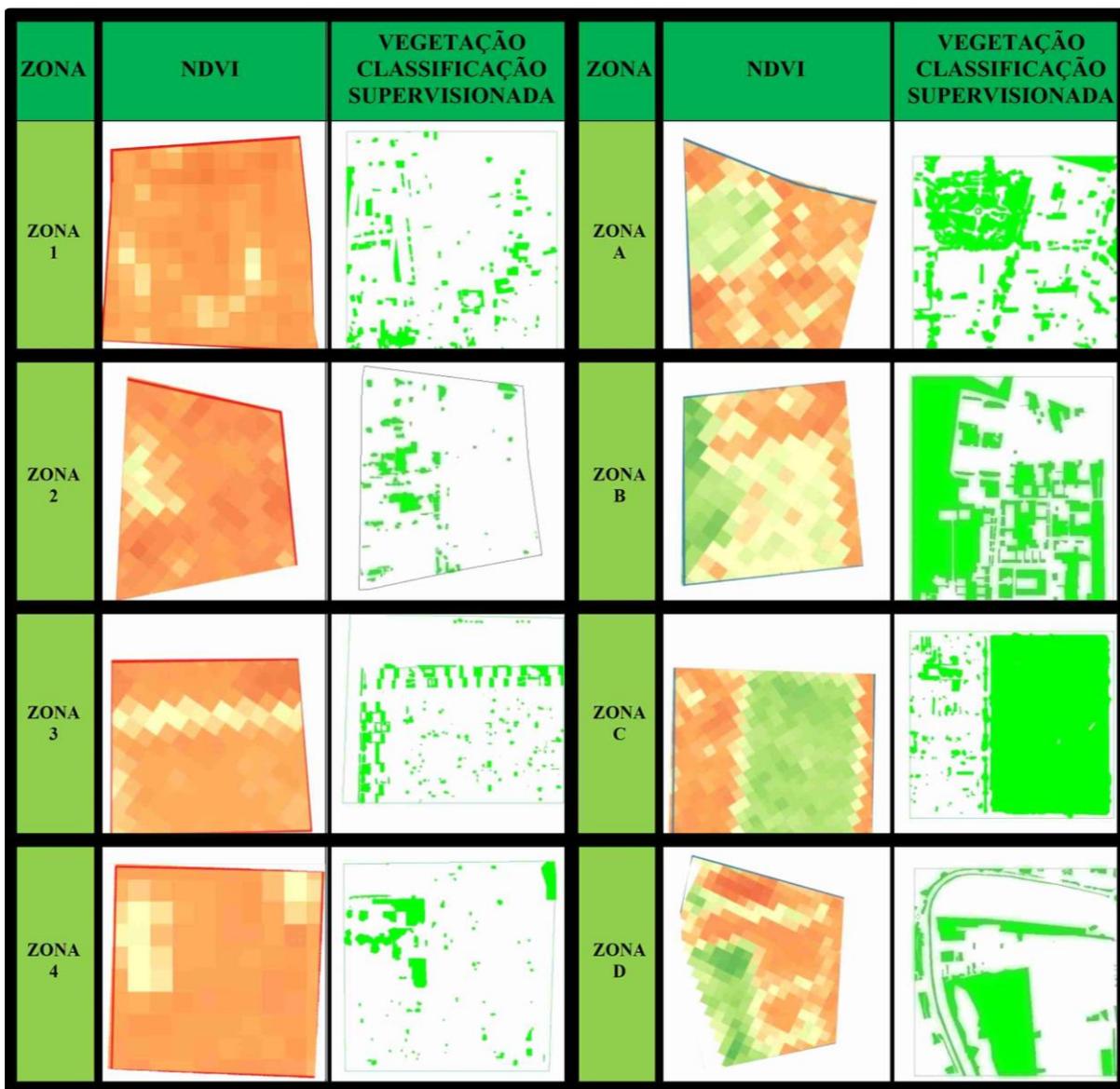


Fonte: Elaborado pela autora

4.2.5.2. Cálculo NDVI

A imagem analisada foi capturada pelo Landsat 8, na data de 26 de junho de 2019, horário 13:23 UTC, com 20% de cobertura de nuvem. O processamento da imagem foi realizado no software QGIS versão 3.4, comando calculadora raster, com o cruzamento da banda 4 (vermelha) e banda 5 (infravermelho próximo), no Landsat 8. Após a geração das imagens NDVI, realizou-se um comparativo com as imagens de análise de superfície obtidas através da classificação supervisionada manual (Figura 85). No NDVI, quanto mais vermelha a área, menor é a presença de vegetação.

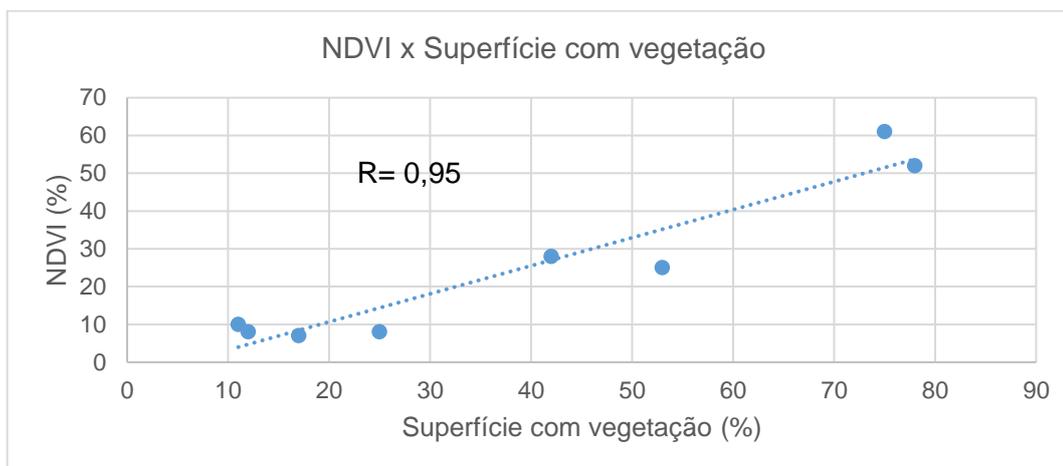
Figura 85 - Comparativo NDVI e Vegetação Classificação Supervisionada



Fonte: Elaborado pela autora

Posteriormente, foi correlacionado o NDVI com as porcentagens de superfície com vegetação de cada zona obtida por classificação supervisionada, onde constatou-se que a correlação é positiva e muito forte, apresentando coeficiente de correlação (R) igual a 0,95 (Figura 86).

Figura 86 - Correlação entre NDVI e Porcentagem de Vegetação Densa



Fonte: Elaborado pela autora

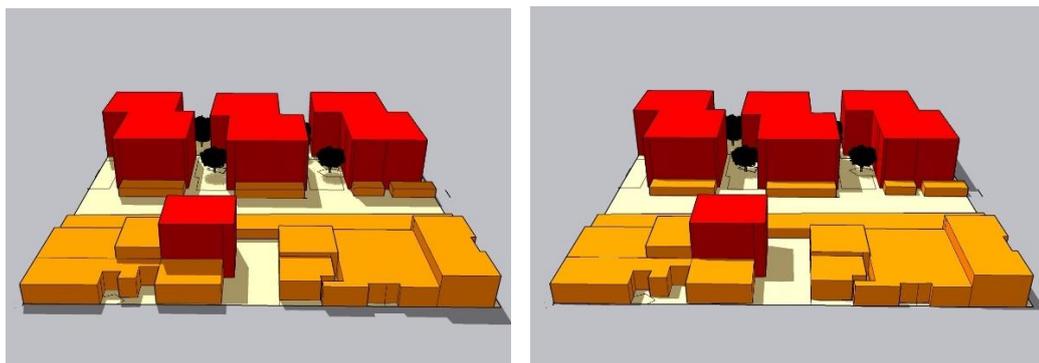
4.2.5.3. Cálculo NDWI

Martinez *et al.* (2009) afirmam que em regiões com alta presença de materiais particulados e dissolvidos na água o processo de absorção e espalhamento da luz é afetado, sendo o caso dos rios da região da Amazônia, onde está situada Belém. Por esse motivo, não se obteve resultado satisfatório na aplicação do método NDWI através do QGIS, pois, alguns corpos d'água não foram identificados, tendo que ser feito de forma manual para complementar.

4.2.6. Sombreamento

Por meio do software Sketchup, as Zonas foram modeladas em nível de microescala, no raio de aproximadamente 100 metros a partir do ponto do receptor, onde as edificações foram representadas por paralelepípedos com alturas semelhantes a real, além disso, foram locados blocos de árvores posicionados análogos a realidade. Em seguida, foram simuladas duas situações, os meses de abril e novembro, ambos no horário de 14h, situações o mais próximo possível das medições realizadas in loco. A partir destas simulações pode-se observar o sombreamento de cada zona, conforme exemplifica a figura 87, com a simulação da Zona 3.

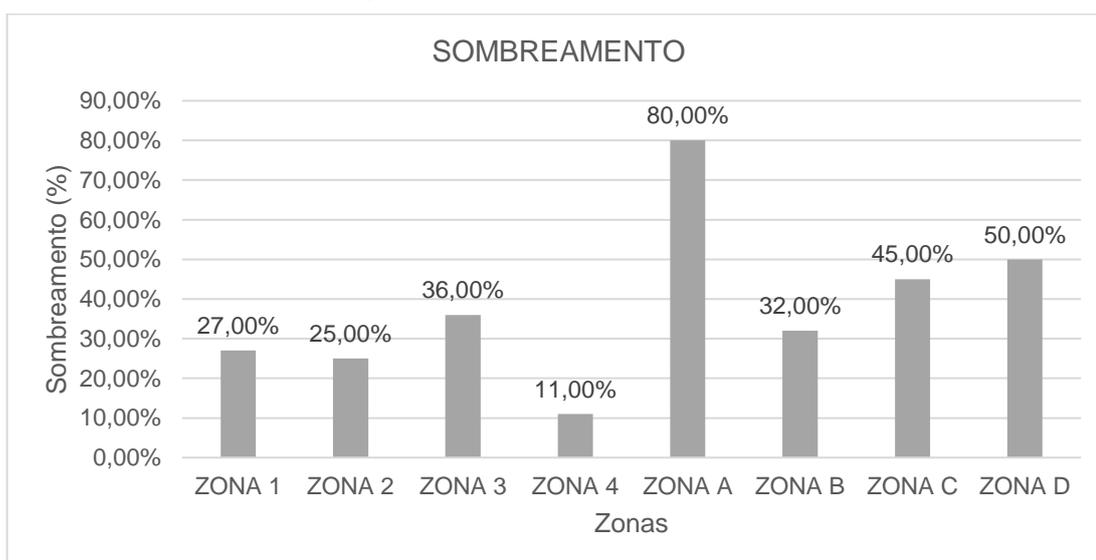
Figura 87 - Relação sombreamento meses de Abril e Novembro, Zona 3



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 88 apresenta o gráfico com a porcentagem de sombreamento de todas as zonas, a Zona A foi a que apresentou maior percentual, com 80% da área sombreada, essa área apresenta grande quantidade de arranha-céus e de vegetação densa, gerando essa grande quantidade de sombra. A Zona D foi a que apresentou menor percentual de sombreamento, com apenas 5%, esta zona é pouco edificada, e apesar de possuir uma abundante quantidade de vegetação rasteira, possui rara presença de árvores, muito se deve ao fato de ser uma área construída há relativamente pouco tempo, onde, as árvores ali plantadas ainda não chegaram na fase adulta. As duas zonas citadas estão localizadas em áreas com menor temperatura, segundo o mapa de temperatura de superfície.

Figura 88 - Percentual de sombreamento



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.7. Adensamento

A Tabela 10 apresenta a densidade de cada zona, obtida a partir da relação entre o número de habitantes pela dimensão em hectare do bairro onde cada zona se encontra, os dados foram obtidos no Anuário Estatístico de Belém 2011 (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2012), como anteriormente citado, é o último anuário disponibilizado pela Prefeitura de Belém.

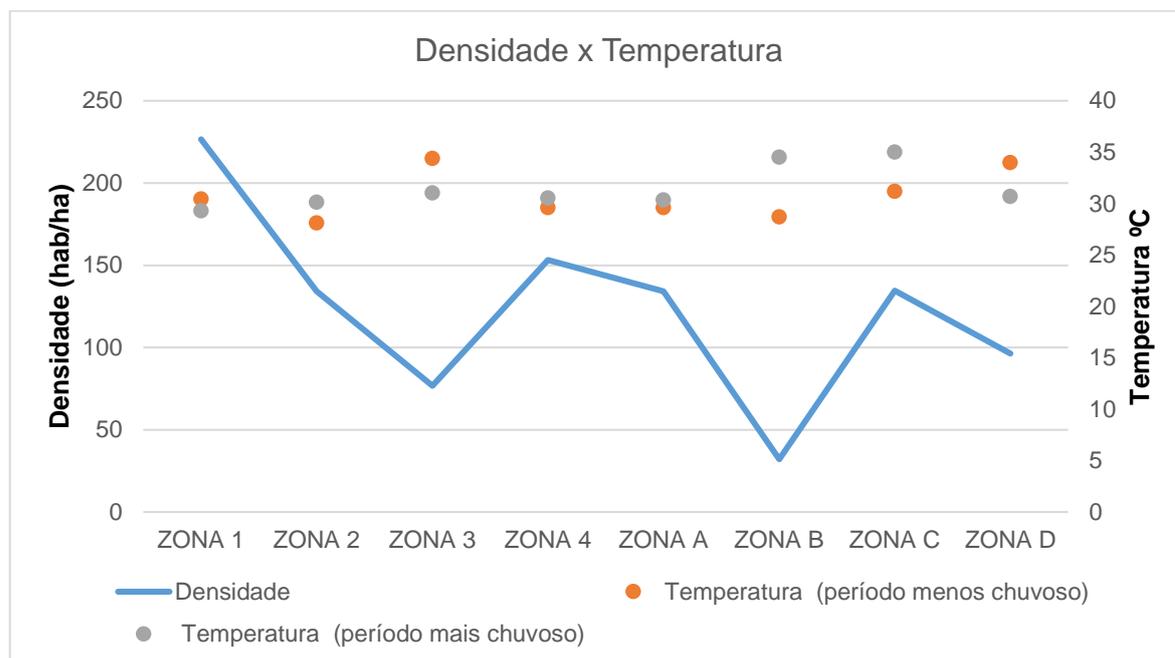
Tabela 10 - Densidade de cada zona

ZONA	Hab	Ha	Densidade
ZONA 1	94610	417,54	226,59
ZONA 2	19136	142,71	134,09
ZONA 3	39126	509,68	76,77
ZONA 4	30534	199,22	153,27
ZONA A	19136	142,71	134,09
ZONA B	13190	411,3	32,07
ZONA C	65844	489,23	134,59
ZONA D	12128	125,79	96,41

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2012

Apesar de apresentar uma das menores densidades, a Zona B é a que apresenta uma das maiores temperaturas no período mais chuvoso (Figura 89), lembrando que essa temperatura representa apenas o ponto de medição, ou seja, o microclima, havendo variação de temperatura em pontos distintos do bairro. A Zona 1 é a que apresenta maior densidade, sendo locada entre as zonas mais quentes.

Figura 89 - Gráfico da relação entre a densidade urbana das áreas analisadas e as temperaturas medidas



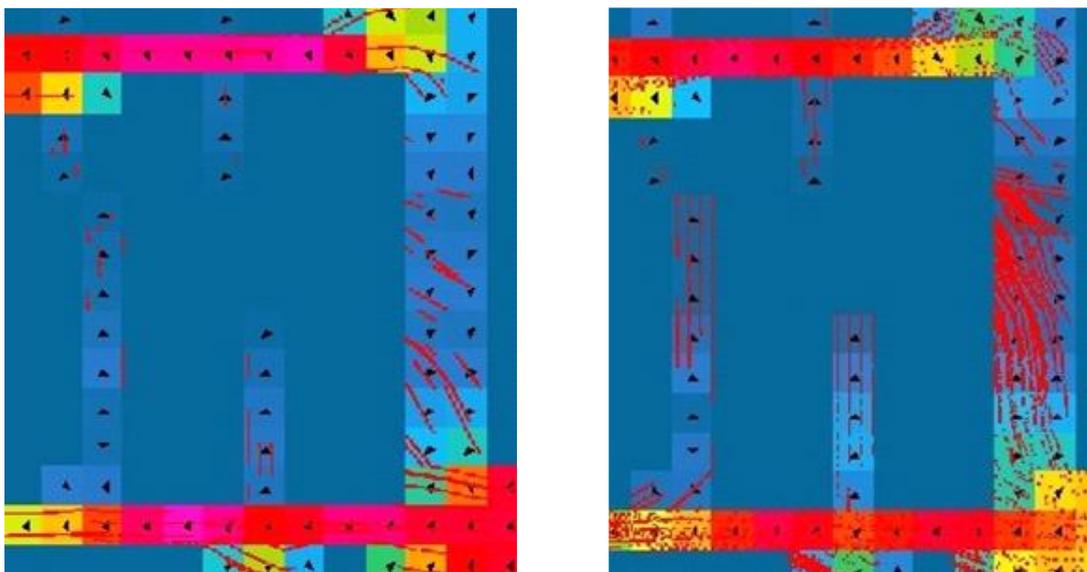
Fonte: Elaborado pela autora

4.2.8. Porosidade

A porosidade foi obtida através de simulação no ENVI-Met (o resultado será antecipado neste tópico, visto que a simulação no ENVI-Met só será explanada no subcapítulo 4.3), onde se obteve a velocidade dos ventos. Para cada zona foram geradas duas situações, uma na época mais chuvosa e outra na época menos chuvosa. Porém, o horário escolhido foi às 10 horas da manhã, hora aproximada da captura da imagem Landsat. Para a melhor visualização da direção dos ventos, optou-se por apresentar a área em microescala, a partir do ponto do receptor (medições).

A Figura 90 apresenta as simulações da Zona 1 nos períodos mais e menos chuvoso, observa-se que o ponto do receptor não recebe tanta ventilação direta, porém, no período menos chuvoso essa ventilação apresenta aumento. A via paralela recebe um fluxo maior de vento, muito provavelmente, por ser uma via mais larga, e possuir menos obstruções.

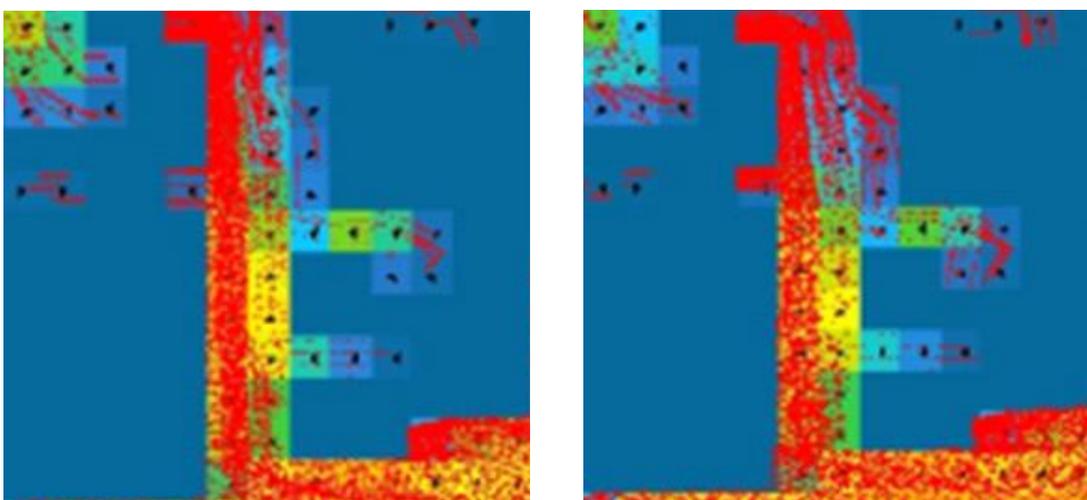
Figura 90 - Zona 1: Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona 2, conforme simulação demonstrada na Figura 91, recebe grande fluxo de vento no ponto do receptor, tanto no período mais chuvoso quanto no período menos chuvoso. A via transversal também recebe intensa ventilação.

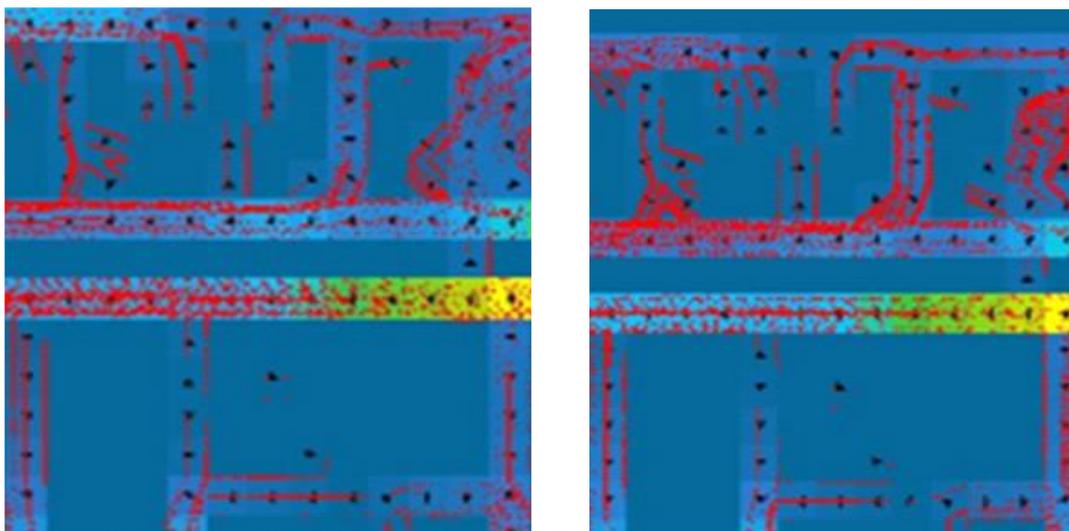
Figura 91 - Zona 2 : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

Na simulação apresentada na Figura 92 é notável o grande fluxo de ventilação na zona 3, por todas as vias existentes no local, apresentando maior fluxo na área do receptor.

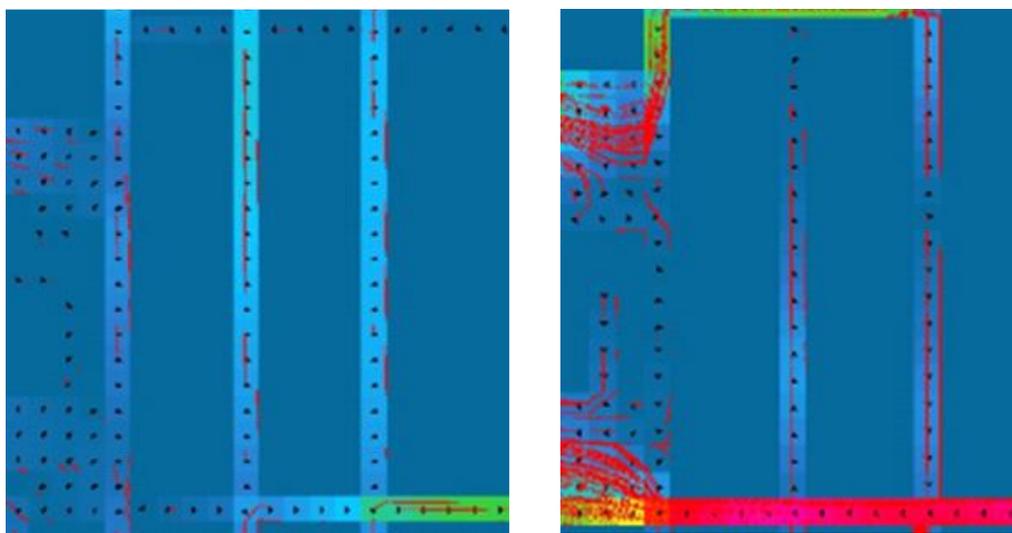
Figura 92 - Zona 3: Direção dos ventos -. Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona 4 apresenta baixo fluxo de ventos no período mais chuvoso, já no período menos chuvoso esse fluxo aumenta, principalmente na área aberta, sem edificações, ou seja, a falta de obstáculos permite a circulação do vento (Figura 93).

Figura 93 - Zona 4 : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente

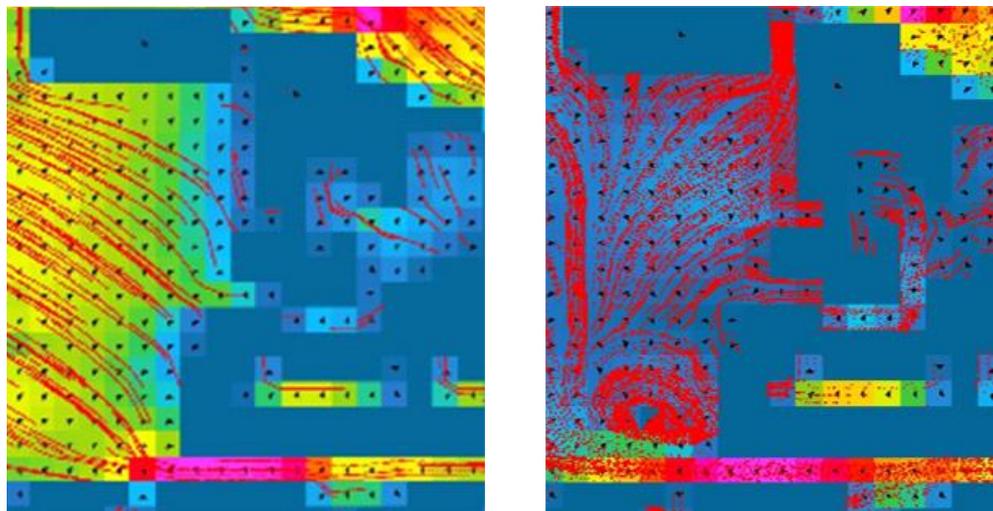


Fonte: Elaborado pela autora

A Zona A recebe bastante fluxo de ventos, principalmente no período menos chuvoso, conforme demonstra a Figura 94, e apesar de possuir bastante vegetação densa e edifícios de altura elevada, estes não são obstáculos para a porosidade. Situação diferente do citado por

BARBOSA et al. (2003) que observaram que em áreas com copa de árvores muito densas, estas funcionam como barreiras que impedem a circulação de ar

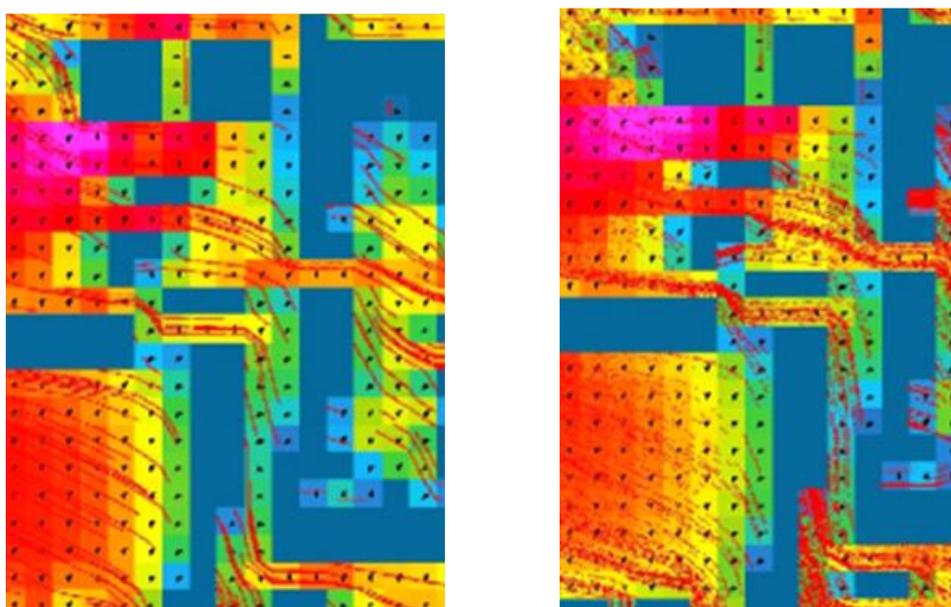
Figura 94: Zona A - Direção dos ventos. Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona B recebe bastante ventilação, e como pode-se perceber na figura 95, os edifícios em vez de servirem como obstáculos, servem como distribuidores da ventilação, fazendo com que assim toda a área receba vento, logo, conclui-se que possui alta porosidade.

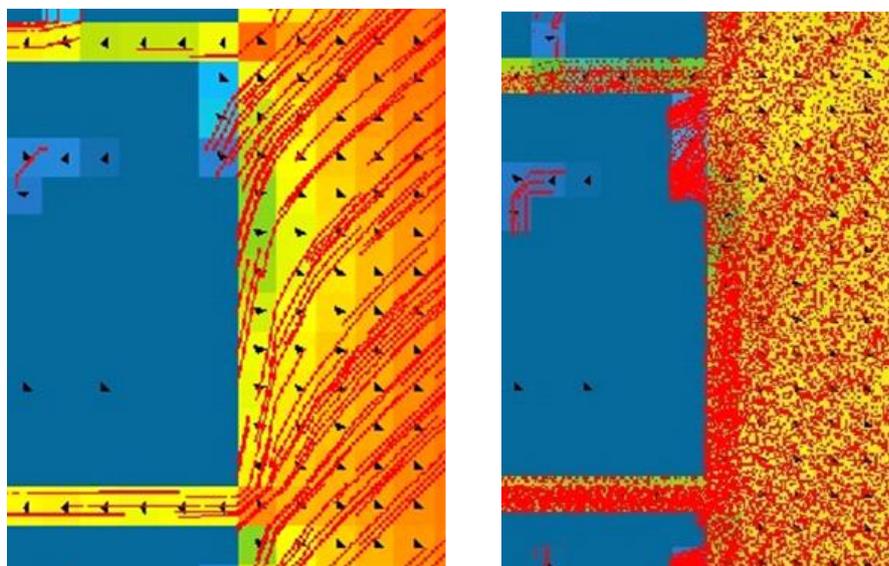
Figura 95 - Zona B : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 96 demonstra a Zona C, onde observa-se que o fluxo de ventos é constante, principalmente próximo à área de vegetação densa. Esse fluxo de ventilação aumenta ainda mais no período menos chuvoso.

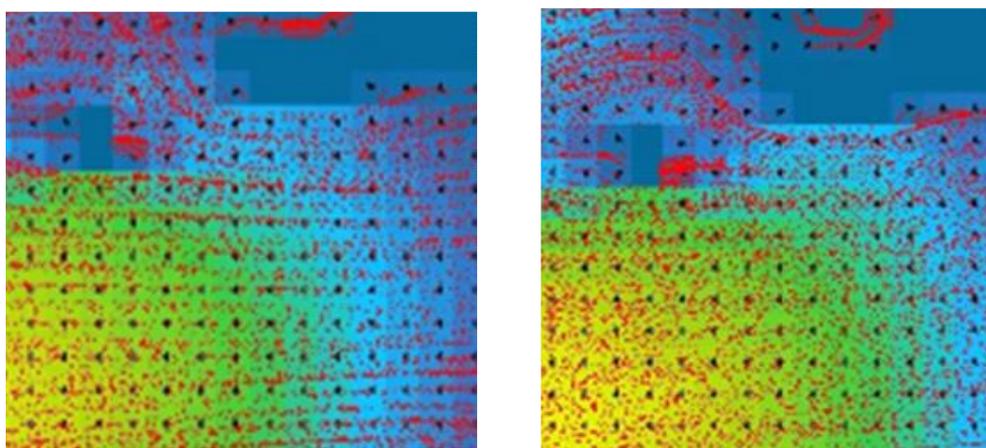
Figura 96 - Zona C : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona D, na sua maior parte, é uma área aberta, classificada como um espaço expansivo (relação H/W), com poucas construções, localizada na beira do rio, sem muitos obstáculos, por esse motivo, conforme demonstra a Figura 97, apresenta fluxo de ventos distribuídos por quase toda a sua extensão, com exceção da área onde estão aglomeradas algumas edificações.

Figura 97 - Zona D : Direção dos ventos - Época mais chuvosa e época menos chuvosa, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.9. Classificação das LCZs Belém

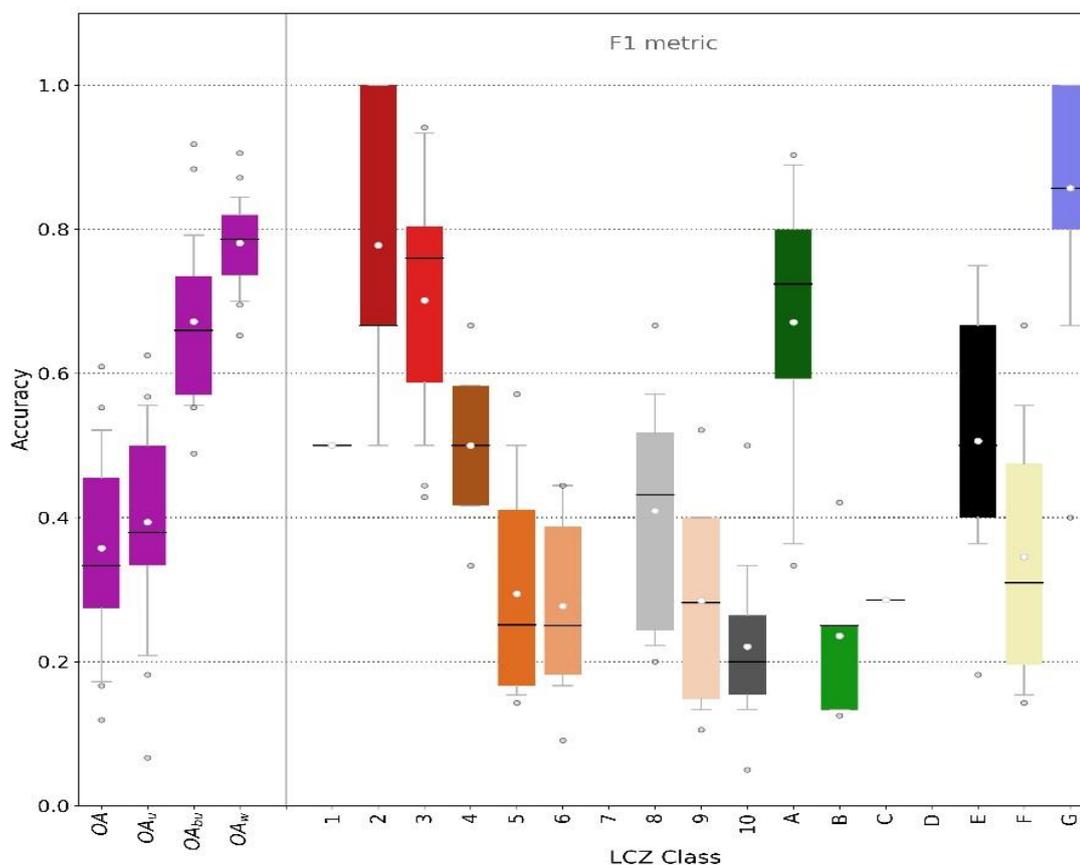
A cidade de Belém possui morfologia urbana heterogênea, o que dificultou a utilização de LCZs puras, contudo, Stewart; Oke (2012) já reconheciam a dificuldade de usar conjuntos padrões de LCZ, sendo praticamente inevitável a utilização de subclassificações. As áreas escolhidas estão locadas em diversos bairros de Belém, pois desta forma, pode-se analisar características urbanas distintas, além de avaliar as transformações urbanas que poderão ser consolidadas a partir do atual Plano Diretor de Belém.

Este trabalho utilizou duas metodologias para a classificação das Zonas Climáticas Locais em Belém, no primeiro momento, a metodologia WUDAPT, esta aplicada a mesoescala; e posteriormente utilizando o método observacional, empregado na escala local, apenas nas áreas escolhidas. Após a obtenção do resultado pelos dois métodos, eles foram comparados.

4.2.9.1. Metodologia WUDAPT

O mapa de precisão é um dos produtos gerados gratuitamente pelo “projeto WUDAPT”, onde pode ser observado que a precisão geral foi de aproximadamente 50%. Ren *et al.* (2016) observaram que as zonas com construções altas e médias mostram baixa acuracidade de detecção em relação às zonas com construções baixas, porém, conforme demonstra a Figura 98, do gráfico de precisão gerado das Zonas Climáticas Locais de Belém, a zona que apresentou maior precisão foi a LCZ 2, talvez, o que explique esse fato seja a grande quantidade de conjuntos habitacionais, que deram homogeneidade às áreas demarcadas para essa zona. Wang; Ren e Lau (2017) em seus estudos, destacaram que estas imprecisões ocorrem principalmente devido à heterogeneidade das cidades, característica observada na cidade de Belém.

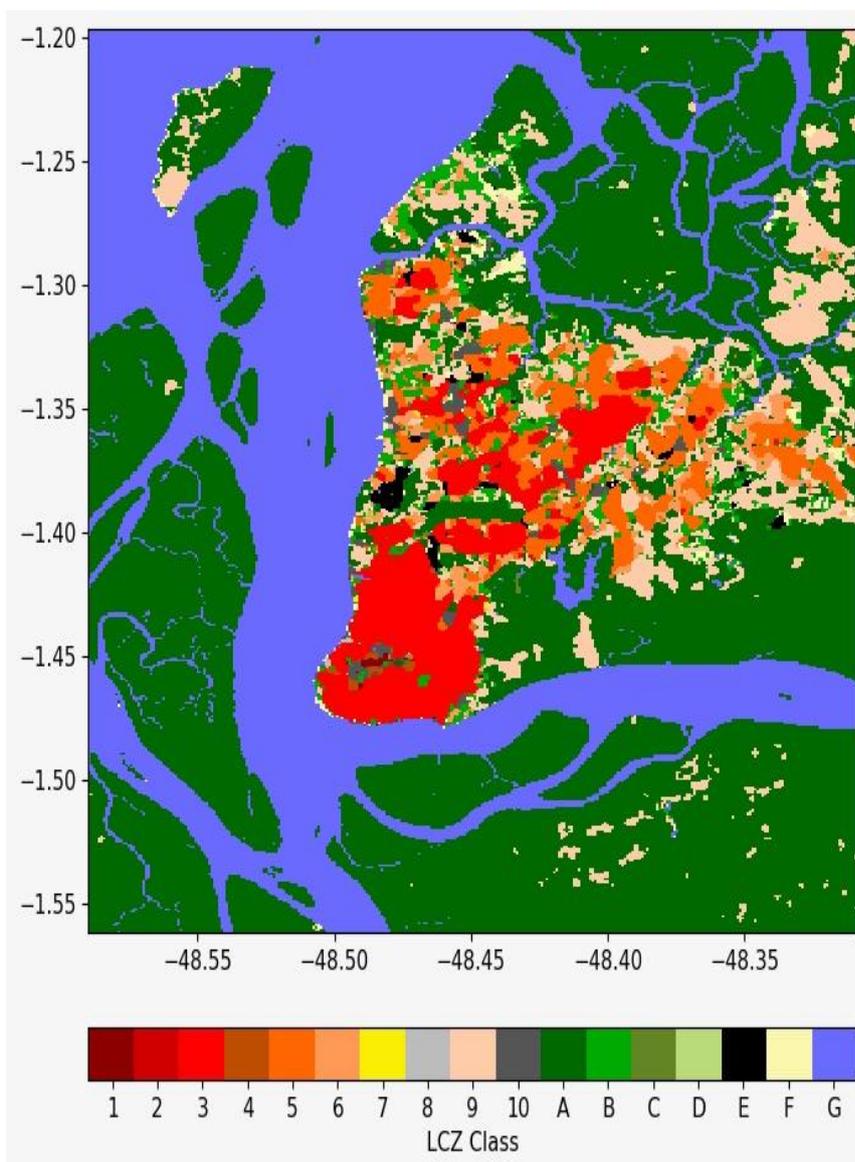
Figura 98 - Gráfico de precisão



Fonte: WUDAPT, 2021

Apesar do Gráfico de precisão apontar a LCZ G com um alto índice de acuracidade, no mapa gerado observou-se que a maior parte das áreas de corpos d'água presentes no interior da cidade não foram detectadas, provavelmente, pelo mesmo motivo do NDWI, onde a coloração das águas dificulta a identificação (MARTINEZ et al., 2009). A figura 99 exibe o mapa gerado (também pertencente ao pacote de produtos gratuitos do “projeto WUDAPT”), este passa uma ideia de que a cidade de Belém apresenta uma grande área homogênea de LCZ 3, porém, isto não ocorre na realidade, visto que, esse tipo de configuração é intercalado com outros padrões, tornando a cidade bastante heterogênea.

Figura 99 - Mapa gerado pelo App Web do WUDAPT



Fonte: WUDAPT, 2021

Ao se analisar o mapa da Figura 99, e compará-lo com a realidade, percebe-se que não corresponde, tanto ao que se refere a padrões construtivos das edificações, quanto à tipo de cobertura de superfície.

4.2.9.2. Metodologia a partir de dados observacionais

Utilizando-se da metodologia de Stewart e Oke (2012), foram preenchidas as 8 fichas. Porém, devido a configuração morfológica heterogênea da cidade de Belém, nenhuma das áreas apresentou LCZ pura, isto é, com apenas um tipo de configuração, inclusive, a maioria apresentou mais de 3 características, divergindo da maior parte dos estudos na área.

A Zona 1 apresenta predominantemente construções baixas, de 1 a 3 pavimentos, cobertura do solo pavimentada, e materiais construtivos em alvenaria, apresenta também alguns edifícios de 4 pavimentos, cercados por área verde. Exibe, ainda, áreas arborizadas, e gramadas (Figura 100).

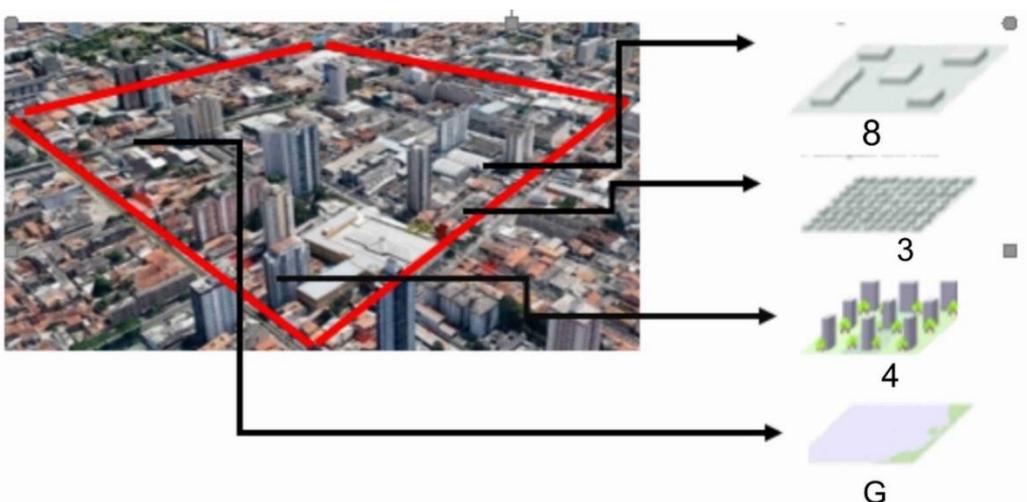
Figura 100 - Características da Zona 1 aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 101 mostra a configuração da Zona 2, com a presença considerável de edifícios grandes (horizontalmente) e baixos, além de construções baixas e densas, com pouco afastamento, e pouca presença de vegetação. Existe também a presença de prédios altos e espaçados. A cobertura do solo é em grande parte pavimentada. A área possui corpos d'água.

Figura 101 - Características da Zona 2 aplicada a LCZ

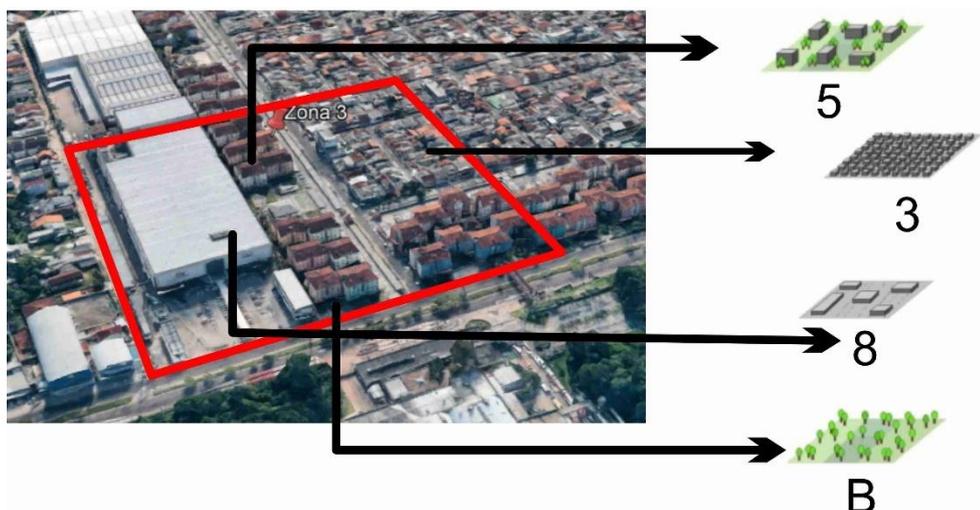


Fonte: Elaborado pela autora.

A Zona 3 apresenta grande diversidade, porém com predominância de construções baixas e compactas. Possui, quase na mesma proporção, construções de 4 pavimentos,

espaçadas, com presença de vegetação. E por fim, como observa-se na Figura 102, exibe uma construção grande e baixa, com materiais construtivos metálicos e alvenaria.

Figura 102 - Características da Zona 3 aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona 4 está localizada em um conjunto habitacional, e é quase homogênea, com construções baixas e densas, porém, apresenta uma pequena área com características diferente, com construções baixas e esparsas, cercada por solo gramado (Figura 103).

Figura 103 - Características da Zona 4 aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 104 apresenta uma grande área de vegetação densa, mesclando com construções grandes e baixas, e construções de altura elevada e espaçadas, essa última categoria é a que mostra maior relevância.

Figura 104 - Características da Zona A aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 105 representa a Zona B, que possui a categoria 6 (construções baixas, espaçadas e com presença de vegetação no entorno) como de maior relevância, apresenta também construções de altura média (4 pavimentos), espaçadas e com presença vegetativa, essas duas categorias estão inseridas dentro de um conjunto habitacional. As construções baixas e densas presentes, estão locadas fora do conjunto habitacional. Por fim, há uma área com presença de vegetação densa, que pertence às forças armadas.

Figura 105 - Características da Zona B aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona C apresenta quase metade de sua área composto por vegetação densa, apresenta, igualmente, construções baixas e densas, e construções térreas de grande dimensão horizontal, essas três categorias são as que apresentam maior relevância na área. (Figura 106)

Figura 106 - Características da Zona C aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona D apresenta um grande terreno com poucas construções, e grande presença arbustiva e solo permeável, se encaixa na categoria 9. Está localizada na margem do rio, logo, também se enquadra na categoria G. Encontram-se na área construções grandes e baixas, configurando galpões. Por fim, apresenta uma pequena área com construções baixas e compactas (Figura 107).

Figura 107 - Características da Zona D aplicada a LCZ



Fonte: Elaborado pela autora

Após o preenchimento das fichas das 8 zonas estudadas, foi gerada uma tabela (Tabela 11) comparativa entre a metodologia observacional e a metodologia WUDAPT. E todas as zonas apresentaram divergências entre si.

Tabela 11 - Comparação entre a metodologia observacional e a metodologia WUDAPT

ÁREA	LCZ Manual	LCZ WUDAPT
ZONA 1	LCZ35B	LCZ3
ZONA 2	LCZ834EG	LCZ348F
ZONA3	LCZ358B	LCZ53BF
ZONA 4	LCZ39	LCZ2945
ZONA A	LCZ48A	LCZ32CB
ZONA B	LCZ635A	LCZ352
ZONA C	LCZ38A	LCZ39A
ZONA D	LCZ938DG	LCZ3F

Fonte: Elaborada pela autora

Entende-se que por se tratar de uma cidade com características altamente heterogêneas, a aplicação do método de Zonas Climáticas Locais, seja pelo método observacional ou pelo método WUDAPT, não é interessante para Belém, pois, por serem zonas com grande diversidade de categorias, não expressaria características que representassem alguma das classes propostas. Desta forma, foi respondido um dos questionamentos dos objetivos específicos, entendendo-se que não é interessante a aplicação de Zonas Climáticas Locais (LCZ) na cidade de Belém.

4.2.10. Medição das Variáveis Microclimáticas no local

As medições das variáveis microclimáticas foram realizadas em todas as zonas em dois períodos (mais chuvoso e menos chuvoso) e dois turnos (tarde e noite), conforme já explanado na metodologia, onde foram obtidos os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Tabela 12), além da obtenção das imagens com as câmeras termais.

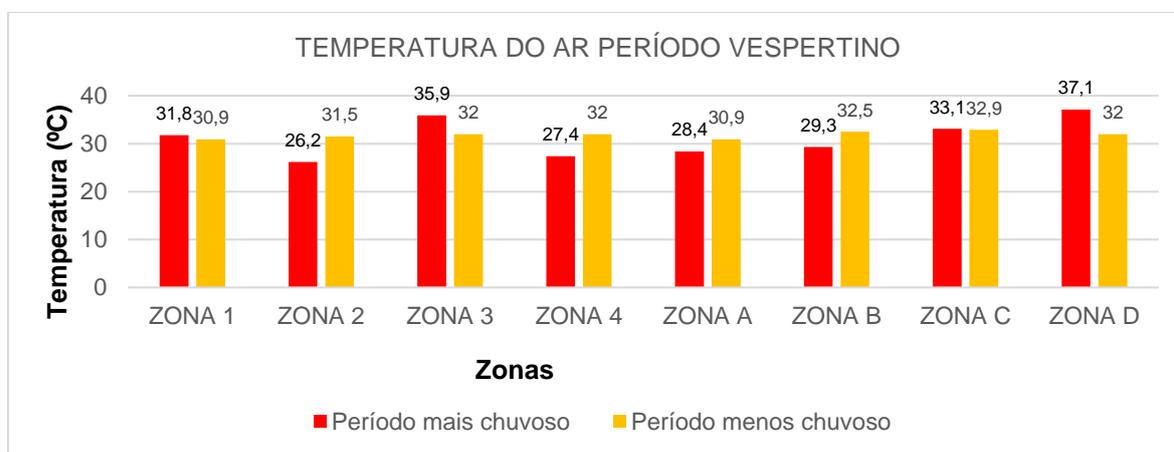
Tabela 12 - Dados obtidos através das medições realizadas “in loco”

ZONA	DATA	HORA	TEMP MÉDIA DO AR	UMIDADE RELAT. DO AR	VELOCID DO VENTO	DATA	HORA	TEMP. MÉDIA DO AR	UMIDADE RELAT. DO AR	VELOCID DO VENTO
1	09/04/2021	14:14	31,8	80	0,0	11/11/2021	14:16	30,9	68	1,4
	09/04/2021	20:42	26,8	99	0,0	11/11/2021	20:30	30,4	74	3,4
2	30/04/2021	14:23	26,2	57	4,3	28/10/2021	14:20	31,5	62	5
	30/04/2021	21:04	27,0	91	0,0	28/10/2021	20:40	26,1	85	2,3
3	04/05/2021	13:38	35,9	57	2,8	04/11/2021	14:00	32	68	6,5
	04/05/2021	20:03	31,7	94	6,6	04/11/2021	21:00	29	75	4,5
4	11/05/2021	13:30	27,4	88	0,0	04/11/2021	13:32	32	62	0,9
	11/05/2021	19:50	27,5	82	0,0	04/11/2021	19:46	30	71	0,6
A	09/04/2021	13:39	28,4	98	0,0	11/11/2021	13:20	30,9	68	2,9
	09/04/2021	21:36	29,2	88	0,0	11/11/2021	21:33	29,3	75	1,7
B	22/04/2021	14:15	29,3	81	0,0	05/11/2021	13:15	32,5	62	1,8
	22/04/2021	19:44	25,1	99	0,0	05/11/2021	19:03	31,5	68	0,0
C	01/05/2021	14:09	33,1	71	0,0	05/11/2021	14:15	32,9	60	1,3
	01/05/2021	21:15	26,1	93	0,0	05/11/2021	19:55	30,4	71	1,0
D	30/04/2021	14:39	27,1	55	3,2	28/10/2021	14:31	32	62	5,0
	30/04/2021	20:54	27,5	88	16,5	28/10/2021	21:02	26	85	4,3

Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 108 apresenta os gráficos comparativos entre as temperaturas do ar medidas durante o turno da tarde. A Zona 2 foi a que apresentou maior variação de temperatura entre o período mais chuvoso e o menos chuvoso, com aumento de 5,3°C, sendo a maior temperatura registrada no período menos chuvoso. As medições vespertinas não apresentaram um padrão. Em alguns casos, a temperatura medida no período mais chuvoso é maior, e em outros casos esse aumento é percebido no período menos chuvoso, e isto acontece tanto nas zonas mais quentes quando nas zonas menos quentes.

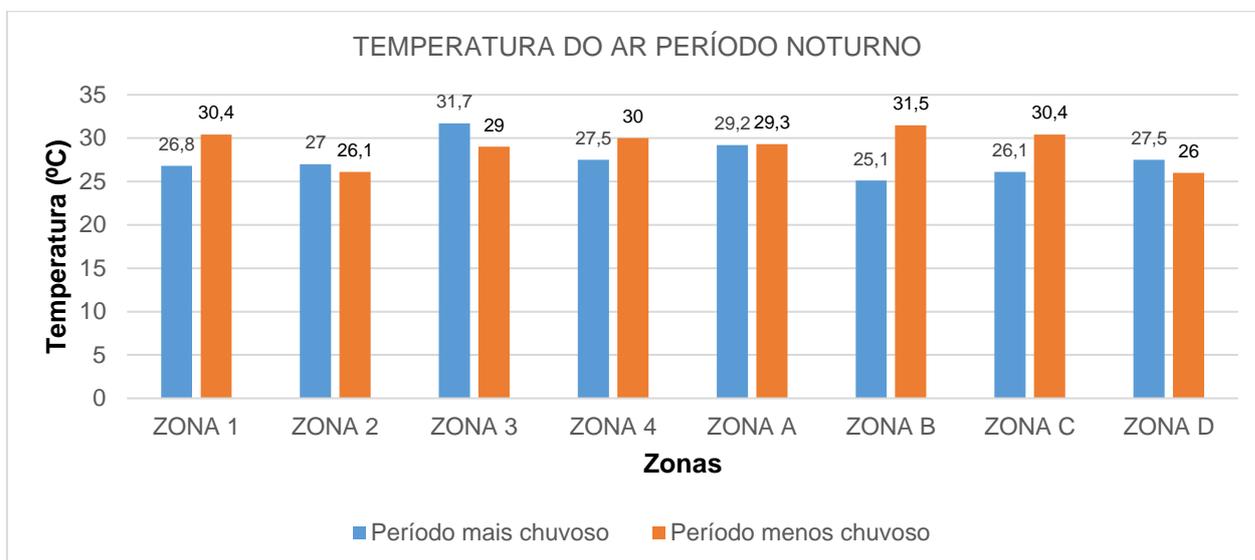
Figura 108 - Gráfico de Temperaturas do ar medidas no turno vespertino



Fonte: Elaborado pela autora

No turno da noite, o observado foi que na maioria das Zonas as medições realizadas no período menos chuvoso apresentaram temperaturas do ar maiores. Sendo a Zona B a que apresenta maior diferença entre os períodos, com aumento de 6,4°C (Figura 109).

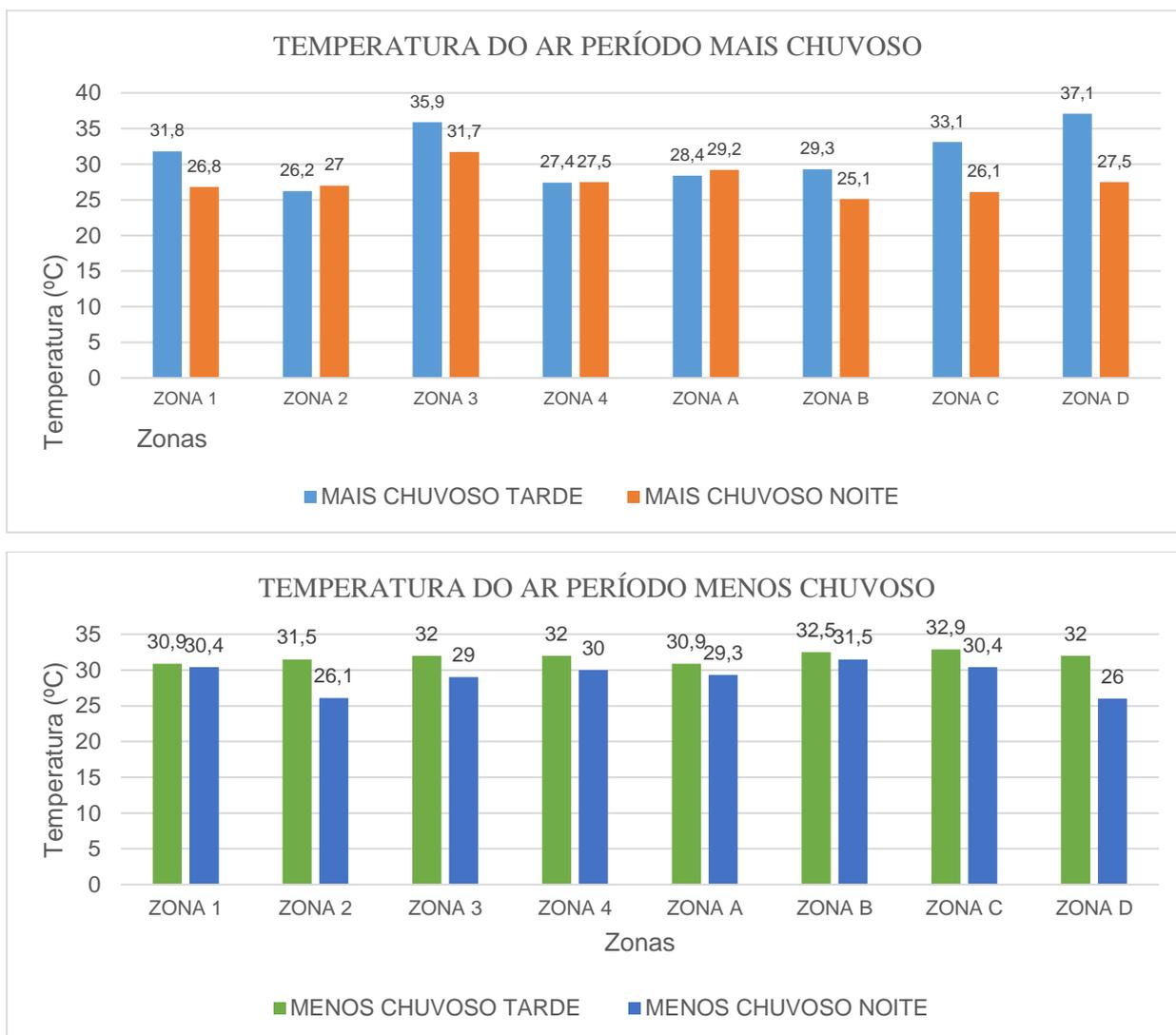
Figura 109 - Gráfico de Temperaturas do ar medidas no turno noturno



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme representado na Figura 110, durante o período mais chuvoso, apenas a Zona 2 e Zona A apresentaram maior temperatura noturna, já no período menos chuvoso, nenhuma zona apresentou maior temperatura no turno da noite, assim, entende-se que a presença de ilhas de calor noturna não pode ser considerada.

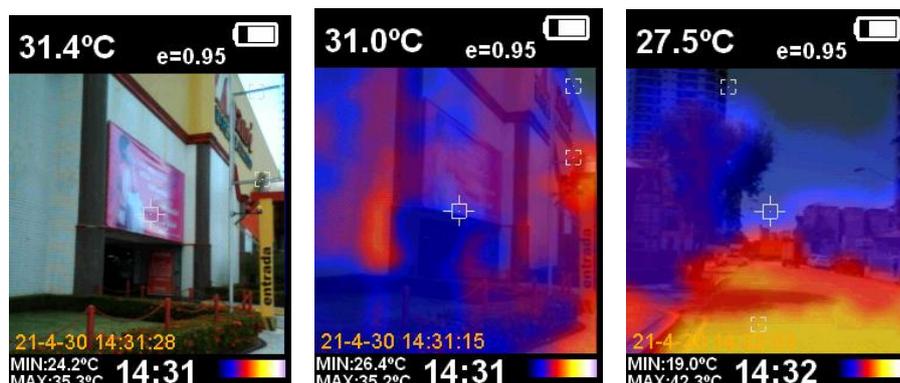
Figura 110 - Comparação das temperaturas do ar nos turnos vespertino e noturno



Fonte: Elaborado pela autora

As fachadas e vias em frente ao ponto de medição de cada zona foram fotografadas com a câmera termal, desta forma, pode-se ter o ponto de vista do pedestre. Através destas imagens é possível obter a temperatura radiante da superfície captada, e perceber a diferença de temperatura entre os diversos materiais de revestimento presentes (Figura 111), mesmo que os registros tenham sido realizados em datas e horários distintos, é possível identificar a relação entre as temperaturas.

Figura 111 - Fachada em frente ao ponto de medição da Zona 2, respectivamente: Fotografia da fachada, imagem termal da fachada, imagem termal da via em frente ao ponto



Fonte: Autora

A imagem obtida na câmera aponta três temperaturas: a menor temperatura, maior temperatura e média das temperaturas dos materiais de revestimento apresentados na fotografia termográfica. Geralmente, essa diferença de temperatura se dá em materiais distintos, como por exemplo, grama e asfalto, mas pode acontecer divergência em um mesmo material, pode-se atribuir isto a alguns fatores, como a insolação que pode ser recebida em apenas uma área de uma fachada com o mesmo material. A Tabela 13 apresenta a temperatura média captada nos dois turnos (tarde e noite), durante o período mais chuvoso e o período menos chuvoso.

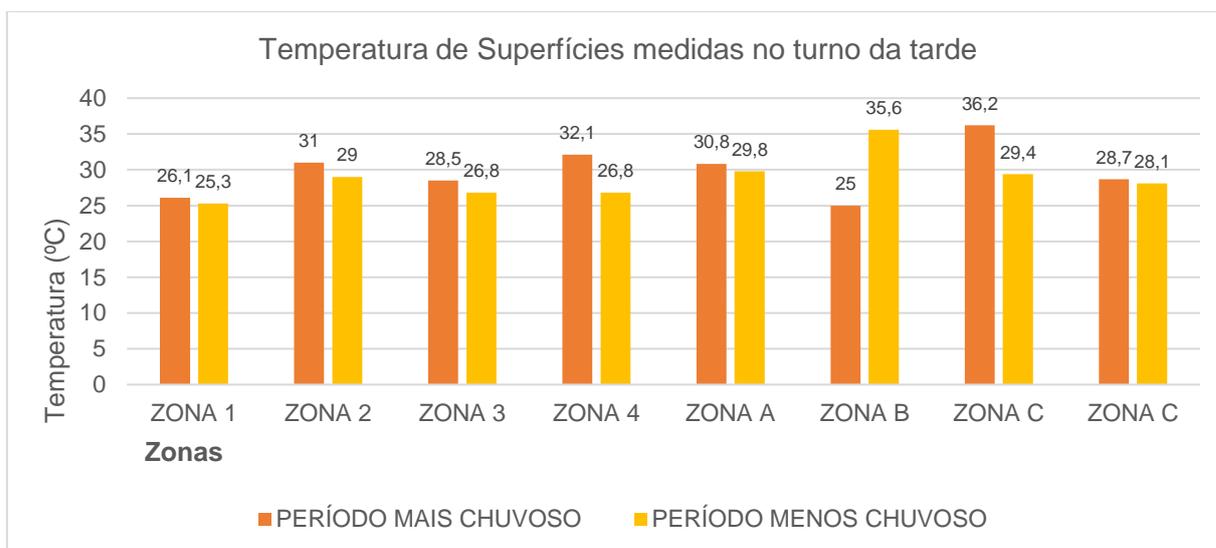
Tabela 13 - Temperaturas médias obtidas a partir da câmera termográfica

ZONA	Data de medição	Hora de medição	Temp. medida pela câmera (°C)	Data de medição	Hora de medição	Temp. medida pela câmera (°C)
ZONA 1	09/04/2021	14:14	26,1	11/11/2021	14:16	25,3
	09/04/2021	20:42	29,8	11/11/2021	20:30	25
ZONA 2	30/04/2021	14:23	31	28/10/2021	14:20	29
	30/04/2021	21:04	25,3	28/10/2021	20:40	25
ZONA3	04/05/2021	13:38	28,5	04/11/2021	14:00	26,8
	04/05/2021	20:03	25,3	04/11/2021	21:00	26,3
ZONA 4	11/05/2021	13:30	32,1	04/11/2021	13:32	26,8
	11/05/2021	19:50	27,8	04/11/2021	19:46	29,5
ZONA A	09/04/2021	13:39	30,8	11/11/2021	13:20	29,8
	09/04/2021	21:36	26,6	11/11/2021	21:33	26,9
ZONA B	22/04/2021	14:15	25	05/11/2021	13:15	35,6
	22/04/2021	19:44	24,2	05/11/2021	19:03	26,1
ZONA C	01/05/2021	14:09	36,2	05/11/2021	14:15	29,4
	01/05/2021	21:15	26,7	05/11/2021	19:55	26
ZONA D	30/04/2021	14:39	28,7	28/10/2021	14:31	28,1
	30/04/2021	20:54	20,6	28/10/2021	21:02	23

Fonte: Elaborado pela autora

Analisando os dados obtidos com a câmera termal, em relação ao turno da tarde, a temperatura média da superfície que apresentou maior variação foi a Zona B, com o aumento de 10°C, acredita-se que o principal motivo seja a insolação que a fachada recebe, com maior incidência solar. Já a Zona onde apresenta menor variação é a Zona D, correspondendo a menos de 1°C de aumento. Todas as Zonas apresentaram maior temperatura de superfície durante o período mais chuvoso, com exceção da Zona C, onde a temperatura se apresenta maior no período menos chuvoso, com aumento de 10,6°C (Figura 112).

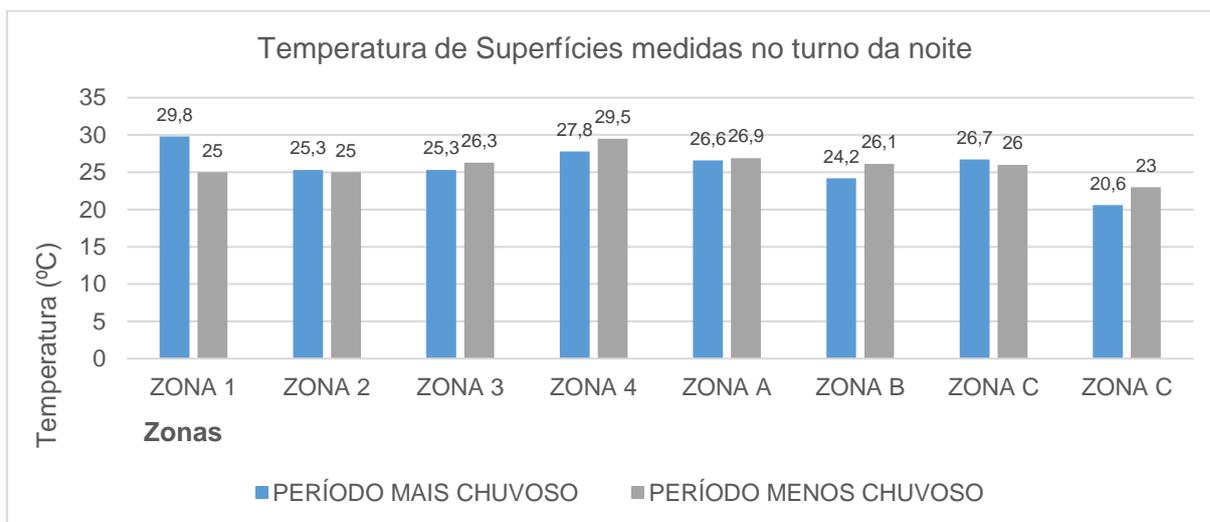
Figura 112 - Gráfico com as Temperatura de Superfícies medidas no turno da tarde



Fonte: Elaborado pela autora

No período noturno a maior diferença de temperatura está na Zona 1, onde o período mais chuvoso apresenta 4,8°C a mais do que o período menos chuvoso. Nas outras Zonas a diferença de temperatura entre os períodos foi pequena, com exceção da Zona D que apresentou 2,4°C a mais no período menos chuvoso (Figura 113).

Figura 113 - Gráfico com as Temperatura de Superfícies medidas no turno da noite

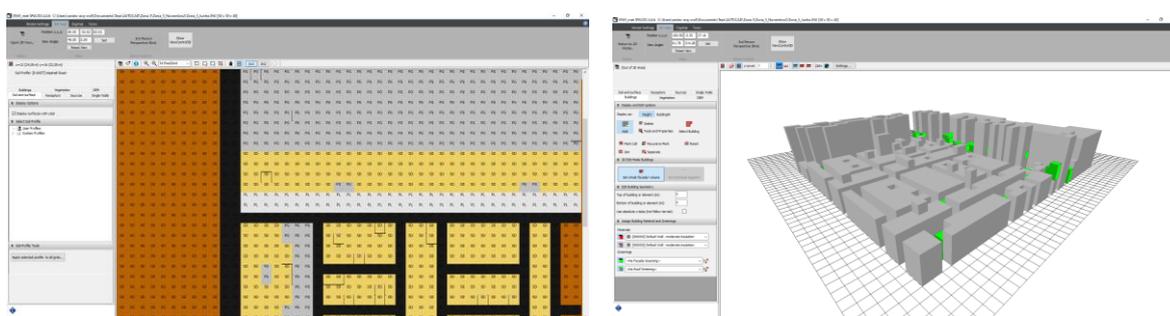


Fonte: Elaborado pela autora

4.3. SIMULAÇÃO ENVI-MET

Para a modelagem, foram obtidas imagens no formato bitmap que serviram de base, essas imagens foram adquiridas do Google Earth gratuitamente. Por cima delas deu-se a modelagem por meio do *Space*, recurso que faz parte do pacote de aplicativos do ENVI-met, onde foram configurados os cenários a partir de dados mais próximos ao real, com a inserção do tipo de materiais de superfície, construções (com as alturas equivalentes a real) e vegetação (Figura 114).

Figura 114 - Modelagem do cenário no aplicativo SPACES

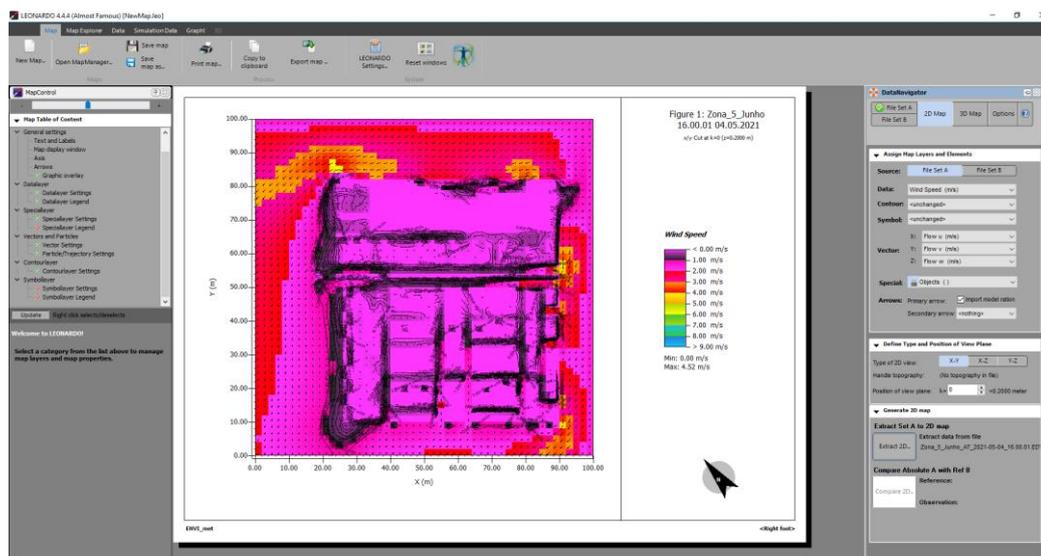


Fonte: Elaborado pela autora

A etapa seguinte é a configuração climática, realizada no aplicativo ENVI-guide, onde serão inseridos os dados de entrada de cada zona, nos dois períodos medidos (sendo, simulações em separado): hora inicial, data, quantidade de horas de simulação, velocidade do vento (m/s), direção do vento (graus), umidade, rugosidade, temperatura.

Após a configuração dos dados, o programa faz a simulação através do aplicativo ENVI-core, essa fase é demorada, levando em média 24 horas para ser concluída. Nessa etapa, são gerados arquivos com a extensão *.edt* e *.edx*. Inicialmente, utilizou-se a versão mais recente do ENVI-met, o ENVI-met 5, porém, ao iniciar o processo de simulação, algumas zonas apresentaram erro, assim, optou-se por simular na versão anterior (ENVI-met 4), onde, obteve-se sucesso. Por fim, os mapas foram gerados através do software Leonardo (Figura 115).

Figura 115 - Geração de mapas no Leonardo



Fonte: Elaborado pela autora

Para esta pesquisa foram gerados os mapas de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (m/s) e umidade relativa (%). Sendo produzidos mapas para todas as Zonas, nos dois períodos e dois turnos, no total de 96 mapas.

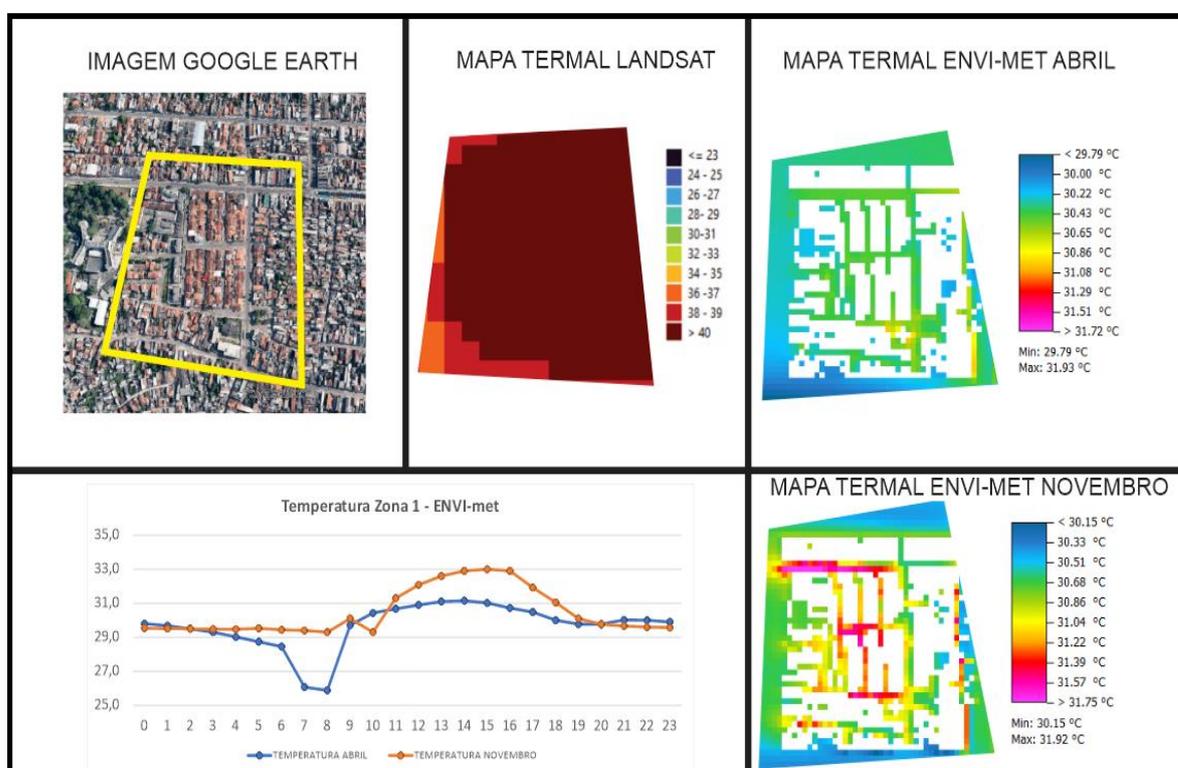
4.4. ANÁLISE COMPARATIVA TERMAL

Neste subcapítulo será realizada a análise termal de cada Zona. A partir de uma ficha que apresenta as seguintes informações: a) imagem via satélite da Zona, obtida pelo mapa de calor (Landsat 8); b) mapa termal obtido através da simulação pelo ENVI-met (hora da simulação às 10:00h, hora aproximada da captura da imagem termal pelo Landsat 8); c) gráfico de temperatura ao longo do dia, a partir dos dados obtidos pelo ENVI-met (temperatura de maior incidência de chuva e temperatura de menor incidência de chuva).

A Zona 1 está localizada no bairro do Guamá, onde predominam habitações de até 2 pavimentos, o mapa termal, a partir da imagem Landsat, exhibe temperaturas elevadas, onde a maior parte da área apresenta mais de 40°C , ainda sobre este mapa, as áreas com menores

temperaturas estão localizadas no limite esquerdo da zona, variando de 36°C a 39°C. Em relação ao mapa termal a partir da simulação ENVI-met, a maior temperatura observada é de 31,93 °C, no período mais chuvoso e 31,92°C no período menos chuvoso, porém, assim como o Mapa termal Landsat, também apresenta como áreas de menor temperatura as localizadas no limite esquerdo da zona, com mínima de 29,79°C no período mais chuvoso e 30,15°C no período menos chuvoso. Segundo o gráfico apresentado na Figura 116, com as medições horárias de temperatura (simulação ENVI-met), o período menos chuvoso apresenta maiores temperaturas ao longo do dia, com exceção da temperatura às 10h da manhã.

Figura 116 - Campo Térmico Zona 1

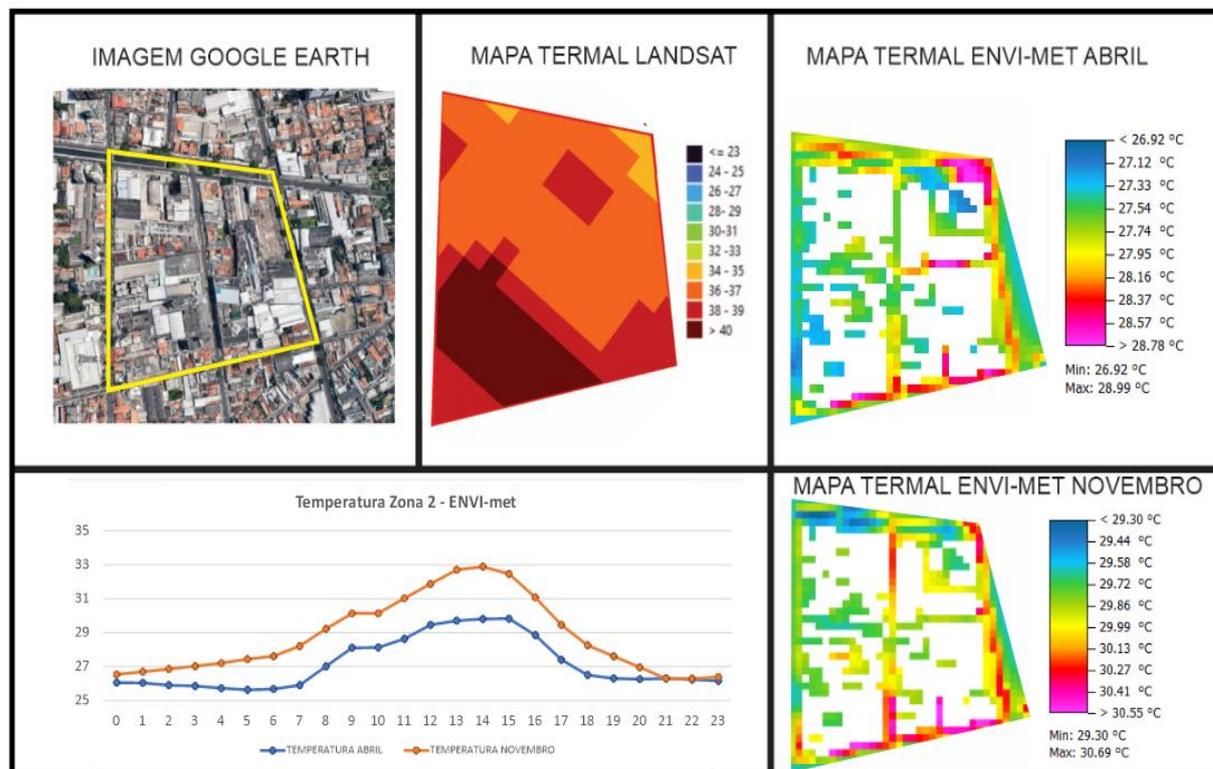


Fonte: Elaborado pela autora

A Zona 2 apresenta uma ilha de calor quase ao centro de sua área, com máxima de 40°C, segundo o mapa Landsat, e apresenta menores temperaturas no limite superior direito, com mínima de 34 °C. O Mapa termal ENVI-met do período mais chuvoso apresenta máxima de 28,99 °C, em vários pontos da zona, inclusive, no limite lateral superior direito (mesmo ponto que no Mapa Landsat se apresenta como menos quente), em relação a menores temperaturas, a apresentada é de 26,92°C. O Mapa termal ENVI-met apresenta máxima de 30,69°C, com áreas críticas no limite inferior da zona, com temperatura mínima de 29,30°C. Em

relação ao gráfico de temperatura, ao longo do dia a temperatura do período de menor incidência de chuva é quando apresenta maiores temperaturas (Figura 117).

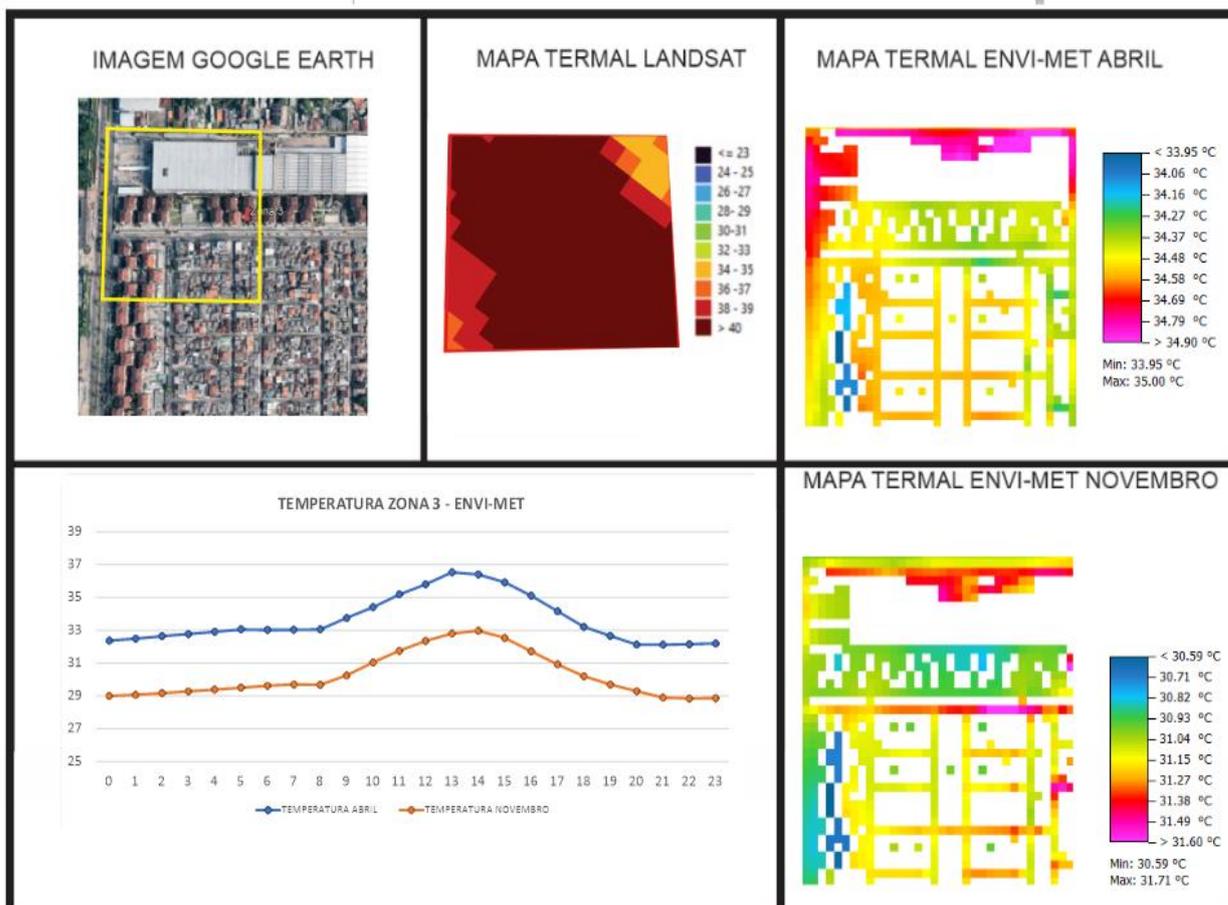
Figura 117 - Campo Térmico Zona 2



Fonte: Elaborado pela autora

O mapa de temperatura de superfície gerado a partir da imagem Landsat apresenta o pico de calor na diagonal da Zona 3, com 40°C, e como ponto de menor temperatura o ponto superior direito, com 34°C. No Mapa termal ENVI-met do período mais chuvoso o ponto mais quente está no limite superior da área, apresentando máxima de 35°C, a área de menor temperatura exibe 33,95°C; já o Mapa termal ENVI-met do período menos chuvoso, apresenta ponto máximo de calor também na área superior da zona, porém não no limite, com máxima de 31,71°C, e mínima de 30,59°C. O gráfico de temperatura, conforme fornece a Figura 118 expõe que ao longo do dia a temperatura do período mais chuvoso é o de maior temperatura.

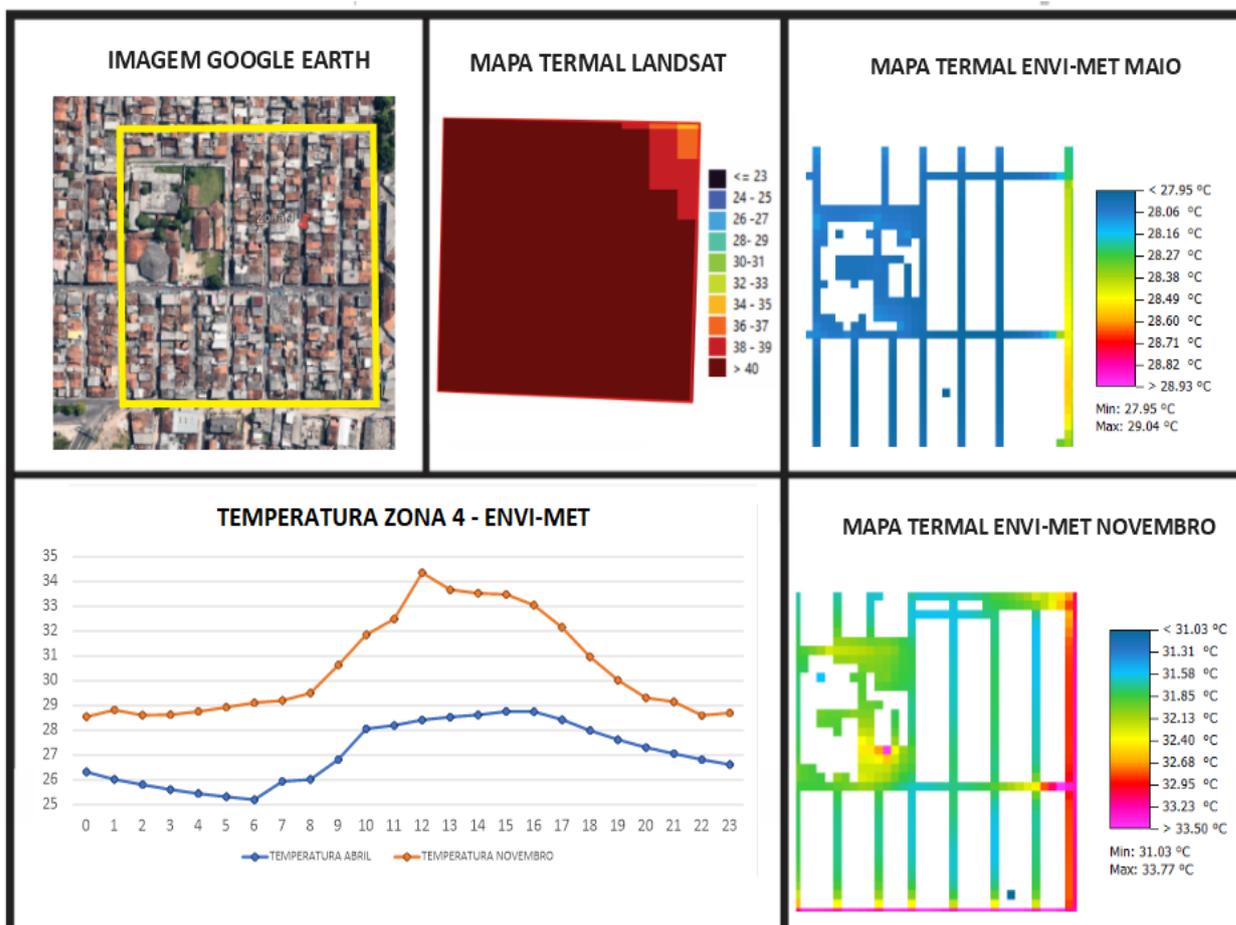
Figura 118 - Campo Térmico Zona 3



Fonte: Elaborado pela autora

Na Zona 4, o Mapa Termal Landsat apresenta em quase toda a sua área temperaturas maiores do que 40°C. A área com menor temperatura está localizada no limite superior direito, apresentando 34°C. No Mapa Termal ENVI-met do período mais chuvoso a maior parte da área apresenta temperatura de 28,08°C, tendo um aumento de temperatura no limite inferior direito, chegando à máxima de 28,60°C. Já no período menos chuvoso, o Mapa Termal ENVI-met apresenta um mapa mais heterogêneo, tendo máxima de 33,77°C no limite direito da Zona, E mínima de 31,03°C. No gráfico de temperatura apresentado na Figura 119, percebe-se que no período menos chuvoso, durante todo o dia, exibem maiores temperaturas do que o período mais chuvoso.

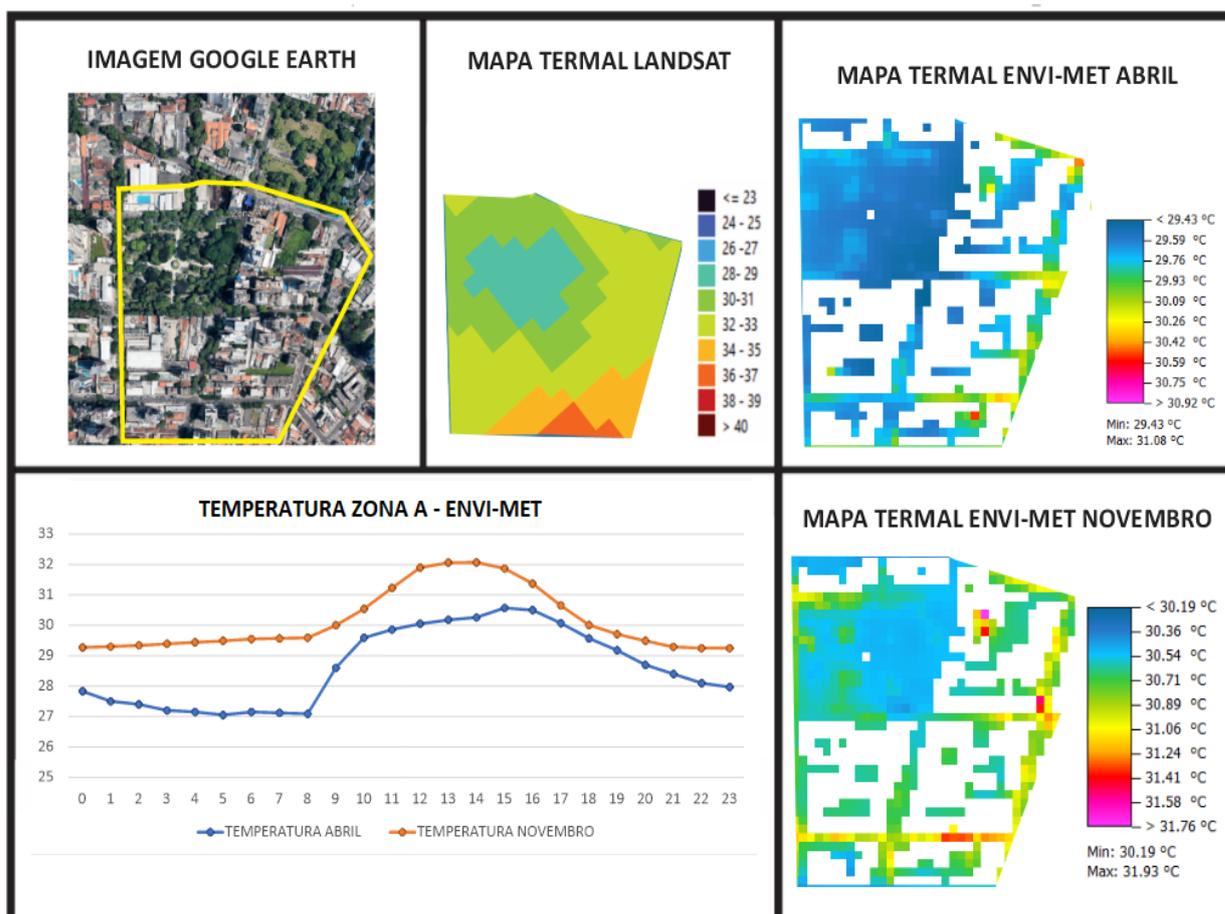
Figura 119 - Campo Térmico Zona 4



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 120 apresenta a Zona A, onde o Mapa Termal Landsat apresenta “vale” de menor temperatura com 28°C, e ponto de maior temperatura de 36°C, este localizado no limite inferior da zona. Já o Mapa Termal simulado no ENVI-met apresenta menor temperatura de 29,43°C, e pequenos pontos com temperatura máxima de 30,75°C, isto no período mais chuvoso. No período menos chuvoso, a temperatura mínima é de 30,19°C e a máxima de 31,41°C. Nos três mapas termais apresentados o ponto de menor temperatura está no mesmo lugar. O Gráfico de temperatura mostra que ao longo do dia a temperatura é sempre mais elevada durante o período menos chuvoso.

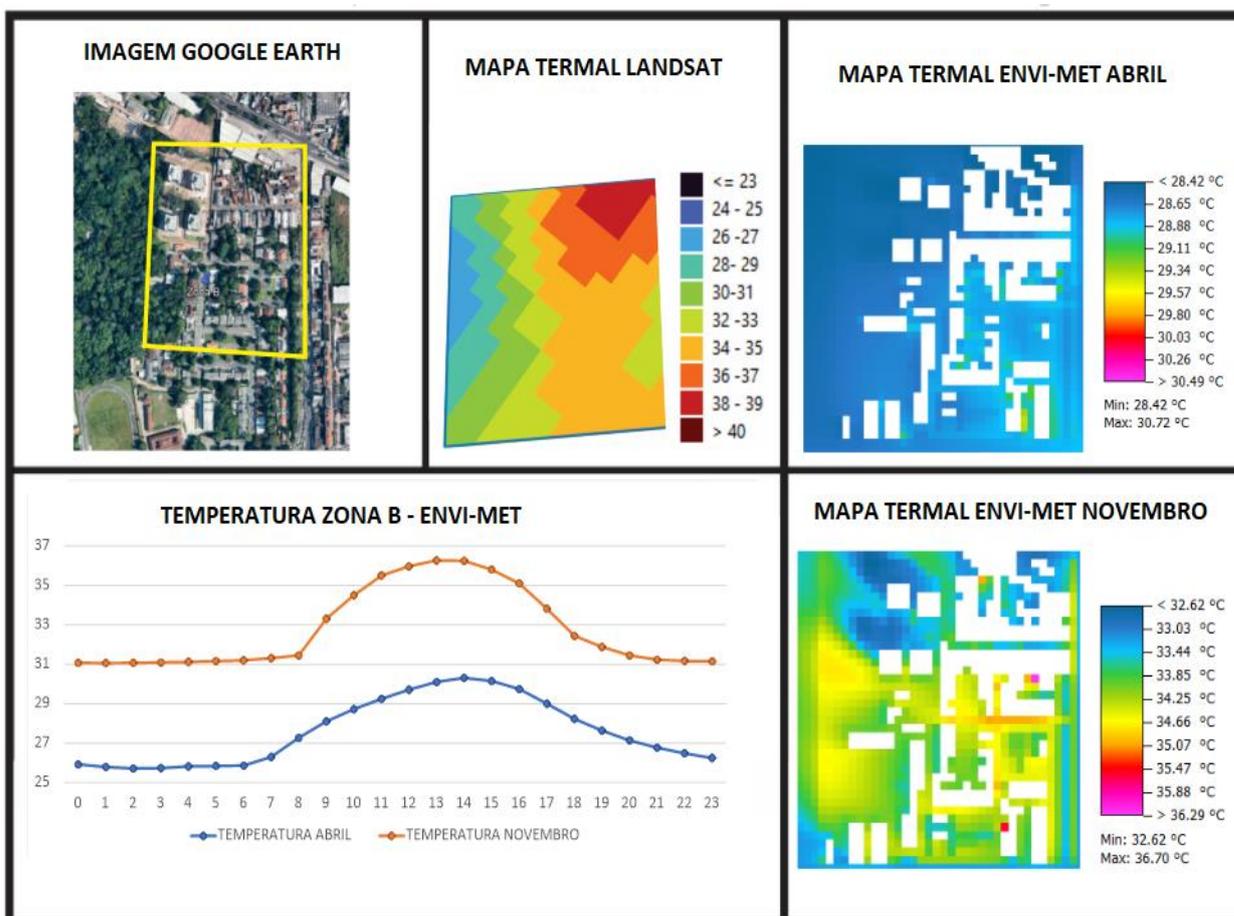
Figura 120 - Campo Térmico Zona A



Fonte: Elaborado pela autora

A Zona B, no Mapa termal Landsat, apresenta uma ilha de calor com temperatura de 38°C, locado na área com maior densidade construtiva, e vale (menor temperatura) de 26°C, na área de vegetação densa. Já o mapa termal ENVI-met do período mais chuvoso apresentou homogeneidade com mínima de 28,65°C e máxima de 29,11°C. E no mapa termal ENVI-met do período menos chuvoso ocorreram alguns pontos de vale com temperatura mínima de 32,67°C e pequeno pontos de temperatura máxima de 36,70°C. Já o gráfico de temperatura apresentou em média durante o dia 4°C a mais durante o período menos chuvoso em relação ao mais chuvoso (Figura 121).

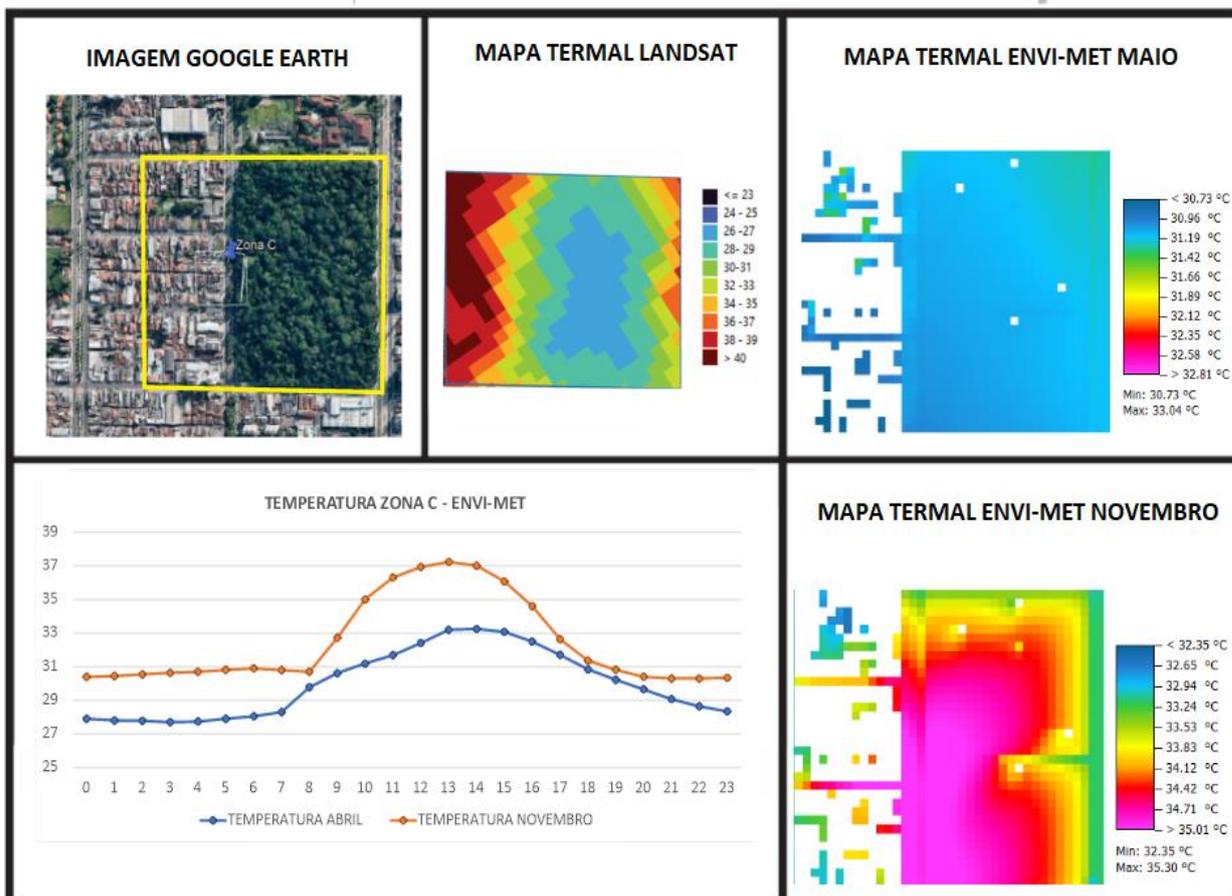
Figura 121 - Campo Térmico Zona B



Fonte: elaborado pela autora

O mapa termal Landsat da Zona C apresenta vale de temperatura localizado na área de vegetação densa, com mínima de 26°C, e máxima de 40°C localizada no limite esquerdo da zona. O mapa termal ENVI-met do período mais chuvoso apresentou homogeneidade, com mínimas de 30,73°C e máximas de 31,42°C. Em relação ao Mapa Termal ENVI-met do período menos chuvoso, existe uma ilha de calor com máxima de 35,30°C e mínima de 32,35°C. Sobre o gráfico de temperatura, a temperatura do período menos chuvoso se apresenta superior durante todo o dia (Figura 122).

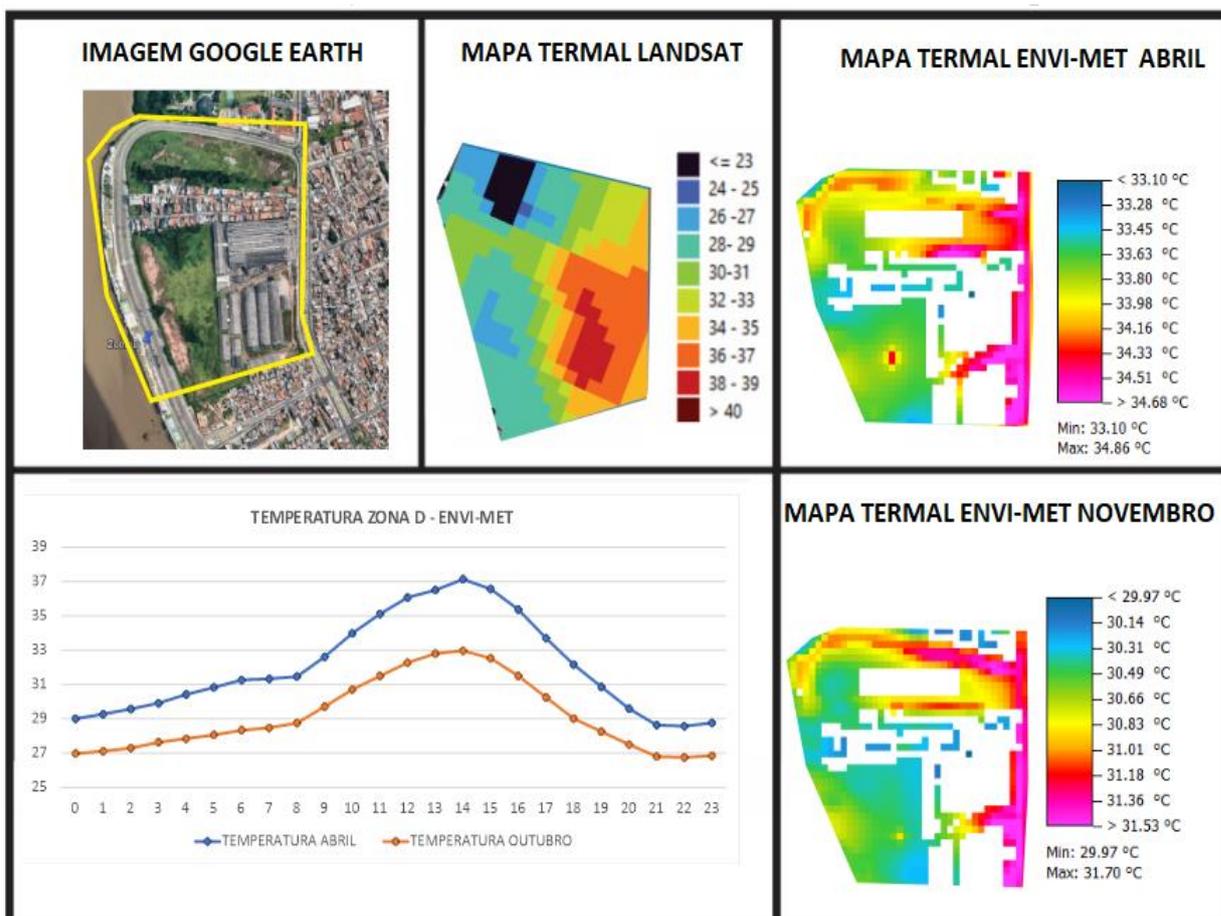
Figura 122 - Campo Térmico Zona C



Fonte: Elaborado pela autora

O Mapa Termal Landsat da Zona D apresenta ilha de calor com pico em 38°C e vale de 23°C. O pico de ilha de calor está localizado na área de galpões, com extensa cobertura de telha metálica (ou fibrocimento). No Mapa termal ENVI-met do período menos chuvoso, a área de maior temperatura também está onde existem os galpões, e apresenta temperatura máxima de 34,86°C. A temperatura mínima é de 33,45°C e está localizada próximo a orla, onde recebe ventilação sem obstáculos. O mesmo se repete no mapa termal ENVI-met do período de menor temperatura, porém com maior temperatura de 31,70°C, e menor temperatura de 29,97°C. O gráfico de temperatura apresenta maiores temperaturas ao longo do dia durante o período mais chuvoso (Figura 123).

Figura 123 - Campo Térmico Zona D



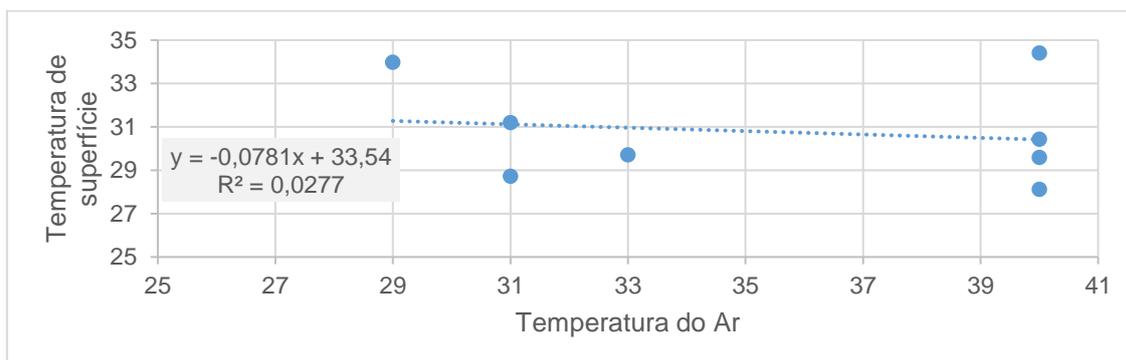
Fonte: Elaborada pela autora

4.5. ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE VARIÁVEIS

Nessa etapa foram analisadas as correlações individuais entre variáveis microclimáticas, a relação H/W/L, FVC, cobertura verde (CV), relação cobertura permeável, albedo do material mais relevante e porosidade.

A primeira correlação a ser realizada é a entre a Temperatura de superfície (Ts) e a Temperatura do ar (Ta). Considerou-se como Temperatura de Superfície (Ts), o mapa termal obtido a partir da imagem Landsat 8, e para a Temperatura do Ar (Ta) foi considerada a temperatura obtida através do mapa termal executado no ENVI-met, considerou-se a hora de simulação, às 10 horas da manhã, e o período mais chuvoso, para que fique o mais próximo aos dados das imagens obtidas pelo Landsat. Em ambos os casos, o ponto avaliado é o do receptor (onde houve a medição). A correlação obtida (Figura 124) entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar é negativa e bem fraca ($R = -0,16$).

Figura 124 - Correlação entre Temperaturas de superfície x Temperatura do ar



Fonte: Elaborado pela autora

Ainda em relação a comparação entre temperatura do ar (T_a) e temperatura de superfície (T_s) (Tabela 14), considerando a temperatura média detectada pela câmera termal, apenas a correlação entre temperatura do ar e temperatura de superfície medida no período mais chuvoso no turno da noite apresentou correlação positiva, sendo $R = 0,55$, ou seja, correlação moderada. Isso significa que, moderadamente, quanto maior a temperatura de superfície, maior será a temperatura do ar. No período menos chuvoso, turno da noite, e no período mais chuvoso, turno vespertino a correlação é negativa e fraca. E no período mais chuvoso, turno da tarde, a correlação é negativa e bem fraca.

Tabela 14 - Temperatura de superfície captada pela câmera termal, e temperatura do ar captada pelo termohigrometro

ZONA	Tarde				Noite			
	Período mais chuvoso		Período menos chuvoso		Período mais chuvoso		Período menos chuvoso	
	T_s (°C)	T_a (°C)	T_s (°C)	T_a (°C)	T_s (°C)	T_a (°C)	T_s (°C)	T_a (°C)
ZONA 1	26,1	31,8	29,8	30,9	25,3	26,8	25	30,4
ZONA 2	31	26,2	25,3	31,5	29	27	25	26,1
ZONA 3	28,5	35,9	25,3	32	26,8	31,7	26,3	29
ZONA 4	32,1	27,4	27,8	32	26,8	27,5	29,5	30
ZONA A	30,8	28,4	26,6	30,9	29,8	29,2	26,9	29,3
ZONA B	25	29,3	24,2	32,5	35,6	25,1	26,1	31,5
ZONA C	36,2	33,1	26,7	32,9	29,4	26,1	26	30,4
ZONA D	28,7	27,1	20,6	32	28,1	37,5	23	26
R	-0,000950309		-0,373941792		-0,328929857		0,553014814	

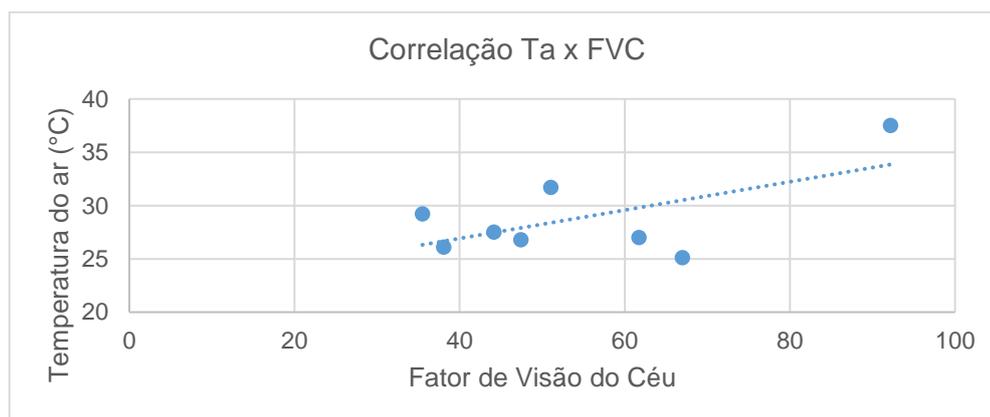
Fonte: Elaborado pela autora

Apesar de muitos autores citarem a umidade como fator diretamente influenciador na temperatura do ar, no caso das medições realizadas para esta pesquisa, o que se demonstrou foi o inverso, pois, cada situação apresentou um resultado diferente, sendo resultado mais

aproximado de 1 ou -1 a medição realizada no período menos chuvoso, turno da noite, tendo $R=-0,98$, ou seja, correlação negativa e muito forte, onde, quanto maior a umidade, menor será a temperatura, diferente do que foi encontrado por Romero et al. (2019), que notaram que quanto maior a temperatura, menor é a umidade. Em todos os outros casos, a correlação se apresentou bem fraca.

Em relação ao FVC (Fator de Visão do Céu), foi feita a correlação das 8 zonas com as temperaturas medidas nos períodos mais chuvosos e menos chuvosos, no turno vespertino e noturno. As medições realizadas no período mais chuvoso e no turno da noite foram as que apresentaram o coeficiente de correlação mais favorável, com $R= 0,61$, apresentando correlação moderada, e positiva, sinalizando que quanto maior o fator de visão do céu, maior será a temperatura do ar (Figura 125), resultado diferente do que constataram alguns autores (SOUZA et al., 2010 : MEGDA, 2020). A correlação FVC x Ta do período menos chuvoso, turno da noite, também apresentou correlação negativa e fraca. O período mais chuvoso e vespertino apresentou correlação negativa e fraca, e o período menos chuvoso, turno da noite, apresentou correlação negativa e moderada. Percebe-se que cada medição apresentou resultado diferente, neste caso, entende-se que o Fator de Visão do Céu, isoladamente, não pode ser uma variável que influencie diretamente na temperatura do ar (Ta). Porém, se forem analisadas as zonas em separado, observa-se que o FVC possui influência na Temperatura do ar, com correlação negativa de moderada a forte.

Figura 125 - Correlação linear de Pearson entre Ta x FVC (período mais chuvoso noturno)



Fonte: Elaborado pela autora

Com a correlação W/H/L, cada medição apresentou resultado distinto um do outro, tendo resultado semelhante a correlação entre o fator W/H x Ta, tendo como melhor resultado o período menos chuvoso (Tabela 15), com $R= 0,84$, apresentando correlação positiva forte. No trabalho de Megda (2020) verificou-se baixa correlação entre o fator H/W e as ilhas de calor

urbanas, situação semelhante ao que ocorreu no período mais chuvoso, tanto no turno vespertino quanto noturno ($R = -0,33$ e $R = 0,13$, respectivamente). Parecido ao que aconteceu com a correlação $T_a \times FVC$, a correlação $W/H/L \times T_a$ e $W/H \times T_a$ também não apresentaram resultados relacionados entre si, logo, não são variáveis que interferem isoladamente na temperatura do ar, o que significa que necessitam de outras variáveis agindo em conjunto. Em relação a correlação entre os fatores $W/H/L$ e W/H , mostrou-se positiva e forte, apresentando $R = 0,86$. Assim, quanto maior o fator $W/H/L$, maior será o fator W/H .

Tabela 15 - Correlação linear de Pearson entre $W/H \times T_a$

ZONA	WH	Dia		Noite	
		Temperatura do ar mais chuvoso (°C)	Temperatura do ar menos chuvoso (°C)	Temperatura do ar mais chuvoso (°C)	Temperatura do ar menos chuvoso (°C)
1	1,4	31,8	30,9	26,8	30,4
2	1,8	26,2	31,5	27	26,1
3	1,6	35,9	32	31,7	29
4	0,75	27,4	32	27,5	30
A	0,41667	28,4	30,9	29,2	29,3
B	3,5	29,3	32,5	25,1	31,5
C	1,2	33,1	32,9	26,1	30,4
D	26,6667	27,1	32	37,5	26
	R	-0,32967865	0,135239	0,83634	-0,59478

Fonte: Elaborado pela autora

Analisando as Zonas em separado, através do gráfico de dispersão, tanto o fator W/H , quanto o fator $W/H/L$ apresentam correlação positiva e moderada, com exceção da Zona D quando considerado o coeficiente W/H , este apresentou correlação fraca, como demonstra a tabela 16, provavelmente, fato que se deve ao Fator W/H ser muito maior do que as outras Zonas. De maneira geral, excluindo a análise da Zona D em relação ao fator W/H (que pode ser considerado um outlier), pode-se supor que quanto maior o fator W/H ou $W/H/L$, maior será a temperatura, e como não houve variação entre as zonas mais quentes e menos quentes, entende-

se que esse fator isoladamente não influencia a formação de Ilha de Calor Urbanas na cidade de Belém.

Tabela 16 - Coeficiente de correlação das Zonas individualmente

ZONA	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO	
	W/H	W/H/L
ZONA 1	R= 64	R= 65
ZONA 2	R= 66	R= 66
ZONA 3	R= 57	R= 58
ZONA 4	R= 72	R= 71
ZONA A	R= 71	R= 70
ZONA B	R= 68	R= 68
ZONA C	R= 60	R= 61
ZONA D	R= 28	R= 69

Fonte: Elaborado pela autora

Tratando-se da análise de fração superfície construída, levando em consideração a porcentagem de área permeável, o melhor resultado apresentado, foi o coeficiente de correlação das medições realizadas no período menos chuvoso e no turno da noite, com $R= 0,64$. Os outros casos não apresentaram resultados satisfatórios e nem coerentes, pois cada caso apresentou um resultado diferente. Em relação a análise individual de cada zona através do gráfico de dispersão, as Zonas mais quentes apresentaram resultado positivo e moderado, onde, quanto maior a área permeável, maior será a temperatura. Já as zonas menos quentes apresentaram correlação negativa, tendo a Zona A exibindo correlação bem fraca, Zonas B e C correlações forte, e Zona D correlação fraca. Assim, entende-se que apenas as Zonas B e C podem ser relevadas, e apresentam menores temperaturas em áreas mais permeáveis.

Considerando a porcentagem de área construída, a que apresentou o R mais próximo de -1 ou 1 foram as medições realizadas no período mais chuvoso e no turno da noite, sendo $R= -0,57$, correlação negativa e moderada. Neste caso, como se pode observar, a correlação poderá variar por outros fatores, não tendo como determinar precisamente a correlação entre a superfície construída e a Temperatura do ar (Quadro 7).

Quadro 6 - Correlações Área permeável x Ta e Área Construída x Ta

	Mais chuvoso / Tarde		Mais chuvoso / Noite		Menos chuvoso / Tarde		Menos chuvoso / Noite	
Área permeável X Temperatura do ar	Negativa	Bem Fraca	Negativa	Bem Fraca	Positiva	Moderada	Positiva	Fraca
Área Construída X Temperatura do ar	Negativa	Bem Fraca	Positiva	Bem Fraca	Negativa	Moderada	Negativa	Fraca

Fonte: Elaborado pela autora

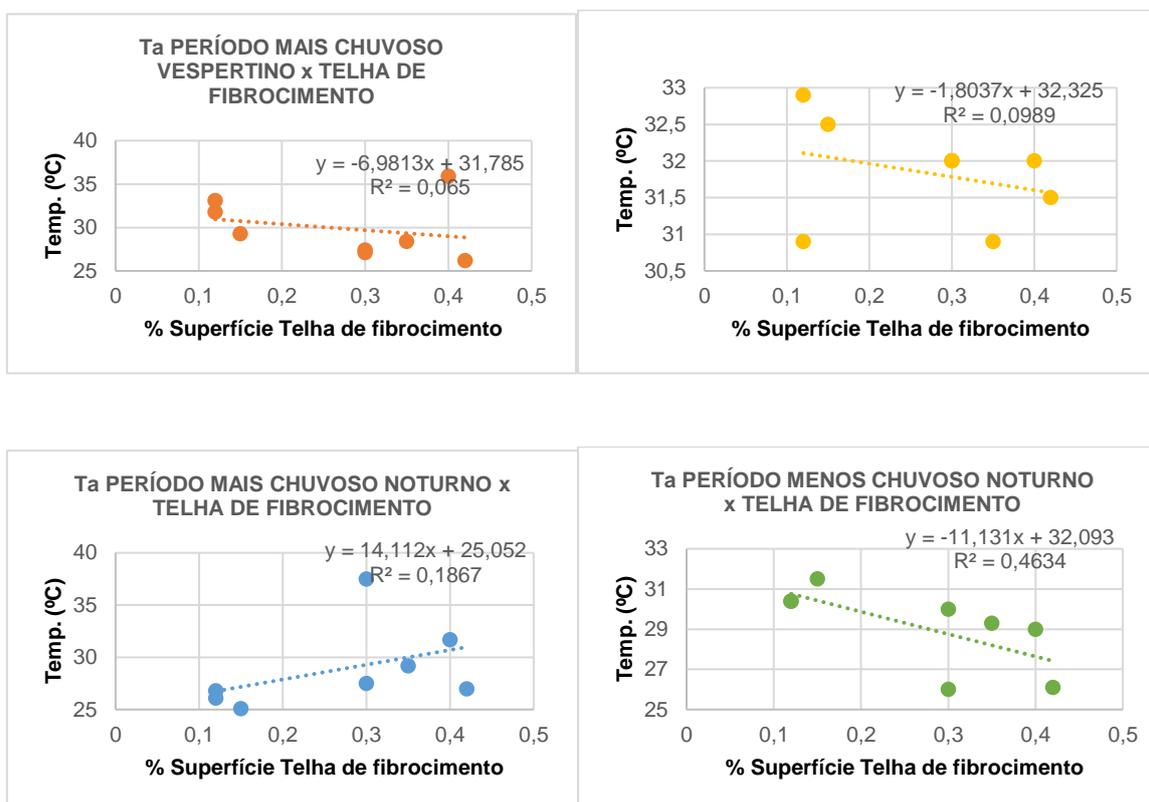
Sobre os materiais de superfície, voltando-se para as áreas de vegetação densa, ao analisar as medições realizadas, o resultado não apresentou relação entre si, porém, ao se analisar as áreas em separado, observou-se que todas as zonas apresentaram correlação moderada, entretanto, as Zonas B e C, com correlação negativa, sendo essas as zonas com maior presença de vegetação densa, ou seja, quanto maior a quantidade de vegetação densa, menor será a temperatura, refutando a teoria de Givoni (1994) e Coutts *et al.* (2015) em que a vegetação densa poderia impedir as perdas de radiação de onda longa durante a noite, bloqueando o resfriamento da superfície. O mesmo resultado foi observado na correlação entre vegetação rasteira e temperatura do ar (Ta).

Em relação ao índice de NDVI, apenas as temperaturas de superfícies medidas no período menos chuvoso vespertino apresentaram correlação moderada e positiva ($R= 0,69$), as outras situações apresentaram correlação fraca ou muito fraca, e negativa. Já a correlação entre áreas vegetativas (densa e rasteira) e temperatura do ar apresentou melhor resultado na medição realizada no período menos chuvoso, turno da noite, sendo o $R= 64$. Examinando as zonas em separado, no caso da correlação NDVI x Ta, houve disparidade entre os resultados, logo, entende-se que não há influência na temperatura do ar. Já a análise das zonas separadamente, apresentou resultado relevante, onde todas as zonas apresentaram correlação moderada, sendo as Zonas B e C correlação negativa.

Por outro lado, analisando o material de superfície de telha de fibrocimento, que foi o material mais frequente nas zonas de maior temperatura, as medições realizadas no turno vespertino apresentaram correlação baixa e negativa, e as medições realizadas no turno noturno apresentaram correlação moderada, sendo a do período mais chuvoso positiva e a do menos

chuvoso, negativa. Conclui-se que na sua maioria a correlação das superfícies em telha de fibrocimento e temperatura do ar são negativas e moderadas (Figura 127), isto é, moderadamente, quanto maior a presença de cobertura de telha de fibrocimento, menor é a temperatura do ar.

Figura 126 - Gráficos de dispersão de correlação entre superfícies de telha de fibrocimento x Temperatura do ar



Fonte: Elaborado pela autora

Analisando as Zonas individualmente (Quadro 8), apresentou-se os seguintes resultados: Na Zona A a correlação entre materiais de superfície e temperatura do ar mostrou-se positiva e forte nos dois períodos no turno da noite. Na Zona B e C a correlação apresentou-se positiva, e de moderada a forte, com exceção do período vespertino noturno, que apresentou correlação negativa e fraca. Na Zona D as correlações apresentaram resultados distintos, sendo negativo e muito fraco nas medições vespertinas (nos dois turnos), e positiva, sendo fraca e moderada no turno vespertino, nos períodos mais chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. Na Zona 1 o melhor resultado foi a correlação moderada apresentada nos períodos mais chuvoso, turno vespertino, e menos chuvosos, turno noite. Na Zona 2, o turno da noite, nos dois períodos foi o que melhor apresentou resultado, sendo correlação moderada. A Zona 3 só apresentou correlação moderada e positiva no turno da noite, período vespertino, mesmo resultado percebido na Zona 4.

Quadro 7 - Correlações de materiais de superfície por Zona

	Mais chuvoso / Tarde		Mais chuvoso / Noite		Menos chuvoso / Tarde		Menos chuvoso / Noite	
Materiais de superfície A x Ta	Positiva	Fraca	Negativa	Moderada	Positiva	Forte	Positiva	Forte
Materiais de superfície B x Ta	Positiva	Moderada	Negativa	Fraca	Positiva	Forte	Positiva	Moderada
Materiais de superfície C x Ta	Positiva	Moderada	Negativa	Fraca	Positiva	Moderada	Negativa	Moderada
Materiais de superfície D x Ta	Negativa	Bem Fraca	Negativa	Bem Fraca	Positiva	Moderada	Positiva	Fraca
Materiais de superfície 1 x Ta	Positiva	Moderada	Negativa	Fraca	Negativa	Bem Fraca	Positiva	Moderada
Materiais de superfície 2 x Ta	Positiva	Bem Fraca	Negativa	Moderada	Positiva	Moderada	Positiva	Moderada
Materiais de superfície 3 x Ta	Positiva	Bem Fraca	Negativa	Fraca	Positiva	Fraca	Positiva	Moderada
Materiais de superfície 4 x Ta	Positiva	Moderada	Negativa	Fraca	Negativa	Bem Fraca	Positiva	Moderada

Fonte: Elaborado pela autora

O coeficiente de correlação da rugosidade e temperatura do ar apresentou em todas as tentativas correlação negativa, sendo a mais próxima de -1 ou 1 as medições realizadas no período menos chuvoso e no turno noturno, com $R = -0,47$, sendo uma correlação moderada; contradizendo a correlação individual de cada zona, feita a partir do gráfico de dispersão, onde todas as Zonas apresentaram correlação positiva e moderada.

A correlação da densidade com a temperatura do ar apresentou apenas uma correlação positiva, que foram as medições realizadas no período menos chuvoso e no turno da noite, porém, com uma correlação muito fraca. Onde o R que mais se aproximou de -1 ou 1 foi nas medições realizadas no período menos chuvoso e no turno vespertino, com $R = 0,58$, apresentando correlação moderada. A análise individual de cada Zona através do gráfico de dispersão, apresentou correlação negativa forte em todas as Zonas, com exceção da Zona B, que apresentou correlação fraca. Ou seja, excluindo a Zona B (que é a Zona com menor densidade), em todas as áreas a densidade apresentou forte influência na Temperatura do ar, sendo menor a temperatura em áreas mais adensadas.

Analisou-se a correlação entre a velocidade do vento e a temperatura do ar medida, os resultados foram bastante distintos, a correlação mais próxima de -1 ou 1 apresentou correlação positiva, $R = 0,96$, que foi a medição realizada no turno da tarde durante o período menos

chuvoso, por outro lado, têm-se a medição realizada no período mais chuvoso, no turno da noite, que apresenta correlação negativa bem fraca (Quadro 9), logo, conclui-se que a correlação dessas duas variáveis dependerá de outros fatores.

Quadro 8- Quadro Correlação Ventos x Ta

PERÍODO MAIS CHUVOSO TARDE	NEGATIVO	MODERADO
PERÍODO MAIS CHUVOSO NOITE	NEGATIVO	BEM FRACA
PERÍODO MENOS CHUVOSO TARDE	POSITIVO	MUITO FORTE
PERÍODO MENOS CHUVOSO NOITE	NEGATIVO	MODERADO

Fonte: Elaborado pela autora

A correlação do efeito cânion urbano (H/W/L) e da porosidade (velocidade do vento) apresentou correlação positiva, sendo o coeficiente de correlação mais próximo de -1 ou 1 as medições realizadas no turno da noite, período com mais chuva, apresentado $R=0,80$. Em relação à densidade e velocidade do vento, em todas as situações as correlações resultantes foram negativas, com exceção das medições realizadas no período menos chuvoso no turno da noite, que apresentou $R= 0,40$; todavia, foram os resultados das medições realizadas no período de menos chuva, vespertino, que o R mais se aproximou de zero, sendo $R= -0,65$.

A análise de correlação de sombreamento e temperatura apresentou coeficiente de correlação fraco. A correlação entre sombreamento e vegetação densa apresentou correlação moderada e positiva. Da mesma forma, a correlação entre sombreamento e umidade apresentou coeficiente de correlação moderado e positivo.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão abordadas as conclusões, contribuições metodológicas e recomendações do trabalho.

No primeiro momento serão realizadas as conclusões referentes a análise da caracterização climática morfológica de cada zona em separado. Em seguida, a análise comparativa entre as zonas mais quentes e as zonas mais frias. Posteriormente, as conclusões a partir da análise estatística realizadas. E por fim, a análise geral.

5.1. Principais conclusões

Em relação FVC observou-se que a correlação com a temperatura irá depender do período e do turno, sendo que apenas o período menos chuvoso, durante a noite, apresenta concordância com o que fala a literatura, onde, quanto menor o FVC, maior será a temperatura. Da mesma forma, se analisadas de forma individual, sem o uso de estatística, as zonas apresentam resultados variáveis, sem correlação entre temperatura e FVC, assim sendo, entende-se que esse não é uma variável relevante, pelo menos de forma isolada, no aumento de temperatura em Belém, e conseqüente formação de Ilha de Calor.

Os cânions urbanos não apresentaram interferência direta na temperatura, nem quando analisados individualmente, nem quando analisados através de correlação por análise estatística. Nas vias claustrofóbicas das zonas de maior temperatura, o sombreamento gerado não foi suficiente para diminuir a temperatura, da mesma forma, o sombreamento não foi característica que tenha influenciado as baixas temperaturas das zonas mais frias.

Em relação a análise de superfície construída, apesar da correlação estatística não ter conferido resultado esperado, ao analisar as zonas através dos índices de quantidade de área permeável, é percebido que as zonas com menores temperaturas também são as zonas com maior área de superfície permeável, entende-se que esse pode ser um fator de contribuição pela formação de Ilhas de Calor Urbanas. O mesmo pode ser observado em relação a superfícies construídas, onde, quanto maior a quantidade, maior será a temperatura.

Em relação a rugosidade, observou-se que os períodos e turnos não apresentaram semelhanças, porém, se analisado estatisticamente de forma geral, a rugosidade apresentou forte correlação com a temperatura, onde, quanto maior a rugosidade, maior será a temperatura. Todavia, a análise de microescala não apresentou padrão, ou seja, não há predominância de uma escala ou classe em zonas mais quentes diferente do que existe em zonas mais frias.

Em relação aos materiais de superfície, foram observados alguns padrões. As Zonas mais quente possuem como materiais de superfície mais relevante as coberturas de telha de fibrocimento, já as zonas menos quentes, possuem como material de superfície mais relevante vegetações (sejam densas ou rasteiras). A análise de correlação estatística apresentou resultados acentuados para as medições realizadas no turno da noite, além das Zonas B e C (quando analisadas as zonas separadamente), que são as áreas com maior porcentagem de áreas verdes.

Na análise observacional, a densidade não apresentou padrão que possa ser relevante na variação de temperatura. Já na análise por correlação estatística, de modo geral, o resultado apresentado foi que quanto maior a densidade, menor será a temperatura, fato divergente ao que a literatura cita. Deve-se atentar, que a densidade referida é a populacional, e não a relação de área construída.

Considerando a porosidade, não foi observado diferenças relevantes entre zonas quentes e zonas frias, nem na análise observacional quanto na correlação estatística.

Durante o período mais chuvoso, as Zonas 1, 3, B, C e D apresentaram maior temperatura no turno da tarde, e durante o período menos chuvoso todas as Zonas apresentaram maior temperatura no período vespertino, diferente do que constatou Fialho (2012). Porém, já havia sido ressaltado por Nechet (1994) que locais com clima equatorial apresentam temperatura máxima durante o dia.

Sobre o uso do ENVI-met, constatou-se que a versão 5.0 apresentou erro em simulações de cenários com presença de grande quantidade de vegetação, nesses casos, foi necessário utilizar a versão anterior (4.0). Outras limitações encontradas no ENVI-met foi em relação a zonas com grande divergência de alturas, o processamento muitas vezes deu erro por excesso de turbulência, tendo que ser abortado, e reiniciado.

Por fim, após a análise de todos os fatores da configuração urbana que podem influenciar a temperatura da cidade, em relação a cidade de Belém, que possui clima equatorial úmido, os fatores que apresentaram maiores relevâncias, refletindo diretamente na formação de ilhas de calor urbana, e no estresse térmico a nível do pedestre são os materiais de superfície e a fração de superfície construída, o que responde um dos objetivos específicos. Desta forma, propõe-se que o planejamento urbano seja realizado de forma que se respeite a taxa de ocupação máxima do lote, para que seja preservadas o máximo as superfícies permeáveis.

Conforme já apontado na literatura por Li *et al.* (2020), os métodos quantitativos tendem a fornecer maior convencimento dos resultados alcançados, porém, deve-se ressaltar que quanto menor o número de amostras, menor será o poder estatístico do experimento. A

maioria dos estudos envolvendo análise estatística por regressão linear fez uso de dados de série temporal de em média 10 anos, o que facilita a obtenção de quantidade desejável de amostras. Tendo em vista que a presente pesquisa teve como intervalo de tempo 1 ano para obtenção de dados, e apenas 1 equipamento para medição, não sendo possível assim, a medição simultânea de mais de 1 ponto, a quantidade de amostras não se apresentou desejável para um resultado satisfatório.

Em relação à pergunta de pesquisa, se “é possível analisar os causadores de ilhas de calor urbanas em cidades de clima equatorial úmido através de métodos de baixo custo e fácil acesso”, a resposta é sim, é possível. Desta forma, o objetivo geral desta tese foi alcançado.

Em relação aos objetivos específicos, foi elaborado o mapa termal de Belém através de imagens do satélite Landsat 8, onde pode ser observado as zonas mais quentes e zonas menos quentes da cidade.

Em relação a comparação entre a temperatura do ar e a temperatura de superfície, observou-se que a temperatura do ar não segue o mesmo padrão que a temperatura de superfície, ou seja, não há tanta oscilação entre diferentes áreas da cidade quando se trata de temperatura do ar.

Em relação às Zonas Climáticas Locais, a metodologia WUDAP (World Urban Database and Access Portal) para a classificação de Zonas Climáticas Locais constatou que o resultado obtido não foi satisfatório quando aplicado à cidade de Belém. E a aplicação da metodologia de classificação por dados observacionais apresentou resultado confuso devido a heterogeneia morfológica da cidade de Belém. Desta forma, como citado anteriormente, entende-se que a aplicação de Zonas Climáticas Locais para a cidade de Belém não seja uma metodologia válida, que irá cumprir o papel inicial de avaliar as zonas conforme as características propostas por Stewart e Oke (2012).

Propõe-se para trabalhos futuros o uso do ENVI-met em simulações de cenários utilizando o atual Plano Diretor de Belém, para assim, verificar a sua aplicabilidade, e até mesmo propor modificações no mesmo. Além disso, propõe-se a aplicação desta metodologia em cidades com clima diferente da cidade de Belém, para que desta forma, possa-se comparar os resultados, e identificar se é aplicável.

6. REFERÊNCIA

ABNT, A. B. DE N. T. **Desempenho térmico de edificações Parte 2 : Métodos de cálculo da transmitância térmica , da capacidade térmica , do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Brasil, 2003a.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3 : Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Brasil, 2003b.

ABNT, A. B. DE N. T. **Edificações, Desempenho térmico de Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. 2005.

ABREU, P. V. L. DE. **A morfologia do plano de expansão da cidade de Belém e a estrutura fundiária do Município no Século XIX**. (Dissertação) 2016. Universidade federal do Pará.

ACIOLY, C.; DAVIDSON, F. **Densidade urbana e Gestão Urbana**. Rio de Janeiro, 1998.

AGATHANGELIDIS, I.; CARTALIS, C.; SANTAMOURIS, M. Integrating urban form, function, and energy fluxes in a heat exposure indicator in view of intra-urban heat island assessment and climate change adaptation. **Climate**, v. 7, n. 6, 2019.

AGUIAR, L. F. M. C.; SILVA, M. V. C.; GANDU, A. W.; ROCHA, C. A.; CAVALCANTE, R. M. Caracterização de Cânions Urbanos e seus Efeitos Climáticos em Área com Intenso Processo de Verticalização na Cidade de Fortaleza, Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. May, p. 1046–1058, 2017.

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 87, n. 1–4, p. 223–237, 2007.

ALMEIDA, J. R.; ARAÚJO, G. H. DE S.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Editora: Bertrand Brasil. Ed. 3. Rio de Janeiro, 2005.

ALMEIDA, M. A. M. de; VASCONCELLOS, V. M. N. de. Perfil dos métodos de análise mais usados na avaliação da influência da vegetação na temperatura do ar em ambientes externos no Brasil. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, , n. 20, p. 1–19, 2018.

ALVES, E. D. L. Análise Das Influências Geourbanas No Clima Urbano Da Cidade De Iporá - **GoiásBoletim de Geografia**, v. 37, n. 2, p. 267-268, 17 abr. 2020.

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental / Influence of different surfaces on the temperature and energy flux: an experimental trial. **Revista Ambientia**, v. 8, n. 1, p. 101–111, 2012.

ARAÚJO JÚNIOR, A. C.; AZEVEDO, A. K. A. Formação da Cidade de Belém (PA): Área Central e seu Papel Histórico e Geográfico. **Espaço Aberto**, p. 151–168, 2012.

ATHUKORALA, D.; MURAYAMA, Y. Urban heat island formation in greater cairo: Spatio-temporal analysis of daytime and nighttime land surface temperatures along the urban-rural gradient. **Remote Sensing**, v. 13, n. 7, 2021.

BARBOSA, A. **Urbanismo bioclimático: efeitos do desenho urbano na sensação**

térmica, (Tese) 2018. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo.

BARBOSA, G. S.; DRACH, P. R. C.; CORBELLA, O. D. Intraurban temperature variations: Urban morphologies of the densification process of copacabana neighborhood, Brazil. **Climate**, v. 7, n. 5, p. 1–17, 2019.

BARBOSA, R.; BARBIRATO, G.; VECCHIA, F. Vegetação urbana: análise experimental em cidade de clima quente e úmido. **Encac - Cotedi 2003**, , n. 1, p. 722–729, 2003.

BASTOS, T.; PACHECO, N.; NECHET, D.; SÁ, T. **Aspectos Climáticos de Belém no Últimos Cem Anos**. Belém: Embrapa, 2002.

BERG, E.; KUCHARIK, C. The Dynamic Relationship between Air and Land Surface Temperature within the Madison, Wisconsin Urban Heat Island. **Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 1–19, 2022.

BORGES, R. DE O.; CAMARGO, F.; CAMPAGNOLI, F.; BAYER, M. Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia: avaliação das imagens Landsat 8 para o monitoramento hidroviário. In: INPE (Org.); **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** -. Anais... . p.6022–6029, 2015. João Pessoa.

BRASIL. **Estatuto da Cidade: Lei 10.257 de 10 de julho de 2001**. Brasil, 2001.

CARDENAL, M. E. C. **Metodologia para avaliação do desempenho térmico em edificações: Estudo de Caso aplicado a Edifício Habitacional na cidade de Belém do Pará**. (Dissertação). 2017. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Pará.

CARDOSO, A. C. D.; LIMA, J. J. F. **Belém: Transformações na ordem urbana**. 1^o ed. Rio de Janeiro, 2015.

CASTRO, C. O. DE; VENERAL, D. C.; SABIÃO, T. J. A Mudança Climática Sustentabilidade e Gestão das Cidades. **XVI Encontro Paranaense de Educação Ambiental**, p. 1–3, 2017.

CHANDLER, T. J. **The Climate of London**. London: Hutchinson of London, 1965.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. DE S. C. Temperatura De Superfície Celsius Do Sensor Tirs/Landsat-8: Metodologia E Aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31, 2013.

CORRÊA, L. V. **Análise dos efeitos térmicos de superfície na cidade de Belém-Pará-Brasil utilizando imagens de satélite** (Dissertação) 2011. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará.

COSTA, E. R. da. **O campo térmico e a qualidade ambiental urbana em Chapecó / SC**. (Tese) 2015. Universidade Estadual paulista.

COSTA, G. G. da. As Cidades Amazônicas Na América Portuguesa. **Examãpaku**, v. 7, n. 2, p. 18, 2014.

COUTTS, A. M.; WHITE, E. C.; TAPPER, N. J. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. **Theoretical and Applied Climatology** · , , n. February, 2015.

DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator : A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. **Frontiers in Environmental Science** |, v. 9, n. April, 2021.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 6^o ed. São Paulo, 2006.

DIAS, M. B. G.; NASCIMENTO, D. T. F. Clima Urbano E Ilhas De Calor: Aspectos Teórico-Metodológicos E Estudo De Caso. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 12, p. 27–41, 2014.

AKROM PRODUTOS ELETRÔNICOS. **Manual de instruções Termo-Higro-Anemômetro - KR825**. 2022.

EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. Urban shading - A design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1995–2004, 2007.

EPA, E. P. A. **Clean Water Is Everybody ' s Business Protecting Water Quality**. Washington: Estados Unidos da América. 2003.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; BONEH, D. **Effect of high-albedo materials on pedestrian thermal comfort in urban canyons**. May 2014, 2012.

FAISAL, A. AL; KAFY, A. A.; AL RAKIB, A.; et al. Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. **Environmental Challenges**, v. 4, n. April, p. 100192, 2021. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100192>>. .

FARID, N.; MOAZZAM, M. F. U.; AHMAD, S. R.; COLUZZI, R.; LANFREDI, M. Monitoring the Impact of Rapid Urbanization on Land Surface Temperature and Assessment of Surface Urban Heat Island Using Landsat in Megacity (Lahore) of Pakistan. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 3, n. May, p. 1–12, 2022.

FAU, F. DE A. E U. DA U. F. DO P. **Hospício dos Lázarus do Tucunduba – localização aproximada**. Disponível em: <<https://fauufpa.org/2014/09/17/hospital-de-lazaros-do-tucunduba—localizacao-aproximada/>>. Acesso em: 7/7/2022a.

FAU, F. DE A. E U. DA U. F. DO P. **Hospital Domingos Freire – fora dos limites do Barros Barreto**. Disponível em: <<https://fauufpa.org/2014/09/08/hospital-domingos-freire—hoje-fora-dos-limites-do-barros-barreto/>>. Acesso em: 7/7/2022b.

FERREIRA, F. L. E S. **Estimativas de temperatura superficial por satélite e análise climática** em município de grande porte no Brasil (Tese) 2020. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

FIALHO, E. S. Ilha de Calor: Reflexões acerca de um conceito. **ACTA Geográfica, Boa Vista**, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, pp.61-76 2012.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo, 2010.

GAWUC, L.; JEFIMOW, M.; SZYMANKIEWICZ, K.; et al. Statistical Modeling of Urban Heat Island Intensity in Warsaw, Poland Using Simultaneous Air and Surface Temperature Observations. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 2716–2728, 2020.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4^a ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIVONI, B. Urban design for hot humid regions. **Renewable Energy**, v. 5, p. 1047–1053, 1994.

GONSALVES, E. P. **Conversas sobre a iniciação à pesquisa científica**. 2^o ed.

Campinas, 2001.

GONZALEZ, D. E. G. **Análise dos efeitos do albedo no microclima de cânios urbanos.** (Dissertação) 2015. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GRIMMOND, C. S. B.; BLACKETT, M.; BEST, M. J.; et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, n. 6, p. 1268–1292, 2010.

GUSMÃO, L.; SOARES, D. Produção desigual do espaço: o processo de verticalização em Belém (PA). **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, , n. 2018– 01, 2018.

HALDER, B.; BANDYOPADHYAY, J.; BANIK, P. Monitoring the effect of urban development on urban heat island based on remote sensing and geo-spatial approach in Kolkata and adjacent areas, India. **Sustainable Cities and Society**, v. 74, n. March, p. 103186, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103186>>. .

HAYES, A. T.; JANDAGHIAN, Z.; LACASSE, M. A.; et al. Nature-Based Solutions (NBSs) to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects in Canadian Cities. **Buildings**, v. 12, n. 7, 2022.

HIEN, W. N.; IGNATIUS, M.; ELIZA, A.; JUSUF, S. K.; SAMSUDIN, R. Comparison of steve and envi-met as temperature prediction models for singapore context. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. 3, n. 3, p. 197–209, 2012.

HIGUERAS, E. G. URBANISMO BIOCLIMÁTICO Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos. In: I. J. de Herrera (Org.); **Cuadernos de Investigación Urbanística**, 1998. Madrid.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Belém**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>>. Acesso em: 30/9/2019.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. - Série Histórica - **Dados Mensais**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/form_mapas_mensal.php>. Acesso em: 8/12/2022.

INPE, Instituto nacional de Pesquisas Espaciais.. **Landsat**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>>. Acesso em: 6/12/2022.

ISO, I. O. F. S. **ISO 7730: Ergonomics of the Thermal Environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Suíça, 2005.

SETO K.; DHAKAL S. Human Settlements, Infrastructure, and Spatial Planning. **AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. p.923–1000, 2015.

KHAN, S. M.; SIMPSON, R. O. D. W. Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed. **Boundary-Layer Meteorology**, , n. 1978, p. 487–506, 2001.

KOLOKOTRONI, M.; GIRIDHARAN, R. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. **Solar Energy**, v. 82, n. 11, p. 986–998, 2008. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004>>. .

KOTTEK., M.; BECK, J. G. C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. **World Map of Köppen-Geiger Climate Classification**. , 2006.

KOWALSKI, L. F.; MASIERO, É. Estudo Comparativo de Sistemas de Medições de Temperatura Superficial de Pavimentos Urbanos. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 8, n. 61, p. 15–28, 2020.

KOWALSKI L. F. **Influência do Albedo de Pavimentos no Campo Térmico de Cânions Urbanos: Estudo de Modelo em Escala Reduzida**, (Dissertação)2019. Universidade Federal de São Carlos.

KRÜGER, E. L. Impacto do adensamento e da orientação solar de cânions urbanos na demanda por condicionamento térmico de edificações sob condições de clima desértico. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 1, p. 65–87, 2008.

LANDSBERG, H. E. **Special environmental report n. 7 - weather, climate and human settlements**. 448^o ed. Geneva: WMO, 1976.

LI, Y. Y.; LIU, Y.; RANAGALAGE, M.; ZHANG, H.; ZHOU, R. Examining land use/land cover change and the summertime surface urban heat island effect in fast-growing greater hefei, China: Implications for sustainable land development. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 10, 2020.

LIMA, D. C. R. **Forma e arborização em cânions urbanos : tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR**, (Tese) 2018. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

LIMA, J. J. F. Conjuntos habitacionais e condomínios de luxo em Belém: duas tipologias em confronto. **Arquitextos**, v. 27, n. 7, p. 1–6, 2002. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/03.027/763>>. .

LIU, H.; LIM, J. Y.; WINT HNIN THET, B.; LAI, P. Y.; KOH, W. S. Evaluating the impact of tree morphologies and planting densities on outdoor thermal comfort in tropical residential precincts in Singapore. **Building and Environment**, v. 221, n. March, p. 109268, 2022. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109268>>. .

LIZ, D. S. DE; ORDENES, M.; GUTHS, S. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis | Green roof thermal behavior through experimental analysis for Florianópolis (Brazil). **Oculum Ensaios**, v. 15, n. 2, p. 315, 2018.

LOMBARDO, M. A. **Ilhas de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo, 1985.

LÓPEZ, D. P. M. **Ciudad y cambio microclimático**, 2020. Universidade de Brasília.

LUCENA, A. Uma Análise De Técnicas Nos Estudos De Clima Urbano Para a Região Metropolitana Do Rio De Janeiro. **Geo UERJ**, 2019.

MACIEL, C. de R. **Condições Microclimáticas de Espaços Abertos: Simulação de estratégias por meio do software ENVI-MET**, (Tese) 2014. Universidade Federal de Mato Grosso.

MANLEY, G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 84, n. 359, p. 70–72, 1958.

MANTEGHI, G.; SHUKRI, S. M.; LAMIT, H. Street Geometry and River Width as Design Factors to Improve Thermal Comfort in Melaka City. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 58, n. I, p. 15–22, 2019.

MARTINEZ, J. M.; GUYOT, J. L.; FILIZOLA, N.; SONDAG, F. Catena Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and

satellite data. *Catena*, v. 79, n. 3, p. 257–264, 2009. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>>. .

MARTINS, T. A. D. L. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**, (Tese) 2014a. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MARTINS M. E. G. Coeficiente de correlação amostral. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 2, p. 1–2, 2014b.

MASIERO, É. **Análise da influência de corpos d'água em microclimas urbanos: Estudo de caso em São José Do Rio Preto, SP**, (Tese) 2014. Universidade Federal de São Carlos.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 1161, 1996.

MEGDA, O. R. **Identificação de Ilhas de Calor Urbano em cidade de porte Médio: Proposta metodológica Adaptada às Zonas Climáticas Locais - ZCLs**. (Tese), 2020. Universidade Federal de São Carlos,.

MENDES, L. A. S.; OLIVEIRA, J. M. G. de. Espaços elitizados de moradia e consumo: Novas centralidades urbanas na Região metropolitana de Belém-PA. *Ensaios de Geografia*, v. 4, p. 26–49, 2015.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; SANTA ROSA, A.; et al. **Introdução Ao Processamento de Imagens De Sensoriamento Remoto**. Brasília, 2012.

MESSIAS, C. G. Análise comparativa entre o mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal utilizando imagens de média e alta resolução espacial. *REVISTA GEONORTE*, p. 1230–1243, 2012.

MINAKI, C. **O clima urbano como indicador de qualidade ambiental: estudo de caso da paisagem urbana de Araçatuba/SP**, 2011. Universidade Estadual Paulista.

MIRANDA, T. B. **a Ilusão da igualdade: Natureza, justiça ambiental e racismo em Belém**, (Dissertação) 2020. Universidade Federal do Pará.

MORAIS JUNIOR, H. DE S.; SILVA, S. L. B. DA. Mapeamento Dasimétrico e Interpolação de Dados Censitários e Imagem Orbital para Análise da Dilatação do Sítio Urbano da Cidade de Belém do Pará. *Revista Geonorte*, v. 10, n. 36, p. 95–109, 2019.

MOREIRA, E. **Belém e sua Expressão Geográfica**. Belém, 1966.

MOREIRA, F. DA S. A.; VITORINO, M. I. Relação de áreas verdes e temperatura da superfície para a cidade de Belém. *Papers do Naea*, jun. 2017. Belém.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto : E metodologias de aplicação**. 1º ed. São José dos Campos, 2001.

MUHAMMAD, F.; XIE, C.; VOGEL, J.; AFSHARI, A. Inference of Local Climate Zones from GIS Data, and Comparison to WUDAPT Classification and Custom-Fit Clusters. *Land*, v. 11, n. 5, p. 747, 2022.

NAKATA-OSAKI, C. M. **Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna**, (Tese) 2016. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. DE; RODRIGUES, D. S. 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**, v. 16, n. 3, p. 73–87, 2016.

NECHET, D. Variabilidade diurna da precipitação em Belém-PA. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA,. **Anais...** . p.1–5, 1994. Rio de Janeiro.

NUGROHO, N. Y.; TRIYADI, S.; WONORAHARDJO, S. Effect of high-rise buildings on the surrounding thermal environment. **Building and Environment**, v. 207, n. PA, p. 108393, 2022. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108393>>.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2° ed. Routledge, 1978.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatologica et chorological**, v. 1, p. 237–254, 1981.

OKE, T. R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.

OKE, T. R. **Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites**. Canadá. 2006.

PACIFICI, M. **Urban Morphology and Climate: field assessment and numerical modeling of interactions**, (Tese) 2019. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PENTEADO, A. R. **Belém - Estudo de Geografia Urbana**. Coleção Am ed. Belém, 1968.

PEREGRINO, P. S. A. **A influência do padrão de adensamento nas características de um escoamento urbano: Uma aplicação à região do altiplano Cabo Branco em João Pessoa - PB**, (Tese) 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PITMAN, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 5, p. 479–510, 2003.

PORTO, A. L. G.; SECCO, C. B.; DELGADO, G. M.; VERBICARO, C.; DEMARZO, M. A Influência “ Hausmanniana ” nas Intervenções Urbanísticas em Cidades Brasileiras. , 2007. São José dos Campos: XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba.

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**, (Tese) 2005. Universidade de São Paulo.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM. **Anuário estatístico de Belém 2011**. Belém, 2012. Disponível em: <http://www.belem.pa.gov.br/app/ANUARIO_2011/>. .

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM. Dados da Cidade. Disponível em: <<http://www.belem.pa.gov.br/planodiretor/paginas/brasao.php>>. Acesso em: 1/8/2019.

QUAH, A. K. L.; ROTH, M. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. **Atmospheric Environment**, v. 46, p. 92–103, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.015>>. .

RAMPAZZO, C. R. **Clima urbano, risco climático e vulnerabilidade socioespacial mediados pela produção do espaço urbano em cidades paulistas (São Carlos, Marília e Presidente Prudente)**, (Tese) 2019. Universidade Estadual Paulista.

REN, C.; WANG, R.; CAI, M.; XU, Y. The Accuracy of LCZ maps Generated by the World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) Method : A Case Study of Hong Kong. **The Fourth International Conference on Countermeasure to Urban Heat Islands**, n. June, 2016.

ROCHA, L. M. V.; SOUZA, L. C. L.; CASTILHO, F. J. V. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 3, p. 161–175, 2011.

RODRIGUES, J. E.; LUZ, L.; SARAIVA, J. Análise Mosfológica dos bairros de Nazaré e Guamá no Processo de Redução de Áreas Verdes Urbanas no Município. **VI Congresso Ibero americano de Estudios territoriales y ambientales**, n. Icv, p. 2813–2838, 2014.

RODRIGUES, V. N. R. Bairro e Memória: Umarizal das vacarias aos espigões. (Belém, 1950/2000). **XXVII Simpósio Nacional de História**, p. 15, 2013. Disponível em: <http://www.snh2013.anpuh.org/resources/anais/27/1364935740_ARQUIVO_BairroeMemoriaUmarizaldasvacariasaosespigoes._Belem,19502000_.pdf>. .

ROMERO, M. A. B. Correlação entre o microclima e a configuração do espaço residencial de Brasília. **VI Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e II Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído**, 2009. Rio Grande do Norte.

ROMERO, M. A. B.; BAPTISTA, M. de M.; LIMA, E. A. de; et al. **MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ILHAS DE CALOR URBANAS**. 1º ed. Brasília, 2019.

ROSSI, F. A.; KRÜGER, E. L. Análise da variação de temperaturas locais em função das características de ocupação do solo em Curitiba. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 9, n. 10, p. 93–105, 2005.

SANTAMOURIS, M.; PAPANIKOLAOU, N.; LIVADA, I.; et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of building. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 201–216, 2001.

SANTOS, LEILSON A. DOS; SILVA, D. D. B.; SOUSA, T. B. DE; FORTES, A. C. C.; VIANA, B. A. DA S. Impactos sociomambientais resultados do progresso de verticalização. **VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Anais. . p.1–7, 2015. Porto Alegre.

SCHMITZ, L. K. **Reestruturação urbana e conforto térmico em Curitiba/PR : diagnóstico, modelagem e cenários**. (Tese) 2014. Instituto de Geografia, Universidade Federal do Paraná.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 1º ed. São Paulo, 2013.

SILVA, C. F. **O Conforto Térmico De Cavidades Urbanas: Contexto Climático Do Distrito Federal**, (Tese) 2013. Universidade de Brasília.

SILVA, F. T.; SCARIONE, P.; ALVAREZ, C. E. A influência da rugosidade e porosidade da tipologia urbana na ventilação em área litorânea e a percepção de conforto do transeunte. **XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Anais. , 2012. Juiz de Fora.

SILVA JÚNIOR, J. de A. **Avaliação de parâmetros micrometeorológicos do conforto e da percepção térmica na área urbana da cidade de Belém-PA**, 2012. Universidade Federal do Pará.

SILVA JÚNIOR, J. DE A.; COSTA, A. C. L.; PEZZUTI, J. C. B.; COSTA, R. F. Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade

de Belém, PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 419–428, 2013.

SOBREIRA, L. C.; LEDER, S. M.; SILVA, F. de A. G. DA; ROSA, P. R. Expansão urbana e variações mesoclimáticas em João Pessoa, PB. **Ambiente Construído**, , n. 83, p. 125–138, 2011. Porto Alegre, RS.

SOLTANI, A.; SHARIFI, E. Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. **Frontiers of Architectural Research**, v. 6, n. 4, p. 529–538, 2017.

SOUZA, J. F. DE.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, 2016.

SOUZA, L. C. L. de; TENTE, C. M.; GIUNTA, M. B.; NAKATA, C. M. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre Sky view factor and urban heat islands intensity at the pedestrian level A Cezar Mecozzi Tente Mariene Benutti Giunta. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 14, p. 155–167, 2010.

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

SUN, C. Y.; KATO, S.; GOU, Z. Application of low-cost sensors for urban heat island assessment: A case study in Taiwan. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 10, 2019.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1997.

TAKASHIMA-OLIVEIRA, T. T. G.; BEZERRA, P. E. S.; PONTES, A. N.; TAVARES-MARTINS, A. C. C. Modificações paisagísticas e implicações térmicas no distrito administrativo de Belém, Pará. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 3, p. 404, 2018.

TORRES, S. C. **FORMA E CONFORTO: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática**, 2017. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

VENTURA NETO, R. da S; MOURA, B. M. Verticalização sobre as áreas permeáveis da primeira légua patrimonial de Belém, Pará. **Revista Projetar: Projeto e percepção do Ambiente**, v. 4, 2019.

VIANNA, E. O. **O campo térmico urbano – Ilhas de Calor em Brasília DF**, 2018. Universidade de Brasília.

VIEIRA, M. G.; MACHADO, G. **Geotecnologias e ilhas de calor urbanas: Uma aplicação a Uberlândia – MG.**, v. 4, p. 137–158, 2018.

VILELA, J. A. **Variáveis do Clima Urbano: Análise da situação atual e prognósticos para a rfeição do bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG.** Dissertação - BH, 2007. Universidade Federal de Minas Gerais.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Complete Urban Surface Temperatures. **Journal of applied meteorology**, p. 1117–1132, 1997.

WANG, R.; REN, C.; XU, Y.; LAU, K. Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods : A case study of Hong Kong **Urban Climate**, , n. October, 2017.

WETHERLEY, E. B.; ROBERTS, D. A.; TAGUE, C. L.; et al. Remote sensing and

energy balance modeling of urban climate variability across a semi-arid megacity. **Urban Climate**, v. 35, n. November 2019, p. 100757, 2021. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100757>>. .

YANG, J.; WANG, Z. H.; KALOUSH, K. E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a “silver bullet” for mitigating urban heat island? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 830–843, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>>. .

ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento Conceitos E Definições. **Revista de Geografia - PPGeo - UFJF**, v. 7, n. 2, 2017.

ZHOU, D.; XIAO, J.; BONAFONI, S.; et al. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands : Progress , Challenges , and Perspectives. **Remote Sens**, p. 1–36, 2019.