



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Natasha Hansen Gapski Pereira

**ANÁLISE DO MICROCLIMA URBANO ATRAVÉS DE MODELAGEM
COMPUTACIONAL: ESTUDO DE CASO EM BALNEÁRIO CAMBORIU-SC**

Florianópolis

2022

Natasha Hansen Gapski Pereira

**ANÁLISE DO MICROCLIMA URBANO ATRAVÉS DE MODELAGEM
COMPUTACIONAL: ESTUDO DE CASO EM BALNEÁRIO CAMBORIU-SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina para obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil
Orientador: Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC

Pereira, Natasha Hansen Gapski

Análise do microclima urbano através de modelagem
computacional: estudo de caso em Balneário Camboriú-SC /
Natasha Hansen Gapski Pereira ; orientador, Deivis Luis
Marinoski, 2022.

188 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Civil. 3. Clima
urbano. 4. Ilha de calor urbana. 5. Simulação
computacional. I. Marinoski, Deivis Luis. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Natasha Hansen Gapski Pereira

Análise do microclima urbano através de modelagem computacional: estudo de caso em Balneário Camboriú-SC

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Denise Helena Silva Duarte, Dra.
Universidade de São Paulo

Prof. Roberto Lamberts, PhD
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Ana Paula Melo, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestra em Engenharia Civil.

Philippe Jean Paul Gleize
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as graças em minha vida.

A minha família, por sempre querer meu melhor.

Ao Paulo Eduardo, por todo apoio e carinho. Agradeço também pela ajuda na construção dos abrigos meteorológicos e na montagem dos equipamentos em campo.

Aos moradores que permitiram a pesquisa de campo: Vera, Valdir e Pedro.

Ao professor Deivis Marinoski, pela orientação, incentivo e paciência. Aos membros da banca de qualificação e defesa, professor Roberto Lamberts, professoras Ana Paula Melo e Denise Duarte, pela disponibilidade e contribuição nesta pesquisa.

Agradeço a FAPEU, pela aquisição do software ENVI-met, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por viabilizar este trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

As ilhas de calor urbanas são definidas segundo a diferença positiva entre a temperatura do ar de uma área urbana em relação a outra não urbana. Fatores como geometria, materialidade, poluição e presença de vegetação, influenciam a intensidade dos fenômenos climáticos urbanos. O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da geometria e da refletância solar das superfícies urbanas no microclima de uma cidade litorânea brasileira. O presente trabalho trata-se de um estudo de caso de duas áreas com diferentes geometrias, representativas da região central de Balneário Camboriú, Santa Catarina. A medição da intensidade das ilhas de calor urbanas ocorreu em dois períodos do ano, nas estações de inverno e primavera. A intensidade média das ilhas de calor foram de até 1,0 °C a noite e 2,5 °C durante o dia. A área com maior densidade horizontal e vertical apresentou ilhas de calor menos intensas durante o dia, devido ao sombreamento causado pelas edificações. No período noturno, o menor fator de visão do céu desta área reduz as trocas de calor por radiação de onda longa com o céu, resultando em temperaturas do ar mais elevadas. A influência da refletância foi avaliada por meio de simulações computacionais de cenários com diferentes combinações de refletância solar das coberturas, fachadas e pavimentações. Utilizou-se o modelo ENVI-met versão 4.4.6, validado segundo as medições em campo. As simulações mostram que, de maneira geral, as superfícies de alta refletância solar contribuem para a redução da temperatura do ar. A geometria do espaço urbano também define o tipo de superfície que afeta mais na temperatura do ar. Nas áreas mais adensadas, a refletância solar das fachadas exerce maior variação de temperatura, enquanto em espaços urbanos abertos, com maior fator de visão do céu, as superfícies de cobertura e pavimentação são mais importantes. Embora dependentes, o efeito da refletância solar das superfícies é secundário em relação aos efeitos da geometria, considerando a variação de temperatura do ar que suas modificações causam. Os impactos no microclima urbano se estendem para além das temperaturas do ar. A radiação solar que incide sobre a pavimentação de um cânion urbano com superfícies de alta refletância solar pode ser até três vezes maior que a de um com baixa refletância. Em relação à radiação térmica líquida, observou-se que o baixo fator de visão do céu reduz a perda de calor por onda longa dos elementos urbanos. Além disso, o cânion urbano profundo ($H/W > 2$) apresentou maior sensibilidade às mudanças de refletância solar das superfícies que o compõe que o de uma área menos adensada.

Palavras-chave: microclima urbano, ilha de calor urbana, refletância solar.

ABSTRACT

The urban heat islands are an urban climate phenomenon defined by the positive difference between the air temperature of an urban area to a non-urban one. Factors such as geometry, materiality, pollution, and vegetation influence the intensity of urban climatic phenomena. This study aims to evaluate the effect of geometry and solar reflectance of urban surfaces on the microclimate of a Brazilian coastal city. The methodology is a case study of two areas with different geometries, representing the central region of Balneário Camboriú, Santa Catarina. The measurement of urban heat islands' intensity occurs in two seasons of the year (winter and spring). The average of the heat islands' intensity was up to 1.0 °C at night and 2.5 °C during the day. The area with the highest horizontal and vertical density had less intense heat islands during the day due to the shading caused by the buildings. At night, this area's lower sky view factor reduces long-wave radiation heat exchange with the sky, resulting in higher air temperatures. The influence of solar reflectance was evaluated through computer simulations of scenarios with different combinations of solar reflectance on the roofs, facades, and pavements. The ENVI-met version 4.4.6 model was used and validated according to field measurements. The simulations show that, in general, surfaces of high solar reflectance contribute to the reduction of air temperature. The geometry of urban space also defines the type of surface that influence the most air temperatures. In denser areas, the solar reflectance of the facades exerts more significant temperature variation. At the same time, in open urban spaces, with a higher sky view factor, the roofing and paving surfaces are more important. Although dependent, the effect of the solar reflectance of the surfaces is secondary concerning the effects of the geometry, considering the air temperature variation that their modifications cause. Impacts on urban microclimate extend beyond air temperatures. The solar radiation incident on the paving of an urban canyon with surfaces of high solar reflectance can be up to three times greater than one with low reflectance. The low sky view factor area shows reduced long-wave radiation heat loss from urban elements regarding net thermal radiation. Furthermore, the deep urban canyon ($H/W > 2$) showed more sensitivity to the surface's solar reflectance changes than a less dense area.

Keywords: urban microclimate, urban heat island, solar reflectance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema das camadas da escala vertical da atmosfera urbana.....	29
Figura 2 - Esquema de fluxos em um volume de controle em espaço urbano	30
Figura 3 - Fluxo de radiação (solar e onda longa) nas fachadas norte e sul na edificação isolada e em diferentes razões H/W (<i>aspect ratio</i>) do cânion urbano	34
Figura 4 - Parâmetros morfológicos de densidade horizontal (compacidade) e vertical urbana	34
Figura 5 - Fluxograma da metodologia	56
Figura 6 - Localização geográfica do município de Balneário Camboriú, Santa Catarina	57
Figura 7 - Média mensal das temperaturas máxima, média e mínima diárias, e média mensal da umidade relativa do ar de Navegantes-SC.....	58
Figura 8 - Mapa de distribuição de usos de Balneário Camboriú (sem escala).....	59
Figura 9 - Mapa da região central de Balneário Camboriú com identificação das áreas A e B (sem escala)	60
Figura 10 - Área A com classificação das edificações em número de pavimentos, identificação da área simulada e os trechos de rua avaliados	61
Figura 11 - Cânions urbanos da área A	62
Figura 12 - Fator de visão do céu na área A simulada no ENVI-met.....	63
Figura 13 - Área B com classificação das edificações em número de pavimentos, identificação da área simulada e os trechos de rua avaliados	64
Figura 14 - Vista das ruas simuladas da área B.....	65
Figura 15 - Fator de visão do céu na área B simulada no ENVI-met.....	65
Figura 16 - Identificação dos pontos de monitoramento das áreas A e B em Balneário Camboriú-SC	69
Figura 17 - Equipamentos instalados nos pontos de monitoramento durante o período de inverno	70
Figura 18 - Localização das estações meteorológicas próximas e pontos de monitoramento .	72
Figura 19 - Esquema do modelo de cálculo da transferência de calor de um elemento no ENVI-met v.4.4.6	74
Figura 20 - Composição da parede de bloco cerâmico com argamassa interna e externa criada no modelo ENVI-met	77
Figura 21 - Composição da cobertura de fibrocimento e laje maciça de concreto criada no modelo ENVI-met	78

Figura 22 - Vista aérea da área A pela a) imagem de satélite e b) modelagem tridimensional no ENVI-met. O ponto vermelho mostra a localização do receptor	80
Figura 23 - Vista aérea da área B pela a) imagem de satélite e b) modelagem tridimensional no ENVI-met. O ponto vermelho mostra a localização do receptor	80
Figura 24 - Diagrama de caixa (box plot) dos indicadores de desempenho utilizados em artigos de validação do programa ENVI-met para a variável de temperatura do ar.	86
Figura 25 - Cenários de refletância solar das superfícies	88
Figura 26 - Mapa de fatores de visão do céu (FVC) em z=1,5 m e identificação da localização dos receptores da área A utilizados para análise dos resultados dos cenários paramétricos	90
Figura 27 - Mapa de fatores de visão do céu (FVC) em z=1,5 m e identificação da localização dos receptores da área B utilizados para análise dos resultados dos cenários paramétricos	91
Figura 28 - Localização do cânion urbano A na vista aérea e vista do corte com identificação das células das paredes esquerda (E) e direita (D), e do solo selecionadas para os cálculos ...	92
Figura 29 - Localização do cânion urbano B na vista aérea e vista do corte com identificação das s das paredes esquerda (E) e direita (D), e do solo selecionadas para os cálculos.....	93
Figura 30 - Dados completos de temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR) nos pontos de monitoramento e estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes durante o período de inverno	96
Figura 31 - Temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR) nos pontos de monitoramento e estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes durante o período de inverno	97
Figura 32 - Temperatura do ar média por hora nos pontos A1, A2 e B, e estação de Itajaí no período de inverno	98
Figura 33 - Intensidade das ICUs média diária no período de inverno com referência de Itajaí	99
Figura 34 - Dados completos de temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR) nos pontos de monitoramento e estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes durante o período de primavera	101
Figura 35 - Temperatura do ar média por hora nos pontos A1, A2 e B, e estação de Itajaí no período da primavera	102
Figura 36 - Intensidade das ICUs média diária no período da primavera com referência de Itajaí	103
Figura 37 - Nebulosidade em diferentes níveis de nuvens durante o período de inverno - de 25/06/2021 a 08/07/2021	104

Figura 38 - Direção e velocidade do vento nos dias 29/06/21, 30/06/21 e 03/07/21. Linhas pontilhadas representam a média diária.....	105
Figura 39 - Perfil diário de temperatura do ar e umidade relativa do ar utilizado no modo <i>simple forcing</i> no ENVI-met v.4.4.6 nas simulações de inverno.....	106
Figura 40 - Radiação solar global no dia 30/06 na estação meteorológica de Indaial, segundo cálculo do ENVI-met (1,0) e ENVI-met ajustado em 0,9.	107
Figura 41 - Nebulosidade em diferentes níveis de nuvens durante o período de primavera - de 10/11/2021 a 23/11/2021	108
Figura 42 - Direção e velocidade do vento no dia 22/11. Linhas pontilhadas representam a média diária.....	109
Figura 43 - Perfil diário de temperatura do ar e umidade relativa do ar utilizado no modo <i>simple forcing</i> no ENVI-met v.4.4.6 nas simulações de primavera.....	110
Figura 44 - Radiação solar global no dia 22/11 na estação meteorológica de Florianópolis e em Balneário Camboriú segundo cálculo do ENVI-met (1,0) e ENVI-met ajustado em 1,2	110
Figura 45 - Perfis de temperatura do ar simulados e observados e coeficiente de determinação (R^2) nos pontos de monitoramento A1, A2 e B, para validação dos resultados ENVI-met referentes ao dia 30/06.....	113
Figura 46 - Perfis de temperatura do ar simulados e observados e coeficiente de determinação (R^2) nos pontos de monitoramento A1, A2 e B, para validação dos resultados ENVI-met referentes ao dia 22/11.....	116
Figura 47 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no período de inverno.....	118
Figura 48 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no período da primavera.....	119
Figura 49 - Fator de visão do céu (FVC) calculado pelo ENVI-met 4.4.6 – plano y/z, corte em $x = 97$ m.....	120
Figura 50 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no dia 30/06/2021 para os dados simulados (linha contínua) e os observados em campo (linha tracejada)	120
Figura 51 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no dia 22/11/2021 para os dados simulados (linha contínua) e os observados em campo (linha tracejada)	121
Figura 52 - Temperatura superficial pelo ENVI-met v 4.4.6 das paredes da edificação na localização A1 e A2 no dia 30/06/2021	122

Figura 53 - Temperatura superficial pelo ENVI-met v 4.4.6 das paredes da edificação na localização A1 e A2 no dia 22/11/2021	122
Figura 54 - Perfil vertical da temperatura do ar simulada no ENVI-met v.4.4.6 no plano y/z, corte em x = 97 m, no dia 30/06/2021 às a) 4h e b) 16h	123
Figura 55 - Perfil vertical da temperatura do ar simulada no ENVI-met v.4.4.6 no plano y/z, corte em x = 97 m, no dia 22/11/2021 às a) 4h e b) 16h	124
Figura 56 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da fachada: alta refletância (AR), média refletância (MR) e baixa refletância (BR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 30/06/2021	126
Figura 57 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da pavimentação das ruas: concreto e asfalto às 8h, 12h e 16h do dia 30/06/2021	127
Figura 58 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar das coberturas: alta refletância (AR) e média refletância (MR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 30/06/2021	128
Figura 59 - Corte em x=75 metros (plano y-z) dos fatores de visão do céu (FVC) pelo ENVI-met 4.4.6. com identificação dos receptores R1, R2 e R3 da área A.....	129
Figura 60 - Distribuição da temperatura do ar (z = 1,5m) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 8h e 12h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021	132
Figura 61 - Distribuição da temperatura do ar (z = 1,5m) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 16h e 20h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021	133
Figura 62 - Temperatura média do ar (z= 1,5m) dos cenários paramétricos nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) - simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021.....	134
Figura 63 - Variação da temperatura do ar entre os cenários 11 e 2 pelo modelo ENVI-met nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) a uma altura de 1,5 metros em relação ao solo no dia 30/06/2021	135
Figura 64 - Temperatura superficial e radiação de onda curta incidente e absorvida pela superfície das paredes do lado esquerdo (E) e do lado direito (D) dos cânions A e B nos cenários 2 e 11 - dia 30/06/2021 pelo ENVI-met v.4.4.6	136

Figura 65 - Temperatura superficial média e radiação de onda curta incidente média no solo dos cânions A e B nos cenários paramétricos 2 e 11 pelo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 30/06/2021	137
Figura 66 - Porcentagem do tipo de radiação diária de onda curta incide na pavimentação dos cenários 2 e 11 nos cânions urbanos A e B segundo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 30/06/2021	138
Figura 67 - Temperatura superficial e radiação de onda longa líquida das paredes e solo dos cânions urbanos A e B nos cenários 2 e 11 (simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021).....	140
Figura 68 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da fachada: alta refletância (AR), média refletância (MR) e baixa refletância (BR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 22/11/2021	142
Figura 69 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da pavimentação das ruas: concreto e asfalto às 8h, 12h e 16h do dia 22/11/2021	143
Figura 70 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar das coberturas: alta refletância (AR) e média refletância (MR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 22/11/2021	144
Figura 71 - Distribuição da temperatura do ar ($z = 1,5\text{m}$) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 8h e 12h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021	148
Figura 72 - Distribuição da temperatura do ar ($z = 1,5\text{m}$) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 16h e 20h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021	149
Figura 73 - Temperatura média do ar ($z = 1,5\text{m}$) dos cenários paramétricos nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) - simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021.....	150
Figura 74 - Variação da temperatura do ar entre os cenários 11 e 2 pelo modelo ENVI-met nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) a uma altura de 1,5 m em relação ao solo no dia 22/11/2021	151
Figura 75 - Temperatura superficial e radiação de onda curta incidente e absorvida pela superfície das paredes do lado esquerdo (E) e do lado direito (D) dos cânions A e B nos cenários 2 e 11 - dia 22/11/2021 pelo ENVI-met v.4.4.6	153

Figura 76 - Temperatura superficial média e radiação de onda curta incidente média no solo dos cânions A e B nos cenários paramétricos 2 e 11 pelo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 22/11/2021	154
Figura 77 - Porcentagem do tipo de radiação diária de onda curta incide na pavimentação dos cenários 2 e 11 nos cânions urbanos A e B segundo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 22/11/2021	155
Figura 78 - Temperatura superficial e radiação de onda longa líquida das paredes e solo dos cânions urbanos A e B nos cenários 2 e 11 (simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021).....	157
Figura 79 - Intensidade média das ICU (em °C) diurnas e noturnas nos pontos A1, A2 e B durante os períodos de medição de inverno e primavera.....	159
Figura 80 - Tipo de superfície com maior diferença estatística da temperatura do ar entre seus níveis de refletância solar nos pontos R1-R6 pelas simulações dos cenários paramétricos (ENVI-met v.4.4.6).....	163

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos nacionais que corroboram com generalizações da	46
Quadro 2 - Especificações HOBO MX1101 Data Logger	69
Quadro 3 - Propriedades dos elementos de parede e cobertura utilizados nas simulações	75
Quadro 4 - Diferenças entre níveis das configurações iniciais de simulação no ENVI-met v.4.4.6	81
Quadro 5 - Valores de $S = V_H/V_{10}$ para várias alturas (H) em áreas urbanas e suburbanas.....	83
Quadro 6 - Parâmetros de inicialização para simulações de inverno pelo ENVI-met 4.4.6 ..	107
Quadro 7 - Parâmetros de inicialização para simulações de primavera pelo ENVI-met 4.4.6	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métricas morfológicas das áreas A e B	60
Tabela 2 - Constantes de calibração dos termo-higrômetros utilizados em campo.....	71
Tabela 3 - Materiais e parâmetros utilizados para compor as camadas dos elementos de.....	76
Tabela 4 - Refletâncias adotadas em cada elemento	89
Tabela 5 - Medidas quantitativas do desempenho do modelo ENVI-met v.4.4.6 e as datas observadas para temperatura do ar no período de inverno	114
Tabela 6 - Medidas quantitativas do desempenho do modelo ENVI-met v.4.4.6 e as datas observadas para temperatura do ar no período da primavera	117
Tabela 7 - Valor-p da temperatura do ar pelo modelo ENVI-met segundo o agrupamento por tipo de superfície (fachada, pavimentação e cobertura) no dia 30/06/2021	130
Tabela 8 - Valor-p da temperatura do ar pelo modelo ENVI-met segundo o agrupamento por tipo de superfície (fachada, pavimentação e cobertura) no dia 22/11/2021	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ICU	Ilha de Calor Urbano
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
SIG	Sistema de Informações Geográficas
H/W	Razão entre altura média das edificações e largura da rua
FVC	Fator de Visão do Céu
PCI	<i>Park Cool Island</i>
RANS	Reynolds <i>Averaged</i> Navier-Stokes
PET	<i>Physiological Equivalent Temperature</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
IVS	<i>Indexed View Sphere</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo Geral.....	26
1.1.2	Objetivos Específicos	26
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	28
2.1	CLIMA URBANO	28
2.1.1	Balanco de Energia	30
2.1.2	Fenômenos Climáticos.....	32
2.1.2.1	<i>Ilha de Calor Urbano</i>	32
2.1.2.2	<i>Ilha de Frescor</i>	36
2.1.3	Efeito da refletância solar	37
2.1.4	Estudos realizados no Brasil.....	40
2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (ENVI-met)	46
2.2.1	Métricas de desempenho	52
2.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	53
3	METODOLOGIA.....	55
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	56
3.1.1	Definição das áreas estudadas	59
3.1.1.1	<i>Área A.....</i>	61
3.1.1.2	<i>Área B.....</i>	63
3.1.2	Definição dos períodos de estudo e dias simulados.....	66
3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS	67
3.2.1	Geometria urbana.....	67
3.2.2	Medição de temperatura do ar e umidade relativa em campo.....	68
3.2.2.1	<i>Constante de calibração.....</i>	70

3.2.3	Condições meteorológicas	71
3.2.4	Processamento dos dados	73
3.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	74
3.3.1	Modelagem	74
3.3.2	Parâmetros de simulação	80
3.3.3	Calibração	84
3.3.4	Cenários paramétricos	87
3.4	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	95
4.1	MEDIÇÕES EM CAMPO.....	95
4.1.1	Inverno.....	95
4.1.2	Primavera	100
4.2	DEFINIÇÃO DOS DIAS E PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES	103
4.2.1	Inverno.....	103
4.2.2	Primavera	108
4.3	VALIDAÇÃO.....	111
4.3.1	Inverno.....	112
4.3.2	Primavera	115
4.4	PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA	117
4.5	CENÁRIOS PARAMÉTRICOS	125
4.5.1	Inverno.....	126
4.5.1.1	<i>Diferença entre os grupos de refletância solar</i>	<i>126</i>
4.5.1.2	<i>Distribuição da temperatura do ar.....</i>	<i>131</i>
4.5.1.3	<i>Radiação solar e térmica.....</i>	<i>136</i>
4.5.2	Primavera	141
4.5.2.1	<i>Diferença entre os grupos de refletância solar</i>	<i>141</i>
4.5.2.2	<i>Distribuição da temperatura do ar.....</i>	<i>147</i>

4.5.2.3	<i>Radiação solar e térmica</i>	152
4.6	SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	158
5	CONCLUSÕES	168
5.1	LIMITAÇÕES	171
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	171
	REFERÊNCIAS	173
	APÊNDICE A - CONSTRUÇÃO DO ABRIGO METEOROLÓGICO	183

1 INTRODUÇÃO

Mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas (ONU, 2018). No Brasil, segundo o último censo demográfico, de 2010, 84% da população é urbana (IBGE, 2011). A movimentação de pessoas para os centros urbanos somada ao aumento da população mundial é responsável pelo elevado adensamento e verticalização desses espaços. Em muitas cidades, este crescimento ocorreu em curto espaço de tempo, de modo que seus habitantes já experienciam problemas ambientais (ROTH, 2007).

A interação das cidades e as atividades humanas com a atmosfera sobrejacente conceitua o clima urbano (OKE *et al.*, 2017a). O uso e a ocupação do solo alteram o balanço energético e de radiação de modo que são responsáveis pela diferenciação climática entre espaços com diferentes níveis de urbanização. A morfologia urbana, os materiais construtivos que a compõe, o adensamento e o nível de verticalização modificam os fluxos de reflexão, absorção e armazenamento de energia (UGEDA JÚNIOR; AMORIM, 2016). Ainda, fatores geográficos, como a latitude e fatores climáticos como a maritimidade e a continentalidade, têm influência no desenvolvimento do clima urbano de cada local. O fenômeno da ilha de calor urbano (ICU ou UHI - *Urban Heat Island*), caracterizado pelo aumento da temperatura do ar nas cidades em relação ao seu entorno rural (SANTAMOURIS, 2006), é uma manifestação bastante documentada do clima urbano.

A modificação do clima pelas cidades tem implicações em pelo menos duas áreas: na saúde humana e no desempenho energético de edificações. Sobre os problemas relacionados à saúde, estudos indicam que as ilhas de calor estão relacionadas com a concentração da poluição no ar (SARRAT *et al.*, 2006), dado ao nível de adensamento que dificulta a dispersão desses gases, e aumentam a produção de *smog* (nevoeiro de fumaça) (AKBARI; KONOPACKI, 2005). Stathopoulou *et al.* (2008) encontraram forte correlação entre a temperatura urbana e a concentração de ozônio na atmosfera. Patz *et al.* (2005) relacionam as mudanças climáticas com o aumento de morbidade e mortalidade humana, apontando que as ilhas de calor urbana podem intensificar eventos climáticos extremos. Além disso, Harlan *et al.* (2006) evidenciam que as populações com baixas condições socioeconômicas tendem a sofrer mais com estresse térmico, inclusive pela falta de recursos para enfrentar o calor extremo.

Em relação à demanda energética, as temperaturas mais elevadas das ilhas de calor podem reduzir o consumo de energia no inverno, porém a aumentam no verão (WATKINS *et al.*, 2002). Previsões futuras indicam a tendência de aumentar a carga térmica de resfriamento

das edificações, devido às mudanças climáticas e o nível de urbanização das cidades (KOLOKOTRONI *et al.*, 2012). Santamouris *et al.* (2015), com base em quinze estudos de diferentes cidades e países, mostraram que o acréscimo da demanda energética por grau de temperatura aumentado varia entre 0,5% e 8,5%. Além disso, o potencial de resfriamento por ventilação natural é reduzido, uma vez que há significativa redução da velocidade do vento em cânions urbanos (SANTAMOURIS, 2007). O entorno urbano também pode influenciar na demanda energética da iluminação, visto que os fluxos de radiação são amplamente modificados (MOONEN *et al.*, 2012), ocasionando maior dependência de iluminação artificial (KRÜGER; SUGA, 2009).

As causas das ilhas de calor estão diretamente ligadas à geometria do local e aos materiais construtivos. As estruturas urbanas afetam o microclima local pela modificação dos fluxos de ar, do balanço de radiação e da interação humana. O nível de urbanização de uma área influencia a intensidade das ilhas de calor a que estarão sujeitas. Stewart e Oke (2012) criaram um sistema de classificação das áreas segundo a geometria e a materialidade do local, e observaram que a diferença entre classes pode chegar a 5 °C. Salvati *et al.* (2019) identificaram a relação entre os índices morfológicos e as temperaturas do ar para diferentes áreas em um clima mediterrâneo. Os autores concluíram que entre as variáveis: morfologia, vegetação, albedo e calor antropogênico, a morfologia tem o maior impacto no clima urbano.

Há dois grandes grupos de estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas existentes. O primeiro consiste em aumentar a evapotranspiração no espaço urbano, através da incorporação de vegetação, telhados verdes e pavimentos permeáveis (AKBARI; KOLOKOTSA, 2016). O segundo grupo de estratégias trata de aumentar a refletância solar dos materiais, com o objetivo de manter as temperaturas superficiais baixas, reduzindo a liberação de calor sensível no ambiente (SANTAMOURIS; YUN, 2020). Na prática, se dá por meio da utilização de materiais frios, que possuem elevada refletância solar e elevada emitância térmica.

A incorporação de vegetação pelo plantio de árvores auxilia na redução das temperaturas ao atuar como elemento de sombreamento e como organismo fotossintetizante, que realiza evapotranspiração (SHINZATO; DUARTE, 2018). Bowler *et al.* (2010) constataram que a presença de parques com vegetação no espaço urbano reduz a temperatura do ar em média em 1 °C. Santamouris *et al.* (2017) observaram uma redução média de 1,66 °C no pico de temperatura do ar em projetos que utilizaram vegetação de diferentes maneiras (telhados verdes, plantio de árvores e grama). A intensidade do efeito da implementação de

dispositivos que retém água depende do projeto de aplicação e da morfologia do entorno urbano (COUTTS *et al.*, 2012).

A aplicação de materiais com elevada refletância solar pode ocorrer em coberturas, pavimentações e nas fachadas das edificações. Sabe-se que o aumento da refletância solar das superfícies urbanas também aumenta o albedo urbano, reduzindo a radiação solar absorvida e consequentemente a temperatura do ar (SALVATI *et al.*, 2021). Entretanto, a efetividade deste grupo de estratégias também depende de outros fatores, como a morfologia urbana e o clima local. Os efeitos da aplicação de materiais frios no microclima urbano não são lineares, pelo menos para as pavimentações e fachadas (NAZARIAN *et al.*, 2019). Isto é, o aparente benefício do aumento do albedo urbano na temperatura do ar pode ser amortecido pelo efeito das múltiplas reflexões de radiação em um cânion.

A substituição de coberturas convencionais para coberturas frias reduzem as temperaturas do ar em 1,3 °C em média (SANTAMOURIS *et al.*, 2017). Herath *et al.* (2021) constataram que o aumento da refletância solar das coberturas de 0,2 para 0,85 apresentou uma redução de 1,29 °C na temperatura máxima, reduzindo os dias de muito calor (>40 °C) em 50%, na cidade de Melbourne, Austrália. O impacto da modificação das coberturas na temperatura do ar é reduzido à medida que a altura das edificações aumenta, devido à distância entre o nível da cobertura e da rua (SANTAMOURIS *et al.*, 2017; SINSEL *et al.*, 2021).

O aumento da refletância solar das pavimentações tem maior potencial de redução da intensidade das ilhas de calor urbanas. Santamouris *et al.* (2017) encontraram que a cada 0,1 de aumento da refletância solar da pavimentação, a temperatura média do ar reduz em 0,27 °C. Jia e Wang (2021) simularam o efeito de seis estratégias de mitigação das ilhas de calor na atmosfera, no conforto térmico e na caminhabilidade (*walkability*) em Hong Kong, e destacam que estas qualidades não estão necessariamente associadas. Embora os pavimentos frios reduzam as temperaturas do ar, também proporcionam um aumento na temperatura radiante média, reduzindo o conforto térmico externo (TALEGHANI; BERARDI, 2018). Além disso, a maior refletância destas superfícies pode aumentar as temperaturas superficiais das paredes e a temperatura operativa interna das edificações do entorno (SALVATI *et al.*, 2021).

A estratégia de utilizar superfícies com alta refletância solar nas fachadas também é sugerida para reduzir a carga de resfriamento de edificações. Esta sugestão é baseada em análises de edificações isoladas, desconsiderando a realidade urbana do entorno (ALLEGRIANI; DORER; CARMELIET, 2016). A preocupação acerca dos efeitos da aplicação desta estratégia para mitigação das ilhas de calor urbano e sua consequência no consumo energético das cidades

é mais recente (NAZARIAN *et al.*, 2019; SALVATI *et al.*, 2021). Assim como a aplicação de superfícies frias nas pavimentações, o aumento da refletância solar das fachadas aumenta a radiação solar refletida, reduzindo o conforto térmico no nível do pedestre.

Segundo Salvati *et al.* (2021), o aumento da refletância solar das paredes tem menor influência no albedo urbano e na temperatura do ar urbana devido à menor disponibilidade solar em superfícies verticais. No clima tropical de Singapura, as simulações de Nazarian *et al.* (2019) sugerem que há um ponto crítico em que o aumento da refletância deixa de ser benéfico em relação a carga térmica total em um cânion urbano profundo. Este ponto depende da morfologia urbana, do desenho e da tipologia da edificação e seus padrões de uso.

Ao mesmo tempo em que a envoltória modifica o desempenho térmico de uma edificação, se altera também o balanço de energia e, conseqüentemente, o clima urbano. Esta relação de mão-dupla deve ser considerada quando se estuda estratégias de mitigação das ilhas de calor urbano. Bouyer, Inard e Musy (2011) avaliaram o desempenho energético de uma edificação com considerações progressivas acerca do microclima urbano pelo acoplamento de modelos. Os autores concluíram que a radiação solar é o parâmetro que têm maior influência nas cargas térmicas de uma edificação.

Há diferentes métodos que permitem a avaliação de um clima local com diferentes enfoques, cada qual com conveniências e limitações próprias. Os métodos mais utilizados são a medição em campo, o sensoriamento remoto e a simulação computacional. As medições em campo são limitadas no tempo e espaço, e representam o ambiente real, sem controle das variáveis, o que pode ofuscar as tendências das observações (YANG; LI, 2015). O método de sensoriamento remoto se utiliza do tratamento de imagens aéreas para estimar as temperaturas superficiais. Este método é baseado nas propriedades térmicas e óticas das superfícies urbanas e não urbanas, e não permite a aferição da temperatura do ar. Por fim, as simulações computacionais baseiam-se em modelos numéricos para estimar as interações entre superfícies e atmosfera.

Entre os modelos que simulam as interações entre a morfologia e clima urbano estão: Grasshopper, CitySim Pro, Rayman, PALM-4U, UWG, Solene e ENVI-met. Considerando a complexidade das interações urbanas e as limitações computacionais, cada modelo é baseado em uma série de suposições e simplificações (NAZARIAN *et al.*, 2019). O propósito do usuário deve orientar a escolha do software adequado. O modelo CitySim, por exemplo, é focado no consumo energético na escala urbana e utilizado na avaliação da instalação de painéis fotovoltaicos (VÁZQUEZ-CANTELI *et al.*, 2019). O *Urban Weather Generator* (UWG), por

sua vez, estima através de balanços de energia as condições microclimáticas médias no nível da rua, a partir do processamento dos dados meteorológicos de uma estação não urbana (MAO; NORFORD, 2021).

Os modelos baseados na dinâmica dos fluidos computacional (*CFD – Computational Fluid Dynamics*) apresentam vantagens em relação aos modelos de balanço de energia (*EBM – Energy Balance Model*), como o acoplamento de velocidades e temperaturas, umidade e poluição (TOPARLAR *et al.*, 2017). Entre os simuladores CFD, o *software* ENVI-met é o mais utilizado para análises microclimáticas (TOPARLAR *et al.*, 2017). Crank *et al.* (2018) sugerem que a popularidade do programa ENVI-met se deve a interface intuitiva (*user friendly*), e seu diferencial é a consideração simultânea dos processos de interação entre superfícies, vegetação e a atmosfera.

Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018), em um estudo de revisão, mostram que o modelo ENVI-met é capaz de reproduzir adequadamente a temperatura do ar, ainda que apresente limitações quanto ao prognóstico de outras variáveis. Validações realizadas em países com diferentes condições climáticas e espaços urbanos sustentam esta afirmação (ACERO; ARRIZABALAGA, 2018; MORAKINYO *et al.* 2019). No Brasil, Gusson e Duarte (2016) e Muniz-Gäal *et al.* (2020) validaram as simulações, por meio da comparação dos resultados simulados com os medidos em campo, em áreas de dois bairros na cidade de São Paulo (SP) e em Campinas (SP), respectivamente.

Após a validação de um modelo computacional, pode-se utilizá-lo como um modelo de previsão para explorar alternativas ou configurações de cenários futuros pela modificação de seus parâmetros de entrada (PACIFICI, 2019). Este uso de modelos computacionais permite a avaliação da efetividade da aplicação de diferentes estratégias de melhoria do clima urbano com maior controle dos parâmetros e por um custo mais baixo (CRANK *et al.*, 2018; SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017).

O balanço de radiação possui componentes primária e secundária. As componentes secundárias de radiação dizem respeito às múltiplas reflexões entre os elementos urbanos, e apresentam maior complexidade de cálculo (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2021). Por este motivo, parte dos modelos de simulação microclimática e de desempenho energético de edificações apresentam fluxos de radiação simplificados, baseados apenas nas componentes primárias. O programa ENVI-met permite a utilização de um esquema de cálculo (IVS), que calcula as radiações secundárias com maior precisão (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2021).

Neste contexto, o presente trabalho propõe avaliar o microclima urbano através do modelo ENVI-met em uma cidade brasileira em dias representativos de duas estações do ano: inverno e primavera. Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018) observaram que a maioria dos estudos com o ENVI-met utilizaram o modelo em condições de calor durante a estação de verão. Além disso, apenas 5,1% dos trabalhos foram realizados em cidades da América Latina (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018).

A cidade de Balneário Camboriú - SC, objeto de estudo do trabalho, se destaca pelos arranha-céus recentemente construídos e ainda em construção, responsáveis por sombrear grandes áreas. Segundo Yang *et al.* (2017), áreas de alta densidade e construções altas, quando apresentam baixo calor antropogênico, podem experimentar ilhas de frescor durante o dia. Para além da validação, as medições em campo permitem quantificar a intensidade do aquecimento urbano no cenário atual em áreas com diferentes uso e ocupação do solo.

Por meio do uso de simulações computacionais como modelos de previsão, o efeito de aplicação da estratégia de aumento da refletância solar para mitigação das ilhas de calor é avaliado em geometrias reais. Os impactos no balanço de radiação da aplicação de materiais frios nas coberturas, fachadas e pavimentação em diferentes combinações também são mensurados. Assim, busca-se a compreensão de como as edificações interagem entre si e afetam o microclima urbano.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar o microclima urbano de uma cidade litorânea em região de clima subtropical, através de medições locais e simulações computacionais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir duas áreas características, com diferentes geometrias, da região central da cidade de Balneário Camboriú-SC;
- Quantificar a intensidade das ilhas de calor urbano, avaliando a temperatura do ar obtida por meio de medições *in loco*;

- Configurar e validar o modelo ENVI-met em dias representativos do período de inverno e da primavera;
- Analisar o efeito da geometria urbana no microclima local;
- Analisar o efeito das refletâncias das pavimentações, fachadas e coberturas das edificações no microclima urbano.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 contextualiza a relevância do presente estudo por meio de um breve histórico, da exposição dos conceitos básicos e das lacunas relacionadas ao clima urbano. Também apresenta as justificativas, o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

O capítulo 2 contém a revisão de literatura. Neste capítulo, os conceitos essenciais para a compreensão do clima urbano e do estado da arte do tema são apresentados. Abordando também os princípios da simulação computacional com o modelo ENVI-met.

O capítulo 3 contém a metodologia utilizada para atingir os objetivos definidos no primeiro capítulo. O método do trabalho foi dividido em quatro partes: a caracterização do local de estudo, o levantamento de dados, os procedimentos relacionados às simulações computacionais e os procedimentos de análise dos resultados.

O capítulo 4 apresenta os resultados referentes às medições em campo, aos procedimentos de definição dos dias simulados, às definições dos parâmetros das simulações adotados para a validação do modelo ENVI-met, e às simulações paramétricas.

Finalmente, o capítulo 5 dispõe as conclusões do trabalho, com reconhecimento das limitações envolvidas e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas as premissas relevantes para o entendimento da climatologia urbana. Primeiro, conceitua-se o clima urbano e as diferentes escalas em que se observa a influência das cidades sobre as variáveis climáticas. Os fenômenos climáticos das ilhas de calor e de frescor são contextualizados a partir da física urbana e do balanço de energia. O efeito da refletância solar no clima urbano é apresentado por meio de trabalhos com diferentes aplicações desta estratégia de mitigação das ilhas de calor urbanas. Ainda, revisou-se estudos brasileiros sobre a temática, conduzidos em diferentes regiões do país e com diferentes metodologias de avaliação do clima urbano. Por fim, o *software* ENVI-met é apresentado com foco nos pontos importantes para sua validação.

2.1 CLIMA URBANO

A modificação da superfície terrestre pelo processo de urbanização compreende alterações quanto à forma, materiais construtivos, uso e ocupação do solo, entre outros fatores. Essa diferenciação do ambiente urbano altera os fluxos de energia, gerando anomalias térmicas e higrométricas (UGEDA JÚNIOR; AMORIM, 2016). Naturalmente, o clima das cidades é influenciado por essas alterações, originando condições climáticas próprias e a climatologia urbana.

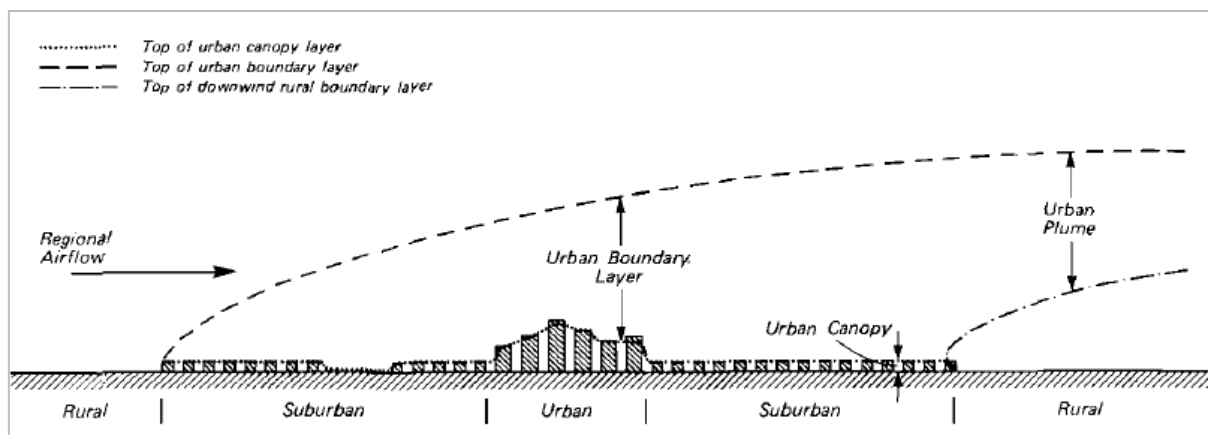
A primeira consideração acerca do clima urbano é em relação à escala de interesse de estudo. A medida em que a escala varia, os balanços de energia também são alterados, incorporando novos elementos e reduzindo a relevância de outros. A divisão horizontal de escalas pode ser em microescala, escala local, mesoescala e macroescala. A microescala compreende os fenômenos climáticos a nível do pedestre, onde são considerados um pequeno conjunto de edificações e área do espaço urbano. Já a escala local, engloba uma área maior, correspondente aos bairros. A mesoescala abrange áreas maiores até cidades inteiras. Por fim, a macroescala abrange uma região ampla e está relacionada com as condições climáticas e seus sistemas atmosféricos.

Oke (1976) propôs uma divisão vertical em camada do dossel urbano (*urban canopy layer*) e camada limite urbana (*urban boundary layer*). Na primeira, camada do dossel, são considerados os processos entre o solo e o nível médio das coberturas. Já a camada limite urbana, localiza-se acima da primeira, portanto acima das coberturas, e suas características são

afetadas pela camada inferior de dossel. Enquanto o balanço energético da camada do dossel urbano é influenciado por processos da microescala, específicos do local, o da camada limite urbana é afetado pela mesoescala ou escala local, e seu respectivo uso e ocupação do solo (ARNFIELD, 2003).

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da proposta de escala vertical por Oke (1976). A pluma urbana (*urban plume*), indicada na Figura 1, demonstra a influência do clima urbano nas áreas adjacentes por meio do alongamento da camada limite devido ao vento. Há, ainda, subcamadas na camada limite urbana, como a subcamada de rugosidade, localizada logo acima do nível de cobertura e caracterizada pelos fluxos de ar de diferentes elementos que interagem entre si, sendo altamente influenciados pela camada do dossel. As superfícies urbanas, sua rugosidade e distribuição espacial, contribuem para o desenvolvimento de subcamadas de rugosidade profundas. Acima desta está a subcamada inercial, onde os fluxos de ar são mais regulares e livres de interferências (ARNFIELD, 2003).

Figura 1 - Esquema das camadas da escala vertical da atmosfera urbana.



Fonte: Oke (1976).

A segunda consideração acerca do clima urbano deve-se a classificação adequada das áreas construídas. Há certa subjetividade entre os conceitos de área urbana e rural, uma vez que são insuficientes para definir propriamente um espaço. Em 2012, Stewart e Oke propuseram uma classificação denominada zona climática local (*Local Climate Zone - LCZ*) que diferencia os espaços considerando sua estrutura construtiva, cobertura da superfície e atividades humanas (STEWART; OKE, 2012). A utilização de uma classificação única pode auxiliar a interpretação de resultados, correlacionando os fenômenos climáticos com o uso e ocupação do solo.

2.1.1 Balanço de Energia

O balanço energético demonstra as entradas e saídas de energia de um sistema, baseado na lei de conservação de energia. Por meio do balanço, identifica-se a relevância de cada parte em relação ao todo, permitindo aferir as causas de desequilíbrios. O balanço de energia em uma superfície é dado pela Equação 1.

$$Q^* = Q_G + Q_H + Q_E \quad (1)$$

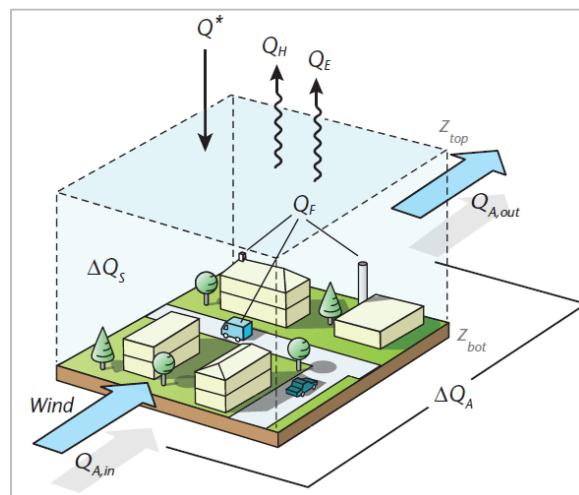
Onde, Q^* é o fluxo de calor por radiação térmica de ondas longas e curtas, Q_G é o fluxo de calor por condução na superfície, Q_H é o fluxo de calor sensível e Q_E é o de calor latente entre a superfície e a atmosfera.

Para a consideração do espaço urbano e as estruturas que o compõe, o balanço energético deve ser equacionado para um volume de controle, de modo que represente adequadamente as interações entre as várias superfícies. Assim, o balanço energético em um volume de controle no espaço urbano pode ser resumido satisfatoriamente pela Equação 2, esquematicamente demonstrada na Figura 2.

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (2)$$

Onde, além das variáveis mostradas anteriormente, Q_F é o calor antropogênico, ΔQ_S é o fluxo calor armazenado e ΔQ_A é a transmissão do calor pelo deslocamento de massa atmosférica no sentido horizontal. O fluxo de calor armazenado (ΔQ_S) representa a energia armazenada em todos os elementos que compõe o espaço urbano, como as edificações, vegetação, pavimentação, entre outros.

Figura 2 - Esquema de fluxos em um volume de controle em espaço urbano



Fonte: Oke *et al.*, (2017c).

O excesso de radiação (Q^*) e o calor antropogênico (Q_F) no volume de controle são absorvidos pelas superfícies em forma de condução (Q_G), parcela relacionada com o calor armazenado (ΔQ_S) da Equação 2, ou por convecção (Q_H e Q_E). As propriedades óticas e térmicas dos materiais definem a quantidade de calor absorvido e armazenado, bem como a capacidade de retenção e como se dá a posterior liberação para o ambiente.

A radiação líquida (Q^*) representa o efeito das interações radiantes na superfície analisada, e pode ser entendida como a taxa de energia necessária para manter a superfície em temperatura constante (BERGMAN *et al.*, 2017). Assim, a radiação líquida procede do balanço entre as radiações de onda curta e onda longa que entram e saem da superfície. A radiação de onda curta é proveniente, principalmente, do sol. A incidência de radiação solar depende diretamente da relação geométrica entre o sol e a Terra, da latitude, hora do dia e período do ano. A radiação de onda longa, por sua vez, está relacionada com o poder emissivo e a refletividade da atmosfera e das superfícies (OKE *et al.*, 2017c).

O balanço de radiação em áreas não urbanas e urbanas se difere principalmente na proporção entre interações de onda longa e curta. Enquanto áreas não urbanas recebem mais radiação de onda curta devido às menores obstruções e sombreamento, as áreas urbanas recebem e emitem mais radiação de onda longa em consequência das múltiplas reflexões entre superfícies (FERREIRA *et al.*, 2012). A radiação líquida tende a ser positiva (ganho de calor pela superfície) durante o período diurno por causa da radiação solar incidente. Durante o período noturno, as superfícies que armazenaram calor durante o dia emitem radiação por onda longa.

O calor antropogênico é resultado da liberação de energia em forma de calor pelo uso das edificações, transportes e a atividade metabólica humana e animal. A importância de estimar o calor antropogênico é maior em locais de altas latitudes onde a radiação solar é menos intensa, de modo que o calor antropogênico pode até superar a radiação incidente total (OKE *et al.*, 2017b).

O fluxo de calor sensível (Q_H) é regido pela diferença de temperaturas entre superfície e atmosfera, essa troca de calor acontece de modo a equilibrar as temperaturas. O fluxo de calor latente (Q_E), por sua vez, está associado à energia utilizada para vaporizar a massa de água. Este fluxo é expressivo na presença de vegetação e corpos d'água, além de ser um importante elemento de redução da temperatura do ar, uma vez que a evaporação remove energia do ambiente, resfriando as superfícies e o ar próximo a elas (OKE *et al.*, 2017b).

A relação entre os fluxos de calor sensível e latente (Q_H/Q_E) é conhecida como razão de Bowen (β) e descreve o tipo de transferência de calor predominante. De maneira geral, quanto maior o suprimento de água, seja por meio de vegetação, corpos d'água ou precipitação, menor a razão de Bowen. Coutts, Beringer e Tapper (2007) demonstraram o impacto da presença de vegetação através de medições em diferentes zonas climáticas urbanas e uma zona rural sem irrigação na Austrália, onde constataram que a razão de Bowen foi significativamente menor ($\beta < 1$ na zona rural). Middel *et al.* (2012) também demonstraram a razão inversa entre vegetação e β em estudo realizado em cidades nos EUA. Roth (2007) destacou que esta relação é observada em diferentes climas.

Por fim, o fluxo de energia por advecção (ΔQ_A) representa a energia adicionada ou subtraída pela envoltória do volume, transportada pelos ventos. Usualmente, assume-se que a superfície urbana é suficientemente homogênea e o calor por advecção desprezível (OKE *et al.*, 2017b).

O balanço energético dos espaços, portanto, é função de características específicas do ambiente urbano, diferenciando-se conforme o balanço energético de cada área. A radiação solar pode ser um fator dominante em uma cidade equatorial, enquanto o calor antropogênico pode ser mais relevante em uma área adensada de edifícios altos, exemplificam Mirzaei e Haghighat (2010). A maneira com que se dá o balanço energético do espaço urbano explica a ocorrência dos fenômenos climáticos urbanos.

2.1.2 Fenômenos Climáticos

O presente trabalho concentra-se nas interações do meio urbano em micro escala, na camada do dossel urbano (*urban canopy layer*). Essas interações alteram o balanço energético das cidades originando fenômenos climáticos próprios, como as ilhas de calor e de frescor. A seguir, estes dois tópicos são apresentados para melhor compreensão da física urbana.

2.1.2.1 Ilha de Calor Urbano

As ilhas de calor urbano (ICU) são caracterizadas pelas maiores temperaturas no espaço urbano em relação ao seu entorno. O fenômeno é mensurado por meio da diferença de temperatura em uma área urbana e outra rural, em que o valor pode ser entendido como a intensidade. Há condições atmosféricas que podem favorecer o desenvolvimento das ilhas de

calor urbano. Momentos de céu limpo e baixas velocidades do vento são associados à estabilidade térmica e à maiores intensidades da ilha de calor urbano. A estabilidade térmica ocorre quando o perfil vertical de temperatura mostra o aumento de temperatura conforme a altura, indicando estagnação do ar frio no nível do solo (HEISLER; BRAZEL, 2015). Há, também, períodos do ano em que as ilhas de calor são mais evidentes, estes períodos variam conforme o local e as condições climáticas de macroescala.

Oke (1982) listou as possíveis causas das ilhas de calor na camada do dossel urbano: (i) aprisionamento de radiação, (ii) redução da perda de calor por onda longa devido a redução do fator visão do céu, (iii) aumento da capacidade térmica dos materiais construtivos, (iv) geração de calor antropogênico, (v) redução do potencial de evapotranspiração devido a diminuição de áreas vegetadas, (vi) e redução da perda de calor por convecção pela diminuição da velocidade do vento.

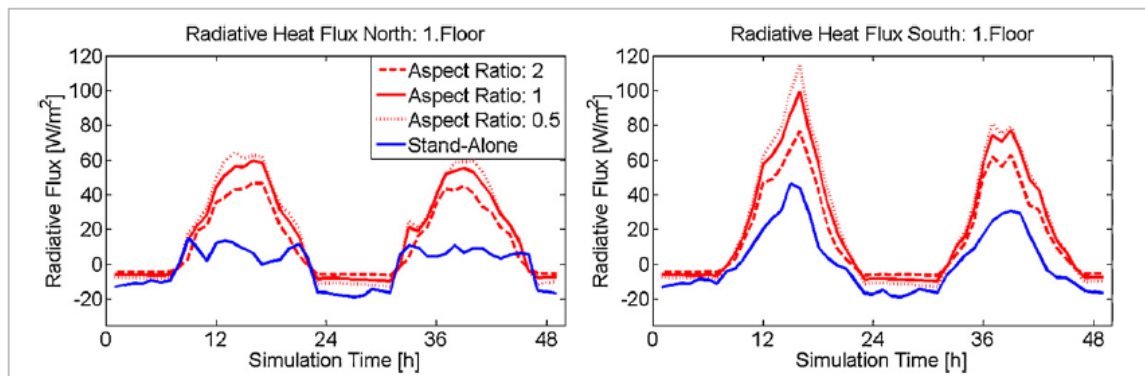
A maior absorção de radiação solar ocorre devido ao aprisionamento de radiação e às múltiplas reflexões entre edificações. A intensidade desse fator está relacionada com a geometria urbana. A perda de calor por radiação de onda longa, também diretamente associada à geometria, ocorre principalmente durante o período noturno, quando a temperatura do céu está mais baixa, sendo um importante mecanismo de manutenção das temperaturas superficiais e do ar. Parâmetros como a relação altura e largura da rua (H/W ou *Aspect Ratio*) e o fator de visão do céu (FVC) são indicativos da sensibilidade do espaço urbano ao aprisionamento de radiação e a redução da perda de calor por onda longa durante a noite.

A relação altura e largura é a razão entre a altura média das edificações de um cânion urbano e a largura da rua entre edificações. Quanto maior essa razão, mais profundo é o cânion, e menos radiação solar penetra o espaço. O fator de visão do céu (FVC) é uma propriedade geométrica referente à relação do céu visível, ou, o céu disponível para dispersar energia térmica (MINELLA; ROSSI; KRÜGER, 2010). Este fator é adimensional e varia de 0 a 1, onde 0 representa um céu totalmente obstruído e 1 sem obstruções. Confrontando os dois parâmetros, uma relação altura e largura maior representa um menor fator de visão do céu.

O trabalho de Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012) faz considerações à radiação ao simular o consumo energético para uma edificação de escritórios na Basileia, Suíça. Comparando o fluxo de radiação total nas fachadas da edificação isolada e no cânion (Figura 3), é notável o efeito do aprisionamento da radiação solar, uma vez que o fluxo na edificação isolada é menor na maior parte do dia, apesar de desconsiderar o sombreamento do entorno edificado. Também, observa-se que os cânions mais largos, ou seja, com menor relação H/W

(*Aspect Ratio*), recebem mais radiação solar durante o dia. Ao mesmo tempo, apresentam maior perda de calor por onda longa durante a noite, devido ao maior fator de visão do céu.

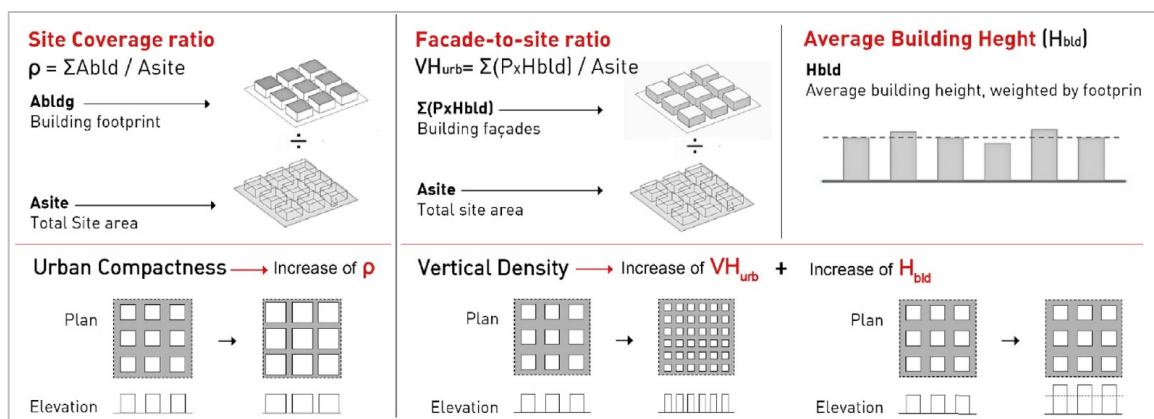
Figura 3 - Fluxo de radiação (solar e onda longa) nas fachadas norte e sul na edificação isolada e em diferentes razões H/W (*aspect ratio*) do cânion urbano



Fonte: Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012).

Salvati *et al.* (2019) argumentam que os parâmetros adimensionais, como a relação H/W e o fator de visão do céu (FVC), não caracterizam adequadamente as morfologias urbanas existentes, pois diferentes configurações podem apresentar os mesmos valores de H/W e FVC. Os autores propõem a análise da taxa de ocupação, da relação fachada-local e altura média das edificações. A taxa de ocupação estaria relacionada com a compacidade do espaço urbano, ou densidade horizontal, indicando o quanto da área total é ocupada e, indiretamente, a proximidade entre edificações. A relação fachada-local e a altura média estão relacionadas com a densidade vertical, indicando a quantidade de superfícies verticais no local. A Figura 4 apresenta esquematicamente o cálculo dos parâmetros e a correlação com os conceitos de compacidade e densidade vertical.

Figura 4 - Parâmetros morfológicos de densidade horizontal (compacidade) e vertical urbana



Fonte: Salvati *et al.* (2019).

Os materiais construtivos das superfícies urbanas absorvem radiação e armazenam calor, que posteriormente é dissipado através de processos de convecção e radiação para a atmosfera, aumentando a temperatura do ar (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011). Heisler e Brazel (2015) atribuem à alta inércia térmica dos materiais construtivos das edificações e infraestruturas urbanas como principal causa das ilhas de calor. O armazenamento de energia é, de maneira geral, maior nas cidades do que nas áreas rurais devido à geometria urbana e às propriedades térmicas dos materiais, fazendo com que as taxas de aquecimento e resfriamento das superfícies sejam mais lentas nessas áreas.

A geometria urbana favorece a interação entre radiação por meio das múltiplas reflexões, além de diminuir a emitância efetiva das superfícies. A materialidade das edificações, por sua vez, estão associadas a um menor albedo das superfícies urbanas (FERREIRA *et al.*, 2012). Albedo é a fração de luz solar refletida por determinada superfície, varia de 0 a 1, em que “0” seria equivalente a um corpo negro (absorve toda radiação) e “1” a um corpo que reflete toda radiação recebida.

O conceito de albedo urbano surge como um parâmetro que incorpora a geometria urbana e as propriedades óticas de seus elementos (SALVATI *et al.*, 2020). É calculado pela razão entre a radiação solar que sai pela radiação solar que entra na camada do dossel urbano. Assim, o albedo urbano indica o quanto o espaço urbano reflete a radiação solar incidente. Salvati *et al.* (2020) avaliaram o efeito do aumento da refletância das superfícies urbanas no albedo urbano e seu impacto na mitigação das ilhas de calor. Os autores notaram que o aumento da refletância da pavimentação tem maior influência na redução da temperatura do ar. Enquanto a refletância das fachadas atuou com maior intensidade na temperatura radiante média no nível da rua.

A substituição do cobrimento natural e vegetado por estruturas impermeáveis também resulta em maior armazenamento de calor (COUTTS *et al.*, 2012). Além disso, a diminuição de áreas vegetadas está relacionada a intensidade das ilhas de calor em consequência de a maior parte da radiação solar absorvida ser convertida em calor sensível ao invés de calor latente. A vegetação contribui para mitigar as altas temperaturas pelo sombreamento e pelo processo de evapotranspiração (SHINZATO; DUARTE, 2018). O aumento da evapotranspiração promove a transferência de calor latente ao invés de calor sensível ou do seu armazenamento (ROTH, 2007).

A presença de vegetação em parques, vias públicas, coberturas e fachadas verdes auxiliam a reduzir a temperatura das cidades. Bowler *et al.* (2010) revisaram 47 estudos sobre

o efeito da vegetação como estratégia de resfriamento das cidades e concluíram que os parques vegetados são, em média, 0,94 °C mais frios durante o dia. Ressalta-se que este efeito depende da quantidade, distribuição, tipo de vegetação, bem como as condições locais e da morfologia e geometria do entorno (BOWLER *et al.*, 2010; COUTTS *et al.*, 2012).

Ainda, a geração de calor pelas atividades humanas tem parte na formação de ilhas de calor. Este fator também está ligado à geometria urbana, que pode favorecer ou dificultar a dispersão de gases. A geração de calor antropogênico é variável conforme o período do ano e o ciclo diário de atividades, e costuma ser superior em áreas de atividades industriais e tráfego intenso. Heisler e Brazel (2015) apontam que a inclusão do calor antropogênico em simulações aumentou em até 2° C a intensidade das ilhas de calor.

Finalmente, a relevância da avaliação dos ventos no ambiente urbano se dá pela sua influência nas trocas de calor por convecção e na alteração do potencial de resfriamento de estratégias de ventilação natural. Os fluxos de vento na malha urbana são uma derivação secundária dos fluxos acima do nível de cobertura (NAKAMURA; OKE, 1988). O problema da velocidade do ar é complexo, pois as edificações atuam como obstáculos que dificultam a penetração do ar na malha urbana e reduzem a perda de calor por convecção. Ao mesmo tempo, em algumas áreas, criam-se corredores de vento, onde a velocidade pode ser bastante alta e causar desconforto no nível do pedestre (MOONEN *et al.*, 2012).

De maneira geral, a velocidade do ar no espaço urbano é reduzida em comparação ao ambiente não urbano ou menos obstruído. A rugosidade das superfícies, compactidade, nível de verticalização das edificações e até mesmo o entorno são determinantes para a circulação do ar (LIMA; BITTENCOURT, 2017). Novamente, a geometria urbana define a facilidade do escoamento do ar e dispersão de calor, sendo que razões H/W menores garantem maior permeabilidade, ao passo que razões H/W maiores dificultam a movimentação do ar.

2.1.2.2 Ilha de Frescor

Alguns estudos constataram intensidade negativa das ilhas de calor, caracterizando a ilha de frescor, quando o ambiente urbano é mais frio que o entorno não urbano. Yang *et al.* (2012) levantaram as possíveis causas das ilhas de frescor segundo estudos anteriores: (i) baixa geração de calor antropogênico; (ii) redução da radiação líquida; (iii) maior inércia térmica no espaço urbano; (iv) influência da brisa do mar ou de frente fria; (v) advecção de ar quente para áreas rurais. Ainda, segundo os autores, os fenômenos de ilhas de calor e de frescor coexistem,

de modo que as ilhas de frescor ocorrem durante o dia, enquanto as ilhas de calor são mais evidentes no período noturno.

A geometria urbana está diretamente associada com a redução da radiação líquida. Cidades com maior adensamento de edificações, espaçamento reduzido e formação de cânions urbanos profundos, sombreiam grandes áreas, obstruindo a radiação solar. Estas condições também dificultam a dispersão de calor, porém, quando associadas às baixas taxas de calor antropogênico ou à influência das brisas marítimas, cria-se um cenário propício para o surgimento das ilhas de frescor.

A presença de umidade também contribui para o surgimento de ilhas de frescor. As ilhas de calor negativas podem ser causadas devido aos solos úmidos possuírem valores de inércia térmica próximos aos de materiais construtivos urbanos (ARNFIELD, 2003). Além disso, em cidades de clima seco, a presença de água da vegetação urbana pode ser responsável pela redução da temperatura urbana em relação ao entorno rural (HEISLER; BRAZEL, 2015).

O conceito de ilhas de frescor também é aplicado sobre parques urbanos (PCI - *park cool island*), onde há arborização e campos abertos em áreas suficientemente grandes para atuar como ilhas de frescor intraurbanas (OKE *et al.*, 2017d). As PCI contribuem para atenuar as ilhas de calor urbanas, pelo aumento da evapotranspiração, adequando-se como estratégia de mitigação de seus efeitos.

2.1.3 Efeito da refletância solar

As ilhas de calor urbana são os fenômenos com mais consequências negativas no clima urbano. As temperaturas do ar apresentam tendência de crescimento, devido à configuração do espaço urbano e às mudanças climáticas. Entre as estratégias de mitigação das ilhas de calor, está a aplicação de superfícies frias nas estruturas urbanas de coberturas, fachadas e pavimentações. Os materiais frios são caracterizados por valores elevados de refletância solar e emitância térmica, propriedades que garantem menor absorção da radiação solar e rápida liberação de calor por onda longa (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

Santamouris *et al.* (2017) revisaram 220 projetos em escala real com implantação de estratégias de mitigação das ilhas de calor urbano. Entre os quais, 75 são referentes a aplicação de coberturas frias, pavimentações frias e do conjunto de coberturas e pavimentação. O estudo avalia apenas o efeito da estratégia na redução da temperatura do ar urbana. Os autores constataram que a mediana de redução da temperatura foi de 1 °C para aplicação de coberturas

frias, 1,3 °C para pavimentação fria, e 1,43 °C na aplicação conjunta. As pavimentações frias mostraram maior impacto na redução de temperatura do ar, o qual Santamouris *et al.* (2017) atribuem à proximidade destas superfícies ao nível do pedestre, enquanto as coberturas se distanciam conforme a altura das edificações.

Apesar da redução da temperatura do ar, o aumento da refletância solar das pavimentações também aumenta o estresse térmico no espaço urbano, devido ao aumento da radiação solar refletida. Erell *et al.* (2014) utilizaram o modelo computacional CAT para avaliar os impactos do aumento do albedo do solo na temperatura do ar, temperatura superficial e nos balanços de radiação de onda curta e onda longa. Foram simulados cânions urbanos com diferentes geometrias, orientações da rua e em quatro cidades com climas variados. Os autores concluem que as temperaturas superficiais e os balanços de radiação também devem ser considerados nos estudos de mitigação das ilhas de calor, a fim de que a redução da temperatura do ar não seja contrabalanceada por outros efeitos.

Sinsel *et al.* (2021) utilizaram o programa ENVI-met versão 4.5.5. para avaliar o impacto da implantação de materiais “super frios” (emitância térmica de 0,97 e refletância solar de 0,96) em coberturas. Para tanto, foram simulados cenários com diferentes tipos de cobertura, em dois dias de verão em Nova Iorque. De maneira geral, a cobertura fria e a cobertura super fria seguem a mesma evolução de temperaturas superficiais, ainda que a super fria apresente potencial levemente maior de resfriamento, tanto durante o dia quanto durante a noite. Por meio das simulações com edificações em três alturas diferentes (13, 25 e 50 metros em relação ao solo), nota-se que o potencial de resfriamento da temperatura do ar no nível da rua diminui conforme a altura. Os autores concluem que a aplicação de materiais super frios podem reduzir a temperatura do ar no nível do pedestre em 0,85 °C em média durante o dia e 0,2 °C durante a noite em comparação a uma cobertura de referência com 0,2 de refletância solar. Em comparação com as coberturas frias convencionais, a redução foi de apenas 0,1 °C durante o dia.

Nazarian *et al.* (2019) estudaram o efeito da refletância solar das fachadas em duas vizinhanças de Singapura (clima tropical) por meio do modelo de simulação TUF-IOBES (*Temperature of Urban Facets Indoor-Outdoor Building Energy Simulator*), que a partir da definição dos dados meteorológicos, da geometria, das propriedades térmicas dos materiais e dos padrões de uso e operação das edificações, calcula as temperaturas superficiais e fluxos de radiação nas superfícies urbanas, a temperatura do ar no cânion e as cargas térmicas internas totais. As simulações incluíram variações na refletância solar das fachadas, no fator percentual

da área de abertura de fachada (*window-to-wall ratio*), no fator solar das janelas e na programação do sistema HVAC. Os resultados mostram que o aumento da refletância solar das fachadas impacta o desempenho energético das edificações, de modo positivo ou negativo, de acordo com a morfologia urbana, do desenho da edificação e da interação humana com a edificação.

Na vizinhança com cânions com H/W de valor 1, o aumento da refletância solar da fachada reduziu a carga de resfriamento considerando a ocupação somente noturna. Porém, quando se considerou uma operação contínua do sistema HVAC, o impacto da refletância solar das fachadas foi pequeno em comparação às propriedades da janela. Na vizinhança comercial, com relação entre altura das edificações e largura da rua (H/W) de 6, a incidência de radiação solar é reduzida e as trocas de radiação entre edificações se intensificam. Neste cenário, há um ponto em que, segundo o fator solar das janelas, a elevada refletância solar das fachadas deixa de ser benéfica. As janelas com elevado fator solar aumentam a carga térmica de resfriamento em cenários com fachadas de elevada refletância solar. Quanto a temperatura do ar nos cânions, observaram que as fachadas com maior albedo reduziram as ilhas de calor urbana, mas essa redução é muito baixa, até 0,11 °C (NAZARIAN *et al.*, 2019).

No clima temperado oceânico de Londres (Inglaterra), Salvati *et al.* (2021) avaliaram o efeito da refletância solar do solo e das fachadas utilizando o programa ENVI-met v.4.4.6. Os autores validaram o modelo por medições em campo do albedo urbano, calculado pela relação entre a radiação solar refletida e a incidente em um cânion de relação H/W entre 0,63 e 0,75. As medições ocorreram em três alturas em relação ao solo: nível da rua (1,2 m), 2º pavimento (5 m) e no nível da cobertura (10 m). Foi encontrado um coeficiente de correlação de Pearson de 0,87 entre a radiação medida e o ENVI-met no nível da rua. Nas demais alturas este coeficiente ficou em torno de 0,10.

O aumento da refletância solar no albedo do cânion urbano (*urban canyon albedo*) está relacionado com a geometria do cânion. Salvati *et al.* (2021) verificaram que o aumento da refletância solar da pavimentação tem maior impacto no albedo de cânions com baixa relação H/W. A refletância solar das fachadas, por sua vez, afeta mais o albedo de cânions urbanos mais profundos (maior H/W). Além do albedo urbano, os autores avaliaram o impacto da refletância solar na temperatura do ar, na temperatura média radiante, no índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*) e o impacto no consumo energético destas modificações. Constataram que o aumento da refletância solar da pavimentação aumenta o albedo do cânion e reduz a temperatura do ar, mas aumenta a temperatura radiante média e a temperatura operativa nas

edificações, reduzindo o conforto térmico e aumentando a carga térmica de resfriamento. O estudo conclui que o aumento da refletância solar das superfícies urbanas pode ter impactos contrários dependendo da geometria urbana.

2.1.4 Estudos realizados no Brasil

Roth (2007) publicou uma revisão dos estudos sobre clima urbano em climas tropicais e constatou a baixa quantidade de pesquisa nesses locais. Apesar das limitações, algumas conclusões puderam ser constatadas: ilhas de calor urbana menos intensas nas estações chuvosas (úmidas) e mais intensas nas secas; ilhas de calor noturnas menos intensas em comparação com as das cidades de clima temperado (ROTH, 2007). Ainda, observa-se nos balanços de energia a importância da disponibilidade de água, contribuindo para a redução de calor sensível ao aumentar a carga de calor latente.

A partir de então, o número de pesquisas sobre clima urbano no Brasil aumentou. Identifica-se três metodologias mais utilizadas nos estudos brasileiros de clima urbano: medição em campo, sensoriamento remoto e simulação computacional. Os métodos, os períodos de avaliação do clima urbano e o clima da localidade são fatores limitantes quanto à comparação entre estudos. Todavia, algumas conclusões são comuns tanto nas revisões internacionais como nas pesquisas nacionais nesta seção analisadas.

As medições em campo são a maneira mais simples de relatar os fenômenos climáticos no local, em que as ilhas de calor são mensuradas por comparação da temperatura do ar na área urbana e a rural adjacente. As observações podem ser realizadas durante um período representativo de condições adequadas para maior intensidade (céu limpo e baixa velocidade dos ventos), mas o monitoramento contínuo fornece informações de diversas condições meteorológicas (HEISLER; BRAZEL, 2015). Além disso, este método representa a real complexidade do clima urbano (MOONEN *et al.*, 2012), o que pode ser considerado uma desvantagem uma vez que diversos parâmetros podem interferir nas medições (MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2010).

Em Manaus, Amazonas, Souza e Alvalá (2014) investigaram dados de estações meteorológicas em três locais na área urbana, uma em área suburbana e uma última em área de floresta, distante 30 km da cidade, entre os anos de 2000 e 2008. Os autores corroboram com as generalizações indicadas por Roth (2007) ao constatar ilhas de calor mais intensas na estação seca. A menor intensidade das ilhas de calor nas estações chuvosas ocorre devido à presença de

nuvens que reduzem a radiação incidente nas superfícies e à maior umidade do solo na área de floresta, aumentando a capacidade de armazenamento de calor. A análise da intensidade das ilhas de calor com base nas medições na floresta revelou picos de intensidade pela manhã e à tarde nas áreas urbanas. Somente quando a comparação foi entre área suburbana e área urbana densa, que o pico ocorreu durante a noite. Este comportamento demonstra a importância de definições menos subjetivas tanto da área urbana quanto do referencial não urbano para a avaliação das ilhas de calor (STEWART; OKE, 2012).

Na capital de São Paulo, Ferreira *et al.*, (2012) utilizaram dados climáticos e de radiação de 15 estações, em áreas urbanas e rurais, para medir a intensidade das ilhas de calor na cidade, relacionando-as com o balanço de radiação. Apesar da subjetividade da classificação de áreas urbanas ou rurais, a quantidade de dados contribuiu para melhor representatividade. Em estudo posterior, também foi estimado o balanço energético na cidade (FERREIRA; DE OLIVEIRA; SOARES, 2013). Os trabalhos mostraram a existência de ilhas de calor urbano, causadas pela liberação do calor armazenado das estruturas urbana. Ainda, revelaram ilhas de calor mais intensas durante o dia, no meio da tarde, atingindo até 5,5 °C. Também é notável a maior amplitude térmica na área rural, que os autores atribuem à maior inércia térmica do espaço urbano.

Por meio do monitoramento entre 2014 e 2016 de dados climáticos na cidade de Aracaju - Sergipe, Anjos e Lopes (2017) investigaram o desenvolvimento de ilhas de calor durante o período. As medições foram realizadas em diferentes zonas climáticas da cidade e revelam a relevância do estudo dos ventos, sobretudo em áreas litorâneas. Verificou-se a formação de ilhas de calor mais intensas na estação mais fresca, causada pela redução da velocidade do ar. A contribuição da presença de vegetação para mitigar o calor também é notável, bem como a proximidade do mar, aumentando a ventilação natural local. A extensão temporal da pesquisa revelou uma média de ilhas de calor de 1,3 °C na estação mais quente.

Alves e Lopes, (2017) estudaram as ilhas de calor em Iporá, Goiás, por meio do monitoramento de termo-higrômetros instalados em 7 locais da cidade, representando diferentes características urbanas e geográficas. Juntamente com o levantamento de parâmetros como altitude, densidade demográfica, índice de vegetação, inclinação do terreno e índice de urbanização, os autores verificaram a relação entre as temperaturas e os parâmetros. O estudo verificou a maior intensidade das ilhas de calor no período noturno e concluiu que a presença de vegetação e o índice de urbanização são as características que mais influenciam a

intensidade. Além disso, notou-se menores temperaturas nos vales em consequência do fenômeno de drenagem do ar frio.

A influência da presença de vegetação e da morfologia urbana também foi estudada em São José do Rio Preto, São Paulo (ROCHA; SOUZA; CASTILHO, 2011). Foi realizado um levantamento de dados de uso e ocupação do solo e o monitoramento da temperatura e umidade do ar em quatro pontos da cidade e em duas estações meteorológicas. Os pontos mais arborizados foram também os pontos com maior fator de visão do céu, apresentando maiores amplitudes de temperatura em comparação com as áreas mais urbanizadas. Os autores verificaram ilhas de calor noturna nos pontos com maior adensamento e verticalização, indicando o armazenamento de calor nas edificações.

A utilização de transectos móveis, em que os medidores são acoplados a um automóvel que passa pelos pontos de interesse, possibilita a análise do clima urbano com poucos equipamentos. No entanto, a resposta temporal nesta metodologia é bastante reduzida. Cardoso *et al.* (2017), por meio de transectos móveis, avaliaram o desenvolvimento de ilhas de calor urbanas em Paranavaí – PR, Rancharia e Presidente Prudente – SP. Os dados foram coletados em 5 dias consecutivos em cada cidade após o pôr do sol (quando as ilhas de calor costumam ser mais intensas) em dias de verão. As autoras demonstraram que áreas mais adensadas e menos vegetadas apresentam ilhas de calor intensas. Também constataram a maior intensidade em condições de céu limpo e baixa velocidade do ar. No período analisado, a máxima diferença entre temperaturas rurais e urbanas foi de 6 °C em Presidente Prudente.

Em Campina Grande, Paraíba, Silva *et al.* (2010) percorreram o trajeto registrando as medições móveis várias vezes durante o dia, em dias representativos das estações chuvosa e seca. A máxima intensidade das ilhas de calor foi de 1,4 °C durante a estação seca, valor significativo considerando que as medições foram restringidas ao período diurno. Enquanto na estação chuvosa, os autores identificaram intensidade negativa, -0,6 °C, indicando ilhas de frescor. Esta ocorrência é atribuída à variação do albedo do entorno rural.

Algumas das limitações do método de medição em campo estão relacionadas com a baixa resolução espacial, que é restrita à área em que são coletados os dados. O sensoriamento remoto, por sua vez, é uma metodologia que permite a análise de distribuição das ilhas de calor de superfície em grandes áreas. O sensoriamento remoto recorre, geralmente, ao uso de imagens de satélite para avaliar a temperatura das superfícies. A temperatura de superfície compreende as propriedades térmicas e radiantes das superfícies urbanas e não urbanas (MIRZAEI;

HAGHIGHAT, 2010). Ressalta-se que a temperatura de superfície não envolve a movimentação do ar, sendo diferente da temperatura do ar.

Peres *et al.* (2018) analisaram a evolução espacial-temporal das ilhas de calor na área metropolitana do Rio de Janeiro por meio de imagens de satélite entre os anos 1984 e 2015. A disponibilidade da condição de céu limpo permitiu a utilização de 82 imagens e a seleção de somente o período da manhã. Esta seleção possibilita uma maior confiabilidade na comparação de resultados, por outro lado, o período matutino geralmente apresenta menores intensidades dos fenômenos climáticos. Os mapas de temperatura superficial gerados demonstraram maiores temperaturas nas áreas urbanas densas e menores nas áreas vegetadas, sendo a diferença média entre elas de 7,1 °C. Também, observaram diferenças de 4,4 °C entre as áreas urbanas mais e menos adensadas, e a presença de ilhas de frescor de temperaturas superficiais em parques na malha urbana.

Em estudo semelhante, no Paço do Lumiar, Maranhão, também se utilizou de imagens de satélite entre 1988 e 2014, obtendo-se uma análise espacial das temperaturas de superfície (SILVA, J. S.; SILVA, R. M.; SANTOS, 2018). Os autores verificaram o aumento de intensidade das ilhas de calor no decorrer dos anos, juntamente com a redução de áreas vegetadas. Também, é notável pontos de maior intensidade nas áreas comerciais e residenciais de maior ocupação. O estudo, baseado em imagens de apenas quatro datas em diferentes períodos do ano, constatou ilhas de calor mais intensas durante o verão.

Verifica-se, então, a limitação desta metodologia quanto aos períodos analisados. Satélites em órbita, por exemplo, são transitórios em uma dada região, além disso, há probabilidade de o céu estar encoberto (MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2010), impossibilitando a obtenção de imagens adequadas nos períodos desejados. Também, dependendo da resolução desejada, os estudos ficam restritos à presença de luz solar, dificultando o estudo de ilhas de calor noturnas por este método.

Alves (2016) utilizou a metodologia de sensoriamento por meio de imagens de satélite para analisar as temperaturas superficiais de Ceres e Rialma, Goiás. O autor selecionou 14 imagens entre 2013 e 2016 das cidades vizinhas separadas pelo Rio das Almas. As análises por estações do ano demonstraram maior intensidade das ilhas de calor no verão e baixas ou intensidades negativas no inverno. Conforme o autor, isso pode ser explicado pela vegetação do referencial rural, que nos meses da estação chuvosa (verão) estão mais densas. Enquanto na estação seca, a vegetação do cerrado perde suas folhas e reduz sua atividade metabólica.

A baixa intensidade ou a presença de ilhas de frescor também é relatada em estudo nas cidades de Cuiabá e Várzea Grande, Mato Grosso (CALLEJAS *et al.*, 2011). Ainda por meio de sensoriamento remoto, utilizou-se imagens de 1987 e 2007 no período matutino. Ao contrário dos estudos anteriores, a análise das temperaturas superficiais não revelou maiores temperaturas nas áreas mais urbanizadas. Os autores atribuem esta ocorrência à topografia das cidades e ao horário das imagens, pois grande parte do centro urbano se localiza em declives na direção sudoeste. Ainda assim, as maiores temperaturas superficiais são notáveis em áreas urbanizadas e de solo descoberto, enquanto as menores temperaturas foram em áreas de vegetação e próximas de corpos d'água.

Modelos matemáticos como a fluidodinâmica computacional (CFD) foram desenvolvidos de modo a simular as interações de transferência de calor e o escoamento de fluidos do espaço urbano. Assim, as simulações fornecem melhor resolução espacial dos fluxos em relação às medições em campo (MOONEN *et al.*, 2012). Os modelos de microescala requerem a modelagem da geometria local e dos materiais de superfície (MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2010). A principal limitação das simulações microclimáticas com CFD é referente ao custo computacional, sendo necessário ajustes quanto a resolução espacial e nível de detalhamento (MOONEN *et al.*, 2012).

Gusson e Duarte (2016) realizaram simulações computacionais com o programa ENVI-met v.4 para duas áreas nos bairros de Brasilândia e Bela Vista, na cidade São Paulo. As modelagens foram calibradas com informações de medições locais e posteriormente validadas. As autoras ressaltam que esse processo foi imprescindível para se obter correlação satisfatória entre os resultados das simulações e as medições reais. Ainda assim, a curva de temperatura do ar simulada foi mais achatada que a medida, demonstrando que o programa ENVI-met a subestima em até 3,3 °C em Brasilândia. Em relação às temperaturas atmosféricas medidas e o desenvolvimento do clima urbano nas áreas, no Brasilândia, a amplitude foi maior, sendo mais quente durante o dia e mais frio durante a noite. Enquanto no Bela Vista, caracterizado pela maior verticalização, observou-se menor amplitude e maiores temperaturas durante o período noturno, em comparação com a área no Brasilândia. Essa diferença entre bairros é atribuída ao fator visão de céu, menor no Bela Vista, reduzindo a incidência de radiação solar e a perda de calor noturna por onda longa.

Após a calibração da modelagem de um cânion urbano em Campinas, São Paulo, Muniz-Gäal *et al.* (2020) simularam 36 cenários alterando as relações geométricas do cânion no ENVI-met. O estudo demonstrou que cânions com maiores razões H/W aumentam o

sombreamento da rua e a velocidade do ar, além de reduzir as temperaturas máximas. Essas condições melhoram o conforto térmico no nível do pedestre, especialmente no verão. No entanto, como apontam os autores, não foram considerados os efeitos da vegetação na área simulada. Além disso, deve-se estudar em maior detalhamento os efeitos dos ventos, uma vez que a velocidade também depende da direção e dos obstáculos na via.

Outra pesquisa, realizada em um parque em São Paulo (SP), utilizou dados de medições no local para calibrar a modelagem no ENVI-met e simular cenários modificados (SHINZATO; DUARTE, 2018). As autoras estudaram o impacto da vegetação no microclima urbano com foco no conforto térmico em espaços abertos. As temperaturas do ar no parque foram apenas 0,7 °C mais baixas do que na rua do entorno, no entanto, a temperatura radiante é bastante influenciada pela presença de vegetação como forma de sombreamento. Esta influência contribui para a diminuir a sensação de calor do pedestre no parque com vegetação em até 7 °C na temperatura equivalente percebida.

A análise dos estudos apresentados, embora baseados em metodologias variadas e em diferentes climas, sobretudo pela vasta extensão territorial do país, confirma as observações de outros autores. O Quadro 1 apresenta estas informações resumidas e as generalizações da literatura que são corroboradas por cada estudo. A maioria das generalizações selecionadas para compor o quadro são relacionadas com o aquecimento urbano e as ilhas de calor urbano (ICU), pois este fenômeno é mais comumente estudado. Porém, também foi contemplado o fenômeno da ilha de frescor, em que a área urbana é mais fria que a área de referência não urbana.

É notável a quantidade significativa de pesquisas que confirmam o efeito de mitigação das ilhas de calor que a presença de vegetação ou corpos d'água possuem. Destaca-se que este efeito em relação à vegetação pode ser mais ou menos evidente dependendo do tipo, tamanho e quantidade de plantas empregadas, além das próprias condições meteorológicas. Shinzato e Duarte (2018) demonstraram por meio de simulações o impacto da alteração da forma e índice de área foliar da vegetação na temperatura e na velocidade do ar. É importante ressaltar que a existência de vegetação não garante temperaturas mais baixas durante todo o tempo. Rocha, Souza e Castilho (2011) registraram temperaturas mais altas em parques no período da tarde do que na área urbana mais adensada, porém, durante a noite esta relação se inverteu.

Destaca-se que há também estudos que apresentaram resultados contrários às premissas comuns. Alves (2016), por exemplo, observou ilhas de calor mais intensas durante os meses mais chuvosos. Anjos e Lopes (2017), por sua vez, verificaram o desenvolvimento de ilhas de calor mais intensas em condições de céu parcialmente encoberto e velocidades do ar

entre 2 e 7 m/s. Assim, observa-se o caráter singular de cada localidade, seja pela morfologia e estruturação do espaço ou pela localização geográfica e clima da região.

Quadro 1 - Estudos nacionais que corroboram com generalizações da literatura científica sobre o clima urbano em cidades brasileiras

Generalização	Referência	Método	Clima*
Áreas de vegetação e corpos d'água reduzem a intensidade do aquecimento urbano	Alves e Lopes (2017)	Medições em campo	Tropical semiúmido
	Rocha, Souza e Castilho (2011)	Medições em campo	Tropical de altitude
	Cardoso <i>et al.</i> (2017)	Medições em campo	Subtropical úmido
	Anjos e Lopes (2017)	Medições em campo	Tropical úmido
	Peres <i>et al.</i> (2018)	Sensoriamento remoto	Tropical úmido
	Callejas <i>et al.</i> (2011)	Sensoriamento remoto	Tropical semiúmido
	Shinzato e Duarte (2018)	Medições em campo e simulação	Subtropical úmido
Ilha de frescor durante o dia	Silva <i>et al.</i> (2010)	Medições em campo	Tropical
	Ferreira, de Oliveira e Soares (2013)	Medições em campo	Subtropical úmido
	Alves (2016)	Sensoriamento remoto	Tropical semiúmido
	Rocha, Souza e Castilho (2011)	Medições em campo	Tropical de altitude
ICU mais intensa nos períodos de seca	Souza e Alvalá (2014)	Medições em campo	Tropical úmido
	Silva <i>et al.</i> (2010)	Medições em campo	Tropical
Maior fator de visão do céu associado a maior amplitude térmica	Muniz-Gaäl <i>et al.</i> (2020)	Simulação	Subtropical úmido
	Gusson e Duarte (2016)	Medições em campo e simulação	Subtropical úmido
	Shinzato e Duarte (2018)	Medições em campo e simulação	Subtropical úmido
	Rocha, Souza e Castilho (2011)	Medições em campo	Tropical de altitude
Intensidade do aquecimento urbano aumenta conforme o nível de urbanização	Silva, J. S.; Silva, R. M. e Santos (2018)	Sensoriamento remoto	Tropical úmido
	Alves e Lopes (2017)	Medições em campo	Tropical semiúmido
	Cardoso <i>et al.</i> (2017)	Medições em campo	Subtropical úmido
	Anjos e Lopes (2017)	Medições em campo	Tropical úmido
	Callejas <i>et al.</i> (2011)	Sensoriamento remoto	Tropical semiúmido

Fonte: autora.

Nota: * Conforme a classificação global de Köppen-Geiger.

2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (ENVI-MET)

O ENVI-met é um modelo tridimensional de simulações microclimáticas, desenvolvido para simular as interações entre superfícies, atmosfera e vegetação. O programa é baseado na dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e se apoia nas equações de Navier-Stokes (RANS - Reynolds *Averaged* Navier-Stokes) para resolver o fluxo atmosférico e transferência de calor em cada célula no espaço de modelagem. O programa também considera um balanço de radiação completo, com fluxos de radiação de ondas curtas e longas em relação ao sombreamento e às múltiplas reflexões entre edificações e vegetação (ENVI-MET, 2019).

O modelo consiste na integração de quatro partes: (i) modelo unidimensional dos limites, utilizado para inicializar a simulação e definir as condições do perímetro do modelo tridimensional; (ii) modelo atmosférico tridimensional, onde os fluxos de radiação e de ar são dispostos; (iii) modelo do solo; (iv) modelo da vegetação, onde é simulado a taxa de transpiração e as trocas de calor entre plantas e a atmosfera (TSOKA; TSIKALOUDEKI; THEODOSIOU, 2018). Estas partes são integradas a partir de um arquivo de entrada de área, onde os modelos (ii), (iii) e (iv) são incorporados em uma localização geográfica definida, e um arquivo de configuração, relacionado ao modelo (i), em que os parâmetros de simulação são definidos.

A utilização do ENVI-met tem sido incorporada em diversos estudos do microclima urbano (TOPARLAR *et al.*, 2017; TSOKA; TSIKALOUDEKI; THEODOSIOU, 2018). Em um primeiro momento, os resultados são avaliados qualitativamente. Esta etapa, também denominada de validação, indica se os parâmetros de inicialização e a modelagem tridimensional estão gerando resultados coerentes. A avaliação do modelo é realizada por comparação entre os resultados simulados e medições reais. As métricas comumente aplicadas são descritas adiante, na seção 2.2.1.

O ajuste do modelo garante que os resultados sejam mais próximos das medições reais. Grades com menores dimensões apresentam maiores nível de detalhamento e custo computacional, enquanto grades superdimensionadas simplificam o modelo. Em um estudo conduzido em Roma, Itália, Salata *et al.* (2016) simularam uma área urbana no ENVI-met versão 3.1 em três diferentes tamanhos das células da grade. Eles constataram que a menor célula (1 x 1 m²) apresentou resultados mais próximos das medições locais, entretanto, o tempo de processamento foi alto. A célula de 3 x 3 m², por sua vez, foi simulada mais rapidamente, mas os resultados demonstraram maior diferença das medições realizadas no local. Assim, os autores optaram por um tamanho intermediário (2 x 2 m²) e sugerem a testagem de diferentes dimensões para orientar a escolha mais adequada.

O dimensionamento da grade implica na simplificação da geometria das edificações. Através de meta-análise, Favretto e Souza (2019) estudaram a influência de simplificações na geometria nos resultados de temperatura do ar, velocidade do ar e fator de visão do céu do ENVI-met versão 4.2. As autoras constataram que as simplificações que mantiveram o alinhamento predial e perímetro das edificações apresentaram melhores resultados nas três métricas avaliadas. Estes resultados são importantes para orientar a modelagem quando não é

possível estimar a morfologia urbana com precisão, ou em processos de planejamento urbano, em que é mais apropriado a utilização de modelagens genéricas.

A configuração das condições de contorno do modelo também apresenta funções importantes para melhorar o desempenho da simulação em relação à representação de variáveis climáticas. As versões mais recentes do software, a partir da versão 4.0, permitem a atualização das condições limítrofes meteorológicas. Ao contrário das versões anteriores em que as condições de iniciação do modelo eram constantes (ACERO; ARRIZABALAGA, 2018). A versão 4.4.6, utilizada neste trabalho, possibilita a aplicação dos modos forçados: *simple forcing* e *full-forcing*. No modo *simple forcing* apenas as variáveis de temperatura do ar e umidade relativa podem ser forçadas em um ciclo diurno (24 horas). No modo *full-forcing* também é possível forçar o vento, o cobrimento do céu e a radiação, além da temperatura e umidade relativa do ar em longo prazo.

Acero e Arrizabalaga (2018) avaliaram o desempenho do ENVI-met em diferentes condições meteorológicas através da modelagem no programa e medições locais de quatro diferentes áreas urbanas de Bilbao, Espanha. O estudo consistiu na modelagem pelo ENVI-met versão 4.0. em condições de céu limpo, parcialmente limpo e encoberto. A temperatura e a umidade relativa do ar do modelo foram forçadas pelo modo *simple forcing* com base nos dados da estação meteorológica de Deusto. Os autores observaram correlações satisfatórias entre as temperaturas do ar simuladas e observadas, mas concluem que o programa não estima adequadamente o efeito das ilhas de calor. As maiores diferenças entre modelo e observação foram em momentos de maior intensidade das ilhas de calor. O modo *simple forcing*, se utilizando de variáveis medidas em outro local senão os modelados, teria sido responsável por subestimar a intensidade das ilhas de calor locais.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do ENVI-met versão 4.0 na previsibilidade das variáveis climáticas em áreas com diferentes morfologias urbanas, Sharmin, Steemers e Matzarakis (2017) estudaram o microclima em duas regiões da cidade de Daca - Bangladesh. A pesquisa consistiu em três etapas: a primeira, na qual foram realizadas medições locais nas áreas de estudo; a segunda, em que estas áreas foram modeladas e simuladas no programa ENVI-met utilizando o modo forçado com as medições da etapa 1; e a terceira, em que as áreas foram simuladas a partir das mesmas condições meteorológicas iniciais, sem a utilização do modo forçado. As simulações no modo forçado mostraram boa correlação entre os resultados estimados e observados no local. Os resultados das simulações da terceira etapa, porém, não apresentaram boa correlação, indicando que o modelo ENVI-met não é suficientemente sensível

à geometria urbana como na condição real. Entretanto, as análises desta etapa foram baseadas em um período de extremo calor do arquivo climático da cidade, diferentemente das etapas 1 e 2, dificultando a comparação.

Segundo Acero e Arrizabalaga (2018), o modo forçado restringe o desenvolvimento dos fenômenos climáticos pelo modelo. Ao mesmo tempo, as simulações com o modo padrão também não reproduzem as condições reais medidas no local (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017). De maneira geral, o programa ENVI-met geralmente estima adequadamente o perfil diurno de temperatura do ar e superficial, segundo a revisão de Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018) envolvendo 52 artigos. Esta revisão também revelou que a temperatura radiante média tende a ser superestimada, ainda que a temperatura radiante média máxima diurna seja estimada com maior precisão. As variáveis de direção e velocidade do vento foram raramente avaliadas, mas nota-se uma limitação do programa em relação aos fluxos de ar, devido aos parâmetros estáticos de inicialização.

O reconhecimento das limitações do modelo ENVI-met auxilia a interpretação adequada dos resultados. Ainda de acordo com o artigo de revisão de Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018), as principais limitações do modelo ENVI-met são atribuídas à imprecisões nos dados de entrada em relação aos materiais, vegetação e estrutura urbana; à não consideração do calor antropogênico gerado; às condições estáticas de cobrimento do céu e movimento do ar; ao próprio modelo de cálculo utilizado e à falta de informações acerca do mesmo. Simplificações nos cálculos da radiação e ao modelo de cálculo de turbulência, que tende a superestimar a produção de turbulência quando o fluxo de ar é modificado pela presença de obstáculos, também são apontados por Sharmin, Steemers e Matzarakis (2017). Entretanto, muitos dos problemas indicados são solucionados conforme o programa é atualizado em novas versões.

A incorporação do sistema de cálculo *Indexed View Sphere* (IVS), por exemplo, trata de um método de transferência de radiação mais completo, possibilitando a análise detalhada dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa na simulação. Os fluxos primários de radiação são simulados com base em algoritmos de *ray tracing* e os fatores de visão do céu do ambiente. Os fluxos secundários, referente à radiação emitida pelos objetos presentes no ambiente, exigem esquemas de cálculo mais complexos. Os fatores de visão de cada objeto devem ser considerados, além da inter-reflexão entre as superfícies (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2021).

O esquema de cálculo IVS utilizado a partir da versão 4.4.6 do ENVI-met baseia-se no armazenamento do fator de visão de cada elemento visto por cada célula do modelo

tridimensional e do traço de raio (*ray trace*) que indica estas relações. Este traço permite o cálculo dos fluxos de radiação secundários pela ligação entre o estado atual dos objetos ligados durante a simulação (SALVATI *et al.*, 2021; SIMON; SINSEL; BRUSE, 2021).

A utilização do esquema IVS foi avaliado por Salvati *et al.* (2021) pelo albedo urbano, calculado segundo a reflexão e a incidência total de radiação solar, em três diferentes alturas em relação ao solo do modelo. Os autores do estudo compararam a versão anterior (4.4.5) e a versão 4.4.6 e concluíram que a segunda é mais confiável porque apresenta desvio consistente do valor medido. Ainda, em relação às simulações sem ativação do esquema de cálculo IVS, Salvati *et al.* (2021) revelam que a radiação solar refletida é superestimada, além de ser igual nos três pontos.

A duração da simulação e o momento em que é iniciada também influencia nos resultados. Sabe-se que os modelos computacionais, de maneira geral, necessitam de um período de inicialização. Para o programa ENVI-met é sugerido que a simulação seja iniciada antes do nascer do sol, permitindo que o modelo se estabilize antes de receber radiação solar. Também é recomendado que estas primeiras horas de simulação sejam descartadas das análises, com o objetivo de utilizar dados refinados, evitando problemas da inicialização da simulação (SALATA *et al.*, 2016).

Em um segundo momento, assumindo que o modelo apresenta resultados satisfatórios, são simuladas variações com diferentes aplicações de estratégias para avaliar a melhoria das condições ambientais do local. Os estudos brasileiros de Shinzato e Duarte (2018) e Muniz-Gäal *et al.* (2020), anteriormente citados (seção 2.1.3), exploraram os efeitos da vegetação e da geometria urbana, respectivamente, no microclima urbano. A adição de vegetação, a aplicação de materiais frios, a implantação de técnicas de mitigação à base de água, bem como a combinação de diferentes estratégias, são tópicos de estudo explorados através do *software* ENVI-met (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018).

Wang, Berardi e Akbari (2016) aumentaram a refletância das coberturas e da pavimentação, e adicionaram vegetação em três áreas com diferentes geometrias urbanas da cidade de Toronto, Canadá. A análise dessas estratégias isoladas e em conjunto demonstrou que suas aplicações, especialmente a implantação de vegetação, contribuem para reduzir as temperaturas do ar e radiante média nos meses de verão. Já no inverno, a influência foi desprezível, portanto, a implantação dessas estratégias contribuiria para diminuir a intensidade das ilhas de calor no verão sem interferências significativas durante os meses mais frios. Mas, o estudo apresenta algumas limitações, pois a validação do modelo não apresentou boa

correlação entre resultados do modelo e o real de estações meteorológicas. Os autores atribuem as baixas correlações à imprecisão na modelagem do solo, vegetação e materiais das superfícies.

Um estudo sobre a aplicação de fachadas vegetadas em Hong Kong, China, verificou correlações razoáveis entre temperatura do ar, temperatura superficial, umidade relativa e fluxo de radiação de onda longa simulados pelo ENVI-met versão 4.0 e observações locais (MORAKINYO *et al.*, 2019). Após a validação, os autores realizaram uma série de simulações paramétricas para observar o efeito da incorporação de fachadas verdes em diferentes configurações de estrutura urbana, conforme a área de aplicação e a orientação, no resfriamento do ar e conforto térmico urbano. Os cenários foram simulados com paredes de concreto e com a implementação de vegetação. Assim, a quantificação do impacto da vegetação se deu através da comparação entre estes dois grupos de cenários. Os resultados do estudo revelaram que a quantidade de fachadas verdes adotadas é o parâmetro mais importante para reduzir a temperatura do ar e as temperaturas superficiais. As análises de regressão sugerem que para reduzir em 1 °C a temperatura do ar nas áreas mais adensadas de Hong Kong, deve-se implantar vegetação em até 50% da área de fachada. Em relação ao conforto térmico, avaliado pelo índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*), os autores observaram que quanto mais próxima a fachada verde do nível de pedestre, maior o benefício.

O aumento de áreas vegetadas urbanas é uma das principais e mais eficientes estratégias de controle das temperaturas nas cidades, devido à evapotranspiração das plantas e à proteção solar que fornecem. A presença de vegetação também contribui para reduzir a poluição, melhorar o conforto acústico, além de atuar como elemento estético (SANTAMOURIS *et al.*, 2017). Os estudos sobre implantação de vegetação urbana através de simulações com o modelo ENVI-met corroboram com estudos observacionais, indicando que a presença de árvores nos ambientes urbanos contribui na redução da temperatura do ar no nível da rua em até 1 °C. A implantação de telhados verdes apresenta menor potencial de redução de temperatura do ar no nível do pedestre, principalmente em áreas com edificações altas (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018).

O impacto da aplicação de materiais frios na pavimentação das cidades e nas coberturas das edificações também é comumente avaliada em pesquisas através do programa ENVI-met. No artigo de revisão de Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018), os autores concluem que a implementação de materiais de alta refletância em pavimentos apresenta maior potencial de resfriamento do ar, em média 1,45 °C, do que a implementação desses materiais em coberturas, em média 0,50 °C. É importante ressaltar que a maioria dos estudos exploraram

os impactos da adição de vegetação urbana e da aplicação de materiais frios em condições de verão. As análises dificilmente compreendem condições de inverno ou estações intermediárias (TSOKA; TSIKALOUDEKI; THEODOSIOU, 2018).

2.2.1 Métricas de desempenho

Diferentes métodos são utilizados para validar os resultados de um modelo computacional de simulação. As métricas apresentadas nesta seção são comumente empregadas como índices de desempenho do modelo ENVI-met, em que são comparados os valores modelados e os observados. Frequentemente, mais de uma métrica é utilizada, pois a análise de uma métrica isolada permite uma única projeção dos erros do modelo, enfatizando uma única característica. Deste modo, a combinação de métricas é mais adequada para avaliar de forma adequada o desempenho de um modelo (CHAI; DRAXLER, 2014).

A raiz quadrada do erro-médio (RMSE - *Root Mean Square Error*) é calculada através da Equação 3, apresentando a diferença média entre o valor estimado (P) e o valor observado (O). Quanto menor o RMSE, melhor o desempenho do modelo. Por se tratar do erro quadrado, maiores diferenças têm maior influência no valor de RMSE em detrimento das diferenças menores (WILLMOTT; MATSUURA, 2005). O maior peso dado às condições desfavoráveis também pode ser considerada uma vantagem quanto à revelação do desempenho do modelo (CHAI; DRAXLER, 2014). Entretanto, a utilização do RMSE como métrica de comparação entre diferentes estudos pode ser inadequada, pois seu cálculo envolve diferentes domínios (WILLMOTT; MATSUURA, 2005).

O erro absoluto médio (MAE - *Mean Absolute Error*) é calculado pela média das diferenças em módulo entre os valores preditos e observados (equação 4). A utilização dos valores absolutos pode ser indesejável, pois dificulta a avaliação da sensibilidade do erro (CHAI; DRAXLER, 2014). O índice MBE (*Mean Bias Error*), por sua vez, representa a média entre as diferenças entre os valores estimados e observado (equação 5), indicando se o modelo consistentemente subestima os resultados ($MBE < 1$) ou superestima-os ($MBE > 1$).

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (4)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (5)$$

Onde, N é o número de casos, P é o valor predito pelo modelo, e O é o valor observado.

O índice de concordância de Willmott, representado por d , reflete a relação entre os valores preditos (P) e observados (O) através da Equação 6. O índice d é adimensional e assume valores entre 0 e 1, em que 0 indica total discordância e 1 total concordância entre P e O .

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (6)$$

Onde, N é o número de casos, P é o valor predito pelo modelo, O é o valor observado, e \bar{O} é a média dos valores observados.

Finalmente, o coeficiente de determinação (R^2) é também utilizado como métrica auxiliar de avaliação dos modelos. O coeficiente de determinação mede a qualidade do ajustamento dos dados à linha de regressão. Ou seja, o quanto o modelo de regressão linear explica o comportamento observado. Este coeficiente tem valor entre 0 e 1, em que conforme se aproxima de 1, melhor é o ajustamento.

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo o conceito de clima urbano foi explorado, investigando como o espaço urbano interfere e altera o clima das cidades em diferentes escalas. O balanço de energia permite identificar cada variável que atua na modificação do microclima. À medida que as cidades se desenvolvem, a antropização do espaço aumenta. O cobrimento vegetal natural é substituído por materiais construtivos com maior inércia térmica, o volume das edificações altera o fluxo de radiação incidente nas superfícies, e a geração de calor antropogênico é intensificada. Assim, geram-se os fenômenos climáticos comumente observados, como as ilhas de calor de urbano e as ilhas de frescor.

No levantamento de estudos sobre clima urbano realizados no Brasil, nota-se o uso de três metodologias: sensoriamento remoto, medições locais e simulação (CARDOSO *et al.*, 2017; GUSSON; DUARTE, 2016; SILVA *et al.*, 2010; SILVA; DA SILVA; SANTOS, 2018). Embora cada método possua vantagens e limitações próprias, os resultados destes estudos são condizentes com as generalizações consolidadas de pesquisas internacionais. Porém, dado a extensão territorial e climática do país, e às diferenças urbanísticas, o tema ainda apresenta lacunas.

A diferenciação do clima urbano segundo o grau de urbanização da cidade implica na inadequação de projetos que tratam as edificações como elementos isolados. A relação entre as edificações e o espaço urbano pode contribuir para intensificar ou mitigar os fenômenos climáticos. O entendimento do clima urbano é fundamental para a elaboração de construções adequadas ao clima local e ao entorno próximo. Neste sentido, as edificações projetadas para possuírem alto nível de eficiência energética, também podem ser avaliadas para que contribuam na melhoria do microclima urbano. A geometria do entorno e os materiais empregados nas edificações, por exemplo, são variáveis que influenciam tanto no clima local quanto no próprio desempenho energético.

O emprego de materiais frios (altos índices de refletância solar e emitância térmica) pode auxiliar na mitigação dos efeitos das ilhas de calor pelo aumento do albedo urbano, em que a radiação solar incidente é refletida ao invés de absorvida pelas edificações. Estudos confirmam a efetividade da aplicação de materiais frios, principalmente das pavimentações, na redução da temperatura do ar (SALVATI *et al.*, 2020; TSOKA; TSIKALOUDEKI; THEODOSIOU, 2018; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016).

Entretanto, outros trabalhos mostram que o impacto da refletância solar das superfícies urbanas se estende ao conforto térmico em espaços abertos e ao desempenho térmico das edificações (NAZARIAN *et al.*, 2019; SALVATI *et al.*, 2021). Estas relações podem ser contraditórias, de maneira que não há resposta simples para os efeitos de aplicação dos materiais frios como estratégia de mitigação das ilhas de calor com objetivo de reduzir o consumo energético. A morfologia urbana se apresenta como uma variável fundamental para definição do desempenho de superfícies frias. Frequentemente, adota-se uma geometria regular para as simulações microclimáticas, no entanto, estas generalizações não são representativas de assentamentos urbanos reais (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017).

Por fim, o programa ENVI-met é apresentado como ferramenta de simulação do microclima urbano. A decisão pela utilização deste modelo de simulação computacional foi baseada na consideração de componentes primárias e secundárias nos fluxos de radiação pelo esquema de cálculo IVS. O aprisionamento de radiação é uma das causas das ilhas de calor urbano, que tem relação com a geometria e a refletância solar das superfícies urbanas. Este efeito é geralmente desconsiderado pelos demais modelos de simulação, devido à complexidade de cálculo e ao custo computacional. Além disso, o modelo ENVI-met apresenta desempenho satisfatório na previsibilidade das condições microclimáticas atestado na literatura científica (TSOKA; TSIKALOUDEKI; THEODOSIOU, 2018).

3 METODOLOGIA

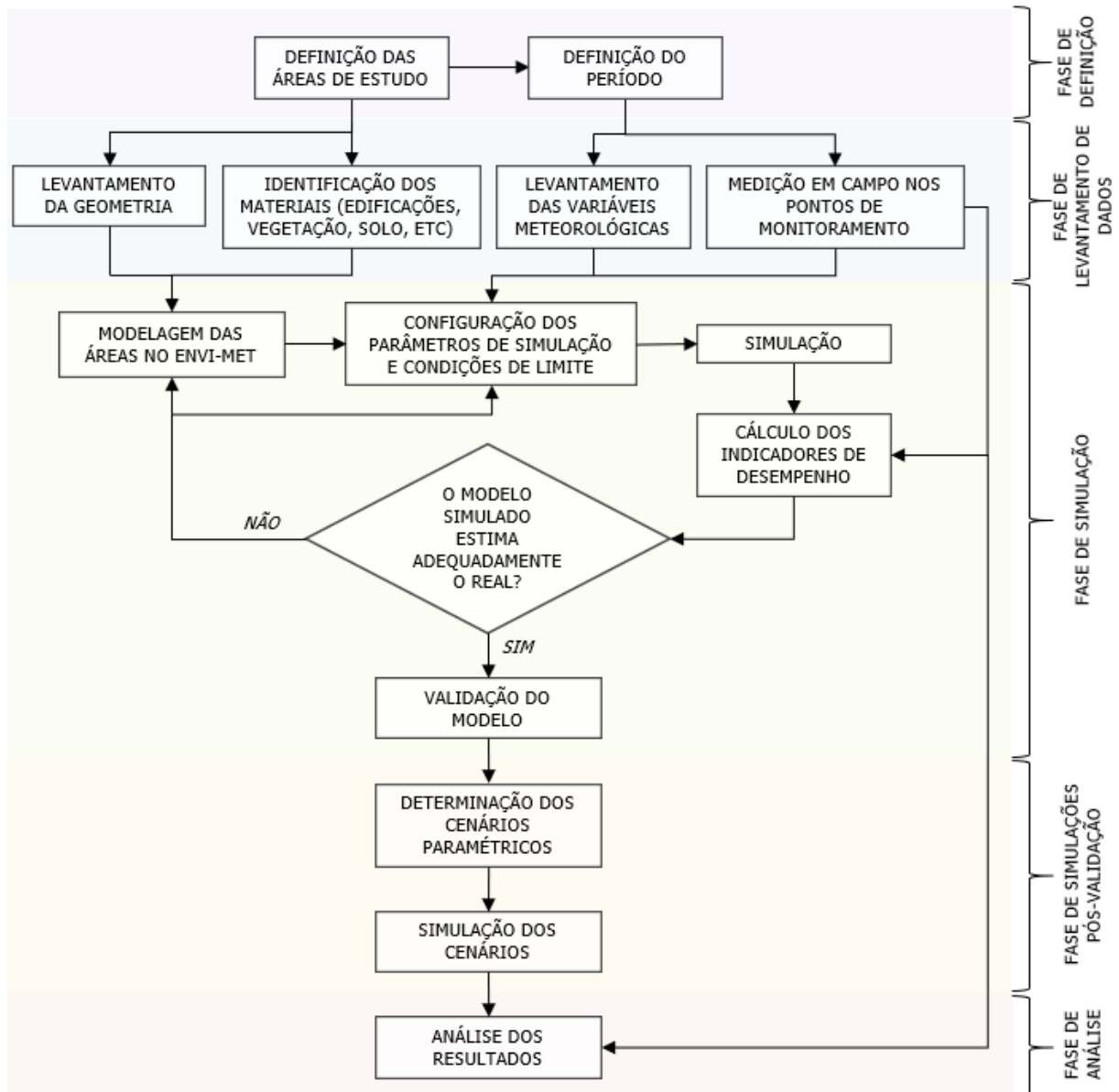
Nesta seção, a metodologia aplicada no trabalho é explicitada. A metodologia pode ser dividida em cinco fases, conforme o fluxograma apresentado na Figura 5. Inicia-se com a fase de definição, que consiste na decisão dos locais de estudo e dos períodos avaliados. A definição de duas áreas representativas da área central de Balneário Camboriú é baseada em considerações sobre os aspectos climáticos e urbanísticos da cidade.

A partir daí, a fase de levantamento de dados compreende a verificação da geometria, juntamente com a identificação dos materiais que compõem o espaço urbano das áreas representativas. Nesta fase também é realizado o levantamento dos parâmetros de inicialização da simulação pelo programa ENVI-met, inclusive as medições em campo da temperatura e da umidade relativa do ar nos pontos de monitoramento. Enquanto os dados obtidos das estações meteorológicas tradicionais são utilizados como fonte das condições meteorológicas da região, as medições em campo nos pontos de monitoramento são utilizadas para a validação das simulações nas duas áreas representativas. A comparação entre os dois tipos de fonte de dados também permite avaliar a intensidade do aquecimento urbano no centro de Balneário Camboriú.

Durante a fase de simulação ocorre a integração dos elementos da fase de levantamento de dados. O modelo tridimensional das áreas de estudo é elaborado conforme a geometria e os materiais identificados nos locais. A configuração dos parâmetros de simulação envolve variáveis meteorológicas obtidas das estações meteorológicas do Aeroporto de Navegantes, do Porto de Itajaí, e das medições nos pontos de monitoramento. Os resultados de temperatura do ar da simulação são comparados com as medições para validação do modelo, por meio das métricas de desempenho. Caso o modelo simulado não apresente desempenho satisfatório, ajusta-se a modelagem e as configurações de inicialização. Este procedimento, também chamado de calibração, é realizado até que o desempenho da simulação seja aceitável.

A partir de então, na fase de simulações pós-validação, os modelos são utilizados para avaliar o efeito da variação de certos parâmetros no microclima. Para isso, são modelados e simulados os cenários parametricamente modificados, com o objetivo de observar o efeito da refletância solar das superfícies no microclima urbano. Finalmente, a fase de análise, na qual os resultados das medições em campo, as condições meteorológicas e as simulações paramétricas são discutidas. Todas as etapas da metodologia são detalhadas no decorrer deste capítulo.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia



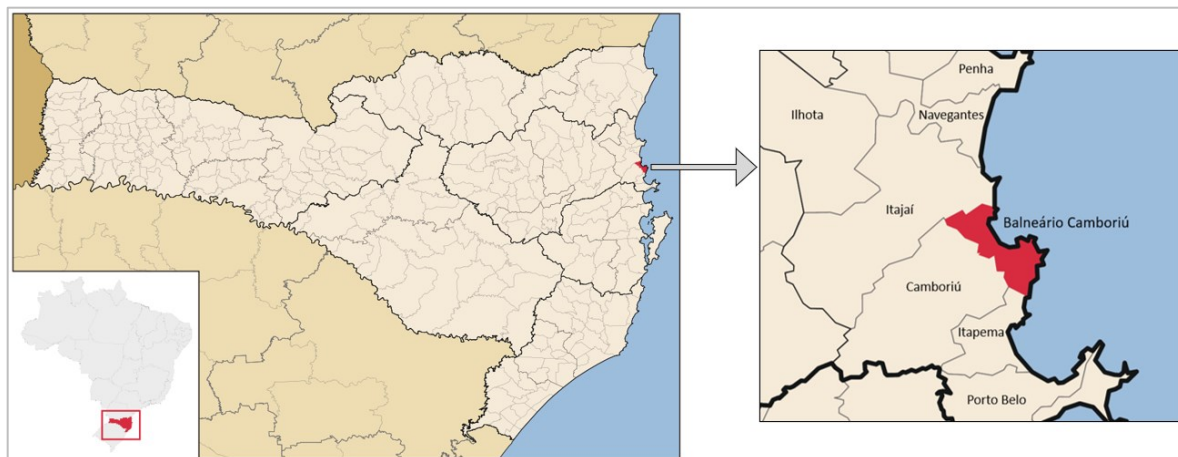
Fonte: autora.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O município Balneário Camboriú localiza-se no litoral do estado de Santa Catarina, na região sul do Brasil (Figura 6), na latitude $-26^{\circ} 59'$ e longitude $-48^{\circ} 38'$. A cidade possui clima subtropical úmido, classificada como "Cfa" segundo Köppen-Geiger (KOTTEK *et al.*, 2006). Esta classificação indica que Balneário Camboriú possui clima temperado quente, umidade relativa alta o ano todo e verões quentes. Em concordância com a classificação da ASHRAE

169 – *Climatic Data for Building Design Standards* (2013), segundo a qual a cidade pertence ao grupo 2A, clima quente e úmido.

Figura 6 - Localização geográfica do município de Balneário Camboriú, Santa Catarina



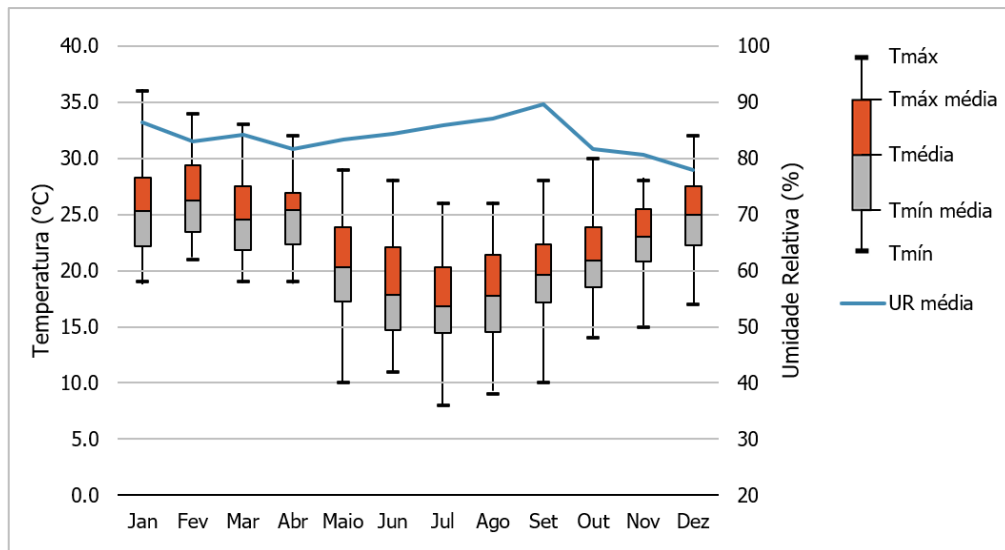
Fonte: adaptado de Abreu (2006).

A estação meteorológica com disponibilidade de dados climáticos históricos mais próxima é a do Aeroporto de Navegantes, localizada a aproximadamente 12 quilômetros do centro de Balneário Camboriú. Embora as duas cidades estejam próximas, há diferenças entre o clima de cada uma, principalmente devido à posição geográfica e ao relevo do entorno. Em Balneário Camboriú é notável a presença de morros ao redor da região central.

A Figura 7 apresenta graficamente a média mensal das temperaturas máximas, médias e mínimas diárias de bulbo seco, e a média mensal da umidade relativa do ar do arquivo climático de Navegantes, baseado em dados históricos de 2004 a 2018 (CLIMATE ONE BUILDING, 2018). Nota-se a média de umidade relativa do ar elevada durante todo o ano, acima ou próxima de 80%. Observa-se também, pela temperatura média diária, que os meses de junho, julho e agosto são os mais frios, enquanto os meses de dezembro a abril são os mais quentes.

A população do município segundo o censo de 2010 é de 108 mil habitantes, mas estima-se que este número esteja acima de 145 mil em 2020 (IBGE, 2021). A população aumenta expressivamente nos meses de verão, quando cerca de um milhão de turistas visitam a cidade, segundo a Prefeitura Municipal de Balneário Camboriú (BALNEÁRIO CAMBORIÚ, c2021). O turismo e a construção civil estão entre as principais atividades econômicas do município, atividades que influenciam o processo de urbanização da cidade.

Figura 7 - Média mensal das temperaturas máxima, média e mínima diárias, e média mensal da umidade relativa do ar de Navegantes-SC



Fonte: adaptado do arquivo climático de Navegantes (CLIMATE ONE BUILDING, 2018).

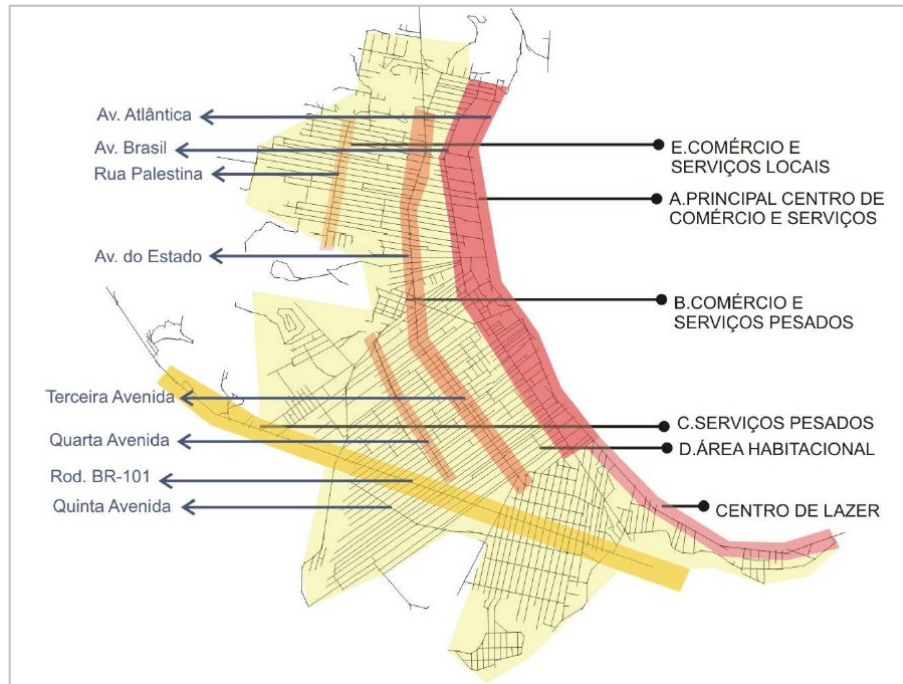
A maior parte da população concentra-se na região central, especialmente nas proximidades da orla da Praia Central. O mapa esquemático de usos (Figura 8), elaborado por Skalee (2008), mostra as principais vias da área central do município. Nota-se a predominância de uso comercial e serviços nas avenidas Atlântica e Brasil, de comércio e serviços pesados nas Terceira e Quarta avenidas, e de serviços pesados na rodovia BR-101. Ainda, Skalee (2008) identifica a região da avenida Atlântica na barra sul como centro de lazer. Enquanto as demais áreas são predominantemente residenciais.

O processo de urbanização da cidade teve início com o surgimento das primeiras casas de veraneio, na década de 30. O desenvolvimento da atividade turística foi impulsionado a partir da década de 60, quando em 1964 o município de Balneário Camboriú foi criado. A partir de então, delineou-se o traçado urbano da cidade, por meio dos loteamentos guiados por interesses do mercado imobiliário (SKALEE, 2008). A cidade tomou forma, com muitas ruas estreitas, perpendiculares à orla, e com uso predominantemente residencial, enquanto as ruas paralelas são menos numerosas e concentram os setores de comércio e serviços.

Atualmente, o nível de verticalização de Balneário Camboriú é alto, de tal maneira que a cidade é conhecida como “Dubai brasileira”, relacionando-a aos arranha-céus da cidade árabe (LUCIANO, 2017). Entre a avenida Atlântica, beira-mar, e a avenida Brasil, estão a maior concentração de edificações. Embora as avenidas Atlântica e Brasil sejam reconhecidas como o principal centro de comércio e serviços, há também grande concentração de edificações

residenciais, principalmente nas ruas perpendiculares às avenidas, que conectam uma avenida à outra. A cidade é mais adensada e verticalizada à medida que se aproxima do mar.

Figura 8 - Mapa de distribuição de usos de Balneário Camboriú (sem escala)



Fonte: Skalee (2008).

3.1.1 Definição das áreas estudadas

Com o objetivo de explorar os diferentes usos de ocupação de solo da cidade, selecionou-se duas áreas representativas com base nas suas morfologias e nos principais usos. A primeira área, chamada de Área A, situa-se entre as avenidas Atlântica e Brasil, em que as vias são estreitas e as edificações altas. A segunda área, Área B, compreende a Quarta avenida, onde as vias são mais largas e as edificações são mais baixas. Segundo Skalee (2008), a área A se trata do “principal centro de comércio e serviços”, enquanto a área B compreende “comércio e serviços pesados” (Figura 8). As áreas selecionadas estão distantes em aproximadamente 1,2 quilômetros e são apresentadas no mapa da Figura 9. Nota-se, na imagem de satélite utilizada para compor a Figura 9, a predominância de edificações mais altas entre a Terceira avenida até a avenida Atlântica, beira-mar.

Figura 9 - Mapa da região central de Balneário Camboriú com identificação das áreas A e B (sem escala)



Fonte: autora.

A Tabela 1 apresenta a taxa de ocupação, altura média das edificações e a relação da área de fachada pela área total de cada uma das áreas. Estes índices foram calculados com base no levantamento da geometria do presente trabalho (ver 3.2.1) e auxiliam a caracterização dos locais de estudo. A taxa de ocupação representa a porcentagem da área total que é ocupada pela projeção da edificação. A relação fachada-local é expressa pela razão entre a área de fachada, calculada por meio da multiplicação entre perímetro e altura das edificações, e a área total do terreno. A altura média provém da média da altura das edificações ponderada pela área ocupada.

Tabela 1 - Métricas morfológicas das áreas A e B

	Área A	Área B
Taxa de ocupação (adimensional)	0,51	0,32
Relação fachada-local (adimensional)	3,67	0,52
Altura média (metros)	31,06	6,30

Fonte: autora.

Estas métricas são utilizadas por Salvati *et al.* (2019) e auxiliam a identificação da compactidade urbana e a densidade vertical. A taxa de ocupação está relacionada com a compactidade, enquanto a altura média e a relação fachada-local indicam o nível de verticalização. Pela Tabela 1, nota-se que a área A é mais adensada horizontalmente e verticalmente, exibindo maiores índices nas três métricas morfológicas.

3.1.1.1 Área A

A ocupação da área A é caracterizada pelo uso misto, em que as edificações são ocupadas tanto por residências quanto pelo setor de comércio e serviços. É notável a concentração de edificações comerciais e de serviços nas avenidas, principalmente nos pavimentos térreos das edificações. Nas ruas perpendiculares, que conectam as avenidas Atlântica e Brasil, predominam edificações residenciais.

Na Figura 10 é apresentado um mapa da área A, em que as edificações são classificadas conforme o número de pavimentos. Nota-se a presença de edificações com até 24 pavimentos, e o predomínio de edificações com mais de quatro pavimentos. Esta configuração garante uma relação altura por largura da rua (H/W) maior do que 2 em toda a área avaliada, característica de cânions profundos (AFIQ; CHE SIDIK; SAQR, 2012). A relação H/W é variável conforme a geometria do entorno e a largura da rua. Por se tratar de uma área não uniforme em relação à altura das edificações, foram realizadas a avaliação de oito trechos de ruas, identificados na Figura 10, dividindo as quadras em duas partes de aproximadamente 120 metros.

Figura 10 - Área A com classificação das edificações em número de pavimentos, identificação da área simulada e os trechos de rua avaliados



Fonte: autora.

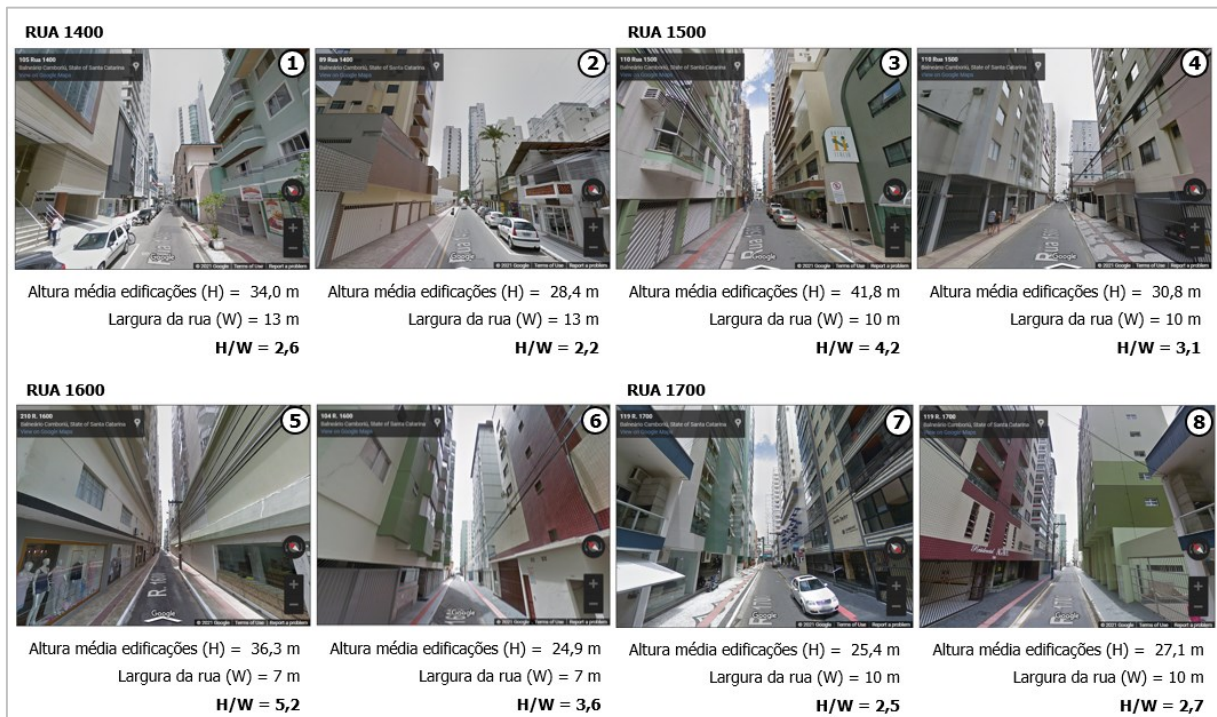
O cálculo da altura média das edificações, para definição da relação H/W, foi aproximado por meio da média ponderada com o comprimento da edificação em cada lado da

rua, seguido de uma média simples das ponderações de cada lado. A largura da rua, por sua vez, foi estimada aferindo a distância entre edificações no próprio mapa, pela ferramenta de medição do QGIS, considerando rua todo o espaço ocupado pelos passeios e a rodovia.

A Figura 11 apresenta a relação H/W calculada e imagens obtidas pelo Google Street View (GOOGLE, 2019) de cada um dos trechos. O trecho 5 apresenta a maior relação H/W na área avaliada, com 5,2. Este trecho, localizado na rua 1600, caracteriza um cânion profundo, onde a largura da via é de apenas 7 metros. Embora o trecho com maior altura média das edificações seja o 3, na rua 1500, a largura da via também é maior, com aproximadamente 10 metros de rua e passeios.

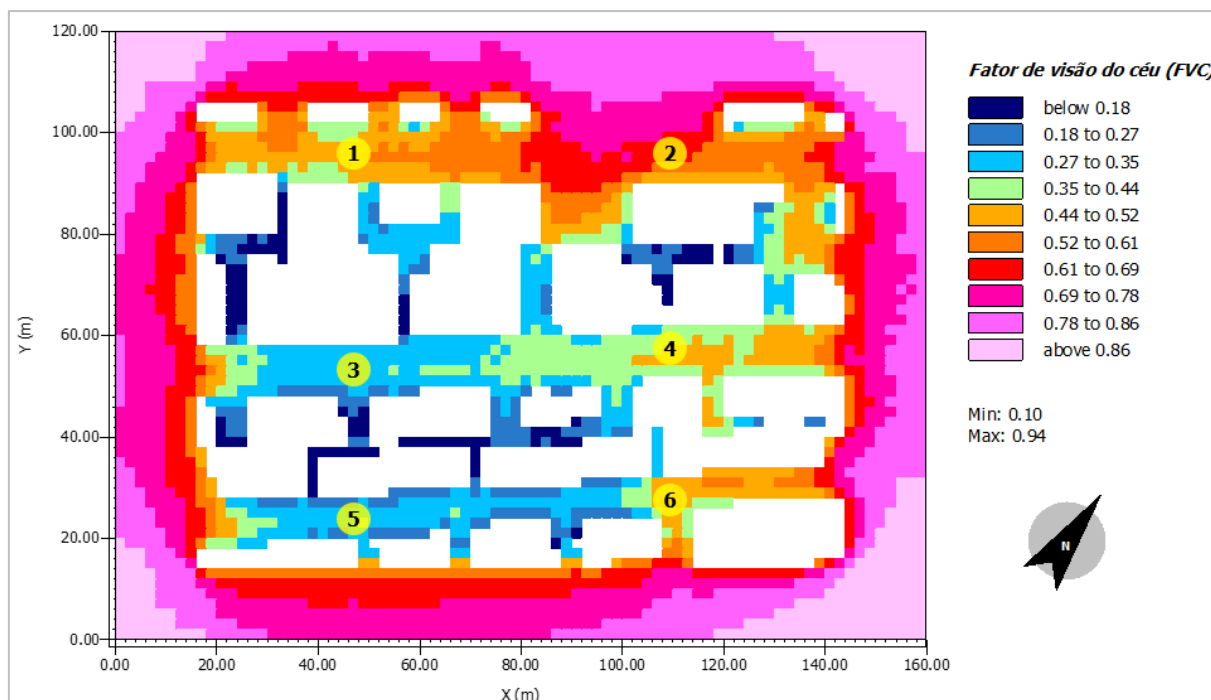
A Figura 12 apresenta graficamente o fator de visão do céu na área A simulada pelo ENVI-met (indicada na Figura 10). Verifica-se que os trechos de rua 7 e 8 não foram contemplados pela área modelada no programa ENVI-met, por isso estes trechos não são mostrados na Figura 12. Os valores de FVC em cada trecho confirmam a relação H/W calculada. Nota-se FVC de até 0,35 nos trechos 3 e 5, e de até 0,61 no trecho 2. Destaca-se que este cálculo pelo ENVI-met são valores aproximados conforme a dimensão da malha de células na sua modelagem.

Figura 11 - Cânions urbanos da área A



Fonte: imagens do Google Maps (2019) e cálculos da autora.

Figura 12 - Fator de visão do céu na área A simulada no ENVI-met



Fonte: autora.

3.1.1.2 Área B

A área B compreende um trecho da Quarta avenida, caracterizada pelo uso comercial e de serviços pesados. Esta área apresenta intenso tráfego de veículos durante todo o ano pela população local, não sendo particularmente afetada pela movimentação de turistas no verão. As vias desta área são mais largas, no mínimo de 12 metros até 26 metros na própria avenida. As edificações são mais baixas, como observado na Tabela 1, com altura média edificada de 6,30 metros. A distribuição irregular das edificações nos lotes quanto aos recuos dificulta a caracterização da área através da relação H/W de cânions urbanos, pois não há uma largura da via uniforme para basear o cálculo.

A Figura 13 apresenta as edificações da área levantada conforme uma escala de número de pavimentos. É notável o predomínio de edificações com até 4 pavimentos. A existência de áreas com 0 pavimentos indica lotes utilizados como estacionamento. A área B representa uma região tipicamente comercial e local. O tráfego de veículos nesta região constitui grande fonte de geração de calor antropogênico, além das máquinas e equipamentos utilizadas em sistemas de condicionamento de ar dos estabelecimentos. A região da área B também apresenta espaços vegetados. Há presença de algumas árvores de pequeno porte no

decorrer da avenida e em alguns lotes é possível identificar vegetação em maior quantidade e árvores de grande porte.

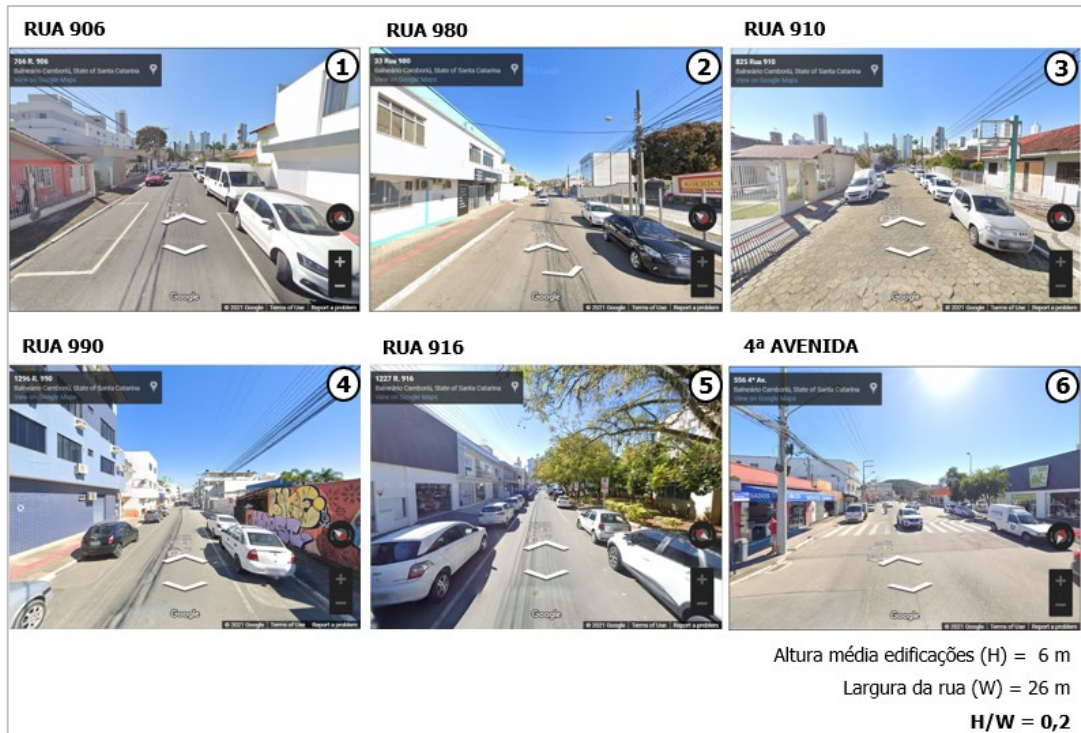
Figura 13 - Área B com classificação das edificações em número de pavimentos, identificação da área simulada e os trechos de rua avaliados



Fonte: autora.

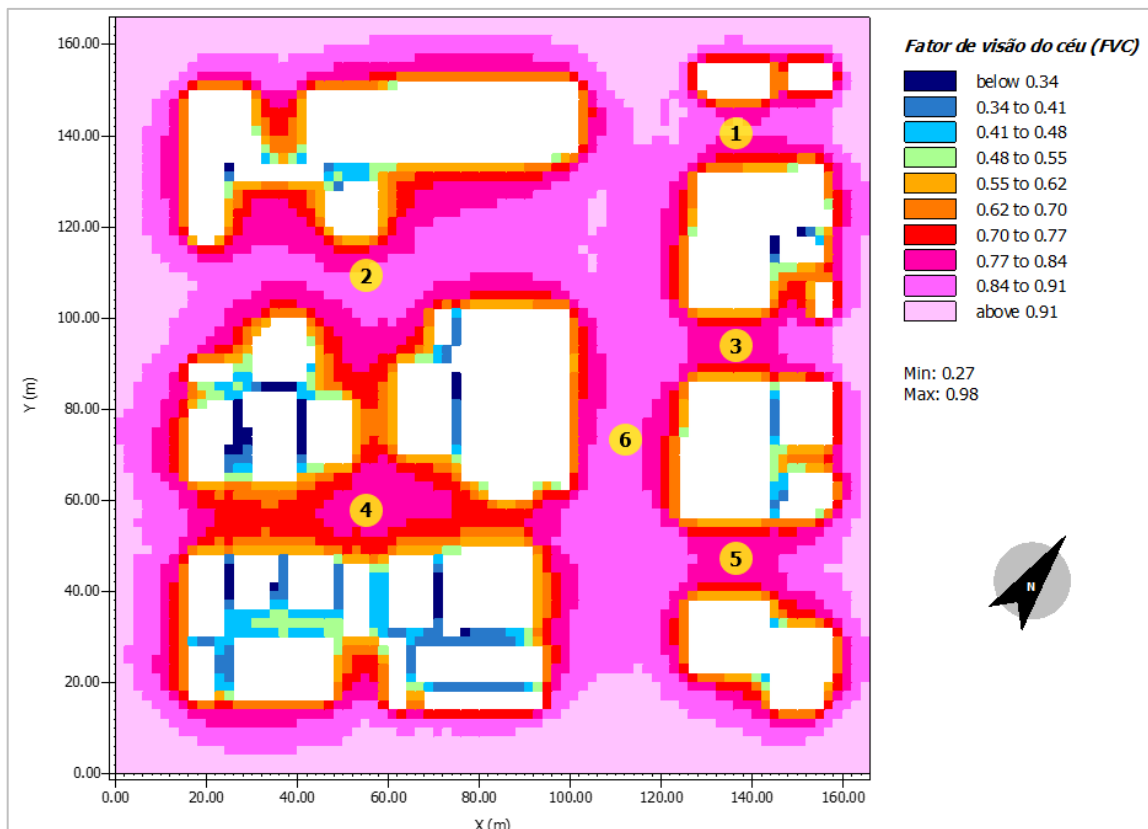
Como mencionado anteriormente, a geometria da área B não representa uma definição regular de cânion urbano. Os 6 números identificados na Figura 13 marcam as ruas modeladas na simulação. A Figura 14 mostra a vista de cada uma destas ruas pelo Google Street View (GOOGLE, 2021). Verifica-se uma maior visão do céu, especialmente na Quarta Avenida (ponto 6), onde a largura da rua é de aproximadamente 26 metros e as edificações têm em média 6 metros de altura, caracterizando um cânion urbano raso, com relação H/W de 0,2. O maior FVC da área B em relação à da área A é confirmado pela representação gráfica deste fator (Figura 15) segundo aproximação da modelagem no ENVI-met. Ressalta-se que o FVC representado leva em conta apenas as edificações do modelo, embora a presença de vegetação, notável no ponto 5 (Figura 14), também contribua para o cálculo deste valor.

Figura 14 - Vista das ruas simuladas da área B



Fonte: imagens do Google Maps (2021) e cálculo da autora.

Figura 15 - Fator de visão do céu na área B simulada no ENVI-met



Fonte: autora.

3.1.2 Definição dos períodos de estudo e dias simulados

A definição dos períodos de estudo foi baseada nas limitações temporais do programa de pós-graduação e ao custo computacional do programa ENVI-met. Em relação ao ENVI-met, sabe-se que as simulações microclimáticas pelo *software* são limitadas a alguns dias. Além disso, as simulações em condições climáticas instáveis exigem maior rigidez nas configurações de inicialização, aumentando o custo computacional. Por estes motivos, optou-se pelo monitoramento das condições meteorológicas e pela aferição da temperatura e umidade relativa do ar nos pontos de monitoramento por pelo menos 14 dias.

Com o objetivo de selecionar dias representativos em diferentes estações do ano, foram selecionados dois períodos de 14 dias para o trabalho. Primeiro, na última semana do mês de junho e início de julho, período em que se inicia o inverno, marcado por temperaturas mais baixas. Segundo, no mês de novembro, período mais próximo do verão sem comprometer o cronograma da pesquisa. Este período, intermediário da primavera, apresenta baixa amplitude de temperatura diária e a temperatura mínima média do ar se mantém acima de 20 °C (CLIMATE ONE BUILDING, 2018).

Com a seleção do período de inverno, a situação de frio pode ser explorada. Isto apresenta vantagens em relação à geração de calor antropogênico, que é reduzida nesta estação do ano pela menor movimentação de turistas e pela menor utilização de condicionadores de ar. Os condicionadores de ar utilizados nas edificações, principalmente para resfriamento, liberam calor para a rua. Além disso, a altura solar é mais baixa, de modo que a radiação solar diária incidente neste período é menor.

A segunda seleção, de um período primaveril, apresenta temperaturas mais elevadas, possibilitando a observação do desenvolvimento de fenômenos climáticos intensificados. Mais próximo do solstício de verão, a intensidade da radiação solar é maior. O calor antropogênico gerado também pode ser maior que nos dias de inverno, devido ao uso de condicionadores de ar e ao aumento do fluxo de turistas.

As condições meteorológicas avaliadas para definir o dia de simulação de cada período foram obtidas por meio dos registros das estações meteorológicas do Aeroporto de Navegantes (NOAA, 2021). A estação de Navegantes registra dados de nebulosidade, velocidade e direção do vento, que foram utilizados para definir os dias com maior estabilidade atmosférica de cada intervalo para a simulação pelo ENVI-met. A nebulosidade é medida em octas (oitavos) de cobertura do céu, variando entre 0 e 8, em que 0 octas significa céu limpo e 8 octas céu

totalmente encoberto. O critério de seleção dos dias ideais em relação à nebulosidade foi o de céu mais limpo possível.

Caso vários dias atendam este requisito, o segundo filtro foi em relação à direção do vento, no qual o critério foi a busca de dias com direção do vento mais uniforme. Este filtro visa a definição de uma direção constante durante a simulação, reduzindo o tempo de duração da mesma. Ainda levando em consideração os ventos, a velocidade do ar também foi avaliada, sendo priorizado dias com ventos mais leves. Este critério visa evitar erros de turbulência nas simulações, além desta condição estar associada ao desenvolvimento de ilhas de calor com maior intensidade (HEISLER; BRAZEL, 2015). Os critérios apresentados foram suficientes para a definição do dia mais adequado em cada período de 14 dias monitorados.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento de dados apresentado nesta sessão é referente a geometria, a identificação dos materiais, às medições locais realizadas nos pontos de monitoramento e aos parâmetros exigidos para a inicialização das simulações no programa ENVI-met.

3.2.1 Geometria urbana

A análise das áreas construídas foi baseada no arquivo DWG disponibilizado pela prefeitura de Balneário Camboriú (2010). Neste arquivo é possível identificar as áreas ocupadas por grande parte das edificações da cidade. A partir deste arquivo, foi feita uma conferência das áreas indicadas e as edificações atuais, corrigindo e acrescentando edificações novas. Ao mesmo tempo, uma estimativa da altura destas edificações foi realizada de maneira observacional, contando o número de pavimentos de cada edificação. Então, assumindo que cada pavimento possui três metros de altura, estimou-se a altura total de cada edificação. Esta aproximação já foi adotada em outros estudos (ACERO; ARRIZABALAGA, 2018), além disso, a própria modelagem da área no programa ENVI-met é aproximada conforme a definição das dimensões da grade.

A atribuição das alturas à cada área de edificação foi realizada no programa QGIS versão 2.18 – plataforma de sistema de informação geográfica com código-fonte aberto – em um arquivo formato *shapefile*. Este formato é aceito no programa ENVI-met v.4.4.6 e facilita a

localização das áreas no aplicativo Monde e a modelagem da geometria no aplicativo Spaces, de modo que esta é feita de modo automático conforme as dimensões da grade selecionadas.

Juntamente com o levantamento da geometria, foram identificados o tipo e a dor dos revestimentos empregados nas fachadas. A atribuição de diferentes características de envoltórias das edificações atua no microclima urbano, sendo estas informações relevantes para a criação do caso base das simulações. O caso base modelado representa a situação mais próxima da observada em campo.

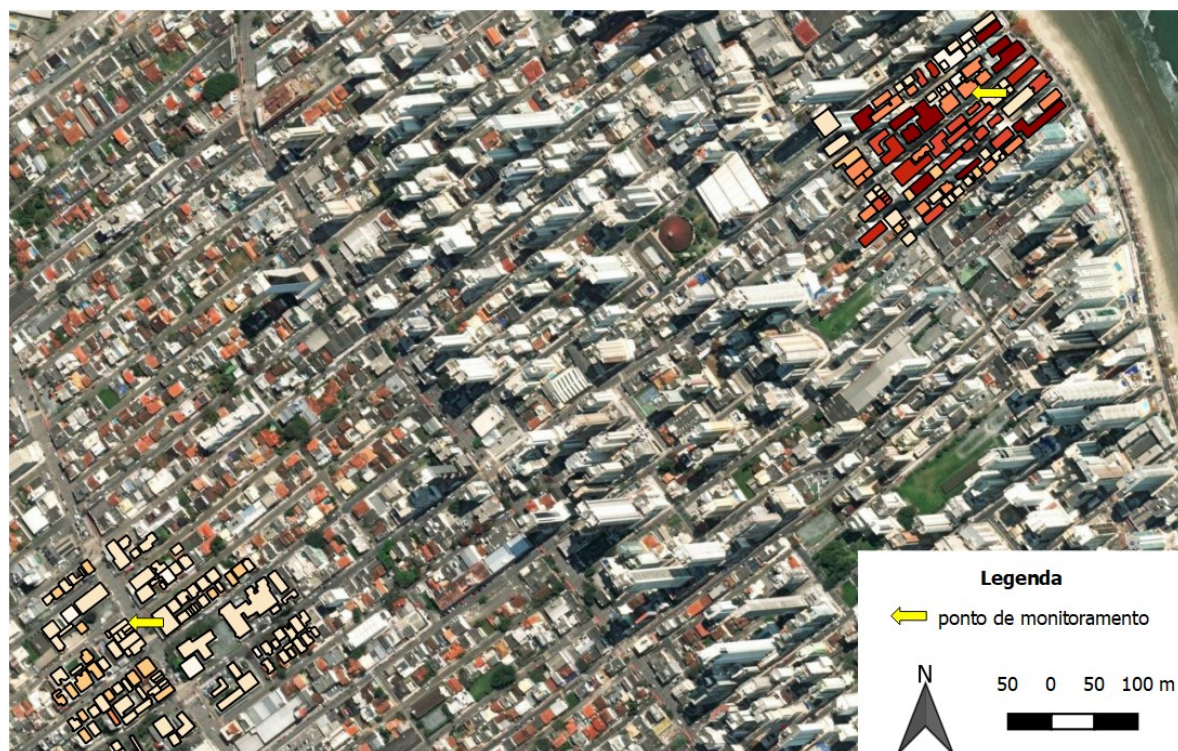
3.2.2 Medição de temperatura do ar e umidade relativa em campo

Em cada uma das áreas foram definidos pontos de monitoramento, em que se instalaram sensores de temperatura e umidade relativa do ar. Estes pontos são identificados nos modelos de simulação como “receptores” e serão utilizados no processo de validação dos modelos. Na área A, foram locados dois pontos, alinhados em relação ao solo, mas em diferentes alturas. As duas alturas indicam como se dá o gradiente de temperatura conforme a elevação. Na área B, por se tratar de um espaço aberto com pouca densidade vertical, apenas um ponto foi locado.

Os pontos de monitoramento foram selecionados com base na disponibilidade dos moradores em contribuir com a pesquisa. A Figura 16 mostra a localização dos pontos nas áreas A e B. Na área A, os equipamentos foram instalados nas varandas do 2º e do 8º pavimento, a uma altura em relação ao solo de 4,5 metros (ponto A1) e 22,5 metros (ponto A2) aproximadamente. Na área B, o equipamento foi instalado na varanda do 2º pavimento da edificação selecionada, a uma altura de aproximadamente 4,5 metros (ponto B) em relação ao solo.

A aferição da temperatura do ar e da umidade relativa do ar é viabilizada pela utilização de HOBO Data Loggers da fabricante Onset, modelo MX1101. O instrumento possui precisão de 0,21 °C na temperatura do ar e entre 2% a 6% na umidade relativa do ar conforme o intervalo de medição. As informações completas referentes aos instrumentos são apresentadas no Quadro 2. Os instrumentos foram configurados para registrar temperatura e umidade relativa do ar a cada 10 minutos.

Figura 16 - Identificação dos pontos de monitoramento das áreas A e B em Balneário Camboriú-SC



Fonte: autora.

Quadro 2 - Especificações HOBO MX1101 Data Logger

Temperature Sensor	
Range	-20° to 70°C (-4° to 158°F)
Accuracy	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F)
Resolution	0.024°C at 25°C (0.04°F at 77°F)
Drift	<0.1°C (0.18°F) per year
RH Sensor*	
Range	1% to 90%, non-condensing
Accuracy	±2.0% from 20% RH to 80% RH typical to a maximum of ±4.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 20% RH and above 80% RH ±6% typical
Resolution	0.01%
Drift	<1% per year typical

Fonte: <https://www.onsetcomp.com/datasheet/MX1101>

A instalação dos HOBOS nos pontos de monitoramento deve garantir a não interferência de fontes de calor localizadas, como garagens e máquinas. Além disso, tratando-se de um aparelho de uso interno, deve-se protegê-lo contra intempéries e radiação solar direta, para que não haja perturbações aos aparelhos durante as medições. Para a escolha dos pontos de medição, optou-se por varandas cobertas (proteção horizontal), para reduzir a exposição dos termo-higrômetros a precipitação e a radiação solar. A Figura 17 mostra os equipamentos

instalados em campo nos pontos A1, A2 e B no período de inverno. Sendo insuficiente a proteção unicamente das coberturas, foram construídos abrigos meteorológicos de baixo custo para os HOBOS utilizados, inspirados no modelo “Pratos” de Freitas (2018). Os detalhes da construção são apresentados no APÊNDICE A - CONSTRUÇÃO DO ABRIGO METEOROLÓGICO.

Figura 17 - Equipamentos instalados nos pontos de monitoramento durante o período de inverno



Fonte: autora.

3.2.2.1 Constante de calibração

Foram utilizados três termo-higrômetros com *data-logger*, aqui nomeados segundo seu número de identificação: HOBO 35, HOBO 42 e HOBO 65. Com o objetivo de estabelecer a relação entre as medições de cada aparelho, foi realizado um procedimento de calibração em dois períodos: antes e depois da utilização dos aparelhos em campo.

Na primeira etapa, os aparelhos foram fixados em uma parede em uma sala, em um local protegido da luz solar e afastado de equipamentos e da movimentação de pessoas. A partir das 12h do dia 21/05/2021 até as 12h do dia 24/05/2021 foram medidos e registrados dados de temperatura e umidade relativa do ar em cada instrumento. Durante estas 72 horas (três dias), os aparelhos registraram valores de temperatura e umidade do ar em intervalos de tempo de 10 minutos, totalizando 433 registros.

Assumiu-se que o HOBO 35 como referência. Então, foram calculadas as variações (Δ) entre o HOBO 35 e os HOBOS 42 e 65 em cada intervalo de medição. Os resultados deste procedimento indicaram que existe uma diferença média de 0,05 °C e de -0,40% entre o HOBO

35 e o HOB065 em relação à temperatura do ar e à umidade relativa do ar, respectivamente. Entre o HOB0 35 e o HOB0 42 não foram observadas diferenças entre as medições de temperatura (média igual a zero), enquanto a diferença média nos registros de umidade relativa do ar foi de 0,10%.

Após a utilização dos termo-higrômetros em campo ocorreu a segunda parte do procedimento de calibração. A partir das 09h20 do dia 01/12/21 até 12h40 do dia 04/12/21 foram medidos e registrados dados de temperatura e umidade relativa do ar em cada instrumento. Os aparelhos, desta vez, foram apoiados em uma caixa de papelão aberta em um local protegido da luz solar e afastado de possíveis geradores de calor interno. Durante este intervalo, os aparelhos registraram valores de temperatura e umidade do ar a cada 10 minutos, totalizando 453 registros.

Ainda considerando o HOB0 35 como referência, as variações (Δ) entre as temperaturas do ar e umidade relativa registradas foram recalculadas na segunda parte da calibração. Os resultados das variações entre o HOB0 35 e o HOB0 65 foram de 0,05 °C e -0,44%, respectivamente, mesmos valores encontrados na primeira parte do procedimento de calibração. Entre o HOB0 35 e o HOB0 42, por sua vez, a diferença foi de 0,02 °C na temperatura do ar e de -0,21% na umidade relativa do ar. Para definir as constantes de calibração, optou-se pela média da diferença de temperatura e umidade do ar dos dois períodos avaliados, totalizando 886 registros. Com isso, as constantes utilizadas para corrigir os dados medidos em campo são apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Constantes de calibração dos termo-higrômetros utilizados em campo

	Constante de calibração		
	HOB0 35	HOB0 42	HOB0 65
Temperatura do ar (°C)	0	0,01	0,05
Umidade relativa (%)	0	-0,08	-0,44

Fonte: autora.

3.2.3 Condições meteorológicas

As medições em campo fornecem apenas dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar. Entretanto, dados como a radiação solar global, o cobrimento do céu, a velocidade e a direção do vento, também são necessários para a inicialização das simulações pelo programa ENVI-met. Estas informações foram provenientes de estações meteorológicas próximas à cidade de Balneário Camboriú.

Os dados nebulosidade, direção e velocidade do vento, foram provenientes da estação do Aeroporto Ministro Victor Konder da cidade de Navegantes (SC), disponibilizados pela National Centers for Environmental Information (NOAA, 2021). Embora os dados desta estação sejam limitados ao horário de funcionamento do aeroporto, é a estação meteorológica mais próxima do local de estudo que apresenta informações acerca da nebulosidade em diferentes níveis de nuvens. Sendo uma das variáveis utilizadas como critério para a definição dos dias ideais para a simulação (3.1.2).

Utilizou-se também os dados da estação meteorológica instalada no Porto de Itajaí, monitorada pelo Laboratório do Clima da Universidade do Vale de Itajaí, em parceria com a Defesa Civil da cidade de Itajaí (LABCLIMA, 2021). A temperatura do ar da estação de Itajaí foi utilizada como referência para avaliar o clima urbano de Balneário Camboriú e o desenvolvimento de ilhas de calor na cidade. Os dados de Itajaí também foram utilizados para conferir os dados de ventos de Navegantes.

Os dados meteorológicos das estações apresentadas foram utilizados como fonte de dados para a calibração das simulações. As estações meteorológicas e os dois pontos de medição em campo utilizados no presente trabalho são apresentadas no mapa da Figura 18. Nota-se que a Estação do Porto de Itajaí localiza-se em um molhe, cercado pela água do mar. Por este motivo, observa-se menor amplitude nas temperaturas desta estação, bem como uma maior umidade relativa do ar, em comparação com os registros do Aeroporto de Navegantes.

Figura 18 - Localização das estações meteorológicas próximas e pontos de monitoramento



Fonte: Imagem aérea da Bing Maps - Microsoft Corporation, composição da autora.

Para a compatibilização da radiação solar global estimada pelo programa com a radiação solar foram utilizadas as estações meteorológicas de Indaial-SC e de Florianópolis-SC. No período de inverno, a radiação solar global medida pela estação de Indaial foi utilizada para calibrar a estimativa do ENVI-met v.4.4.6. No segundo período esta estação estava desativada, portanto utilizou-se os dados de radiação da estação de Florianópolis para fazer esta calibração. Os dados das duas estações automáticas, de Indaial (A817) e Florianópolis (A806), são disponibilizados pelo Banco Nacional de Dados Meteorológicos do INMET (2021).

3.2.4 Processamento dos dados

Como mencionado em 3.2.2.1, o primeiro processamento dos dados provenientes das medições em campo é a atualização dos valores registrados conforme as constantes de calibração calculadas (Tabela 2). A partir daí, inicia-se um processo que visa melhorar a comparação entre os dados meteorológicos de diferentes fontes.

As medições em campo nos pontos de monitoramento foram registradas pelos termohigrômetros com data logger em intervalos de 10 minutos. As simulações e a estação meteorológica do Aeroporto apresentam as temperaturas do ar e a umidade relativa do ar de hora em hora. Os registros da estação do Porto de Itajaí disponibilizados pelo LabClima apresentam dados de 5 em 5 minutos. Para permitir a comparação entre todas as fontes de dados e diminuir possíveis discrepâncias positivas ou negativas das medições em campo e da estação de Itajaí, foi criada uma base de dados com intervalos de 30 minutos. Toda a análise de dados é realizada sobre estes dados processados, quando a referência é apresentada de hora em hora, indica que os dados de metade de hora foram descartados.

Nos pontos de monitoramento, as novas temperaturas e umidades relativas são provenientes da média entre a medição anterior ao horário cheio e a medição posterior. Por exemplo, para definir a temperatura das 09h fez-se a média entre as temperaturas registradas 08h50, 09h e 09h10. O mesmo ocorreu nas metades de hora, para 09h30, por exemplo, calculou-se a média entre 09h20, 09h30 e 09h40. Nos registros da estação de Itajaí, o processamento se deu pela média entre as duas medições anteriores e as três posteriores do horário desejado. Exemplificando a definição da temperatura às 09h, calculou-se a média entre as temperaturas registradas em 08h50, 08h55, 09h, 09h05, 09h10 e 09h15.

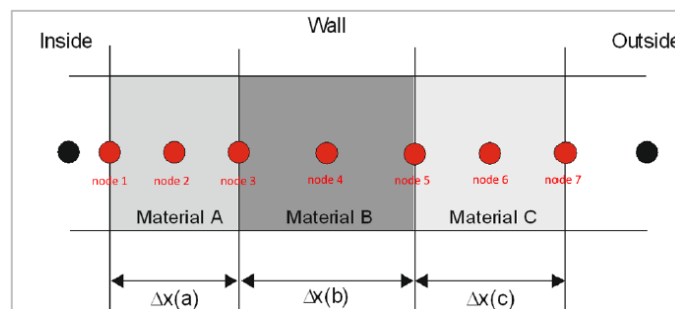
3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

3.3.1 Modelagem

A simulação dos cenários de interesse no programa ENVI-met pode ser dividida em três partes: a criação de um banco de dados de materiais (*Database*), a modelagem da geometria (*Area Input File*) e a configuração das condições limítrofes (*Configuration File*) (SALATA *et al.*, 2016). Estas três partes geram arquivos próprios, formatos INFOX, INX e SIMX, respectivamente, que são integrados para a simulação.

A criação de um banco de dados próprio é opcional ao usuário, que pode escolher utilizar apenas a biblioteca original do programa ENVI-met. A criação dos materiais que compõe as edificações de Balneário Camboriú foi baseada nas propriedades da biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no EnergyPlus de Weber *et al.* (2017). Assim como no EnergyPlus, a composição dos elementos de parede e cobertura no ENVI-met se dá de forma perpendicular ao fluxo de calor. Porém, o ENVI-met permite adicionar apenas três camadas, pois a transferência é calculada a partir de um modelo de 7 nós. A Figura 19 apresenta o modelo de 7 nós utilizados atualmente para os cálculos de transferência de calor em um elemento de parede ou cobertura.

Figura 19 - Esquema do modelo de cálculo da transferência de calor de um elemento no ENVI-met v.4.4.6



Fonte: Simon, Bruse e Kissel, 2017.

As estruturas escolhidas para as edificações da cidade foram a de bloco cerâmico furado com argamassa interna e externa para as paredes, e telha de fibrocimento com laje simples para as coberturas. As propriedades das camadas destes elementos equivalentes a camadas perpendiculares ao fluxo são apresentadas no Quadro 3. Onde, e é a espessura; λ é a condutividade térmica; ρ é o peso específico aparente; c é o calor específico; Rt é a resistência

térmica total; Ut é a transmitância térmica total e Ct é a capacidade térmica total, todas as unidades estão indicadas no quadro.

Quadro 3 - Propriedades dos elementos de parede e cobertura utilizados nas simulações

PAREDE										
Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/(m.K))	ρ (kg/m ³)	c (kJ/(kg.K))	Rt ((m ² .K)/W)	Ut (W/(m ² .K))	Ct (kJ/(m ² .K))
Cerâmica	6 furos 9x14x24 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39	150000
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de ar	6,32	0,361	-	-	0,175		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
COBERTURA										
Telha	Laje	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/(m.K))	ρ (kg/m ³)	c (kJ/(kg.K))	Rt ((m ² .K)/W)	Ut (W/(m ² .K))	Ct (kJ/(m ² .K))
Fibrocimento	Mação de concreto	Sem acabamento superior e inferior	Fibrocimento	0,80	0,950	1900	0,840	0,0084	2,06	233000
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100		
			Concreto	10,0	1,750	2200	1,00	0,0571		

Fonte: Weber *et al.*, 2017.

O primeiro passo da modelagem, portanto, é a criação dos materiais componentes dos elementos de parede e cobertura. Como o programa ENVI-met limita a três camadas de materiais, a composição das paredes foi adaptada a partir da criação de um material único de argamassa e cerâmica, mantendo a camada de ar como intermediária. A criação do elemento argamassa e cerâmica manteve a espessura dos dois componentes, somando-as (2,5 cm + 1,34 cm = 3,84 cm). O peso específico aparente e o calor específico foram calculados por meio da média ponderada pela espessura, equações 6 e 7, respectivamente. A condutividade foi calculada a partir da resistência e da espessura, com a equação 8.

$$\rho = \frac{(1,34 \times 1600) + (2,5 \times 2000)}{3,84} = 1860,4 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

$$c = \frac{(1,34 \times 0,92) + (2,5 \times 1,00)}{3,84} = 0,972 \text{ kJ/(kg.K)} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{e}{R} = \frac{2,5 + 1,34}{0,015 + 0,022} = 0,98 \text{ W/(m.K)} \quad (9)$$

Os demais materiais componentes dos elementos de parede e cobertura selecionados tiveram suas propriedades mantidas conforme o Quadro 3. No caso das propriedades não apresentadas no Quadro 3, como a emitância dos materiais, o calor específico e o peso específico do ar, por exemplo, utilizou-se os valores padrão de um material semelhante da base de dados do ENVI-met. A Tabela 3 a seguir mostra todos os materiais e parâmetros utilizados nas simulações com o programa ENVI-met. Nota-se a presença de três níveis – AR, MR e BR – de argamassa e cerâmica (“Arg+Cer”) e de fibrocimento (“Fibroc.”). Estes níveis se referem à refletância da superfície: alta refletância (AR), média refletância (MR) e baixa refletância (BR).

Os diferentes níveis de refletância são utilizados para compor os cenários base considerando o nível de refletância identificado em cada fachada, e os cenários paramétricos (ver 3.3.4). A cobertura de fibrocimento de baixa refletância foi criada exclusivamente para representar o estado atual das coberturas das áreas de estudo, observadas pelas imagens aéreas. O valor da refletância solar desta telha – 0,15 – foi baseado na dissertação de Maestri (2017), que avaliou esta propriedade em telhas envelhecidas, chegando a até 0,14 de refletância solar.

Tabela 3 - Materiais e parâmetros utilizados para compor as camadas dos elementos de parede e de cobertura na Biblioteca do ENVI-met.

Parâmetro	PAREDE				COBERTURA				
	Arg+Cer AR	Arg+Cer MR	Arg+Cer BR	Ar	Fibroc. AR	Fibroc. MR	Fibroc. BR	Ar	Concreto
Espessura padrão (m)	0,0384	0,0384	0,0384	0,0632	0,008	0,008	0,008	0,25	0,1
Absortância solar	0,2	0,5	0,8	0	0,3	0,6	0,85	0	0,5
Transmitância solar	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Refletância solar	0,8	0,5	0,2	0	0,7	0,4	0,15	0	0,5
Emitância térmica	0,9	0,9	0,9	0,96*	0,9	0,9	0,9	0,96*	0,9
Calor específico (J/(kg.K))	972	972	972	1006*	840	840	840	1006*	1000
Condutividade térmica (W/(m.K))	0,98	0,98	0,98	0,361	0,95	0,95	0,95	1,190	1,75
Densidade (kg/m ³)	1860,4	1860,4	1860,4	1,204*	1900	1900	1900	1,204*	2200

Fonte: autora.

Nota:

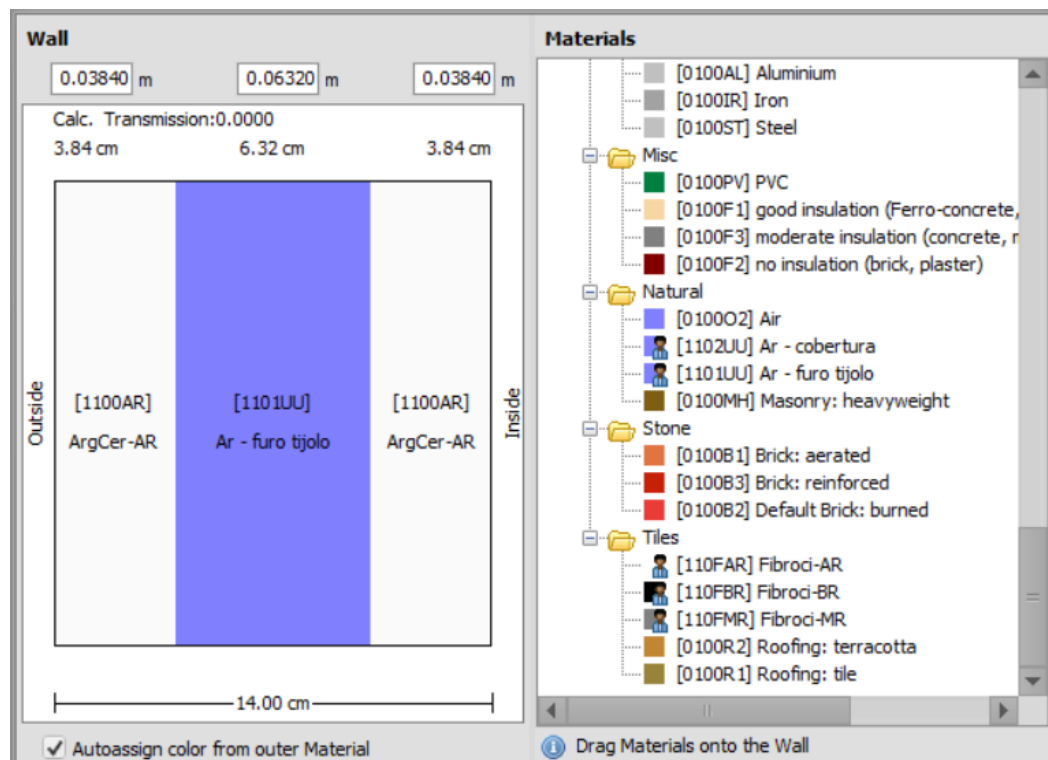
* Valores da biblioteca padrão do ENVI-met para o material “Air (ID 010002)”.

Uma vez criados os materiais, os elementos com até três camadas são criados. A Figura 20 exemplifica como se dá a atribuição de materiais e espessuras para compor uma parede de bloco cerâmico com argamassa interna e externa de alta refletância. O mesmo processo foi realizado para a criação das paredes de média e baixa refletância, ressalta-se que apenas a

argamassa externa foi alterada para o material com menor refletância. Para a composição das coberturas (Figura 21) o processo é o mesmo.

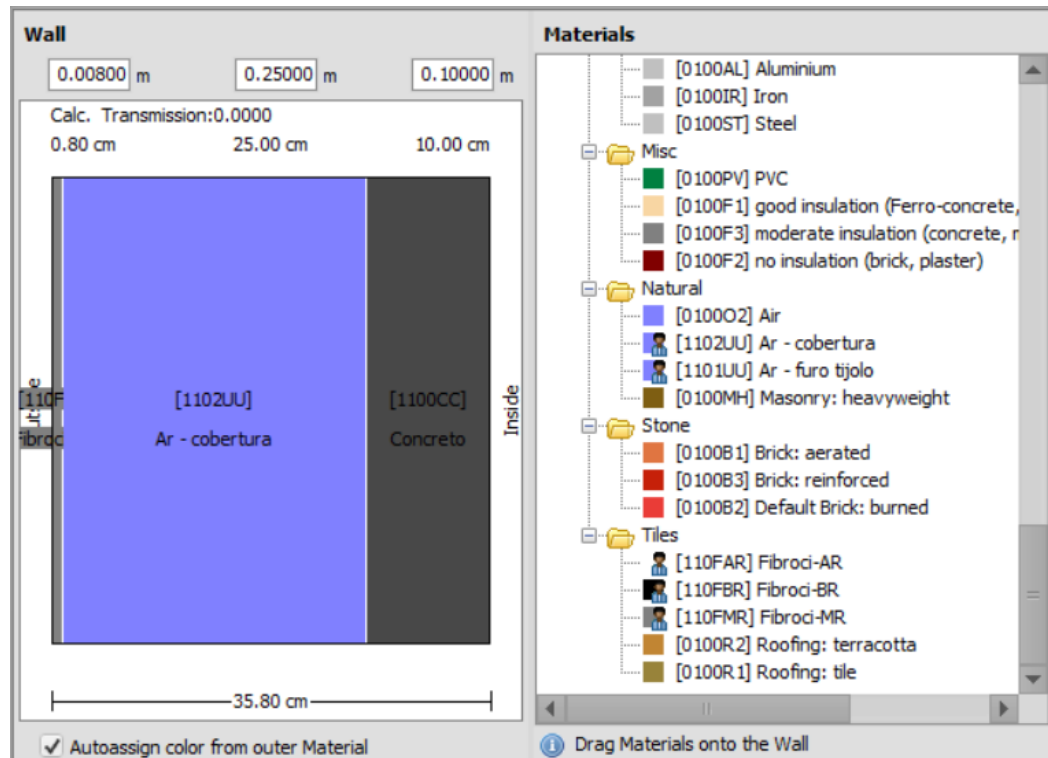
Para a pavimentação, optou-se pela utilização de perfis de solo padrão da biblioteca de materiais do ENVI-met v.4.4.6, compatíveis com as propriedades óticas previstas para a formação dos cenários. Para o asfalto, o “*AsphaltRoad*” (ID 0100ST) foi selecionado, já para a pavimentação de concreto, o perfil “*Pavement (Concrete), used/dirty*” (ID 0100PP) foi escolhido. O perfil de asfalto possui refletância de 0,20, e $1,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ de condutividade térmica. Enquanto o de concreto possui refletância solar de 0,30 e condutividade térmica de $1,63 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ambos os perfis contam com solo arenoso-argiloso abaixo da estrutura de pavimentação.

Figura 20 - Composição da parede de bloco cerâmico com argamassa interna e externa criada no modelo ENVI-met



Fonte: autora.

Figura 21 - Composição da cobertura de fibrocimento e laje maciça de concreto criada no modelo ENVI-met



Fonte: autora.

Após a criação da biblioteca de materiais, inicia-se a modelagem da geometria no programa. O processo da modelagem da geometria inicia-se no levantamento da geometria (seção 3.2.1) com a atribuição da altura aos polígonos, que representam as áreas de cada edificação componente da malha urbana. Este procedimento foi realizado no próprio arquivo vetorial georreferenciado (*shapefile*) pelo programa QGIS. Uma vez que se tem o arquivo georreferenciado, a importação para o ENVI-met é realizada através do aplicativo Monde da interface do ENVI-met. Após a importação, é realizado o ajuste para que os atributos das feições sejam interpretados pelo aplicativo monde, neste caso, as alturas sejam atribuídas a cada polígono.

A segunda etapa da modelagem da geometria consiste na exportação da área em *shapefile* para um arquivo do modelo ENVI-met, formato INX. O modelo espacial do ENVI-met é dividido em células tridimensionais. A exportação da geometria para um modelo tridimensional é realizada automaticamente pelo programa a partir do dimensionamento das células. O dimensionamento da grade deve considerar aspectos como: a necessidade de evitar erros numéricos, a compatibilidade com as dimensões reais e a capacidade do hardware que processará as simulações (SALATA *et al.*, 2016). A resolução horizontal das células (*x, z grid*)

foi definida em 2 metros, dimensão também sugerida em outros trabalhos (SALATA *et al.*, 2016; MAGGIOTTO *et al.*, 2014).

Para definir a altura da grade (*z-grid*), é recomendável que a altura total seja no mínimo o dobro da altura da edificação mais alta do modelo (GUSSON; DUARTE, 2016). A fim de reduzir o tempo de simulação, pode ser adotado um fator de telescópio (*telescoping factor*) a partir de determinada altura. Este fator aumenta a altura da célula conforme o fator em percentual. Além disso, pode-se optar pelo refinamento da altura das primeiras caixas de grade, dividindo-as em cinco partes iguais, com o objetivo de se obter maior precisão do microclima urbano no nível do pedestre.

Definiu-se a resolução vertical em 3 metros, para compatibilizar com a aproximação do levantamento da geometria, que considerou cada pavimento com esta altura. A edificação mais alta da área A possui 72 metros de altura. Na área B, a edificação mais alta apresenta 15 metros de altura. Na área A foi definido que 34 células z seriam suficientes, enquanto na área B, 20 células. Em ambas foi aplicado um fator de telescópio de 5% a partir de 30 metros de altura, além de adotado a divisão da primeira altura de células em cinco subcélulas.

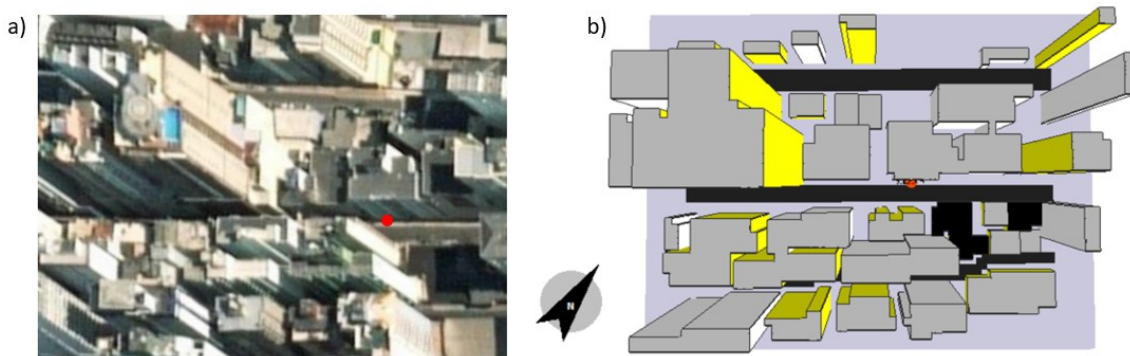
A partir do dimensionamento da grade do modelo, o ENVI-met automaticamente transforma a área com as dimensões reais em *shapefile* para o modelo tridimensional utilizado nas simulações em INX. Uma vez que o modelo tridimensional é criado, a edição passa a ser pelo aplicativo Spaces. Na interface do Spaces é aplicado em cada superfície da malha urbana os materiais criados na biblioteca de materiais do programa ENVI-met. Ressalta-se que a modelagem do caso base tem como objetivo a validação da simulação. A atribuição de materiais às superfícies se dá através da aproximação da situação observada em campo entre os três níveis de refletância criados na biblioteca de materiais do ENVI-met anteriormente.

Também é neste aplicativo que se atribui o tipo de solo/pavimentação, a presença e localização de vegetação e a localização de receptores. Os receptores indicam a localização de pontos de interesse em que as informações microclimáticas são registradas. Nas simulações do caso base, os receptores indicam a posição dos pontos de monitoramento, e são utilizados no processo de validação do modelo simulado.

A Figura 22 e a Figura 23 apresentam as áreas A e B em imagens de satélite e da modelagem no ENVI-met. Na área modelada nota-se a presença de células sem edificação nas bordas de modelo. É necessário garantir um espaçamento entre as bordas do modelo e as edificações para evitar erros de turbulência durante a inicialização das simulações. Para tanto, foram adicionadas células às bordas das áreas A e B, aumentando a dimensão total do modelo.

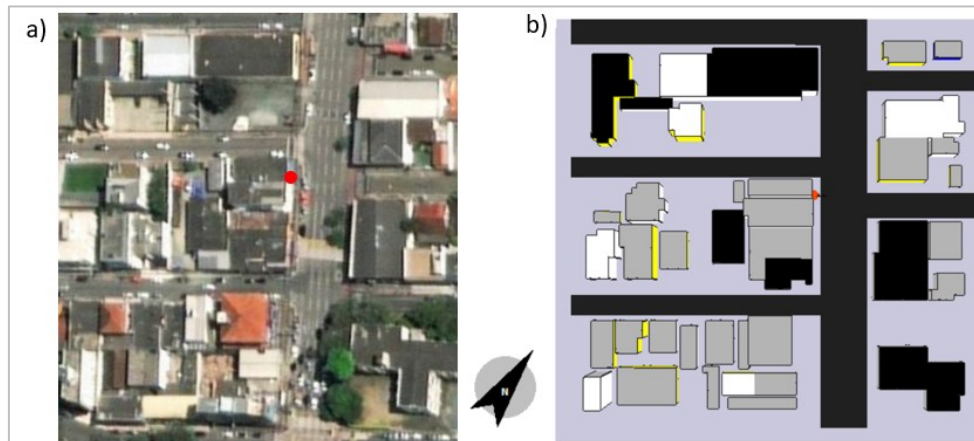
A dimensão total da área A modelada tem 80 células em x, 60 células em y e 34 células em z, totalizando um volume de 160 metros x 120 metros x 170,18 metros. Enquanto a área B tem 83 células em x, 83 células em y e 20 células em z, totalizando 166 metros x 166 metros x 69,62 metros. Os valores da altura total z foram definidos segundo a aplicação do fator de telescópio de 5% mencionado anteriormente.

Figura 22 - Vista aérea da área A pela a) imagem de satélite e b) modelagem tridimensional no ENVI-met. O ponto vermelho mostra a localização do receptor



Fonte: imagem aérea da Microsoft Corporation (a), composição da autora.

Figura 23 - Vista aérea da área B pela a) imagem de satélite e b) modelagem tridimensional no ENVI-met. O ponto vermelho mostra a localização do receptor



Fonte: imagem aérea da Microsoft Corporation (a), composição da autora.

3.3.2 Parâmetros de simulação

A configuração das condições limítrofes dá origem ao arquivo SIMX. Nesta etapa são definidos os modos de simulação e as condições meteorológicas iniciais. A data e o horário de início, e a duração da simulação são indicados. É recomendável que a simulação seja iniciada

durante a noite ou madrugada, para que o programa inicie com atmosfera neutra. Quanto a duração da simulação, sugere-se que os resultados do primeiro dia simulado sejam descartados (GUSSON, 2020), para preferencialmente utilizar dados de saída mais refinados, evitando os possíveis erros de inicialização (SALATA *et al.*, 2016). Por estes motivos, as simulações foram iniciadas às 04:00 e com duração de 44h em ambos os períodos de estudo (inverno e primavera).

Depois, é decidido o nível das configurações iniciais, entre iniciante, intermediário e avançado. O Quadro 4 indica as diferenças entre níveis iniciante e intermediário. O nível avançado cobre todas as funções do intermediário com adição de: informações sobre a concentração de poluentes, temperatura interna das edificações, sistema de cálculo *Indexed View Sphere* (IVS), definição do intervalo de tempo para salvar dados, condições da vegetação, redução do timestep de cálculo, ajuste da radiação solar, definição das condições limites das laterais (*lateral boundary condition*), escolha do campo de pressão, escolha dos métodos de cálculo para resistência do ar nas fachadas, escolha do modelo de turbulência (GUSSON, 2020).

Quadro 4 - Diferenças entre níveis das configurações iniciais de simulação no ENVI-met v.4.4.6

	Iniciante	Intermediário	Avançado
Temperatura do ar	min. e max.	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i> : horária.	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i> : horária.
Velocidade do vento	média diária	<i>simple forcing</i> : valor inicial a 10m. <i>full forcing</i> : horária (opcional).	<i>simple forcing</i> : valor inicial a 10m. <i>full forcing</i> : horária (opcional).
Direção do vento	predominante	<i>simple forcing</i> : valor inicial. <i>full forcing</i> : horária (opcional)	<i>simple forcing</i> : valor inicial. <i>full forcing</i> : horária (opcional)
Rugosidade abaixo do anemômetro	_____	<i>simple forcing</i>	<i>simple forcing</i>
Umidade relativa	_____	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i>	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i>
Umidades e temperaturas iniciais em camadas do solo	_____	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.
Dispersão de poluentes	_____	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.
Condição de nuvens	_____	<i>simple forcing</i> : opcional, o modelo calcula, mas permite edição.	<i>simple forcing</i> : opcional, o modelo calcula, mas permite edição.
Radiação (onda curta direta e difusa e onda longa)	_____	<i>full forcing</i> : opcional.	<i>full forcing</i> : opcional

Fonte: Gusson, 2020.

No presente trabalho, o nível avançado foi selecionado, devido ao interesse em utilizar o IVS como esquema de cálculo para as múltiplas reflexões entre superfícies. Uma vez nesse modo, pode-se optar pelo modo *simple forcing* ou *full forcing*. Ambos os modos foram testados, forçando apenas as variáveis: temperatura do ar e umidade relativa do ar. Observou-se uma menor variação ínfima entre as temperaturas de inicialização e as simuladas quando se utiliza o modo *full forcing*. Esta menor variação é esperada, pois quando se utiliza este modo o programa força o modelo com os dados inseridos em todas as alturas do modelo. Enquanto no *simple forcing*, em apenas uma altura ($z = 2$ metros) é atribuído os valores de inicialização de temperatura e umidade relativa do ar, o restante é gerado pelo modelo¹. O uso do modo *full forcing* se mostra adequado quando se tem acesso a dados meteorológicos medidos em campo em baixa altura.

Utilizou-se a mesma configuração de parâmetros iniciais nas duas áreas, com o objetivo de observar o efeito das diferentes geometrias no microclima local. Assim, sendo os dados de temperatura do ar de inicialização provenientes da estação de Itajaí, optou-se pelo *simple forcing*, pois este modo não limita o desenvolvimento de ilhas de calor do modelo. Paralelamente, avalia-se o emprego dos dados oficiais como previsores das condições atmosféricas nas áreas A e B.

A umidade relativa do ar varia conforme o local de medição. Na estação do Porto de Itajaí, por exemplo, se mantém com valores mais elevados de umidade relativa do ar em relação aos pontos de monitoramento e à estação de Navegantes durante os períodos estudados. Isto ocorre porque esta estação está localizada no Molhe de Itajaí, ponto cercado pela água do mar (Figura 18). Esta relação também se reflete nas temperaturas da estação de Itajaí, apresentando um perfil com menor amplitude em comparação aos demais pontos. A definição de um perfil de umidade relativa do ar nas simulações, baseou-se na inserção de seus pontos máximo e mínimo diário. Partindo do cálculo da média aritmética dos três pontos de monitoramento entre os valores mínimos e máximos do dia de interesse. Com as informações acerca do horário de umidade relativa do ar máxima e mínima e seus respectivos valores médios, o ENVI-met v.4.4.6 no modo *simple forcing* cria um perfil horário que orienta as simulações.

Segundo Acero e Arrizabalaga (2018), as definições do fluxo de ar (direção e velocidade do vento) e radiação solar são os parâmetros responsáveis por aumentar a diferença do microclima entre o modelo e as medições em campo. A direção e a velocidade do vento no

¹ Segundo Helge Simon, engenheiro desenvolvedor do *software*, em discussão no fórum ENVI-met. Disponível em: <https://tinyurl.com/yckz35yf>. Acesso em: 19 ago. 2021.

modo *simple forcing* são definidas com um valor médio de todo o período simulado na inicialização. Estes valores devem ser, preferencialmente, provenientes de uma medição a 10 metros de altura em um campo aberto. A estação do Aeroporto de Navegantes atende estes requisitos e foi utilizada para definição da direção do vento média diária. Os dados de Itajaí também contêm informações acerca da direção do vento, entretanto, são apresentadas em pontos cardeais e registradas a cada 5 minutos. Com a intenção de evitar erros de aproximação no processamento dos dados, optou-se pela utilização da direção do vento registrada em Navegantes, com a direção expressa em graus e de hora em hora.

A estação de Itajaí foi utilizada para definir a velocidade do vento, devido a completude de dados horários, já que os dados da estação do Aeroporto de Navegantes são limitados ao seu horário de funcionamento. Porém, a velocidade do vento medida no Molhe de Itajaí não corresponde à velocidade do ar em uma área urbana. Por este motivo, a velocidade média diária foi corrigida conforme o Quadro 5 de Nikolopoulou (2004). O quadro indica que para uma altura H de 10 metros o fator de correção S para uma área urbana é de 0,36. Assim, a velocidade na área urbana (V_H) é a velocidade medida a 10 metros de altura (V_{10}) em uma área rural multiplicada pelo fator S de 0,36.

Quadro 5 - Valores de $S = V_H/V_{10}$ para várias alturas (H) em áreas urbanas e suburbanas

H [m]	S(suburban)	S(urban)
10	0.6	0.36
20	0.73	0.47
30	0.82	0.55
40	0.89	0.62
50	0.94	0.68
60	0.99	0.73
70	1.04	0.77
80	1.08	0.82
90	1.11	0.86
100	1.14	0.89
110	1.18	0.93
120	1.21	0.96
130	1.24	0.99
140	1.27	1.02
150	1.29	1.05

E.g. Wind speed at 100m high in an urban area corresponds to 89% of the wind velocity at 10m height in flat open country.

Fonte: Nikolopoulou, 2004.

Quanto à radiação solar incidente no modelo, o arquivo tridimensional INX é referenciado geograficamente e, conforme a localização da área modelada e a data, o programa

sugere estes dados. No modo avançado, os valores de radiação podem ser ajustados segundo a multiplicação de um fator (*solar adjust factor*). O ajuste foi feito com base na radiação global medida nas estações de Indaial e de Florianópolis nos períodos de inverno e primavera, respectivamente. Os valores de radiação também dependem do nível de nebulosidade do dia analisado, variável que pode ser alterada no modo intermediário e avançado. O nível de nebulosidade é definido em três alturas de nuvens: baixas, médias e altas, e quantificado em octas. Os dados meteorológicos provenientes do Aeroporto de Navegantes distinguem a presença de nuvens em diferentes níveis e basearam a definição de nebulosidade no presente trabalho.

3.3.3 Calibração

O processo de calibração visa a validação do modelo por meio da modificação das configurações de entrada até que os resultados da simulação sejam próximos dos valores reais medidos nos pontos de monitoramento. Esta aproximação é avaliada pela aplicação das métricas de desempenho apresentadas em 2.2.1. A calibração do modelo pode envolver a alteração do modelo tridimensional (arquivo INX), envolvendo maior detalhamento do espaço, ou das configurações de simulação (arquivo SIMX). Este procedimento de alteração dos modelos foi realizado até que as métricas de desempenho apresentassem resultados satisfatórios, coerentes com a validação de outros estudos (GUSSON; DUARTE, 2016; MORAKINYO *et al.*, 2019; SALATA *et al.*, 2016).

A calibração se inicia com a identificação da localização dos pontos de monitoramento no modelo tridimensional. Ainda na modelagem, esta localização é marcada como um receptor. Os receptores geram arquivos próprios contendo todas as informações microclimáticas daquele local durante a simulação, facilitando a análise de dados. O receptor é marcado na área “XY” do modelo ENVI-met e seus arquivos incluem todas as alturas daquele ponto. No caso da área A, o receptor A é o mesmo para se extrair as informações dos pontos A1 (em $z=4,5$ metros) e A2 (em $z=22,5$ metros). Em ambas as áreas, A e B, aplica-se um filtro sobre os resultados dos receptores, para selecionar apenas a célula na altura de interesse.

A localização dos receptores é aproximada, considerando a dimensão das grades do modelo tridimensional ENVI-met. Nas duas áreas, selecionou-se a célula logo à frente da edificação em que ocorreram as medições em campo. Como as grades do programa são de 2 m x 2 m, os resultados do receptor são referentes ao ponto médio desta grade. Portanto, a 1 metro

de distância da parede da edificação. Embora os pontos de monitoramento estejam localizados em área externa, trata-se de varandas, estes espaços garantem uma proteção horizontal aos equipamentos. Estas proteções foram desconsideradas na criação da área no ENVI-met, para simplificar a modelagem e adaptá-la às dimensões da grade.

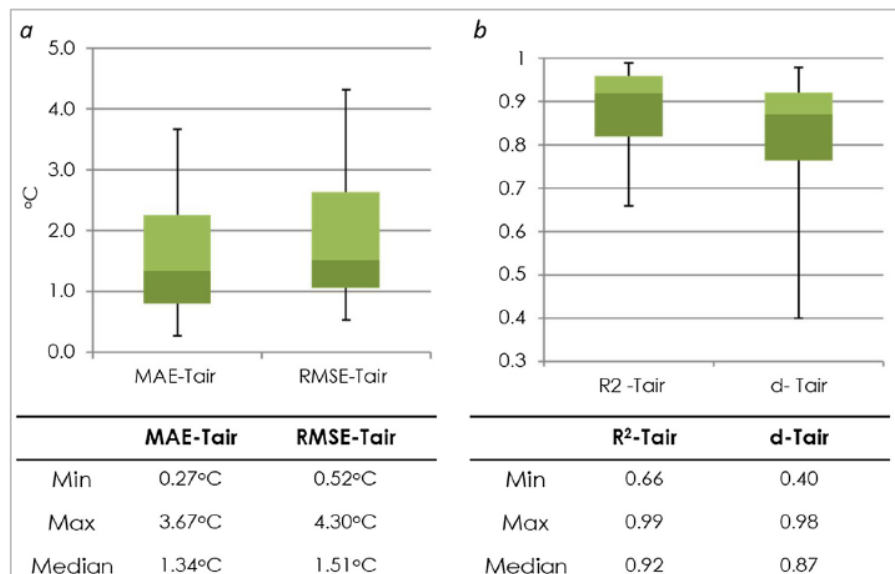
Com os resultados da simulação no receptor, compara-se as temperaturas do ar simuladas com as medidas em campo. Avalia-se o desempenho por meio da aplicação dos indicadores de desempenho: RMSE, MAE, MBE, índice de Willmott (d) e o coeficiente de determinação (R^2). Os dois últimos são priorizados nesta avaliação, devido a vasta utilização na literatura para validação das simulações com o programa ENVI-met (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018), e pela facilidade de interpretação. Tanto o índice d quanto o R^2 indicam maior qualidade do ajuste a medida em que se aproximam de 1. O gráfico do perfil horário de temperatura do dia simulado com as curvas referentes aos valores simulados e aos medidos em cada ponto também é plotado para auxiliar a calibração do modelo. A análise de diferentes índices simultaneamente evita a interpretação equivocada que a verificação de uma única métrica pode ocasionar.

O processo de calibração apoiou-se nas variáveis medidas em campo: temperatura do ar e umidade relativa do ar. A umidade relativa do ar foi avaliada nas simulações de calibração com o objetivo de aproximar a umidade simulada das medidas nos pontos de monitoramento. Entretanto, esta variável não foi analisada separadamente para a validação. Isto ocorreu devido às simplificações do modelo tridimensional que interferem na umidade relativa local, como a desconsideração da vegetação da área B, e o perfil de solo com parâmetro padrão utilizado nas duas áreas. Além disso, a umidade relativa do ar se mostrou mais sensível ao ambiente, abrangendo diferentes níveis de valores para cada local. Optou-se pela aproximação do perfil observado em campo pelo modo *simple forcing*, de maneira experimental, dispondo dos valores medidos nos três pontos.

A validação do modelo ocorreu quando a inserção dos parâmetros iniciais de simulação resultou em perfis de temperatura próximos aos medidos em campo. Neste momento, todos os indicadores atingiram valores razoáveis em relação a outros trabalhos que validaram o modelo ENVI-met. Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018) analisaram os indicadores de desempenho de 52 trabalhos. A partir desta amostra, calcularam os valores mínimos, máximos e as medianas dos indicadores MAE, RMSE, R^2 e d (Figura 24). Considerando estes resultados, se buscou atingir métricas que superam a mediana de cada indicador da Figura 24.

Os trabalhos de Acero e Arrizabalaga (2018), Gusson e Duarte (2016), Morakinyo *et al.* (2019) foram validados utilizando o programa ENVI-met versão 4. As métricas destes estudos também sustentaram a validação do presente trabalho. Na Espanha, em três dias com diferentes condições de cobertura do céu, Acero e Arrizabalaga (2018) validaram a temperatura do ar do modelo ENVI-met com índices MBE que variaram entre $-1,54$ e $-0,17$ °C, na condição de céu limpo e parcialmente coberto, respectivamente. O índice de Willmott foi de $0,83$ nos dias de céu limpo e totalmente coberto (8 octas) para $0,94$ no dia parcialmente coberto. Gusson e Duarte (2016) validaram as temperaturas do ar simuladas em duas áreas da cidade de São Paulo com valores de RMSE, MAE e d de $1,6-1,9$ °C, $1,4-1,8$ °C, e $0,85-0,92$, nesta ordem. Morakinyo *et al.* (2019) validou a temperatura do ar em Hong Kong com R^2 de $0,89$ e RMSE de $0,5$ °C.

Figura 24 - Diagrama de caixa (box plot) dos indicadores de desempenho utilizados em artigos de validação do programa ENVI-met para a variável de temperatura do ar.



Fonte: Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018)

No processo de calibração, se verificou menor influência das alterações no modelo tridimensional nas variáveis microclimáticas. A única alteração realizada no volume simulado pelo arquivo INX foi a criação de um caso base considerando os diferentes níveis de refletância de cada superfície. De uma maneira aproximada, foram atribuídas refletâncias conforme as cores predominantes das paredes das edificações e nas coberturas conforme a visualização da área por imagens aéreas. As coberturas foram classificadas em baixa, média ou alta refletância,

sendo a baixa refletância atribuída nas coberturas com alto grau de envelhecimento e as de alta refletância em edificações novas que contam com coberturas refletivas.

A simulação de diversas configurações de simulações possibilitou a calibração do modelo representativo dos períodos de inverno e primavera. O período de inverno englobou maior quantidade de simulações experimentais, em que se exploraram os diferentes níveis e modos de simulação pelo programa ENVI-met versão 4.4.6. Estes testes foram desde a simulação nível iniciante até a mais avançada, com emprego do modo *full forcing*. Após a validação do modelo de inverno, buscou-se repetir a metodologia e parâmetros iniciais para o modelo da primavera.

3.3.4 Cenários paramétricos

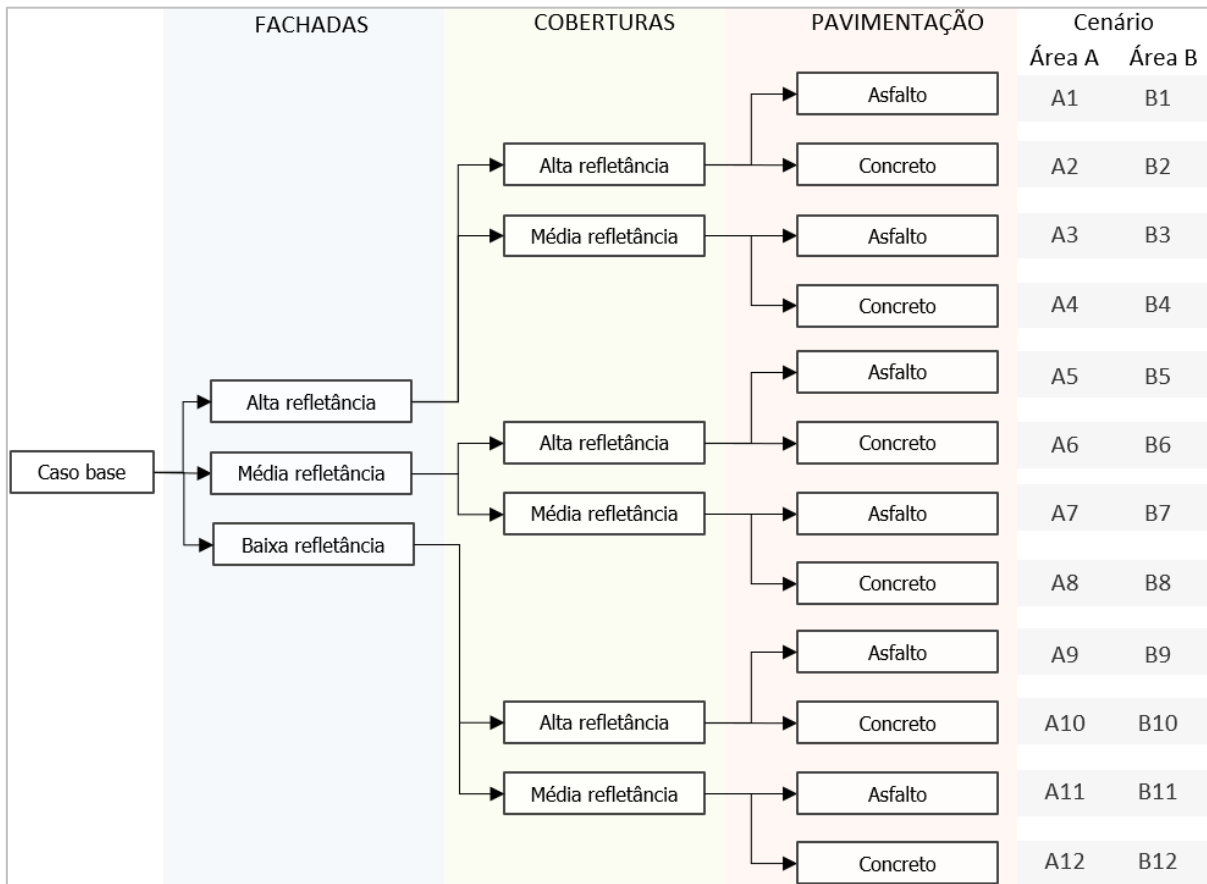
Uma vez que o modelo é validado, os cenários paramétricos são desenvolvidos. Com o objetivo de avaliar o impacto da refletância solar da pavimentação, das coberturas e das fachadas das edificações no microclima local, são simulados cenários combinados conforme o esquema apresentado na Figura 25. Partindo das simulações validadas para cada uma das áreas, os cenários paramétricos definidos permitem avaliar a influência da refletância solar de cada elemento (pavimentação, fachadas e coberturas) no microclima urbano nas duas configurações urbanas. Apenas a refletância solar dos elementos varia em cada cenário, as demais configurações serão mantidas dos casos base validados.

Os cenários foram criados visando representar características reais e possíveis de implantar. Por este motivo, a refletância solar das fachadas será avaliada em três níveis, enquanto as refletâncias da pavimentação e das coberturas em apenas dois. Cada cenário provém da combinação das características das fachadas, coberturas e do pavimento (Figura 25). A alteração da refletância solar dos três elementos garante a padronização das superfícies, pois nos casos base são heterogêneas, conforme as observações reais.

O custo computacional das simulações também foi considerado como fator limitante, uma vez que cada cenário é simulado por vez e exigiu um tempo de processamento de até 60h neste trabalho. A licença do ENVI-met utilizada foi a de estudante (ENVI-met *Student License*). Este tipo de licença permite o uso de todas as funções do programa, mas com limitação no processamento computacional. Outras licenças do ENVI-met, como a *Business* e a *Universities*, permitem a utilização de vários núcleos de processamento do computador, além da integração

com outras máquinas. Na licença de estudante, este recurso é indisponível, e a capacidade da máquina utilizada é limitada, aumentando o custo computacional.

Figura 25 - Cenários de refletância solar das superfícies



Fonte: autora.

Os valores de refletância propostos para cada elemento são explicitados na Tabela 4. Para as fachadas, buscou-se representar cenários com refletância entre 0,20 e 0,80. Estes valores extremos são equivalentes às superfícies pintadas com tintas de cores escuras, como azul, verde e cinza, e tons de branco, respectivamente (INMETRO, 2017). Em relação à pavimentação, foram considerados cenários utilizando asfalto, coincidindo com o caso base, e concreto. Adotou-se valores médios de refletância solar de 0,20 para o asfalto e de 0,30 para o pavimento de concreto (PREVE, 2019; VILLENA DEL CARPIO *et al.*, 2016). As coberturas também foram avaliadas em dois níveis, considerando um cenário de média refletância, em que se ponderou um valor entre as coberturas novas usualmente empregadas, sem tratamentos superficiais. O cenário de alta refletância de cobertura, por sua vez, representa o emprego de coberturas frias. Assim, 12 cenários serão simulados em cada área, totalizando 24 simulações pós validação.

Tabela 4 - Refletâncias adotadas em cada elemento

Fachada	Alta refletância	Média refletância	Baixa refletância
	0,80	0,50	0,20
Cobertura	Alta refletância	Média refletância	
	0,70	0,40	
Pavimento		Concreto	Asfalto
		0,30	0,20

Fonte: autora.

3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

A seleção de duas áreas urbanas de estudo com diferentes morfologias, permite avaliar o efeito da geometria no microclima urbano. Este efeito pode ser observado diretamente por meio da comparação entre a temperatura do ar e a umidade relativa do ar medidas nos pontos de monitoramento das áreas A e B. Além da geometria, cada área apresenta níveis de geração de calor antropogênico distintos, o que juntamente com a localização, mais próxima ou distante do mar, pode influenciar na intensidade das ilhas de calor urbano.

Após a validação dos casos base no modelo ENVI-met, a elaboração de cenários paramétricos também contribui com a análise do efeito da geometria, uma vez que as refletâncias estarão padronizadas. As simulações dos cenários paramétricos auxiliam na compreensão do quanto as refletâncias das superfícies urbanas atuam no desenvolvimento do microclima urbano. Neste trabalho, a análise de impacto da alteração das refletâncias solares no microclima baseia na variável de temperatura do ar.

O modelo ENVI-met calcula as variáveis microclimáticas em todas as células da modelagem tridimensional. Foram definidos três pontos em cada área, com base em diferentes fatores de visão do céu (FVC) para analisar mais detalhadamente. Buscou-se selecionar pontos no centro de cada cânion e afastados das bordas do modelo, a fim de evitar zonas de instabilidade. Estes pontos foram numerados conforme os receptores inseridos nos modelos, com abreviação de R1 a R6, seguindo uma ordem crescente de fator de visão do céu.

Na área A, os pontos definidos são mostrados na Figura 26 e estão alinhados no mesmo valor da coordenada x, possibilitando a visualização em corte (plano y-z) dos três pontos. O ponto R1 representa a região com cânions mais profundos da área A, com um fator de visão do céu de 0,29. O ponto R2, localizado na rua 1500, apresenta FVC de 0,36. O ponto R3, por fim,

representa a região com maior FVC desta área, de 0,57, em que as edificações mais espaçadas e a presença de estacionamentos garantem maior incidência de radiação solar.

Na área B, além de representar diferentes fatores de visão do céu, buscou-se definir pontos em locais que apresentam certa uniformidade do cânion, com edificações sem recuo frontal. O ponto R4 está localizado no cânion mais estreito da área modelada, com um FVC de 0,75. O receptor 5 (R5) apresenta FVC também alto, 0,84, e está na mesma orientação do ponto R4. Por fim, ponto R6 está na 4ª avenida, apresentando o fator de visão do céu mais elevado dentre os seis pontos analisados, de 0,89. Os pontos da área B são apresentados na Figura 27.

Com os resultados das simulações dos cenários paramétricos em cada ponto, avaliou-se o efeito da geometria, através do fator de visão de céu, e da refletância solar das superfícies na temperatura do ar a uma altura de 1,5 metros em relação ao solo dos seis pontos selecionados nas áreas A e B. Agrupou-se os cenários segundo a nível de refletância solar de cada elemento, a fim de avaliar se há relação entre a temperatura do ar no ponto e a propriedade das superfícies do entorno. Foram avaliados graficamente três horários, às 8h, 12h e 16h, representando diferentes momentos do dia.

Figura 26 - Mapa de fatores de visão do céu (FVC) em $z=1,5$ m e identificação da localização dos receptores da área A utilizados para análise dos resultados dos cenários paramétricos

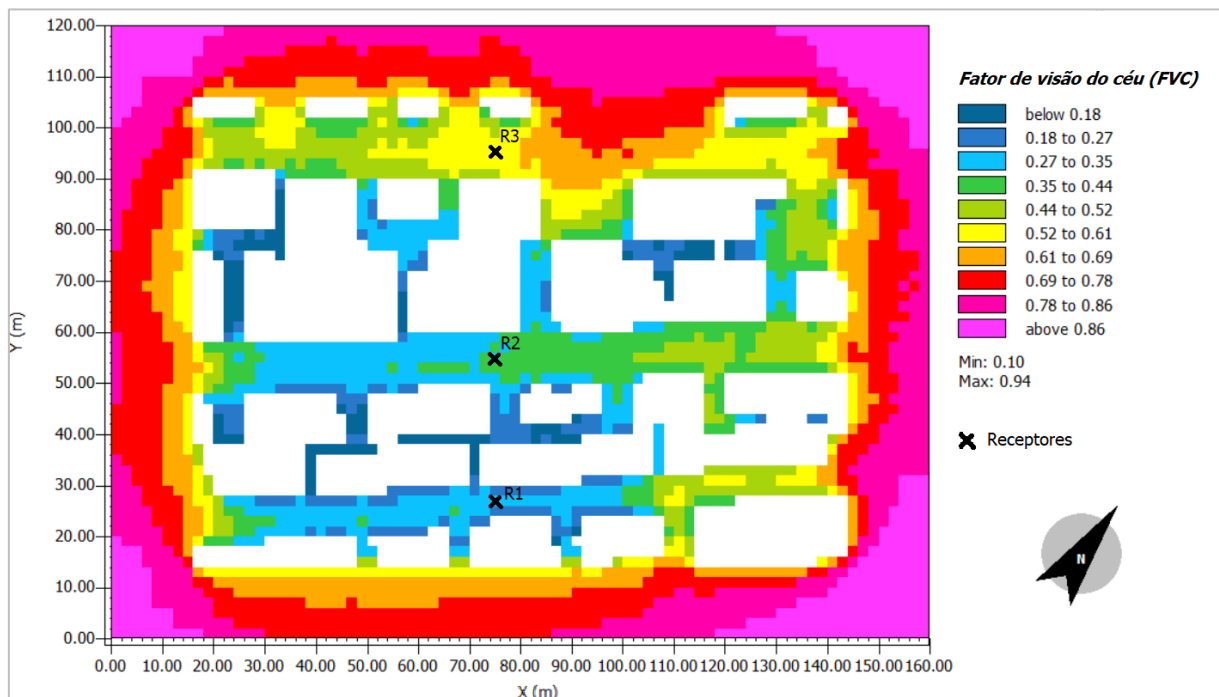
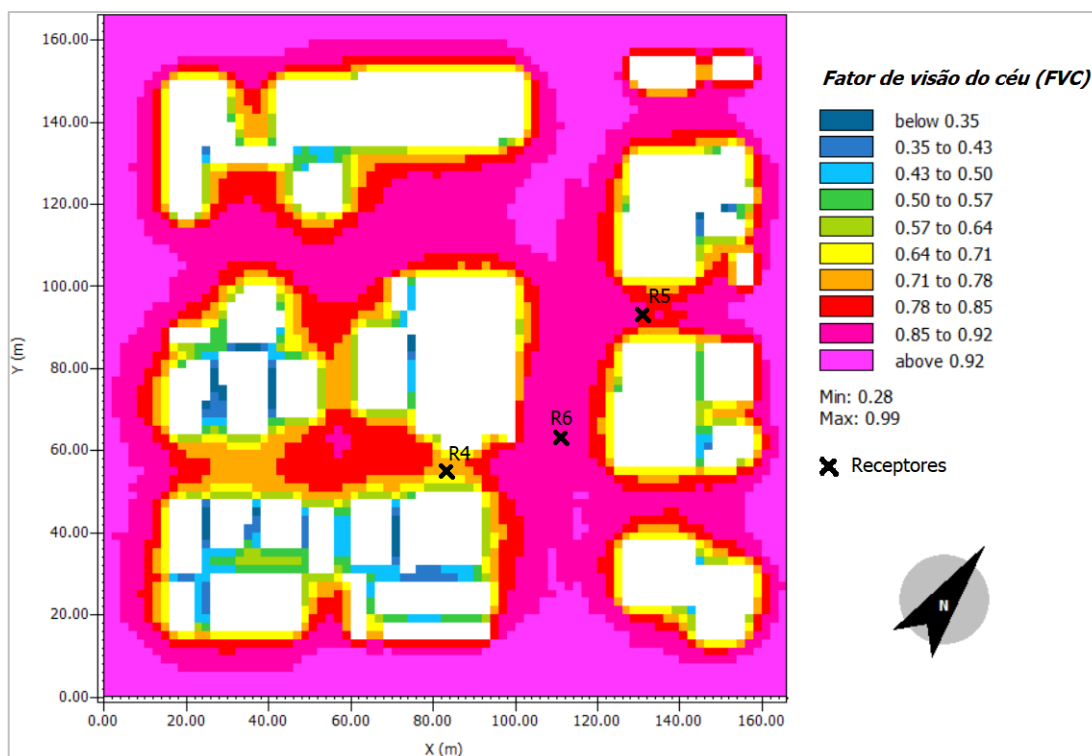


Figura 27 - Mapa de fatores de visão do céu (FVC) em $z=1,5$ m e identificação da localização dos receptores da área B utilizados para análise dos resultados dos cenários paramétricos



Fonte: autora.

O agrupamento das temperaturas se deu conforme as combinações de refletância solar definidas no esquema da Figura 25. A refletância solar das fachadas foi agrupada em três níveis, o de alta refletância incluiu os cenários de 1 a 4, o de média refletância solar, os cenários de 5 a 8, e os cenários de 9 a 12 pertencem ao grupo de fachadas de baixa refletância. Quanto a pavimentação, os cenários ímpares são de asfalto, e os de números pares apresentam pavimentação de concreto. As coberturas dos cenários 1, 2, 5, 6, 9 e 10 se referem às coberturas frias, alta refletância, enquanto os cenários 3, 4, 7, 8, 11 e 12 pertencem ao grupo das coberturas comuns de fibrocimento, de média refletância.

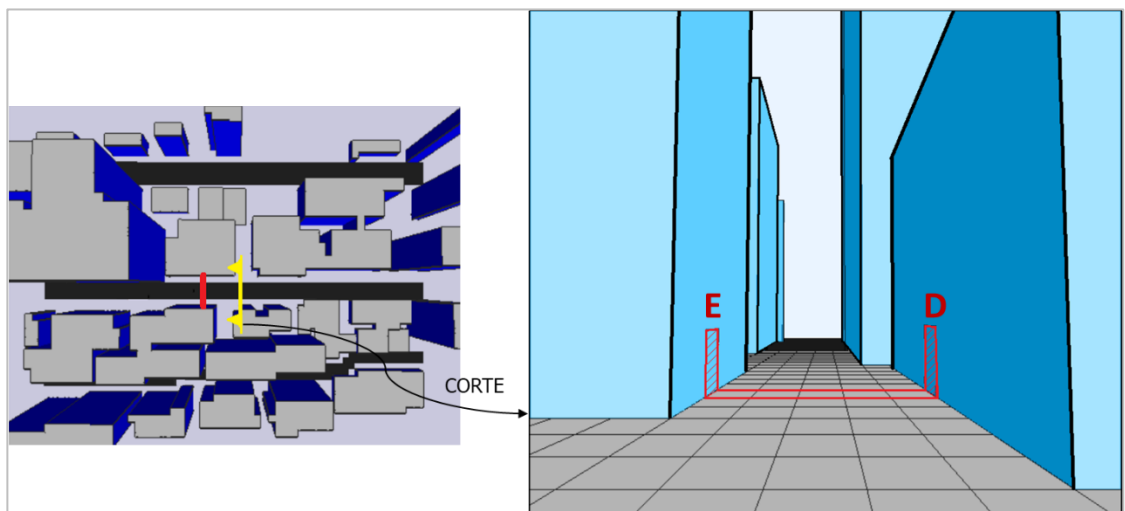
Com o objetivo de verificar a diferença estatística entre os diferentes níveis de refletância, fez-se a análise de variância (ANOVA). A ANOVA é um método de comparar as médias de diferentes grupos de observações independentes. Este método é utilizado quando se tem uma variável dependente, no presente trabalho, a temperatura do ar, a qual se deseja avaliar se é afetada pela variável independente, o nível de refletância solar. A análise de variância provém de um teste de hipótese. A hipótese nula indica que não há diferença estatística entre as médias das populações. A hipótese alternativa revela que existe diferença entre pelo menos duas populações avaliadas.

A ANOVA de fator único foi utilizada neste trabalho, testando apenas uma variável independente, a refletância solar. A diferença estatística é afirmada pelo valor-p calculado. O valor-p indica a probabilidade de se verificar uma diferença maior ou igual a probabilidade da hipótese nula (FERREIRA; PATINO, 2015). Utilizou-se a probabilidade de 5% como valor de corte. Assim, os valores-p abaixo de 0,05 indicam que há diferença estatística entre os cenários segundo os diferentes níveis de refletância solar. A análise de variância permite verificar se as diferenças entre as médias da temperatura do ar medidas nos cenários com pavimentação de concreto são estatisticamente diferentes das dos cenários com asfalto, por exemplo.

Posteriormente, realizou-se uma análise por meio da comparação direta entre os cenários 2 e 11, que representam os cenários com maior e menor refletância solar dos três elementos (fachadas, pavimentação e coberturas), respectivamente. Esta análise tem como objetivo observar o comportamento de variáveis como a radiação de onda curta incidente e a temperatura superficial dos elementos do cânion urbano.

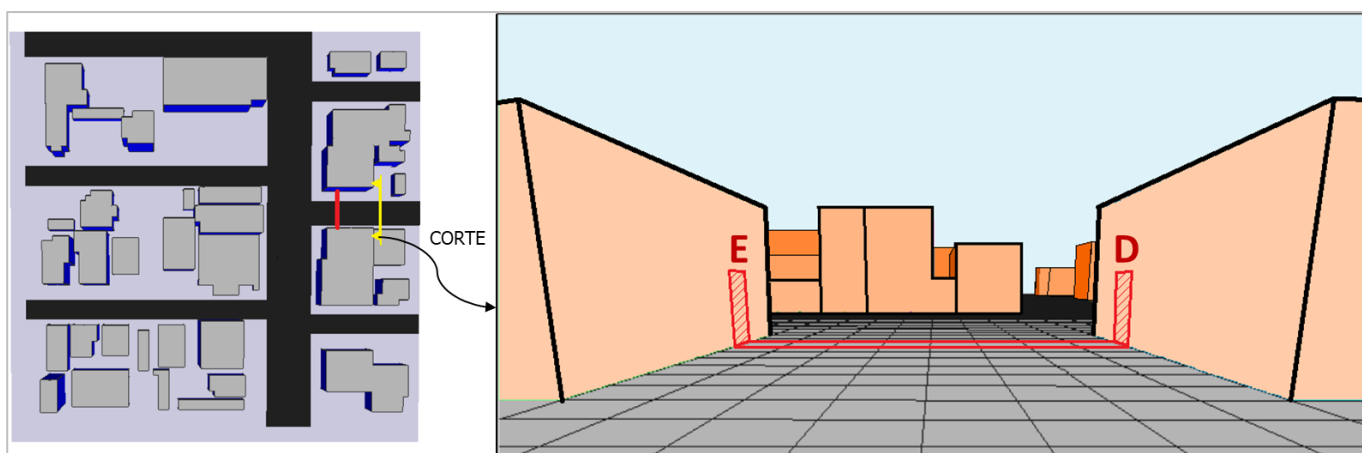
Para a comparação entre os cenários, selecionou-se um cânion urbano em cada área. Na área A, selecionou-se um trecho próximo ao ponto R2, devido a sua localização central no modelo. Na área B, o cânion próximo ao ponto R5 foi definido para as análises acerca da radiação e da temperatura superficial. A localização dos cânions urbanos A e B e a vista em corte das células utilizadas para as análises são apresentadas na Figura 28 e na Figura 29. Foram extraídos os dados de radiação das paredes até 3 metros de altura e do solo de toda a largura da rua.

Figura 28 - Localização do cânion urbano A na vista aérea e vista do corte com identificação das células das paredes esquerda (E) e direita (D), e do solo selecionadas para os cálculos



Fonte: autora.

Figura 29 - Localização do cânion urbano B na vista aérea e vista do corte com identificação das paredes esquerda (E) e direita (D), e do solo selecionadas para os cálculos



Fonte: autora.

Foram calculadas as médias de cada variável de interesse das células referentes às paredes esquerda (E) e direita (D), identificadas segundo a vista do corte na Figura 28 e na Figura 29, e ao solo. A largura da rua do cânion A é de 10 metros, equivalentes a 5 células no modelo ENVI-met. No cânion B, a largura da rua é de 8 células de 2 metros, totalizando 16 metros de largura da rua. Ressalta-se que os cânions selecionados possuem a mesma orientação, nordeste-sudoeste, possibilitando a comparação para avaliar a influência da geometria do entorno.

O cânion A possui a sua esquerda uma edificação com 33 metros de altura e à direita uma edificação com 15 metros de altura em relação ao solo. Considerando apenas estas duas edificações e a largura da rua de 10 metros, a relação entre a altura média e a largura da rua (H/W) do cânion A é de 2,4. O cânion B é mais regular, possui edificações com 6 metros de altura em relação ao solo em ambos os lados. Com a largura da rua sendo 16 metros, a relação H/W do cânion B é de 0,38, caracterizando um cânion mais raso.

As variáveis utilizadas para analisar a radiação e a temperatura superficial das paredes do cânion são provenientes dos arquivos de saída “*Building data dynamic*”, em que são apresentados os dados referentes às edificações do modelo que são atualizados durante a simulação. A radiação de onda curta incidente na fachada foi avaliada nas superfícies de parede segundo a variável *shortwave radiation received at facade*. A radiação de onda curta absorvida foi extraída da variável *absorbed direct shortwave radiation*. A temperatura superficial externa da parede deriva da variável *temperature node 1/outside*. Quanto à radiação de onda longa, utilizou-se diretamente o seu valor líquido, pela *longwave energy balance*.

Para avaliar os fluxos de radiação e a temperatura superficial do solo do modelo, o arquivo “*Surface/Flux Data*” foi utilizado para extrair as variáveis: *Q_Sw Direct*, *Q_Sw Diffuse Horizontal*, *Q_Sw Reflected Received Horizontal*, *Q_Lw budget* e *T Surface*, referentes à radiação de onda curta direta, radiação de onda curta difusa, radiação de onda curta refletida recebida do entorno, radiação líquida de onda longa e temperatura superficial, respectivamente.

Os três tipos de radiação de onda curta (direta, difusa e refletida recebida) foram somadas para representar a radiação de onda curta total incidente. Posteriormente, com o objetivo de mensurar o impacto de cada tipo de radiação de onda curta no total recebido, foram somadas as radiações de onda curta de todo o dia avaliado e calculado a porcentagem que cada tipo representa do total diário.

Os balanços de radiação de onda longa nas superfícies de paredes e de pavimentação dos cânions, foram avaliados juntamente com a temperatura superficial. As trocas de calor por radiação de onda longa ocorrem entre uma superfície e outra, inclusive o céu e o solo. A transferência de calor por radiação de onda longa é um processo bidirecional, que depende da temperatura das duas superfícies (EVINS; DORER; CARMELIET, 2014). No modelo ENVI-met, o balanço de radiação de onda longa pode exibir valor positivo ou negativo. O saldo positivo indica que a superfície avaliada está ganhando calor, enquanto o negativo indica a perda calor para o entorno por este tipo de radiação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados da pesquisa, desde a análise dos dados obtidos pelas medições em campo até as simulações de cenários paramétricos.

4.1 MEDIÇÕES EM CAMPO

As medições em campo nos pontos de monitoramento indicam as condições atmosféricas de cada ponto. Foram dois períodos de medições: inverno, com os equipamentos instalados no dia 24/06/2021 e retirados no dia 09/07/2021, e primavera, com monitoramento iniciado no dia 09/11/2021 e finalizado no dia 23/11/2021. O primeiro e o último dia de medições não possuem dados horários completos, devido ao horário de instalação e retirada dos equipamentos, por esta razão são desconsiderados das análises a seguir apresentadas.

Na área A, dois pontos foram monitorados, a uma altura de aproximadamente 4,5 metros (ponto A1) e 22,5 metros (ponto A2), respectivamente. Na área B, apenas um ponto foi monitorado a uma altura de 4,5 metros, denominado ponto B. A primeira parte da análise de dados consiste na verificação dos dados medidos diante das estações de Navegantes e Itajaí. Assim, é possível identificar inconsistências nas medições em campo.

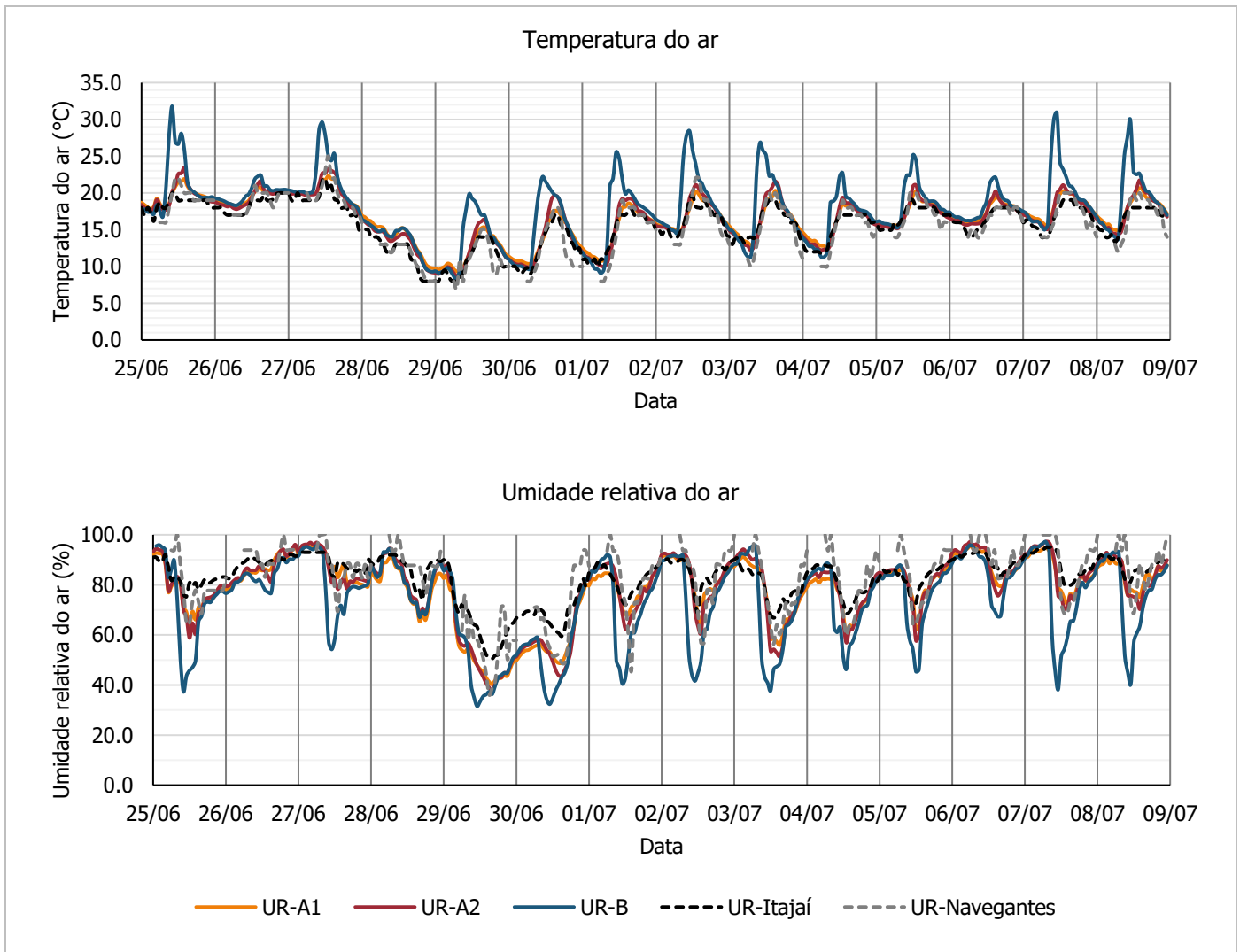
A partir de então, as análises envolvendo os dados das medições em campo e provenientes das estações meteorológicas podem ser realizadas. Nesta seção buscou-se avaliar as diferenças entre pontos, ocasionadas pelo efeito da geometria das duas áreas. Depois, a diferença entre as temperaturas do ar em Itajaí e no centro de Balneário Camboriú (áreas A e B) indicam a intensidade das ilhas de calor urbanas.

4.1.1 Inverno

A Figura 30 mostra as temperaturas do ar e as umidades relativas do ar registradas nos três pontos de monitoramento e nas estações meteorológicas do Aeroporto de Navegantes e do Porto de Itajaí. Nota-se que as linhas de temperatura e umidade relativa do ar do ponto B apresentam valores muito acima (temperatura) ou abaixo (umidade relativa) das linhas referentes aos outros pontos de medição. Na temperatura do ar, os picos de temperatura do ponto B ocorrem em média as 10h, mas a partir das 7h, quando o sol nasce, é notável o

comportamento diferenciado do equipamento. A partir de 15h a temperatura volta ao nível dos demais.

Figura 30 - Dados completos de temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR) nos pontos de monitoramento e estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes durante o período de inverno

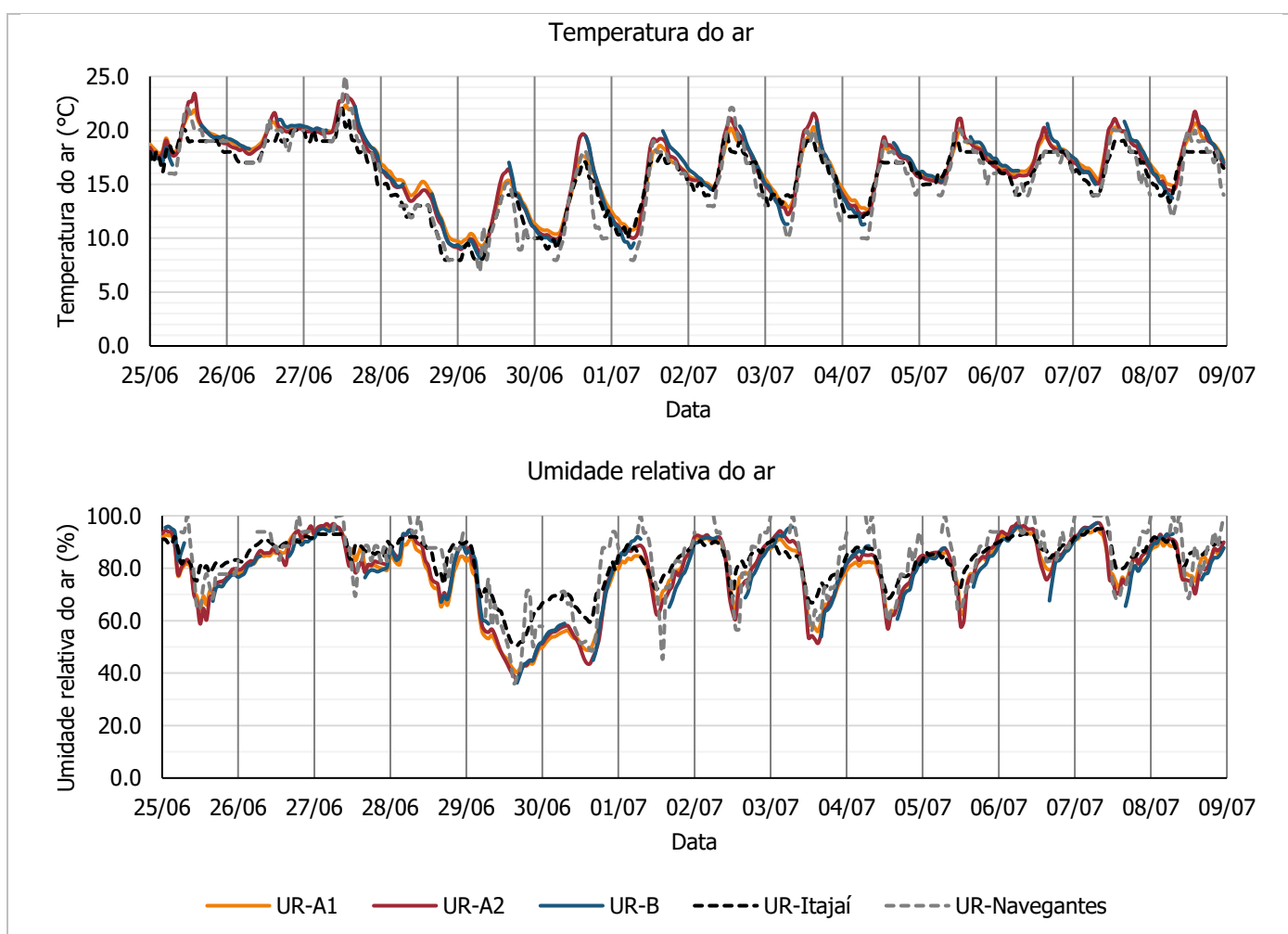


Fonte: autora

O comportamento anômalo observado no ponto de monitoramento B coincide com o horário de insolação direta sobre o equipamento no local. Este comportamento indicou uma insuficiência do abrigo meteorológico construído para proteger o termo-higrômetro. Os demais pontos, na área A, não apresentam o mesmo problema, pois no período de inverno estão totalmente protegidos da radiação. Pela não confiabilidade dos dados do ponto B durante as horas em que houve incidência de radiação solar no equipamento, os dados entre 07h30 e 15h foram descartados.

O novo gráfico, desconsiderando os dados descartados do ponto B é apresentado na Figura 31. Verifica-se que as temperaturas da estação de Itajaí apresentam menor amplitude durante o período analisado. A menor amplitude térmica é constatada pelas maiores temperaturas durante o período noturno e, principalmente, pelas menores temperaturas durante o dia. Esta tendência se confirma nas umidades relativas registradas no molhe, sendo mais estáveis e com propensão de se manter acima das umidades relativas do ar dos demais pontos.

Figura 31 - Temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR) nos pontos de monitoramento e estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes durante o período de inverno



Fonte: autora.

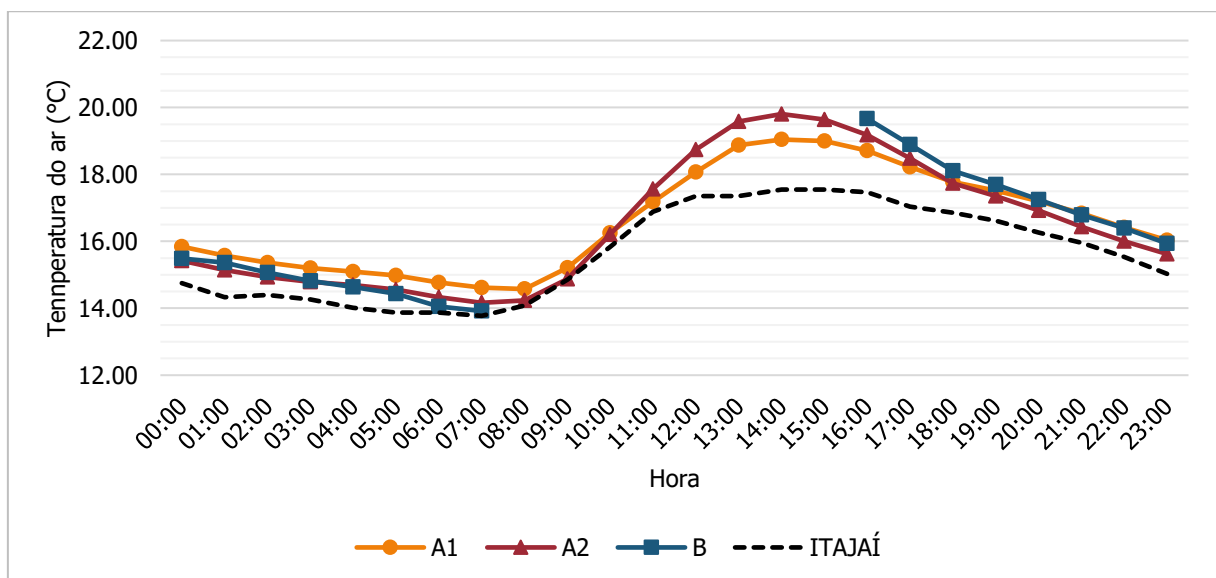
O perfil de temperatura da estação do Aeroporto de Navegantes apresentou maior amplitude térmica que a de Itajaí, com temperaturas intermediárias às de Itajaí e do ponto A2 (Figura 31). Também em relação aos dados da estação de Navegantes, nota-se um perfil de umidade relativa mais instável, possivelmente causado pelo próprio registro de dados de hora

em hora. Ainda, apesar da carência de dados desta estação entre 0h a 6h, nota-se temperaturas mais baixas nas primeiras horas da manhã. Esta leitura condiz com o esperado, pois a estação instalada em aeroporto tem maior visão de céu, condição que aumenta a perda de calor para o céu durante a noite, especialmente em noites de céu limpo.

A comparação entre pontos de monitoramento pode ser associada ao efeito da geometria sobre cada local. O ponto A2 apresenta as maiores temperaturas diárias, desconsiderando parte das medições do ponto B. No restante do dia, nota-se um perfil semelhante entre os dois pontos (A2 e B). O ponto A1 mostra um perfil de temperatura do ar com menores temperaturas máximas durante o dia e maiores temperaturas mínimas durante a noite. O ponto A2 (22,5 m), localizado em uma altura mais elevada do que o ponto A1 (4,5 m), tem maior visão do céu, pois está menos obstruído pelo entorno edificado, fator que justifica a maior temperatura diurna (acesso solar) e as menores temperaturas noturnas observadas (troca de calor por onda longa).

De maneira geral, no período de inverno, as temperaturas do ar são mais baixas, variando entre a mínima de 7 °C em 29/06 e uma máxima de 25 °C registrada no dia 27/06, ambas no Aeroporto de Navegantes. Traçando o perfil médio de temperatura por horário no período de 14 dias estudado (Figura 32), observa-se que as temperaturas ficaram entre 14 e 20 °C. Esta faixa de temperatura corresponde com o arquivo climático de Navegantes para os meses de junho e julho (Figura 7).

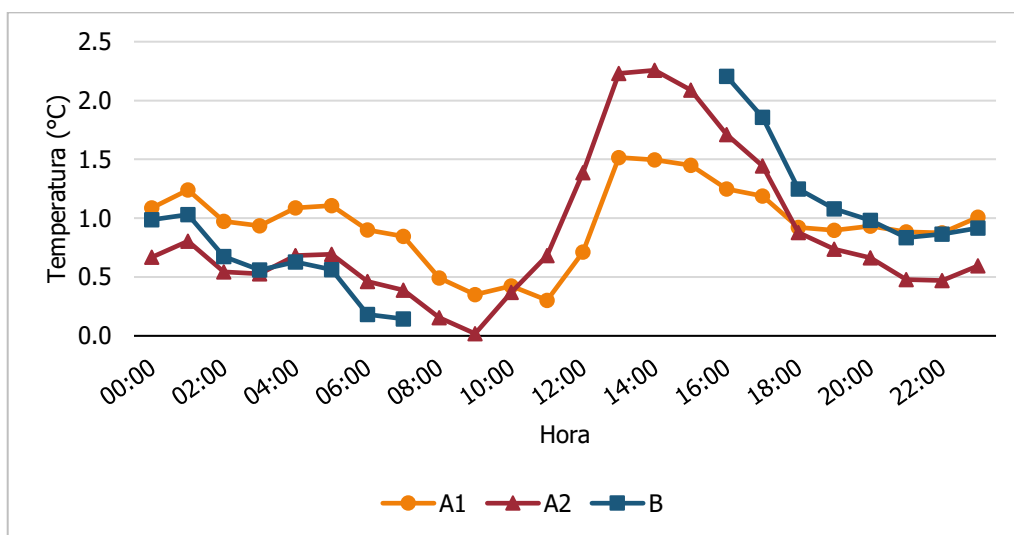
Figura 32 - Temperatura do ar média por hora nos pontos A1, A2 e B, e estação de Itajaí no período de inverno



Fonte: autora.

É notável a diferença entre os pontos monitorados na área urbana de Balneário Camboriú e as estações meteorológicas mais afastadas, do Porto de Itajaí e do Aeroporto de Navegantes. Assumindo estas estações como representativas de uma área “rural”, calcula-se o perfil de intensidade das ilhas de calor. A Figura 33 mostra a intensidade média das ilhas de calor por horário em todo o período de inverno, utilizando a estação de Itajaí como referência. A intensidade das ilhas de calor urbanas noturnas atinge ponto máximo de 1,24 °C às 1h no ponto A1. Como comentado anteriormente, a maior intensidade das ilhas de calor noturnas no ponto A1 se devem ao menor fator de visão do céu do local, ocasionado pela morfologia da área A. Ao mesmo tempo em que garante maior sombreamento durante o dia, dificulta a dispersão do ar quente durante a noite.

Figura 33 - Intensidade das ICUs média diária no período de inverno com referência de Itajaí



Fonte: autora.

Ainda em relação a Figura 33, o ponto B mostra comportamento semelhante ao ponto A1 durante as horas seguintes ao pôr do sol (19h a 00h). A área B apresenta geometria com edificações mais espaçadas e com menor altura, por isto, este comportamento nas primeiras horas da noite pode ser devido à geração de calor antropogênico neste horário, uma vez que se trata de uma das principais avenidas (4ª avenida) da cidade e com grande movimentação. Após este horário, a intensidade das ilhas de calor começa a reduzir ficando abaixo de 0,5 °C entre 6 e 7h.

Por fim, identifica-se intensidades de até 2,26 °C às 14h no ponto A2. O ponto A2 também se mostra o local com menor intensidade das ilhas de calor noturnas do que os pontos

A1 e B, com uma queda na intensidade logo após o pôr do sol. Este comportamento pode ser explicado pelo distanciamento do solo (22,5 m), garantindo menor interferência das superfícies do pavimento e das edificações vizinhas, e do calor antropogênico gerado no nível da rua.

4.1.2 Primavera

No período de medições em novembro, durante a primavera, foram construídas proteções adicionais para os abrigos dos termo-higrômetros instalados em campo. As proteções adicionais foram construídas para sombrear o equipamento e evitar a incidência de radiação solar direta e difusa. Os detalhes da construção do abrigo e da proteção são apresentados no Apêndice A.

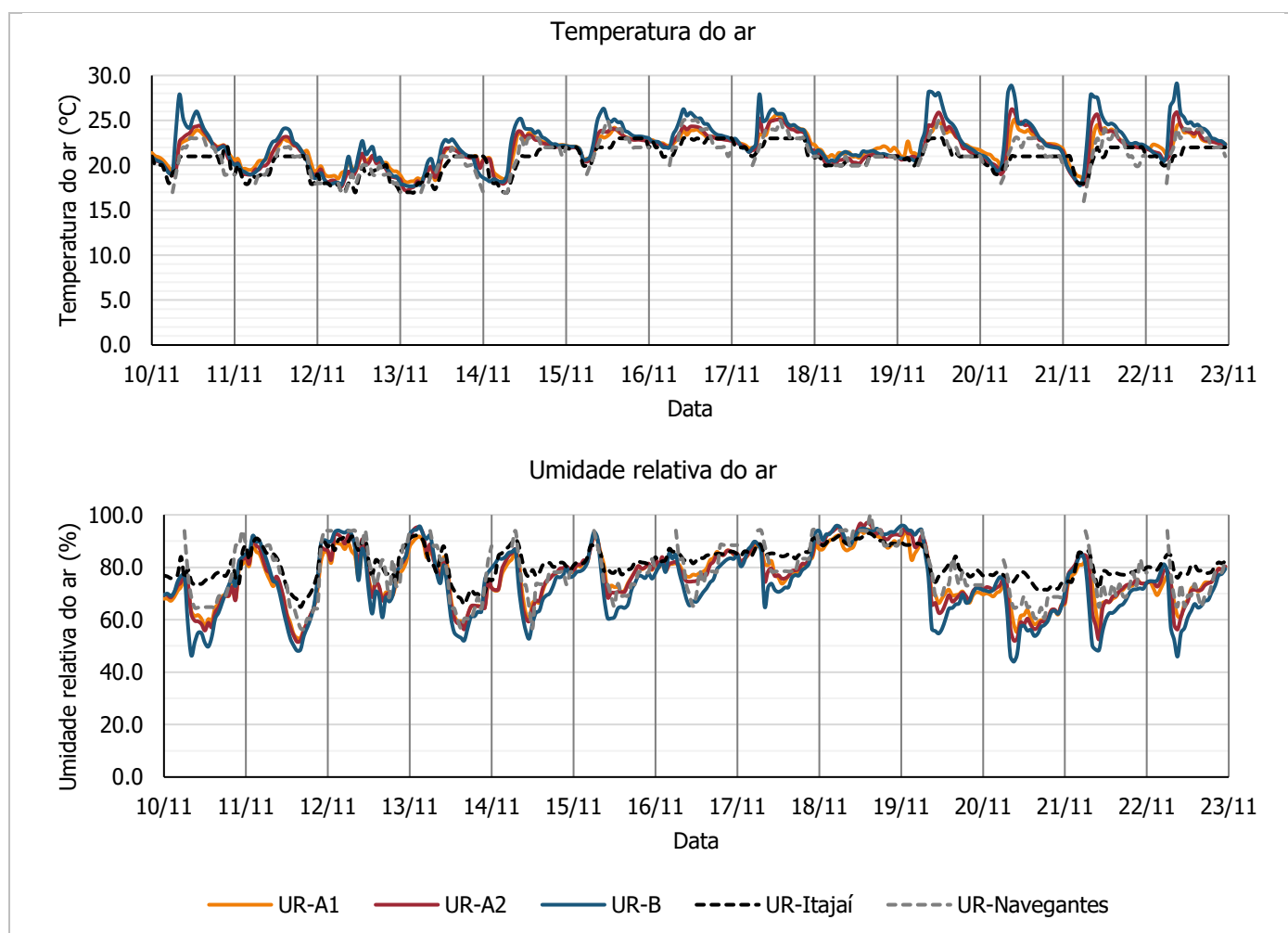
A Figura 34 apresenta graficamente os dados completos de temperatura do ar e umidade relativa do ar provenientes dos pontos de monitoramento em Balneário Camboriú e das estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes. Observa-se um perfil de temperatura e umidade relativa do ar mais estável na estação do Porto de Itajaí. Os dados do Aeroporto de Navegantes mostram maior proximidade com os dados de Balneário Camboriú, com maior amplitude térmica. Quanto aos registros dos pontos A1, A2 e B, nota-se um comportamento semelhante ao do período de inverno, em que os pontos A2 e B apresentam maior amplitude térmica do que o ponto A1.

Verifica-se picos positivos de temperatura do ar durante a manhã nos três pontos de monitoramento. No período de medições, entre 10 e 22 de novembro, a altura solar é mais elevada, garantindo maior acesso da radiação solar às áreas estudadas, ainda que o ponto B continue sendo o mais exposto. Assim, os três pontos de monitoramento podem ter sofrido a influência da radiação solar pela manhã, apresentando perfis semelhantes de temperatura do ar. Diferentemente das medições de inverno, em que apenas o ponto B sofreu os efeitos da radiação solar direta.

As medições em campo da primavera contaram com dispositivos adicionais ao abrigo meteorológico para sombrear os HOBOS utilizados. Os registros deste período em cada ponto de medição mostram que a adição de um elemento de sombreamento no abrigo atuou para diminuir a influência da radiação solar nas medições. Observa-se que as diferenças entre pontos não ultrapassam 7 °C, valor menor em comparação às medições de inverno em que o ponto B apresentou temperaturas até 12,15 °C mais altas do que dos pontos A1 e A2.

Este fenômeno pode indicar a ineficiência do abrigo meteorológico e do dispositivo de sombreamento acoplado. Ou ainda, indica a influência das paredes próximas ao equipamento nas medições. Destaca-se que a escolha da localização dos pontos de medição em campo foi baseada na disponibilidade dos residentes, e que se buscou locais com proteção horizontal contra precipitação. As proteções que a própria configuração urbana oferece ao equipamento podem ter contribuído para afetar a temperatura do ar pela influência da temperatura superficial destas e pela estagnação do ar no local, onde as proteções atuariam como obstáculos ao fluxo do vento.

Figura 34 - Dados completos de temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR) nos pontos de monitoramento e estações meteorológicas de Itajaí e Navegantes durante o período de primavera

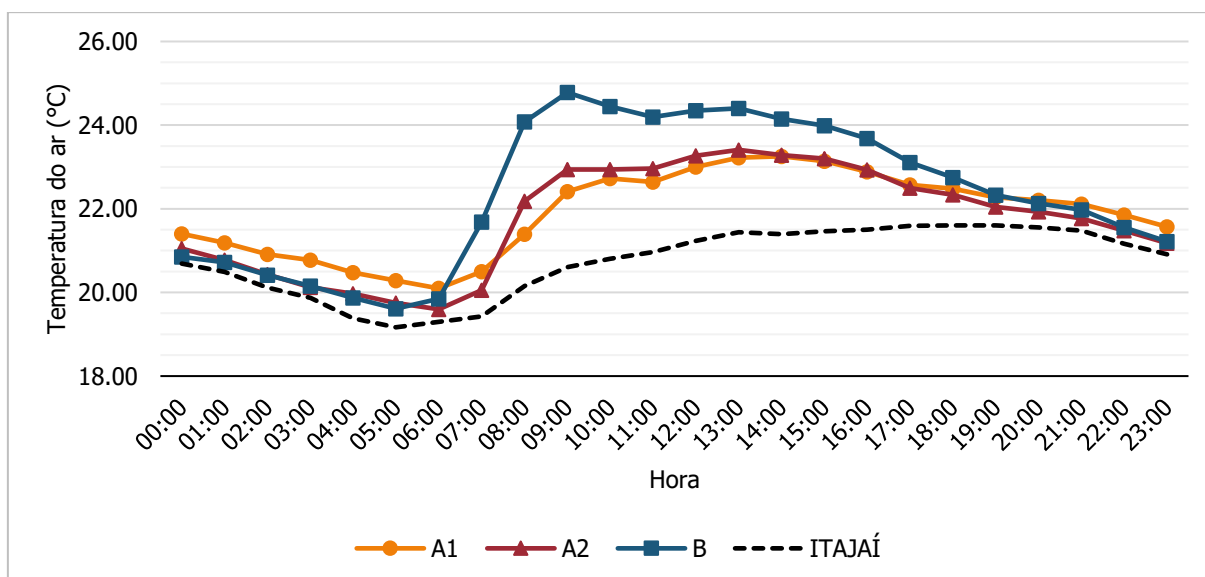


Fonte: autora.

A Figura 35 apresenta o gráfico das temperaturas médias por hora de todo o período da primavera. De maneira geral, os pontos seguem a mesma tendência durante o dia, mas com

intensidades diferentes. O ponto B exibe as maiores temperaturas durante o dia, enquanto o ponto A1 exibe as menores temperaturas diurnas e as maiores temperaturas noturnas. O ponto A2 é intermediário aos outros dois, sendo que a noite (entre 0h e 6h) mostra paridade com o ponto B. Em comparação com o período de inverno, nota-se médias de temperatura do ar mais altas, com mínima e máxima média entre 19 e 25 °C. Em paralelo ao arquivo climático de Navegantes (Figura 7), as temperaturas registradas nas duas semanas de 2021 foram mais baixas. A temperatura mínima média foi de 19,6 °C, e de 20,8 °C no arquivo climático. A temperatura máxima média nos dados históricos foi de 25,5 °C, enquanto a máxima média das medições em campo foi registrada no ponto B com 24,8 °C (Figura 35).

Figura 35 - Temperatura do ar média por hora nos pontos A1, A2 e B, e estação de Itajaí no período da primavera



Fonte: autora.

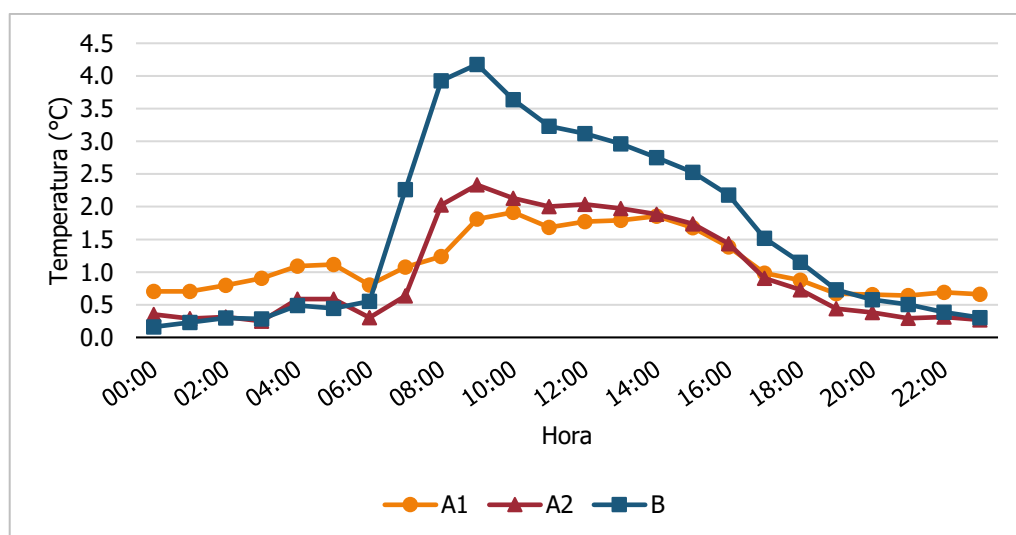
A partir do perfil médio de temperatura (Figura 35) dos pontos A1, A2, B e dos dados da estação meteorológica de Itajaí, calculou-se a intensidade das ilhas de calor utilizando o último como referência de área não urbana (Figura 36). Verifica-se maior intensidade nos períodos diurnos com ápice às 9h nos três pontos monitorados. O ponto máximo de intensidade da ilha de calor foi de 4,2 °C

Entretanto, como já discutido anteriormente, estes registros podem estar sob influência das condições específicas dos locais de instalação. Além disso, deve-se levar em consideração a localização da estação meteorológica do Porto de Itajaí, com proximidade com o mar. A proximidade da estação com a água influencia a umidade relativa, que se mantém acima da

média das demais fontes de dados (Figura 34), e as temperaturas do ar, que durante a noite são mais amenas. Isto porque o elevado calor específico da água garante com que ela libere o calor armazenado durante o dia mais lentamente a noite.

Durante o período noturno, nota-se baixas intensidades de ilha de calor, com máxima em 1,1 °C no ponto A1. Assim como no inverno, o ponto A1 apresentou ilhas de calor noturnas mais intensas que os pontos A2 e B. Os pontos A2 e B também se mantiveram com comportamentos semelhantes no período noturno. As ilhas de calor noturno apresentaram intensidades próximas às ilhas de calor no período de inverno.

Figura 36 - Intensidade das ICUs média diária no período da primavera com referência de Itajaí



Fonte: autora.

4.2 DEFINIÇÃO DOS DIAS E PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

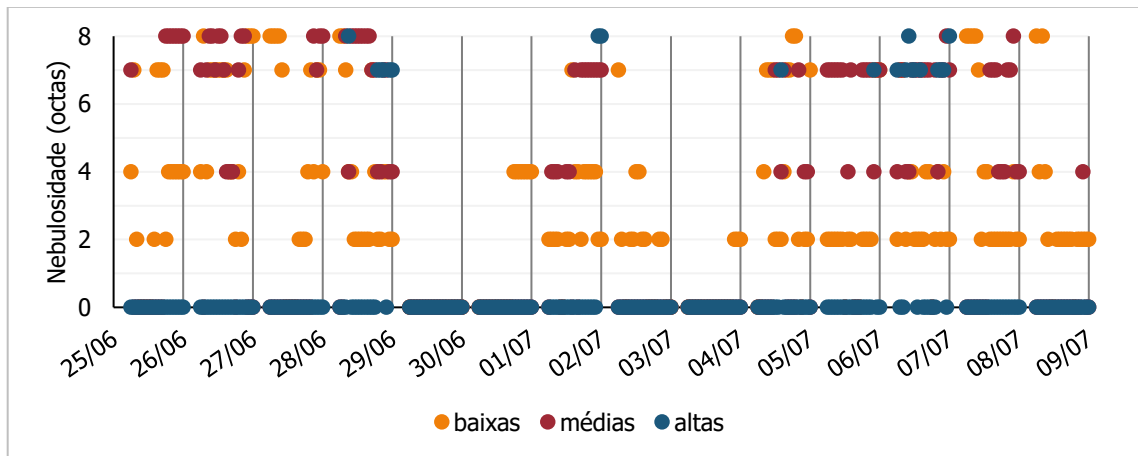
A definição dos dias ideais para simulação em cada um dos períodos monitorados (inverno e primavera) foi baseado no método apresentado em 3.1.2. Nesta seção também são apresentados os parâmetros e configurações utilizados para simular os cenários paramétricos no inverno e na primavera.

4.2.1 Inverno

Os dados de nebulosidade do período de inverno segundo a estação do Aeroporto de Navegantes são apresentados graficamente na Figura 37. Nota-se que os dias 29/06, 30/06 e 03/07 estavam praticamente com céu limpo. Os demais dias apresentaram céu encoberto.

Ressalta-se que os dados provenientes da estação meteorológica do Aeroporto de Navegantes mostram dados apenas do horário de funcionamento do aeroporto, normalmente a partir das 06h da manhã até meia noite.

Figura 37 - Nebulosidade em diferentes níveis de nuvens durante o período de inverno - de 25/06/2021 a 08/07/2021



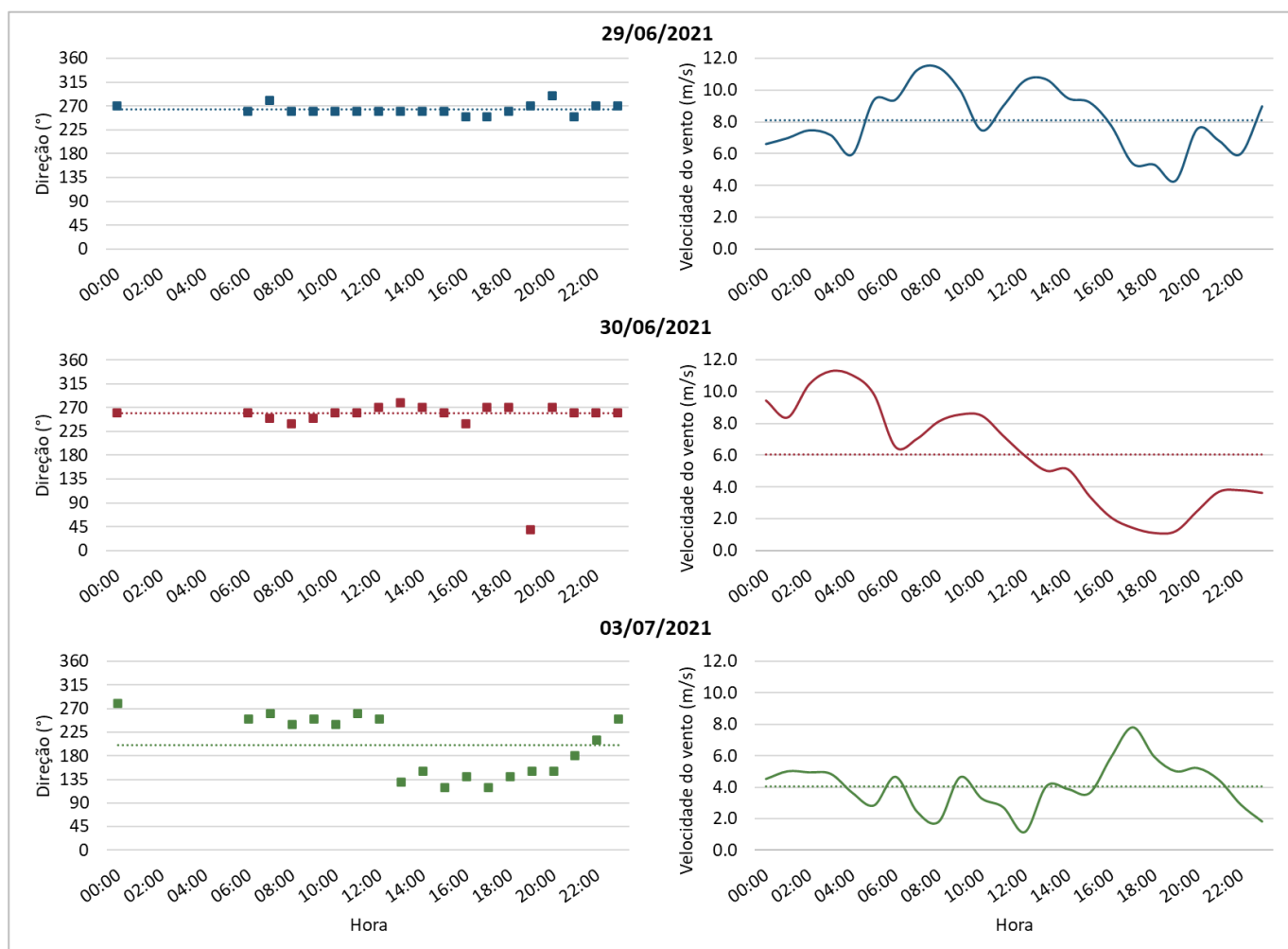
Fonte: Adaptado de NOAA (2021).

O segundo critério para escolha do dia ideal para a simulação consiste em avaliar a uniformidade da direção e da velocidade do vento. Neste critério, o dia 03/07 foi descartado, pois apresentou alta variação na direção dos ventos (Figura 38). Os dias 29 e 30 de junho mostraram constância na direção dos ventos, em média a 260° , direção oeste. Em relação à velocidade do vento, nota-se que no dia 29 a média da velocidade é mais alta do que a do dia 30, 8,1 m/s e 6,1 m/s, respectivamente. Os ventos mais fortes no dia 29 também explicam as temperaturas mais baixas deste dia em comparação ao dia 30 (Figura 31). Então, foi escolhido o dia 30/06/2021 para as simulações no ENVI-met, devido aos ventos com velocidade moderada.

Para a inicialização das simulações do período de inverno no ENVI-met, se selecionou a data de início em 28/06 e a duração da simulação de 44 horas. Assim, as primeiras 20 horas simuladas são descartadas, enquanto as restantes são referentes ao dia 30 escolhido. Embora a simulação seja iniciada em 29/06, os parâmetros iniciais que guiam as simulações são relativos ao dia de interesse, 30/06/2021. Primeiramente, são requeridas informações sobre o vento. A velocidade do vento na área urbana, segundo a correção sugerida por Nikolopoulou (2004) no Quadro 6 (seção 3.3.2) é de 2,2 m/s. Este resultado provém da multiplicação da média calculada,

6,1 m/s, pelo fator S de 0,36. A orientação do vento é solicitada em graus, para o dia 30/06 a orientação média foi de 260° (Figura 38).

Figura 38 - Direção e velocidade do vento nos dias 29/06/21, 30/06/21 e 03/07/21. Linhas pontilhadas representam a média diária



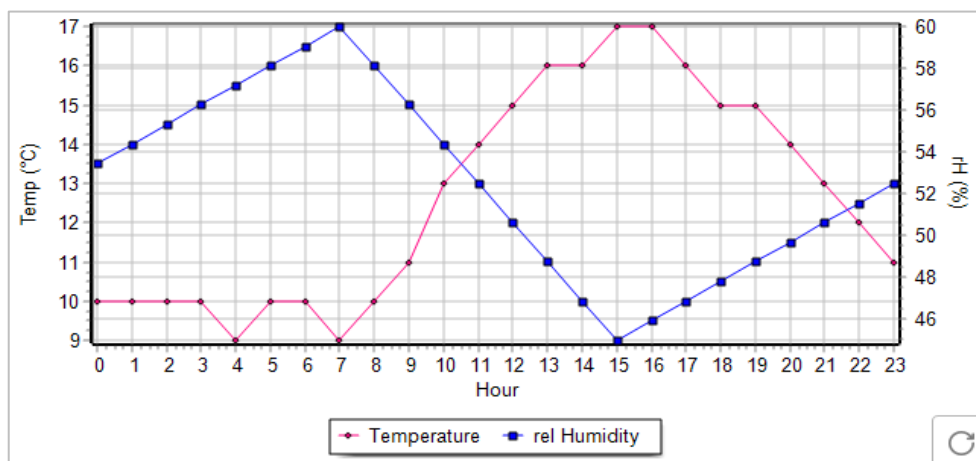
Fonte: Adaptado de NOAA (2021) e LabClima (2021).

Os perfis de temperatura e a umidade relativa do ar podem ter seus valores inseridos de hora em hora. Como foi utilizado o modo *simple forcing*, apenas um perfil de temperatura será seguido em toda a simulação. Isto significa que o dia 29 será simulado com as configurações do dia 30, sendo o perfil de temperatura criado repetido a cada ciclo diário. Para os dados de temperatura do ar, foram inseridos os dados horários provenientes dos registros da estação de Itajaí. A escolha da base de dados utilizada para guiar as simulações foi feita com base na melhor aproximação dos resultados na etapa de calibração (seção 3.3.3). Foram testadas outras configurações, como a utilização dos dados de Navegantes e a média das medições em

campo. A configuração com melhor desempenho segundo as métricas apresentadas em 2.2.1 foi a com as temperaturas do ar de Itajaí.

Para a umidade relativa do ar, por não apresentar um perfil cíclico no dia 30/06, exibindo valores muito elevados ao final do dia, foi criado um perfil mediano que correspondesse a umidade registrada na maior parte do dia. Para isso se utilizou a geração de perfil automática com a inserção das umidades máximas e mínimas e os respectivos horários em que ocorrem. No período de inverno a umidade mínima, de 45%, ocorreu às 15h, e a máxima, de 60%, às 7h. Este perfil garantiu boa correlação entre os valores simulados e observados em campo até 16h, a partir deste horário a umidade relativa do ar em Balneário Camboriú começou a aumentar até chegar a 80% às 23h. Os perfis de temperatura e umidade relativa utilizados nas simulações de inverno são apresentados na Figura 39.

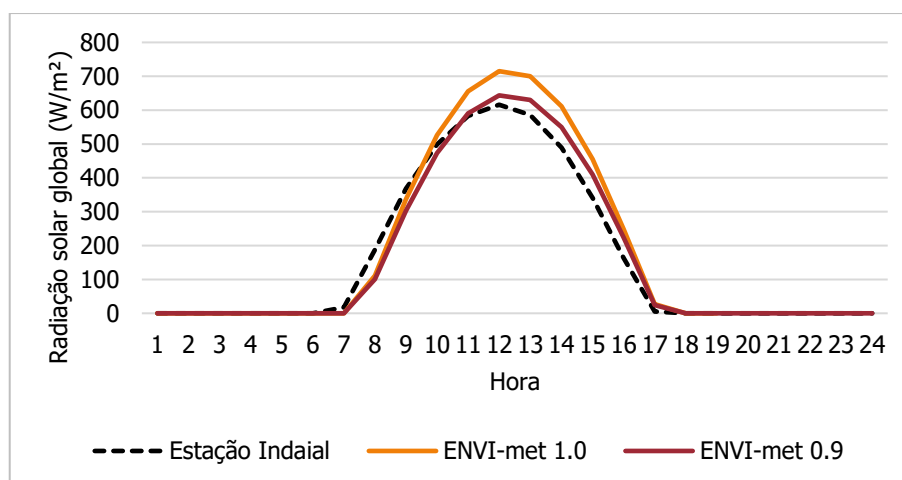
Figura 39 - Perfil diário de temperatura do ar e umidade relativa do ar utilizado no modo *simple forcing* no ENVI-met v.4.4.6 nas simulações de inverno



Fonte: autora.

Após a inserção destes parâmetros, configurações avançadas podem ser adicionadas. Neste modo avançado, a nebulosidade pode ser inserida e a radiação solar é ajustada por meio do fator de ajuste. No dia 30/06/2021 a condição de céu limpo foi atendida, não foi necessário inserir parâmetros a respeito da nebulosidade. A Figura 40 apresenta a radiação solar global por hora do dia 30/06/2021 conforme os registros da estação meteorológica de Indaial (INMET, 2021), e pela estimativa por localização do ENVI-met sem ajuste e com um fator de ajuste de 0,9. O fator de 0,9 apresentou boa aproximação com a radiação medida em Indaial, e foi adotado para as simulações de inverno. A radiação solar global na estação meteorológica de Indaial foi o registro mais próximo de Balneário Camboriú, o centro das duas cidades está a uma distância em linha reta de aproximadamente 60 km.

Figura 40 - Radiação solar global no dia 30/06 na estação meteorológica de Indaial, segundo cálculo do ENVI-met (1,0) e ENVI-met ajustado em 0,9.



Fonte: autora.

Também no modo avançado, o esquema de cálculo IVS foi acionado, com o objetivo de se obter resultados avançados quanto a transferência de radiação de ondas curta e longa no modelo tridimensional². Os parâmetros de simulação utilizados nas simulações representativas do inverno pelo programa ENVI-met versão 4.4.6 são apresentados resumidamente no Quadro 6. Estas configurações foram utilizadas em todas as simulações do período, para validar os cenários base e simular os cenários paramétricos das áreas A e B definidas.

Quadro 6 - Parâmetros de inicialização para simulações de inverno pelo ENVI-met 4.4.6

Data e horário inicial (local)	2021.29.06 - 04:00
Duração	44 h
Velocidade do vento (m/s)	2,2
Direção do vento (°)	260
Simple forcing	Sim
Temperatura do ar	Porto de Itajaí - dia 30/06/2021
Umidade relativa do ar (máx/hora - mín/hora)	60% / 07:00 - 45% / 15:00
Nebulosidade	0
Fator solar	0,9
Modo IVS	Sim

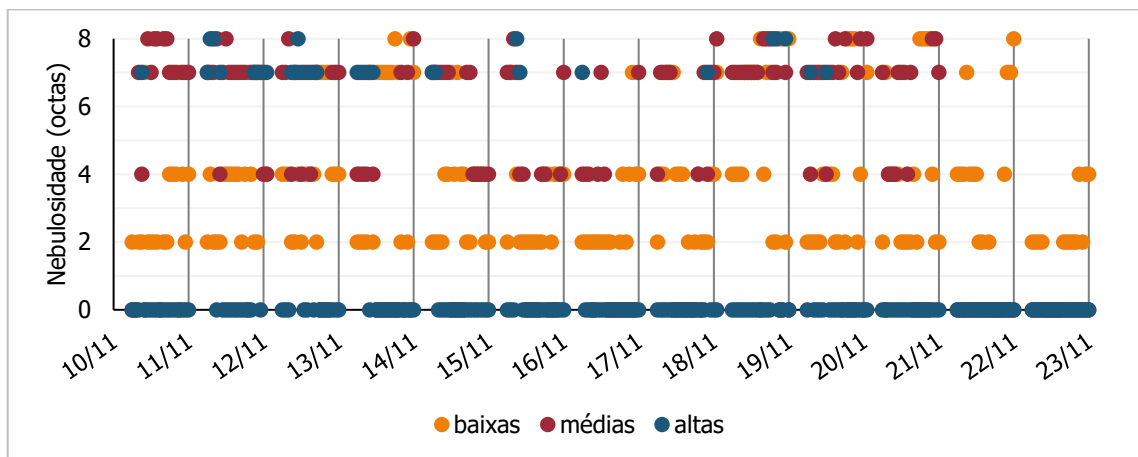
Fonte: autora.

² Por problemas de inicialização do próprio programa ENVI-met versão 4.4.6, o esquema de cálculo IVS foi ativado manualmente a partir da edição do código fonte do arquivo SIMX por meio do editor de texto Notepad++. As instruções para este acionamento foram dadas por Tim Sinsel, desenvolvedor do programa, no fórum do ENVI-met. Disponível em: <https://tinyurl.com/2byc2pk5>. Acesso em: 15 set. 2021.

4.2.2 Primavera

No segundo período de estudo, durante a primavera, observou-se grande nebulosidade nos dias monitorados. A Figura 41 mostra graficamente a nebulosidade ao longo deste período. Observa-se a presença de nuvens baixas com predominância de nebulosidade entre 2 e 4 octas em todo o período. Nuvens de média e alta altura também puderam ser observadas com maior frequência. Durante o período não foi observado dias de céu totalmente limpo. O dia 22 de novembro é o que apresentou menor nebulosidade, sem momentos de nebulosidade alta, acima de 6 octas. Neste dia, nota-se a presença de nuvens baixas com cobertura do céu de 2 octas durante a maior parte do dia.

Figura 41 - Nebulosidade em diferentes níveis de nuvens durante o período de primavera - de 10/11/2021 a 23/11/2021



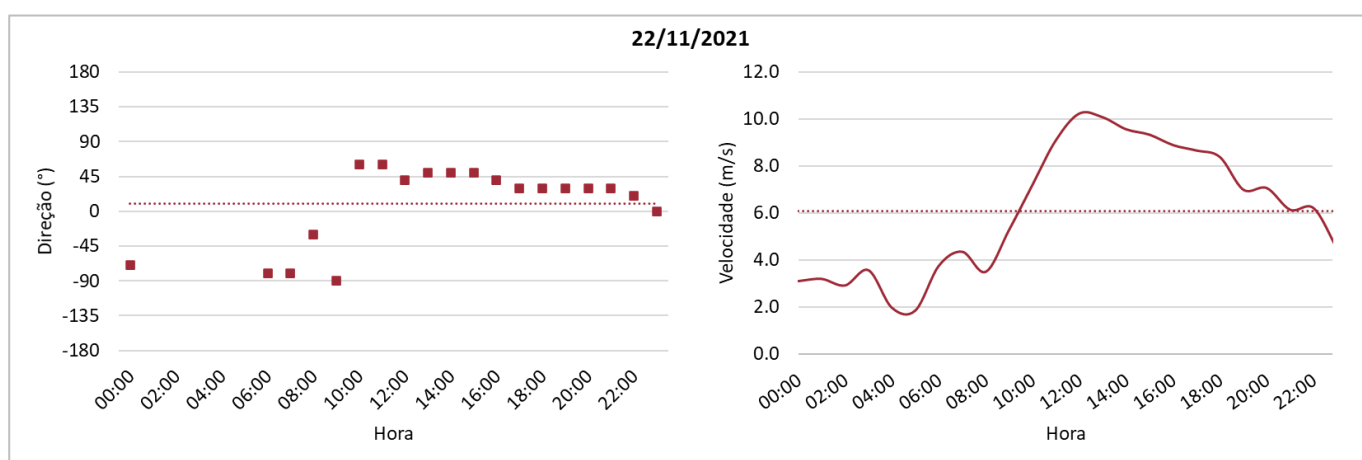
Fonte: Adaptado de NOAA (2021).

Apenas o dia 22/11/21 foi considerado adequado para simulação no período de primavera, segundo o critério de nebulosidade. A Figura 42 apresenta a direção e velocidade dos ventos neste dia. A direção do vento varia entre as orientações oeste e nordeste, mantendo a média próximo a 10° , direção norte. O perfil de velocidade do vento mostra ventos mais fracos durante a noite e ventos mais fortes durante o dia, com pico às 12h. A média diária da velocidade do ar no dia 22/11 foi de 6,1 m/s no Molhe de Itajaí. Com base nos dados apresentados, o dia 22 de novembro foi escolhido para basear as simulações representativas do período de primavera.

Assim como no período de inverno, as simulações da primavera têm 44 horas de duração, sendo as 20 primeiras horas, referentes ao dia 21/11/2021, descartadas. O primeiro

parâmetro requerido pelo programa é acerca da velocidade e direção do vento. A velocidade média do vento em área não urbana foi de 6,1 m/s (Figura 42). A transformação deste valor para uma velocidade referente a um ambiente urbano foi feita por meio da multiplicação de 6,1 pelo fator S de 0,36, conforme o Quadro 5 de Nikolopoulou (2004). A velocidade do vento média diária foi de 2,2 m/s. A direção do vento média do dia 22/11, já calculada em Figura 42, é de 10°.

Figura 42 - Direção e velocidade do vento no dia 22/11. Linhas pontilhadas representam a média diária



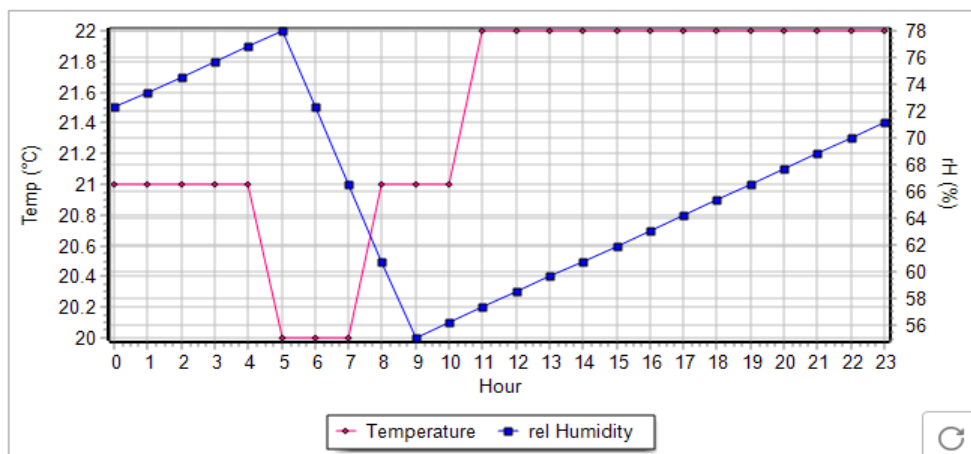
Fonte: Adaptado de NOAA (2021) e LabClima (2021).

Nas simulações da primavera manteve-se a metodologia de definição dos parâmetros de simulação do inverno. Foi utilizado o modo *simple forcing*. O perfil de temperatura do ar proveniente dos dados meteorológicos do Porto de Itajaí do dia 22 de novembro. A umidade relativa do ar, desta vez, foi estimada com base nos valores médios máximo e mínimo das medições em campo (pontos A1, A2 e B) do dia e nos respectivos horários em que ocorrem. A umidade relativa do ar máxima ocorreu às 5h e foi de 78%, a mínima foi de 55% às 9h. A Figura 43 mostra os perfis de temperatura do ar e umidade relativa do ar utilizados para forçar estas variáveis nas simulações de primavera.

Após as definições iniciais do modo *simple forcing*, define-se as configurações avançadas. Primeiro, a nebulosidade é inserida. No dia 22/11/2021 foi constatada a presença de poucas nuvens baixas na maior parte do dia, ocupando até 2 oitavos (octas) do céu (Figura 41). A composição da nebulosidade no programa ENVI-met é distribuída em três níveis de nuvens, nas quais se insere o cobrimento do céu em cada nível em octas. Uma vez definida a nebulosidade, realiza-se o ajuste da radiação solar pelo fator solar. É importante que este ajuste

seja feito após a inserção da nebulosidade, pois a quantidade de nuvens e a altura em que se encontram, modifica a quantidade de radiação solar incidente.

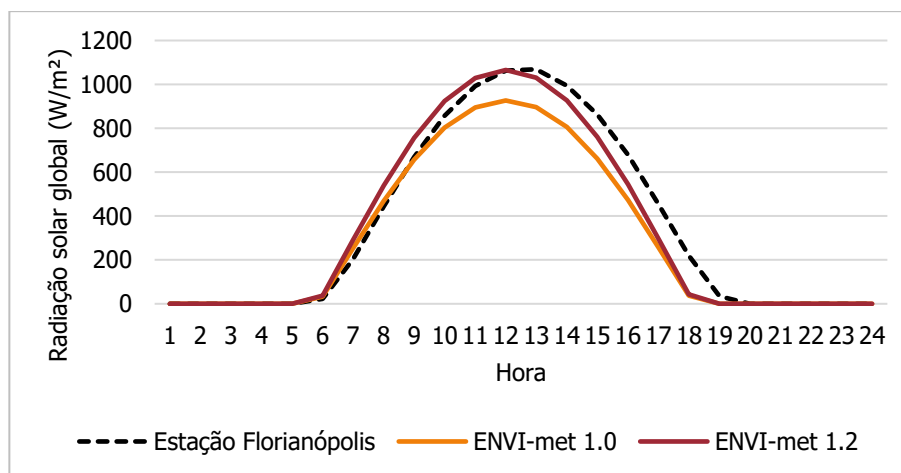
Figura 43 - Perfil diário de temperatura do ar e umidade relativa do ar utilizado no modo *simple forcing* no ENVI-met v.4.4.6 nas simulações de primavera



Fonte: autora.

A Figura 44 apresenta graficamente a radiação solar global do dia 22/11/2021 na estação meteorológica automática mais próxima em funcionamento, de Florianópolis (INMET, 2021), e os perfis estimados pelo ENVI-met sem e com ajuste no fator solar. A distância entre os centros das cidades de Florianópolis e Balneário Camboriú é de aproximadamente 70 km em linha reta. A estação de Indaial, utilizada anteriormente, no período de inverno, não possui dados de novembro de 2021 no Banco Nacional de Dados Meteorológicos do INMET (2021).

Figura 44 - Radiação solar global no dia 22/11 na estação meteorológica de Florianópolis e em Balneário Camboriú segundo cálculo do ENVI-met (1,0) e ENVI-met ajustado em 1,2



Fonte: autora.

Verifica-se, pela Figura 44 que a radiação estimada pelo programa, curva ENVI-met 1.0, subestima a intensidade da radiação solar global, provavelmente devido à presença das nuvens. Com um fator de ajuste de 1,2, atinge-se um valor máximo de radiação (1065 W/m^2) suficientemente próximo ao registrado em Florianópolis naquele dia (1063 W/m^2). Embora o perfil de radiação estimada pelo ENVI-met apresente menos horas de radiação e uma curva deslocada à esquerda, a diferença não é significativa o bastante para comprometer os resultados das simulações (ver 4.3).

Por fim, o modo avançado de cálculo de radiação, o esquema IVS, foi ativado nas simulações durante a primavera. Assim como no período de inverno, a ativação desta opção foi realizada manualmente pela modificação do código-fonte do arquivo SIMX. Neste período, a versão 5.0 do programa tinha sido lançada, mas com o objetivo de manter as configurações o mais próximas das de inverno, as simulações seguiram sendo realizadas pelo ENVI-met versão 4.4.6. O Quadro 7 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações do dia 22/11/2021, dia representativo do período da primavera.

Quadro 7 - Parâmetros de inicialização para simulações de primavera pelo ENVI-met 4.4.6

Data e horário inicial (local)	2021.11.21 - 04:00
Duração	44 h
Velocidade do vento (m/s)	2,2
Direção do vento (°)	10
<i>Simple forcing</i>	Sim
Temperatura do ar	Porto de Itajaí - dia 22/11/2021
Umidade relativa do ar (máx/hora - mín/hora)	78%/05:00 - 55%/09:00
Nebulosidade (octas)	2 (<i>low clouds</i>) 0 (<i>medium clouds</i>) 0 (<i>high clouds</i>)
Fator solar	1,2
Modo IVS	Sim

Fonte: autora.

4.3 VALIDAÇÃO

O processo de validação das simulações baseia-se na correlação entre valores medidos em campo e os simulados. Os parâmetros definidos para as simulações devem resultar em boa concordância com os três pontos de monitoramento: A1 e A2 na área A, e B na área B. Como os parâmetros de inicialização das simulações são os mesmos em ambas as áreas, o processo de calibração foi realizado de modo simultâneo, considerando o desempenho das duas áreas.

Foram realizados diversos testes, com diferentes configurações e modos no ENVI-met versão 4.4.6, principalmente no primeiro período analisado, de inverno. Isto ocorreu porque após a definição dos parâmetros do dia representativo de inverno, a mesma metodologia de definição foi utilizada para o período de primavera. Os parâmetros definidos em 4.2 foram as configurações que apresentaram os melhores resultados no inverno e na primavera, de modo que nesta seção serão apresentados e discutidos os indicadores de desempenho alcançados nos modelos para a variável temperatura do ar.

4.3.1 Inverno

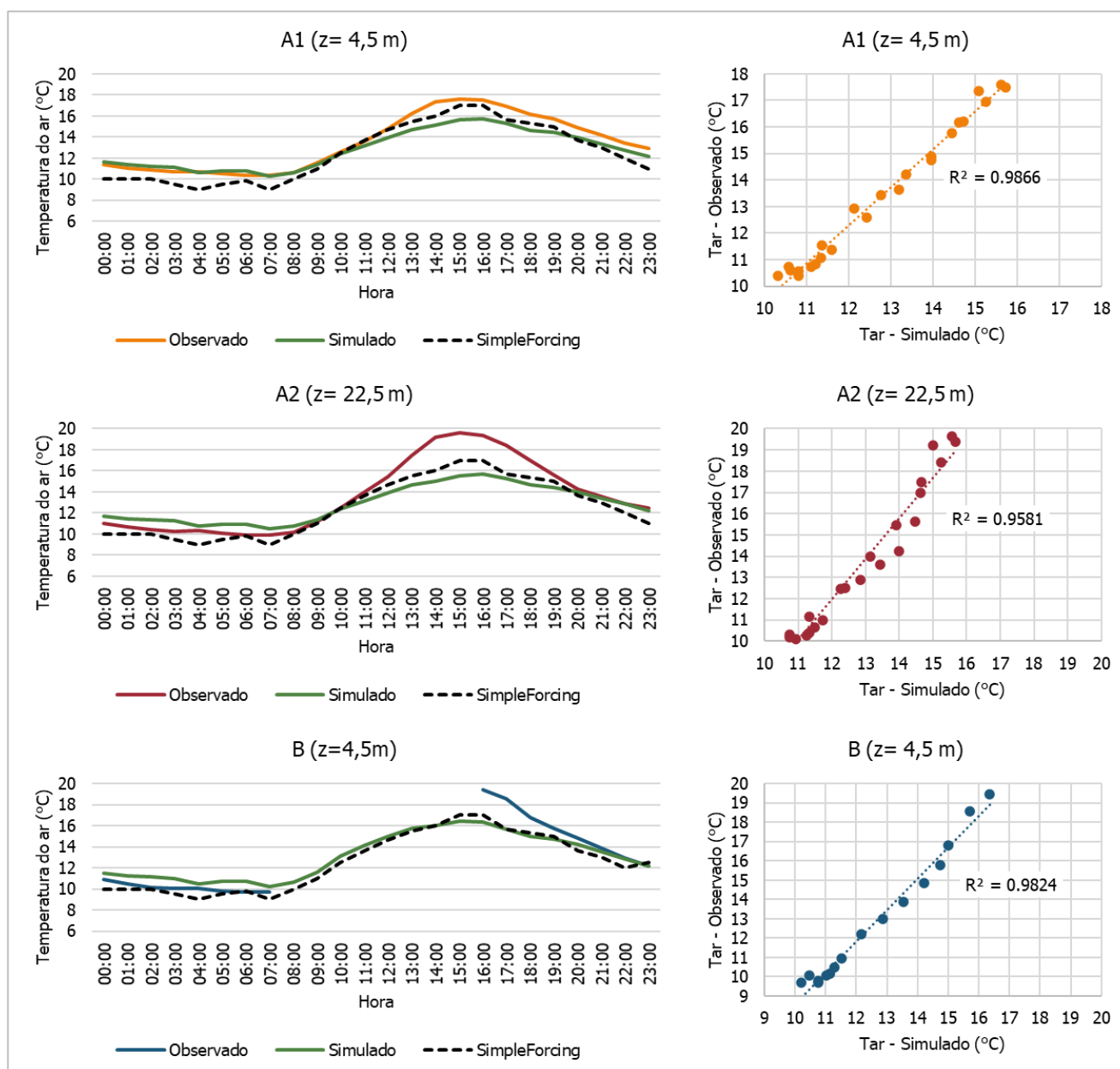
No período de inverno, o dia 30/06 foi eleito como representativo e modelado no programa ENVI-met para a análise microclimática das áreas A e B. Os pontos A1, A2 e B foram avaliados para validar o modelo. A Figura 45 mostra o perfil horário de temperatura do ar provenientes das medições, observado em campo, e das simulações em cada ponto. A linha tracejada representa o perfil de temperatura de Itajaí, utilizado para guiar as simulações por meio do modo *simple forcing*. Ao lado direito da Figura 45, observa-se as representações gráficas do coeficiente de determinação (R^2) de cada ponto de monitoramento.

A Tabela 5 apresenta as métricas de desempenho calculadas para cada ponto no período de inverno. Verifica-se por meio dos gráficos a boa correspondência entre os valores simulados e os observados em campo do ponto A1. Neste ponto, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,99, o índice de Willmott (d) de 0,94 e o raiz quadrada do erro médio (RMSE) teve seu valor mais baixo dentre os três pontos, de 1,05 °C. A simulação apresentou bom desempenho, embora as temperaturas diurnas tenham sido subestimadas. Maggiotto *et al.* (2014) observou que o modelo ENVI-met tem tendência de subestimar a temperatura máxima diurna, mas prevê corretamente o horário em que as temperaturas máximas e mínimas ocorrem. No ponto A1, a temperatura máxima simulada de 15,72 °C às 16h e a mínima foi de 10,32 °C às 7h, enquanto as medições locais indicaram temperatura máxima de 17,60 °C às 15h e mínima de 10,39 °C às 7h. A diferença entre os picos de temperatura foi de 1,88 °C.

No ponto A2, as métricas indicaram bom desempenho da simulação, entretanto, nota-se que a temperatura do ar noturna tenha sido superestimada e a diurna subestimada com maior intensidade pelo modelo ENVI-met (Figura 45). Entre os três pontos no período de inverno, o ponto A2 foi o que apresentou maiores erros, RMSE de 1,89 °C, MBE de -0,76 °C e MAE de 1,38 °C (Tabela 5). O valor negativo de MBE indica a tendência de a temperatura simulada ser

mais baixa que a observada. Embora as medidas quantitativas de desempenho tenham apresentado valores razoáveis para a validação pela comparação com outros trabalhos (GUSSON; DUARTE, 2016), o perfil de temperatura do ar apresentou tendência contrária do esperado, posto a relação do ponto A2 com o ponto A1. Esta relação será discutida adiante, na seção 4.4.

Figura 45 - Perfis de temperatura do ar simulados e observados e coeficiente de determinação (R^2) nos pontos de monitoramento A1, A2 e B, para validação dos resultados ENVI-met referentes ao dia 30/06



Fonte: autora.

Tabela 5 - Medidas quantitativas do desempenho do modelo ENVI-met v.4.4.6 e as datas observadas para temperatura do ar no período de inverno

		Tamanho da amostra	Indicador de desempenho				R ²
			RMSE	MBE	MAE	d	
Ponto	A1	24	1,05 °C	-0,65 °C	0,83 °C	0,94	0,99
	A2	24	1,89 °C	-0,76 °C	1,38 °C	0,87	0,96
	B	16	1,37 °C	-0,24 °C	1,08 °C	0,94	0,98

Fonte: autora.

Na área B, menos densa vertical e horizontalmente, o ponto B apresentou boa correlação entre os valores simulados e observados. Neste ponto, foram descartados os dados de temperatura do ar das medições, resultando na redução do tamanho da amostra para os cálculos dos indicadores de desempenho (Tabela 5). Pelo gráfico referente a este ponto na Figura 45, verifica-se que as temperaturas simuladas são mais altas que as observadas entre 0h e 7h. Em outro momento, entre 16h e 21h, a temperatura do ar observada supera em até 3,1 °C a temperatura simulada. Ainda que o modelo tenha apresentado menor amplitude térmica, as métricas de desempenho RMSE, MAE, *d* e R² tiveram valores melhores do que as medianas encontradas na revisão de Tsoka, Tsikaloudaki e Theodosiou (2018) (Figura 24).

Fazendo uma comparação entre os pontos simulados, observa-se que a temperatura do ar no ponto A1 apresentou menor amplitude térmica que o ponto B. O ponto B foi o que apresentou temperaturas do ar mais elevadas durante o dia, e também as menores temperaturas entre 0h e 6h em relação às simuladas na área A. Estas observações indicam que o modelo ENVI-met está em concordância com as observações em campo. De maneira geral, os três pontos apresentaram boas previsões da temperatura do ar pelo modelo ENVI-met, justificando a sua validação.

Embora o modelo tenha estimado temperaturas diurnas mais baixas do que o registrado pelos termo higrômetros nos três pontos, este comportamento também foi observado em outros trabalhos (GUSSON; DUARTE, 2016; MORAKINYO *et al.*, 2019). A temperatura do ar durante a noite, por sua vez, foi superestimada. Maggiotto *et al.* (2014) observaram que somente quando se simulava um cenário ficcional com maior cobertura natural da superfície urbana, aumentando a evapotranspiração no espaço modelado, que os resultados se aproximavam do real. Na área A não se observa presença significativa de vegetação e áreas permeáveis, mas na área B há áreas de grama e árvores de diferentes portes que foram desconsideradas na modelagem. Ressalta-se que não foi configurada a geração de calor antropogênico, parcela que

influencia as temperaturas do ar urbano e cuja negligencia pode ter afetado o desempenho do modelo.

4.3.2 Primavera

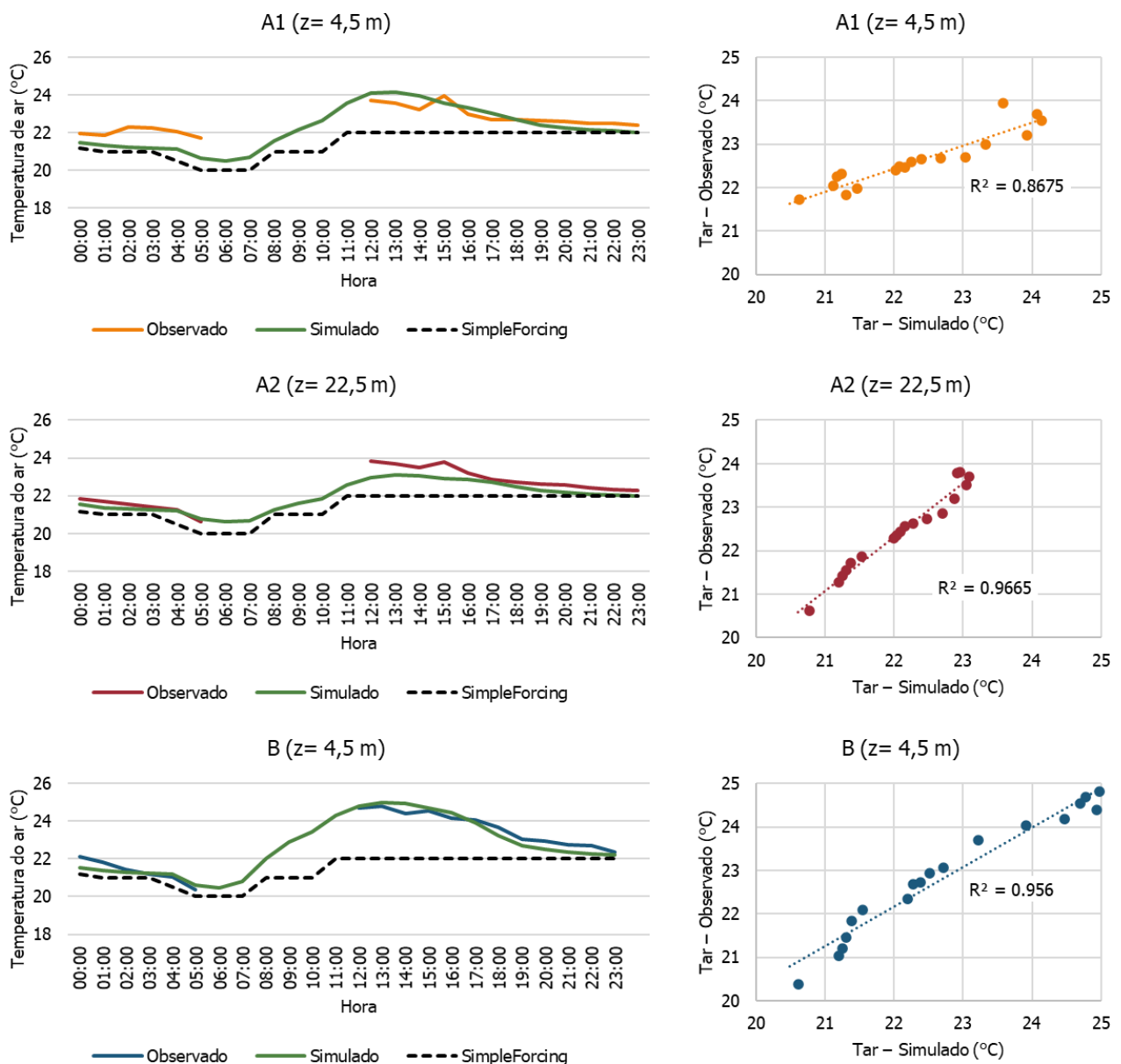
No período da primavera, as medições em campo ocorreram no mês de novembro e o dia representativo para as simulações foi o dia 22/11/2021. Neste período, as temperaturas do ar registradas em cada ponto de monitoramento sofreram influências externas, exibindo um perfil de temperaturas mais elevadas durante o período da manhã, como discutido em 4.1.2. Este comportamento pode ter sido causado pela proximidade dos equipamentos com as paredes das edificações. Devido as dimensões da malha utilizada nas simulações, a modelagem de um cenário mais detalhado e próximo da realidade pelo ENVI-met foi impossibilitada.

As influências externas sobre a temperatura do ar e a umidade relativa do ar registrada nos termo-higrômetros instalados em campo não foram propriamente representadas pelo modelo ENVI-met. Por este motivo para a validação, foram desconsideradas as temperaturas registradas entre 6h e 12h, pois neste intervalo houve a incidência solar nas edificações, fator que contribuiu para aumentar a interferência sobre os equipamentos. A Figura 46 apresenta os gráficos de perfil das temperaturas simuladas e observadas e a representação do coeficiente de determinação (R^2) com base nestes valores em cada ponto de monitoramento. Assim como nos resultados do dia de inverno, a linha tracejada representa os dados de temperatura da estação de Itajaí, inseridos para basear a simulação pelo modo *simple forcing*. A Tabela 6 mostra as métricas de desempenho calculadas para cada ponto no período da primavera.

Verifica-se que o ponto A1 exibiu o pior desempenho entre os três pontos, com R^2 e d de 0,87, embora os demais indicadores apresentaram valores razoáveis, RMSE de 0,63 °C e MAE de 0,57 °C (Tabela 6). Observa-se neste ponto um comportamento de aumento da temperatura às 2h, que não foi verificado nos demais. Este comportamento demonstra que houve uma interferência pontual que atuou aumentando a temperatura neste local. Durante o dia, o perfil simulado atinge uma temperatura máxima de 24,14 °C às 13h, valor próximo aos 23,54 °C registrados em campo no mesmo horário. A partir deste horário as curvas de temperatura do simulado e observado seguem próximas. Às 15h, tanto no ponto A1 quanto no ponto A2 verifica-se um pico de temperatura do ar, também possivelmente causado por alguma perturbação local.

O ponto A2 apresenta um bom desempenho, atingindo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,97 e um d de 0,93. Pelo gráfico da Figura 46, nota-se que as temperaturas do ar até as 5h foram muito semelhantes. Comportamento que se repete ao final do dia. Ainda neste ponto, observa-se a tendência do modelo ENVI-met em subestimar as temperaturas do ar durante o dia. A análise comparativa entre os pontos A1 e A2 sob a perspectiva do perfil vertical de temperatura no espaço urbano é realizada em 4.4.

Figura 46 - Perfis de temperatura do ar simulados e observados e coeficiente de determinação (R^2) nos pontos de monitoramento A1, A2 e B, para validação dos resultados ENVI-met referentes ao dia 22/11



Fonte: autora.

Tabela 6 - Medidas quantitativas do desempenho do modelo ENVI-met v.4.4.6 e as datas observadas para temperatura do ar no período da primavera

		Tamanho da amostra	Indicador de desempenho				R ²
			RMSE	MBE	MAE	d	
Ponto	A1	18	0,63 °C	-0,28 °C	0,57 °C	0,87	0,87
	A2	18	0,43 °C	-0,36 °C	0,38 °C	0,93	0,97
	B	18	0,33 °C	-0,10 °C	0,30 °C	0,99	0,96

Fonte: autora.

O ponto B foi o local que apresentou melhor desempenho segundo as métricas da Tabela 6, com um d de 0,99 e R^2 de 0,96. Verifica-se que a simulação representou satisfatoriamente a temperatura diurna, que teve seu máximo às 13h com valor simulado de 24,97 °C e observado de 24,81 °C. Durante a noite, a temperatura do modelo ENVI-met é reduzida mais rapidamente, mas a diferença entre os perfis atinge no máximo 0,56 °C (às 0h).

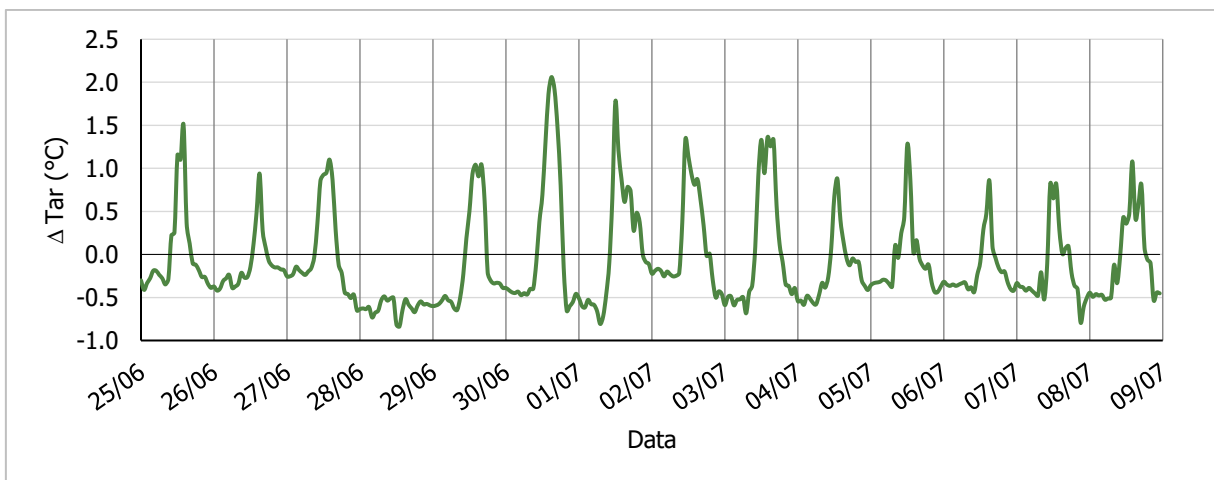
Nas simulações do período da primavera, as temperaturas noturnas foram superestimadas. As temperaturas diurnas, por sua vez, apresentaram perfis semelhantes, superestimando no ponto A1 e subestimando em A2. Os indicadores de desempenho apresentaram valores suficientes para a validação, com desempenho análogo ao de outros trabalhos (ACERO; ARRIZABALAGA, 2018; GUSSON; DUARTE, 2016; TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018). Verifica-se que a amplitude térmica registrada no dia 22/11/2021 foi mais baixa do que as do dia representativo de inverno. As temperaturas noturnas, por sua vez, ainda foram superestimadas na simulação. Ressalta-se que a modelagem das áreas negligenciou a presença de vegetação e áreas permeáveis no modelo, fator que contribuiria para reduzir esta temperatura.

4.4 PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA

Na área A, selecionou-se dois pontos de monitoramento. Os pontos A1 e A2 foram alocados na mesma posição em área do solo, mas em alturas diferentes. O objetivo desta seleção foi observar como se dá o microclima urbano nas diferentes alturas. Analisando como o fenômeno das ilhas de calor afetam os primeiros e os últimos pavimentos de uma edificação. Para estudar este perfil vertical de temperatura na área A definida em Balneário Camboriú, são analisados os dados medidos em campo nos períodos de inverno e primavera e os resultados das simulações dos dias representativos de cada período.

A Figura 47 mostra a variação de temperatura do ar (ΔT_{ar}) registradas durante o período de inverno entre os pontos A2 e A1. Verifica-se que na maior parte do período analisado, as temperaturas diurnas do 8º pavimento da edificação, ponto A2, superam as do segundo pavimento, ponto A1. Apenas no dia 28/06 este comportamento não é verificado, neste dia o céu estava nublado (Figura 37), indicando que a elevação da temperatura pode ter relação com o acesso solar de cada pavimento. As temperaturas noturnas, por sua vez, foram mais elevadas no ponto A1, exibindo uma variação negativa em todo o período observado.

Figura 47 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no período de inverno



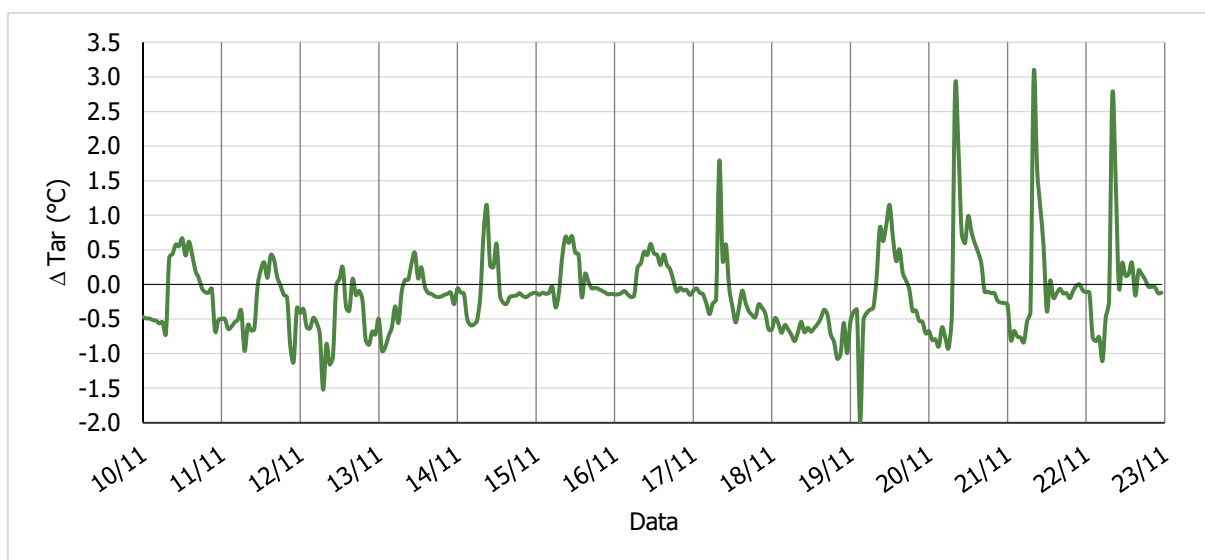
Fonte: autora.

No segundo período avaliado, durante a primavera, o mesmo comportamento é observado (Figura 48). O ponto A2 apresenta maiores temperaturas diurnas e menores temperaturas do ar noturnas em relação ao ponto A1. Verifica-se que neste período a variação da temperatura do ar noturna foi mais alta, superando $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ de diferença entre o segundo e o oitavo pavimento em alguns momentos. A variação da temperatura diurna, por sua vez, foi menos intensa do que a observada no inverno durante a maior parte do intervalo. Ressalta-se que neste período de monitoramento os dias foram bastante nublados (Figura 41), o que pode ter contribuído para reduzir a diferença entre as temperaturas durante o dia, pois restringiu o acesso solar. Além disso, a amplitude térmica do período da primavera foi mais baixa do que do inverno (Figura 34).

Nota-se no gráfico da Figura 48 que a partir do dia 20/11, quando o céu está parcialmente nublado, os picos de ΔT_{ar} são mais altos. Nestes dias, verifica-se até $3,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ de variação, que ocorrem no período da manhã, às 8h. Neste horário, a altura solar ainda é baixa,

de modo que a proteção horizontal da varanda não sombreia os aparelhos. O comportamento observado coincide com o momento de incidência de radiação solar nos dois pontos, indicando a influência da radiação solar sobre as medições em campo na primavera.

Figura 48 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no período da primavera

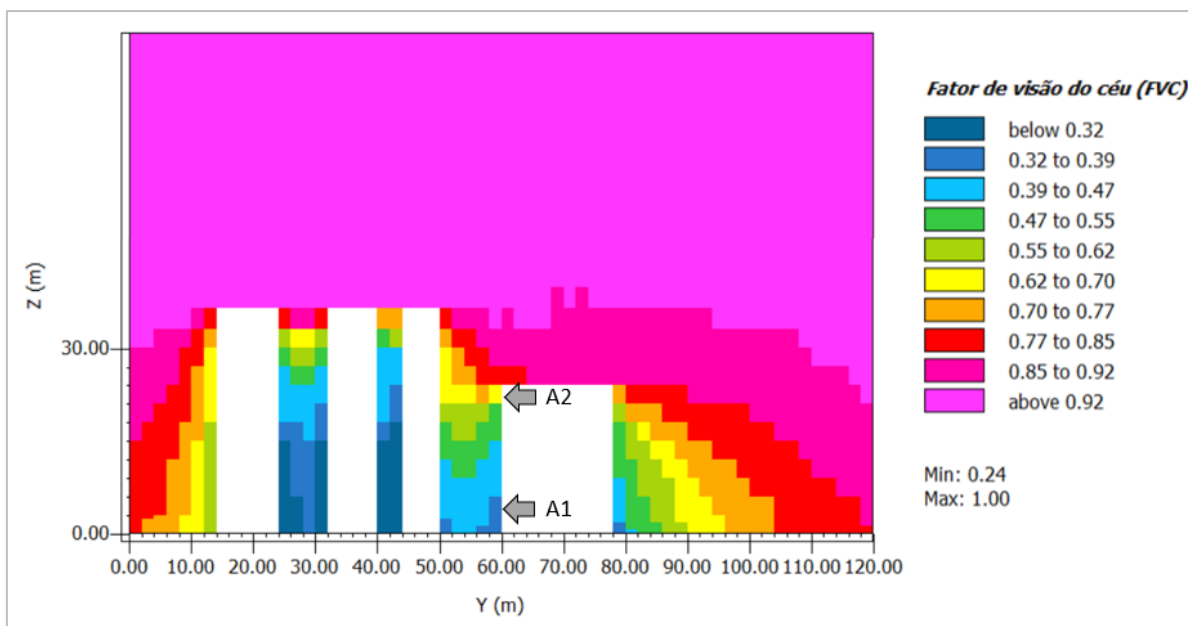


Fonte: autora.

As medições em campo mostraram um padrão de perfil vertical de temperatura naquele ponto da área A. O ponto mais elevado, A2, localizado a aproximadamente 22,5 metros de altura em relação ao solo, apresentou maior amplitude térmica do que o ponto A1, que está a uma altura de 4,5 metros do solo. O ponto A2, por estar em um local mais alto, apresenta maior fator de visão do céu do que o ponto A1, pois há menos edificações obstruindo a visão neste local. A simulação do modelo da área A pelo ENVI-met v.4.4.6 calcula o FVC conforme o modelo tridimensional aproximado do espaço urbano criado no programa. A Figura 49 mostra no plano y-z os FVC de cada célula do modelo, os pontos A1 e A2 estão indicados com uma seta. No ponto A1, o FVC é de 0,39, e no ponto A2 é de 0,67. Nota-se que a medida em que se afasta das edificações e do solo, aumenta o fator de visão do céu.

O FVC mais alto do ponto A2 está associado a uma maior troca de radiação solar por onda longa com o céu durante a noite, fazendo com que as temperaturas reduzam mais rapidamente neste ponto. O maior FVC também está relacionado com uma maior incidência de radiação solar difusa, justificando as temperaturas do ar mais elevadas no ponto A2 em relação ao A1 durante o dia.

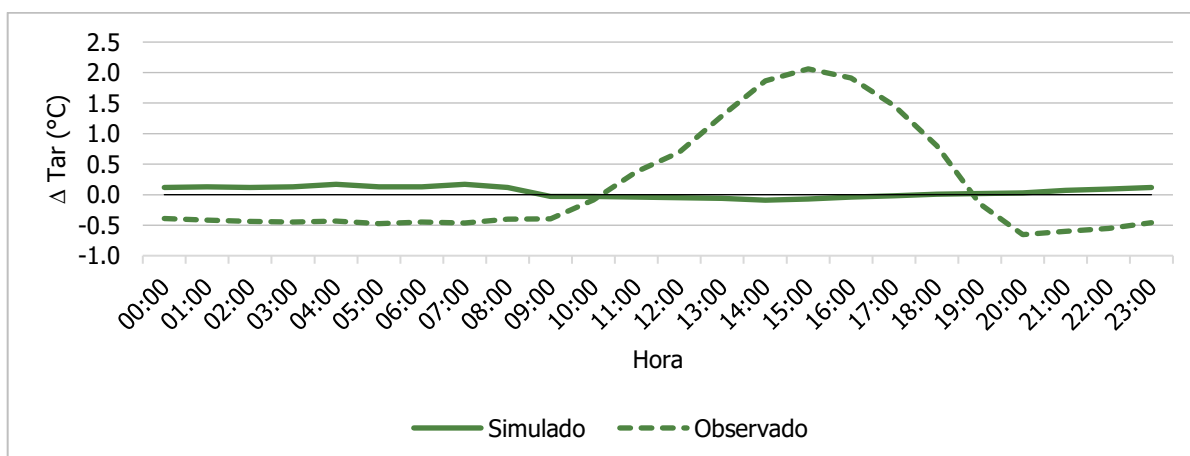
Figura 49 - Fator de visão do céu (FVC) calculado pelo ENVI-met 4.4.6 – plano y/z, corte em x = 97 m



Fonte: autora.

No processo de validação, verificou-se que as diferenças entre as temperaturas do ar simuladas dos pontos A2 e A1 mostrou tendência contrária ao observado em campo. A Figura 50 apresenta graficamente os dois perfis de variação da temperatura do ar (ΔT_{ar}) para o dia 30 de junho, representativo do período de inverno. Nota-se que a ΔT_{ar} simulado é muito menor do que as medições em campo indicaram, com a diferença máxima entre A2 e A1 na simulação sendo de 0,17 °C. Além disso, observa-se nas simulações temperaturas mais elevadas em A2 durante a noite e mais baixas neste ponto durante o dia.

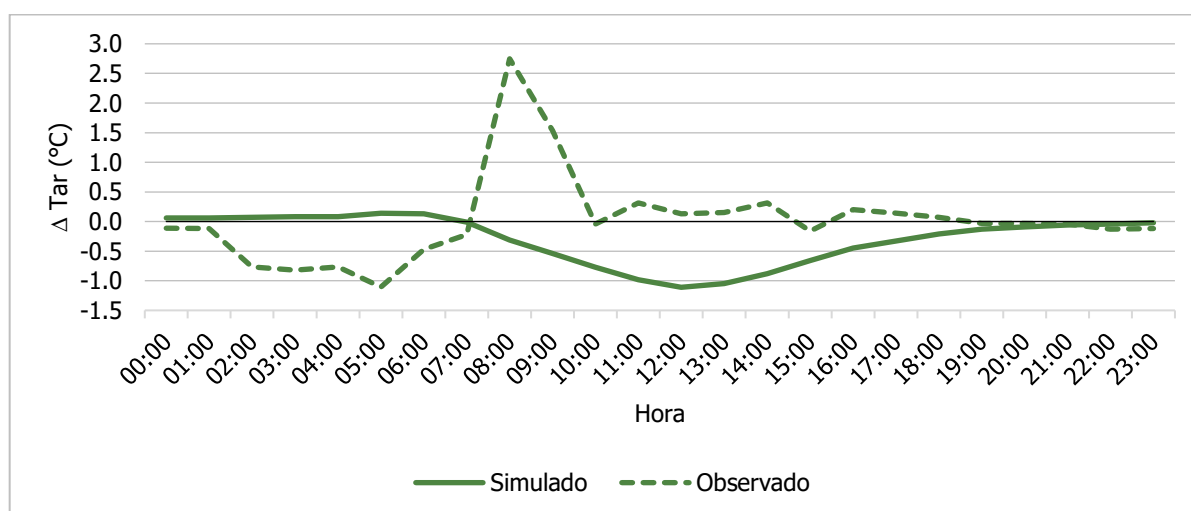
Figura 50 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta T_{ar} = T_{arA2} - T_{arA1}$) no dia 30/06/2021 para os dados simulados (linha contínua) e os observados em campo (linha tracejada)



Fonte: autora.

A Figura 51 apresenta o gráfico das variações das temperaturas do ar entre os pontos A2 e A1 no dia representativo do período monitorado da primavera. No dia 22/11, ΔTar apresentou maior intensidade, com máximo negativo de $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12h. Neste período do ano há incidência solar pela manhã nos pontos de monitoramento, o que pode explicar a maior intensidade da diferença entre os pontos A1 e A2 no modelo ENVI-met. Durante a noite, a partir de 0h a variação entre os pontos simulados se manteve positiva, ainda que próxima de zero. De maneira geral, nota-se a mesma tendência observada na simulação de inverno, com variação positiva durante a noite e negativa durante o dia. Comportamento contrário ao observado pelas medições em campo.

Figura 51 - Variação da temperatura do ar entre pontos A2 e A1 ($\Delta Tar = TarA2 - TarA1$) no dia 22/11/2021 para os dados simulados (linha contínua) e os observados em campo (linha tracejada)



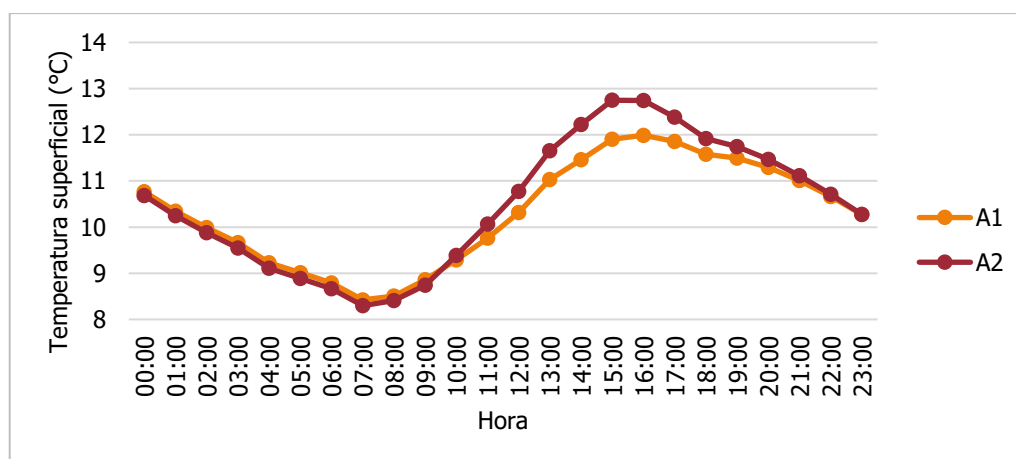
Fonte: autora.

Com o objetivo de compreender os resultados das simulações do modelo ENVI-met, plotou-se a temperatura superficial da parede da edificação nos pontos A1 e A2. A Figura 52 mostra o comportamento da temperatura superficial nos dois pontos no período de inverno. Nota-se uma maior temperatura superficial durante o dia no ponto A2, e uma temperatura levemente mais fria no mesmo ponto a noite. O perfil de temperatura superficial condiz com o esperado, embora em baixa intensidade.

A Figura 53 é referente ao período da primavera. Verifica-se uma diferença desprezível entre as temperaturas superficiais dos pontos A1 e A2 durante a noite. A baixa diferença pode ser justificada pela presença de nebulosidade neste dia de simulação, fator que

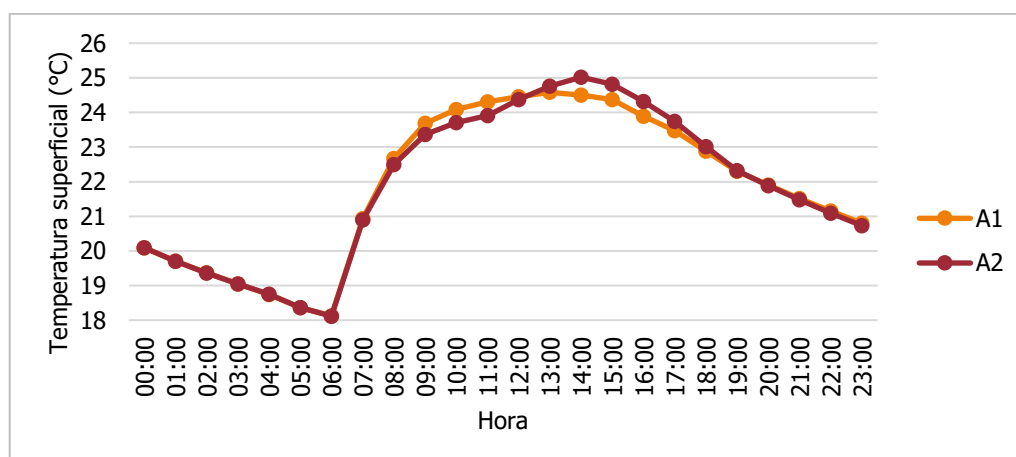
reduz a troca de calor por onda longa com o céu. Durante o dia, pela manhã (8h – 12h) o ponto A1 apresenta maiores temperaturas, enquanto a tarde (12h – 18h) o ponto A2 supera o A1. De maneira geral, os dois pontos apresentam perfis semelhantes, com diferenças entre um ponto e outro menores do que 1 °C.

Figura 52 - Temperatura superficial pelo ENVI-met v 4.4.6 das paredes da edificação na localização A1 e A2 no dia 30/06/2021



Fonte: autora.

Figura 53 - Temperatura superficial pelo ENVI-met v 4.4.6 das paredes da edificação na localização A1 e A2 no dia 22/11/2021



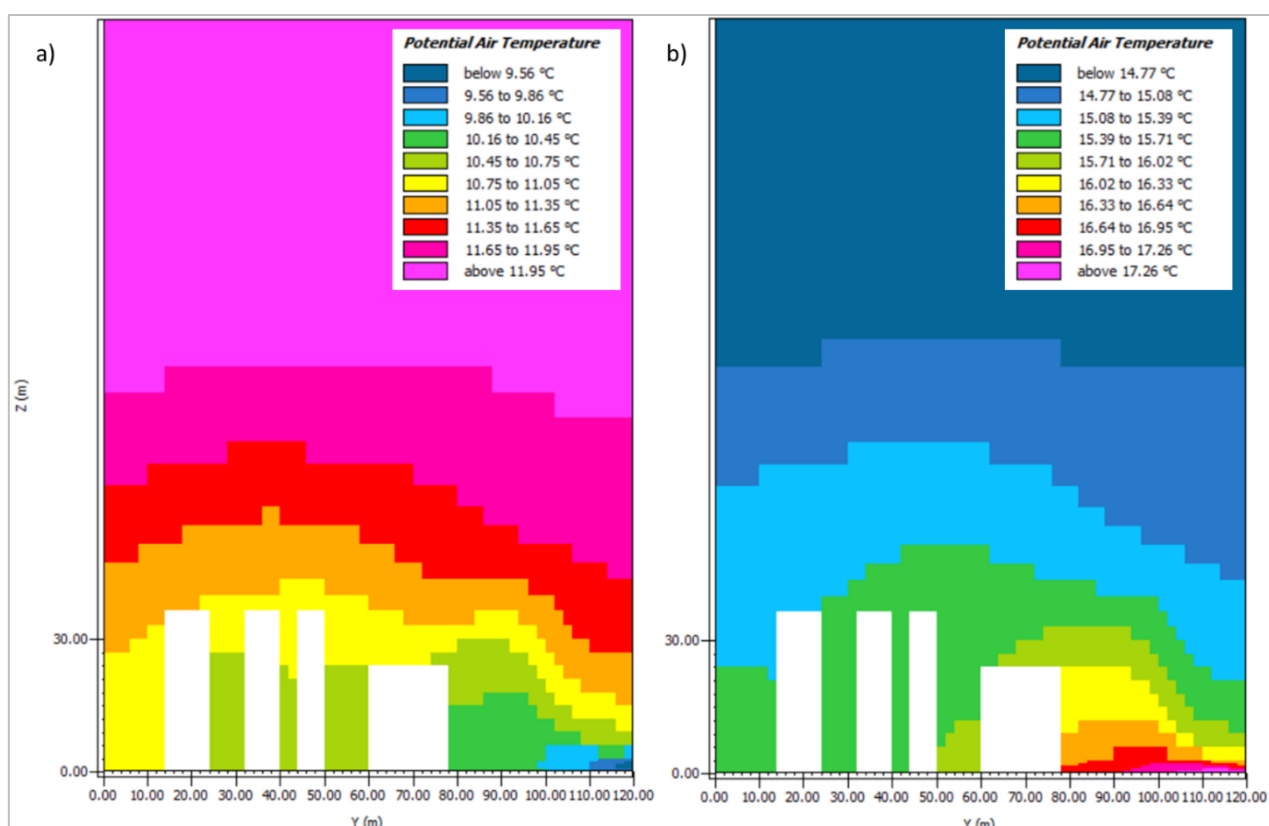
Fonte: autora.

O perfil vertical de temperatura do ar de um espaço está relacionado com a estabilidade térmica do mesmo. Há estabilidade térmica quando a temperatura aumenta juntamente com a altura. Durante a noite, a troca de radiação de onda longa do solo com o céu resfria o solo, que resfria o ar próximo a ele. O ar resfriado tende a ficar no solo, a atmosfera está estável. Durante

o dia, as superfícies e o solo são aquecidos, aquecendo o ar próximo a elas. O ar quente é mais leve (menos denso) e tende a subir com turbulência, gerando instabilidade térmica (HEISLER; BRAZEL, 2015).

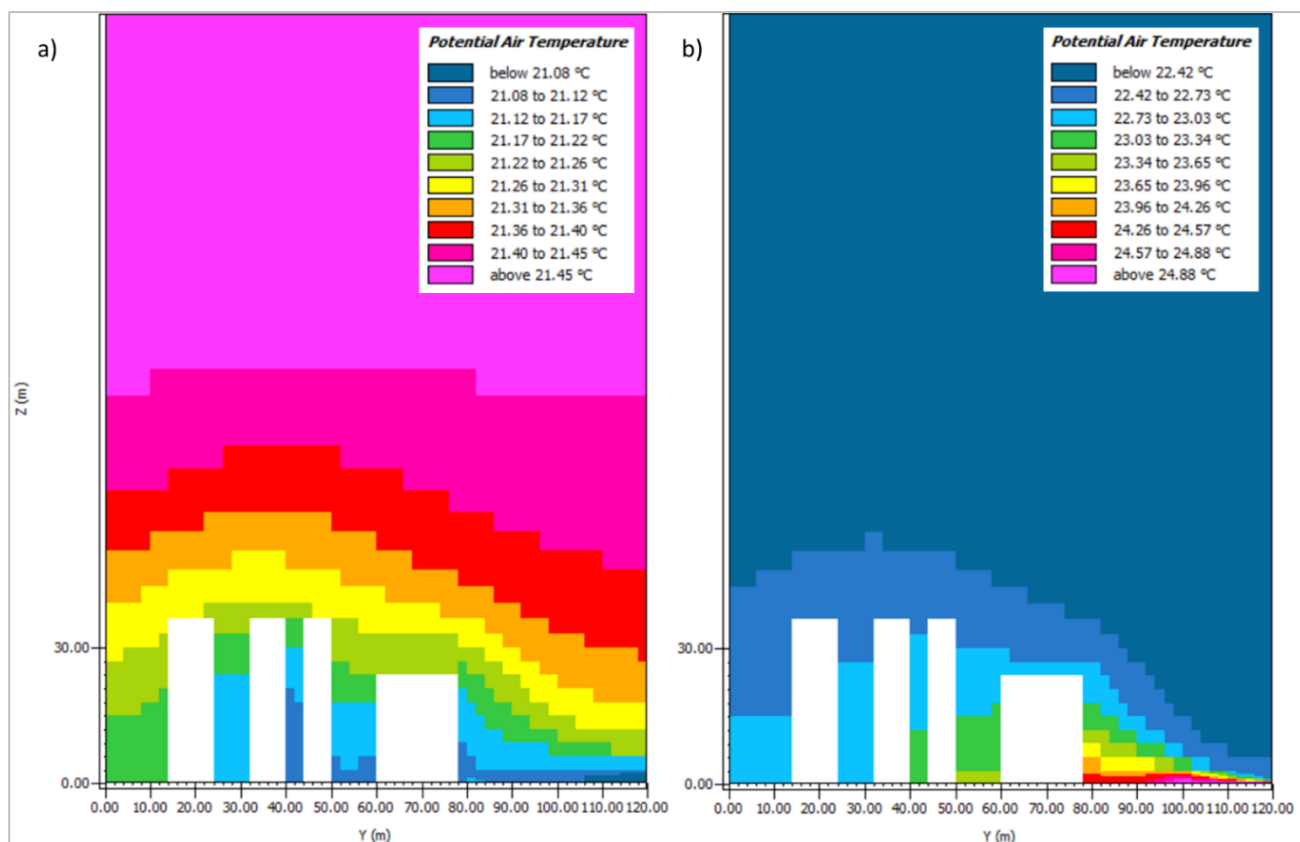
As Figura 54 e Figura 55 mostram a temperatura do ar simulada no plano y-z nas simulações de inverno e primavera, respectivamente. Em dois horários, 4h e 16h, para mostrar o perfil vertical durante a noite e o dia. Observa-se, nos dois períodos, um perfil de estabilidade térmica a noite e de instabilidade durante o dia, conforme as definições de Heisler e Brazel (2015). Oke *et al.* (2017) acrescenta que os perfis noturnos seriam mais próximos da neutralidade atmosférica, pois a geometria e os materiais construtivos reduzem a capacidade de resfriamento no espaço urbano. A neutralidade atmosférica acontece quando o ar está bastante misturado. Isto ocorre quando não há grandes trocas de calor, em dias e noites nubladas, por exemplo. Mas, os autores reconhecem que estas constatações são mais especulativas do que fatos estabelecidos (OKE *et al.*, 2017d).

Figura 54 - Perfil vertical da temperatura do ar simulada no ENVI-met v.4.4.6 no plano y/z, corte em $x = 97$ m, no dia 30/06/2021 às a) 4h e b) 16h



Fonte: autora.

Figura 55 - Perfil vertical da temperatura do ar simulada no ENVI-met v.4.4.6 no plano y/z, corte em $x = 97$ m, no dia 22/11/2021 às a) 4h e b) 16h



Fonte: autora.

O modelo tridimensional do ENVI-met trata-se de uma aproximação, conforme a definição das dimensões da grade e as simplificações para ajustar o modelo. A localização dos receptores marcados nas áreas modeladas é também aproximada. Neste trabalho, os receptores representam as condições atmosféricas no ponto central da célula, a uma distância de 1 metro da parede da edificação. Pelas simplificações do modelo, não há proteções horizontais sobre os receptores, que atuam como dispositivos de sombreamento e afetam o fluxo do ar nesses pontos. Por fim, na construção do modelo não se configurou o calor antropogênico e a poluição gerada na área A. Todos estes fatores são limitações que podem ter afetado as medições em campo e não foram consideradas no modelo ENVI-met.

A validação dos resultados do ENVI-met na literatura científica é frequentemente realizada no nível do pedestre. A própria estrutura do programa indica este foco, sendo o modo forçado do modelo baseado na imposição das variáveis meteorológicas a uma altura de 2 metros em relação ao solo. Entretanto, não há orientação explícita por parte do programa ENVI-met de que o foco das simulações tridimensionais esteja restrito aos pontos próximos do solo.

Além disso, o modelo tridimensional é discretizado no primeiro plano x-y de células, enquanto o nível de detalhamento diminui à medida em que a altura (z) aumenta. Crank *et al.* (2018) alertaram que o bom desempenho do modelo ENVI-met poderia estar limitado às amostras de temperaturas próximas a superfície, sem necessariamente representar os processos de transferência de calor e mistura vertical no modelo. A comparação entre os resultados das simulações e as medições em campo deste trabalho sugere que o modelo ENVI-met não representa adequadamente o perfil vertical de temperatura no espaço urbano. Não foram encontrados estudos que validassem o perfil vertical das variáveis microclimáticas das simulações do programa ENVI-met.

4.5 CENÁRIOS PARAMÉTRICOS

Os resultados das simulações dos cenários paramétricos definidos em 3.3.4 segundo a refletância solar das fachadas, coberturas e pavimentação são apresentados e discutidos nesta seção. A análise das simulações do modelo ENVI-met nos dias representativos do inverno e da primavera foi baseada nas simulações dos 12 cenários paramétricos das áreas A e B, totalizando 24 simulações em cada estação do ano. Na estação de inverno, as simulações são baseadas no modelo validado do dia 30 de junho de 2021. Na primavera, o modelo validado foi referente ao dia 22 de novembro de 2021.

O efeito da refletância das superfícies do espaço urbano no microclima local é avaliado em relação à temperatura do ar nos seis pontos locados em diferentes cânions urbanos das áreas de interesse a uma altura de 1,5 metros em relação ao solo. A análise dos cenários paramétricos foi realizada separadamente conforme a estação, e compreendem a (i) diferenciação entre os grupos de refletância solar, (ii) a distribuição de temperatura do ar nas áreas A e B e (iii) a radiação solar e térmica em um cânion urbana de cada área. Para as duas últimas análises, foram selecionados os cenários 2 e 11, que representam a combinação de superfícies com maior e menor refletância solar, respectivamente.

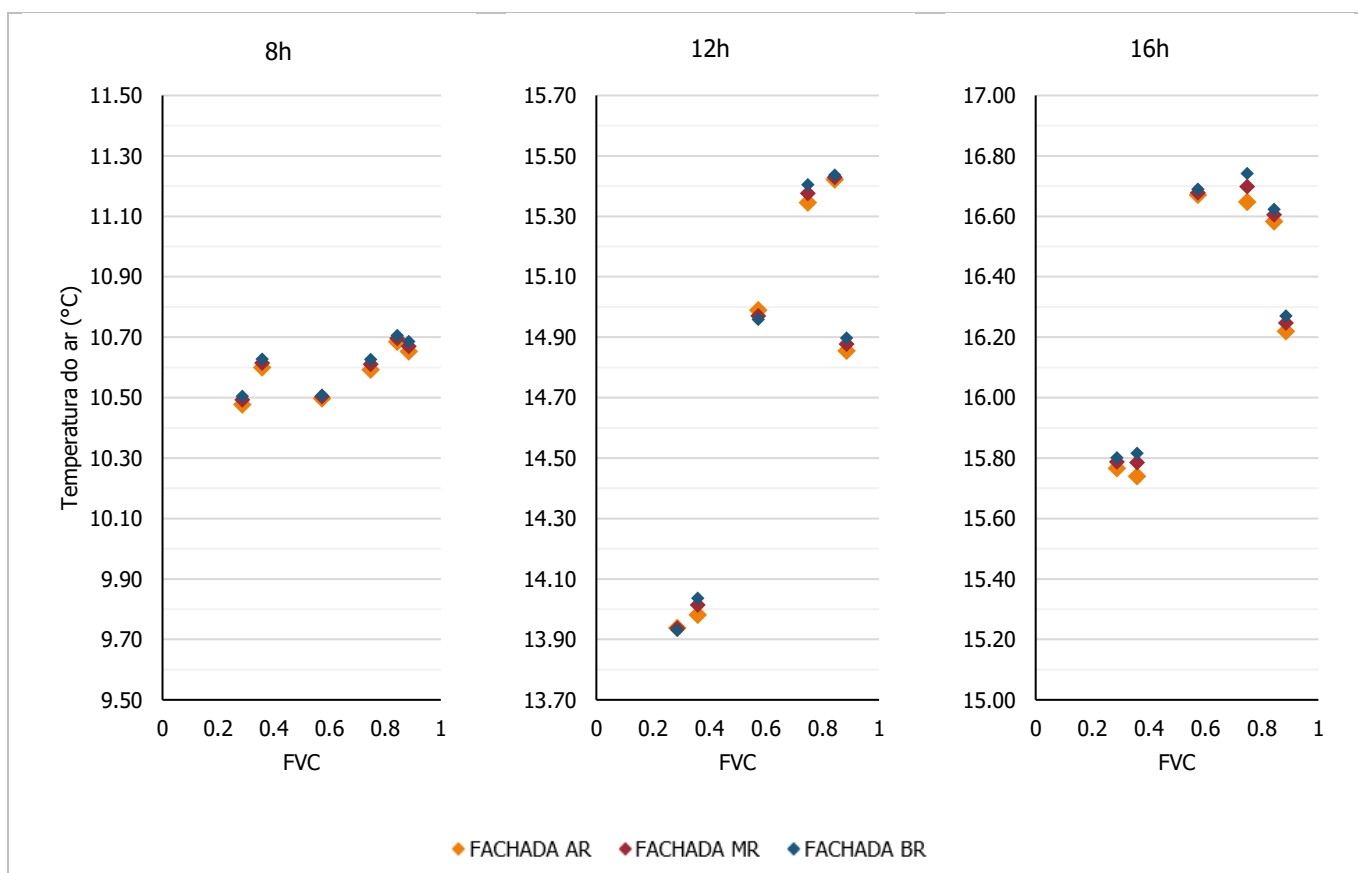
A seleção de um cânion urbano em cada uma das áreas simuladas (A e B) se deu com o objetivo de avaliar a incidência de radiação solar e a temperatura superficial nas paredes e na pavimentação em diferentes geometrias. Ressalta-se que os cânions possuem a mesma orientação, portanto a variação da incidência de radiação solar entre cânions deve-se somente à morfologia urbana e a refletância solar dos materiais que a compõe.

4.5.1 Inverno

4.5.1.1 Diferença entre os grupos de refletância solar

A Figura 56 apresenta as médias da temperatura do ar conforme o agrupamento pela refletância da fachada e o fator de visão do céu (FVC) de cada ponto nas simulações referentes ao período de inverno. Nota-se, nos três horários, que as fachadas de baixa refletância estão relacionadas com as temperaturas do ar mais altas. Este comportamento só não acontece com o ponto R3 (FVC=0,57) às 12h. De maneira geral, as diferenças entre as temperaturas do ar médias de cada grupo de fachada, observadas graficamente na Figura 56, não são expressivas. A diferença máxima entre temperaturas médias foi de 0,09 °C entre os cenários de alta e baixa refletância solar do ponto R4 (FVC=0,75) às 16h.

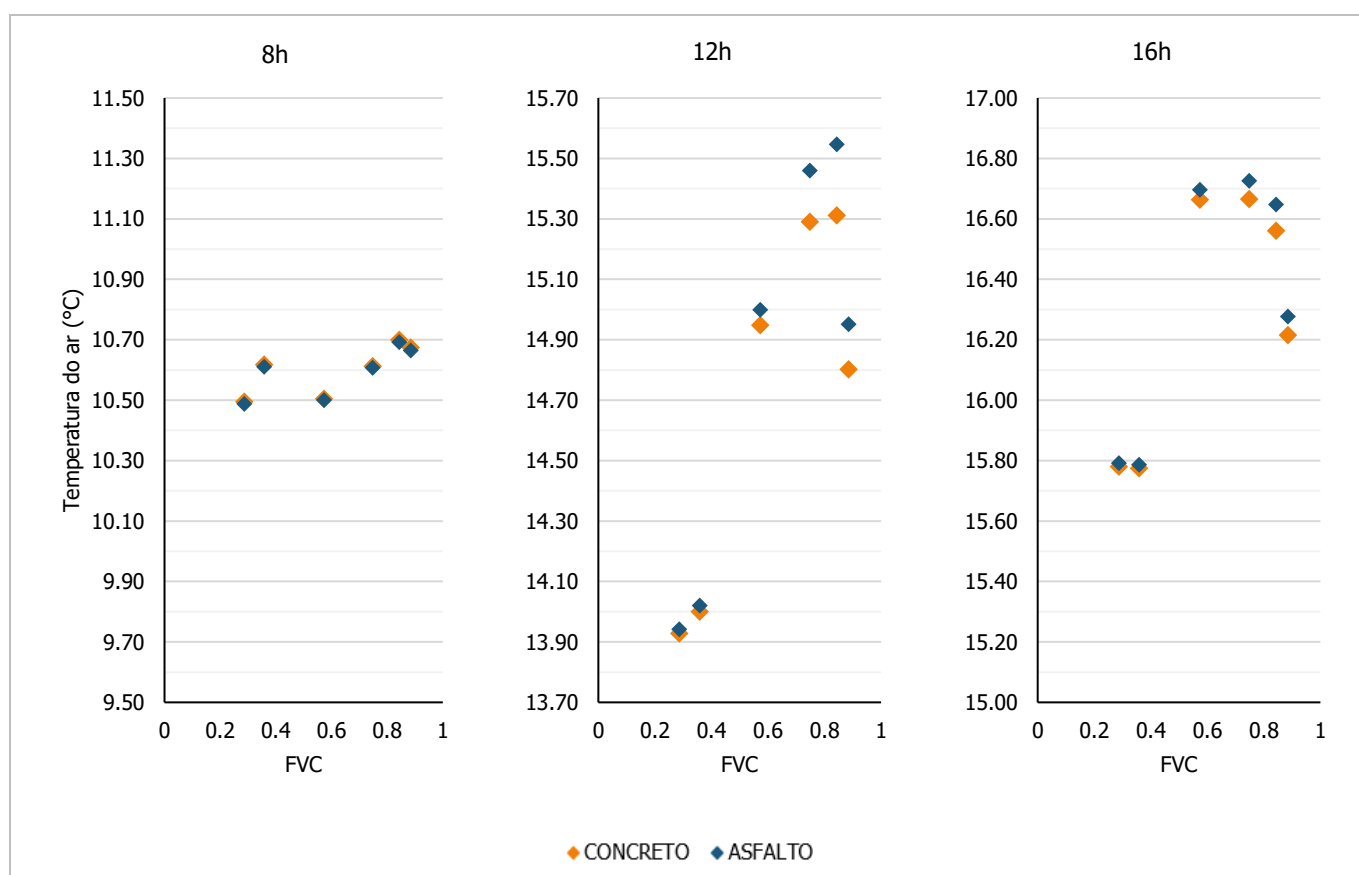
Figura 56 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da fachada: alta refletância (AR), média refletância (MR) e baixa refletância (BR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 30/06/2021



Fonte: autora.

A Figura 57 apresenta graficamente as médias das temperaturas do ar dos cenários com pavimentação de concreto e asfalto segundo o fator de visão do céu de cada ponto. Observa-se que às 8h a pavimentação de asfalto mostra temperaturas médias mais baixas do que a pavimentação de concreto. Nos demais horários (12h e 16h) a tendência se inverte, com os cenários com pavimentação de asfalto apresentando as maiores temperaturas médias.

Figura 57 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da pavimentação das ruas: concreto e asfalto às 8h, 12h e 16h do dia 30/06/2021



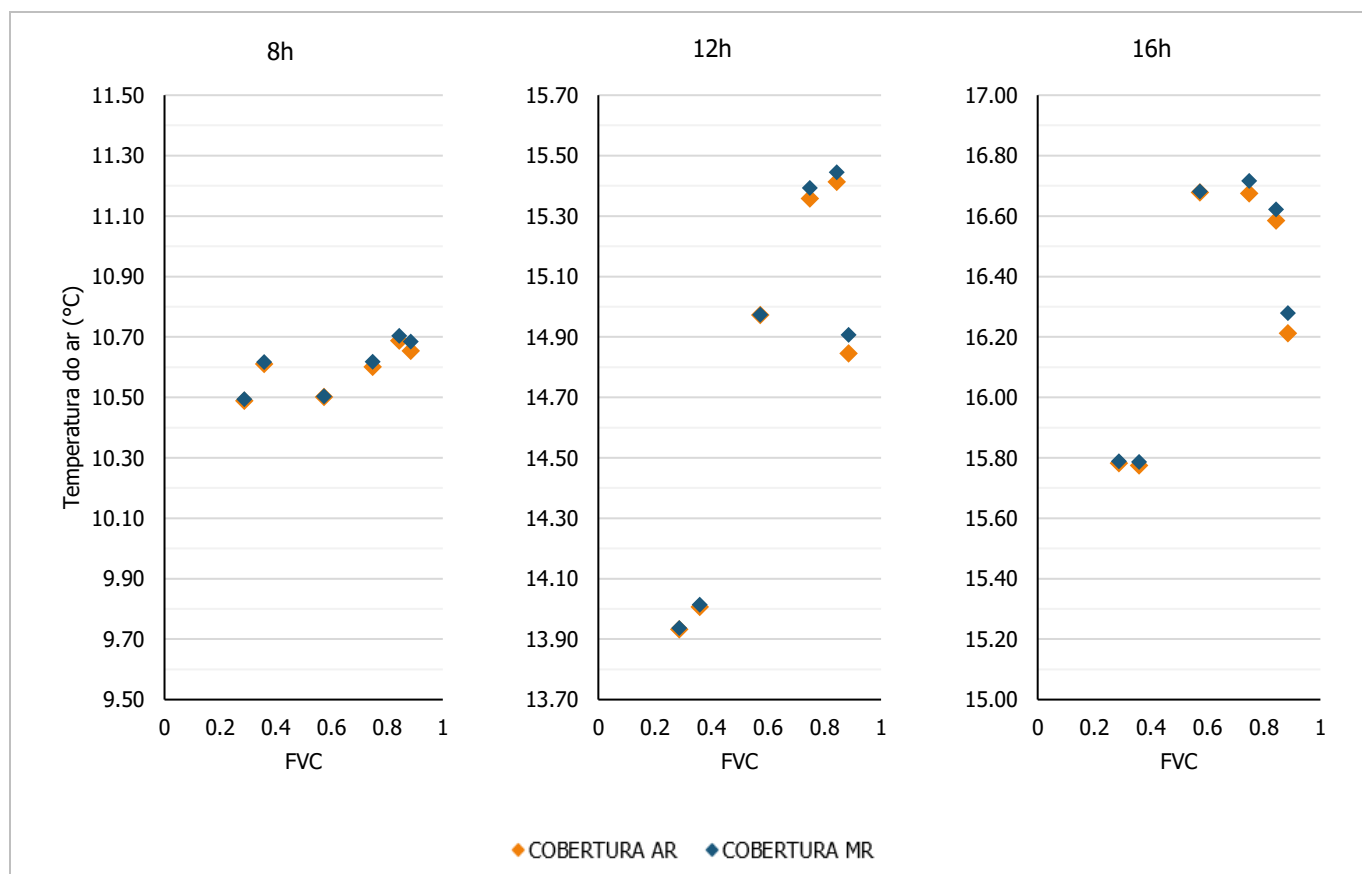
Fonte: autora.

Ainda na Figura 57, nota-se que os pontos da área B (R4, R5 e R6), que possuem os maiores fatores de visão do céu, apresentam maior variação entre as médias dos cenários com pavimentação de concreto e asfalto em comparação com os pontos da área A (R1, R2 e R3). Esta variação era esperada, uma vez que valores mais elevados de FVC podem ser associados a uma maior incidência solar nestes pontos.

A variação entre as temperaturas do ar médias nos pontos segundo o agrupamento pela refletância solar da cobertura é apresentada na Figura 58. Observa-se variações muito baixas, até nulas (médias iguais), entre as coberturas de alta ou média refletância solar nos pontos da

área A (R1, R2 e R3). Este comportamento também foi observado em outros estudos (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016) e é causado pela distância entre as coberturas das edificações e o nível da rua. Nos pontos R4, R5 e R6 (área B), distinguem-se as temperaturas médias entre os tipos de cobertura nos três horários avaliados, sendo a cobertura de média refletância solar associada às maiores temperaturas do ar.

Figura 58 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar das coberturas: alta refletância (AR) e média refletância (MR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 30/06/2021

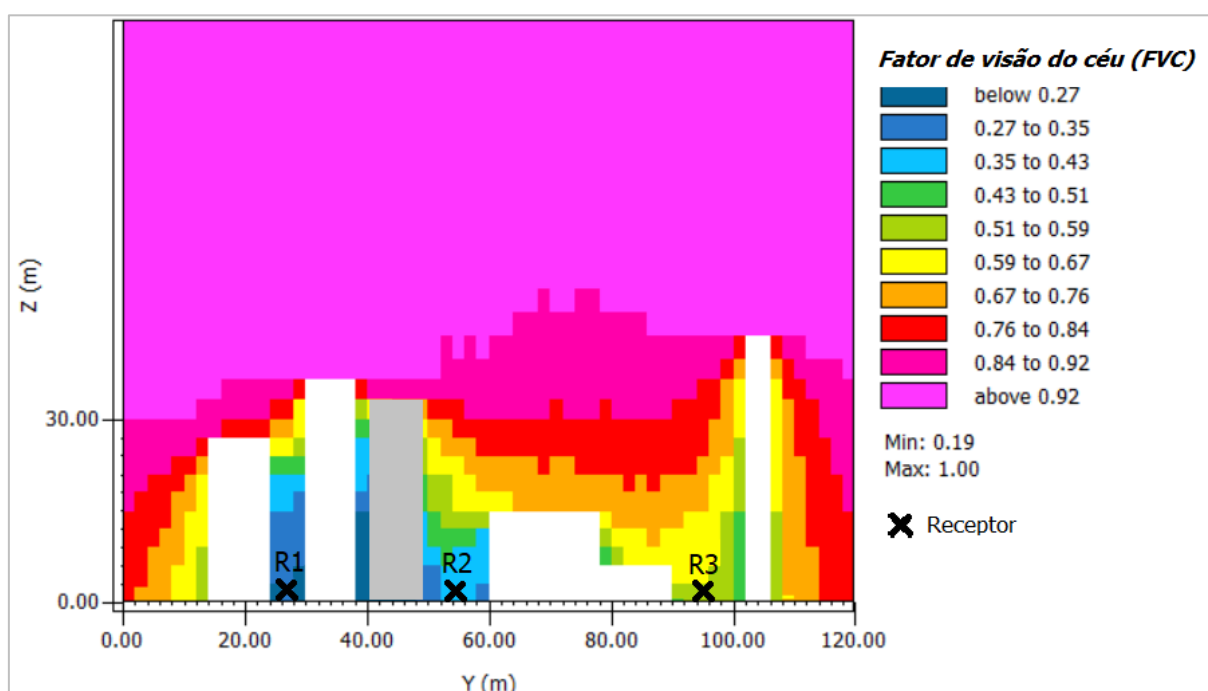


Fonte: autora.

A variação da temperatura do ar entre pontos é notável em todos os agrupamentos das superfícies (Figura 56, Figura 57 e Figura 58). Entretanto, não se observa uma relação evidente entre o fator de visão do céu e a temperatura. Ressalta-se que a orientação do cânion em que se locou cada ponto é a mesma, exceto para o ponto R6, na Quarta avenida. Isto indica que o fator de visão do céu não é suficiente para definir o microclima urbano de uma área.

A diferença entre os pontos R1 e R2, por exemplo, pode estar relacionada com a não uniformidade da altura das edificações do cânion urbano. A Figura 59 mostra a localização dos receptores R1, R2 e R3 no plano y-z. O ponto R2 está em um ponto em que a edificação de um lado tem 5 pavimentos e do outro lado possui 11 pavimentos. O ponto R1 está em um cânion urbano com edificações de 9 e 12 pavimentos, apresentando maior uniformidade.

Figura 59 - Corte em $x=75$ metros (plano y-z) dos fatores de visão do céu (FVC) pelo ENVI-met 4.4.6. com identificação dos receptores R1, R2 e R3 da área A



Fonte: autora.

Embora haja diferença entre as temperaturas do ar em diferentes níveis de refletância solar das superfícies, estes valores são pequenos. Com o objetivo de confirmar se as diferenças observadas graficamente são estatisticamente diferentes, realizou-se a análise de variância (ANOVA) de um fator. A Tabela 7 apresenta os valores de p calculados para cada agrupamento (fachada, pavimentação e cobertura) em horários espaçados em 4 horas do dia 30 de junho.

Na Tabela 7, observa-se que os valores de p mostram que existe diferenças relevantes entre a refletância solar das fachadas em todos os horários do ponto R2 ($FVC=0,36$), e no ponto R1 ($FVC=0,29$), exceto às 12h do último. Ressalta-se que este resultado apenas indica que há diferença estatística entre as médias de pelo menos dois grupos, sem indicar quais níveis são diferentes. No ponto R4 também é notável a diferença estatística entre os grupos de refletância solar das fachadas, com exceção do horário das 4h e às 12h. Os pontos R1 e R2 exibem os

menores FVC entre os pontos selecionados para esta análise, pois se localizam na região mais adensada da área A, com edificações de altura elevada e pouco espaçadas entre si. Esta configuração urbana garante maior visão das fachadas, justificando a maior influência da refletância solar destas superfícies nestes pontos.

Tabela 7 - Valor-p da temperatura do ar pelo modelo ENVI-met segundo o agrupamento por tipo de superfície (fachada, pavimentação e cobertura) no dia 30/06/2021

		receptor					
	horário	R1	R2	R3	R4	R5	R6
FACHADA	00:00	0,001	0,000	0,006	0,017	0,151	0,219
	04:00	0,009	0,002	0,083	0,103	0,371	0,324
	08:00	0,000	0,000	0,002	0,003	0,047	0,100
	12:00	0,508	0,000	0,380	0,712	0,989	0,819
	16:00	0,000	0,000	0,401	0,035	0,594	0,422
	20:00	0,000	0,000	0,000	0,001	0,018	0,169
PAVIMENTAÇÃO	00:00	0,181	0,291	0,056	0,140	0,021	0,323
	04:00	0,069	0,149	0,005	0,033	0,003	0,180
	08:00	0,328	0,291	0,152	0,577	0,344	0,471
	12:00	0,000	0,218	0,000	0,000	0,000	0,000
	16:00	0,244	0,563	0,000	0,055	0,000	0,034
	20:00	0,691	0,796	0,546	0,606	0,406	0,779
COBERTURA	00:00	0,539	0,544	0,790	0,145	0,114	0,003
	04:00	0,472	0,441	0,713	0,122	0,155	0,003
	08:00	0,534	0,431	0,527	0,085	0,023	0,006
	12:00	0,418	0,641	0,978	0,544	0,685	0,237
	16:00	0,537	0,585	0,834	0,208	0,232	0,017
	20:00	0,522	0,543	0,807	0,148	0,046	0,001

Fonte: autora.

Nota: Valores em negrito indicam valor-p < 0,05 (quando há diferença estatística).

A diferença estatística entre os grupos de pavimentação, por sua vez, foram mais frequentes no ponto R5 (FVC=0,84) (Tabela 7). Ainda, é evidente a significância da refletância solar da pavimentação nos outros pontos às 12h, momento em que apenas o ponto R2 (FVC=0,36) apresentou valor-p acima de 0,05. A relevância da pavimentação neste horário está relacionada com a altura solar em seu ápice, permitindo maior acesso à radiação solar no solo em todos os pontos.

Por fim, as diferenças entre as médias de temperatura dos grupos de cobertura com média ou alta refletância foram significativas apenas nos pontos R6 (FVC=0,89), exceto às 12h, e R5 (FVC=0,84), às 8h e 20h. Os demais pontos não exibiram diferença estatística entre as

médias dos grupos conforme a cobertura. Como discutido anteriormente, isto ocorreu devido a distância entre o nível de cobertura com o nível do pedestre em que as temperaturas do ar estão sendo avaliadas ($z=1,5\text{m}$).

Observa-se que a influência da refletância solar se estende ao período noturno (0h, 4h e 20h). A refletância solar das superfícies urbanas durante o dia determina a quantidade de radiação solar incidente que será absorvida pelo material ou refletida. As superfícies com baixa refletância solar absorvem mais radiação, ocasionando o aumento da temperatura superficial. Durante a noite, os materiais que mais absorveram calor durante o dia liberam o calor armazenado para o ambiente, mantendo a temperatura do ar mais alta em comparação aos cenários com materiais de alta refletância. Assim, o comportamento diurno, definido pela materialidade e pelo acesso solar de cada superfície, afeta o comportamento noturno por meio do calor armazenado pelas estruturas urbanas.

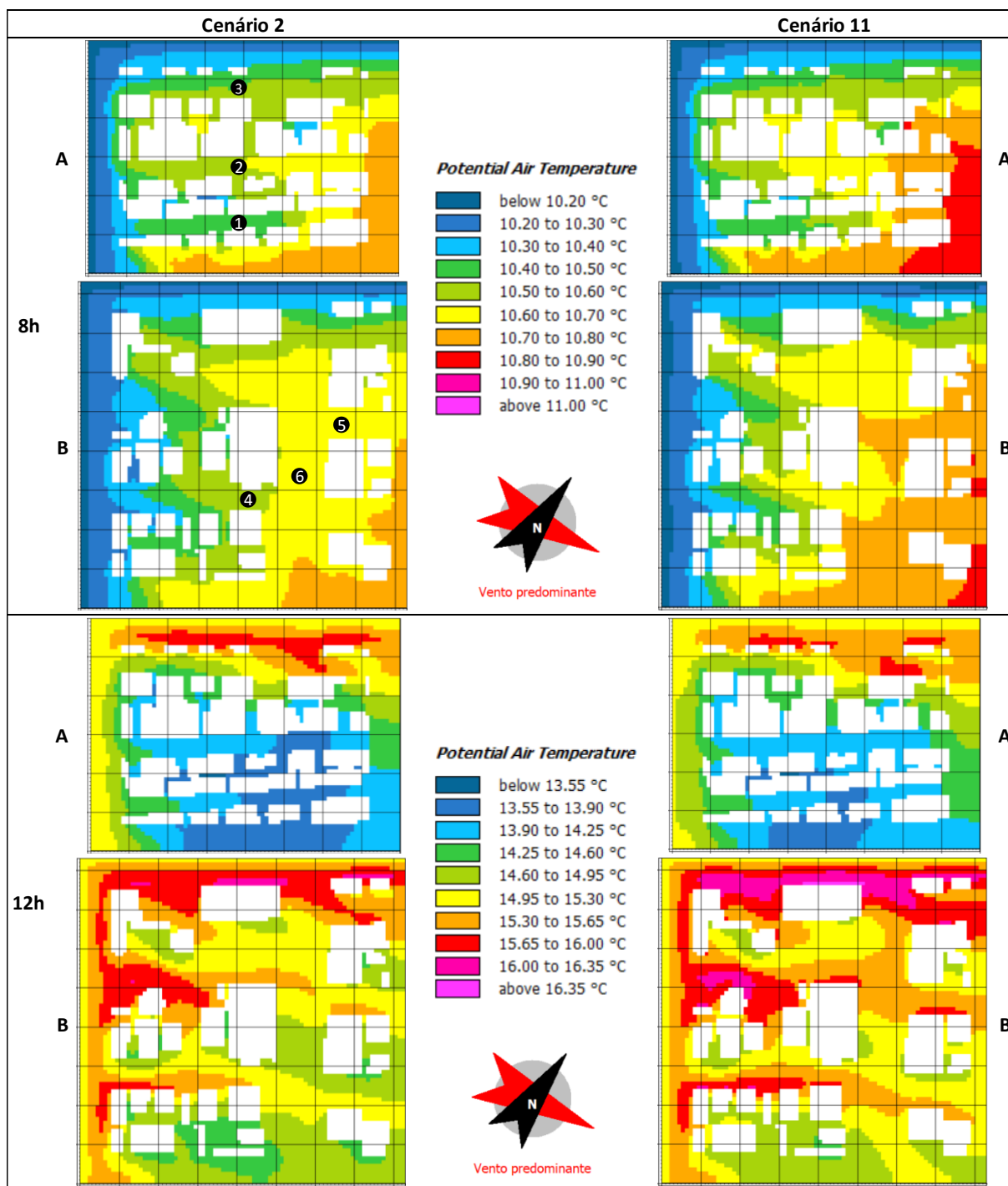
Ainda na Tabela 7, verifica-se que de maneira geral os pontos apresentam diferença significativa em pelo menos um dos grupos por horário. No ponto R1, por exemplo, o nível de refletância das fachadas apresentou diferença estatística durante todo o dia 30, exceto no horário das 12h, em que o nível de refletância solar da pavimentação foi predominante para diferenciar as temperaturas do ar. O mesmo ocorre nos demais pontos. Esta relação permite afirmar que existe influência da refletância das superfícies no microclima urbano, porém a influência de cada superfície depende do local e do horário. Neste trabalho, nota-se que os cânions urbanos mais profundos sofrem maior influência da refletância solar das fachadas, enquanto as áreas menos adensadas, da pavimentação.

4.5.1.2 Distribuição da temperatura do ar

A Figura 60 e a Figura 61 mostram a distribuição da temperatura do ar nas áreas A e B nos cenários extremos de refletância solar 2 e 11. O cenário 11 apresenta a menor combinação de refletâncias solar nas superfícies de fachada, cobertura e pavimentação. Enquanto o cenário 2 apresenta as maiores refletâncias solar nos três elementos simultaneamente.

Nota-se às 8h as temperaturas do ar são mais elevadas na direção leste, que corresponde a parte inferior direita da imagem (Figura 60). Em ambas as áreas (A e B), o cenário 2 apresentou temperaturas mais baixas do que o cenário 11. Entretanto, neste horário, a variação de temperatura não é intensa, com máxima menor que $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 60 - Distribuição da temperatura do ar ($z = 1,5\text{m}$) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 8h e 12h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021

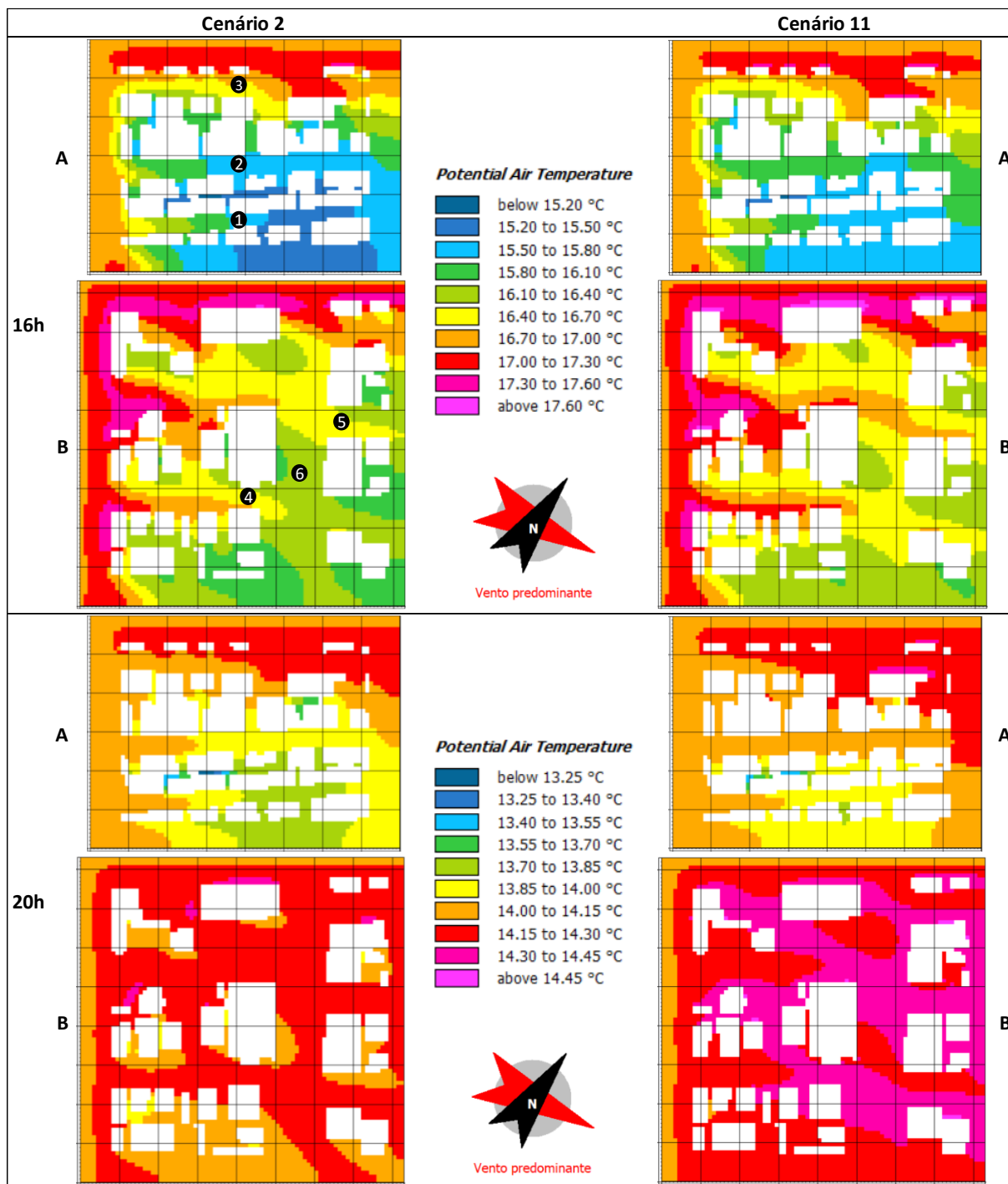


Fonte: autora.

Às 12h, os locais com maior temperatura se localizam na região superior do modelo. Observa-se que a área A apresenta temperaturas mais baixas nos cânions mais profundos, em que estão localizados R1 e R2, representadas em azul na Figura 60. Também às 12h, a variação na distribuição de temperaturas do ar nos cenários 2 e 11 são mais significativas., até 3 °C. O

cenário 11 mostra temperaturas do ar mais elevadas, principalmente na área B, onde as temperaturas acima de 14,60 °C são predominantes.

Figura 61 - Distribuição da temperatura do ar ($z = 1,5\text{m}$) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 16h e 20h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021

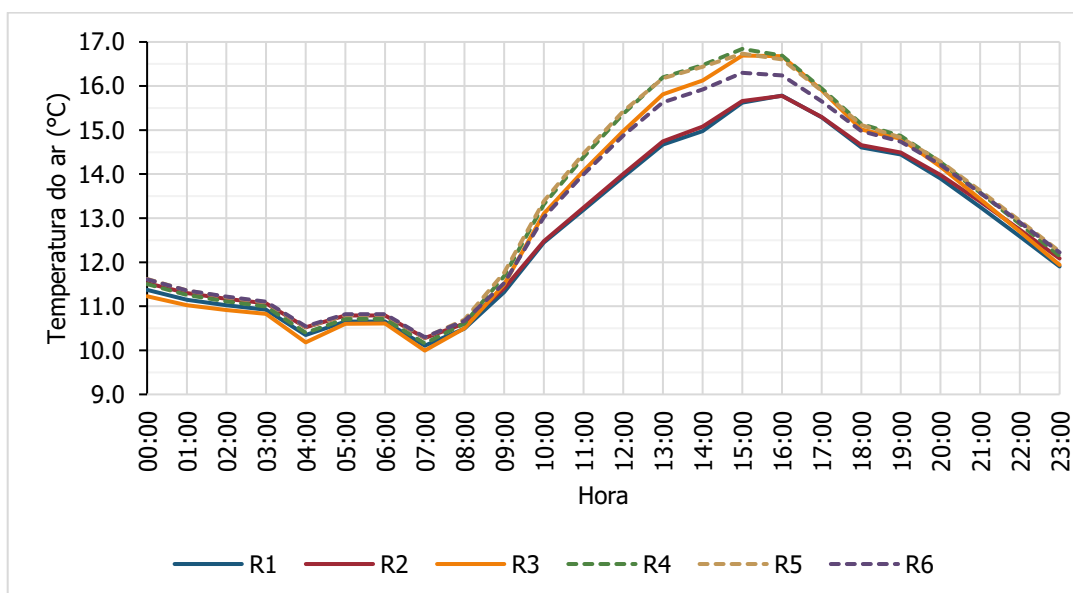


Fonte: autora.

Na Figura 61, no horário das 16h, verifica-se que as temperaturas mais elevadas se deslocam à esquerda, direção oeste, devido ao posicionamento do sol. O cenário 11 continua exibindo temperaturas mais elevadas. A variação máxima de temperatura entre as áreas A e B e os diferentes cenários é de aproximadamente 2,5 °C. Às 20h, nota-se temperaturas do ar mais uniformes na área B. Os cânions urbanos da área A continuam com temperaturas mais frias do que a área B durante as primeiras horas após o pôr do sol. Em relação aos cenários 2 e 11, o cenário 11 (baixa refletância solar) manteve-se com temperaturas mais elevadas, embora a variação de temperatura seja pequena, na escala de 0,15 °C.

Com o objetivo de avaliar a diferença de temperatura entre cada ponto receptor (definidos em 3.4), segundo a geometria do entorno, plotou-se os perfis médios de temperatura do ar na Figura 62. Observa-se que os pontos R4 e R5 apresentam as maiores temperaturas do ar durante todo o dia 30 de novembro. O ponto R3, localizado em um cânion irregular e com maior FVC na área A, exibe temperatura máxima próxima aos dos pontos R4 e R5, e menor temperatura mínima noturna. Este comportamento é consequente da proximidade do ponto com a borda do modelo, em que não há representação realista das edificações que compõem o entorno de R3.

Figura 62 - Temperatura média do ar ($z=1,5\text{m}$) dos cenários paramétricos nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) - simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021



Fonte: autora.

Ainda na Figura 62, verifica-se que os pontos nos cânions mais profundos, R1 e R2, apresentam menor amplitude térmica que os demais. Isto é, temperatura do ar máxima mais

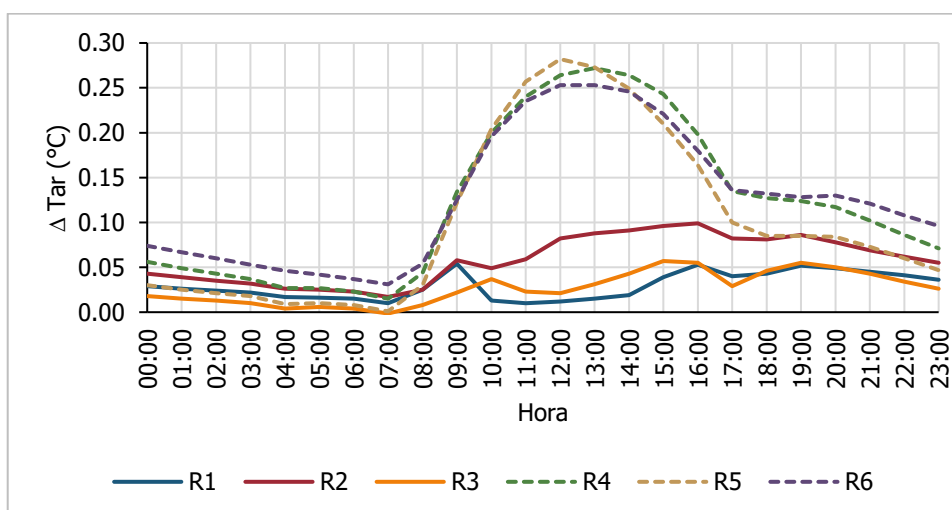
baixa e temperatura mínima mais elevada em relação aos demais. Ao mesmo tempo em que o baixo FVC está associado ao maior sombreamento da área durante o dia, está associado a uma menor troca de calor por ondas longas durante a noite. As medições em campo mostraram perfil semelhante, com maior variação entre as temperaturas noturnas da área A e da área B.

De maneira geral, a diferença entre as temperaturas do ar dos diferentes cenários paramétricos não foi muito significativa no dia de inverno simulado. A Figura 63 mostra a diferença entre a temperatura do ar dos cenários 11 e 2, nos seis pontos. Verifica-se que a variação se mantém positiva durante todo o dia 30/06, indicando que o cenário de menor refletância (cenário 11) apresenta temperaturas mais elevadas que o cenário 2 em todo o período.

Ainda na Figura 63, observa-se que a diferença de temperatura entre cenários é baixa, com máxima de 0,28 °C às 12h no ponto R5. As maiores variações são verificadas durante o dia nos pontos R4, R5 e R6, na área B, com pico juntamente com a curva de radiação solar (Figura 40). Nos pontos da área A (R1, R2 e R3) as refletâncias dos elementos construtivos têm menor influência na temperatura do ar. Na área A, mais adensada vertical e horizontalmente, a diferença entre os cenários 11 e 2 atingem o máximo de 0,1 °C às 16h no ponto R2.

Figura 63 - Variação da temperatura do ar entre os cenários 11 e 2 pelo modelo ENVI-met nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) a uma altura de 1,5 metros em relação ao solo no dia

30/06/2021

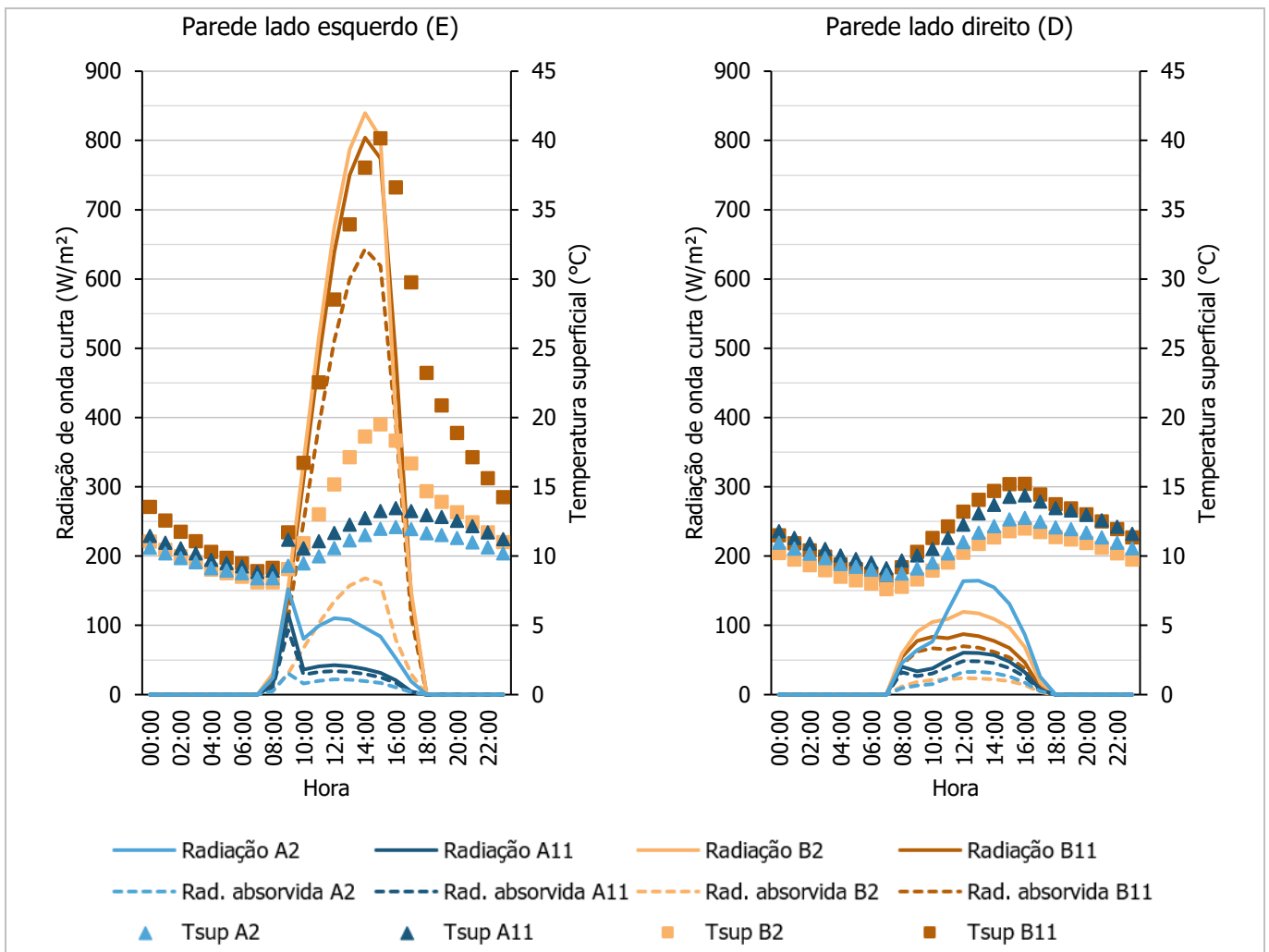


Fonte: autora.

4.5.1.3 Radiação solar e térmica

Ainda comparando os cenários 11 e 2, a radiação de onda curta e a temperatura superficial nas paredes dos cânions urbanos A e B, definidos em 3.4, são apresentadas na Figura 64. Nota-se que, devido à orientação nordeste-sudoeste dos cânions, as paredes do lado esquerdo (E), que estão voltadas para a direção noroeste, recebem mais radiação de ondas curtas do que as do lado direito (D). Verifica-se que a radiação de onda curta incidente é maior nas paredes do cenário paramétrico 2, com superfícies de elevada refletância solar, quando se compara com o mesmo cânion no cenário 11. Apesar dessa maior incidência, a baixa absorptância das paredes do cenário 2 minimiza o efeito da radiação sobre as temperaturas superficiais.

Figura 64 - Temperatura superficial e radiação de onda curta incidente e absorvida pela superfície das paredes do lado esquerdo (E) e do lado direito (D) dos cânions A e B nos cenários 2 e 11 - dia 30/06/2021 pelo ENVI-met v.4.4.6

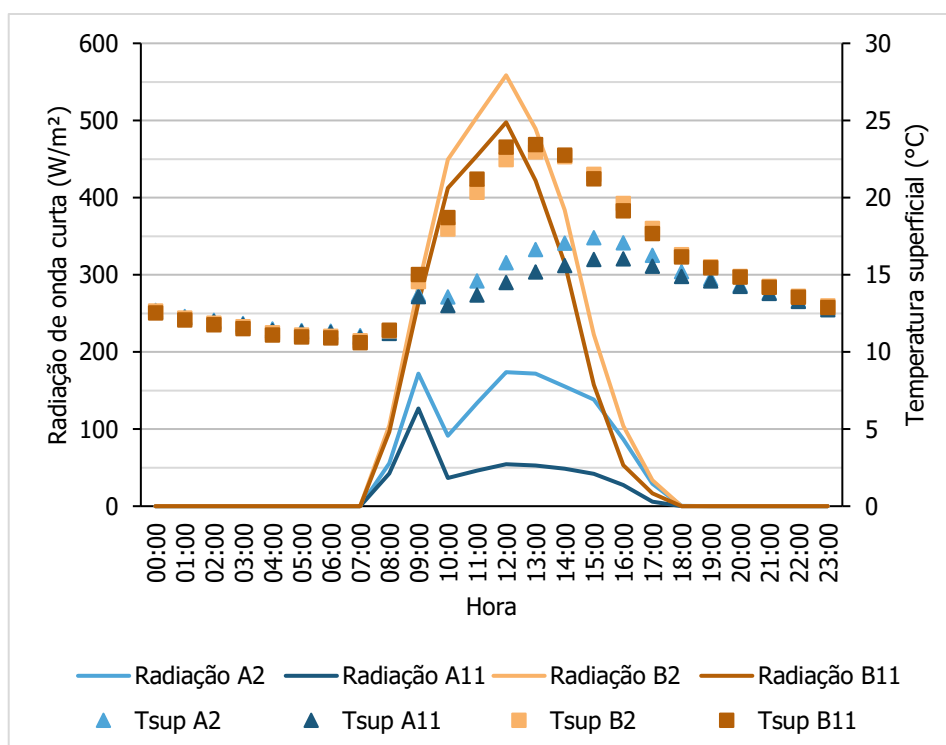


Fonte: autora.

A Figura 65 mostra a radiação de onda curta incidente e a temperatura superficial do solo dos cânions A e B. Os valores apresentados no gráfico são referentes à média das células em toda a largura da rua. No cânion A, a média foi calculada segundo as medidas de 5 células entre as edificações do lado esquerdo e direito do cânion (definidos na Figura 28). No cânion B, 8 células compõe a rua do cânion (Figura 29).

Assim como as paredes do cânion, verifica-se maior incidência de radiação de onda curta na rua do cânion B do que no A (Figura 65). Em relação aos cenários 2 e 11, nota-se que a radiação incidente no cenário paramétrico 2, com maior refletância solar das superfícies, apresentou valores mais elevados do que os registrados no cenário paramétrico 11. Ainda assim, no cânion B, a temperatura superficial do cenário 11 (B11) foi superior ao do cenário 2 (B2) entre 8h e 14h. Entretanto, as diferenças entre cenários foram baixas, com máxima de 0,84 °C. Ressalta-se que as pavimentações de concreto e asfalto possuem propriedades térmicas distintas além da refletância solar, como a capacidade térmica e a condutividade térmica.

Figura 65 - Temperatura superficial média e radiação de onda curta incidente média no solo dos cânions A e B nos cenários paramétricos 2 e 11 pelo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 30/06/2021



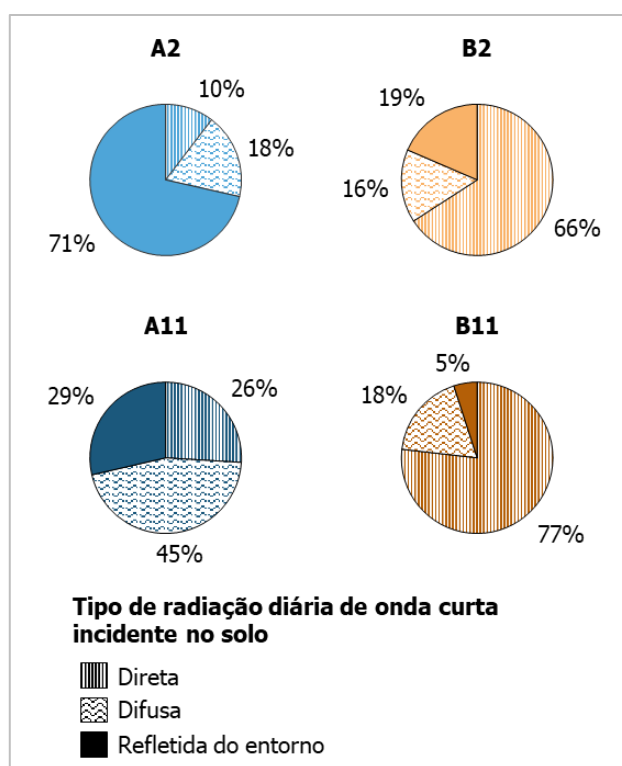
Fonte: autora.

No cânion A, a maior radiação solar incidente na pavimentação no cenário paramétrico 2 também influenciou a temperatura superficial deste cenário (Figura 65). A temperatura

superficial do cenário 2 foi mais elevada que a do cenário 11 em todos os horários do dia avaliado. A variação da temperatura superficial entre os cenários 2 e 11 atingiu valor máximo de 1,46 °C às 14h no cânion urbano A. A geometria do cânion A associada às superfícies com maior refletância solar revela a influência deste parâmetro em uma área com elevada densidade horizontal e vertical.

A radiação de onda curta incidente na pavimentação dos cânions é dividida em três tipos pelo modelo ENVI-met: direta, difusa e refletida do entorno. Em um mesmo cânion, a radiação de onda curta direta e difusa são iguais, pois dependem somente da geometria urbana. A radiação de onda curta refletida do entorno incidente, por sua vez, depende da geometria e da refletância solar das superfícies do entorno. Com base na radiação de onda curta total diária incidente sobre a pavimentação do cânion, calculou-se o quanto cada tipo de radiação representa em relação ao total. A Figura 66 apresenta estes resultados segundo as simulações do dia representativo de inverno.

Figura 66 - Porcentagem do tipo de radiação diária de onda curta incidente na pavimentação dos cenários 2 e 11 nos cânions urbanos A e B segundo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 30/06/2021



Fonte: autora.

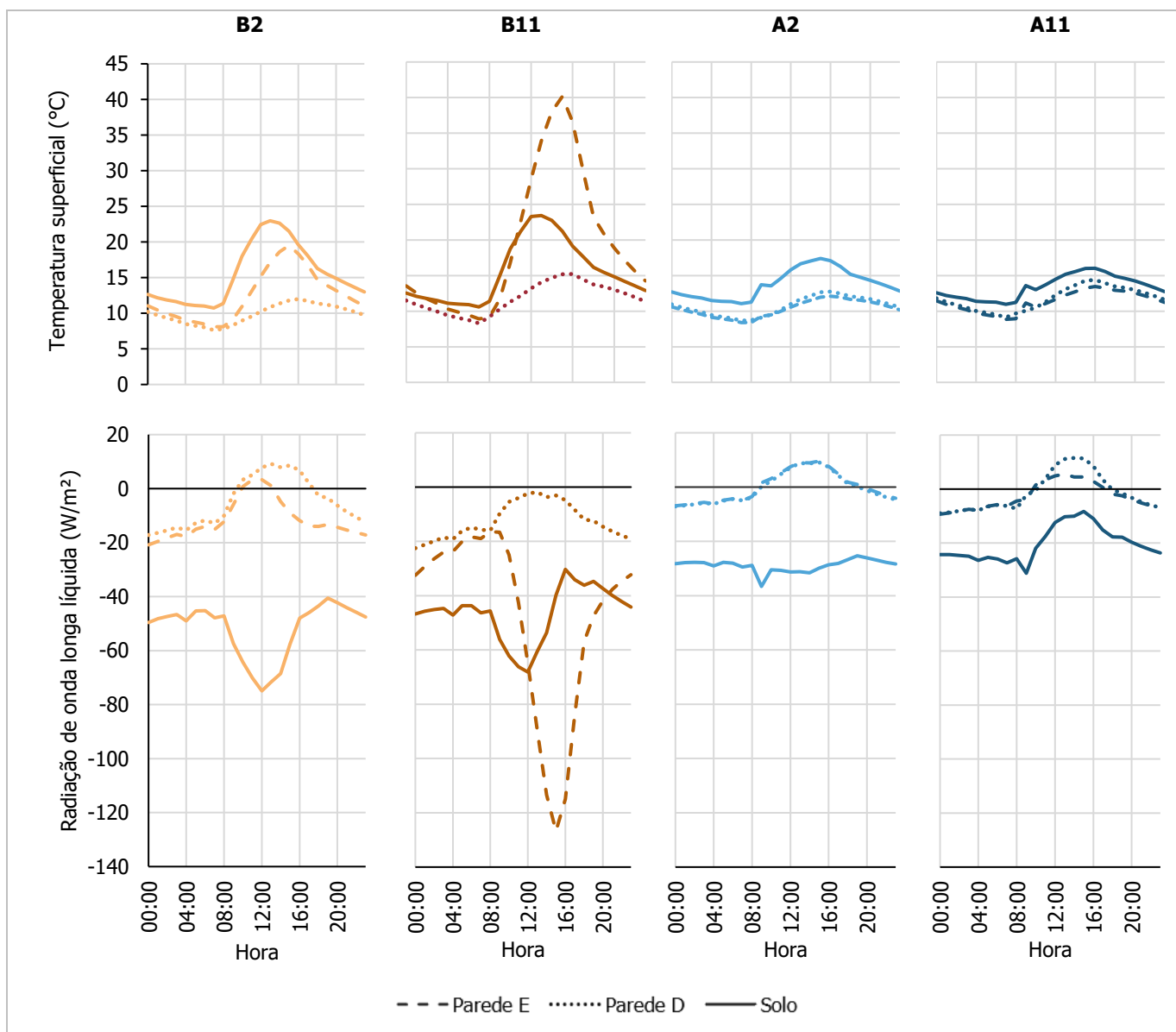
Verifica-se, no cânion A, que o cenário paramétrico 2 (A2) tem 71% de toda radiação de onda curta incidente na pavimentação proveniente da reflexão do entorno (Figura 66). Neste cenário, a radiação solar direta representa apenas 10% do valor total diário de radiação na pavimentação. Ainda no cânion A, o cenário 11 apresenta maior incidência de radiação solar difusa sobre a pavimentação, representando 45% do total. Os demais tipos, direta e refletida no entorno, contribuíram com 26% e 29% do total, respectivamente.

No cânion urbano B, a incidência de radiação de onda curta refletida do entorno corresponde a 19% da radiação total de onda curta incidente no cenário 2 e por 5% no cenário 11 (Figura 66). Este aumento de porcentagem de um cenário para o outro está diretamente relacionado com as refletâncias solar das superfícies urbanas. A refletância solar do entorno altera a quantidade de radiação de onda curta total incidente sobre o espaço urbano. Ao mesmo tempo em que locais mais adensados e com edificações elevadas contribuem com o aumento das áreas sombreadas, também aumentam a quantidade de superfícies e a interação entre as mesmas.

Como observado, a refletância solar das superfícies da área urbana tem influência direta na intensidade de radiação de onda curta incidente em cada cânion. Uma vez que a incidência de radiação em uma superfície afeta a sua temperatura superficial, o balanço de radiação de onda longa também é alterado. A Figura 67 mostra graficamente as temperaturas superficiais e o balanço de radiação térmica nas paredes e no solo dos cânions urbanos A e B em um dia representativo de inverno. A radiação de onda longa em uma determinada superfície depende dos fatores de visão que a mesma possui do entorno e das respectivas temperaturas superficiais.

Na configuração de um cânion, a variação das temperaturas entre superfícies explica o sentido da radiação térmica, que apresenta valor positivo quando entra na superfície e negativo quando é emitida por ela. No cânion B, nota-se temperaturas superficiais mais elevadas em comparação às do cânion A (Figura 67). Sendo a temperatura superficial uma variável crítica para determinar as trocas de radiação de onda longa (EVINS; DORER; CARMELIET, 2014), verifica-se que a radiação térmica líquida é maior, em módulo, quando a temperatura superficial é mais elevada.

Figura 67 - Temperatura superficial e radiação de onda longa líquida das paredes e solo dos cânions urbanos A e B nos cenários 2 e 11 (simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 30/06/2021)



Fonte: autora.

A temperatura das pavimentações supera as das paredes, exceto no cenário 11 no cânion B, em que a parede esquerda apresenta temperaturas superficiais até 40,15 °C, enquanto a pavimentação de asfalto atinge o máximo de 23,44 °C (Figura 67). O balanço de radiação de onda longa com resultado negativo indica que a superfície está perdendo calor por este tipo de radiação. Nota-se que nas quatro situações avaliadas, a radiação de onda longa das pavimentações permaneceu negativa durante todo o dia, com picos de perda de calor simultâneos aos picos de temperatura superficial.

Quanto ao balanço de radiação térmica das paredes, verifica-se picos positivos durante o dia, entre 10h e 18h (Figura 67). Nas situações B2, A2 e A11, o valor positivo destes picos indicam o ganho de calor por radiação térmica nestes momentos do dia, embora em baixa intensidade. No cenário de baixa refletância (cenário 11) no cânion B, a parede direita exibe comportamento semelhante às demais situações, ainda que não seja observado um saldo positivo, há um pico de radiação de onda longa em $-1,87 \text{ W/m}^2$. A parede esquerda da situação B11 (cânion B – cenário 11) é superaquecida durante o dia (Figura 64), neste momento, a radiação de onda longa líquida desta parede acompanha, com sinal negativo, o pico de temperatura superficial. A radiação térmica líquida pode ser entendida como mecanismo de manutenção da elevação da temperatura, devolvendo-a ao ambiente e ao entorno, caso estes apresentem temperaturas mais baixas.

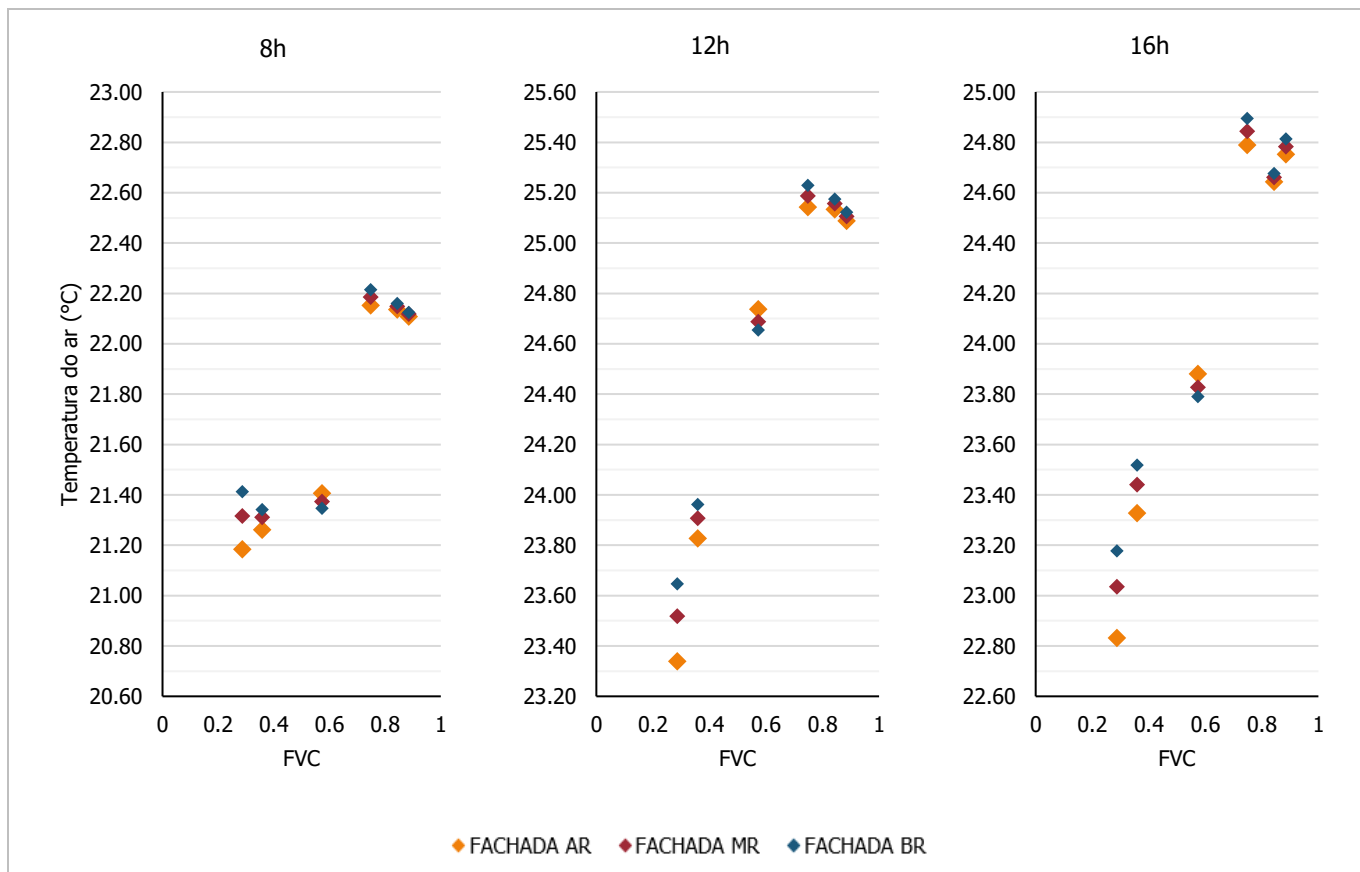
De maneira geral, verifica-se que as trocas de radiação de onda longa são mais intensas no cânion B em comparação ao cânion A (Figura 67). Isto ocorre em ambos os cenários (cenários 2 e 11) e se deve principalmente à geometria dos cânions. Durante o dia, o maior acesso solar no cânion B garante maior incidência de radiação de onda curta. Enquanto no período noturno, o maior fator de visão do céu assegura o aumento da transferência de calor por radiação de onda longa das superfícies do cânion B com o céu. Estas relações podem ser observadas também nas temperaturas superficiais do cânion urbano B, que apresentam valores próximos às do cânion A durante a noite (entre 20h e 6h).

4.5.2 Primavera

4.5.2.1 *Diferença entre os grupos de refletância solar*

No segundo período analisado, na estação da primavera, as simulações foram realizadas com base no dia 22 de novembro de 2021. As temperaturas deste dia são mais elevadas e a radiação solar incidente mais intensa do que as do dia 30 de junho, no inverno. A Figura 68 apresenta graficamente a temperatura do ar média dos cenários agrupados segundo o nível de refletância solar das fachadas das edificações. Observa-se que o ponto R1 (FVC=0,29) nos três horários representados (8h, 12h e 16h) mostra as maiores diferenças entre as temperaturas médias do ar no cânion com edificações com fachadas de alta, média e baixa refletância solar. A diferença máxima é de $0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ às 16h entre os grupos de baixa e alta refletância solar das fachadas.

Figura 68 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da fachada: alta refletância (AR), média refletância (MR) e baixa refletância (BR) solar às 8h, 12h e 16h do dia 22/11/2021

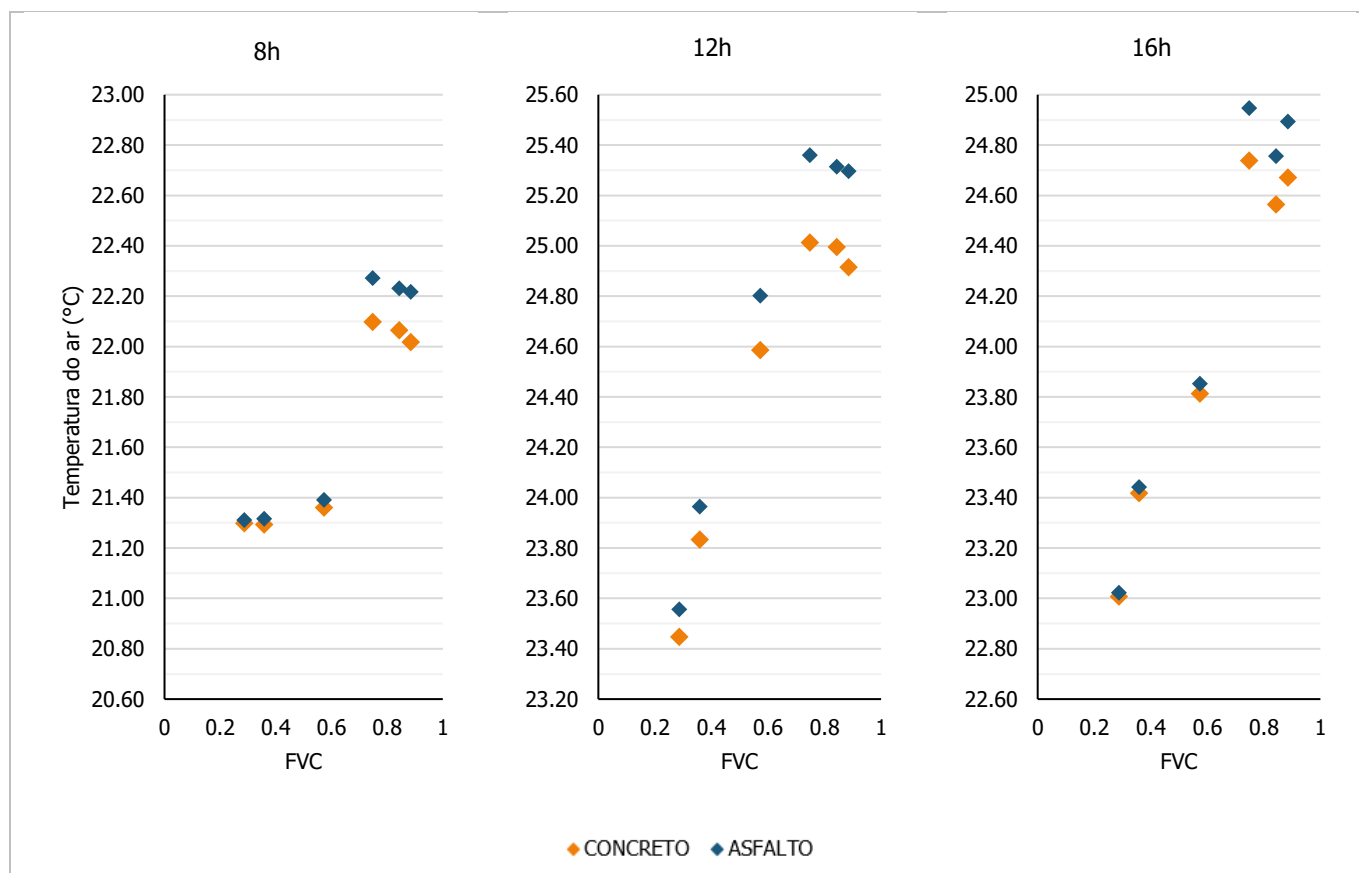


Fonte: autora.

De maneira geral, os cenários com fachadas de alta refletância exibiram menores temperaturas do ar nos pontos avaliados (Figura 68). Apenas no ponto R3 (FVC=0,57) a média do grupo de cenários com fachadas de alta refletância solar foi maior do que as do grupo com média e baixa refletância solar. Entretanto, estas diferenças são muito pequenas, no máximo de 0,04 °C. O ponto R3 está localizado em um cânion irregular, em que a incidência de radiação solar é facilitada e a refletância solar das fachadas pode contribuir para a elevação da temperatura do ar a medida em que também se eleva a radiação incidente nas superfícies.

Ainda na Figura 68, os pontos da área B (R4, R5 e R6) possuem maior fator de visão do céu e apresentam baixa diferença entre as temperaturas médias do ar segundo a refletância solar da fachada. Nesta área, o agrupamento dos cenários pelo nível de refletância das fachadas revela uma influência marginal destas superfícies na temperatura do ar.

Figura 69 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar da pavimentação das ruas: concreto e asfalto às 8h, 12h e 16h do dia 22/11/2021



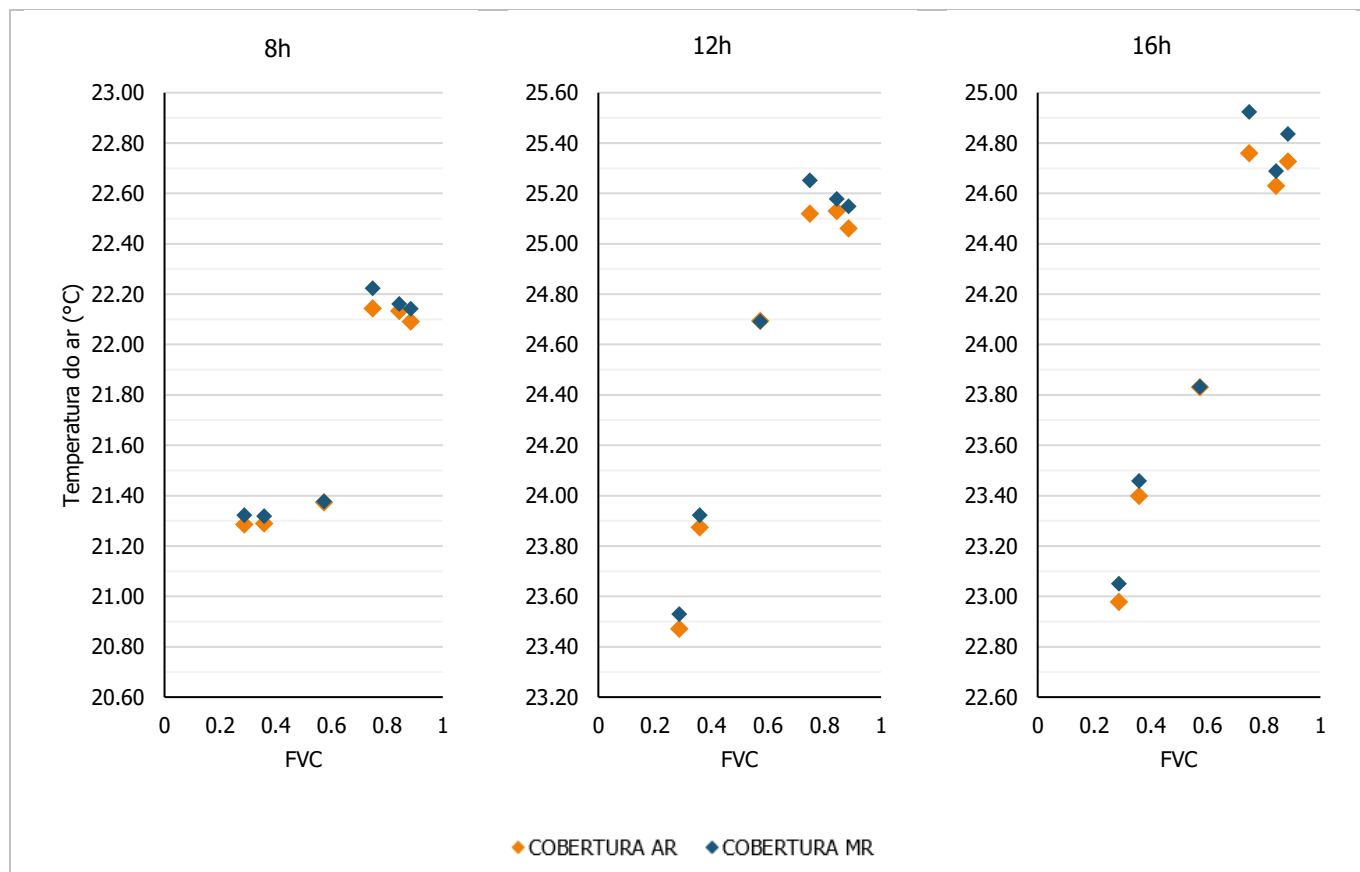
Fonte: autora.

O agrupamento de cenários segundo o nível de refletância solar da pavimentação é exposto na Figura 69. Observa-se que nos pontos da área A (R1, R2 e R3), que possuem menor fator de visão do céu, a média da temperatura do ar entre os grupos de pavimentação de concreto e de asfalto são muito próximas e até nulas (diferença igual a zero) nos horários 8h e 16h. Às 12h, a variação entre as médias do grupo de concreto e de asfalto é mais significativa, de 0,11 °C em R1, até 0,21 °C em R3.

Os pontos com maior fator de visão do céu, na área B, apresentam maior variação entre cenários de concreto (refletância solar de 0,3) e asfalto (refletância solar de 0,2), até 0,38 °C em R6 às 12h. Ainda às 12h, a diferença entre os cenários de concreto e asfalto é notável graficamente nos seis pontos. Este horário representa o momento em que há maior incidência de radiação solar nos cânions urbanos, que incide diretamente sobre a pavimentação, justificando a influência da refletância solar na temperatura do ar.

Figura 70 - Relação entre o FVC e a temperatura do ar média dos cenários agrupados conforme o nível de refletância solar das coberturas: alta refletância (AR) e média refletância (MR) solar às 8h, 12h e 16h do dia

22/11/2021



Fonte: autora.

A temperatura do ar média segundo o agrupamento de cenários com coberturas frias (coberturas com alta refletância) e comuns (média refletância) é exibida na Figura 70. No ponto R3 a média da temperatura do ar foi a mesma nos dois grupos de cenários de coberturas. Este comportamento indica que a aplicação de uma cobertura com alta ou média refletância solar neste local tem papel secundário na definição da temperatura do ar nos horários avaliados.

Verifica-se que a variação entre as médias dos cenários de alta e média refletância das coberturas é maior nos pontos localizados na área B (Figura 70). Isto ocorre devido à menor altura das edificações desta área, aumentando a influência da materialidade da cobertura do nível do pedestre avaliado ($z=1,5$ metros). Também nas simulações de inverno (4.5.1) e em outros trabalhos (TSOKA; TSIKALOUDEKI; THEODOSIOU, 2018) se observa resultados semelhantes.

As diferenças entre as temperaturas segundo o nível de refletância solar foram maiores ou menores conforme a localização do ponto avaliado. Observando apenas a relação entre fator

de visão do céu (FVC) e a temperatura média do ar em cada ponto nos três gráficos (Figura 68, Figura 69 e Figura 70), nota-se que a temperatura aumenta conforme o FVC. Esta tendência é verificada às 12h e 16h. No horário da manhã (8h) a diferença entre pontos é baixa, ainda que seja notável uma variação conforme a área em que está inserido. Os pontos da área A apresentam temperaturas semelhantes entre si, mas menores em relação às dos pontos da área B. Esta menor temperatura do ar da área A é justificada pela geometria local, responsável pela redução do FVC e, conseqüentemente, da incidência de radiação solar na área.

A análise da temperatura do ar média segundo o agrupamento de cenários conforme o nível de refletância de suas superfícies permite verificar a influência das mesmas em diferentes pontos. A geometria do entorno, o fator de visão do céu, e a orientação da rua são fatores que definem se a refletância solar das diferentes superfícies pode afetar em maior ou menor intensidade o desenvolvimento das ilhas de calor urbanas, expressas pela temperatura do ar. Com o objetivo de verificar se há diferença estatística entre as temperaturas do ar médias em cada ponto, foram calculados os valores-*p*, pela ANOVA de um fator, de cada ponto avaliado em horários com intervalos de 4 horas do dia 22/11/2021 simulado (Tabela 8).

Verifica-se, na Tabela 8, que a área A exibe diferença estatística entre as médias de temperatura do ar conforme o nível de refletância solar das fachadas. No ponto R1 (FVC=0.29), esta variação explica a temperatura do ar no cânion em todos os horários avaliados. Nos demais pontos da área A, R2 e R3, apenas às 12h as temperaturas médias do ar são estatisticamente iguais. Em contrapartida, ainda às 12h, os pontos R2 e R3 apresentaram diferença estatística nas médias de temperatura segundo o agrupamento pela refletância solar da pavimentação.

A diferença estatística dos cenários paramétricos, agrupados conforme o material empregado na pavimentação é observada nos pontos R2 e R3 apenas no horário das 12h. Nos pontos da área B (R4, R5 e R6), que possuem maior FVC, a diferença estatística é observada nos horários 8h, 12h e 16h. É possível relacionar a influência da refletância da pavimentação com a incidência solar no local, por sua vez, quantificada pelo fator de visão de céu. Na área B, as edificações são mais baixas e espaçadas entre si, garantindo maior incidência de radiação solar. Na área A, a geometria de cânions mais profundos está associada a um menor fator de visão do céu e ao menor acesso solar. Por este motivo, a influência da refletância solar da pavimentação é maior durante o dia (horários das 8h, 12h e 16h) e nos pontos da área B (R4, R5 e R6), segundo os valores-*p* calculados (Tabela 8).

Tabela 8 - Valor-p da temperatura do ar pelo modelo ENVI-met segundo o agrupamento por tipo de superfície (fachada, pavimentação e cobertura) no dia 22/11/2021

		receptor					
	horário	R1	R2	R3	R4	R5	R6
FACHADA	00:00	0,000	0,000	0,000	0,239	0,037	0,143
	04:00	0,000	0,001	0,000	0,377	0,102	0,264
	08:00	0,000	0,002	0,004	0,734	0,943	0,981
	12:00	0,001	0,112	0,652	0,853	0,953	0,976
	16:00	0,000	0,000	0,001	0,633	0,923	0,836
	20:00	0,000	0,000	0,001	0,213	0,043	0,148
PAVIMENTAÇÃO	00:00	0,962	0,891	0,497	0,738	0,481	0,597
	04:00	0,960	0,891	0,428	0,717	0,448	0,572
	08:00	0,838	0,345	0,079	0,000	0,000	0,000
	12:00	0,213	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
	16:00	0,877	0,659	0,133	0,005	0,000	0,000
	20:00	0,962	0,885	0,203	0,732	0,360	0,548
COBERTURA	00:00	0,310	0,210	0,567	0,001	0,021	0,002
	04:00	0,221	0,126	0,396	0,000	0,006	0,001
	08:00	0,554	0,208	0,848	0,194	0,604	0,441
	12:00	0,520	0,398	0,977	0,266	0,649	0,484
	16:00	0,440	0,255	0,976	0,044	0,366	0,162
	20:00	0,357	0,221	0,556	0,001	0,024	0,002

Fonte: autora.

Nota: Valores em negrito indicam valor-p < 0,05 (quando há diferença estatística).

Quanto ao agrupamento de cenários com coberturas de alta ou média refletância solar, os pontos R4, R5 e R6 exibiram diferença estatística nos horários noturnos avaliados (0h, 4h e 20h) (Tabela 8). Este comportamento pode estar relacionado com o perfil vertical de temperatura, que durante a noite, segundo o modelo ENVI-met, apresenta uma condição de estabilidade atmosférica. A estabilidade atmosférica ocorre quando as temperaturas mais próximas do solo são mais baixas e aumentam juntamente com a altura. A temperatura superficial mais elevada das coberturas de média refletância em relação às de alta refletância solar, podem dificultar o fluxo ascendente do ar no nível da rua (SINSEL *et al.*, 2021). Assim, o nível de refletância solar das coberturas é responsável por manter as temperaturas do ar noturnas mais elevadas no nível da rua da área B nos cenários com coberturas de média refletância solar em comparação às de alta refletância solar.

Os valores-p dos pontos da área A (R1, R2 e R3) indicam a não influência da refletância solar das coberturas nas médias de temperatura do ar (Tabela 8). Assim como observado nas simulações do dia representativo de inverno (4.5.1), isto se justifica pela

distância entre o nível das coberturas e o nível do pedestre na área A (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016).

A análise dos valores-p da Tabela 8 permite a identificação da influência do nível de refletância solar de cada superfície conforme a geometria da área. Embora apresentem diferentes valores de fator de visão do céu, os pontos das áreas A e B exibem comportamentos semelhantes entre si. A área A, caracterizada por uma morfologia com maior taxa de ocupação e altura média das edificações, sofre influência mais evidente das fachadas das edificações na definição da temperatura do ar. A área B, por sua vez, mostra temperaturas do ar mais afetadas pela pavimentação durante o dia e pela cobertura durante a noite.

4.5.2.2 *Distribuição da temperatura do ar*

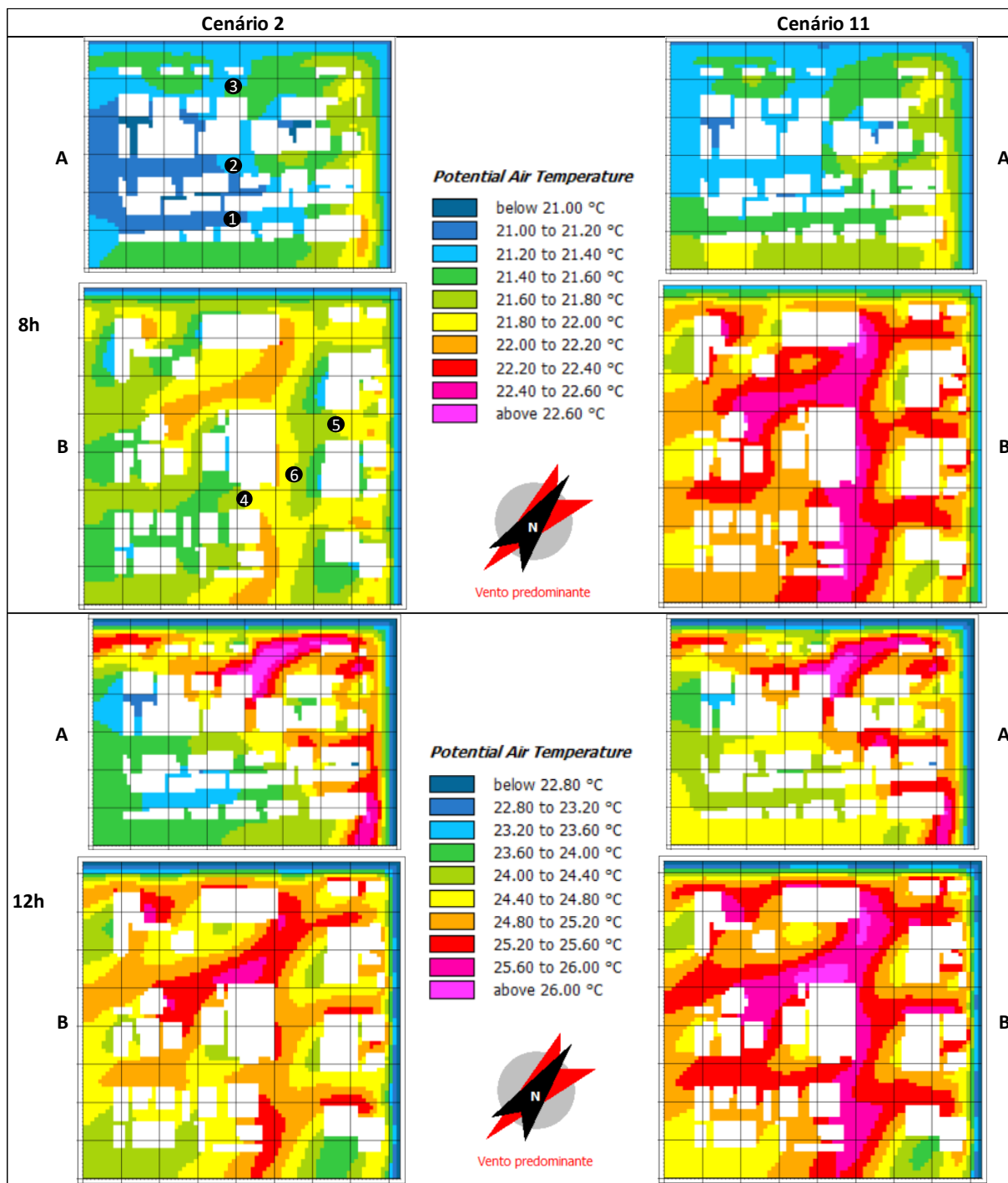
A Figura 71 apresenta a distribuição de temperatura do ar segundo as simulações com o programa ENVI-met nas áreas A e B às 8h e 12h do dia 22 de novembro de 2021. Entre os cenários simulados, foram selecionados os cenários 2 e 11, que representam a combinação de superfícies com maior e menor refletância solar, respectivamente. Às 8h, nota-se que a área B e o cenário 11 apresentam as temperaturas do ar mais elevadas. Neste horário, em todos os gráficos, as regiões de temperaturas mais elevadas estão localizadas à direita, devido à incidência solar proveniente da direção leste. Além disso, a direção do vento também conduz as massas de ar quente ao sul do modelo.

Às 12h, as regiões com temperaturas mais elevadas estão localizadas na parte superior direita das áreas A e B (Figura 71). Verifica-se zonas de temperatura mais baixas nos cânions da área A no cenário 2. No cenário 11, a baixa refletância solar das superfícies implica no aumento da absorção da radiação solar pelas edificações, aumentando também as temperaturas superficiais e a temperatura do ar no nível da rua. A variação de temperatura às 12h, horário com maior intensidade de radiação solar, atinge mais de 3 °C conforme a localização e a refletância solar das superfícies do modelo.

A Figura 72 mostra a distribuição de temperatura nos horários das 16h e 20h. Às 16h, na área A, observa-se temperaturas mais elevadas na região superior do mapa, em que o FVC é maior. As temperaturas mais baixas, por sua vez, são apresentadas nos cânions mais profundos, com menor FVC, em que está alocado o ponto R1. Em comparação com a área B, a área A exibe temperaturas do ar mais baixas. Na área B, pela maior regularidade da geometria em

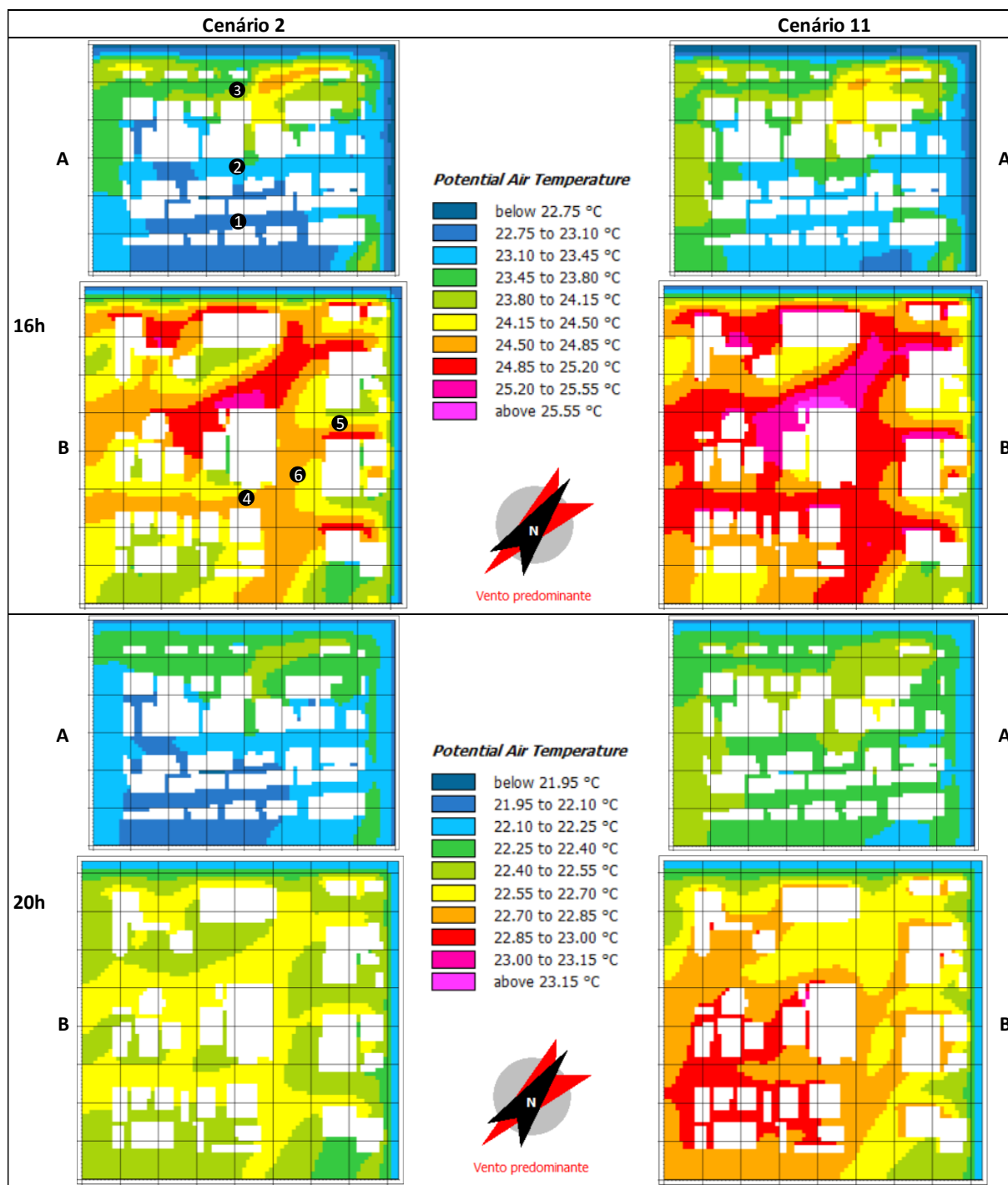
relação à altura das edificações, observa-se uma distribuição de temperatura mais uniforme por toda a área, às 16h.

Figura 71 - Distribuição da temperatura do ar ($z = 1,5\text{m}$) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 8h e 12h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021



Fonte: autora.

Figura 72 - Distribuição da temperatura do ar ($z = 1,5\text{m}$) nas áreas A e B e nos cenários paramétricos 2 e 11, às 16h e 20h - simulações pelo ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021



Fonte: autora.

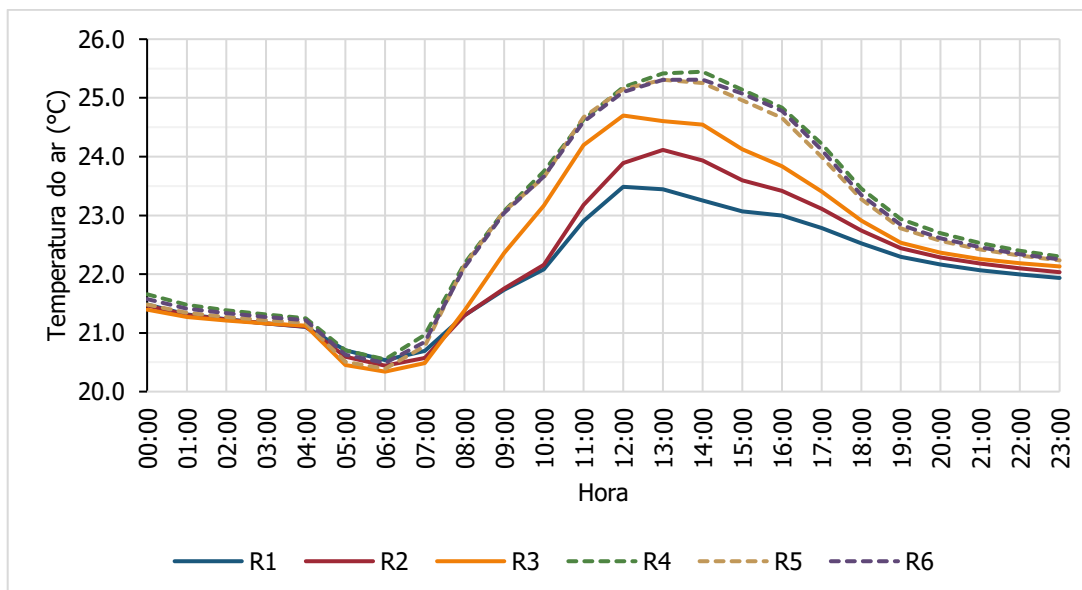
A área B mostra maior sensibilidade às refletâncias solares das superfícies com relação às temperaturas do ar. A mudança de cenário é responsável pela variação da temperatura do ar em grande parte da área B em aproximadamente $0,35\text{ °C}$ (valor da escala na Figura 72). A área A também exibe temperaturas mais elevadas no cenário 11, mas estas temperaturas

atingem o máximo de 24,85 °C, contra 25,87 °C da área B. Isto se deve à geometria da área A, que garante um grande sombreamento do nível da rua pelas edificações com maior altura.

Durante a noite, às 20h, a área A mantém a distribuição de temperatura semelhante às das 16h, com temperaturas mais baixas segundo o FVC. No cenário 11, as temperaturas nos cânions da área A exibem distribuição mais uniforme de temperatura de aproximadamente 22,4 °C. Na área B, o cenário 2 apresenta temperaturas mais amenas que o cenário 11, mas superiores aos da área A. O cenário 11 exibe temperaturas mais elevadas na região inferior esquerda da área, possivelmente pela liberação de calor absorvido pelas edificações durante o dia e pela influência do vento, que direciona o calor liberado a esta região.

De modo geral, o cenário 11 está relacionado com as temperaturas mais elevadas em todos os horários avaliados. Para avaliar a influência da geometria, se calculou a temperatura média em cada ponto receptor. A Figura 73 apresenta o perfil de temperatura do ar média por hora em cada ponto, de R1 a R6. Verifica-se que os pontos da área B (R4, R5 e R6) apresentam as maiores temperaturas máximas diárias, e perfis semelhantes entre si. A variação da temperatura do ar média entre os pontos da área B é baixa, com o ponto R4 exibindo a temperatura mais elevada. Na área A, os pontos R1, R2 e R3 apresentam maior temperatura máxima conforme seu FVC, sendo crescente nesta mesma ordem.

Figura 73 - Temperatura média do ar ($z=1,5\text{m}$) dos cenários paramétricos nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) - simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021

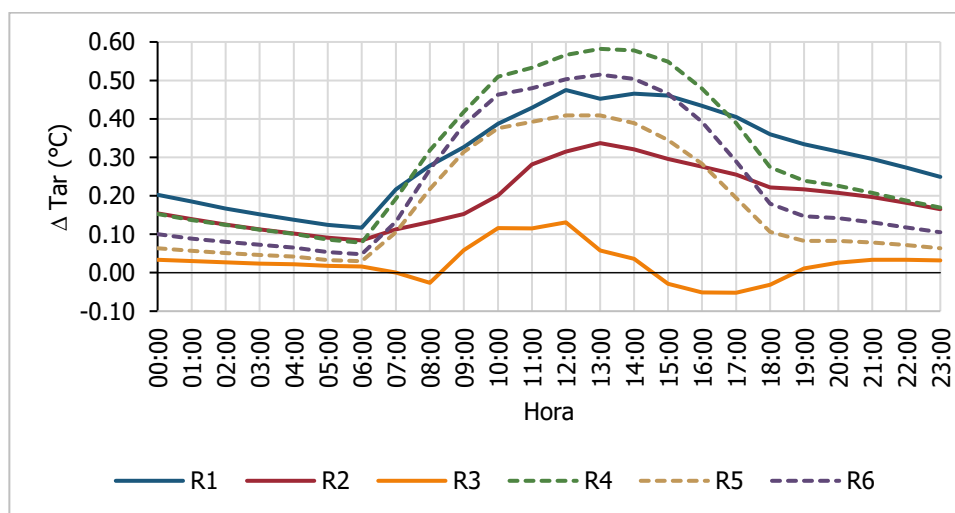


Fonte: autora.

Durante o período noturno a diferença de temperatura entre os pontos das áreas A e B diminuem, mas as temperaturas da área B se mantêm mais elevadas em relação às da área A. Este comportamento indica que, nas simulações de primavera, o maior acesso solar da área B não foi compensado pelas trocas de calor noturna por radiação de onda longa, como ocorreu nas simulações de inverno. Na primavera, portanto, as temperaturas do ar são mais baixas em geometrias mais densas horizontal e verticalmente, pois a radiação solar tem intensidade tal que os menores FVC garantem temperaturas mais baixas.

Com o objetivo de quantificar a variação da temperatura do ar que as diferentes combinações de níveis de refletância solar podem produzir, calculou-se a diferença entre os cenários 11 e 2 (Figura 74). Verifica-se que o ponto R1 apresenta as maiores variações de temperatura do ar entre os cenários 11 e 2 da área A. Com variação máxima de 0,48 °C às 12h, o ponto R1 mantém a variação acima de 0,1 °C em todo o dia avaliado. Ainda em relação ao ponto R1, é notável a diferença entre os cenários extremos antes do nascer do sol (às 6h) e após o pôr do sol (às 19h), que apresenta a maior variação entre todos os pontos avaliados no período noturno. Esta diferença evidencia a influência da refletância solar das superfícies urbanas nas temperaturas noturnas.

Figura 74 - Variação da temperatura do ar entre os cenários 11 e 2 pelo modelo ENVI-met nos pontos R1, R2 e R3 (linha contínua), e R4, R5 e R6 (linha tracejada) a uma altura de 1,5 m em relação ao solo no dia 22/11/2021



Fonte: autora.

O ponto R2 apresenta curva de variação da temperatura do ar semelhante à do ponto R1, porém com menor intensidade. O ponto R3, por fim, é o único dentre os seis pontos avaliados que mostra valores negativos de variação, indicando que a temperatura do ar no

cenário 2, com maior refletância solar, foram mais elevadas do que as do cenário 11 (Figura 74). Este comportamento pode estar relacionado com a geometria irregular do cânion urbano (Figura 59). Apesar da tendência contrária ao esperado, a variação máxima negativa é de baixa intensidade, até 0,05 °C às 17h.

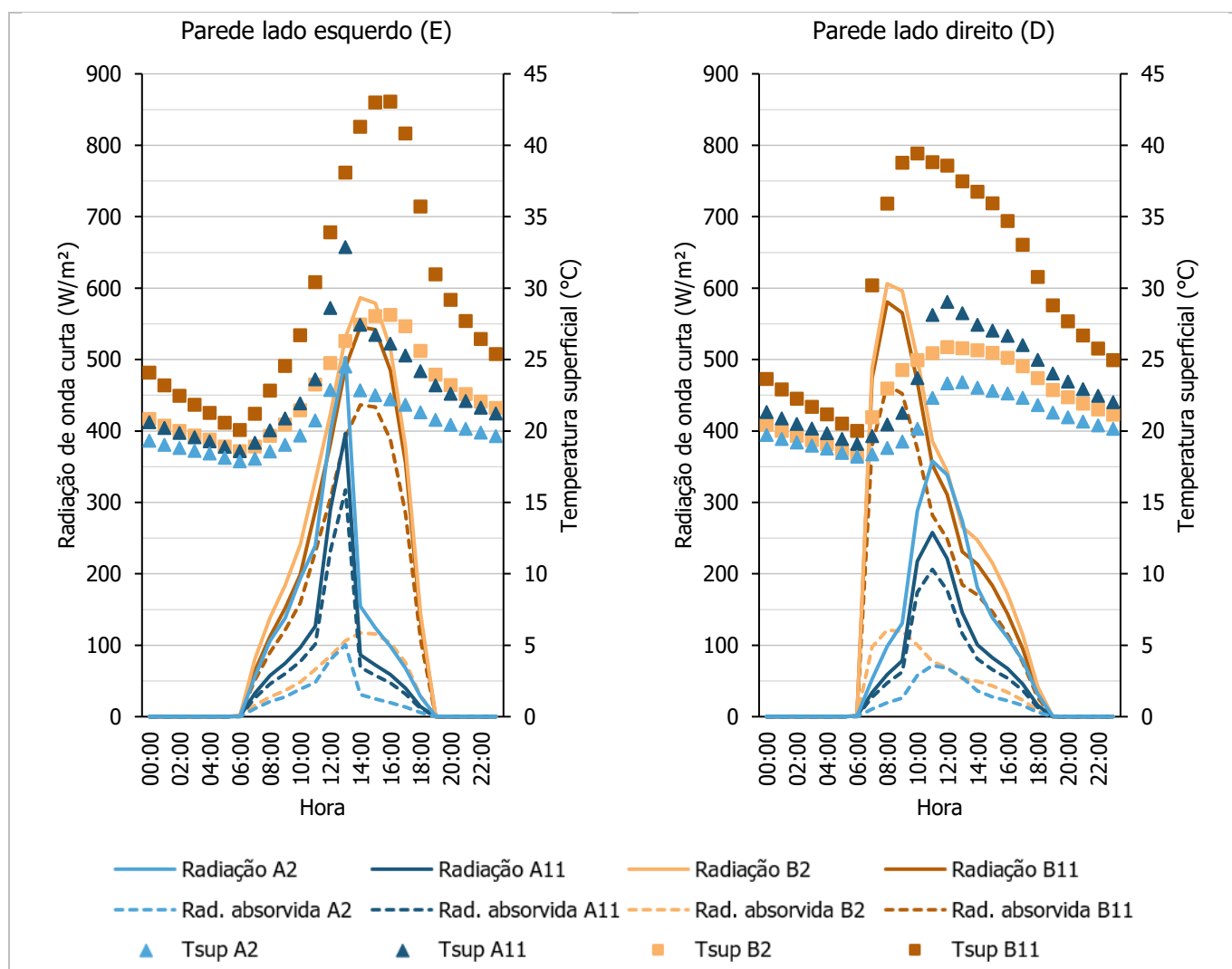
Observa-se que os pontos R4, R5 e R6 seguem uma curva de variação semelhante, com diferentes intensidades (Figura 74). O ponto R4 é o que apresenta maior variação de temperatura do ar entre os cenários extremos de refletância solar, com máxima de 0,58 °C às 13h. O ponto R4 também mantém a variação entre os cenários 11 e 2 com valores mais altos do que os pontos R5 e R6 durante a noite. A maior variação do ponto R4 se deve a maior proximidade do ponto com as edificações do seu entorno, aspecto que se reflete no menor valor do FVC entre os três pontos da área B.

4.5.2.3 Radiação solar e térmica

Com o objetivo de analisar o desenvolvimento da radiação de onda curta e da temperatura superficial das superfícies urbanas, selecionou-se dois cânions (Figura 28 e Figura 29). As superfícies dos cânions A e B, nomeados segundo a área em que estão localizados, foram avaliadas pela comparação entre os cenários 2 e 11. A Figura 75 mostra graficamente a radiação de onda curta total incidente, a radiação de onda curta absorvida e a temperatura superficial nas paredes dos cenários 2 e 11. Ressalta-se que os gráficos são baseados na média das células de parede até 3 metros de altura em relação ao solo.

Os cânions A e B possuem a mesma orientação, porém a geometria de cada um define o acesso solar de cada superfície. Nas paredes do cânion B, nota-se que a radiação de onda curta incidente apresenta curva deslocada à direita na parede E, e deslocada à esquerda na parede D (Figura 75). No cânion urbano A, este comportamento também pode ser observado em menor intensidade e com picos de radiação pontuais. Segundo uma sinalização binária do acesso solar nas superfícies pelo ENVI-met, a variável *wall shadowing flag*, no cânion A há incidência de radiação solar direta na parede esquerda às 12h e 13h, e na direita às 10h e 11h. A parede esquerda do cânion B, por sua vez, recebe radiação solar direta das 11h às 18h, na parede direita a exposição ao sol ocorre desde as 7h até 12h.

Figura 75 - Temperatura superficial e radiação de onda curta incidente e absorvida pela superfície das paredes do lado esquerdo (E) e do lado direito (D) dos cânions A e B nos cenários 2 e 11 - dia 22/11/2021 pelo ENVI-met v.4.4.6



Fonte: autora.

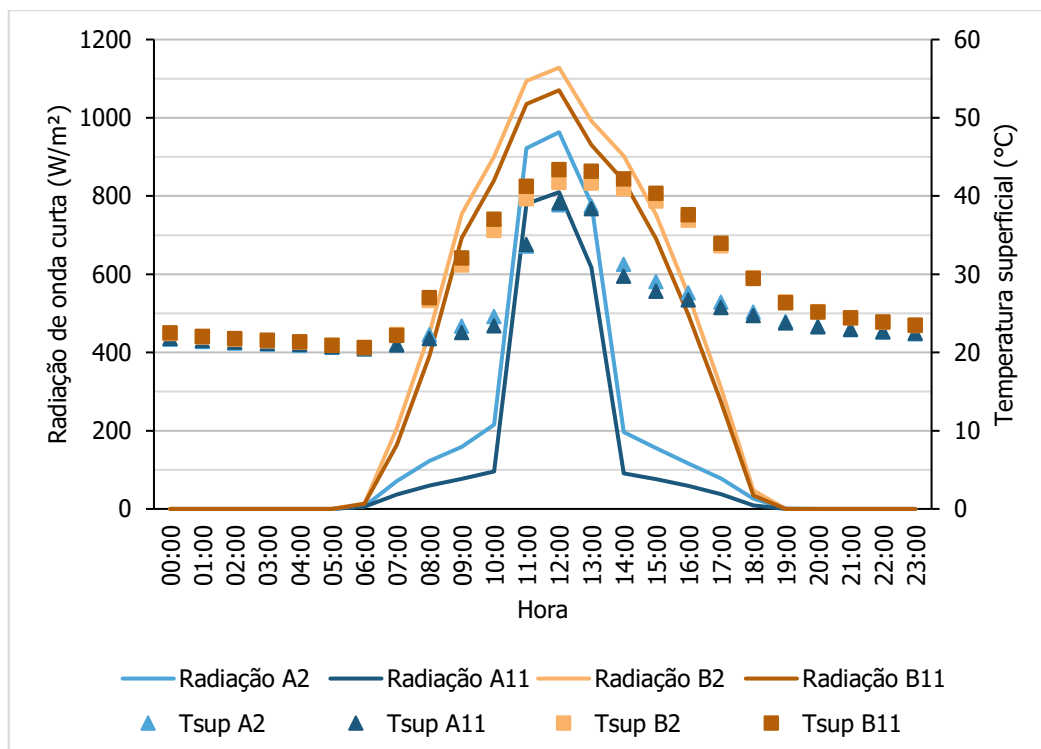
Verifica-se que as radiações de onda curta incidentes são mais elevadas no cenário 2 nos dois cânions (Figura 75). A diferença entre a radiação incidente entre os cenários 2 e 11 é maior no cânion A, isto ocorre porque este cânion é mais profundo e possui maior fator de visão das edificações do entorno do que no cânion B. Apesar de receber mais radiação de onda curta, o cenário 2 absorve menos radiação que o cenário 11, devido a baixa refletância solar das paredes.

Observa-se que, assim como nos resultados das simulações do dia de inverno (4.5.1), a radiação absorvida define a temperatura superficial. Nos cânions A e B as temperaturas superficiais mais elevadas foram registradas nas paredes do cenário 11 (Figura 75). No cânion A, a variação máxima entre as temperaturas superficiais do cenário 11 e 2 é de 5,80 °C às 11h

na parede esquerda, e de 8,37 °C às 13h na parede direita. O cânion B, que permite maior acesso solar em seu interior e sofre menos influência da refletância solar do seu entorno, apresenta maior variação entre as temperaturas superficiais entre os cenários 11 e 2. A variação máxima na parede esquerda é de 14,51 °C às 9h, na parede direita é de 14,95 °C às 15h. Embora a diferença das temperaturas superficiais entre os cenários 11 e 2 sejam maiores nos horários de máxima radiação solar incidente, esta diferença se mantém positiva (T_{sup} no cenário 11 > T_{sup} no cenário 2) durante todo o período avaliado.

A Figura 76 mostra o gráfico da radiação de onda curta total incidente e a temperatura superficial na pavimentação dos cânions A e B nas configurações de refletância solar dos cenários paramétricos 2 e 11. Ressalta-se que os valores de radiação e temperatura se referem às médias das células de pavimentação que compõe os cânions. Assim como nas paredes, observa-se que as radiações de onda curta do cenário 2 são mais intensas nos dois cânions. É notável a maior influência da refletância solar do entorno no cânion A, em que a radiação incidente dobra de valor no cenário 2 em relação ao 11 (às 8h, 9h, 10h, 15, 16h e 17h).

Figura 76 - Temperatura superficial média e radiação de onda curta incidente média no solo dos cânions A e B nos cenários paramétricos 2 e 11 pelo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 22/11/2021

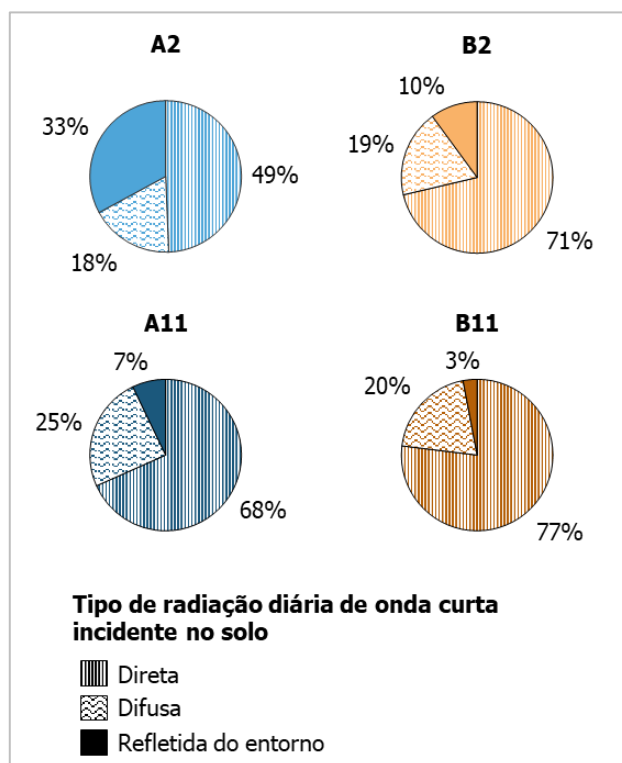


Fonte: autora.

Em relação às temperaturas superficiais, a pavimentação apresentou menor variação entre os cenários 11 e 2 (Figura 76). Além disso, a diferença não foi sempre positiva, indicando que o cenário 2 mostrou temperaturas superficiais abaixo das do cenário 11. No cânion A, a maior variação de temperatura superficial entre os cenários 11 e 2 foi de $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 14h. A maior temperatura superficial registrada no cenário 2 está relacionada à maior incidência de radiação de onda curta proveniente da reflexão das edificações do entorno, pois ocorre nos momentos em que a radiação de onda curta total supera em pelo menos duas vezes a do cenário 11. No cânion B, a diferença se manteve positiva na maior parte do dia, e apresentou máxima de $1,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12h.

A fim de identificar a influência de cada tipo de radiação incidente na radiação de onda curta total na pavimentação dos cânions, calculou-se a porcentagem que cada tipo representa do valor total (Figura 77). Ressalta-se que, em valores absolutos, as radiações dos tipos direta e difusa são iguais em um mesmo cânion, pois só dependem da geometria do mesmo. Nota-se que a radiação de onda curta refletida do entorno do cenário 2 no cânion A representa 33% de toda a radiação de incidente diária. No cenário 11, esta parcela diminuiu para 7%.

Figura 77 - Porcentagem do tipo de radiação diária de onda curta incidente na pavimentação dos cenários 2 e 11 nos cânions urbanos A e B segundo modelo ENVI-met v.4.4.6 no dia 22/11/2021



Fonte: autora.

Na área B, a influência da refletância solar do entorno é menor, pois neste cânion incide mais radiação solar do tipo direta e difusa. No cenário de alta refletância solar (B2), 10% da radiação de onda curta total diária provém da reflexão das superfícies do entorno, 19% incide na pavimentação de forma difusa e a maior parte, 71%, de forma direta (Figura 77). No cenário 11 (B11), apenas 3% da radiação solar total incidente é do tipo refletida do entorno, sendo os restantes 20% e 77% do tipo difusa e direta, respectivamente (Figura 77).

A comparação entre cânions mostra a relação entre a morfologia e o microclima urbano. O cânion A recebe menos radiação solar, portanto suas temperaturas superficiais são mais baixas. Em contrapartida, este cânion se revela mais sensível às mudanças de refletância solar do seu entorno em relação à incidência de radiação de onda curta. Isto ocorre devido ao aumento da radiação de onda curta refletida do entorno, que é evidente na análise da radiação incidente da superfície da pavimentação dividida em direta, difusa e refletida do entorno.

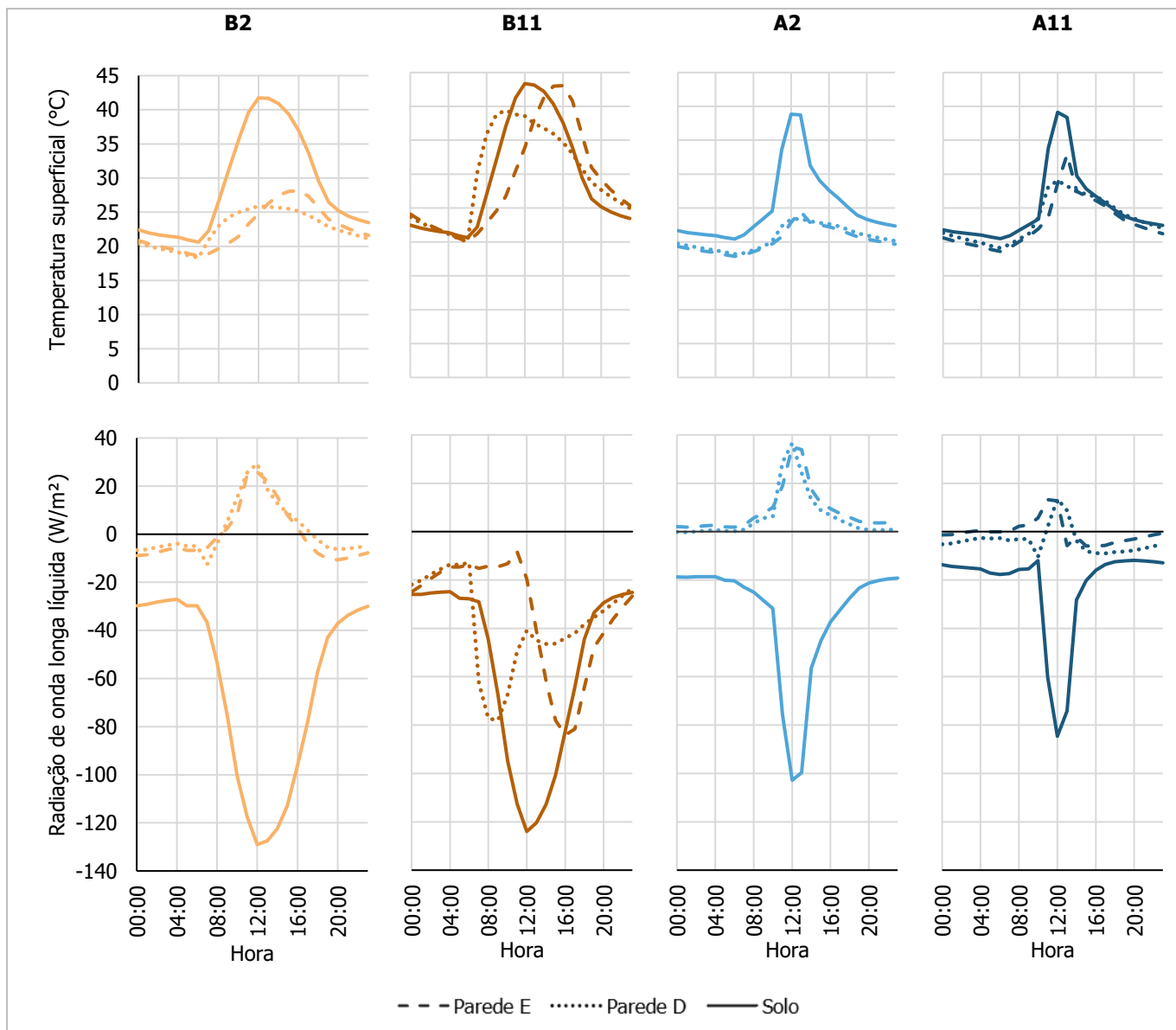
Durante o dia, a radiação de onda curta incidente no cânion tem maior influência sobre as demais variáveis, devido à sua intensidade. No período noturno, a transferência de calor por radiação de onda longa constitui um mecanismo para reduzir as temperaturas armazenadas pelos materiais urbanos durante o dia. A Figura 78 mostra graficamente a temperatura superficial e a radiação térmica líquida nas superfícies de parede e solo dos cânions urbanos A e B no dia 22 de novembro segundo as simulações dos cenários 2 e 11 pelo ENVI-met.

Verifica-se que os maiores valores de radiação de onda longa líquida estão associados às temperaturas superficiais mais elevadas (Figura 78). Ressalta-se que os valores negativos de radiação de onda longa indicam a perda de calor da superfície avaliada por este tipo de radiação, enquanto os valores positivos representam o ganho de calor. As pavimentações exibem o maior fluxo de transferência de calor por radiação de onda longa, devido às maiores temperaturas destas superfícies. As paredes, por sua vez, apresentam comportamentos distintos em cada situação avaliada.

Na situação B2 (cânion B – cenário 2), as superfícies de parede exibem comportamento semelhante quanto à radiação de onda longa líquida. Entre 10h e 16h, estas superfícies ganham calor por radiação de onda longa e nos demais horários o saldo é negativo, indicando a perda de calor. Avaliando juntamente com a temperatura superficial, nota-se que a temperatura das paredes é até 15,9 °C mais baixa do que a da pavimentação. Esta relação é observada no balanço de radiação de onda longa, mostrando que ao mesmo tempo em que a superfície do solo perde calor em até 129,02 W/m², as paredes direita e esquerda ganham até 29,37 W/m² de calor por

meio deste tipo radiação. Durante o período noturno as trocas de calor se mantêm com valor negativo.

Figura 78 - Temperatura superficial e radiação de onda longa líquida das paredes e solo dos cânions urbanos A e B nos cenários 2 e 11 (simulações com ENVI-met v.4.4.6 referentes ao dia 22/11/2021)



Fonte: autora.

No cenário de baixa refletância (cenário 11) no cânion B, as superfícies de parede e solo absorvem grande parte da radiação de onda curta incidente, apresentando temperaturas superficiais elevadas. As temperaturas superficiais, por sua vez, estão associadas ao aumento da transferência de calor por onda longa, que, nesta situação (B11), revela uma radiação térmica líquida negativa durante todo o dia 22/11/2021.

O cânion urbano A, com menor fator de visão do céu, apresenta temperaturas superficiais mais baixas e, em grande parte do tempo, menores fluxos de radiação de onda longa em comparação ao cânion B. Na situação A2 (cânion A – cenário 2), o perfil de radiação de onda longa líquida das paredes do cânion é predominantemente positivo, representando o ganho de calor destas superfícies em todo o dia representativo da primavera simulado. Ainda que apresente valores próximos de zero, os perfis de radiação de onda longa líquida das paredes em comparação com os do solo revelam a influência da temperatura da pavimentação sobre as paredes do cânion.

Esta influência também pode ser observada na situação A11 (cânion A – cenário 11) em que a radiação de onda longa líquida das paredes exibe perfil de comportamento contrário ao do solo (Figura 78). A análise do balanço de radiação de onda longa revela uma influência tanto da geometria do cânion quanto dos cenários de refletância solar. A radiação de onda longa líquida exibe o impacto da incidência de radiação solar no cânion, com maiores intensidades no cânion B (maiores FVC).

4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

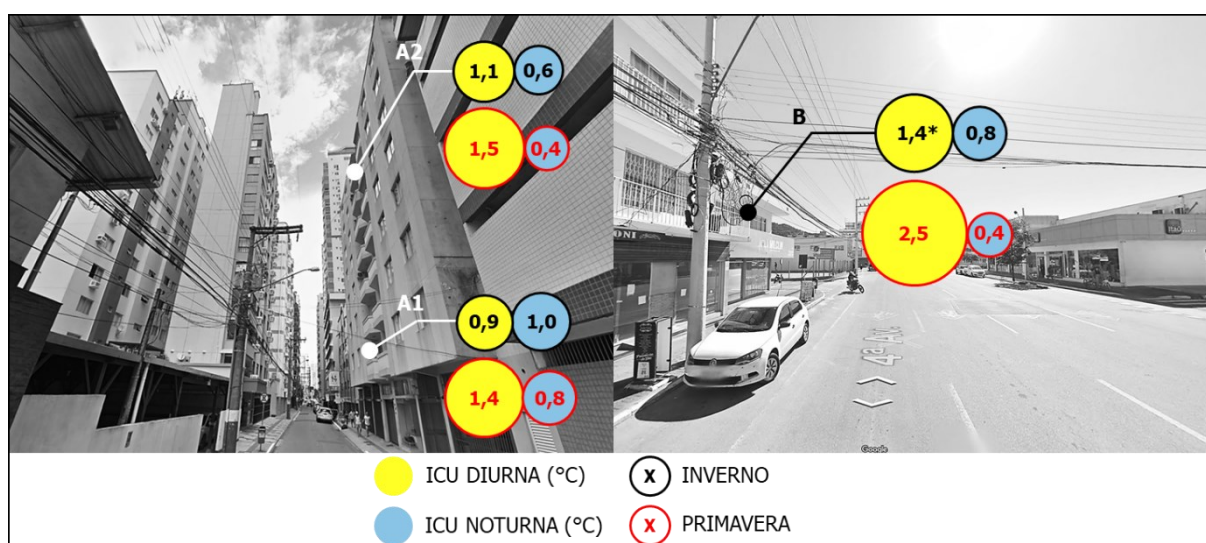
O presente trabalho partiu da avaliação em campo das temperaturas e umidades relativas do ar em duas áreas representativas da região central da cidade de Balneário Camboriú. A primeira área selecionada, chamada de área A, representa a zona com maior densidade construída. As edificações da área A possuem altura média de 31 metros e taxa de ocupação do solo e 51% (Tabela 1). Na área A foram instalados dois termo-higrômetros, na mesma posição, porém em alturas diferentes, o primeiro (A1) a uma altura em relação ao solo de 4,5 metros, e o segundo (A2) a uma altura em relação ao solo de 22,5 metros. A área B, distante da área A em 1,2 km, é composta por edificações mais espaçadas e com menor altura, taxa de ocupação de 32% e altura média de 6,3 metros (Tabela 1). Nesta segunda área, apenas um termo-higrômetro foi instalado a 4,5 metros de altura em relação ao solo.

A avaliação em campo consistiu no monitoramento por meio da instalação de termo-higrômetros durante duas semanas em dois períodos do ano, na estação de inverno e na primavera. No período de inverno, verificou-se um perfil horário de temperatura do ar média com mínima de 14 °C e máxima de 20 °C. Na primavera, este valor subiu para uma temperatura do ar média diária entre 19 °C e 25 °C. Nos dois períodos as temperaturas e a umidade relativa do ar registradas foram comparadas com as medições da estação meteorológica do Porto de

Itajaí, que neste trabalho foi adotada como representativa de uma área rural para o cálculo da intensidade das ilhas de calor.

Foram observadas ilhas de calor nos três pontos monitorados com temperaturas médias acima das do Porto de Itajaí nos dois períodos avaliados. Embora alguns registros tenham sido descartados devido à influência da incidência solar no equipamento do ponto B, foi possível observar perfis distintos de temperatura do ar em cada ponto de monitoramento. A Figura 79 apresenta a intensidade média das ilhas de calor diurnas e noturnas em cada ponto nas estações de inverno e primavera. O período diurno foi definido conforme o nascer e pôr do sol, no inverno das 7h às 18h, e na primavera das 6h às 19h. Observa-se que as ilhas de calor urbanas diurnas são menos intensas no ponto A1 e mais intensas no ponto B (Figura 79). Durante a noite, o ponto A1 apresentou ilhas de calor mais intensas, com média de 1,0 °C no inverno e 0,8 °C na primavera.

Figura 79 - Intensidade média das ICU (em °C) diurnas e noturnas nos pontos A1, A2 e B durante os períodos de medição de inverno e primavera



Fonte: imagens do Google Maps (2021) e composição da autora.

Nota:

* Média diurna com base nos horários 7h, 16h, 17h e 18h, devido ao descarte de dados incertos.

Os perfis de temperatura em cada ponto estão relacionados com o fator de visão do céu de cada um. O ponto A1 possui menor FVC (0,39) entre os três, o que está associado a um menor acesso solar durante o dia, justificando a menor temperatura diurna. No período noturno, o FVC é relacionado com a perda de calor com o céu por radiação de onda longa. Durante o dia, as ilhas de calor no ponto A1 são menos intensas, devido ao sombreamento causada pelas

edificações nesta área. À noite, porém, o ponto A1 registra maiores intensidades das ilhas de calor, pois as edificações em seu entorno dificultam a dispersão de calor. Por este mesmo motivo, os pontos A2 e B (FVC de 0,67 e 0,80, respectivamente, segundo estimativa baseada nos modelos tridimensionais para o ENVI-met) exibem maior amplitude térmica diária. Este comportamento também foi observado em outros estudos do microclima urbano em cidades brasileiras (GUSSON; DUARTE, 2016; MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2020).

Ainda na Figura 79, verifica-se que as ilhas de calor diurnas foram mais intensas na primavera, enquanto as noturnas, no inverno. As ilhas de calor mais intensas podem estar associadas às baixas umidades relativa do ar, ou aos períodos de seca (ROTH, 2007; SOUZA; ALVALÁ, 2014). Na região de Balneário Camboriú, ambos os períodos mostraram valores de umidade relativa do ar média similares. Isto se deve à proximidade com o mar e está de acordo com o arquivo climático do município de Navegantes (CLIMATE ONE BUILDING, 2018). Na primavera, as temperaturas mais elevadas na área urbana podem estar associadas à um maior uso de condicionadores de ar, uma forma de geração de calor antropogênico que contribui para o aumento das temperaturas.

A partir dos dados de temperatura e umidade relativa do ar coletados em campo e a avaliação de dados meteorológicos de estações próximas da cidade, foram selecionados os dias mais adequados para a simulação do modelo ENVI-met. A seleção foi baseada na nebulosidade e na estabilidade do vento. Os dias 30 de junho e 22 de novembro foram definidos para representar os períodos de inverno e primavera na fase de simulações. Primeiramente, o modelo foi validado, comparando as temperaturas do ar simuladas com as medidas em campo.

O desempenho do modelo no inverno foi satisfatório, com R^2 de 0,99, 0,96 e 0,98 nos pontos A1, A2 e B, respectivamente, e índice de Wilmott (d) de pelo menos 0,87. Na primavera, os índices de desempenho também foram satisfatórios, R^2 e d de no mínimo 0,87. Porém, para atingir estes valores houve desconsideração dos dados do período da manhã pela possível interferência nas medições *in loco* decorrentes da instalação. Os resultados dos índices de desempenho estão de acordo com a validação de outros trabalhos (ACERO; ARRIZABALAGA, 2018; TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018).

Nas simulações de inverno, o modelo ENVI-met mostrou um perfil de temperatura do ar mais achatado, subestimando as temperaturas diurnas. Este comportamento também foi observado nos trabalhos de Gusson e Duarte (2016) e Morakinyo *et al.* (2019). Visto que nas simulações da primavera isto não ocorreu, sugere-se que o problema esteja relacionado com a amplitude térmica dos dias simulados. No dia 30 de junho, a temperatura do ar variou de 9 °C

a 17 °C, enquanto no dia 22 de novembro esta variação foi de apenas 2 °C (mínima de 20 e máxima de 22 °C), segundo os registros da estação meteorológica do Porto de Itajaí.

As simulações para a validação do modelo foram baseadas nos dados de estações meteorológicas fixas, em local afastado do centro de Balneário Camboriú. Ainda assim, os resultados do modelo ENVI-met v.4.4.6 demonstraram um bom desempenho na previsão da temperatura do ar nos pontos A1 e B no dia 22 de novembro. A diferença entre a temperatura entre estes pontos pelo modelo ENVI-met foi de até 1,14 °C, e pelas observações em campo utilizadas para a validação foi de 1,34 °C. Além disso, a variação máxima ocorreu às 16h pelo modelo computacional e às 17h pelas medições.

Em ambos os períodos avaliados, em relação aos horários de temperaturas máximas e mínimas, os perfis de temperatura do ar das simulações estiveram de acordo com os medidos em campo. Além disso, observou-se que o modelo ENVI-met da área B exibiu maior amplitude térmica do que a área A, em concordância com as medições *in loco*. Os pontos A1 e B estão a uma mesma altura em relação ao solo e mais próximos do nível de 2 metros, em que a temperatura e a umidade do ar são forçadas pelo modelo.

O ponto A2, por sua vez, localizado em uma altura mais elevada em relação ao solo, apesar das métricas de desempenho estarem de acordo com outros trabalhos, mostrou comportamento contrário ao observado em campo em relação ao ponto A1. A análise do perfil vertical de temperatura do ar no ponto A revelou temperaturas simuladas mais elevadas em A2 durante a noite e mais baixas durante o dia em comparação ao ponto A1. As possíveis causas levantadas para esta divergência entre medição e simulação são: as simplificações na modelagem tridimensional do modelo ENVI-met; a consideração do modelo de estar sob a condição de neutralidade atmosférica durante a noite; o enfoque do modelo computacional no nível do pedestre; medições em campo imprecisas.

A consideração de duas alturas em relação ao solo na área A se deu com o objetivo de verificar a distribuição de temperatura do ar verticalmente. Os diferentes pavimentos de uma edificação estão sujeitos a diferentes condições microclimáticas. Os pavimentos tem maior acesso solar, o fluxo de ar é intensificado e a influência dos processos no nível da rua reduzem a medida em que se distanciam do solo. Esta diferenciação microclimática pode ter implicações importantes no consumo energético de uma edificação de altura elevada. Devido às diferenças entre as temperaturas do ar medidas em campo e as simuladas pelo ENVI-met no ponto A2, optou-se por avaliar o microclima através dos cenários paramétricos apenas no nível do pedestre (em $z=1,5$ metros).

Os cenários paramétricos foram criados para representar diferentes combinações de refletância solar nas superfícies urbanas de pavimentação, fachadas e coberturas. A análise destes cenários partiu do agrupamento dos cenários segundo o nível de refletância das superfícies urbanas. Foram calculadas as médias de temperatura do ar em cada grupo em seis horários dos dias 30 de junho e 22 de novembro simulados. De maneira geral, notou-se que as temperaturas do ar mais elevadas estão associadas às baixas refletâncias solares das superfícies.

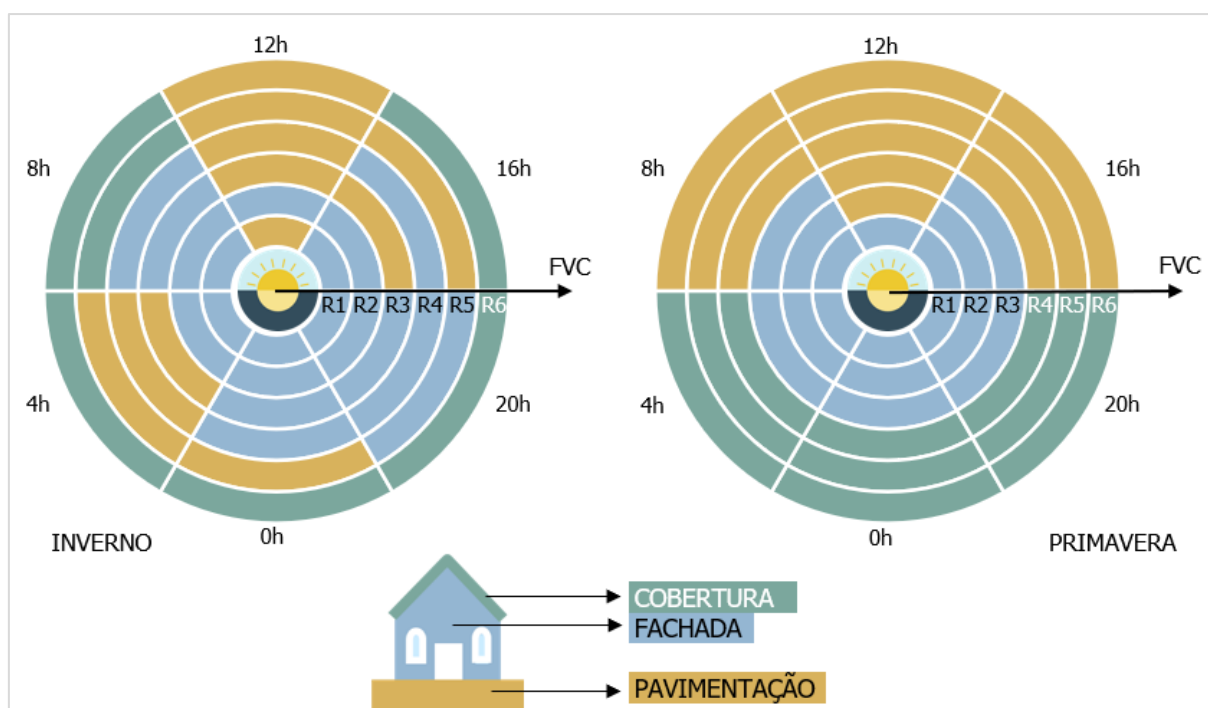
Ainda, observou-se que a medida em que se aumenta o acesso e a intensidade solar incidente nos pontos avaliados, maior é a influência da refletância solar das superfícies urbanas na temperatura. Isto é, maior é a variação entre as temperaturas do ar médias dos grupos de refletâncias. Esta relação pode ser observada pela comparação entre o período de inverno e de primavera, nota-se que na primavera a variação entre as médias de temperatura do ar dos agrupamentos foi mais elevada do que nas simulações de inverno.

Pela análise de variância (ANOVA), foi avaliada se a variação entre as médias é diferente estatisticamente ou não, pelo valor-p com significância de 5%. Observou-se que nos dois períodos (inverno e primavera), em todos os horários e pontos avaliados, o nível de refletância foi significativo em pelo menos um tipo de superfície. Verificou-se que a relevância de cada superfície na temperatura do ar é maior ou menor segundo a geometria do local, o horário e o período do ano. A Figura 80 mostra graficamente o tipo de superfície urbana que apresentou maior diferença estatística quando se alterou a refletância solar.

No inverno, nos pontos de R1 ao R4, nota-se que a refletância solar das fachadas e da pavimentação tem maior influência na temperatura do ar (Figura 80). No ponto R2, em todos os horários, a refletância das fachadas afetou as temperaturas do ar mais do que as das coberturas e da pavimentação. No horário de 12h no inverno, a refletância da pavimentação mostrou maior relevância entre as demais superfícies em todos os pontos, exceto em R2. Nos pontos R5 e R6, localizados na área B e que apresentam os maiores fatores de visão do céu, houve influência da refletância das coberturas na temperatura do ar (no ponto R5, apenas às 8h, mas no ponto R6, durante a maior parte do dia 30/11/2021 simulado).

O tipo de superfície que tem maior influência em cada ponto revelou um padrão mais uniforme segundo o FVC na primavera. A Figura 80 mostra que na área A (R1, R2 e R3) o nível de refletância solar da fachada é notável em todo o dia 22/11/2021, exceto às 12h em R2 e R3. Assim como no inverno, a pavimentação apresentou maior influência na definição da temperatura do ar às 12h. Neste horário (12h), apenas no ponto R1 a pavimentação não foi o tipo de superfície mais relevante.

Figura 80 - Tipo de superfície com maior diferença estatística da temperatura do ar entre seus níveis de refletância solar nos pontos R1-R6 pelas simulações dos cenários paramétricos (ENVI-met v.4.4.6)



Fonte: autora.

Na área B (pontos R4, R5 e R6), observa-se que a modificação da refletância solar das superfícies de cobertura e pavimentação foi responsável pelas diferenças mais significativas (Figura 80). Os três pontos (R4, R5 e R6) apresentaram a pavimentação como superfície mais relevante durante o período diurno (8h, 12h e 16h). No período noturno (0h, 4h e 20h), a refletância solar das coberturas mostrou maior diferença estatística entre as temperaturas do ar.

A influência da refletância solar das coberturas é observada apenas nos pontos da área B, com maior FVC. Na área A, a distância entre o nível das coberturas e o nível da rua reduz a relevância destas superfícies no interior de cânions profundos (TSOKA; TSIKALOUDEAKI; THEODOSIOU, 2018; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016). Verificou-se na área B, por sua vez, que a refletância solar das coberturas pode influenciar a temperatura do ar no nível do pedestre ($z = 1,5$ m). Sinsel *et al.* (2021) atribuem esta diferença ao ar mais frio, quando empregado as coberturas frias, no nível da cobertura (camada do dossel urbano – *urban canopy layer*), que dificulta o fluxo vertical do ar.

Em relação às fachadas, é evidente a maior influência destas superfícies nos pontos em que há maior densidade urbana, expressa pelos baixos valores de FVC. Os pontos da área B (R4, R5 e R6) foram os que menos apresentaram diferenças estatísticas de temperatura do ar entre os cenários com diferentes níveis de refletância solar nas fachadas. Isto pode ser explicado

pela baixa incidência de radiação solar em superfícies verticais (SALVATI *et al.*, 2021). Os pontos da área A (R1, R2 e R3), por sua vez, apresentam maior área de fachada, fator que intensifica as múltiplas reflexões, contribuindo para afetar mais a temperatura do ar.

A influência do nível de refletância das pavimentações também é maior nos pontos da área B, devido ao maior FVC desta área, que permite maior incidência solar nesta superfície. Por este mesmo motivo, a pavimentação também foi relevante na área A no horário das 12h, momento de pico solar, que assegura maior incidência da radiação solar nesta superfície.

A avaliação de diferentes pontos da área urbana de Balneário Camboriú mostrou que os pontos com maior FVC estão associados às maiores temperaturas do ar diurno. Embora não seja possível identificar uma relação linear entre o FVC e a temperatura do ar dos pontos selecionados nas áreas A e B. Na área B, por exemplo, em que o FVC é de no mínimo 0,74 (R4), a variação de temperatura entre pontos não pode ser explicada apenas pelo FVC. Sugere-se que outros fatores, como a irregularidade da geometria e o modo com que esta afeta o fluxo de ar no cânion urbano, também têm influência sobre a temperatura.

A avaliação dos mapas de distribuição de temperatura do ar nas áreas A e B confirmou a influência da morfologia na temperatura do ar em toda a região simulada. Além disso, a dependência do acesso solar e dos ventos predominantes também é notável na distribuição das temperaturas. Observa-se que as áreas com maior temperatura do ar variam conforme a insolação em diferentes momentos do dia, definida pela trajetória solar. Os fluxos de ar também indicam a direção predominante das massas de ar.

Ainda em relação aos pontos de R1 ao R6, plotou-se o perfil de temperatura do ar média por horário nos dias 30 de junho e 22 de novembro simulados (Figura 62 e Figura 73). No inverno, nota-se que as temperaturas do ar são mais baixas nos pontos com menor FVC durante o dia, mas a noite são mais elevadas. Este comportamento também foi observado nas medições em campo e está relacionado às trocas de calor por radiação de onda longa com o céu (OKE, 1982).

Nas simulações do dia 22/11/2021, na primavera, as temperaturas do ar dos pontos com maior FVC se mantiveram mais elevadas durante a noite. Sugere-se que a maior intensidade da radiação solar deste período tenha aumentado as temperaturas a um nível que a transferência de calor por radiação de onda longa a noite não foi suficiente para verificação da inversão observada no inverno. Ainda, ressalta-se que, nas medições em campo, a menor amplitude térmica da medição na área A em relação a área B foi observada em ambos os

períodos (inverno e primavera). Esta divergência entre simulação e observação pode ter sido causada pela não consideração do calor antropogênico no modelo computacional.

De maneira geral, a avaliação das temperaturas do ar dos cenários paramétricos segundo a refletância solar das superfícies urbanas, mostrou que existe influência da refletância solar. No entanto, a temperatura do ar se mostrou uma variável pouco sensível em valores absolutos às mudanças da refletância solar das superfícies do meio urbano. A comparação entre as maiores e menores temperaturas do ar registradas em cada ponto avaliado nos cenários paramétricos revelou que a maior variação foi de 0,58 °C (R4) na primavera. Salvati *et al.* (2020) também encontraram diferenças pouco expressivas na variação da temperatura do ar segundo a refletância da pavimentação e das fachadas, porém atribuíram-na à utilização do modo *full forcing* no programa ENVI-met.

A incidência de radiação solar, por sua vez, é bastante alterada conforme estas definições, e podem ter implicações importantes no conforto térmico urbano e no desempenho térmico das edificações (NAZARIAN *et al.*, 2019; SALVATI *et al.*, 2021). Para avaliar o balanço de radiação de ondas curtas e longas nas superfícies das áreas simuladas, selecionou-se dois cânions urbanos. O primeiro, cânion A, está localizado na área A em um ponto central do modelo. O segundo, denominado cânion B, localiza-se na área B, em local com um cânion mais regular e com a mesma orientação solar que o cânion A.

A análise do balanço de radiação foi feita em cada superfície separadamente pela média das variáveis na parede esquerda e direita até o nível de 3 metros, e no solo em toda a largura da rua. Foram comparados os cenários 2 e 11, que apresentam, respectivamente, a combinação de maior e menor refletância solar das superfícies de fachadas, coberturas e pavimentação.

Em relação ao balanço de radiação solar nas superfícies dos cânions urbanos A e B, nota-se que a elevada refletância solar aumentou a incidência deste tipo de radiação nas paredes e no solo. Embora o cenário 2 tenha aumentado a radiação solar total incidente nas superfícies, a radiação absorvida é que determina a sua temperatura superficial. Nas superfícies de parede, o cenário 2 representa edificações com refletância solar de 0,8, e o cenário 11 com refletância solar de 0,2. A diferença entre esta propriedade foi fundamental para garantir que, mesmo com maior incidência de radiação de onda curta, as paredes do cenário 2 absorvessem menos radiação e se mantivessem com temperaturas superficiais mais baixas do que as do cenário 11.

A comparação entre as paredes dos cânions urbanos A e B revelou que o primeiro recebe menos radiação solar total do que o segundo. O cânion A também foi mais afetado pela

refletância solar da própria edificação e do entorno, ao apresentar maior variação da radiação solar incidente e da temperatura superficial entre cenários 2 e 11. A maior influência das propriedades óticas das superfícies na área A é justificada pelo fator de visão que estas têm do entorno. No cânion B, o espaçamento e a baixa altura das edificações garantem um maior FVC. Enquanto no cânion A, o menor FVC é causado pelo maior fator de visão das edificações próximas, que propiciam a incidência de radiação solar refletida.

Nos solos dos cânions A e B, observou-se que a radiação refletida do entorno contribuiu para que a temperatura superficial do cenário 2 fosse mais elevada do que a do cenário 11. Este comportamento demonstra que o efeito benéfico da refletância solar elevada das superfícies do entorno foi compensado pelo efeito do aumento da radiação solar refletida. Isto ocorreu nas pavimentações devido à proximidade das propriedades térmicas e óticas do asfalto (refletância solar de 0,2) e do concreto (refletância solar de 0,3).

No solo do cânion urbano A, a temperatura superficial do cenário 2 foi sempre maior que a do cenário 11 no dia representativo de inverno. Na primavera, a incidência de radiação de onda curta no cenário 2 dobra de valor em relação ao cenário 11, ocasionando temperaturas superficiais bastante próximas em ambos os cenários. No solo do cânion B, que tem menor fator de visão das edificações vizinhas, a temperatura superficial do cenário 11 foi mais elevada do que a do cenário 2 nos horários com maior incidência solar de inverno e primavera.

A avaliação do quanto cada tipo de radiação representa da radiação de onda curta total incidente nas pavimentações também mostra a relevância da geometria. No cânion A, até 71% (cenário 2, inverno) da radiação solar incidente no solo foi proveniente da reflexão das superfícies do entorno. No cânion B, a porcentagem máxima de radiação refletida do entorno foi de 19%, também no cenário 2 e no período de inverno.

Por fim, avaliou-se a radiação térmica líquida das paredes e solos dos cânions A e B. As trocas de calor por radiação de onda longa constituem um mecanismo de redução das temperaturas urbanas, principalmente pela troca com o céu (OKE, 1982). A transferência de calor por radiação de onda longa é dependente do fator de visão e das temperaturas superficiais das superfícies urbanas.

A comparação entre os cânions urbanos (A e B) mostrou que, de maneira geral, a radiação térmica líquida de cada superfície é maior no cânion B. Pois, durante o período diurno, o maior FVC do cânion B permite maior incidência de radiação solar no cânion, aumentando as temperaturas superficiais. Neste momento, o efeito da refletância solar na radiação líquida de onda longa pode ser verificado conforme afeta as temperaturas superficiais.

No período noturno, em que não há influência da radiação de onda curta, observa-se que a radiação térmica líquida no cânion B se mantém maior em módulo do que no cânion A. Nas simulações de inverno e de primavera, esta intensidade foi expressa em valores negativos, indicando que as superfícies perdem calor para o entorno. Isto é, a geometria do cânion B, com maior FVC, possibilitou maior troca de calor por onda longa com o céu do que o cânion A. Entretanto, a anterior análise das temperaturas do ar mostra que, na primavera, a maior troca de calor por ondas longas com o céu da área B foi insuficiente para reduzir a temperatura do ar em níveis abaixo aos da área A.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar o microclima urbano da cidade de Balneário Camboriú, Santa Catarina, conforme o efeito da geometria e da refletância solar das superfícies que a compõe. Para isso, foram selecionadas duas áreas representativas da região central da cidade, com diferentes morfologias. A primeira, nomeada de área A, apresenta edificações adensadas e com altura média elevada. A segunda, área B, representa a área de comércio e serviços da cidade, com edificações de baixa altura e mais espaçadas entre si.

O estudo compreendeu etapas de medições da temperatura e da umidade do ar em campo e de simulações computacionais com o programa ENVI-met versão 4.4.6. As medições em campo permitiram mensurar a intensidade média da ilha de calor das áreas A e B, além possibilitar a validação dos resultados das simulações pelo ENVI-met. Ressalta-se que as ilhas de calor urbanas indicadas neste trabalho foram avaliadas apenas com base na referência do Porto de Itajaí, estação meteorológica não urbana mais próxima da região central de Balneário Camboriú. Esta avaliação não representa a totalidade do território do município, e podem haver regiões com variações mais intensas de temperatura.

A relação entre a geometria urbana e a intensidade das ilhas de calor urbanas foi observada. De maneira geral, a área B, com menor taxa de ocupação e edificações de baixa altura, apresentou maior aquecimento urbano diurno. Esta relação se deve à elevada incidência de radiação solar nesta área. A área A, por sua vez, caracterizada por cânions urbanos profundos, apresentou menor intensidade média de aquecimento urbano durante o dia, mas maior intensidade das ilhas de calor noturnas em comparação à área B. Também devido à geometria, em que o baixo fator de visão do céu (FVC) reduz as trocas de calor por onda longa com o céu durante a noite.

Em relação à fase de validação do modelo computacional com o programa ENVI-met versão 4.4.6, o modo *simple forcing* foi utilizado. O modelo foi inicializado com base nos dados climáticos referentes às estações meteorológicas de Itajaí (SC) e de Navegantes (SC), e apresentou um desempenho satisfatório na previsão do aquecimento urbano das duas áreas avaliadas. Apesar de bons resultados, notou-se que o modelo ENVI-met tende a superestimar as temperaturas do ar diurnas e superestimar as noturnas no dia de inverno simulado. O dia representativo de inverno apresentou maior amplitude térmica do que o de primavera. Sugere-se que o pior desempenho do modelo ENVI-met esteja relacionado à inabilidade de representar grandes amplitudes térmicas pelo modo *simple forcing*.

O programa ENVI-met também foi avaliado segundo os resultados do perfil vertical de temperatura do ar. A comparação dos resultados das simulações com os observados *in loco* em duas alturas (4,5 e 22,5 metros em relação ao solo) revelou que o programa mostra variação de temperatura do ar contrária às observações. Este resultado pode ser consequência do foco do modelo ENVI-met no nível do pedestre. Entretanto, reconhece-se a possível inadequação do nível de detalhamento do modelo computacional e as interferências do meio urbano nas medições em campo.

Após a validação do modelo, foram simulados 12 cenários paramétricos, com diferentes combinações de refletância solar das superfícies de cobertura, fachada e pavimentação do modelo. Os resultados das simulações destes cenários, em duas áreas representativas e duas estações do ano, permitiram avaliar o efeito da refletância solar em diferentes geometrias. Notou-se que a influência da refletância solar de cada tipo de superfície na temperatura do ar no nível do pedestre depende da geometria do local analisado.

O efeito da refletância solar das superfícies urbanas foi avaliado nas temperaturas do ar e superficial, na radiação solar incidente e absorvida, e no balanço de radiação de ondas longas. A reflexão solar é uma propriedade ótica, que em materiais opacos é complementada pela absorvância solar. A refletância solar define o quanto da radiação solar é refletida ao incidir sobre uma superfície, sendo a restante absorvida pela mesma. Assim, esta propriedade tem mais relevância quanto maior a incidência de radiação solar, que, por sua vez, depende da altura solar (período do ano) e do acesso solar (geometria do entorno). A refletância solar afeta diretamente a temperatura superficial dos elementos urbanos, e seus efeitos se estendem às temperaturas do ar e aos balanços de radiação de onda longa no período noturno.

De maneira geral, o aumento da refletância solar de uma superfície reduziu a temperatura do ar urbana. Entretanto, a variação entre a temperatura dos diferentes cenários de refletância solar não foi tão significativa em valores absolutos. A comparação entre os cenários de maior e menor refletância solar das superfícies urbanas revelou que a máxima variação de temperatura do ar foi de 0,58 °C na primavera, conforme os pontos avaliados nas áreas A e B.

O quanto a refletância solar de cada tipo de superfície influencia a temperatura do ar tem relação com a geometria. A influência da refletância solar das fachadas na temperatura do ar, por exemplo, foi maior nos pontos mais adensados, na área A. Ainda, notou-se que a refletância solar das coberturas tem efeito desprezível no nível da rua à medida em que a altura das edificações aumenta. Em áreas urbanas pouco adensadas verticalmente, as áreas de fachada têm menor relevância, pois a incidência solar nessas superfícies é baixa comparada às

coberturas e pavimentações. Esta relação foi confirmada pelas análises de pontos na área B, em que a refletância solar das coberturas e da pavimentação foram mais significativas na definição da temperatura do ar.

Para avaliar o efeito da refletância solar nos fluxos de radiação nas superfícies urbanas, foram definidos um cânion urbano em cada área, e comparados os cenários extremos de refletância. Observou-se que o cenário composto por superfícies com maior refletância aumentou a radiação de onda curta incidente nas superfícies de parede e solo do cânion urbano. Na área A, este efeito foi mais intenso devido à maior área de fachadas e às múltiplas reflexões. A radiação incidente no cenário de alta refletância solar foi até três vezes maior que a do cenário de baixa refletância solar.

Em relação às temperaturas superficiais, mesmo a elevada refletância solar tendo aumentado a radiação incidente sobre as superfícies, as paredes e pavimentação do cenário com maior refletância se mantiveram com temperaturas mais baixas do que às do cenário com menor refletância solar. Apenas na pavimentação do cânion urbano da área A que a temperatura superficial do concreto (cenário de alta refletância) foi maior que a do asfalto (cenário de baixa refletância) no inverno.

O balanço de radiação de onda longa nas paredes e solo dos cânions urbanos avaliados confirmou que, durante a noite, a perda de calor por radiação de onda longa é maior na área B, com maior FVC. Notou-se que no inverno, a perda de calor por radiação de onda longa noturna foi suficiente para que as temperaturas do ar na área B fossem menores do que as da área A, como observado em campo. Nas simulações do dia representativo da primavera esta inversão não ocorreu, e a temperatura do ar se manteve mais elevada na área B durante a noite.

Conclui-se que o microclima urbano de Balneário Camboriú é influenciado diretamente pela incidência de radiação solar sobre a morfologia urbana existente. O aumento da refletância solar das superfícies reduziu as temperaturas do ar, mas teve efeito secundário em comparação ao efeito da geometria. Isto é, as áreas A e B mostraram variação de temperatura mais elevada devido à geometria das edificações do que as variações causadas pela alteração da refletância solar nas superfícies. Porém, tendo em vista a impossibilidade de alteração nas estruturas urbanas existentes e a tendência de crescimento verticalizado das cidades, a implementação de superfícies frias é de mais fácil implantação, justificando o interesse no tema.

5.1 LIMITAÇÕES

O cronograma deste trabalho sofreu atrasos pela pandemia de covid-19. Além do período de suspensão do calendário acadêmico, a pandemia dificultou a realização de medições em campo com segurança à saúde dos envolvidos.

O estudo foi baseado apenas em períodos de 14 dias nas estações de inverno e da primavera. Durante o inverno, o período com menores temperaturas e incidência solar foi monitorado. Na primavera, por sua vez, as temperaturas do ar são mais amenas, com poucos dias com temperaturas mais elevadas.

Outras limitações envolveram a simplificação na modelagem computacional devido à falta de acesso a informações mais específicas. Em relação aos materiais empregados, por exemplo, a composição do perfil do solo e a generalização das paredes como de alvenaria. Além disso, foram desconsideradas as vegetações presentes na área B para validação. O calor antropogênico também foi desconsiderado e pode ter implicações relevantes nas variáveis microclimáticas de cada período avaliado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a superação das limitações anteriormente apresentadas. Propõe-se a realização de novas medições com instrumentação adequada para medições externas e em local mais afastado das superfícies de parede. Além disso, sugere-se o monitoramento de períodos mais quentes de verão, a fim de avaliar o desenvolvimento do microclima urbano em eventos climáticos extremos.

No presente trabalho, o pavimento asfáltico foi modelado com o valor padrão de albedo (0,2) previsto na biblioteca de dados ENVI-met. Sugere-se para futuras análises a reavaliação dos cenários com a aplicação de valores de albedo mais baixos (por exemplo, 0,1) a fim de representar outras condições de pavimentação asfáltica.

Quanto às configurações das simulações com o ENVI-met, sugere-se verificar o nível de detalhamento ideal, considerando malhas de outras dimensões, os diferentes materiais construtivos, a incorporação de calor antropogênico e a poluição no sistema. A avaliação do ENVI-met também pode ser aprimorada ao validar seus resultados com base em outras variáveis além da temperatura do ar.

O efeito das coberturas frias no perfil vertical de temperatura pode ser aprofundado. As simulações computacionais com o ENVI-met sugerem que a baixa temperatura noturna das coberturas frias tem como consequência dificultar a dispersão do ar quente em noites de estabilidade térmica. Uma vez que o perfil vertical se mostrou inadequado pelas medições em campo em diferentes alturas (4,5 e 22,5 metros em relação ao solo), sugere-se um estudo mais preciso neste tema e suas implicações.

Por fim, apesar do aparente benefício da incorporação de superfícies frias nas fachadas e pavimentações urbanas para a mitigação das ilhas de calor (redução da temperatura do ar), as consequências do aprisionamento da radiação solar nos cânions devem ser melhor exploradas no âmbito do conforto do pedestre e no desempenho térmico de edificações.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. L. de. **Map locator of Santa Catarina's Balneário Camboriú city.** [S.l.: s.n.]. Disponível em:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SantaCatarina_Municip_BalnearioCamboriu.svg.
 Acesso em: 12 abr. 2021. 8 set. 2006
- ACERO, J. A., ARRIZABALAGA, J. "Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions", **Theoretical and Applied Climatology**, v. 131, n. 1, p. 455–469, 1 jan. 2018. DOI: 10.1007/s00704-016-1971-y.
- AFIQ, W., CHE SIDIK, N. A., SAQR, K. "Effects of buildings aspect ratio, wind speed and wind direction on flow structure and pollutant dispersion in symmetric street canyons: A review", **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 7, p. 158–165, 1 jan. 2012.
- AKBARI, H., KONOPACKI, S. "Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies", **Energy Policy**, v. 33, n. 6, p. 721–756, 2005. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.001.
- AKBARI, Hashem, KOLOKOTSA, D. "Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research", **Energy and Buildings**, v. 133, p. 834–842, 1 dez. 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.067.
- ALLEGRI, J., DORER, V., CARMELIET, J. "Impact of radiation exchange between buildings in urban street canyons on space cooling demands of buildings", **Energy and Buildings**, v. 127, p. 1074–1084, 1 set. 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.073.
- ALLEGRI, J., DORER, V., CARMELIET, J. "Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings", **Energy and Buildings**, Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. v. 55, p. 823–832, 1 dez. 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.013.
- ALVES, E. D. L. "Seasonal and Spatial Variation of Surface Urban Heat Island Intensity in a Small Urban Agglomerate in Brazil", **Climate**, v. 4, n. 4, p. 61, dez. 2016. DOI: 10.3390/cli4040061.
- ALVES, E. D. L., LOPES, A. "The Urban Heat Island Effect and the Role of Vegetation to Address the Negative Impacts of Local Climate Changes in a Small Brazilian City", **Atmosphere**, v. 8, n. 2, p. 18, fev. 2017. DOI: 10.3390/atmos8020018.
- ANJOS, M., LOPES, A. "Urban Heat Island and Park Cool Island Intensities in the Coastal City of Aracaju, North-Eastern Brazil", **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1379, ago. 2017. DOI: 10.3390/su9081379.
- ARNFIELD, A. J. "Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island", **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 1, p. 1–26, 2003. DOI: 10.1002/joc.859.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 169 - Climatic Data for Building Design Standards.** 2013.

BALNEÁRIO CAMBORIÚ, P. de. **A Cidade**. c2021. Prefeitura de Balneário Camboriú. Disponível em: <https://www.bc.sc.gov.br/a-prefeitura.cfm>. Acesso em: 7 abr. 2021.

BALNEÁRIO CAMBORIÚ, P. de. **DWG - Mapa Geral e Zoneamento**. 2010. Prefeitura de Balneário Camboriú. Disponível em: https://www.bc.sc.gov.br/arquivos/conteudo_downloads/RS2HV7KS.zip. Acesso em: 10 fev. 2021.

BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S., INCROPERA, F. P., *et al.* **Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 8th Edition**. 8th edition ed. [S.l.], Wiley, 2017.

BOUYER, J., INARD, C., MUSY, M. "Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context", **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1549–1559, 1 jul. 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.010.

BOWLER, D. E., BUYUNG-ALI, L., KNIGHT, T. M., *et al.* "Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence", **Landscape and Urban Planning**, v. 97, n. 3, p. 147–155, 15 set. 2010. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.

CALLEJAS, I. J., OLIVEIRA, A. S. de, SANTOS, F. M. de M., *et al.* "Relationship between land use/cover and surface temperatures in the urban agglomeration of Cuiabá-Várzea Grande, Central Brazil", **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 5, n. 1, p. 053569, jan. 2011. DOI: 10.1117/1.3666044.

CARDOSO, R. D. S., DORIGON, L. P., TEIXEIRA, D. C. F., *et al.* "Assessment of Urban Heat Islands in Small- and Mid-Sized Cities in Brazil", **Climate**, v. 5, n. 1, p. 14, mar. 2017. DOI: 10.3390/cli5010014.

CHAI, T., DRAXLER, R. R. "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature", **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 30 jun. 2014. DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014.

CLIMATE ONE BUILDING. Arquivos Climáticos INMET 2018, 2018. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 25 mar. de 2021.

COUTTS, A. M., BERINGER, J., TAPPER, N. J. "Impact of Increasing Urban Density on Local Climate: Spatial and Temporal Variations in the Surface Energy Balance in Melbourne, Australia", **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 4, p. 477–493, 1 abr. 2007. DOI: 10.1175/JAM2462.1.

COUTTS, A. M., TAPPER, N. J., BERINGER, J., *et al.* "Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context", **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 37, n. 1, p. 2–28, 6 nov. 2012. DOI: 10.1177/0309133312461032.

CRANK, P. J., SAILOR, D. J., BAN-WEISS, G., *et al.* "Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies", **Urban Climate**, v. 26, p. 188–197, 1 dez. 2018. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.09.002.

ENVI-MET. **ENVI-met Model Architecture**. 31 maio 2019. Disponível em: <https://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>. Acesso em: 17 maio 2021.

ERELL, E., PEARLMUTTER, D., BONEH, D., *et al.* "Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons", **Urban Climate**, ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment. v. 10, p. 367–386, 1 dez. 2014. DOI: 10.1016/j.uclim.2013.10.005.

EVINS, R., DORER, V., CARMELIET, J. "Simulating external longwave radiation exchange for buildings", **Energy and Buildings**, v. 75, p. 472–482, 1 jun. 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.030.

FAVRETTO, A. P. O., SOUZA, L. C. L. "A meta-analysis over geometric modeling simplifications in ENVI-met urban climate simulation", **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 143–160, mar. 2019. DOI: 10.1590/s1678-86212019000100298.

FERREIRA, J. C., PATINO, C. M. "What does the p value really mean?", **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, p. 485–485, out. 2015. DOI: 10.1590/S1806-37132015000000215.

FERREIRA, M. J., DE OLIVEIRA, A. P., SOARES, J. "Diurnal variation in stored energy flux in São Paulo city, Brazil", **Urban Climate**, v. 5, p. 36–51, 1 out. 2013. DOI: 10.1016/j.uclim.2013.06.001.

FERREIRA, M. J., DE OLIVEIRA, A. P., SOARES, J., *et al.* "Radiation balance at the surface in the city of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations", **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1, p. 229–246, 1 jan. 2012. DOI: 10.1007/s00704-011-0480-2.

FREITAS, M. P. P. de. **Caracterização de sensores e abrigos meteorológicos de baixo custo**. 2018. TCC (Graduação) – UFRGS, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/180974>. Acesso em: 1 jun. 2021.

GOOGLE, M. **Street View: Balneário Camboriú - Santa Catarina**. fev. 2019. Disponível em: <https://goo.gl/maps/Xpct9vp7VZEwcWm8>. Acesso em: 30 abr. 2021.

GOOGLE, M. **Street View: Balneário Camboriú - Santa Catarina**. jul. 2021. Disponível em: <https://goo.gl/maps/K7c1wiFvH68gWBgC6>. Acesso em: 3 jan. 2022.

GUSSON, C. dos S. **O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios**. 2020. text – Universidade de São Paulo, 2020. DOI: 10.11606/T.16.2020.tde-29032021-104403. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-29032021-104403/>. Acesso em: 26 ago. 2021.

GUSSON, C. S., DUARTE, D. H. S. "Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil", **Procedia Engineering**, Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, 30-31 May and 1 June 2016. v. 169, p. 2–10, 1 jan. 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.10.001.

HARLAN, S. L., BRAZEL, A. J., PRASHAD, L., *et al.* "Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress", **Social Science & Medicine**, v. 63, n. 11, p. 2847–2863, 1 dez. 2006. DOI: 10.1016/j.socscimed.2006.07.030.

HEISLER, G. M., BRAZEL, A. J., "The Urban Physical Environment: Temperature and Urban Heat Islands". **Urban Ecosystem Ecology**, [S.l.], John Wiley & Sons, Ltd, 2015. p. 29–56. DOI: 10.2134/agronmonogr55.c2. Disponível em: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronmonogr55.c2>. Acesso em: 14 maio 2020.

HERATH, P., THATCHER, M., JIN, H., *et al.* "Effectiveness of urban surface characteristics as mitigation strategies for the excessive summer heat in cities", **Sustainable Cities and Society**, v. 72, p. 103072, 1 set. 2021. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103072.

IBGE, I. B. de G. e E. **Panorama Cidades - Balneário Camboriú**. 2021. IBGE Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/balneario-camboriu/panorama>. Acesso em: 7 abr. 2021.

IBGE, I. B. de G. e E. **Sinopse do censo demográfico: 2010 / IBGE**. 2011. Biblioteca IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=249230>. Acesso em: 29 jul. 2020.

INMET, I. N. de M. **Banco Nacional de Dados Meteorológicos**. 2021. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 26 nov. 2021.

INMETRO, I. N. D. M., QUALIDADE E. TECNOLOGIA. **Anexo da portaria nº 50/2013: Anexo Geral V - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtospbe/regulamentos/anexov.pdf>.

JIA, S., WANG, Y. "Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong", **Building and Environment**, v. 201, p. 107988, 15 ago. 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107988.

KOLOKOTRONI, M., REN, X., DAVIES, M., *et al.* "London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings", **Energy and Buildings**, v. 47, p. 302–311, 1 abr. 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.12.019.

KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., *et al.* "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated", **Meteorologische Zeitschrift**, p. 259–263, 10 jul. 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

KRÜGER, E., SUGA, M. "Thermal and daylighting evaluation of the effect of varying aspect ratios in urban canyons in Curitiba, Brazil", **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, n. 3, p. 033108, maio 2009. DOI: 10.1063/1.3153900.

LABCLIMA, Laboratório do Clima. **Dados meteorológicos - Estação do Porto de Itajaí**. Universidade do Vale do Itajaí. Mensagem recebida por <labclima@outlook.com> em 29 nov. 2021.

LIMA, R. G. de, BITTENCOURT, L. S. "A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural", **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, p. 425–441, out. 2017. DOI: 10.1590/2175-3369.009.sup11.ao013.

LUCIANO, A. “Dubai brasileira” em Santa Catarina reúne os prédios mais altos do país. 3 fev. 2017. Gazeta do Povo. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/dubai-brasileira-em-santa-catarina-reune-os-predios-mais-altos-do-pais-0zy3kukf0j2bziqx71qm0ts64/>. Acesso em: 8 abr. 2021.

MAESTRI, A. **Avaliação da refletância solar em coberturas no campus da Universidade Federal de Santa Catarina**. 2017. text – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: https://labeec.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/dissertacao_alexandre_maestri.pdf. Acesso em: 1 ago. 2021.

MAGGIOTTO, G., BUCCOLIERI, R., SANTO, M. A., *et al.* "Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: the Lecce (IT) case study", **Environmental Modelling & Software**, v. 60, p. 69–83, 1 out. 2014. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.06.001.

MAO, J., NORFORD, L. K., "Urban Weather Generator: Physics-Based Microclimate Simulation for Performance-Oriented Urban Planning". In: PALME, M., SALVATI, A. (Org.), **Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies**, Cham, Springer International Publishing, 2021. p. 241–263. DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4_12. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_12. Acesso em: 11 maio 2021.

MIDDEL, A., BRAZEL, A. J., GOBER, P., *et al.* "Land cover, climate, and the summer surface energy balance in Phoenix, AZ, and Portland, OR", **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 13, p. 2020–2032, 2012. DOI: 10.1002/joc.2408.

MINELLA, F. C. O., ROSSI, F. A., KRÜGER, E. "Análise do efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba", **Ambiente Construído**, v. 11, n. 1, p. 123–143, 2 nov. 2010.

MIRZAEI, P. A., HAGHIGHAT, F. "Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations", **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2192–2201, 1 out. 2010. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.04.001.

MOONEN, P., DEFRAEYE, T., DORER, V., *et al.* "Urban Physics: Effect of the microclimate on comfort, health and energy demand", **Frontiers of Architectural Research**, v. 1, n. 3, p. 197–228, 1 set. 2012. DOI: 10.1016/j.foar.2012.05.002.

MORAKINYO, T. E., LAI, A., LAU, K. K.-L., *et al.* "Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong", **Urban Forestry & Urban Greening**, Green Infrastructures: Nature Based Solutions for sustainable and resilient cities. v. 37, p. 42–55, 1 jan. 2019. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.11.010.

MUNIZ-GÄAL, L. P., PEZZUTO, C. C., CARVALHO, M. F. H. de, *et al.* "Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate", **Building and Environment**, v. 169, p. 106547, 1 fev. 2020. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106547.

NAKAMURA, Y., OKE, T. R. "Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon", **Atmospheric Environment** (1967), v. 22, n. 12, p. 2691–2700, 1 jan. 1988. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4.

NAZARIAN, N., DUMAS, N., KLEISSL, J., *et al.* "Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate", **Energy and Buildings**, v. 187, p. 144–162, 15 mar. 2019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.01.022.

NIKOLOPOULOU, M. **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach**. [S.l.: s.n.], 2004.

NOAA, N. C. for E. I. **All Observational Times Data Map**. 2021. Disponível em: <https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/alltimes>. Acesso em: 26 nov. 2021.

OKE, T. R. "The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands", **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1 dez. 1976. DOI: 10.1080/00046973.1976.9648422.

OKE, T. R. "The energetic basis of the urban heat island", **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, jan. 1982. DOI: 10.1002/qj.49710845502.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A., *et al.*, "Energy Balance". **Urban Climates**, Cambridge, Cambridge University Press, 2017a. p. 156–196. DOI: 10.1017/9781139016476.007. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/urban-climates/energy-balance/C3A24A81F7556AD54D0FC99EE2771764>.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A., *et al.*, "Introduction". **Urban Climates**, Cambridge, Cambridge University Press, 2017b. p. 1–13. DOI: 10.1017/9781139016476.002. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/urban-climates/introduction/21AA33299F24164CF3EED3DAD842FB0E>.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A., *et al.*, "Radiation". **Urban Climates**, Cambridge, Cambridge University Press, 2017c. p. 122–155. DOI: 10.1017/9781139016476.006. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/urban-climates/radiation/B01B694873B2937FA362B8225915AAA7>.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A., *et al.*, "Urban Heat Island". **Urban Climates**, Cambridge, Cambridge University Press, 2017d. p. 197–237. DOI: 10.1017/9781139016476.008. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/urban-climates/urban-heat-island/9D06471365051F619A20D2B43BAA6107>.

ONU – Organização das Nações Unidas / Population Division. 2018. **World Urbanization Prospect: the 2018 revision**. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>.

PACIFICI, M. **Urban morphology and climate: field assessment and numerical modeling of interactions**. 2019. text – Universidade de São Paulo, 2019. DOI: 10.11606/T.3.2019.tde-13082019-150128. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-13082019-150128/>. Acesso em: 5 ago. 2021.

PATZ, J. A., CAMPBELL-LENDRUM, D., HOLLOWAY, T., *et al.* "Impact of regional climate change on human health", **Nature**, v. 438, n. 7066, p. 310–317, 17 nov. 2005. DOI: 10.1038/nature04188.

PERES, L. de F., LUCENA, A. J. de, ROTUNNO FILHO, O. C., *et al.* "The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data", **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p. 104–116, 1 fev. 2018. DOI: 10.1016/j.jag.2017.08.012.

PREVE, A. R. D. **Avaliação das propriedades radiantes em pavimentos de peças pré-moldadas de concreto com incorporação de vidro reciclado e dióxido de titânio submetidas à alteração superficial por colmatção e desgaste**. 2019. 153 f. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215028>. Acesso em: 17 maio 2021.

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, 31 jul. 2011.

ROTH, M. "Review of urban climate research in (sub)tropical regions", **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1859–1873, 2007. DOI: 10.1002/joc.1591.

SALATA, F., GOLASI, I., DE LIETO VOLLARO, R., *et al.* "Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data", **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 318–343, 1 out. 2016. DOI: 10.1016/j.scs.2016.07.005.

SALVATI, A., KOLOKOTRONI, M., KOTOPOULEAS, A., *et al.* "Impact of urban albedo on microclimate: Computational investigation in London". 1 set. 2020. Accepted: 2021-02-07T09:50:17Z. **Anais [...]** [S.l.], PLEA Association, 1 set. 2020. Disponível em: <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/22215>. Acesso em: 5 maio 2021.

SALVATI, Agnese, KOLOKOTRONI, M., KOTOPOULEAS, A., *et al.* "Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates", **Building and Environment**, p. 108459, 23 out. 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108459.

SALVATI, Agnese, MONTI, P., COCH ROURA, H., *et al.* "Climatic performance of urban textures: Analysis tools for a Mediterranean urban context", **Energy and Buildings**, v. 185, p. 162–179, 15 fev. 2019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.12.024.

SANTAMOURIS, M., CARTALIS, C., SYNNEFA, A., *et al.* "On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review", **Energy and Buildings**, Renewable Energy Sources and Healthy Buildings. v. 98, p. 119–124, 1 jul. 2015. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.09.052.

SANTAMOURIS, M., DING, L., FIORITO, F., *et al.* "Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects", **Solar Energy**, Solar Thermal Heating and Cooling. v. 154, p. 14–33, 15 set. 2017. DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.006.

SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., KARLESSI, T. "Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions", **Solar Energy**, Progress in Solar Energy 2. v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 1 dez. 2011. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023.

SANTAMOURIS, M., YUN, G. Y. "Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island", **Renewable Energy**, v. 161, p. 792–807, 1 dez. 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.07.109.

SANTAMOURIS, Mat. **Environmental Design of Urban Buildings: An Integrated Approach**. 1. ed. London, Routledge, 2006. Disponível em: <https://www.routledge.com/Environmental-Design-of-Urban-Buildings-An-Integrated-Approach/Santamouris/p/book/9780367390518>. Acesso em: 29 jul. 2020.

SANTAMOURIS, Mat. "Heat Island Research in Europe: The State of the Art", **Advances in Building Energy Research**, v. 1, n. 1, p. 123–150, 1 jan. 2007. DOI: 10.1080/17512549.2007.9687272.

SARRAT, C., LEMONSU, A., MASSON, V., *et al.* "Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution", **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 10, p. 1743–1758, mar. 2006. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.11.037.

SHARMIN, T., STEEMERS, K., MATZARAKIS, A. "Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment", **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 293–308, 1 out. 2017. DOI: 10.1016/j.scs.2017.07.006.

SHINZATO, P., DUARTE, D. H. S. "Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera", **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 197–215, 6 jun. 2018.

SILVA, V. de P. R. da, DE AZEVEDO, P. V., BRITO, R. S., *et al.* "Evaluating the urban climate of a typically tropical city of northeastern Brazil", **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 161, n. 1, p. 45–59, 1 fev. 2010. DOI: 10.1007/s10661-008-0726-3.

SILVA, J. S., DA SILVA, R. M. da, SANTOS, C. A. G. "Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil", **Building and Environment**, v. 136, p. 279–292, 15 maio 2018. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.03.041.

SIMON, H., BRUSE, M., KISSEL, L. "Evaluation of ENVI-met's multiple-node model and estimation of indoor climate". 4 jul. 2017. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 4 jul. 2017.

SIMON, H., SINSEL, T., BRUSE, M. "Advances in Simulating Radiative Transfer in Complex Environments", **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5449, jan. 2021. DOI: 10.3390/app11125449.

SINSEL, T., SIMON, H., BROADBENT, A. M., *et al.* "Modeling the outdoor cooling impact of highly radiative “super cool” materials applied on roofs", **Urban Climate**, v. 38, p. 100898, 1 jul. 2021. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100898.

SKALEE, M. **Construção e apropriação do espaço público: estudo do traçado urbano do Centro de Balneário Camboriú**. 2008. 110 f. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em:

<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91530>. Acesso em: 4 nov. 2019.

SOUZA, D. O. de, ALVALÁ, R. C. dos S. "Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil", **Meteorological Applications**, v. 21, n. 2, p. 186–193, 2014. DOI: 10.1002/met.1340.

STATHOPOULOU, E., MIHALAKAKOU, G., SANTAMOURIS, M., *et al.* "On the impact of temperature on tropospheric ozone concentration levels in urban environments", **Journal of Earth System Science**, v. 117, n. 3, p. 227–236, 2008.

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, 25 maio 2012. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

TALEGHANI, M., BERARDI, U. "The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto", **Urban Climate**, v. 24, p. 449–459, 1 jun. 2018. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.007.

TOPARLAR, Y., BLOCKEN, B., MAIHEU, B., *et al.* "A review on the CFD analysis of urban microclimate", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1613–1640, 1 dez. 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.248.

TSOKA, S., TSIKALOUDAKI, A., THEODOSIOU, T. "Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review", **Sustainable Cities and Society**, v. 43, p. 55–76, 1 nov. 2018. DOI: 10.1016/j.scs.2018.08.009.

UGEDA JÚNIOR, J. C., AMORIM, M. C. de C. T. "Reflexões acerca do sistema clima urbano e sua aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas", **Revista do Departamento de Geografia**, p. 160–174, 24 out. 2016. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.119402.

VÁZQUEZ-CANTELI, J. R., ULYANIN, S., KÄMPF, J., *et al.* "Fusing TensorFlow with building energy simulation for intelligent energy management in smart cities", **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 243–257, 1 fev. 2019. DOI: 10.1016/j.scs.2018.11.021.

VILLENA DEL CARPIO, J. A., MARINOSKI, D. L., TRICHÊS, G., *et al.* "Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field", **Solar Energy**, v. 134, p. 72–81, 1 set. 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.04.044.

WANG, Y., BERARDI, U., AKBARI, H. "Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada", **Energy and Buildings**, SI: Countermeasures to Urban Heat Island. v. 114, p. 2–19, 15 fev. 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.046.

WATKINS, R., PALMER, J., KOLOKOTRONI, M., *et al.* "The London Heat Island: results from summertime monitoring", **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 23, n. 2, p. 97–106, maio 2002. DOI: 10.1191/0143624402bt031oa.

WEBER, F. da S., MELO, A. P., MARINOSKI, D. L., *et al.* **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus.** Florianópolis, LabEEE, ago. 2017.

WILLMOTT, C. J., MATSUURA, K. "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance", **Climate Research**, v. 30, n. 1, p. 79–82, 19 dez. 2005. DOI: 10.3354/cr030079.

YANG, Xiaoshan, ZHAO, L., BRUSE, M., *et al.* "An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments", **Energy and Buildings**, v. 54, p. 243–251, 1 nov. 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.042.

YANG, Xinyan, LI, Y. "The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature", **Building and Environment**, v. 90, p. 146–156, 1 ago. 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.037.

Atualizações de citação automática estão desativadas. Para ver a bibliografia, clique em Atualizar na aba do Zotero.

APÊNDICE A - CONSTRUÇÃO DO ABRIGO METEOROLÓGICO

Com o objetivo de proteger o termo-higrômetro da radiação solar e precipitações, foi construído um abrigo meteorológico de baixo custo. Inspirado pelo “modelo Pratos” de Freitas (2018), o abrigo foi adaptado para acolher o termo-higrômetro HOBO Data Logger modelo MX1101, da fabricante Onset,. O conjunto equipamento e abrigo meteorológico foi fixado sobre uma base de chão, para facilitar a instalação, evitando intervenções nos locais de instalação.

As medições durante o inverno revelaram a insuficiência do abrigo à exposição da radiação solar direta. Assim, foi acrescentado um dispositivo de proteção adicional nas medições durante a primavera. O dispositivo complementar tem como principal elemento de sombreamento uma malha vazada de plástico, usualmente utilizada como jogo americano, cujo detalhe é mostrado na Figura A-3. Optou-se por um elemento vazado de sombreamento para facilitar a circulação do ar pelo abrigo. Ainda por este motivo, o dispositivo foi construído mantendo certo distanciamento (aproximadamente 6 cm) do abrigo original. Os detalhes da construção do abrigo, do dispositivo de proteção e da base utilizada são apresentados a seguir.

MATERIAIS

Abrigo meteorológico:

- 7 pratos de plástico (mini-prato fundo em plástico – com 14 cm de diâmetro e 2,2 cm de altura) (Figura A-1);
- 3 hastes/barras roscadas de 3/16” com 20 cm de comprimento (Figura A-1);
- 6 arruelas-porcas sextavada 3/16” (Figura A-1);
- 36 cm de mangueira de nível (Figura A-1);
- Furadeira broca 3/16”;
- Furadeira serra-copo 45mm;
- Tinta spray branca brilhante;
- Abraçadeiras de nylon.

Figura A - 1 - Materiais utilizados para a montagem do abrigo

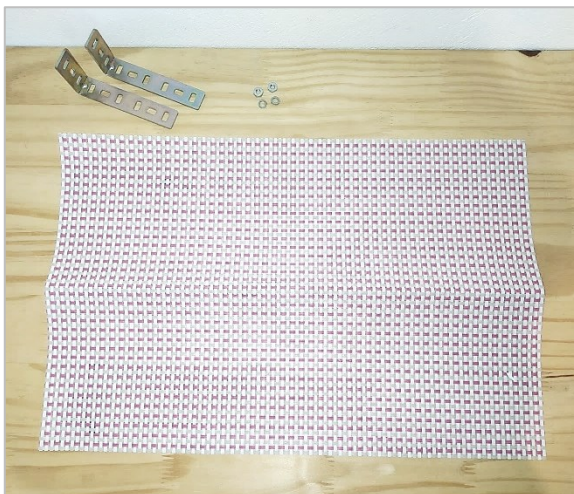


Fonte: autora.

Proteção/sombreamento adicional:

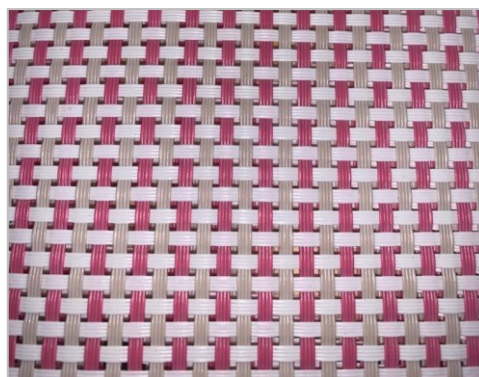
- 2 chapas dobrada de aço perfuradas (Figura A-2)
- 2 arruelas-porcas (Figura A-2)
- Jogo americano plástico vazado (45 cm x 30 cm) (Figura A-2 e detalhe na Figura A-3)
- Abraçadeiras de nylon

Figura A - 2 - Materiais utilizados para a montagem do dispositivo de proteção adicional



Fonte: autora.

Figura A - 3 - Detalhe da malha do jogo americano



Fonte: autora.

MODO DE CONSTRUÇÃO

1. Com a furadeira serra-copo de 45mm, furar o centro de 5;
2. Ainda com a furadeira, com a broca de 3/16", furar em 3 pontos ao redor da abertura de 45mm;
3. Utilizando o primeiro prato furado como modelo, marcar o local dos furos nos demais pratos. Perfurar todos os pratos com os 3 furos marcados;
4. Cortar a mangueira de nível em 18 partes de 2 cm cada;
5. Caso os pratos não sejam de plástico branco, pintar os pratos perfurados com tinta multisuperfícies de cor branca;
6. [MONTAGEM] Começar a montagem passando as hastes roscadas pelos furos de um prato sem abertura de 45mm para a base;
7. Fixar o prato base nas barras com arruelas e porcas;
8. Passar a mangueira de nível com 2 cm em cada haste acima do prato-base; seguir a montagem intercalando as mangueiras e os pratos com abertura de 45mm.
9. Antes de finalizar, fixar o termo-higrômetro com abraçadeiras de nylon às hastes do abrigo meteorológico;
10. Finalizar a montagem passando os outros 2 pratos sem abertura juntos (sem espaçamento com a mangueira) e fixando a montagem com os conjuntos de arruelas e porcas (Figura A-4);

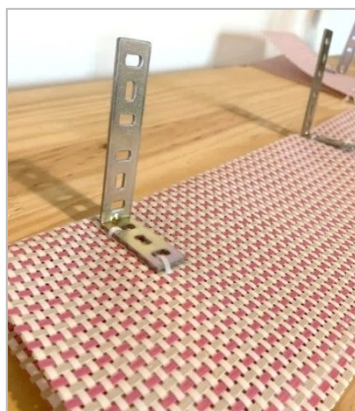
Figura A - 4 - Abrigo meteorológico



Fonte: autora.

11. [PROTEÇÃO SOLAR EXTRA] Dobrar o jogo americano de plástico ao meio no sentido da largura (30 cm), resultando em uma proteção de 45 cm x 15 cm;
12. Fixar, a aproximadamente 7 cm da extremidade do jogo americano, a chapa de aço dobrada ao jogo americano dobrado com abraçadeiras de nylon (Figura A-5);

Figura A - 5 - Detalhe da montagem da proteção adicional



Fonte: autora.

13. Repetir o passo 12 na extremidade oposta do jogo americano;
14. Firmar as chapas de aço dobradas à barra roscada atravessando a perfuração da chapa pela barra e fixando-as com arruelas de pressão e porcas 3/16" (Figura A-6).

Figura A - 6 - Abrigo meteorológico com o dispositivo de proteção adicional



Fonte: autora.

Base:

- Vaso
- Tubo PVC 32mm com 150 cm de comprimento
- Cap PVC 32mm
- Chapa de aço perfurada
- Parafuso
- Arruelas-porcas
- Areia e brita

A base do abrigo foi construída firmando o abrigo meteorológico por meio das barras roscadas à uma chapa de aço perfurada com as arruelas e porcas. A chapa de aço, por sua vez, foi afixada ao cap de PVC com um parafuso. O cap de PVC conecta-se ao tubo de PVC, cuja base consiste em um vaso completo com areia e brita para fazer peso. O abrigo meteorológico com a base é apresentado na Figura A-7 a seguir.

Figura A - 7 - Equipamento instalado a) no ponto A2 no inverno, b) no ponto B na primavera



Fonte: autora.