

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**  
**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**



Dissertação de mestrado

**EFEITOS DO ADENSAMENTO CONSTRUTIVO SOBRE MICROCLIMAS**  
**URBANOS: estudo em uma cidade de porte médio no Sul do Brasil**

Mônica Machado dos Santos

Pelotas, agosto de 2023

**Mônica Machado dos Santos**

**EFEITOS DO ADENSAMENTO CONSTRUTIVO SOBRE MICROCLIMAS  
URBANOS: estudo em uma cidade de porte médio no Sul do Brasil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Lisandra Fachinello Krebs

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

S237e Santos, Mônica Machado dos

Efeitos do adensamento construtivo sobre microclimas urbanos : estudo em uma cidade de porte médio no sul do Brasil / Mônica Machado dos Santos ; Lisandra Fachinello Krebs, orientadora. — Pelotas, 2023.

131 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Microclimas urbanos. 2. Conforto térmico de pedestres. 3. Adensamento construtivo. 4. Clima subtropical úmido. 5. Cidades de médio porte. I. Krebs, Lisandra Fachinello, orient. II. Título.

CDD : 720

## **Agradecimentos**

À minha família, pelo incentivo, ajuda e apoio.

À minha orientadora, Lisandra Fachinello Krebs, pela orientação, disponibilidade, apoio e incentivo a novas experiências.

À colega do grupo de pesquisa, Raischa Holz Ribak, pela parceria de trabalho e trocas de conhecimentos.

Aos professores membros da banca de qualificação, Denise Helena Silva Duarte, Maurício Couto Polidori e Lígia Maria Chiarelli, pelas pertinentes observações que engrandeceram este estudo.

À Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal de Pelotas pela acolhida e oportunidade de novos conhecimentos e experiências.

Obrigada!

## Resumo

SANTOS, Mônica Machado dos. **EFEITOS DO ADENSAMENTO CONSTRUTIVO SOBRE MICROCLIMAS URBANOS**: estudo em uma cidade de porte médio no Sul do Brasil. Orientadora: Lisandra Fachinello Krebs. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

Esta pesquisa teve como objetivo analisar os efeitos do aumento do adensamento construtivo sobre o conforto térmico de pedestres em espaços abertos na cidade de Bagé - RS. O aumento do adensamento construtivo, induzido por agentes como o mercado imobiliário, altera os microclimas urbanos que, somados aos cenários de projeções de mudanças climáticas em escala global, interferem sobre o conforto térmico de pedestres em espaços abertos. A investigação deu - se pela necessidade de estudos preditivos sobre os efeitos de alterações morfológicas nos microclimas urbanos em cidades de médio porte brasileiras. Bagé é uma cidade de médio porte localizada no Sul do Brasil e teve um considerável aumento da densidade construída na última década (2011-2021), principalmente na zona central. O clima da cidade é o subtropical úmido com verões quentes (Cfa), com elevadas amplitudes térmicas anuais e temperaturas baixas no inverno. A metodologia desta pesquisa é quali-quantitativa, dividida em quatro etapas, sendo a primeira de análise urbana e histórica de Bagé para definição do cenário base deste estudo e de um prognóstico da densidade construída para 2060. Na segunda etapa definiu-se os cenários com aplicação do prognóstico sobre o cenário base, combinado a dois patamares de mudanças climáticas globais, e outros quatro cenários urbanos hipotéticos. A terceira etapa consistiu na modelagem e simulação dos microclimas dos cenários urbanos estabelecidos para um dia extremo de verão e de inverno. Na quarta etapa analisou-se os resultados de Temperatura Radiante Média (TRM) nas calçadas adjacentes e no interior da quadra central do recorte urbano, para os diferentes cenários de adensamento analisados. Para o entendimento dos efeitos sobre o conforto térmico, aplicou-se o índice *Physiological Equivalent Temperature* (PET) aos cenários base e prognósticos. O aumento do adensamento construtivo através da inserção de edifícios de três pavimentos reduziu modestamente as TRM em alguns horários, não gerando impactos negativos ao conforto térmico nas situações analisadas. No verão, observou-se aumento do desconforto térmico por calor do cenário base para o cenário de prognóstico com aquecimento da temperatura do ar em patamar elevado. Esses resultados alertam para os efeitos do aquecimento do ar, decorrente das projeções de mudanças climáticas em escala global.

Palavras-chave: Microclimas urbanos. Conforto térmico de pedestres. Adensamento construtivo. Clima subtropical úmido. Cidades de médio porte.

## Abstract

SANTOS, Mônica Machado dos. **EFFECTS OF BUILDING DENSITY ON MICROCLIMATES:** study in a medium size Southern Brazilian city. Advisor: Lisandra Fachinello Krebs. 2023. 124 f. Dissertation (Masters in Architecture and Urban Planner) – Faculty of Architecture and Urban Planner, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

This study aimed to analyze the effects of building density increase in pedestrian thermal comfort on open spaces in Bagé Brazilian city. The building density increase, induced by agents such as the real estate market, changing urban microclimates that, cumulated with climate change scenarios on a global scale, interfere with pedestrian thermal comfort in open spaces. The investigation has been because of the need for predictive studies about the effects of urban morphology in urban microclimates in medium size Brazilian cities. Bagé is a medium size Southern city that increased building density considerably in the last decade (2011-2021), mainly in the Central zone. It has a subtropical humid climate with hot summers (Cfa), wide temperature variations in the year, and low temperatures in the winter. The methodology of this research is quali-quantitative, divided into four stages. In the first stage, the scenario base of this study and a building density prognosis to 2060 was defined based on a historical and urban analysis of Bagé. In the second, the scenarios applying the prognosis on scenario base accumulated with two levels of global climate changes and four urban hypothetical scenarios. The next stage consisted of the modeling and the simulation of the urban microclimate scenarios, which ran to extreme summer and winter days. In the last step, the Mean Radiant Temperature results were analyzed on the sidewalk and interior block for all scenarios. The Physiological Equivalent Temperature (PET) index was applied to base and prognosis scenarios to understand their effects on thermal comfort. The building density increase, by inserting buildings with three storeys, reduced the Mean Radiant Temperature modestly in some schedules. It did not cause adverse impacts on thermal comfort in analyzed situations. In the summer, increased heat thermal stress was observed from scenario base to prognosis with increased air temperature at a high level. Those results alert us to air heating effects caused by predicted climate changes on a global scale.

Keywords: Urban microclimates. Pedestrian thermal comfort. Building density. Subtropical humid climate. Medium size cities.

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Quarteirões edificados com coeficiente de aproveitamento igual a 1.3. .	19
Figura 2.2: Quadras urbanas ilustradas em The Urban Task Force (2003). .....	20
Figura 2.3: Balanço energético urbano .....	22
Figura 2.4: Ilustração das escalas e camadas verticais climáticas. ....	23
Figura 2.5: Cânion urbano de proporção H/W (altura média das edificações/largura da via) de 0.33. ....	24
Figura 2.6: Fluxo do vento em diferentes cenários urbanos: a) edificação isolada (relação H/W até 0.4); b) cenário urbano com relação H/W entre 0.4 e 0.7; e c) cenário urbano com menor distanciamento entre os edifícios, barrando o fluxo de vento. ....	27
Figura 2.7: Ferramenta Spaces do ENVI-met.....	34
Figura 3.1: Localização da cidade de Bagé.....	38
Figura 3.2: Paisagem do bioma Pampa .....	39
Figura 3.3: Temperaturas médias do ar e precipitações acumuladas mensais conforme as Normais climatológicas (1991-2020) para Bagé. ....	39
Figura 3.4: Foto aérea das Av. Tupy Silveira e Marechal Floriano no Centro de Bagé .....	40
Figura 3.5: Etapas deste estudo .....	42
Figura 3.6: Fluxograma da etapa 1. ....	44
Figura 3.7: Macrozonas de Bagé conforme PDDUA. ....	45
Figura 3.8: Mapeamento dos edifícios com três ou mais pavimentos, construídos entre 2011 e 2021. ....	46
Figura 3.9: Mapeamento para definição recorte urbano (cenário base do estudo). ..	48
Figura 3.10: Fotos da quadra central do recorte.....	49
Figura 3.11: Fotos das calçadas de pisos cimentício em (a) e (b) e das vias carroçáveis com calçamento de pedra em (c) e coberta por asfalto acima do calçamento em (d). ....	50
Figura 3.12: Modelagem tridimensional das edificações e quadras do recorte em 2021.....	51
Figura 3.13: Fluxograma da etapa 2. ....	53
Figura 3.14: Lotes incluídos no sorteio e os sorteados.....	55
Figura 3.15: Modelagem tridimensional dos cenários base e prognóstico.....	56
Figura 3.16: Distintas formas e ocupações de edifícios abordados por The Urban Task Force (2003). ....	57
Figura 3.17: Modelagem tridimensional dos cenários 1A; 1B; 2 e 3. ....	57
Figura 3.18: a) traçado de via no eixo Leste-Oeste; b) traçado de via no eixo norte-sul e c) desenho final da quadra. ....	58
Figura 3.19: Fluxograma da etapa 3. ....	60
Figura 3.20: Desenho dos edifícios, quadras e vias do cenário base. ....	61
Figura 3.21: Recorte aplicado aos cenários modelados, exemplificado no cenário base.....	62

Figura 3.22:Quadro síntese das simulações computacionais.....	64
Figura 3.23: Dados de saída de Radiação Solar Direta (a) e TRM (b) das simulações pelo método Full forcing e Simple forcing.....	65
Figura 3.24: Dados horários de entrada da temperatura do ar e da umidade relativa para verão (a) e inverno (b).....	66
Figura 3.25: Radiação: Global Horizontal e Difusa Horizontal do TMY e alcançadas no ENVI-guide.....	68
Figura 3.26:Temperaturas horárias do ar projetadas para 2065 no período de: a) verão (24 - 25 de janeiro), e b) inverno (18 - 19 de junho) .....	71
Figura 3.27: Fluxograma da etapa 4. ....	72
Figura 3.28: Área (em grids) a partir da qual foram extraídos os resultados de TRM e PET, exemplificada no cenário base. ....	73
Figura 44.1: Trajetória solar em janeiro para latitude 31° Sul. ....	77
Figura 44.2: Trajetória solar em junho para latitude 31° Sul. ....	78
Figura 4.3: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) no interior da quadra dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão. ....	79
Figura 4.4: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) no interior da quadra dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno. ....	79
Figura 4.5: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	80
Figura 4.6: sombreamento do dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	81
Figura 4.7: TRM no dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1B e 3. ....	82
Figura 4.8: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Leste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão. ....	82
Figura 4.9: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Leste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.....	83
Figura 4.10: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 8:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	84
Figura 4.11: sombreamento do dia 18 de junho, às 9:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	85
Figura 4.12: sombreamento do dia 18 de junho, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	85
Figura 4.13: Direção e velocidade do vento (h=1.5m) no dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3. ....	86
Figura 4.14: TRM (h=1.5m) no dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	87
Figura 4.15: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Oeste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão. ....	88
Figura 4.16: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Oeste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.....	88

Figura 4.17: Direção e velocidade do vento (h=1.5m) no dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3. ....	90
Figura 4.18: TRM (h=1.5m) no dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	90
Figura 4.19: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Norte dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão. ....	91
Figura 4.20: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Norte dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.....	91
Figura 4.21: sombreamento do dia 18 de junho, às 11:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.....	92
Figura 4.22: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Sul dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão.....	93
Figura 4.23: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Sul dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.....	94
Figura 4.24: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro no interior da quadra dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	98
Figura 4.25: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 8:00h, nos cenários base e prognóstico (A e B). ....	99
Figura 4.26: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho no interior da quadra dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	99
Figura 4.27: sombreamento do dia 18 de junho, às 15:00h, nos cenários base e prognóstico (A e B). ....	100
Figura 4.28: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Leste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	101
Figura 4.29: TRM no dia 24 de janeiro (h=1.5m), às 15:00h, nos cenários: base, prognósticos A e B.....	102
Figura 4.30: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: base e prognóstico (A e B) .....	102
Figura 4.31: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Leste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	103
Figura 4.32: sombreamento do dia 18 de junho, às 9:00h, nos cenários: base e prognóstico. ....	103
Figura 4.33: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Oeste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	104
Figura 4.34: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 11:00h, nos cenários: base e prognóstico (A e B). ....	105
Figura 4.35: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Oeste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	106
Figura 4.36: sombreamento do dia 18 de junho, às 16:00h, nos cenários: base e prognóstico. ....	106
Figura 4.37: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Norte dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	107

Figura 4.38: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Norte dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	108
Figura 4.39: TRM no dia 18 de junho (h=1.5m), às 13:00h, nos cenários: base, prognósticos A e B. ....	109
Figura 4.40: sombreamento do dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: base e prognóstico. ....	109
Figura 4.41: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Sul dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	110
Figura 4.42: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Sul dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B. ....	111

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Características principais deste estudo. ....	37
Tabela 3.2 - Programas utilizados em cada etapa .....	42
Tabela 3.3 - Taxas de ocupação, densidades construídas e prognóstico de adensamento para 2060. ....	52
Tabela 3.4 - Taxas de ocupação, densidades construídas e prognóstico de adensamento para 2060. ....	59
Tabela 3.5- Materiais especificados nos cenários e suas propriedades de absorvância e emissividade. ....	61
Tabela 3.6 - Dimensões dos modelos dos cenários exploratórios. ....	63
Tabela 3.7- Dados de entrada do vento, da radiação solar e do solo. ....	67
Tabela 3.8 - Coeficiente de correlação (R) nas simulações de verão e de inverno dos cenários 1A, 1B, 2, 3 e base. ....	69
Tabela 3.9 - Período, localização e horários dos resultados no índice PET dos cenários base, prognóstico A e B. ....	74
Tabela 3.10 - Especificações inseridas no programa Rayman. ....	75
Tabela 3.11 - Faixas de conforto térmico PET. ....	76
Tabela 4.1 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão no interior da quadra. ....	79
Tabela 4.2 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Leste. ....	83
Tabela 4.3 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Oeste. ....	88
Tabela 4.4 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Norte. ....	92
Tabela 4.5 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Norte. ....	94
Tabela 4.6 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão. ....	96
Tabela 4.7 - TRM média das 24 horas das simulações de verão e de inverno. ....	112
Tabela 4.8 - PET nos cenários base, prognóstico A e B no verão. ....	114
Tabela 4.9 - PET nos cenários base, prognóstico A e B no inverno. ....	116

## Lista de abreviaturas e siglas

Aw	Clima tropical de savana
AR5	<i>Fifth Assessment Report</i> - Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
Cfa	Clima subtropical úmido com verões quentes
Cfb	Clima temperado úmido com verões amenos
C.A.	Coeficiente de aproveitamento
I.A.	Índice de aproveitamento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPHAE	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico do Estado do Rio Grande do Sul
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico do Estado do Rio Grande do Sul
H/W	Proporção entre a altura média das edificações e a largura das vias
PDDUA	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental
PET	<i>Physiological Equivalent Temperature</i> - Temperatura fisiológica equivalente
Q*	Radiação solar
Q <sub>E</sub>	Calor latente - energia térmica que provoca alteração de temperatura, sem mudar o estado físico
Q <sub>H</sub>	Calor sensível - energia térmica que provoca mudança de estado físico, sem alterar a temperatura
Q <sub>F</sub>	Calor antropogênico - fluxo de calor de origem humana
$\Delta Q_A$	Calor por convecção - transferência de calor pelo movimento de fluidos
$\Delta Q_s$	Calor armazenado
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i> - Patamar de Concentração de Gases
T.O.	Taxa de ocupação
TRM	Temperatura Radiante Média
TRY	<i>Test Reference Year</i> - Ano Climático de Referência
UBL	<i>Urban boundary layer</i> - Camada limite urbana
UCL	<i>Urban canopy layer</i> - Camada de dossel urbano
UTCI	<i>Universal Thermal Climate Index</i> - Índice de clima térmico universal
ZAP	Zona de Adensamento Prioritário

## Sumário

1. Introdução .....	13
2. Revisão de literatura.....	17
2.1 Espaços urbanos .....	17
2.2 Microclimas urbanos .....	21
2.3 Conforto térmico de pedestres em espaços urbanos abertos .....	30
2.4 Utilização do programa ENVI-met em experimentações microclimáticas .....	33
3. Materiais e métodos de pesquisa .....	36
3.1 Estratégia de pesquisa.....	37
3.1.1 Caracterização da cidade de Bagé-RS .....	38
3.1.2 Etapas da pesquisa .....	41
3.2 Etapa 1: Cenário base .....	43
3.3 Etapa 2: Definição de cenários urbanos exploratórios .....	53
3.4 Etapa 3: Simulações computacionais dos microclimas. ....	59
3.5 Etapa 4: Análise dos microclimas e da sensação térmica humana. ....	72
4. Análise e discussão dos microclimas simulados.....	77
4.1 Cenários hipotéticos .....	78
4.1.1 Interior da quadra .....	78
4.1.2 Calçada Leste.....	82
4.1.3 Calçada Oeste .....	87
4.1.4 Calçada Norte.....	91
4.1.5 Calçada Sul .....	93
4.1.6 TRM médias e máximas .....	95
4.2 Cenários base, prognósticos A e B .....	97
4.2.1 Interior da quadra .....	97
4.2.2 Calçada Leste.....	100
4.2.3 Calçada Oeste .....	104
4.2.4 Calçada Norte.....	107
4.2.5 Calçada Sul .....	109
4.2.6 TRM médias e máximas .....	112
4.2.7 Índice PET .....	114
4.3 Recomendações de diretrizes urbanísticas.....	117
5. Considerações finais .....	118
Referências.....	121

Apêndice 1: Publicações oriundas da Dissertação .....	131
---	-----

# 1.Introdução

Em centros urbanos brasileiros médios a grandes, zonas consideradas de interesse econômico são foco do mercado imobiliário, estimulando o aumento da densidade construída. A alteração da morfologia urbana interfere nas variáveis ambientais locais como a direção e a velocidade dos ventos, a temperatura e a umidade do ar e a Temperatura Radiante Média<sup>1</sup> (TRM). Como consequência dessa alteração nas variáveis ambientais, os microclimas são modificados, influenciando na sensação de conforto térmico ao nível do pedestre em espaços urbanos abertos.

A estreita relação entre o mercado imobiliário e as transformações na morfologia urbana é observada em diferentes cidades brasileiras, principalmente nas capitais. Carvalho (2008) cita um exemplo em São Paulo, no qual a valorização de terrenos e o interesse pelo maior aproveitamento do solo, amparados pela legislação urbanística municipal, resultaram na expressiva construção de torres residenciais isoladas nos bairros Itaim Bibi e Higienópolis e de conjuntos de torres na Vila Leopoldina. Gusson (2020) identificou que a influência de características como as alturas das edificações, a orientação solar e a taxa de ocupação dos lotes, quando somadas, podem alterar a TRM em até 14°C, no mês de abril, em simulações computacionais para São Paulo, clima subtropical úmido com verões amenos - “Cfb”, conforme classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006).

Santos e Sauer (2020), em bairros próximos a orla da Praia de Itaparica em Vila Velha - ES; Aguiar et al. (2017), no bairro Meireles em Fortaleza - CE; e Barbosa et al. (2014), em Copacabana, Rio de Janeiro, analisaram o efeito do aumento da densidade construída por meio da verticalização nos recortes urbanos selecionados. Os três estudos constataram alterações nos microclimas e no conforto térmico de pedestres com alteração da temperatura do ar, da velocidade e da direção dos ventos, em decorrência do sombreamento das edificações e da redução da permeabilidade para ventilação (devido à proximidade entre os prédios).

---

<sup>1</sup> Consiste na temperatura uniforme de um invólucro imaginário no qual a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no invólucro não uniforme real (ISO 7726, 1998).

Em cidades de médio porte também foram observadas alterações nos microclimas em consequência do adensamento construtivo. Em Passo Fundo - RS, (clima subtropical úmido com verões quentes - "Cfa"), Morsch e Silvano (2017) compararam as medições climáticas entre o centro da cidade (mais denso) e um bairro arborizado (menos denso), no verão. Os autores constataram o aumento de, aproximadamente, 2°C na temperatura do ar e a redução de 8% na umidade relativa do ar no centro da cidade, em relação ao bairro menos denso. Em Jacareí - SP, cidade de médio porte como Passo Fundo - RS, Cavicchioli et al. (2021) contam que as políticas públicas municipais desconsideram questões climáticas constatadas, como a existência de ilhas de calor<sup>2</sup>, embora seja de conhecimento de autoridades políticas municipais.

Os microclimas urbanos estão em contínuas mudanças, em decorrência de alterações na morfologia urbana, mas também devido às mudanças climáticas globais. Conforme o sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura da superfície global foi elevada em, aproximadamente, 1.1°C do período de 2011–2020 em relação às décadas de 1850–1900. O relatório afirma que em regiões que ocorreram eventos extremos de elevação da temperatura do ar foram registradas morbidade e mortalidade humana.

Romero et al. (2019) ressalta a necessidade de atenção aos centros urbanos, devido às alterações climáticas que interferem no bem estar da população e no uso dos espaços abertos. Proporcionar espaços urbanos agradáveis é essencial para incentivar atividades físicas e permanência prolongada (GEHL, 2014; FARR, 2013). A caracterização dos espaços públicos e privados e a forma das edificações e dos vazios urbanos interferem não apenas no microclima, mas também na qualidade de vida (SILVA et al., 2017).

Dado que a ação do mercado imobiliário em centros urbanos de médio porte no Sul do Brasil – como Bagé – acarretam um aumento do adensamento construtivo e, ainda, somam-se a isso cenários de mudanças climáticas em escala global, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de estudos preditivos dos efeitos deste contexto sobre o conforto térmico em espaços urbanos abertos, o que está diretamente relacionado à qualidade de vida das pessoas.

---

<sup>2</sup> Fenômeno caracterizado pela "condição microclimática em que a temperatura do ar está mais elevada, a umidade relativa do ar está mais baixa e que existe a alteração na velocidade dos ventos, regime de chuvas, entre outros" (ROMERO et al., 2019, p.13).

Deve, ainda, atentar-se que cada região territorial tem características climáticas locais. Assim, é necessária a realização de estudos locais, pois cada região requer diferentes estratégias para proporcionar conforto térmico aos pedestres. A Região Sul do Brasil apresenta uma singularidade em relação às demais: o inverno com temperaturas mais frias. Contudo, pesquisas que abordam os efeitos do adensamento construtivo sobre os microclimas urbanos, no verão e no inverno, raramente se destinam à Região Sul (predominantemente de clima subtropical úmido com verões quentes - "Cfa").

Com base nas pesquisas que demonstraram a influência da morfologia urbana sobre os microclimas, este estudo foca nos efeitos do aumento da densidade construída (com aplicação de prognóstico) junto às projeções de mudanças climáticas em cidades médias no Sul do Brasil. Cidades de médio porte, como Bagé-RS, são potenciais objetos de estudo devido ao seu estágio de adensamento construtivo (mais modesto), ainda passíveis de terem desenvolvimento urbano orientado por estudos prévios e atento às condições e implicações climáticas. Estudos em cidades médias diferem-se de pesquisas para grandes centros urbanos, pois oferecem maiores possibilidades de intervenção na realidade, a partir da integração de alternativas mitigadoras ao planejamento urbano.

A motivação desta pesquisa parte do interesse de expandir os estudos em conforto térmico à escala urbana. O trabalho desenvolvido buscou responder à seguinte pergunta: "Quais serão os efeitos do aumento do adensamento construtivo, decorrente do crescimento intraurbano, sobre os espaços abertos de cidades de médio porte no Sul do Brasil para as próximas décadas?".

Esta pesquisa teve por objetivo analisar os efeitos do aumento do adensamento construtivo sobre o conforto térmico de pedestres em espaços abertos na cidade de Bagé-RS (clima "Cfa"). O estudo busca contribuir com a discussão dos efeitos da morfologia urbana sobre os microclimas de regiões subtropicais. Bagé foi selecionada para o estudo por ser uma cidade de médio porte que apresentou aumento da densidade construída na última década e tem grande amplitude térmica durante o ano, conforme dados das estações meteorológicas locais. A pesquisa teve os seguintes objetivos específicos:

- Compreender a influência de distintas formas de **adensamento construtivo** sobre o microclima em uma zona central da cidade de Bagé;

- Identificar as diferenças destes efeitos do adensamento para o conforto térmico nos períodos de **verão** e de **inverno**;
- Estimar, **de forma conjunta**, os efeitos do **aumento do adensamento construtivo e de projeções de mudanças climáticas globais** sobre o conforto térmico, ao nível do pedestre, em espaços abertos.

## 2.Revisão de literatura

Este capítulo apresenta e discute estudos anteriores, organizados em quatro seções, sendo que na seção 2.1 conceitua-se e caracteriza-se as cidades médias e os espaços urbanos abertos. Na segunda seção (2.2) busca-se compreender os microclimas urbanos, a partir de teorias e de estudos semelhantes a este, que embasam e auxiliam na compreensão das simulações deste estudo. As seções 2.3 e 2.4 abordam o programa ENVI-met e os índices de conforto térmico, contextualizando a utilização deles em estudos da área e embasando as escolhas para esta pesquisa.

### 2.1 Espaços urbanos

Andrade e Lodder (1979), classificaram cidades com população entre 50 mil e 250 mil habitantes como médias. Posteriormente, Pereira e Furtado (2011) definiram que cidades com população entre 100 mil a 500 mil habitantes vêm sendo consideradas como médias nas últimas décadas. Spósito (2010) aponta que o termo “cidades médias” associa-se não só ao tamanho da cidade, mas também à sua classificação hierárquica e importância na constituição de redes urbanas. Mais recentemente, Saccaro Junior et al. (2022) complementam que a densidade demográfica não traduz as diversas funções de uma cidade e suas influências em relação às demais cidades brasileiras.

O IBGE (2020) classificou os municípios brasileiros em cinco níveis de hierarquias e vínculos entre as cidades: Metrópoles; Capitais Regionais; Centros Sub-Regionais; Centros de Zona e Centros Locais. Nessa classificação, Bagé é categorizada como Centro Sub-Regional A (terceiro nível hierárquico): possui atividades de gestão menos complexas com áreas de influência de menor extensão que as das Capitais Regionais e população maior que 100 mil habitantes.

Cidades capitalistas são *“um produto social resultado de ações acumuladas através do tempo e engendradas por agentes que produzem e consomem espaço”* (CORRÊA, 1989, p. 11). O autor cita como agentes produtores do espaço urbano:

- a) os proprietários do meio de produção: como indústrias e grandes empresas comerciais;

- b) os proprietários de imóveis: que recebem por aluguéis e influenciam sobre decisões nas legislações urbanísticas, pressionando os agentes públicos;
- c) os promotores imobiliários: operam no mercado imobiliário e recebem pelo serviço;
- d) o Estado: detentor de espaços e agente regulador do uso do solo; e
- e) os grupos sociais excluídos: proprietário fundiário da periferia.

Harvey (1980) acrescenta mais alguns agentes relacionados ao mercado imobiliário:

- a) moradores: consomem e pagam pelas moradias;
- b) incorporadores e indústria da construção civil: influenciam sobre o valor dos imóveis; e
- c) instituições financeiras: realizam financiamentos imobiliários.

Percebe-se a influência do mercado imobiliário sobre a dinâmica das cidades e a relevância de políticas públicas e das legislações urbanísticas para regular a construção civil. No planejamento de cidades e regiões, a densidade urbana é um índice essencial e pode ser relativa ao número de habitantes ou à área construída. A densidade demográfica corresponde ao número de habitantes por uma determinada área e a densidade construída (ou edificada) refere-se à porção de área total construída em relação a uma determinada área, como de um lote.

Este estudo delimita-se à abordagem do adensamento construtivo e salienta-se que densidades demográficas e edificadas podem não apresentar relação direta, assim como a verticalização de edifícios pode não resultar em maiores densidades populacionais, como observado em São Paulo por Gusson et al. (2012). Nakano (2018) alerta para a conformação de “cidades ocas”, o que ocorre quando o acréscimo de densidade construtiva não promove aumento da densidade populacional, como observado em edifícios residenciais verticalizados em São Paulo, no período entre 1998 e 2008.

As legislações municipais, como os Planos Diretores, são instrumentos fundamentais que regulam e impõem limites à construção de edifícios, por exemplo. Isso ocorre através de índices e coeficientes construtivos ou de permeabilidade, abordados nesta pesquisa. O coeficiente de aproveitamento (C.A.) ou índice de aproveitamento (I.A.), consistem na proporção entre uma área superficial considerada

(como um lote) e a área total construída sobre essa área considerada, regulamentando o uso do solo.

Outro índice urbanístico, presente nos Planos Diretores, é a taxa de ocupação (T.O.) que consiste na proporção entre a área da projeção horizontal construída e a área do lote. Esse índice aliado às dimensões mínimas de afastamentos das divisas do terreno (os recuos) determinará a permeabilidade entre as edificações, o que pode alterar a dinâmica dos ventos naturais e a incidência solar sobre os edifícios e os espaços abertos, interferindo nos microclimas.

A taxa de ocupação e o coeficiente de aproveitamento são índices relevantes na conformação de morfologias urbanas e podem resultar em cenários urbanos bem variados. A Figura 2.1 ilustra quarteirões edificados com coeficientes de aproveitamento iguais e taxas de ocupação bem distintas.

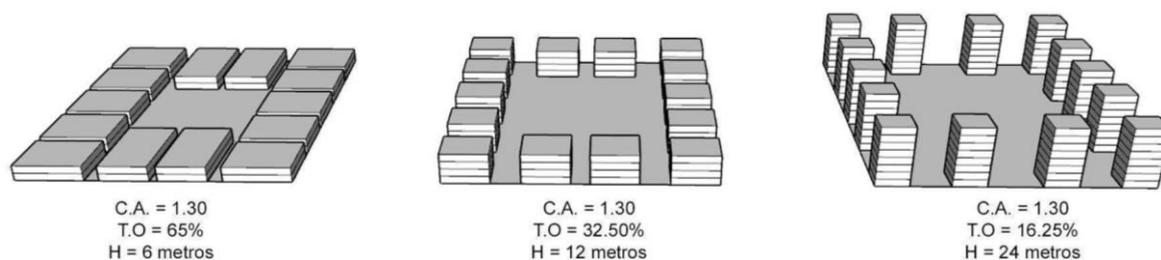


Figura 2.1: Quarteirões edificados com coeficiente de aproveitamento igual a 1.3.

Fonte: Autora, 2023.

Observa-se que ao restringir a taxa de ocupação e permitir elevados coeficientes de aproveitamento incentiva-se a verticalização de edifícios, por exemplo. Oke et al. (2017) salienta que a ocupação verticalizada pode ser problemática para latitudes mais elevadas (como na cidade de Bagé), devido ao extenso sombreamento dos edifícios. *The Urban Task Force* (2003) ilustra três concepções de quadra urbana (Figura 2.2) para atender uma mesma demanda populacional (75 unidades por hectare), diferenciando a forma e a implantação dos edifícios, a taxa de ocupação da quadra e as áreas abertas (não edificadas).



Figura 2.2: Quadras urbanas ilustradas em *The Urban Task Force* (2003).

Fonte: *The Urban Task Force* (2003), editada pela autora.

Os três exemplos resultam em diferentes microclimas e proporcionam distintas relações entre os moradores e os espaços abertos, sendo referência na construção dos cenários deste estudo, como explicado no capítulo 3. Conforme *The Urban Task Force* (2003), os edifícios altos com baixa taxa de ocupação da quadra apresentam espaços abertos mais amplos e públicos, estabelecendo baixa conexão dos moradores com a vida urbana. Cheng (2009) complementa que as grandes áreas ao redor do edifício alto, em um planejamento eficiente, podem abrigar instalações comunitárias ou se indevidamente administrado, podem ser problemáticas.

A proposta de edifícios baixos com elevada taxa de ocupação divide os espaços abertos de modo mais individualizado e privativo. Já a quadra com média taxa de ocupação e altura das edificações e um espaço aberto público central, podendo ser um palco comunitário, incentiva as atividades coletivas e o uso pleno do espaço, elevando a interação entre os moradores e a vida urbana (*THE URBAN TASK FORCE*, 2003 e CHENG, 2009).

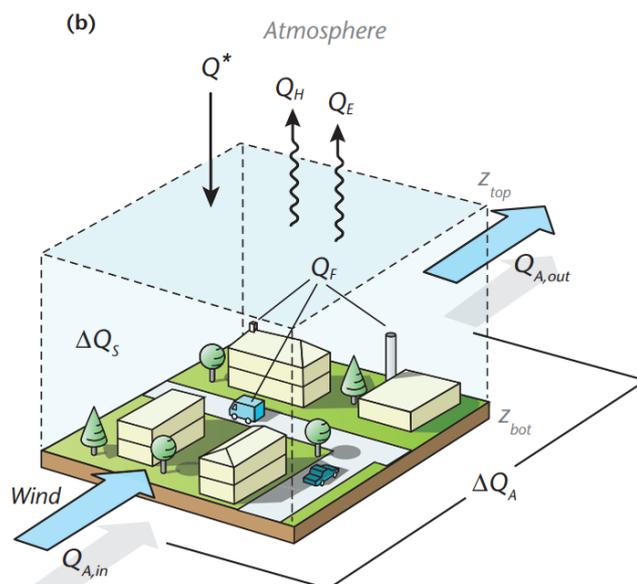
Ao nível do pedestre, a permeabilidade visual no térreo de edificações (baixas ou verticalizadas) próximas às calçadas contribuem com a vitalidade dos espaços abertos adjacentes. Exemplificando, Gregoletto (2019) verificou que 63.6% dos entrevistados consideraram agradáveis os espaços adjacentes aos edifícios verticalizados com permeabilidade visual acima de 66% no térreo, em Caxias do Sul-RS, devido à presença de outras pessoas e do comércio com vitrine. Já os moradores dos pavimentos mais altos de edifícios de intensa verticalização encontram-se distantes da vida urbana das ruas e calçadas, o que interfere sobre a saúde mental deles (ALEXANDER et al., 1977). Por outro lado, o aumento do adensamento construtivo por edifícios horizontais avança sobre áreas verdes e demanda elevados custos com infraestruturas e mobilidade urbana (SILVA et al., 2017).

Os elementos urbanos citados por Lamas (2010): os edifícios; a pavimentação, o lote (parcela fundiária); o quarteirão; a fachada; o logradouro (espaço não edificado do lote); o traçado das ruas; a praça; a arborização e a vegetação interferem na conformação dos microclimas urbanos. Mohammed e Radha (2022) afirmam que alterações na geometria urbana são ferramentas eficazes para melhorar o conforto térmico de espaços abertos e criar cidades mais sustentáveis.

A conformação da morfologia urbana é influenciada por diversos fatores como o mercado imobiliário, as legislações urbanísticas e outras decisões humanas pessoais. As características da morfologia urbana, como a configuração dos edifícios influenciam sobre a percepção, uso e qualidade (inclusive quanto a sensação térmica) dos espaços urbanos abertos. Na subseção seguinte a influência da morfologia urbana sobre os microclimas é aprofundada.

## 2.2 Microclimas urbanos

Compreender o balanço energético é essencial no estudo de microclimas urbanos, pois consiste na expressão da transferência de energia para e entre superfícies terrestres. O primeiro princípio da termodinâmica, a conservação de energia, embasa as equações do balanço energético, por meio da interpretação de que toda energia da superfície terrestre proveniente da radiação ou do calor antropogênico irá elevar a temperatura do ar, ser absorvida ou evaporar com a umidade (GARTLAND, 2010). A Figura 2.3 apresenta o balanço energético urbano, conforme Oke (2017).



$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

Figura 2.3: Balanço energético urbano  
 Fonte: Oke, 2017 (p.157), editado pela autora.

A soma da radiação solar resultante de ondas longas e curtas, incidentes e refletidas ( $Q^*$ ) com o calor antropogênico ( $Q_F$ ) iguala-se ao calor armazenado ( $\Delta Q_S$ ) somado às trocas de calor por convecção ( $\Delta Q_A$ ), fluxos turbulentos de calor sensível ( $Q_H$ ) e latente ( $Q_E$ ).

Os estudos sobre balanço energético urbano direcionaram para as diferenças climáticas entre as áreas urbanas e rurais. Nas áreas urbanas, o fluxo de calor sensível é maior devido à presença de superfícies impermeáveis e mais absorventes à radiação solar, enquanto que zonas rurais perdem mais calor latente (ASSIS, 1997). Além das propriedades das superfícies das áreas urbanas, outros fatores como a altura das edificações influenciam na conformação de climas locais, devido ao menor ou maior acesso da radiação solar às superfícies.

Oke (2006) apresenta três escalas climáticas, ilustradas na Figura 2.4:

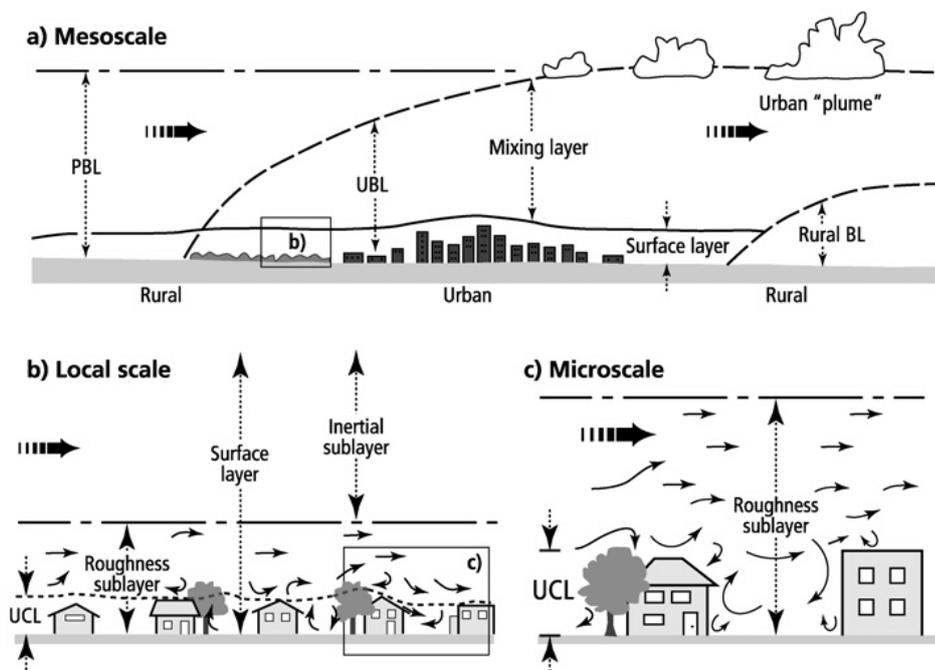


Figura 2.4: Ilustração das escalas e camadas verticais climáticas.

Fonte: Oke, 2006 (p. 3).

- A. Mesoescala: consiste na escala mais ampla, englobando a cidade.
- B. Escala local: resultante da combinação de microclimas, abrange uma área determinada por características topográficas e urbanas semelhantes.
- C. Microescala: escala sobre influência de elementos da morfologia urbana local (como arborização, edifícios e revestimentos), influenciando na temperatura do ar e no vento. Espaços próximos podem apresentar microclimas bem distintos.

A Figura 2.4 também ilustra as camadas urbanas verticais classificadas por Oke (2002) em:

- *Urban canopy layer* (UCL) - Camada de dossel urbano: área em que os elementos morfológicos exercem influência sobre o microclima ao seu redor. Consiste na camada que se estende entre o chão e a altura média de elementos rugosos, tais como edifícios e árvores.
- *Urban boundary layer* (UBL) - Camada limite urbana: camada acima da UCL até o nível em que a influência da rugosidade da morfologia não é mais perceptível.

Com base no conhecimento do balanço energético, diversos estudos investigam a relação das edificações e dos adensamentos construtivos com a conformação de

microclimas urbanos. Em Brasília (clima tropical de savana - “Aw”), cânions urbanos<sup>3</sup> com largura de vias ( $W$ ) maiores que a altura média das edificações ( $H$ ), para o estudo proporções  $H/W$  entre 0.14 e 0.33, apresentam condições térmicas mais confortáveis (SILVA et al., 2020). No caso de Brasília, os cânions mais profundos (proporção  $H/W$  maior que 1) podem acumular calor, devido ao clima quente. A Figura 2.5 apresenta um esquema de cânion urbano com relação  $H/W$  igual a 0.33.

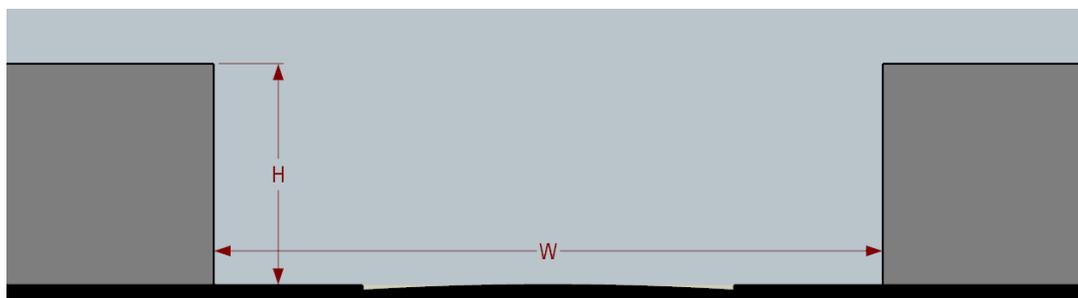


Figura 2.5: Cânion urbano de proporção  $H/W$  (altura média das edificações/largura da via) de 0.33. Fonte: Autora, 2023.

Para o mesmo clima de Brasília (Aw), Monteiro (2020) em Macapá - AP e Leal (2018) em Vitória - ES estudaram o efeito do acréscimo de edificações com até, respectivamente, 22 e 14 pavimentos em um recorte de morfologia existente com predomínio de edificações de, respectivamente, 2 a 3 pavimentos e 4 pavimentos. Os autores observaram que a Temperatura Radiante Média (TRM) reduziu até 36.8°C às 15:00h, em Macapá e até 27°C, às 9:00h em Vitória, entre os cenários existentes e os mais verticalizados. Monteiro (2020) ressalta que, dependendo da velocidade do ar, essa redução na TRM pode resultar em desconforto térmico no inverno (situação que também pode acontecer na cidade de Bagé).

Para os períodos mais quentes do clima subtropical úmido “Cfa” (clima de Bagé), a verticalização pode favorecer o conforto térmico devido ao maior sombreamento dos edifícios, semelhante ao que acontece em climas quentes. Muniz-Gäal et. al. (2018) e Lima (2018) estudaram cânions urbanos com relações  $H/W$  até 1.4 e 2.25, respectivamente, e observaram que as maiores proporções favorecem o conforto para as cidades de Campinas-SP e Umuarama-PR no verão. Entretanto, o clima Cfa requer maior atenção ao período de inverno, devido às baixas temperaturas.

Muniz-Gäal et. al. (2018) observou que nos cenários mais verticalizados (de maior relação  $H/W$ ), a amplitude térmica diária foi reduzida em ambos os períodos de

<sup>3</sup>Consistem na combinação de superfícies horizontais, as vias, e verticais, as edificações (NUNEZ e OKE, 1977).

verão e inverno. No entanto, o maior sombreamento reduziu a média diária do índice PET<sup>4</sup> no inverno, o que pode agravar o desconforto térmico. Essa redução na amplitude térmica, devido à verticalização, também foi observada por Schmitz (2014), ao analisar (utilizando o índice UTCI<sup>5</sup>) os cenários de morfologia consolidada de 2011 e o de prognóstico para 2061 para a cidade de Curitiba-PR, clima Cfb. Para o mesmo clima, Pacifi (2019) indica que grupos de edifícios altos e próximos devem ser evitados, em São Paulo, pois reduzem o fator de céu visível obstruindo as trocas térmicas entre as superfícies e a atmosfera e alteram a velocidade do vento, o que também deve ocorrer no clima Cfa.

Concordando com estes estudos em relação ao período de inverno, Lima (2018) afirma que as **menores** relações H/W são as mais favoráveis ao conforto térmico no inverno, pois possuem menor sombreamento das edificações sobre os espaços abertos em Umuarama - PR, cidade de médio porte com clima "Cfa". Em Harbin (clima continental com invernos secos e verões quentes - "Dwa"), na China, Sun et al. (2022) indicam que proporções H/W entre 0.5 e 1.5 são mais confortáveis termicamente, considerando períodos quentes e frios. Os autores estudaram três morfologias urbanas consolidadas com proporções H/W entre 0.47 e 2.0 (com altura média dos edifícios dos cenários entre 16 e 32.4 metros).

Em Arapiraca - AL (clima semiárido quente - "Bsh"), também cidade de médio porte, Brandão (2020) comparou os resultados climáticos, em novembro, entre cenários com edifícios de um, cinco, dez e quinze pavimentos. A autora observou que a TRM reduziu de 75°C para abaixo de 40°C, às 15:00h, entre os cenários extremos (de um e quinze pavimentos), ambos com recuos frontais de três metros e laterais de um metro e meio. Semelhante a Brandão (2020), para a cidade de São Paulo, clima "Cfa", as simulações de Gusson et al. (2016), em abril, também apresentaram temperaturas mais baixas no cenário com alturas mais elevadas. Os cenários estudados eram compostos por: torres de quatorze pavimentos; edifícios com oito pavimentos no perímetro da quadra; e edifícios retangulares com dez pavimentos.

Estudos internacionais focando nos períodos quentes reforçam os resultados de que a verticalização e o sombreamento colaboram com sensações térmicas mais

---

<sup>4</sup> Definido por Höpfe (1999) como a temperatura do ar (em ambiente sem vento e radiação solar) em que o balanço térmico do corpo humano encontra-se em equilíbrio, temperatura central e da pele iguais, sob as condições externas a qual deseja-se avaliar.

<sup>5</sup> Temperatura equivalente entre condições reais e de referência com base nas respostas fisiológicas do corpo (JENDRITZKY, 2009).

confortáveis aos pedestres em espaços abertos na estação mais quente. Berardi e Wang (2016), em Toronto (clima continental úmido de verão fresco), analisaram o efeito do aumento da altura média dos edifícios de 16 para 23.7 metros em uma área da cidade e de 14.2 para 18.2 metros em outra. As temperaturas médias diárias no índice PET reduziram, respectivamente, em 3.4°C e 2.4°C, e a velocidade do ar aumentou.

Simulações computacionais para New Aswan, no Egito, comparando a morfologia urbana existente (edificações com até 36 metros de altura) com o cenário em que a altura máxima dos edifícios é reduzida para doze metros, previram que a PET aumentou em até 5.5°C e em média 1°C (GALAL, MAHMOUD, SAILOR, 2020). Em Sri Lanka, Hepsheba et al. (2019) observaram que, ao dobrar o número de pavimentos em relação ao cenário original, passando as edificações de quatro para oito pavimentos, a TRM foi reduzida, em média, 3.89°C. Ao triplicar a altura das edificações (passando de quatro para doze pavimentos), a TRM foi reduzida em 5.16°C.

Yang, Wong e Lin (2015) e Acero et al. (2021) concordam que maiores proporções H/W (como entre três e cinco) projetam maiores sombreamentos e proporcionam melhores condições térmicas em espaços abertos de Singapura (clima tropical) pois acumulam menos calor nas superfícies. Acero et al. (2021) acrescenta que o aumento da altura dos edifícios de 47 para até 91 metros reduz a velocidade do vento. A ventilação é outro fator de influência sobre os microclimas urbanos, como ilustrado por Oke (2002) que apresenta a trajetória dos ventos em diferentes cenários urbanos (Figura 2.6).

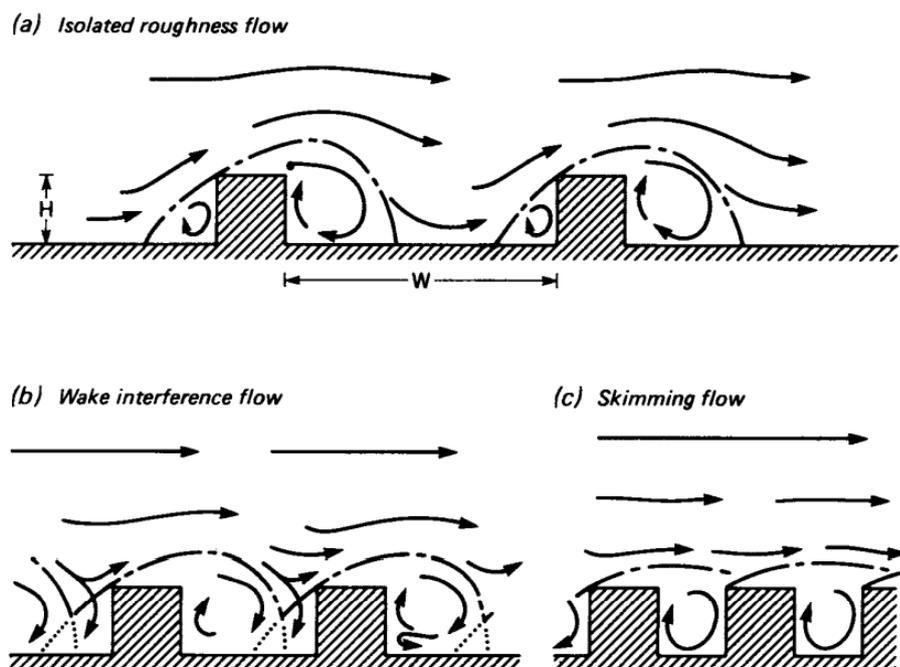


Figura 2.6: Fluxo do vento em diferentes cenários urbanos: a) edificação isolada (relação  $H/W$  até 0.4); b) cenário urbano com relação  $H/W$  entre 0.4 e 0.7; e c) cenário urbano com menor distanciamento entre os edifícios, barrando o fluxo de vento.

Fonte: Oke, 2002 (p. 267)

Na Figura 2.6a, as edificações estão espaçadas de modo que a ventilação se assemelha aos cenários com edifícios isolados e à medida que os edifícios se encontram mais próximos (Figura 2.6b), alguns pontos ao redor da edificação possuem o vento barrado. Ao inserir edificações bem próximas entre si, a ventilação percorre majoritariamente acima dos edifícios, como demonstrado na Figura 2.6c.

Para a densa cidade de Hong Kong, NG (2009) destaca a necessidade de maximizar a velocidade do vento e minimizar a radiação solar, através das alturas e implantação dos edifícios, para atingir o conforto térmico no verão. O autor ressalta que quando o pedestre está em áreas parcialmente sombreadas pode ser necessário maior velocidade do vento, enquanto que à sombra, a velocidade de 1.5 m/s já favorece o conforto no verão de Hong Kong.

Nogueira et al. (2018), em Maceió (clima tropical quente e úmido, com estação seca no inverno - "As"), afirma que a **verticalização quando associada a permeabilidade do vento** entre as edificações são aspectos favoráveis ao maior conforto térmico em períodos e/ou climas quentes. O estudo também identificou pequeno aumento na temperatura do ar no cenário mais poroso e verticalizado (vinte pavimentos) em relação aos demais, de dois e dez pavimentos, devido às maiores áreas expostas ao sol.

De forma semelhante, Gusson (2020), em período quente na cidade de São Paulo, verificou mais horas (33%) de neutralidade térmica no cenário com permeabilidade e verticalização (81 metros) intermediárias. A autora comparou o cenário intermediário com o de edificações mais altas (119 metros) e distantes entre si (o que permite maior incidência de radiação solar no cenário, como no estudo em Maceió) e com o cenário de edificações de 44 metros de altura e próximas entre si.

Martins e Rosseti (2019), em Cuiabá - MT (clima tropical de savana - "Aw") constataram a importância de permeabilidades mínimas estabelecidas pelo Plano Diretor. O estudo comparou um recorte urbano consolidado e não regularizado pela legislação municipal com o cenário em que se aplica a permeabilidade mínima exigida sobre a área consolidada. Os autores observaram a mudança na velocidade e direção dos ventos, canalizados em alguns pontos, e temperaturas mais baixas no cenário com a mínima permeabilidade exigida, favorecendo o conforto térmico.

A **orientação das vias em relação aos ventos predominantes** possui relação com a velocidade dos ventos nas ruas. Quando as vias estão paralelas à direção dos ventos, o aumento da intensidade é favorecido. Inversamente, se as vias se localizam perpendicularmente aos ventos predominantes, as edificações tendem a redirecionar, reduzir a velocidade e até mesmo obstruir parcialmente a passagem dos ventos. Quando as vias são rotacionadas 45° em relação aos ventos predominantes, a distribuição dos ventos tende a ser mais homogênea entre as vias, princípio que pode ser aplicado a diferentes regiões climáticas (AYYAD E SHARPLES, 2020; BRANDÃO, 2020; MUNIZ-GÄAL et al., 2018; NOGUEIRA et al., 2018; e BARBOSA et al., 2014).

Outro fator que interfere na dinâmica dos ventos e, conseqüentemente no conforto térmico, é a diversificação de alturas das edificações nas quadras. Brandão (2020) e Pacifi (2019) concordam que grupos de edifícios com alturas variáveis favorecem o conforto térmico em espaços abertos de Arapiraca - AL e São Paulo - SP. Novaes (2020) observou que a área urbana com maior variação de altura das edificações, combinada à orientação da via paralela aos ventos predominantes, apresentou desempenho térmico mais satisfatório em dia quente, na cidade de São Paulo.

Para Medeiros e Filho (2021), a ventilação pode desfavorecer o conforto térmico. Os autores constataram que, em Palmas - TO, a elevação da velocidade do vento em áreas com edificações mais altas (cenário com maior rugosidade devido ao

aumento de superfícies construídas) reduziu a umidade relativa do ar, variável importante para o conforto térmico do clima (seco) Tropical de Savana.

Um estudo conduzido em Bandung – Indonésia por Dwiputra et al. (2021), buscou correlação entre parâmetros urbanísticos estabelecidos por planos diretores e suas influências sobre as variáveis climáticas. As simulações com diferentes tipologias, variando a taxa de ocupação e o coeficiente de aproveitamento apontaram que a taxa de ocupação possui correlação direta com a umidade relativa e indireta com a velocidade do vento. Os autores também observaram que o coeficiente de aproveitamento possui correlação direta com a umidade relativa e indireta com a temperatura do ar e a radiação solar.

Outros estudos demonstram que as **mudanças climáticas** globais também podem interferir no conforto térmico de espaços abertos nos próximos anos. Chapman et al. (2019) em Brisbane, na Austrália, analisaram os efeitos do aumento da densidade construída (proporção H/W de 0.4 para 0.6) combinado às projeções de mudanças climáticas globais, considerando patamar de concentração de gases (RCP) 8.5<sup>6</sup>, entre os períodos de 1990–2000 e 2040–2050. Os autores constataram maior aumento da temperatura do ar, à noite, elevando em média 2.5°C, no verão.

No Brasil, em Curitiba - PR, Schmitz (2014) simulou o aumento da densidade construída de proporção H/W 0.96 em 2011 para 1.2 em 2061 **combinado** às projeções de alterações climáticas, no período de doze horas (7:00h às 19:00h) em fevereiro e agosto. Em todos cenários no inverno, a autora verificou sensação de desconforto por frio às 7:00h, 18:00h e 19:00h e conforto térmico nos demais horários. Para o verão, embora os cenários apresentem modestas diferenças de temperaturas no índice UTCI, ambos são classificados com estresse térmico por calor, entre às 9:00h e 16:00h. Efeitos semelhantes são discutidos no capítulo 4 desta pesquisa.

Os estudos abordados discutem os efeitos do adensamento construtivo principalmente sobre duas variáveis ambientais: vento e temperatura (por vezes do ar, por vezes TRM) e aplicam, predominantemente, o índice de conforto térmico PET (assunto abordado na seção 2.3). As pesquisas discutidas nesta seção indicam que as melhores condições de conforto térmico, embora se diferenciam conforme os climas locais, estão relacionadas a um equilíbrio entre as variáveis da morfologia urbana, como distância e altura das edificações e a taxa de ocupação.

---

<sup>6</sup> Os patamares de concentração de gases são apresentados e explicados no capítulo 3 (seção 3.4).

Neste estudo, para uma cidade média os efeitos do aumento do adensamento construtivo devem ser mais modestos devido à menor altura das edificações, mas ainda assim ter alterações microclimáticas decorrentes, principalmente do sombreamento das edificações. Destaca-se que, até o momento, não foram encontrados na literatura outras investigações em conforto térmico em espaços urbanos abertos que apliquem cenários prognósticos de crescimento urbano aliados a cenários de mudanças climáticas, para cidades médias do Sul do Brasil.

## 2.3 Conforto térmico de pedestres em espaços urbanos abertos

A fisiologia humana possui mecanismos para manter o equilíbrio térmico com o ambiente em que está inserido, evitando perdas ou ganhos extremos de energia térmica. Em espaços urbanos abertos ocorrem mecanismos que são influenciados pelos elementos urbanos e atributos das edificações, como absorção e emissão de energia na forma de radiação e trocas térmicas por convecção (ERELL et al., 2011). Conforto térmico consiste na condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico, conforme avaliação subjetiva (ASHRAE, 2004). Nicol, Humphreys e Roaf (2012) citam fatores que influenciam no conforto térmico:

- a) fisiológico: atividade metabólica;
- b) psicofísico: que relaciona a sensação térmica com os estímulos recebidos pelo mundo físico e a resposta do cérebro;
- c) físico: trocas térmicas por radiação, convecção, temperatura operativa (valor médio entre a temperatura do ar e a TRM), evaporação, respiração e transpiração e o uso de vestimentas; e
- d) comportamento humano: troca de vestimenta, atividade em desenvolvimento e troca de ambiente térmico.

NG (2009) afirma que é possível proporcionar conforto térmico em espaços urbanos abertos através do equilíbrio entre temperatura e umidade do ar, vento, radiação solar, atividade humana em desenvolvimento e vestimentas. NICOL et al. (2006) destaca que a sensação térmica em espaços abertos é principalmente influenciada pela temperatura do ar, a velocidade do vento e a radiação solar. Francis (1987) afirma que as condições climáticas como insolação e sombreamento, proteção

para chuvas e ventos são fatores essenciais para o uso e satisfação de permanência em espaços abertos.

Kim e Brown (2022) analisaram o comportamento dos pedestres no período de verão em Austin (Estados Unidos), confirmando a preferência por áreas de maior conforto térmico, como calçadas sombreadas. No Brasil, em Caxias do Sul-RS, Gregoletto (2019) verificou que 71.4% dos pedestres entrevistados nas calçadas adjacentes a edifícios com mais de dez pavimentos identificaram o sombreamento projetado pelos edifícios como positivo no verão e 35.7%, como negativo no inverno, devido ao aumento do frio e da umidade nas calçadas.

Pesquisadores buscaram estimar condições térmicas em que as pessoas consideram aceitáveis (sem desconforto por calor ou frio), através de modelos matemáticos com base em estudos de campo ou no balanço de energia térmica do corpo humano (ERELL et al., 2011), estabelecendo-se diversos índices de conforto térmico. Alguns índices são recomendados para espaços internos de edificações e outros, podem ser aplicados e/ou são desenvolvidos especificamente para espaços abertos (externos).

Cita-se alguns índices amplamente utilizados mundialmente: *Predicted Mean Vote* (PMV), criado por Fanger (1972); *Physiological Equivalent Temperature* (PET), por Hoppe (1999) e o *Universal Thermal Climate Index* (UTCI), desenvolvido pela *International Society of Biometeorology* (ISB). Outros índices são desenvolvidos para regiões específicas, como o índice de Temperatura Equivalente Percebida (TEP), desenvolvido para o clima de São Paulo, por Monteiro (2008).

Zare et al. (2018) verificou que o índice UTCI tem coeficiente de correlação de 0.96 com o índice PET, maior que com os demais índices analisados pelos autores, *Standard Effective Temperature* (SET); PMV; *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD); e *Wet-bulb Globe Temperature* (WBGT). Lam et al. (2021) verificou que o índice PET (utilizado neste estudo, como abordado no capítulo 3), é o mais utilizado entre estudos (publicados de 2006 a 2019) que investigam o conforto térmico em espaços abertos em distintos países. O índice *Physiological Equivalent Temperature* (PET) foi definido por Höppe (1999) como a temperatura do ar (em ambiente sem vento e radiação solar) em que o balanço térmico do corpo humano se encontra em equilíbrio, temperatura central e da pele iguais, sob as condições externas a qual deseja-se avaliar.

Giralt (2006); Labaki et al. (2012); Ribeiro et al. (2020); Lucchese et al. (2016); Krüger et al., (2012) e Chen et al., (2020), entre outros, verificaram que o índice PET é eficaz para aplicação de estudos de espaços abertos em, respectivamente, Torres-RS; Campinas, Bauru e Presidente Prudente-SP; Cuiabá-MT; Campo Grande-MT; Glasgow no Reino Unido; e Harbin na China. Krüger et al. (2019), identificaram uma estreita relação entre a permanência das pessoas na Praça Japão em Curitiba-PR (clima “Cfb” que também apresenta períodos de frio intenso como o “Cfa”, clima de Bagé) e a sensação de neutralidade térmica, expressa através do índice de conforto térmico PET.

A sensação térmica em uma determinada condição climática é variável entre indivíduos e depende de questões culturais e da adaptação ao clima. Assim sendo, torna-se essencial a calibração das faixas de conforto e desconforto térmico dos índices para o local ou região do estudo (LUCCHESI et al., 2016 e CHEN et al., 2020). Diversos estudos calibraram o índice PET para cidades brasileiras, como Rosa (2021) para Pelotas-RS (utilizado neste estudo); Aquino et al. (2019) para Maringá-PR; Krüger et al. (2018) para Curitiba-PR; Rossi et al. (2020) para Rio de Janeiro-RJ; Andrade et al., (2016) para Salvador-BA; e Ribeiro et al., (2022) para Cuiabá-MT.

As pessoas conseguem adaptar-se a condições climáticas mais moderadas, mas não se adaptam completamente em situações extremas de temperaturas bem baixas ou elevadas, sentindo desconforto térmico (NICOL et al., 2006). Além dos fatores climáticos e de adaptação, Nikolopoulou e Steemers (2003) apontam fatores psicológicos que influenciam na sensação de conforto em espaços urbanos abertos:

a) naturalidade do ambiente: mudanças climáticas em ambientes naturais são mais toleráveis que em ambientes com elementos construídos;

b) expectativa: em espaços abertos, espera-se temperaturas mais frias no período de inverno, por exemplo, portanto são mais aceitas que temperaturas elevadas no mesmo período frio;

c) experiência: a curto prazo está relacionado com a expectativa em relação a sensação térmica de um dia para o outro e a longo prazo refere-se a estratégias que as pessoas desenvolveram para determinadas situações climáticas, como consumo de bebidas geladas em estações quentes;

d) tempo de exposição: o desconforto por curto tempo, como uma transição do carro para casa não é visto como problemático às pessoas, mas a longo prazo interfere no tempo de permanência para atividades ao ar livre;

e) controle percebido: as pessoas tendem a ser mais toleráveis ao desconforto térmico quando estão no espaço externo por escolha, e não por dever. Semelhante ocorre quando se tem escolha entre: estar exposto ao sol ou à sombra, podendo o indivíduo alternar de lugar;

f) estímulos do ambiente: refere-se à preferência das pessoas por ambientes não monótonos, que ofereçam diferentes estímulos aos sentidos, como nos espaços urbanos abertos, devido a variação da radiação solar e do vento.

Compreende-se que em estudos que investigam os efeitos do adensamento construído em vista da qualidade do espaço urbano aberto para as pessoas é essencial a utilização de índices de conforto térmico. Nesse âmbito, o índice PET é o mais utilizado e consolidado em pesquisas nacionais e internacionais, sendo necessária a calibração das faixas de conforto térmico para a região estudada para resultados mais realistas.

## 2.4 Utilização do programa ENVI-met em experimentações microclimáticas

Silva (2013) comenta que as ferramentas computacionais são potenciais instrumentos no estudo de prognósticos comprometidos com questões climáticas. Lam et al. (2021) levantaram publicações no *Google Scholar* e *Web of Science* entre 2006 e 2019, e constataram que a maioria dos estudos que simularam o conforto térmico em espaços urbanos abertos utilizou o programa ENVI-met. Torres (2017) reitera a eficiência do programa no estudo microclimático para Arapiraca-AL comparando os resultados simulados com os dados medidos de temperatura e umidade relativa do ar.

Estudos de microclimas urbanos já validaram simulações no ENVI-met para o clima “Cfa” (o mesmo clima de Bagé). Morsch (2020) analisou medidas de mitigação para ilhas de calor na cidade de Passo Fundo-RS; Lima et al. (2018) estudaram cânions urbanos de Umuarama-PR, variando a altura das edificações e a inserção de arborização; Krebs (2018) investigou os efeitos de coberturas vegetadas em Porto Alegre-RS e Muniz-Gäal et al. (2018) simularam cenários com diferentes adensamentos construtivos em Campinas-SP. Em outros países como China (ZHANG et al., 2022); Singapura (ACERO et al., 2021); Indonésia (DWIPUTRA et al., 2021); Austrália (ABDOLLAHZADEH e BILORIA, 2020); Egito (GALAL et al., 2020); Sri Lanka

(HEPSHEBA et al., 2019), entre outros, também foram realizadas simulações computacionais no ENVI-met para o mesmo fim.

O ENVI-met é um modelo holístico tridimensional que simula microclimas urbanos através da interação entre atmosfera, vegetação e superfícies com base nos princípios da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica. As simulações podem englobar cálculos de fluxos de radiação de onda longa e curta e de evapotranspiração; calor sensível; temperatura de superfícies, paredes e coberturas e dispersão de poluentes. O modelo destina-se a estudos de análise solar, efeitos de vegetação e água, dispersão de poluentes, fluxos de ventos, trocas térmicas do edifício com ambientes externos e internos, desenvolvimento de árvores ou de microclimas e conforto térmico (BRUSE, 2017).

O programa possibilita modelar cenários urbanos em uma malha (com dimensão mínima de 0.5 metros) representando as edificações, as vias e as vegetações. Os materiais que compõem o cenário urbano e suas propriedades de transmitância e de absorvância devem ser atribuídos aos elementos do modelo, utilizando o banco de dados do programa ou criando novas configurações. Essa etapa de modelagem dos cenários é realizada nas ferramentas *Monde* e *Spaces*. A Figura 2.7 ilustra a ferramenta *Spaces* do ENVI-met.

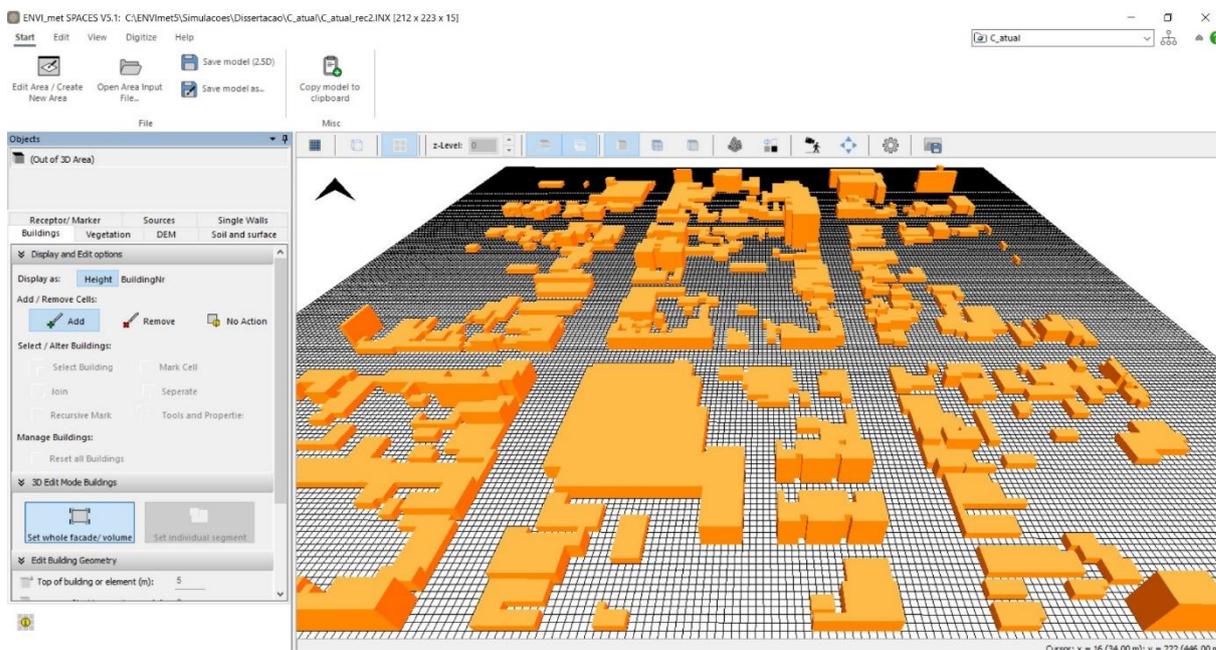


Figura 2.7: Ferramenta Spaces do ENVI-met.  
Fonte: Autora, 2023.

Em outra ferramenta, ENVI-guide, insere-se os dados climáticos para as simulações, que podem ser atribuídos através das opções *Simple Forcing* ou *Full Forcing*. Na opção *Simple Forcing*, insere-se manualmente os dados horários climáticos de temperatura e umidade relativa do ar de 24 horas, a direção e a velocidade do vento. A radiação solar é configurada através do fator de radiação solar e de nuvens baixas, médias e altas. Na opção *Full Forcing*, as simulações utilizam o arquivo EPW inserido, que contém os dados climáticos horários de um ano e informa-se uma data específica para a simulação. O programa ainda disponibiliza configurações que permitem incluir a temperatura e umidade do solo para quatro níveis de profundidade em ambas opções (*Simple* ou *Full Forcing*).

Os resultados das simulações podem ser extraídos por meio de diversas variáveis, dentre elas: direção e velocidade do vento; temperatura do ar; temperatura radiante média; umidade relativa do ar, em mapas ou tabelas. Também é possível determinar pontos receptores na modelagem para facilitar a extração e a visualização de resultados em localizações e alturas específicas.

O programa é disponibilizado por licença gratuita ou paga, destinado a estudantes, profissionais da área, universidades ou instituições públicas. A licença gratuita possui restrições como número de *grids* para modelagem; indisponibilidade do novo algoritmo de cálculo de radiação de ondas curtas e da opção *Full Forcing* para simulação. A licença para estudantes libera as restrições citadas anteriormente, mas ainda limita a utilização do processador em apenas um core para a simulação.

A atualização mais recente do ENVI-met para a versão 5.0, lançada no segundo semestre de 2021, apresenta uma nova interface da ferramenta ENVI-guide, seção que se insere os dados climáticos; integração da linguagem de programação *Python* ao sistema para visualização de resultados; aprimoramento da ferramenta de modelagem de árvores e implementação de novo algoritmo de cálculo de radiação de ondas curtas, aumentando a precisão dos resultados.

Compreende-se que o ENVI-met é uma ferramenta computacional eficiente, confiável e amplamente utilizada em estudos de microclimas urbanos, atendendo à proposição e as necessidades deste estudo.

### 3. Materiais e métodos de pesquisa

Esta pesquisa insere-se na área do conforto térmico na microescala urbana, relacionada à arquitetura, ao desenho urbano e ao planejamento urbano. O tema do adensamento construtivo e seus efeitos sobre os microclimas são amplamente discutidos por arquitetos, urbanistas, geógrafos, planejadores urbanos e climatólogos. A natureza deste estudo é pesquisa aplicada, que busca obter resultados de pesquisas científicas e aplicá-las em situações reais. A abordagem deste estudo é quali-quantitativa. Qualitativa, pois analisa um fenômeno urbano como base para este estudo e atribui aos resultados numéricos um parecer subjetivo (relativo à sensação térmica humana); e quantitativa, pois manipula fenômenos possíveis de serem mensurados por números com base em simulações computacionais.

Aksamija (2021) caracteriza as pesquisas qualitativas como descritivas que utilizam dados não numéricos (estratégias de coleta e interpretação de dados), e as pesquisas quantitativas, como precisas com dados numéricos (estratégias de coleta e análise estatísticas de dados). Groat & Wang (2013) e Aksamija (2021) afirmam que pode haver uma combinação entre os métodos qualitativos e quantitativos. Esta pesquisa adota métodos indutivos (etapas qualitativas) e dedutivos (etapa quantitativa com simulações computacionais), concordando com a abordagem de Groat & Wang (2013) de que a pesquisa quantitativa é um processo dedutivo que busca explicação de causa-efeito e a pesquisa qualitativa enfatiza métodos indutivos.

Este estudo é exploratório, com o intuito de investigar questões e compreender a natureza de uma problemática. Groat & Wang (2013) e Aksamija (2021) concordam que pesquisas exploratórias manipulam uma ou mais variáveis e mensuram os efeitos do experimento sobre outras variáveis, através da quantificação de resultados. A Tabela 3.1, a seguir, resume as principais características metodológicas deste estudo.

Tabela 3.1 - Características principais deste estudo.

Fenômeno de estudo	Alterações no adensamento construtivo em Bagé-RS
Variáveis	Urbanas: implantação e altura dos edifícios; taxa de ocupação e densidade construída das quadras
	Climáticas: temperatura (bulbo seco) e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar e Temperatura Radiante Média
Parâmetros	Diferenças nas Temperaturas Radiante Média (TRM) e do índice de conforto térmico <i>Equivalent Physiological Temperature</i> (PET)
Unidade de atribuição	Calçadas norte, leste, sul e oeste e interior da quadra (área não edificada) da quadra central do recorte urbano
Causa - efeito	Modificações no adensamento construtivo alteram variáveis ambientais

### 3.1 Estratégia de pesquisa

Esta pesquisa apoia-se em uma revisão de literatura e estuda casos exploratórios para a cidade gaúcha de Bagé-RS (31°19' Sul, 54°6' Oeste, altitude de 232m). A seção 3.1.1 caracteriza a cidade selecionada, a seção 3.1.2 sintetiza as etapas deste estudo: 1) Cenário base; 2) Definição de cenários urbanos exploratórios; 3) Simulações computacionais dos microclimas; e 4) Análise dos microclimas e da sensação térmica humana, e as seções 3.2 a 3.5 apresenta as etapas detalhadamente.

### 3.1.1 Caracterização da cidade de Bagé-RS



Figura 3.1: Localização da cidade de Bagé.  
Fonte: autora, 2023.

Bagé, localiza-se na região Sudoeste do Rio Grande do Sul (Figura 3.1), possui 117 mil e 938 habitantes (IBGE, 2022) e foi classificada como Centro sub-regional A (IBGE, 2020), explicado na seção 2.1. A cidade situa-se no bioma Pampa, que abrange aproximadamente 63% do estado do Rio Grande do Sul e estende-se por Argentina, Uruguai e Paraguai (BENCKE et al., 2016). O Pampa, ou Campos Sulinos, é constituído por extensas planícies com predomínio de vegetação rasteira, como em Bagé, e relevos ondulados que constituem os cerros da Região Central e Oeste do RS (PILLAR et al., 2009). A Figura 3.2, ilustra a paisagem característica do bioma Pampa.



Figura 3.2: Paisagem do bioma Pampa  
 Fonte: Sarita Reed - Revista National Geographic Brasil <sup>7</sup>, 2020.

Conforme a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Bagé é “Cfa” subtropical úmido, caracterizado por distintas estações de aquecimento e resfriamento, alta umidade e verões quentes (KOTTEK et al., 2006). O pampa gaúcho caracteriza-se por grandes amplitudes térmicas e a passagem de intensas frentes frias que aumentam a evapotranspiração causando secas ocasionais (IBGE, 2019). A Figura 3.3 apresenta as temperaturas médias mensais do ar e a precipitação acumulada mensal de Bagé, conforme as Normais climatológicas 1991-2020 (INMET, 2022).

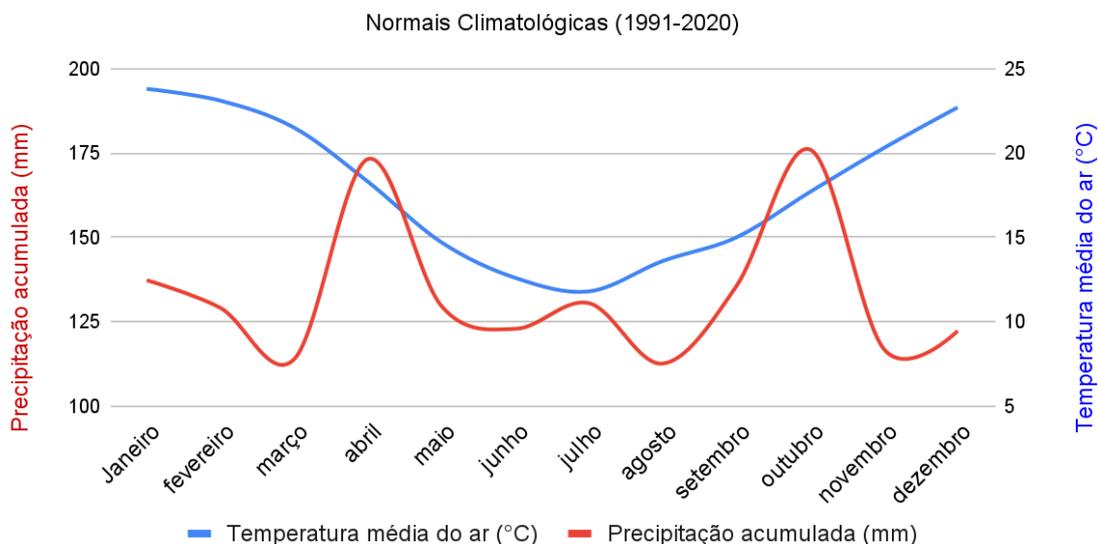


Figura 3.3: Temperaturas médias do ar e precipitações acumuladas mensais conforme as Normais climatológicas (1991-2020) para Bagé.

Fonte: Dados do INMET (2022) organizados pela autora, 2023.

<sup>7</sup>Disponível em: <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2019/10/degradacao-cerrado-amazonia-pampa-bioma-brasil-rio-grande-do-sul-vegetacao>>. Acesso em: 30 de abril de 2023.

Observa-se que as temperaturas médias mensais do ar variam entre 11.8°C (em julho) e 23.8°C (em janeiro), apresentando temperatura média anual de 17.9°C. O índice pluviométrico acumulado varia entre 113.9mm (em março) e 176mm (em outubro) e apresenta precipitação acumulada anual de 1599.9mm. No inverno, as frentes frias (conhecidas por Minuano) provenientes da Antártica atravessam a Argentina e incidem sobre a Região do Pampa, caracterizadas por vento que:

[...] não se detém diante de obstáculos, só o transforma num assobiar anunciador do frio. Vento frio e seco que sopra do Sudoeste, empurra a massa de ar quente e úmida estacionada nos pagos rio grandenses, pede um poncho, uma chaleira no fogo-de-chão alimentando o mate-amargo, para bem receber esse visitante das invernadas que à garupa traz muita água do Patrão lá do céu. (PILLAR et al., 2009, p.44-45).

A Figura 3.4 apresenta a morfologia de Bagé em uma área do bairro Centro.



Figura 3.4: Foto aérea das Av. Tupy Silveira e Marechal Floriano no Centro de Bagé  
Fonte: Jornal Minuano<sup>8</sup>, 2020

A morfologia da cidade constitui-se predominantemente por edificações horizontais (até dois pavimentos) com amplas avenidas centrais e topografia predominantemente plana (principalmente na Região do Centro), como ilustrado na Figura 3.4. A malha urbana apresenta vazios e observou-se o aumento de construções de edificações mais verticalizadas (três ou mais pavimentos) na última década, conforme é abordado na seção 3.2.

---

<sup>8</sup>Disponível em: <<https://www.jornalminuano.com.br/noticia/2020/07/18/bage-permanece-na-bandeira-laranja-na-11-rodada-do-distanciamento-controlado>>. Acesso em: 3 de abril de 2023.

### 3.1.2 Etapas da pesquisa

As etapas desta pesquisa consistem em:

1: Cenário base: Teve o objetivo de estabelecer um caso real como cenário base da pesquisa exploratória. Nesta etapa definiu-se o recorte urbano na cidade de Bagé, conforme parâmetros pré-determinados, amparado pela elaboração de mapas para análises históricas e urbanas. Realizou-se a modelagem tridimensional do recorte definido (cenário base) e projetou-se uma hipótese de adensamento construído para 2060, detalhada na seção 3.2.

2: Definição de cenários urbanos exploratórios: Teve o intuito de estabelecer, a partir do cenário base, os demais cenários de adensamento construtivo. Nesta etapa desenvolveu-se e modelou-se o cenário de prognóstico para 2060, conforme parâmetros pré-determinados, e quatro cenários hipotéticos (cenários 1A, 1B, 2 e 3), a partir da referência bibliográfica selecionada, adaptados para a situação de Bagé.

3. Simulações computacionais dos microclimas: Teve o objetivo de definir e simular os microclimas estudados nesta pesquisa, estabelecendo as condições climáticas junto aos cenários urbanos. Nesta etapa, utilizando o programa ENVI-met, modelou-se os cenários exploratórios, definiu-se e configurou-se os dados climáticos de Bagé para o *input* de cada simulação, realizou-se estudos piloto e, posteriormente, as simulações dos quatorze microclimas estabelecidos.

4. Análise dos microclimas e da sensação térmica humana: Teve o objetivo de analisar os resultados das simulações, sob a perspectiva da sensação térmica humana. Nesta etapa: definiu-se os parâmetros para extração dos resultados das simulações, extraiu-os em Temperatura Radiante Média (TRM) e analisou-os junto ao estudo de sombreamento nos cenários urbanos; estabeleceu-se os parâmetros e as configurações para aplicação do índice de conforto térmico *Equivalent Physiological Temperature* (PET) aos resultados das simulações; obteve-se os resultados no índice PET e analisou-os junto a classificação das temperaturas nas faixas de conforto térmico. A Figuras 3.5 apresenta as quatro etapas deste estudo, seus objetivos e desenvolvimentos.

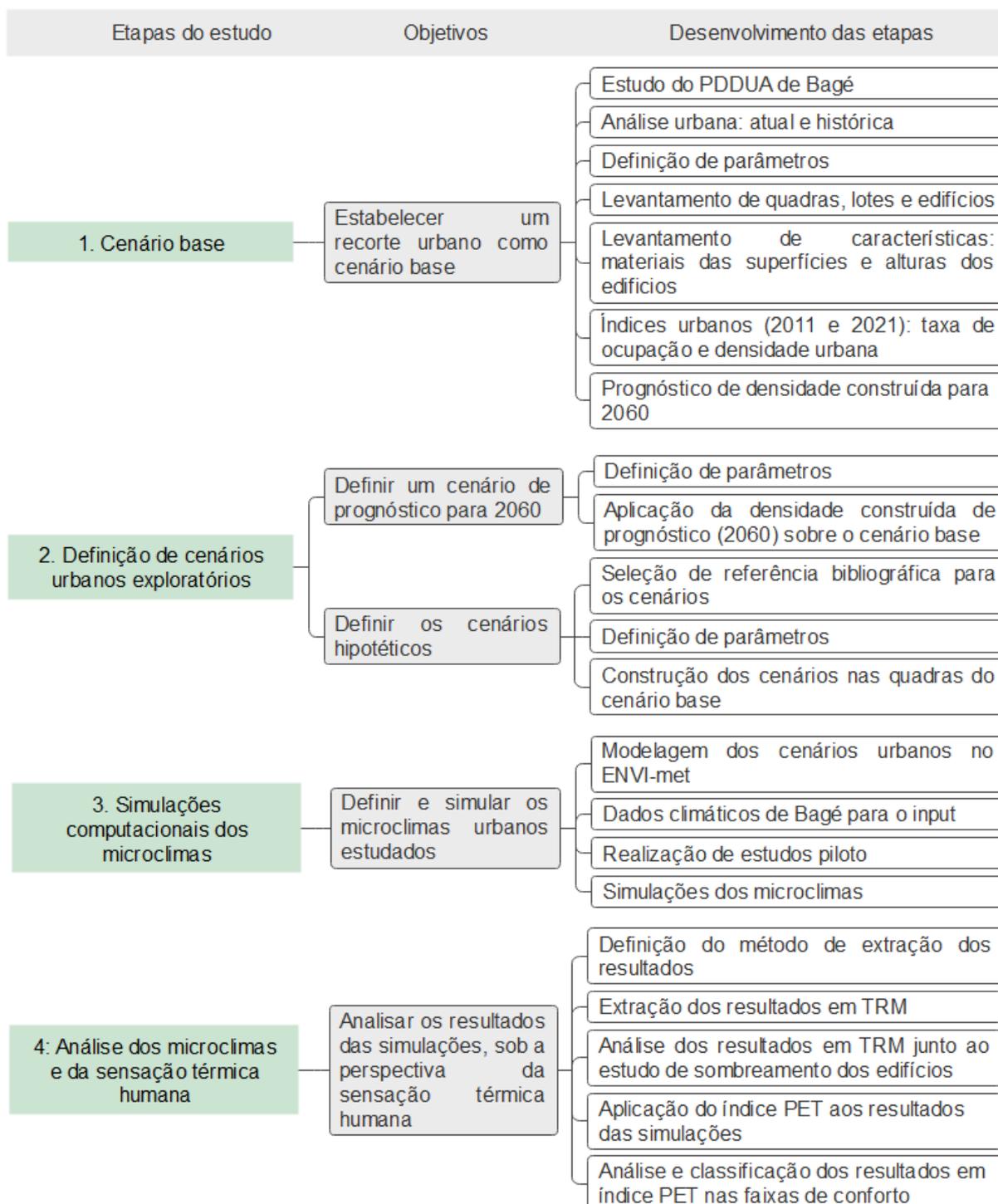


Figura 3.5: Etapas deste estudo  
 Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 3.2 apresenta os programas computacionais utilizados em cada etapa.

Tabela 3.2 - Programas utilizados em cada etapa

Etapas	Programas
1. Cenário base	QGIS, <i>SketchUp</i> e <i>Modelur (plugin)</i>
2. Definição de cenários urbanos exploratórios	<i>SketchUp</i> e <i>Modelur (plugin)</i>
3. Simulações computacionais dos microclimas	ENVI-met e <i>WeatherShift</i>
4. Análise dos microclimas e da sensação térmica humana	ENVI-met, <i>SketchUp</i> e <i>Rayman</i>

### 3.2 Etapa 1: Cenário base

A primeira etapa deste estudo definiu um recorte urbano na cidade de Bagé, como cenário base, a partir dos parâmetros estabelecidos. Como realizado por Galal, Mahmoud e Sailor (2020), Monteiro (2020), Leal (2018), Torres (2017) e Schmitz (2014), esta pesquisa estuda um cenário de morfologia urbana atual, o cenário base. A Figura 3.6 apresenta o fluxograma desta etapa iniciando pela definição de parâmetros para a seleção da área e do recorte urbano (cenário base), seguida do mapeamento de novas edificações e do estudo de Macrozonas urbanas. Ao final da etapa obteve-se o modelo tridimensional do recorte, a taxa de ocupação e as densidades construídas para três períodos: 2011, 2021 e de prognóstico para 2060.

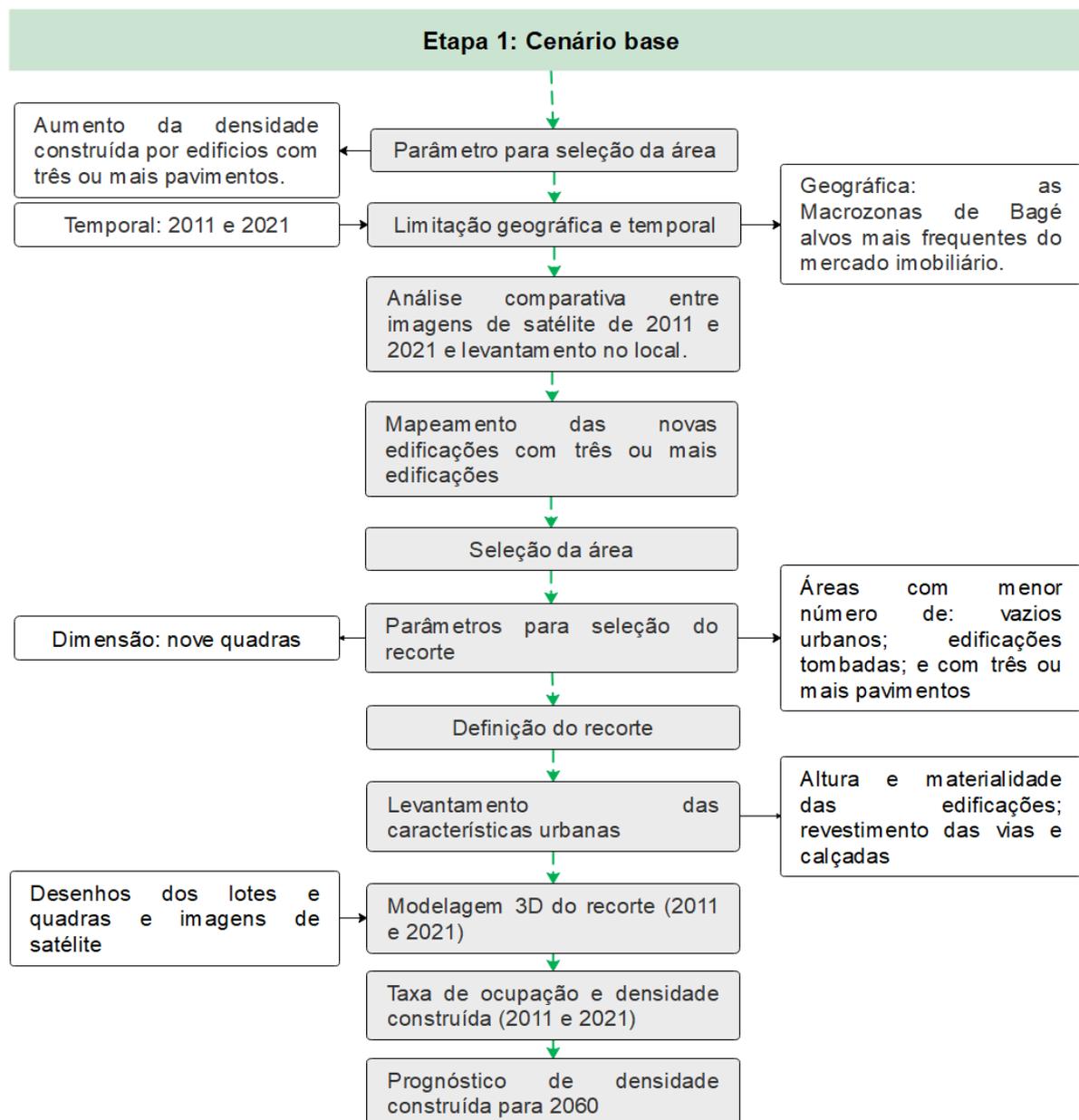


Figura 3.6: Fluxograma da etapa 1.  
Fonte: Autora, 2023.

Primeiramente, adotou-se o aumento do adensamento construtivo, foco desta pesquisa, como critério para seleção da área urbana e posterior recorte. Limitou-se o período de abrangência entre 2011 e 2021 para análise do aumento da densidade construída, devido à disponibilidade de dados legíveis. Nesse caso, os dados disponíveis que possibilitaram identificar o aumento da densidade construída foram as imagens de satélites de 2011 e 2021 do *Google Maps*.

Para a limitação geográfica da análise da densidade construída, primeiramente, observou-se no vigente Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental (PDDUA), que divide Bagé em nove macrozonas: Central; Reestruturação;

Adensamento Restrito; Universitária; Campestre; Anel Perimetral; Produção; Cultural; e Ambiental, conforme demonstrado na Figura 3.7.

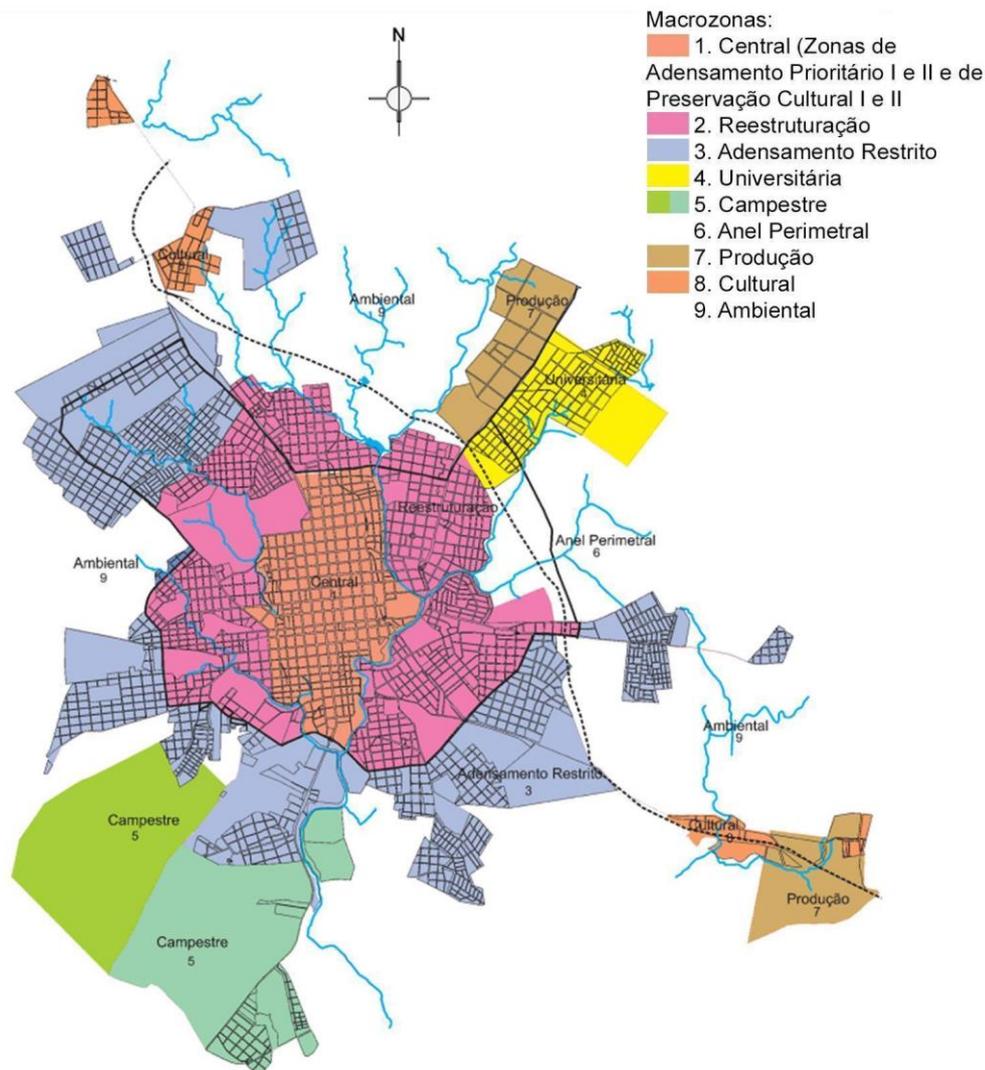
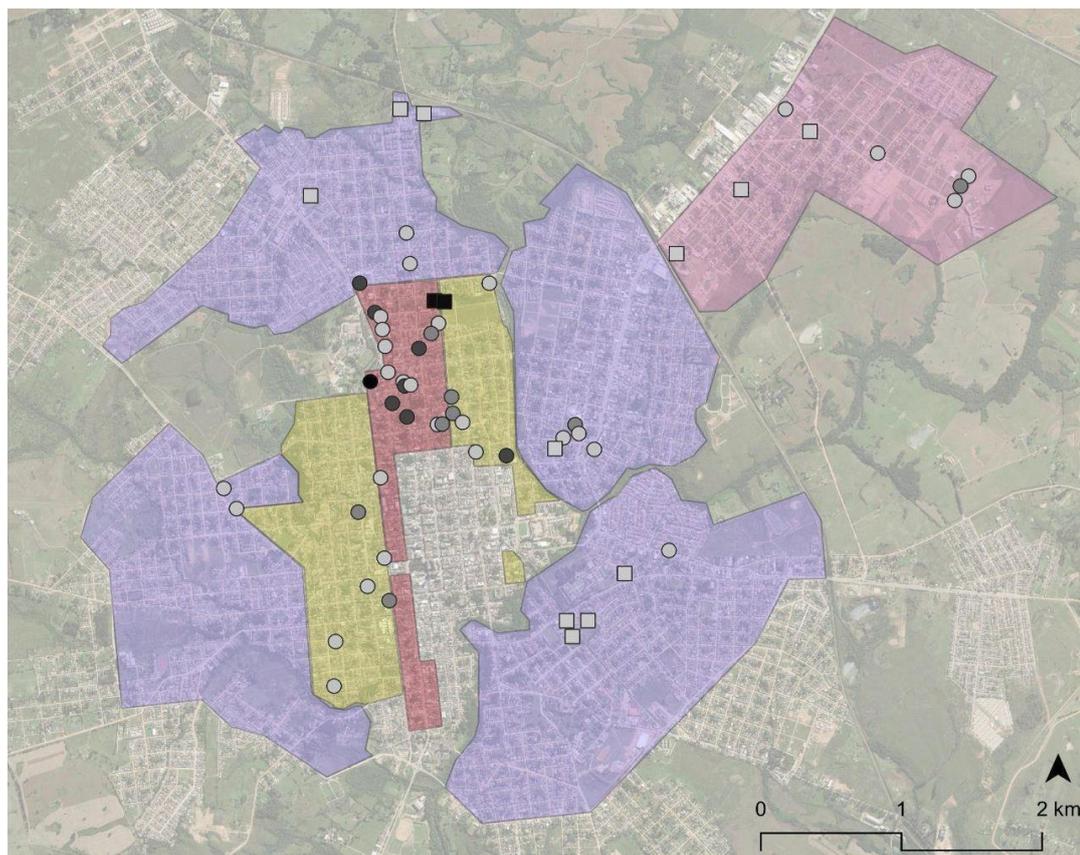


Figura 3.7: Macrozonas de Bagé conforme PDDUA.  
Fonte: Mapa do PDDUA vigente editado pela autora, 2023.

A macrozona Central divide-se em duas zonas de Adensamento Prioritário e outras duas de Preservação Cultural. A fim de delimitar geograficamente o recorte na malha urbana, selecionou-se as zonas com maior incentivo ao aumento da densidade construída e que são alvos mais frequentes do mercado imobiliário, sendo elas: Adensamento Prioritário I; Adensamento Prioritário II; Reestruturação Urbana e Universitária (Figura 3.8).



Legenda:

Condomínios com:

- 4 pav.
- 10 pav

Edifícios com:

- 3 - 4 pav.
- 5 - 6 pav.
- 7 - 8 pav.
- 9 - 10 pav.

Macrozonas (PDDUA)

- Zona de Adensamento Prioritário 1
- Zona de Adensamento Prioritário 2
- Zona de Reestruturação
- Zona Universitária

Figura 3.8: Mapeamento dos edifícios com três ou mais pavimentos, construídos entre 2011 e 2021. Fonte: Edição da autora sobre imagem do Google Maps (2021), 2023.

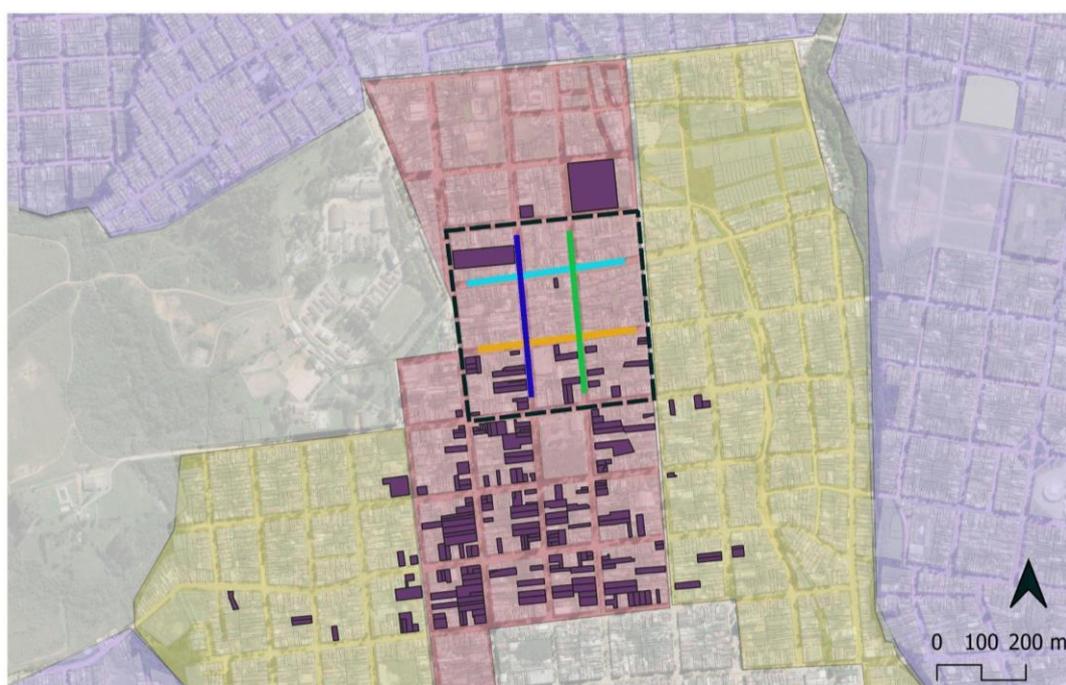
Definidos o critério para a escolha da área urbana, e as limitações temporais e geográficas, identificou-se os novos edifícios com três ou mais pavimentos, através da análise comparativa entre as imagens de satélite de 2011 e 2021 do *Google Maps* e do levantamento no local. Estabeleceu-se o parâmetro de três ou mais pavimentos devido à maior parte dos edifícios na cidade ter até dois pavimentos. A Figura 3.8 demonstra o mapeamento dessas edificações, elaborado no programa QGIS, aplicativo de Sistema de Informação Geográfica de livre acesso, sobre imagem de satélite de 2021 do *Google Maps*. Os círculos representam as novas construções isoladas e os quadrados, condomínios (conjunto de edifícios).

O mapeamento demonstrou que a maioria dos edifícios construídos com mais de três pavimentos situam-se no bairro Centro, em uma área da Zona de Adensamento Prioritário I (ZAP I), representada em vermelho na Figura 3.8, definindo-a como a área urbana para seleção do recorte (cenário base). Conforme o PDDUA, a

ZAP I possui índices mais elevados para densidade construída e verticalização, e o objetivo de “estimular a morfologia urbana vertical”, estabelecendo máximos: coeficiente de aproveitamento igual a 4.5; altura de 24 metros e taxa de ocupação de 66%.

Optou-se pela dimensão de nove quadras para definição do recorte (cenário base) por abranger uma quadra central (foco do estudo) e seu entorno imediato, as oito quadras mais próximas. Semelhantemente, Brandão e Barbosa (2023), Gusson (2020) e Leal (2018) delimitaram o recorte de estudo abrangendo a área foco da análise e seu entorno imediato.

Compreende-se que edificações tombadas não deverão ser substituídas por novas, conforme restrições legislativas, assim como dificilmente os edifícios mais altos serão demolidos. Assim, para definir a localização do recorte dentro da área selecionada, verificou-se as quadras com menor número de: a) edificações tombadas; b) vazios urbanos; e c) edificações existentes já com três ou mais pavimentos. A Figura 3.9 mapeia os lotes com imóveis tombados pelo IPHAN e IPHAE na área e demarca o recorte de nove quadras definido como cenário base desta pesquisa.



Legenda:

Edificações tombadas  
Recorte (objeto base)

Zonas (PDDUA)  
Adensamento Prioritário 1  
Adensamento Prioritário 2  
Reestruturação

Vias:  
Av. Tupy Silveira  
Av. Marechal Floriano  
Rua 24 de maio  
Rua Venâncio Aires

Figura 3.9: Mapeamento para definição recorte urbano (cenário base do estudo).

Fonte: Edição da autora sobre imagem do Google Maps (2022) com base nos mapas do IPHAN<sup>9</sup> e do IPHAE<sup>10</sup>, 2023.

A quadra central do recorte definido tangência as Avenidas Tupy Silveira (oeste), Marechal Floriano (leste) e as Ruas 24 de Maio (norte) e Venâncio Aires (sul) e tem apenas uma edificação tombada. Outras quatro quadras do recorte (à norte, nordeste, leste e oeste da quadra central) não têm edificações tombadas. A Figura 3.10 apresenta fotos da quadra central do recorte.

---

<sup>9</sup> Dossiê de Tombamento do IPHAN em outubro de 2009.

<sup>10</sup> Mapa de Tombamento de Bagé (2017). Disponível em: <<http://www.iphae.rs.gov.br/Main.php?do=DownloadDetalhesAc&item=46002>>. Acesso em: janeiro de 2022.



Figura 3.10: Fotos da quadra central do recorte.  
Fonte: Autora, 2023.

Observa-se na Figura 3.10, o predomínio de volumes horizontais (até dois pavimentos) com alguns edifícios mais altos (três a sete pavimentos) e vias amplas. Por meio de visita ao local, realizou-se o levantamento de características urbanas do recorte (alturas e materialidade das edificações, revestimentos das vias e calçadas) necessárias para as simulações dos microclimas. A vegetação existente não foi levantada para este estudo, focando as discussões e análises desta pesquisa às

variáveis urbanas relacionadas ao adensamento construtivo. A Figura 3.11 demonstra a pavimentação das vias e das calçadas do recorte.



Figura 3.11: Fotos das calçadas de pisos cimentício em (a) e (b) e das vias carroçáveis com calçamento de pedra em (c) e coberta por asfalto acima do calçamento em (d).  
Fonte: Autora, 2023.

Conforme demonstrado na Figura 3.11, as calçadas possuem pisos cimentícios, representados em (a) e em (b). As vias carroçáveis apresentam calçamento em pedra na Rua 24 de Maio, representado em (c), e são cobertas por asfalto na Rua Venâncio Aires e nas Avenidas Tupy Silveira e Marechal Floriano, ilustradas em (d). A partir dos dados levantados, das imagens de satélite e dos desenhos de quadras e dos lotes, disponibilizados pela Prefeitura Municipal<sup>11</sup>, modelou-se tridimensionalmente as edificações e as quadras do recorte no programa *SketchUp*, Figura 3.12.

<sup>11</sup>Disponíveis em: <<https://sites.google.com/site/ggcbage/home/arquivos/mapas-de-bag%C3%A9?authuser=0>>. Acesso em: novembro de 2021.



Figura 3.12: Modelagem tridimensional das edificações e quadras do recorte em 2021  
 Fonte: Modelagem no *SketchUp* realizada e editada pela autora, 2023.

A Figura 3.12 demonstra os imóveis tombados, que devem ser preservados; as edificações que foram construídas na última década, levantadas com base em imagens de satélite do *Google Maps* de 2011 e do *Google Street View* entre 2011 e 2021; e as quadras enumeradas, correlacionando-as à Tabela 3.3.

A partir desse modelo tridimensional (Figura 3.12) obteve-se as taxas de ocupação (T.O.) e as densidades construídas (ou C.A.) das quadras do recorte em 2021. Para isso, utilizou-se o *Modelur*, um *plugin* paramétrico de modelagem urbana implementado no *SketchUp* que fornece esses índices, a partir da modelagem tridimensional. Em seguida, substituíram-se as edificações construídas entre 2011 e 2021 (representadas em laranja na Figura 3.12) pelas edificações existentes anteriormente a 2011 e obteve-se as densidades construídas e as taxas de ocupação de 2011 por quadra.

A Tabela 3.3 apresenta os percentuais de taxa de ocupação e as densidades construídas dos anos de 2011 e 2021, o aumento da densidade construída na última década e o prognóstico da densidade construída para 2060 (cálculo explicado a seguir).

Tabela 3.3 - Taxas de ocupação, densidades construídas e prognóstico de adensamento para 2060.

Quadra	Taxa de ocupação (%)		Densidade construída (ou C.A)			Prognóstico da densidade para 2060
	2011	2021	2011	2021	Aumento (2011-2021)	
1	38,65	41	0,57	0,65	0,08	0,94
2	64	64	<b>1,15</b>	<b>1,15</b>	0	1,67
3	36,5	37	0,91	0,94	0,03	1,36
4	36	36	<b>0,48</b>	<b>0,48</b>	0	0,70
5	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>0,64</b>	<b>0,88</b>	<b>0,24</b>	1,27
6	32	32	0,39	0,41	0,02	0,59
7	46	48	0,68	0,89	0,21	1,28
8	53	54	0,94	1,02	0,08	1,48
9	38	38	<b>0,52</b>	<b>0,52</b>	0	0,78
Total	-	-	6,28	<b>6,94</b>	<b>0,66</b>	10,07

Observa-se na Tabela 3.3 mínimas ou nulas alterações na taxa de ocupação entre 2011 e 2021 e que as quadras números dois, quatro e nove mantiveram suas densidades construídas (não ocorreu a construção de novas edificações). A quadra central do recorte, número cinco, apresentou o maior aumento de densidade construída (0.64 para 0.88) do recorte e pequeno aumento da taxa de ocupação (de 42% para 43%).

O somatório das densidades construídas foi realizado para a finalidade de verificar o aumento desse índice no recorte (nove quadras) na década 2011 – 2021. O aumento das densidades construídas total foi de 0.66, representando crescimento de aproximadamente 10% (de 6,28 para 6,94) entre 2011 e 2021, utilizado como base para o cálculo de prognóstico. Em seguida, projetou-se as densidades construídas para o ano de 2060, aplicando o crescimento (10%) por década sobre a densidade construída de 2021 de cada quadra do recorte, através da seguinte fórmula:

$$(\text{densidade construída em 2021}) \times (1 + \text{taxa de crescimento por década})^t$$

Utilizou-se a densidade construída de cada quadra em 2021 apresentada na Tabela 3.3, a taxa de crescimento de 10% e o período "t" é igual a 4, referente a quatro décadas (2021-2060).

### 3.3 Etapa 2: Definição de cenários urbanos exploratórios

A segunda etapa teve como objetivo conceber os cenários urbanos exploratórios desta pesquisa, a partir do cenário base, definido na etapa anterior. A Figura 3.13 apresenta o fluxograma para construção do cenário de prognóstico e outros quatro hipotéticos, a partir da definição de parâmetros, e obtendo-se os modelos tridimensionais ao final da etapa.

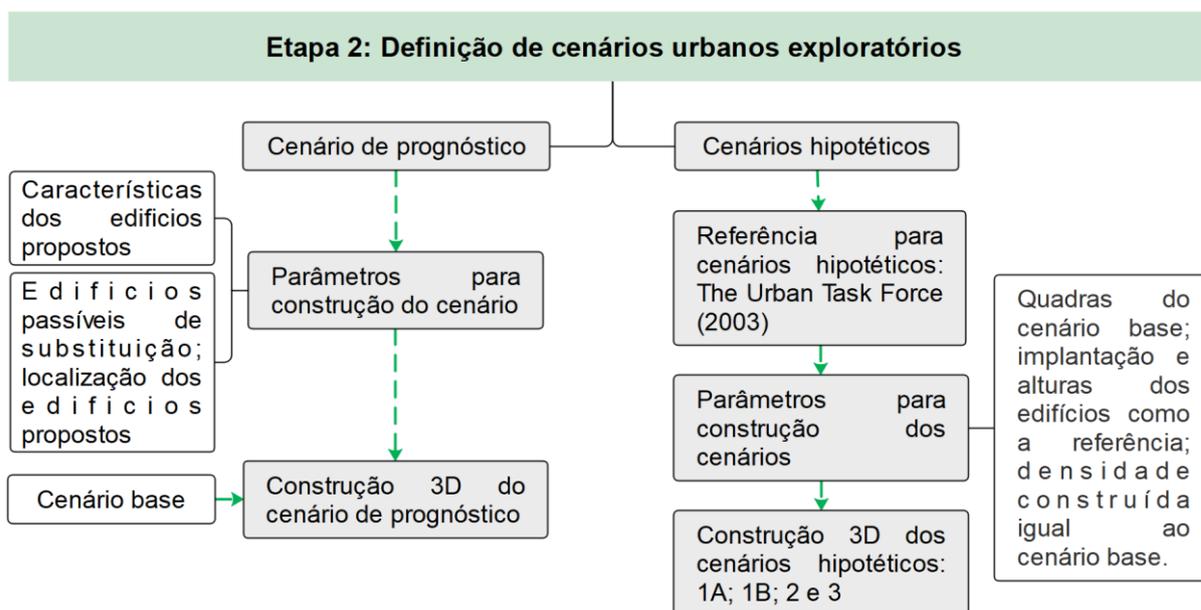


Figura 3.13: Fluxograma da etapa 2.  
Fonte: Autora, 2023.

A construção dos cenários deste estudo buscou retratar situações mais realistas para a cidade de Bagé, diferentemente da maioria das pesquisas da área que exploram os índices construtivos máximos dos Planos Diretores municipais. O cenário base deste estudo consiste em um cenário realista, que representa um recorte urbano atual na cidade de Bagé, como referência para comparação com os demais cenários definidos para este estudo. Os cenários de prognóstico consistem em cenários urbanos e climáticos projetados para o futuro que buscam ser realistas.

A partir do cenário base e do prognóstico de densidade construída para 2060 (definido na etapa anterior), estabeleceu-se os seguintes parâmetros iniciais para a construção do cenário de prognóstico:

1. Edifícios passíveis de serem substituídos do cenário base: edificações até dois pavimentos e não tombadas;
2. Localização dos edifícios propostos: numerou-se os lotes vazios ou com edifícios passíveis de serem substituídos, iniciando-se pela esquina

nordeste e prosseguindo no sentido horário em cada quadra (Figura 3.14), e realizou-se um sorteio. A cada número sorteado (correspondente a um lote), substituiu-se a edificação existente e conferiu-se a densidade construída da quadra. Repetiu-se esse processo até atingir-se a densidade construída estimada para 2060 (Tabela 3.3).

Optou-se por manter as edificações tombadas, em respeito ao patrimônio histórico e cultural da cidade e à legislação, assim como as edificações com três ou mais pavimentos, visto que as edificações propostas para 2060 tem três pavimentos (conforme explicado a seguir). Além disso, a maioria dos edifícios do cenário base possui até dois pavimentos, mais viáveis e prováveis de serem demolidos e substituídos.

O sorteio, realizado em ferramenta online<sup>12</sup>, é um método também utilizado por Brandão (2020) que traz o aspecto de aleatoriedade à localização das edificações propostas no prognóstico. Castro (2019) conta que dificilmente se pode prever com determinada precisão o desenvolvimento das cidades e cita fatores complexos como: a infraestrutura; a legislação urbanística; os proprietários dos lotes; o mercado imobiliário; os planejadores urbanos; os moradores e seu modo de vida e a apropriação dos espaços. A Figura 3.14 apresenta os lotes excluídos do sorteio (edifícios tombados ou existentes com mais de dois pavimentos) e os incluídos (sorteados e não sorteados).

---

<sup>12</sup>Website: sorteador. Disponível em: <<https://sorteador.com.br/>>. Acesso em março de 2022.



Figura 3.14: Lotes incluídos no sorteio e os sorteados.

Fonte: Autora, 2023.

Para a proposição dos edifícios de prognóstico nos lotes sorteados, estabeleceu-se os seguintes parâmetros:

1. Altura dos edifícios: três pavimentos. Para definição da altura considerou-se o porte da cidade, o predomínio de edificações até dois pavimentos e os cenários de média e elevada ocupação de *The Urban Task Force* (2003), como abordado na seção 2.1;
2. Taxa de ocupação: manteve-se igual ao cenário base, devido à baixa variação entre 2011 e 2021, observada na Tabela 3.3;
3. Recuos laterais: em lotes com testada maior que sete metros, aplicou-se o recuo mínimo de dois metros (condição para haver aberturas na fachada lateral, conforme PDDUA de Bagé). Nos demais lotes, não foram aplicados recuos laterais, pois resultaria em edificações muito estreitas;

4. Recuos de fundos: respeitou-se a mínima dimensão (12% da maior dimensão do terreno), conforme PDDUA de Bagé;
5. Recuo de ajardinamento (frontal): opcional pelo PDDUA para a Zona do objeto base, optou-se por não aplicar o recuo devido a maioria das edificações existentes nas áreas próximas localizarem-se no alinhamento predial.

Na quadra número três, substituiu-se todas as edificações possíveis conforme os parâmetros definidos e atingiu-se a densidade construída de 1.27, ao invés de 1.36 como projetado para 2060. Essa eventualidade não apresentou prejuízos ao estudo, visto que todas as edificações da quadra número três ficaram com ao menos três pavimentos, o que já causa efeitos ao entorno. Nas demais quadras atingiu-se a densidade construída estimada. A Figura 3.15 apresenta os cenários base e prognóstico, modelados no programa *SketchUp*.

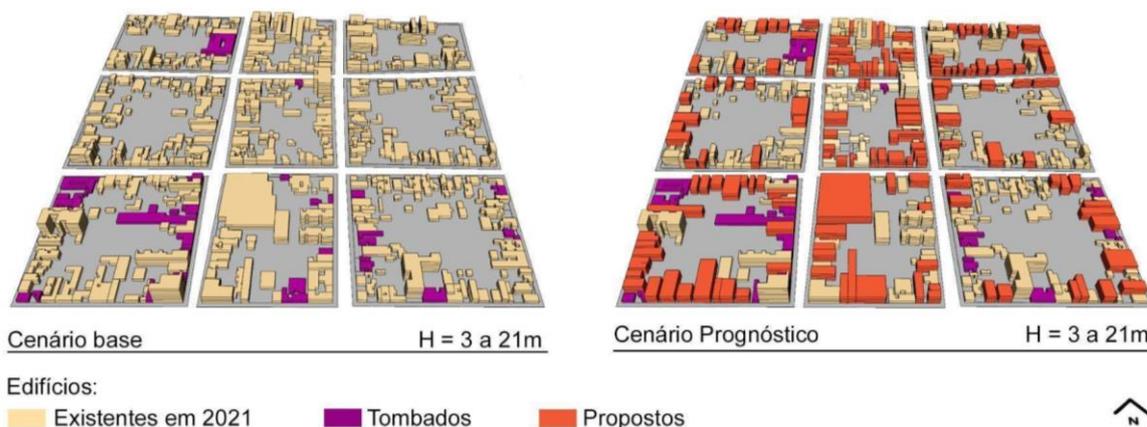


Figura 3.15: Modelagem tridimensional dos cenários base e prognóstico.  
Fonte: Autora, 2023.

No cenário prognóstico observa-se, em vermelho, as edificações que foram propostas para o prognóstico de 2060. Ambos cenários possuem edificações entre 3 e 21 metros e iguais taxa de ocupação (conforme pré-estabelecido), diferenciando-se nas densidades construídas.

Em seguida, foram definidos quatro cenários hipotéticos com diferentes taxas de ocupação para a compreensão do clima de Bagé. Primeiramente, selecionou-se uma referência para construção dos cenários: *The Urban Task Force* (2003) (apresentada no capítulo 2.1), cujos cenários são ilustrados na Figura 3.16. Optou-se por essa referência pelas seguintes razões: a) variações de alturas e implantações dos edifícios relevantes ao estudo de conforto térmico urbano; b) discussão dos autores sobre a relação dos moradores com os espaços abertos dos cenários e a vida

urbana; e c) frequentemente referenciada por outros estudos que discutem a qualidade dos espaços abertos.



Figura 3.16: Distintas formas e ocupações de edifícios abordados por The Urban Task Force (2003).  
Fonte: *The Urban Task Force* (2003), imagem editada pela autora, 2023.

Para a construção dos cenários hipotéticos, utilizou-se a densidade construída do cenário base e replicou-se as implantações e as alturas dos edifícios dos cenários de *The Urban Task Force* (2003). A partir do cenário de edifícios baixos e elevada ocupação da referência utilizada (Figura 3.16), estabeleceram-se duas variações de implantações para este estudo: eixo norte-sul (cenário 1A) e eixo Leste-Oeste (cenário 1B), visto que o sombreamento das áreas abertas se difere entre as implantações. A Figura 3.17 apresenta os quatro cenários resultantes deste estudo.

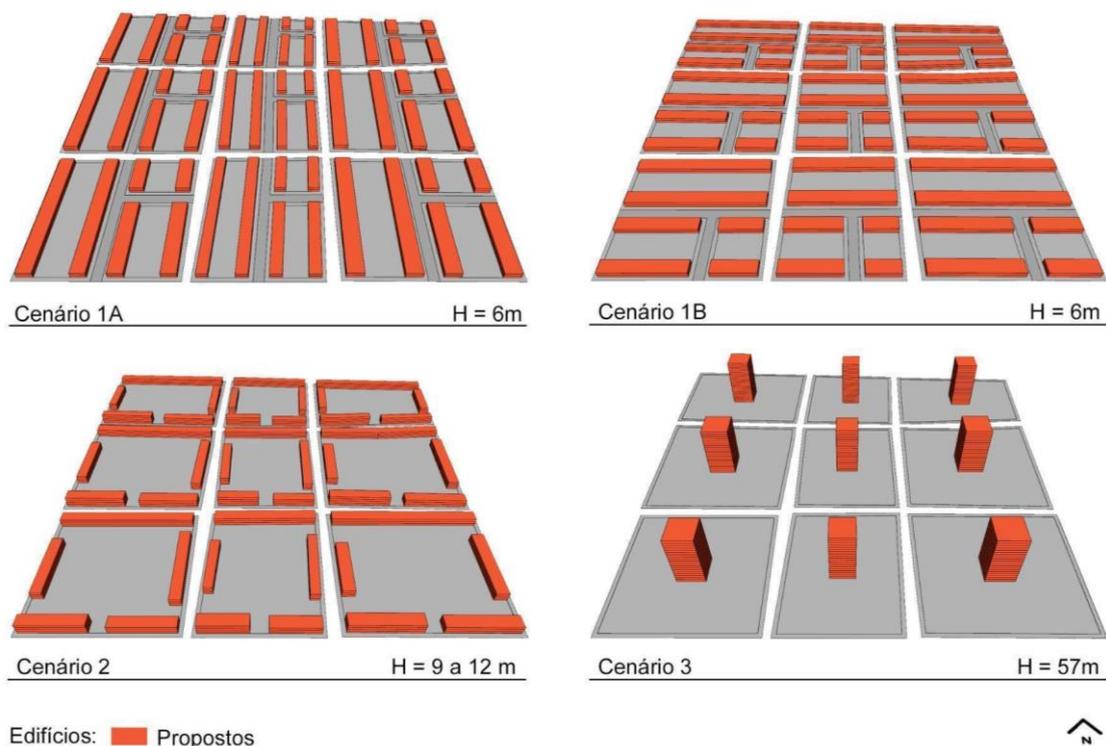


Figura 3.17: Modelagem tridimensional dos cenários 1A; 1B; 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

Como nos cenários de *The Urban Task Force* (2003), os cenários 1A e 1B (Figura 3.17) possuem edificações em blocos com dois pavimentos e vias locais internas à quadra (cuja construção é explicada a seguir e ilustrada na Figura 3.18). O cenário 2 possui edificações com três e quatro pavimentos (ao sul), ocupando o perímetro das quadras, e o cenário 3 possui um edifício de dezenove pavimentos por quadra.

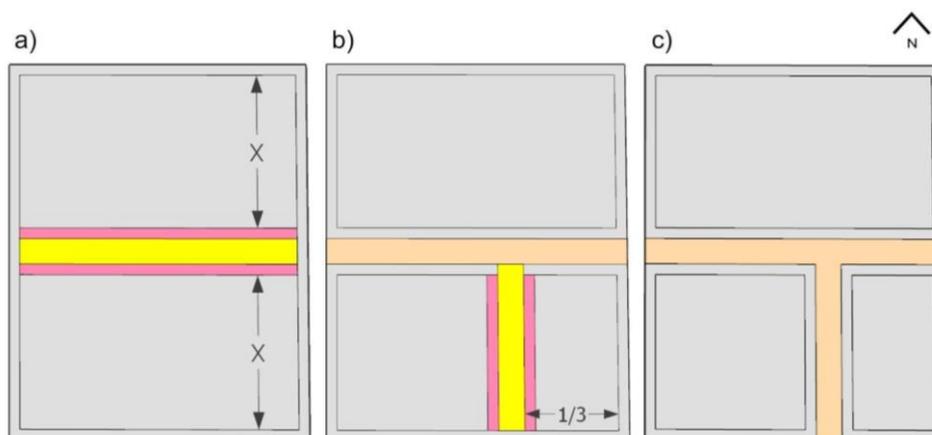


Figura 3.18: a) traçado de via no eixo Leste-Oeste; b) traçado de via no eixo norte-sul e c) desenho final da quadra.

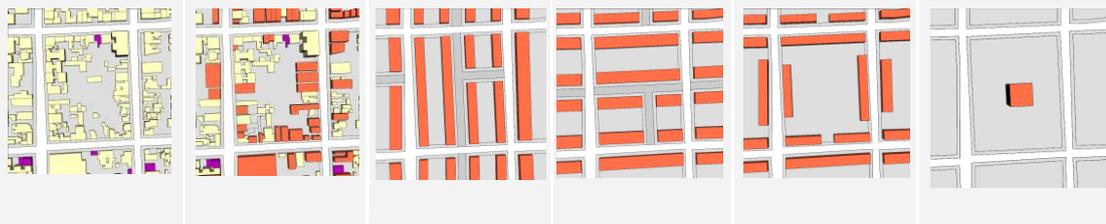
Fonte: Autora, 2022.

As vias locais dos cenários 1A e 1B, como ilustrado na Figura 3.18, reproduzem as vias do cenário de referência de *The Urban Task Force* (2003) e foram elaboradas da seguinte forma:

1. Traçou-se uma via Leste-Oeste centralizada na quadra com 9.5m de largura (representada em amarelo);
2. Determinou-se as calçadas com quatro metros, igual às demais existentes (representadas em rosa);
3. Traçou-se outra via e as calçadas na medida de  $\frac{1}{3}$  da face sul, representado em (b) na Figura 3.18.

A Tabela 3.4 apresenta os seis cenários exploratórios deste estudo através das vistas superiores das quadras central e entorno, e suas respectivas alturas das edificações (H), taxa de ocupação (T.O.), densidade construída (ou C.A.) e a relação entre a altura média dos edifícios e a largura da via (H/W).

Tabela 3.4 - Taxas de ocupação, densidades construídas e prognóstico de adensamento para 2060.



	Cenário base	Cenário prognóstico	Cenário 1A	Cenário 1B	Cenário 2	Cenário 3
H	3 a 21m	3 a 21m	6m	6m	9 a 12m	57m
T.O.	44%	44%	39%	39%	25%	4%
C.A.	0.77	1.11	0.77	0.77	0.77	0.77
H/W	0.25	0.36	0.23	0.23	0.44	0.10

A taxa de ocupação (T.O.) e a densidade construída (ou C.A.) apresentadas na Tabela 3.4 consistem na média das nove quadras em cada cenário. Conforme proposto, os cenários base, 1A, 1B, 2 e 3 possuem a mesma densidade construída (0.77), mas observa-se que as taxas de ocupação variam significativamente entre 4% (cenário 3) e 44% (cenário base).

Observa-se que os seis cenários urbanos deste estudo possuem proporção H/W menor que um, ou seja, a altura média dos edifícios é menor que a largura da via. A menor proporção H/W é no cenário 3 (0.10), devido a maior distância entre os edifícios, e a maior, ocorre no cenário 2 (0.44).

### 3.4 Etapa 3: Simulações computacionais dos microclimas.

A terceira fase deste estudo objetivou estabelecer as características climáticas junto aos cenários urbanos e realizar as simulações computacionais. A Figura 3.19 apresenta o fluxograma da etapa, iniciada pela modelagem dos cenários urbanos no programa de simulação ENVI-met, seguida da definição e configuração das condições climáticas, realização de estudos piloto e finalizada com as simulações computacionais e a validação dos modelos calibrados.

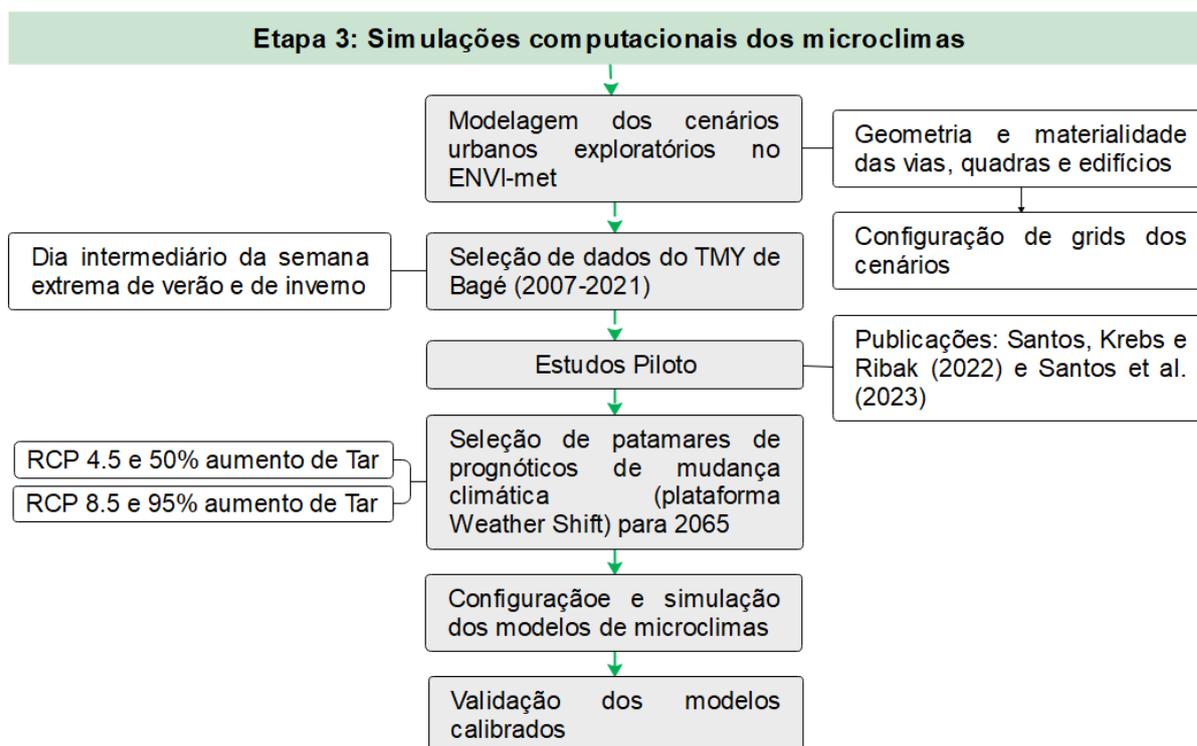


Figura 3.19: Fluxograma da etapa 3.  
Fonte: Autora, 2023.

A partir dos cenários exploratórios definidos na etapa anterior, avançou-se para a utilização do programa que simula microclimas urbanos: o ENVI-met (versão 5.1, licença *Student*). Como observado no capítulo 2.3, o programa é amplamente utilizado em estudos semelhantes e validado para diferentes climas, inclusive o Cfa (clima de Bagé). Primeiramente, remodelou-se os cenários utilizando a ferramenta *Monde* do ENVI-met, a partir de imagens do modelo do *SketchUp*.

No *Monde* as geometrias são desenhadas através de polígonos, sem preocupação com adequação à resolução do *grid*, definida ao exportar o modelo. As geometrias dos elementos (edificações, vias e quadras) são modeladas em diferentes camadas e atribuídos os materiais e as alturas dos edifícios. Outro benefício é a possibilidade de exportar apenas uma determinada área do cenário, vantajoso para as simulações de testes, sendo uma ferramenta prática e flexível. A Figura 3.20, a seguir, exemplifica o desenho da geometria das edificações, das quadras e das vias no *Monde* e a Tabela 3.5 apresenta os materiais especificados conforme o levantamento realizado. Nessa etapa, também se informou a localização geográfica e o fuso horário de Bagé.

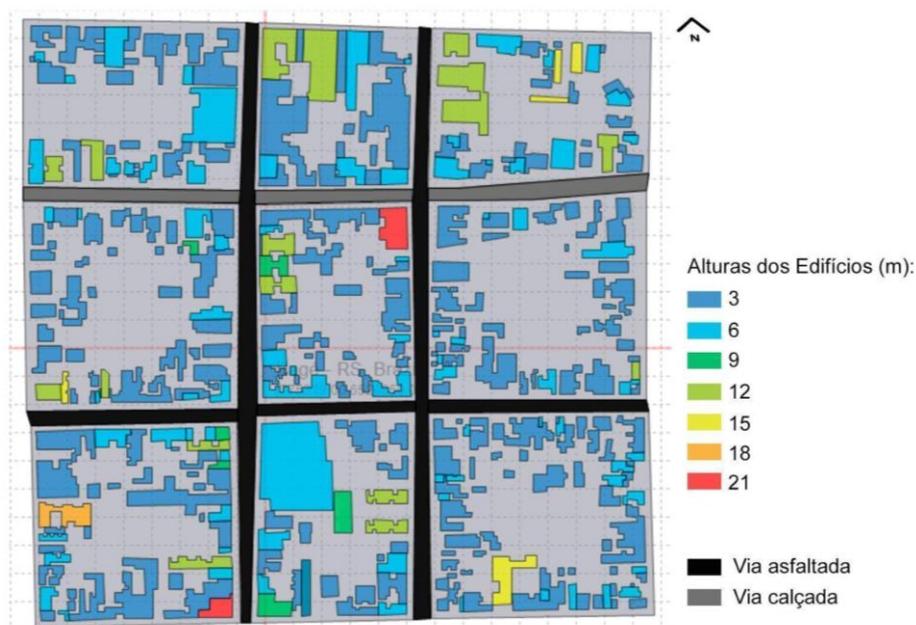


Figura 3.20: Desenho dos edifícios, quadras e vias do cenário base.  
Fonte: Imagem do Monde (ENVI-met) editada pela Autora, 2023.

Tabela 3.5- Materiais especificados nos cenários e suas propriedades de absorvância e emissividade.

	Material	Cor	Absorvância ( $\alpha$ )	Emissividade e ( $\epsilon$ )
Cobertura	Telha cerâmica	Terracota	0.5	0.9
Paredes externas	Reboco externo - insolação moderada (2,5cm)	Cinza	0.4	0.9
	Tijolo furado (19cm)	Terracota	0.6	0.9
	Reboco interno - insolação moderada (2,5cm)	Cinza	0.4	0.9
Calçadas e pátios	Concreto com desgaste (usado)	Cinza	0.7	0.9
Vias carroçáveis	Granito	Cinza	0.6	0.9
	Asfalto	Escuro	0.8	0.9

Os cenários modelados no *Monde* foram exportados para o *Spaces* (ENVI-met) com *grids* de resolução de dois metros (recoo mínimo entre as edificações) nos eixos “x” e “y” e de três metros (altura de cada pavimento) no eixo “z”. No *Spaces* conferiu-se a quantidade mínima de *grids* solicitada pelo programa nas bordas de cada modelo, o que é essencial para a estabilidade das simulações.

Santos, Krebs e Ribak (2022) e Santos et al. (2023) apresentam simulações de testes que contribuíram nas definições para as simulações desta pesquisa. Em Santos, Krebs e Ribak (2022), simulou-se apenas as quadras centrais dos cenários testes e em Santos et al. (2023) ampliou-se a área simulada, contemplando a quadra

central e parte das oito quadras do entorno dos cenários. Verificou-se a importância das quadras do entorno nas simulações, devido ao sombreamento que causam sobre a quadra central.

Nesta pesquisa, o intuito inicial foi simular os modelos completos (com as nove quadras inteiras), mas verificou-se que seriam necessários mais de 15 dias<sup>13</sup> por cada simulação de cenário. Considerando o tempo e a capacidade necessárias para as simulações e visando a qualidade dos resultados, optou-se por realizar um recorte na área modelada, aplicado igualmente a todos os cenários. A Figura 3.21 demonstra a área considerada para as simulações (demarcada em vermelho), exemplificada pelo cenário base. Após esse recorte, definiu-se as dimensões dos modelos, apresentadas na Tabela 3.6.

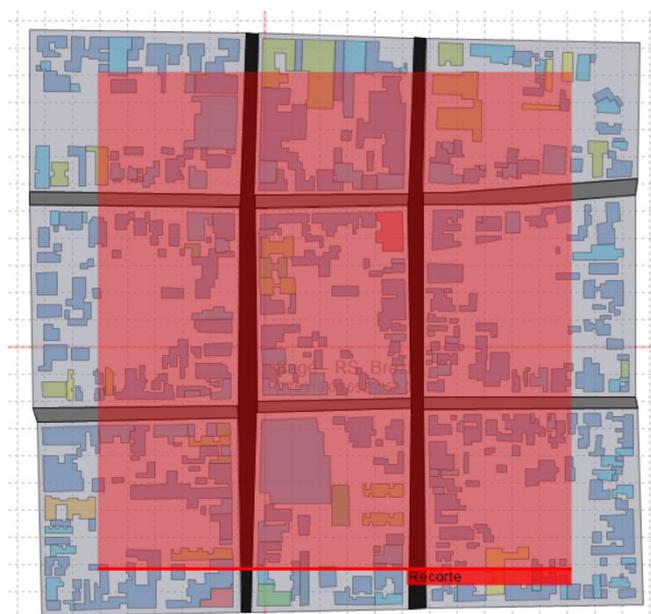


Figura 3.21: Recorte aplicado aos cenários modelados, exemplificado no cenário base.  
Fonte: Imagem do Monde (ENVI-met) editada pela Autora, 2023.

---

<sup>13</sup> Nas condições disponíveis para o desenvolvimento desta pesquisa: licença *Student* (permite a utilização de apenas um core) e processador Intel® Core(TM) i5- 9300H, CPU 2.40Ghz.

Tabela 3.6 - Dimensões dos modelos dos cenários exploratórios.

Cenários	Dimensões do modelo (m)	Dimensões em <i>grids</i>	Dimensão do <i>grid</i> (m) - x, y e z	Fator telescópico	Início do telescópico em (m)
base	424 x 446 x 45	212 x 223 x 15	2 x 2 x 3	-	-
prognóstico	424 x 446 x 45	212 x 223 x 15	2 x 2 x 3	-	-
1A	432 x 452 x 15	216 x 226 x 5	2 x 2 x 3	-	-
1B	432 x 452 x 15	216 x 226 x 5	2 x 2 x 3	-	-
2	432 x 452 x 27	216 x 226 x 9	2 x 2 x 3	-	-
3	432 x 452 x 120	216 x 226 x 19	2 x 2 x 3*	20%	25

\*nos primeiros 25 metros de altura

Nas bordas dos eixos “x” e “y” foram necessários 24 *grids* nos cenários base e prognóstico e 26 *grids* nos demais cenários (1A, 1B, 2 e 3). A quantidade mínima de *grids* necessários no eixo “z” equivale ao dobro da altura do edifício mais alto do modelo mais um *grid* para todos os cenários. No cenário 3 seriam necessários 39 *grids* no eixo “z”, optou-se, então, por utilizar o fator telescópico<sup>14</sup> de 20%, a partir de 25 metros de altura, reduzindo de 39 para 19 *grids*.

Em seguida, prosseguiu-se para a utilização da ferramenta ENVI-guide (ENVI-met), configurando-se as condições climáticas das simulações. A Figura 3.22 apresenta uma síntese das quatorze simulações realizadas, apontando o cenário urbano, a fonte dos dados climáticos e o período.

<sup>14</sup> Opção que permite diferentes alturas de *grids* em um mesmo modelo. Nesse caso, acima da altura de 25 metros, aumentou-se a dimensão dos *grids* em 20%.

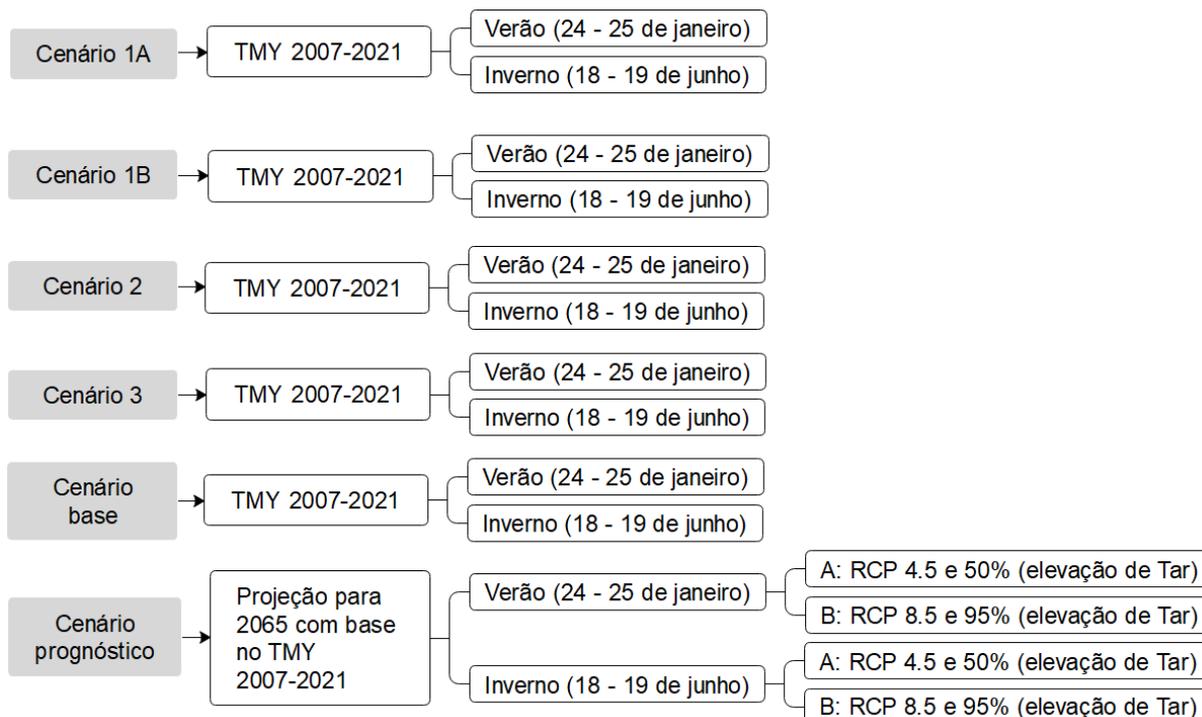


Figura 3.22:Quadro síntese das simulações computacionais  
Fonte: Autora, 2023.

Utilizou-se os dados do Ano Climático de Referência - TMY<sup>15</sup> (2007-2021) de Bagé/RS para calibração dos modelos e dados de entrada das simulações. A calibração dos modelos ocorre pela comparação entre as temperaturas do ar inseridas (dados de entrada da simulação) e as temperaturas de resultados (dados de saída da simulação), apresentada posteriormente na Tabela 3.8.

Dentre os dois métodos (*simple* e *full forcing*) disponíveis para inserção dos dados climáticos, pretendia-se utilizar o *full forcing*, mas a simulação apresentou dados de saída incoerentes. Os resultados de Radiação Solar Direta e da TRM das simulações pelo método *full forcing* estão ilustrados em verde e pelo método *simple forcing*, em laranja na Figura 3.23. Ambas simulações com o mesmo cenário urbano e dados climáticos do dia 18/06 do TMY (2007-2021) de Bagé.

<sup>15</sup> Arquivo de dados determinado a partir da listagem das temperaturas médias mensais do intervalo de tempo determinado (por exemplo 2007-2021) e exclusão das temperaturas extremas até restar uma temperatura para cada mês. Os dados climáticos do ano que restou para cada mês será parte do TMY. Para essa pesquisa foi utilizado o arquivo climático mais recente disponível em Climate.Onebuilding.org.

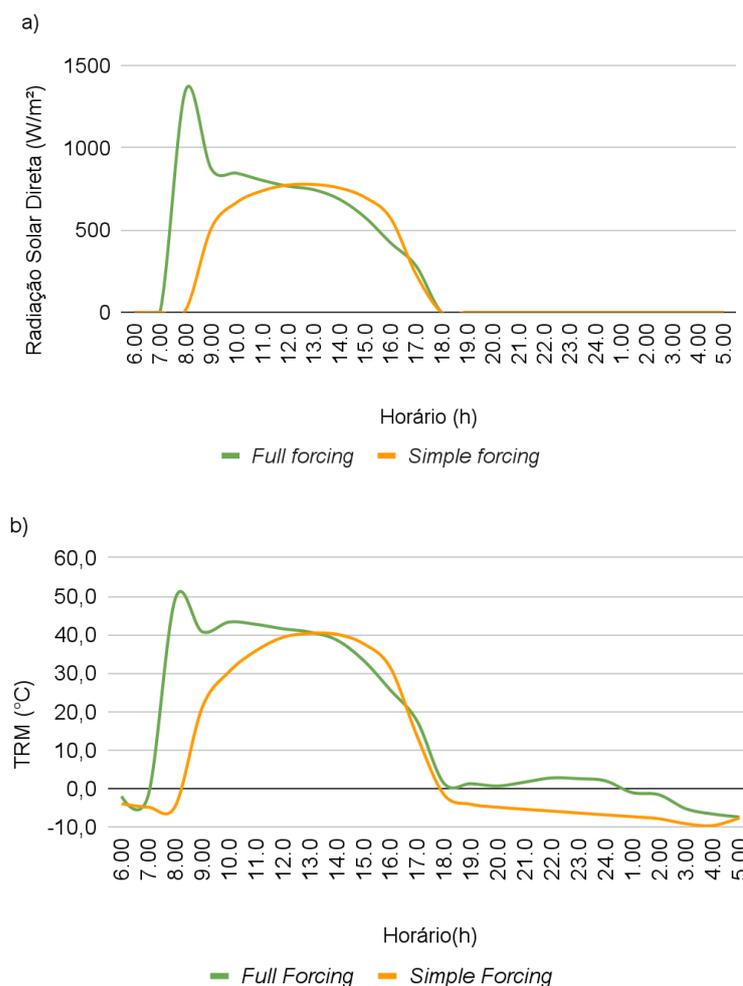


Figura 3.23: Dados de saída de Radiação Solar Direta (a) e TRM (b) das simulações pelo método Full forcing e Simple forcing.

Fonte: Autora, 2023.

Observa-se em (a), Figura 3.23, que a Radiação Solar Direta mais elevada ocorre erroneamente às 8:00h na simulação *full forcing*, enquanto que na simulação *simple forcing* é registrada às 13:00h. Conseqüentemente, observa-se em (b), Figura 3.23, que a TRM mais elevada na simulação *full forcing* ocorre às 8:00h (49.3°C), enquanto que a simulação *simple forcing* apresenta maior temperatura às 13:00h (40.3°C), como esperado por ser o horário mais quente do dia. Atribui-se esses resultados no método *full forcing* a um possível erro devido à ausência de dados descritivos de radiação no arquivo climático TMY (2007-2021).

Realizaram-se outras simulações com método *full forcing*: a) arquivo TMY (2007-2021) em outros dias, ocorrendo o mesmo erro; e b) arquivo TMY mais antigo (1973-2018) que devido a grandes amplitudes na velocidade e direção do vento durante 24 horas apresentaria instabilidades na simulação, conforme alertado pelo programa. As simulações testes, Santos, Krebs e Ribak (2022) e Santos et al. (2023),

foram configuradas com os dados climáticos da média da semana extrema de verão e de inverno do arquivo TMY (1973-2018)<sup>16</sup> de Bagé pelo método *simple forcing*. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar os dados do dia intermediário (quarto dia) das semanas extremas de verão e de inverno do arquivo TMY mais recente disponível (2007-2021) pelo método *simple forcing*. Diferentemente dos estudos piloto, optou-se por utilizar um dia das semanas extremas de verão e de inverno, pois posteriormente foi necessário selecionar um dia para extração de dados climáticos de prognóstico na plataforma *WeatherShift* (abordada mais adiante).

As simulações ocorreram para o período de 24 horas, iniciando às 5:00 horas, antes do nascer do sol, no verão e no inverno. Para os cenários: 1A, 1B, 2, 3 e base foram inseridas as temperaturas e umidades relativa do ar horárias dos dias 24 - 25 de janeiro de 2016 e 18 - 19 de junho de 2014 do TMY, demonstradas na Figura 3.24.

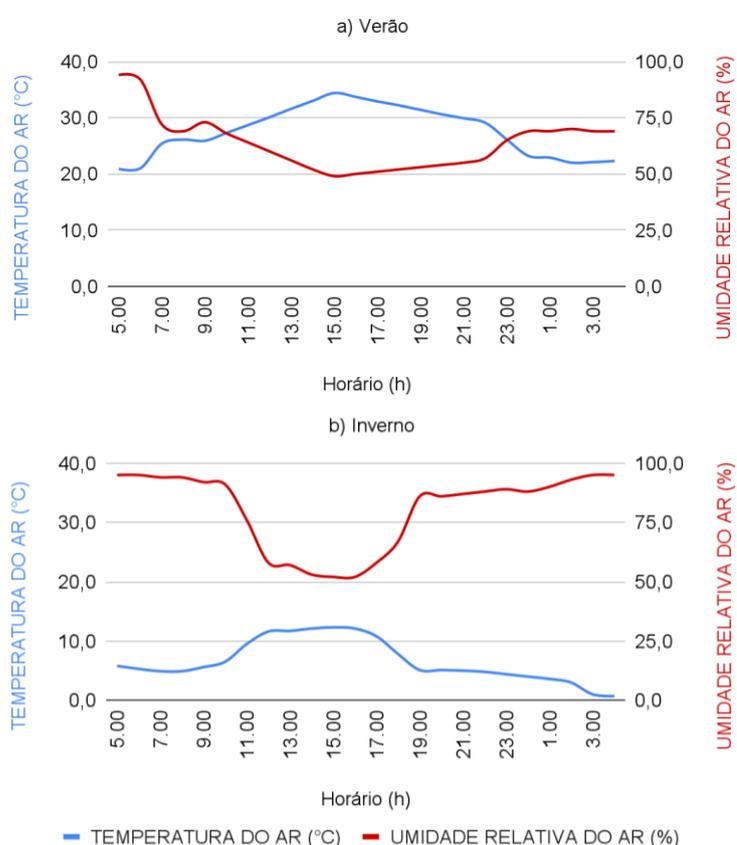


Figura 3.24: Dados horários de entrada da temperatura do ar e da umidade relativa para verão (a) e inverno (b).

Fonte: Dados do TMY (2007-2021) de Bagé editados pela autora, 2023.

<sup>16</sup> No período das simulações piloto em Santos, Krebs e Ribak (2022) e Santos et al. (2023), o arquivo TMY mais recente de Bagé ainda não estava disponível.

Conforme a Figura 3.24, a temperatura do ar varia de 20.9°C a 34.4°C no verão e de 0.7°C a 12.3°C no inverno e umidade relativa permanece acima de 49% em ambos os períodos, ao longo das 24 horas. A Tabela 3.7 apresenta os dados de entrada das simulações referentes à velocidade (média das 24 horas) e direção do vento predominante, radiação solar para os dias simulados, temperatura e umidade relativa do solo, conforme TMY (2007-2021) de Bagé.

Tabela 3.7- Dados de entrada do vento, da radiação solar e do solo.

Vento		verão	inverno
Velocidade a 10m (m/s)		4.35	2.75
Direção (°)		45.0	45.0
Radiação solar		verão	inverno
Fator de ajuste solar		0.95	0.96
Fração de nuvens baixas (x/8)		0	1
Fração de nuvens média (x/8)		0	0
Fração de nuvens altas (x/8)		0	0
Solo		verão	inverno
Temperatura (°C)	camada 0.0 – 0.2m	23.2	13.3
	camada 0.2 – 0.5m	23.2	13.3
	camada 0.5 - 2.0m	21.9	15.0
	camada mais profunda que 2.0m	20.5	16.4
Umidade Relativa (%)	camada 0.0 – 0.2m	50.0	50.0
	camada 0.2 – 0.5m	50.0	60.0
	camada 0.5 - 2.0m	60.0	60.0
	camada mais profunda que 2.0m	60.0	60.0

Os fatores de ajuste solar e as frações de nuvens apresentadas na Tabela 3.7 foram definidos buscando valores de Radiação Solar Global e Difusa mais próximos possíveis do arquivo TMY. A Figura 3.25, a seguir, demonstra as radiações do TMY e as alcançadas na configuração no ENVI-guide (ENVI-met).

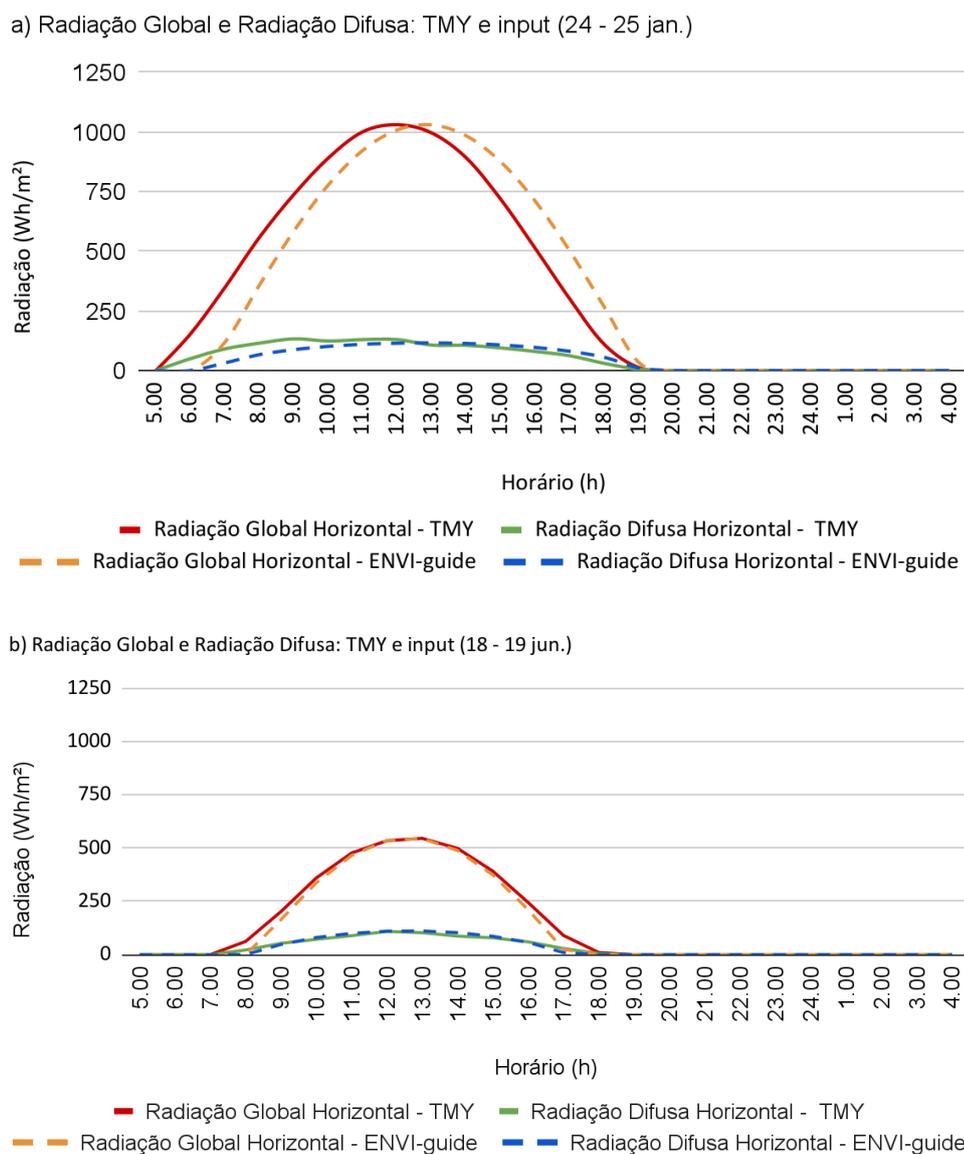


Figura 3.25: Radiação: Global Horizontal e Difusa Horizontal do TMY e alcançadas no ENVI-guide.  
Fonte: Autora, 2023.

Observa-se na Figura 3.25 que os dados de entrada (ENVI-guide) de verão (a) aproximam-se dos valores do TMY com atraso de aproximadamente uma hora na Radiação Global e os dados de inverno (b) atingiram valores bem semelhantes ao do arquivo TMY em todos os horários. Com os modelos e as condições climáticas configuradas, a próxima fase consistiu em rodar as simulações e verificar a calibração dos dados de entrada.

Diferentes autores, a exemplo de Morsch (2020) e Lima (2018), validaram simulações no programa ENVI-met através de calibração com medições locais para o clima “Cfa”. Neste estudo, a calibração ocorreu através dos dados climáticos do TMY, método utilizado por Krebs (2018); Nogueira et al. (2018) e Torres (2017). A Tabela

3.8, a seguir, apresenta o coeficiente de correlação (R) entre as temperaturas do ar inseridas (dados do TMY) e as temperaturas do ar de saída (*outputs*) das simulações.

Tabela 3.8 - Coeficiente de correlação (R) nas simulações de verão e de inverno dos cenários 1A, 1B, 2, 3 e base.

	1A	1B	2	3	base
Verão	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98
Inverno	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97

As temperaturas de *outputs* consideradas no coeficiente de correlação foram extraídas de um *grid* central do cenário (que possui a menor ou nenhuma influência do entorno), a 10.5 metros do solo. Na Tabela 3.8, observa-se que todas as simulações apresentaram elevado coeficiente de correlação (próximo de um), validando-as.

Diferentemente dos cenários anteriores, no cenário prognóstico utilizou-se de projeções futuras para estabelecer as condições climáticas iniciais das simulações. Optou-se pela plataforma online gratuita *WeatherShift*<sup>17</sup>, que estabelece projeções climáticas futuras pelo método “*morphing*” (BELCHER et al., 2005), a partir de patamares de concentração representativas (RCP) de gases do quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

O método “*morphing*” aplica transformações relativamente simples aos dados de um arquivo climático EPW (8760 horas) com base em dados meteorológicos históricos, projetando variáveis meteorológicas de séries temporais para décadas futuras (BAMM et al. 2017). Esse método é amplamente utilizado por pesquisas sobre o desempenho térmico de edifícios, como Da Guarda et al. (2020) e Gnecco et al. (2022) no Brasil; Firlag et al. (2021) na Polônia e Berardi e Jafarpur (2020) no Canadá.

O AR5 (IPCC, 2014) apresenta quatro RCPs, utilizados para estabelecer projeções climáticas futuras: RCP 2.6 - cenário de elevada mitigação de emissão de gases; RCP 4.5 e 6.0 - cenários de mitigação intermediária e RCP 8.5 - cenário com elevada emissão de gases. Nesta pesquisa, como Gnecco et al. (2022) e Firlag et al. (2021), optou-se por utilizar os dois RCPs disponíveis na plataforma *WeatherShift*: RCP 4.5 e 8.5.

Combinado ao RCP, seleciona-se uma opção de porcentagem entre 10% e 95% de aquecimento da temperatura do ar na plataforma. Para o RCP 4.5 optou-se

<sup>17</sup> Website: *WeatherShift*. Disponível em: <<https://www.weathershift.com/>>. Acesso em 20 de março de 2023.

por 50%, mantendo-se um patamar intermediário tanto para a mitigação de gases quanto para o aquecimento da temperatura do ar (prognóstico A deste estudo), e para o RCP 8.5, cenário mais extremo de emissão de gases optou-se pela condição mais extrema de aquecimento, 95% (prognóstico B deste estudo).

Em seguida, inseriu-se o arquivo TMY (2007-2021) de Bagé na plataforma que gerou os gráficos de variáveis climáticas para os anos de 2035, 2065 e 2090. Anotou-se as temperaturas horárias do ar (Figura 3.26) para os dias 24 - 25 de janeiro e 18 - 19 de junho (mesmos períodos estabelecidos para os demais cenários urbanos) do ano de 2065 para os dois patamares de mudança climática (RCP 4.5 e RCP 8.5). Esses dados foram inseridos no *ENVI-guide*, constituindo as simulações prognóstico A e prognósticos B, ambas com o mesmo cenário urbano (cenário prognóstico da Figura 3.15).

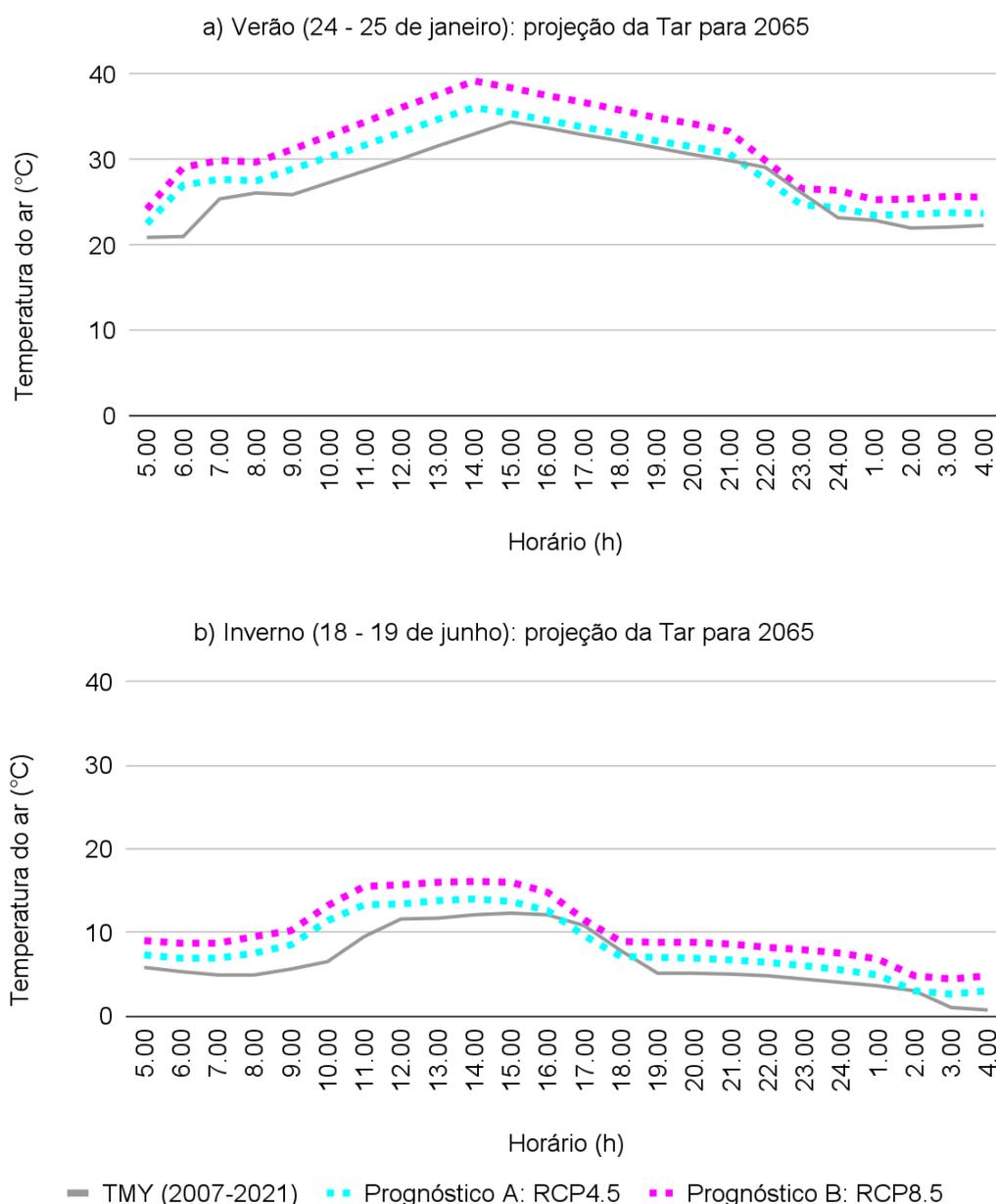


Figura 3.26: Temperaturas horárias do ar projetadas para 2065 no período de: a) verão (24 - 25 de janeiro), e b) inverno (18 - 19 de junho)

Fonte: Dados da plataforma *WeatherShift* editados pela autora, 2023.

Observa-se que as temperaturas projetadas para os prognósticos A e B são bem elevadas em relação ao TMY (2007 – 2021), provavelmente superestimadas. Ainda assim, essa foi a única ferramenta gratuita encontrada que calcula simultaneamente as projeções de mudanças climáticas junto ao aquecimento da temperatura do ar.

Para os cenários prognóstico A e B, verão e inverno, optou-se por manter os dados de umidade relativa do ar (Figura 3.24), devido aos valores projetados apresentarem diferenças nulas ou irrelevantes para 2065 em relação ao arquivo TMY

(2007-2021), em ambos os RCPs (4.5 e 8.5). As configurações de fator solar e de frações de nuvens também foram mantidas conforme a Tabela 3.7, pois a projeção horária da radiação solar não foi disponibilizada gratuitamente pela plataforma *WeatherShift*.

### 3.5 Etapa 4: Análise dos microclimas e da sensação térmica humana.

A quarta fase deste estudo objetivou analisar os resultados das simulações, sob a perspectiva da sensação térmica humana. A Figura 3.27 apresenta o fluxograma da etapa 4 que contempla determinação de parâmetros, extração e organização dos resultados e finaliza com a análise de dados em Temperatura Radiante Média (TRM) e *Equivalent Physiological Temperature* (PET).

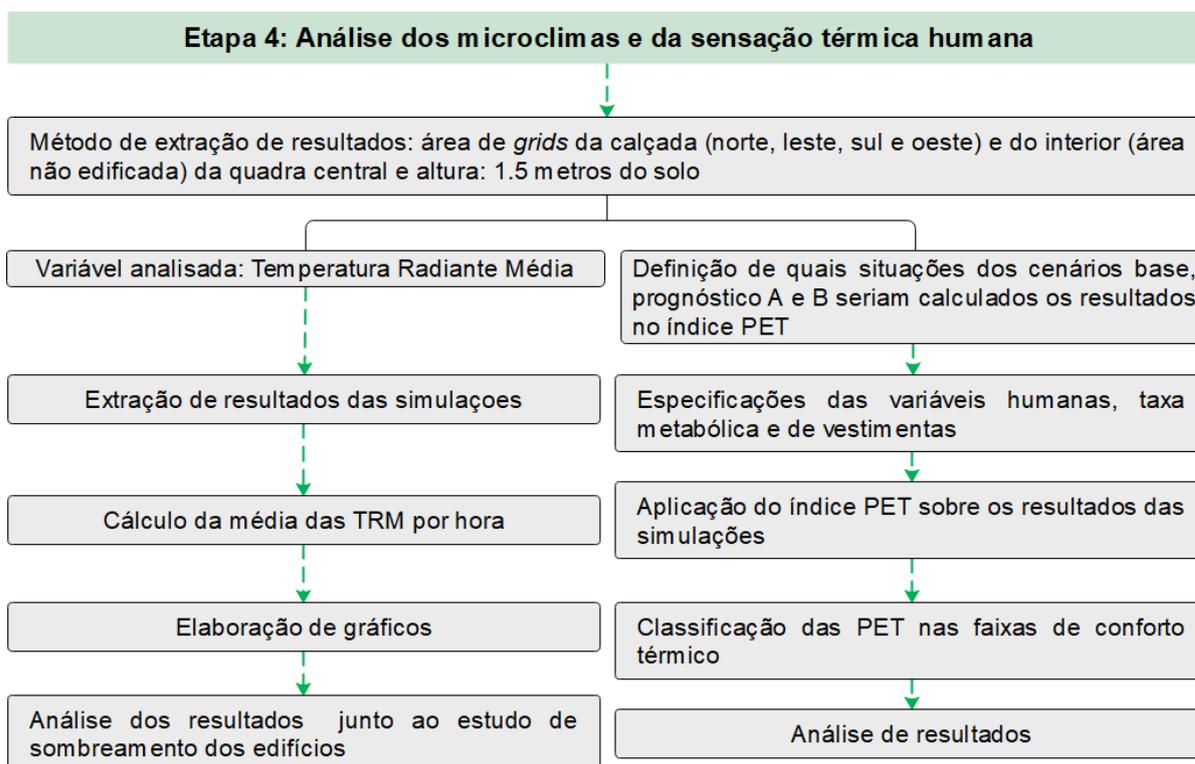


Figura 3.27: Fluxograma da etapa 4.  
Fonte: Autora, 2023.

Inicialmente, definiu-se o método de extração de resultados com base nas experimentações dos estudos de testes. Nas simulações de Santos, Krebs e Ribak (2022) estabeleceram-se cinco pontos receptores para a extração dos resultados. Observou-se que em modelos com edifícios de diferentes alturas e ocupações, como os cenários base e prognóstico, a extração dos resultados por um ponto receptor representa uma situação específica do local, ao invés da condição mais generalizada

de uma calçada. A partir dessa observação, optou-se por utilizar a média dos resultados dos *grids* das áreas de calçadas e do interior da quadra central (áreas não edificadas), como realizado em Santos et al. (2023). A Figura 3.28 demonstra as áreas de *grids* consideradas nas médias dos resultados das calçadas e interior de quadra, exemplificadas no cenário base.



Figura 3.28: Área (em grids) a partir da qual foram extraídos os resultados de TRM e PET, exemplificada no cenário base.

Fonte: Imagem do Spaces (ENVI-met) editada pela autora, 2023.

Utilizando a ferramenta *Leonardo* do ENVI-met, extraiu-se os resultados de TRM na altura de 1.5 metros acima do solo. As médias das TRM horárias de todos os cenários por cada orientação de calçada e do interior da quadra foram calculadas, e então gerados os gráficos de resultados apresentados no capítulo 4. Para auxílio da compreensão dos resultados das simulações, realizou-se a análise de sombreamento dos cenários para os dias simulados, através do programa *SketchUp*.

Optou-se pela utilização índice de conforto térmico PET neste estudo por ser amplamente utilizado em pesquisas para espaços abertos, como abordado na seção 2.4, e pela disponibilidade das faixas de sensação térmica calibradas para uma cidade próxima de Bagé. Em seguida, estabeleceu-se em quais situações (horários e locais) dos cenários base, prognóstico A e B seriam calculados os resultados no índice PET para análise:

1. Verificou-se o horário mais quente nos gráficos de TRM do interior da quadra, selecionando-se às 15:00h no verão e às 13:00h no inverno;
2. Verificou-se a calçada que obteve maior diferença de TRM entre os cenários no horário mais quente do dia, selecionando-se a calçada leste, às 13:00h, no verão e a calçada norte, às 14:00h, no inverno;
3. Optou-se por analisar também os resultados em um horário mais frio, às 8:00h, para as mesmas calçadas selecionadas anteriormente (leste no verão e norte no inverno). Nesse horário, na cidade de Bagé, muitas pessoas se encontram nas ruas, deslocando-se da residência para o trabalho, e observa-se, posteriormente na seção 4, que as TRM no inverno elevam - se expressivamente a partir das 8:00h.

A Tabela 3.9 aponta o período, a localização e os horários dos resultados calculados no índice PET para análise.

Tabela 3.9 - Período, localização e horários dos resultados no índice PET dos cenários base, prognóstico A e B.

	Localização	Horário
verão	calçada leste	às 8:00h e às 13:00h
	interior da quadra	às 15:00h
inverno	calçada norte	às 8:00h e às 14:00h
	interior da quadra	às 13:00h

Para o cálculo dos resultados no índice PET utilizou-se o programa *Rayman* 1.2 (Matzarakis et al., 2007), por ser gratuito e amplamente utilizado por pesquisas da área (LAM et al., 2021), como Sun et al. (2022); Muniz-Gäal et al. (2018) e Berardi e Wang (2016). Inseriu-se os dados climáticos das simulações do ENVI-met (média das calçadas e do interior de quadra na altura de 1.5 metros do solo, como realizado na

extração de resultados de TRM) e as especificações humanas, apontadas na Tabela 3.10, no programa Ray-man que forneceu os resultados no índice PET.

Tabela 3.10 - Especificações inseridas no programa Rayman.

Gênero	Homem
Idade	30 anos
Peso	70Kg
Altura	1.75 m
Vestimenta	0.3 clo (verão) 1.3 clo (inverno)
Taxa metabólica	300 W (4 Km/h)

As características humanas e a taxa metabólica foram estabelecidas conforme a Organização Internacional de Normalização 8996 (ISO, 2004), como realizado por Krüger et al. (2018) e Rosa et al. (2019). As vestimentas foram definidas a partir de De Vecchi et al. (2017) que verificou o predomínio de usuários de edifícios com roupas equivalentes a 0.3 clo no verão e entre 1.1 e 1.5. clo no inverno, em Florianópolis-SC (clima Cfa, como de Bagé).

Os resultados no índice PET foram classificados nas faixas de conforto térmico originais, definidas por Matzarakis e Mayer (1996), e conforme a calibração de Rosa (2021) para da cidade de Pelotas-RS (distante 190 Km de Bagé, ambas com clima Cfa), demonstradas na Tabela 3.11. Os resultados no índice PET e as sensações térmicas equivalentes são apresentados e discutidos no capítulo 4.

Tabela 3.11 - Faixas de conforto térmico PET.

PET - original (MATZARAKIS e MAYER, 1996)	PET – Pelotas (ROSA, 2021)	Sensação térmica
< 4°C	-	Muito frio
4°C - 8°C	-	Frio
8°C - 13°C	-	Pouco frio
13°C - 18°C	8°C - 17°C	Levemente Frio
18°C - 23°C	17°C - 26°C	Neutralidade térmica
23°C - 29°C	26°C - 35°C	Levemente calor
29°C - 35°C	35°C - 44°C	Pouco calor
35°C - 41°C	-	Calor
> 41°C	-	Muito calor

## 4. Análise e discussão dos microclimas simulados

Este capítulo apresenta os resultados da investigação e suas análises, cruzando as informações de simulação no programa ENVI-met com os estudos de sombreamento previamente modelados e analisados no programa SketchUp. As simulações foram realizadas para os dias intermediários das semanas extremas de verão (24 a 25 de janeiro) e de inverno (18 a 19 de junho) do arquivo *Test Reference Year* (TMY) do período de 2007-2021 de Bagé. As análises foram feitas para as quatro calçadas e para o interior da quadra central do recorte urbano estudado (um total de nove quadras).

Para a comparação do conforto térmico entre a situação atual e os prognósticos futuros (cenários base x prognósticos A e B) foi adotado o índice *Physiological Equivalent Temperature* (PET).

É essencial observar o sombreamento das edificações em função da trajetória solar nos períodos estudados para a compreensão dos resultados das simulações. As Figuras 4.1 e 4.2 demonstram a trajetória e a altura solar para a latitude de Bagé (31° Sul), respectivamente no período de janeiro e de junho.

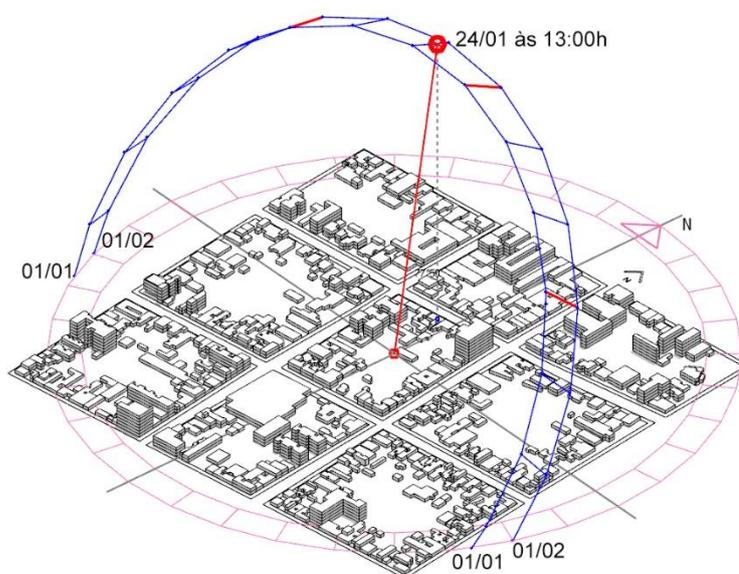


Figura 4.1: Trajetória solar em janeiro para latitude 31° Sul.  
Fonte: autora, 2023.

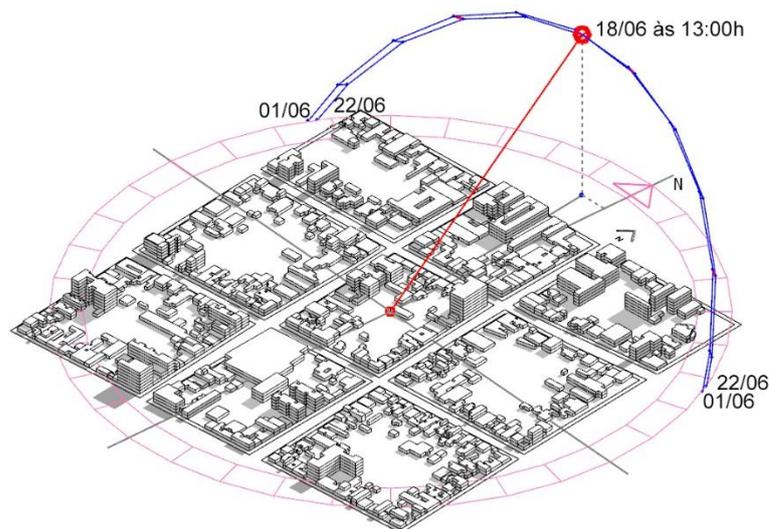


Figura 4.2: Trajetória solar em junho para latitude 31° Sul.  
Fonte: autora, 2023.

Observa-se que em janeiro a trajetória solar percorre do quadrante Sudeste para Sudoeste e em elevada altura, projetando sombreamentos modestos próximo ao meio dia. A trajetória solar em junho percorre entre a orientação Nordeste e Noroeste e em baixa altura, até aproximadamente 35° em relação à horizontal. Consequentemente, as sombras projetadas no inverno são mais extensas que no verão, influenciando de modo mais expressivo sobre os microclimas do entorno das edificações.

## 4.1 Cenários hipotéticos

Nas seções 4.1.1 a 4.1.5, analisa-se os resultados de TRM por calçada e no interior da quadra. A seção 4.1.6 apresenta uma síntese dos resultados, comparando as TRM média de 24 horas e as TRM máximas.

### 4.1.1 Interior da quadra

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os resultados horários de TRM e a Tabela 4.1 informa a TRM no horário mais quente do dia e a média (24 horas) para verão e inverno.

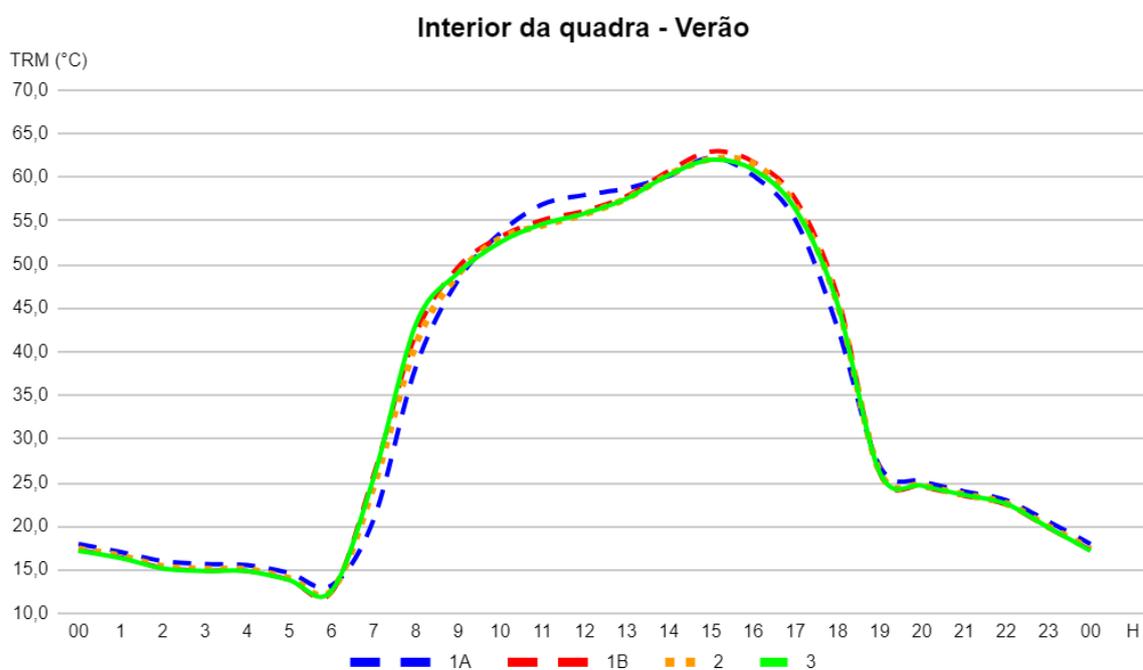


Figura 4.3: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) no interior da quadra dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão.  
Fonte: Autora, 2023.

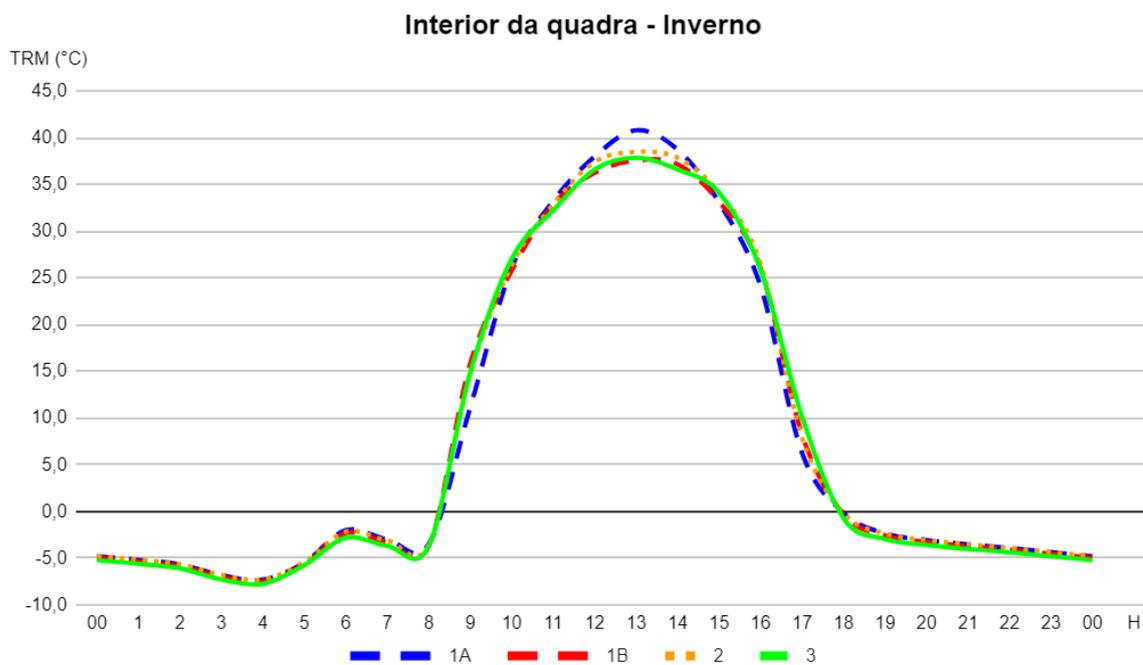


Figura 4.4: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) no interior da quadra dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.  
Fonte: Autora, 2023.

Tabela 4.1 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão no interior da quadra.

Localização	Cenário	Verão - TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno - TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Interior da quadra	1A	<b>35,2</b>	62,3	7,9	<b>40,8</b>
	1B	35,5	<b>63,0</b>	7,9	37,5
	2	<b>35,2</b>	62,1	<b>8,1</b>	38,5
	3	<b>35,2</b>	62,0	7,8	37,8

No interior da quadra, as TRM horárias dos quatro cenários apresentam pouca diferença ao longo das 24 horas (Figuras 4.3 e 4.4), resultando em TRM médias iguais ou com até 0,3°C de diferença (Tabela 4.1), no verão e no inverno. Essas semelhanças nos resultados decorrem da similaridade da proporção de área sombreada nos cenários, como exemplificado nas Figuras 4.5 e 4.6.

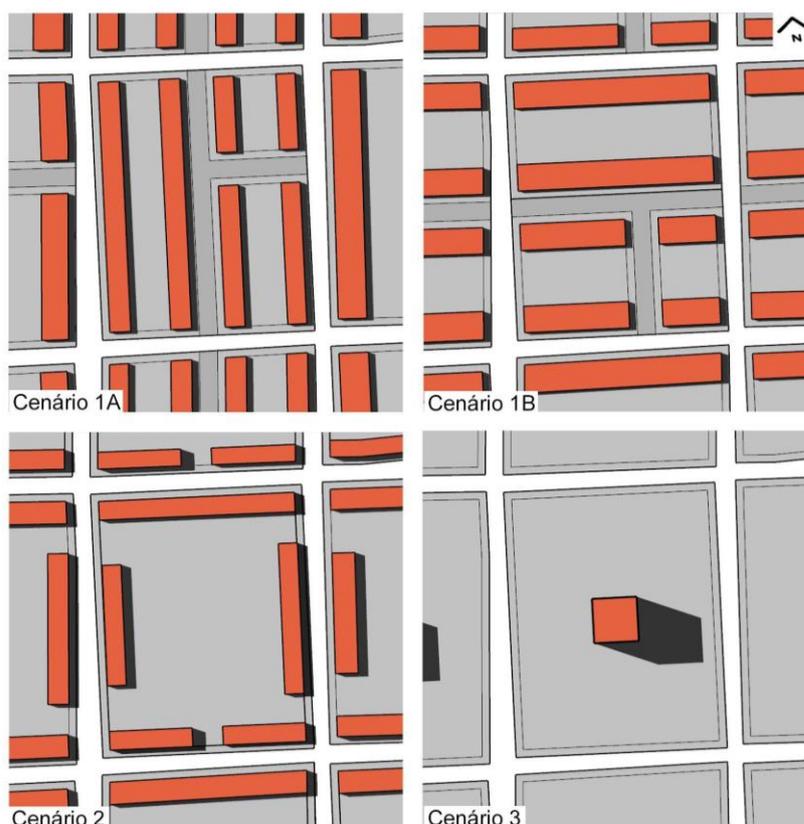


Figura 4.5: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

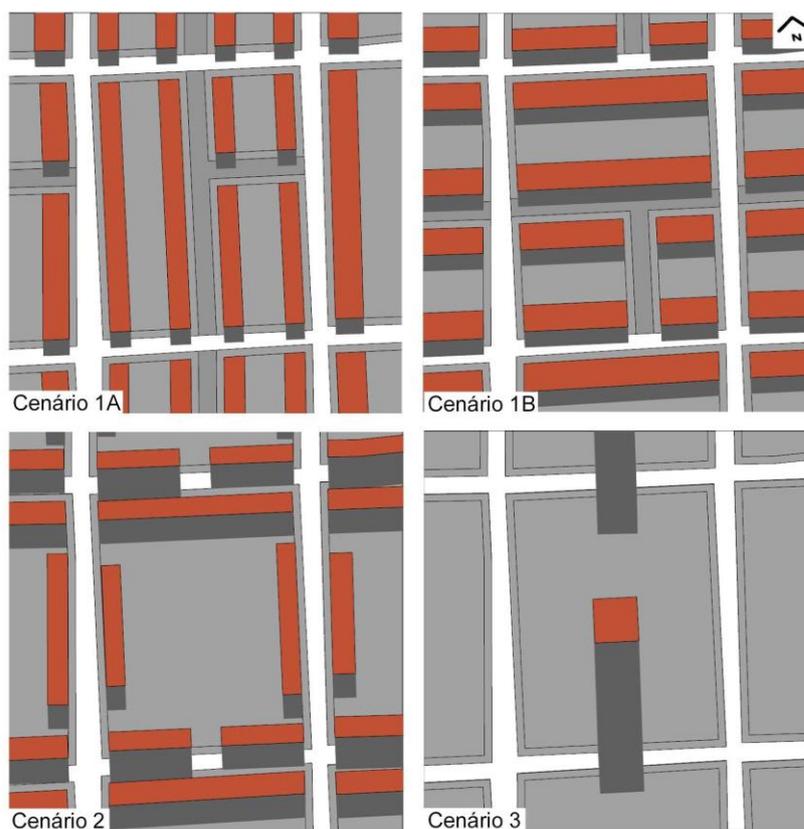


Figura 4.6: sombreamento do dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente do dia no verão (às 15:00h), o cenário 1B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 63.0°C. Inversamente, o cenário 3 foi o que apresentou a mais baixa (favorável ao conforto térmico), 62.0°C. Isso decorre das respectivas áreas sombreadas no interior da quadra (Figura 4.5): a proporção de área aberta sombreada no cenário 3 é maior que a do cenário 1B. No horário mais quente do dia no inverno (às 13:00h), o cenário 1A tem a TRM mais elevada entre os cenários: 40.8°C (Tabela 4.1), devido a implantação das edificações do cenário 1A, orientados no eixo Norte-Sul, projetando o menor sombreamento no interior da quadra (Figura 4.6), dentre todos cenários.

Para verificar maiores diferenças de TRM no interior da quadra, entre os cenários, seria necessária uma análise mais aprofundada, verificando a TRM por pontos. À exemplo, observa-se na Figura 4.7 que o cenário 3 tem uma área (representada em azul) com TRM entre 48.23°C e 49.78°C, enquanto o cenário 1B apresenta TRM mais elevada em toda área da quadra central.

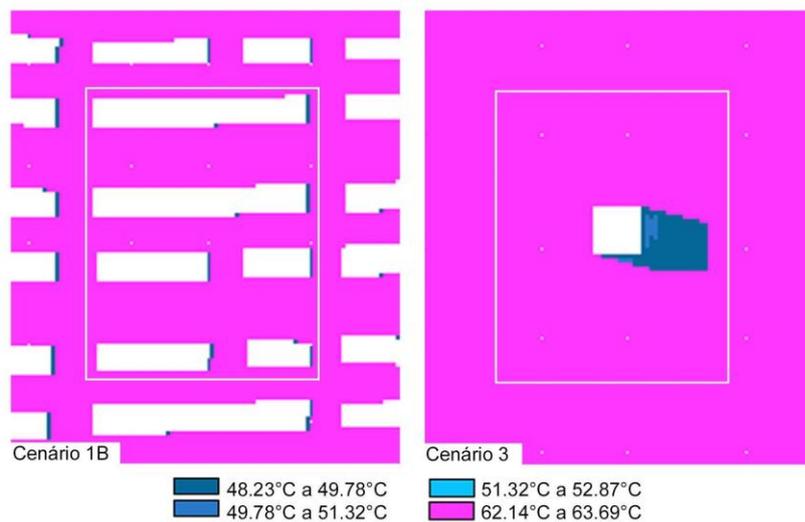


Figura 4.7: TRM no dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1B e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

#### 4.1.2 Calçada Leste

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados horários de TRM e a Tabela 4.2 informa a TRM no horário mais quente do dia e a média (24 horas) para verão e inverno.

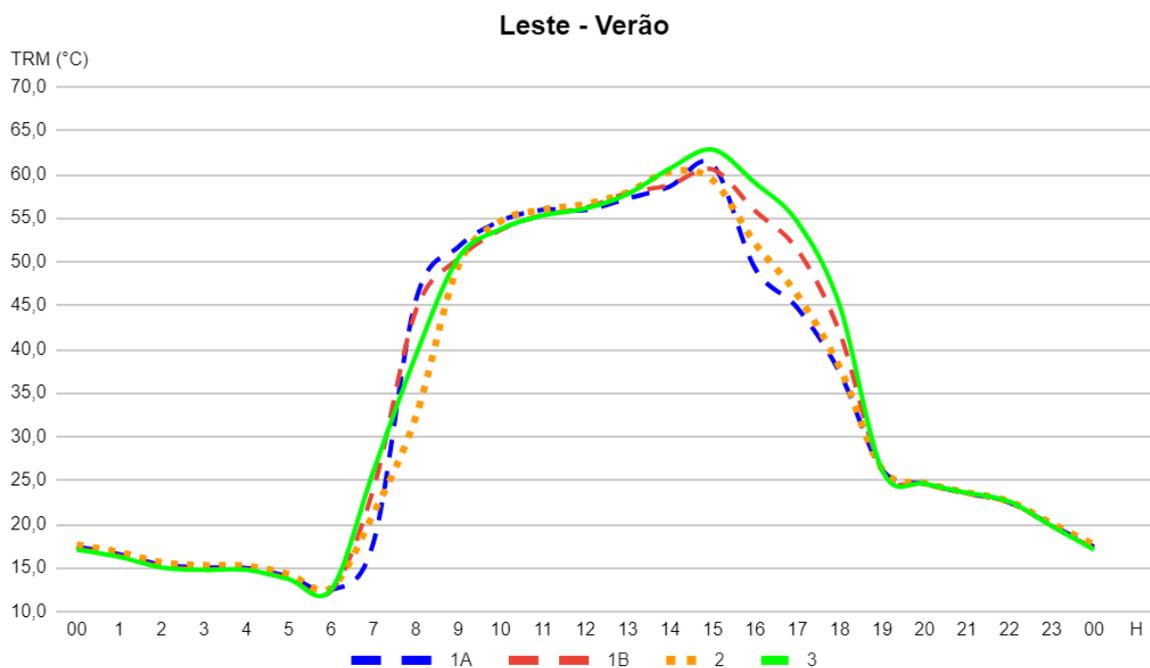


Figura 4.8: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Leste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão.  
Fonte: Autora, 2023.

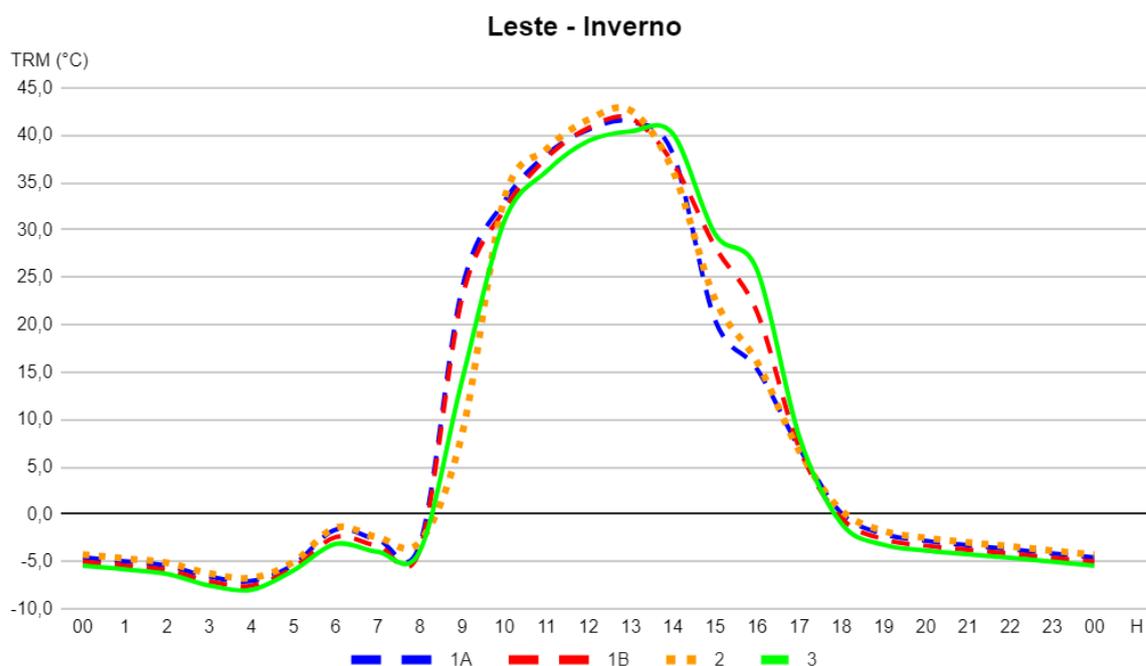


Figura 4.9: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Leste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 4.2 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Leste.

Localização	Cenário	Verão - TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno - TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Leste	1A	33,9	61,1	8,3	41,4
	1B	34,6	60,6	<b>8,5</b>	41,8
	2	<b>33,7</b>	59,3	8,1	<b>42,6</b>
	3	35,1	<b>62,8</b>	8,0	40,4

Observa-se na Figura 4.8 que o cenário 2 mantém-se com TRM mais baixas ao longo do dia, o que resultou na TRM média mais baixa, 33,7°C (Tabela 4.2), favorável ao conforto térmico. Esse resultado decorre da combinação: implantação dos edifícios no eixo Norte-Sul, adjacentes às calçadas Leste e Oeste (na quadra vizinha), e a altura de três pavimentos, projetando maior sombreamento sobre a calçada Leste, comparado aos demais cenários, ao longo do dia (Figuras 4.5 e 4.10).

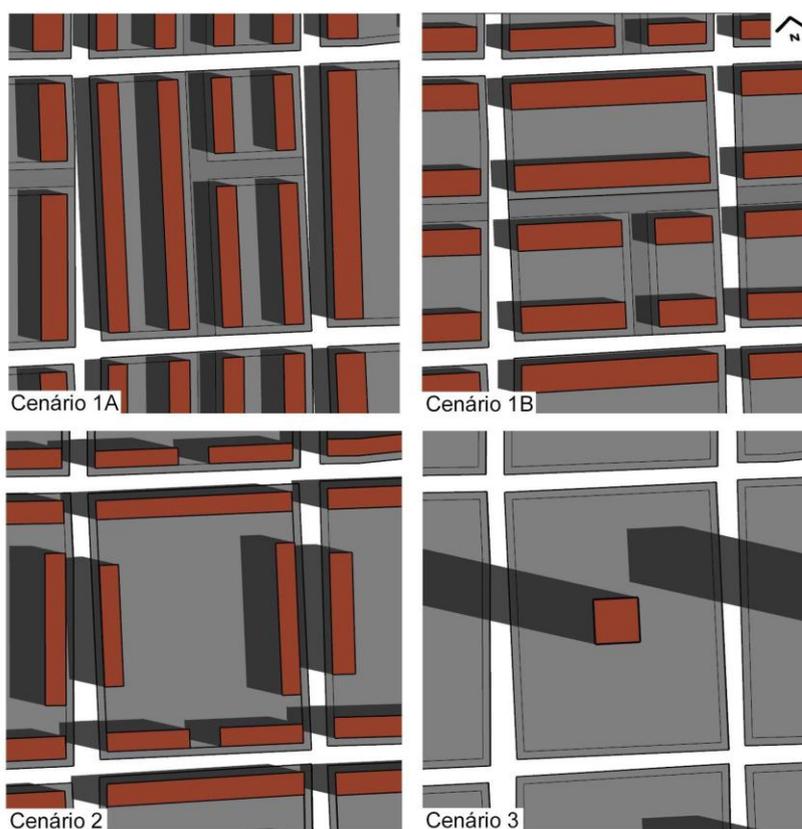


Figura 4.10: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 8:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

No inverno, a calçada Leste do cenário 1B mantém TRM elevadas ao longo do dia (Figura 4.9), que resultaram na TRM média mais elevada, 8.5°C, dentre os cenários (Tabela 4.2), favorecendo o conforto térmico. O cenário 1B apresenta menor sombreamento pela manhã e à tarde, comparado aos demais cenários (Figuras 4.11 e 4.12), devido a combinação da baixa altura dos edifícios (dois pavimentos) com a menor ocupação de edifícios adjacentes à calçada Leste.

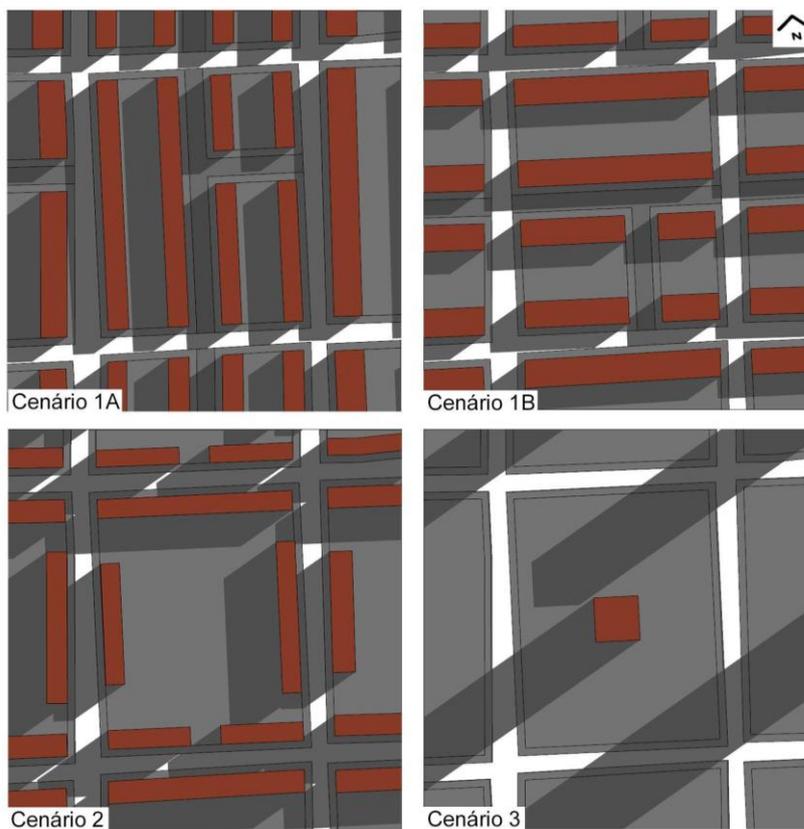


Figura 4.11: sombreamento do dia 18 de junho, às 9:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

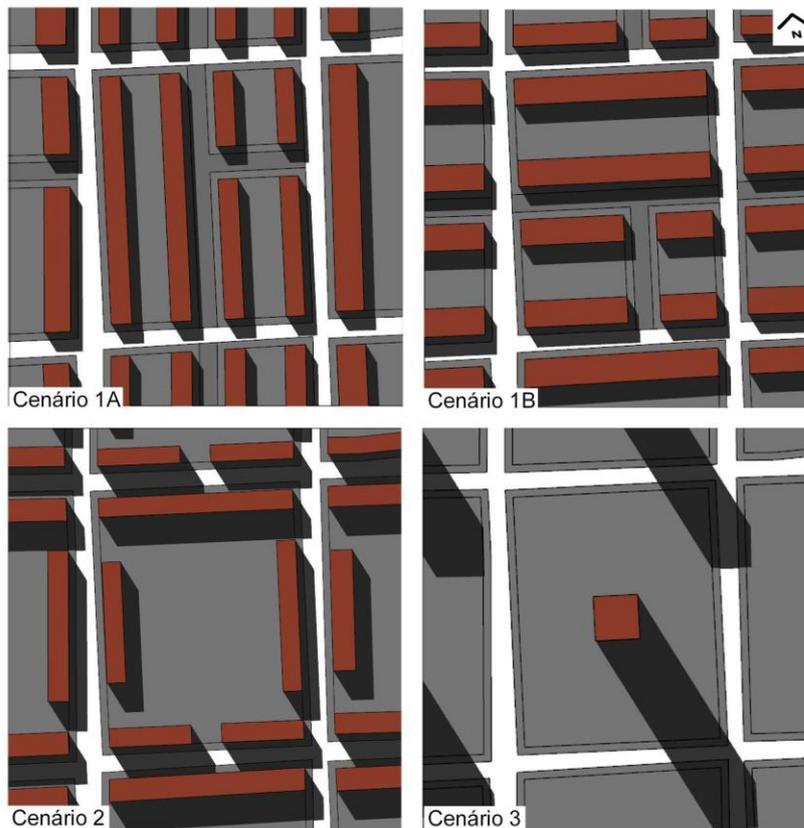


Figura 4.12: sombreamento do dia 18 de junho, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente do dia (às 15:00h), no verão, o cenário 3 foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 62.8°C (Tabela 4.2), pois nesse horário, é o único cenário com a calçada Leste totalmente ensolarada (Figura 4.5). No inverno, no horário mais quente do dia (às 13:00h), a calçada Leste de todos os cenários encontra-se ensolarada (Figura 4.6) e a do Cenário 2 apresenta a TRM mais elevada (42.6°C). O Cenário 2 tem a menor velocidade do vento (indicada pela seta vermelha na Figura 4.13) dentre as calçadas Leste, às 13:00h, pois o edifício da quadra vizinha (à leste) barra o vento. Essa redução da velocidade do vento elevou a TRM no entorno adjacente ao edifício (calçada Leste). A Figura 4.14 demonstra o efeito da redução do vento na TRM da calçada Leste do cenário 2 (indicado pela seta vermelha).

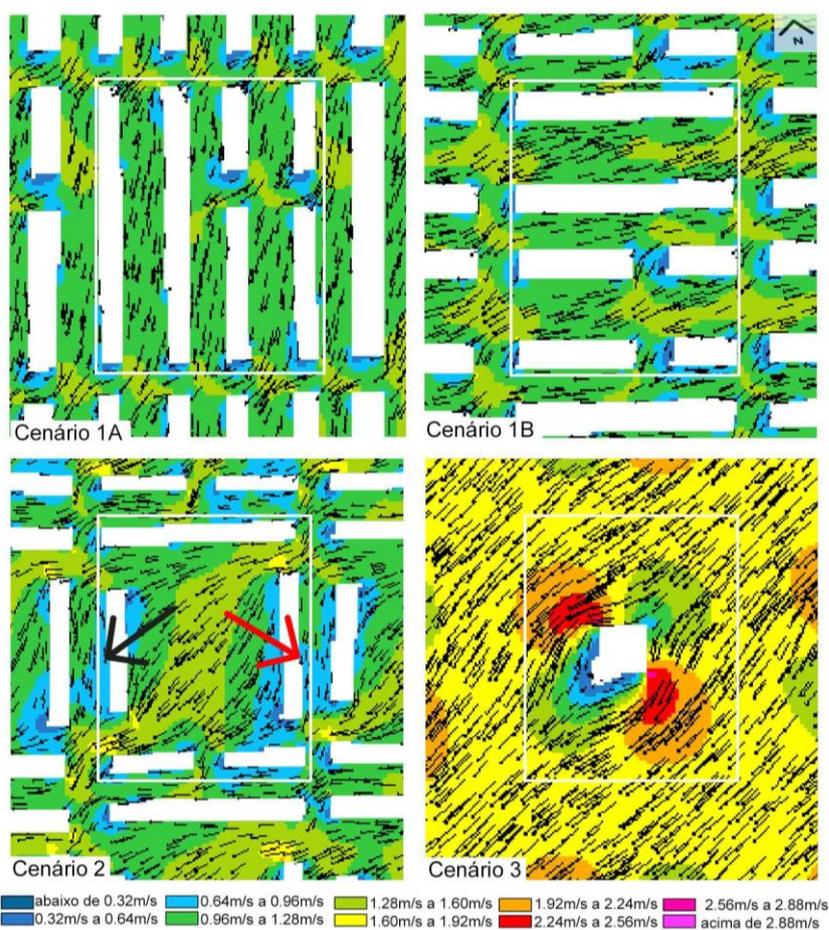


Figura 4.13: Direção e velocidade do vento ( $h=1.5m$ ) no dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.

Fonte: Autora, 2023.

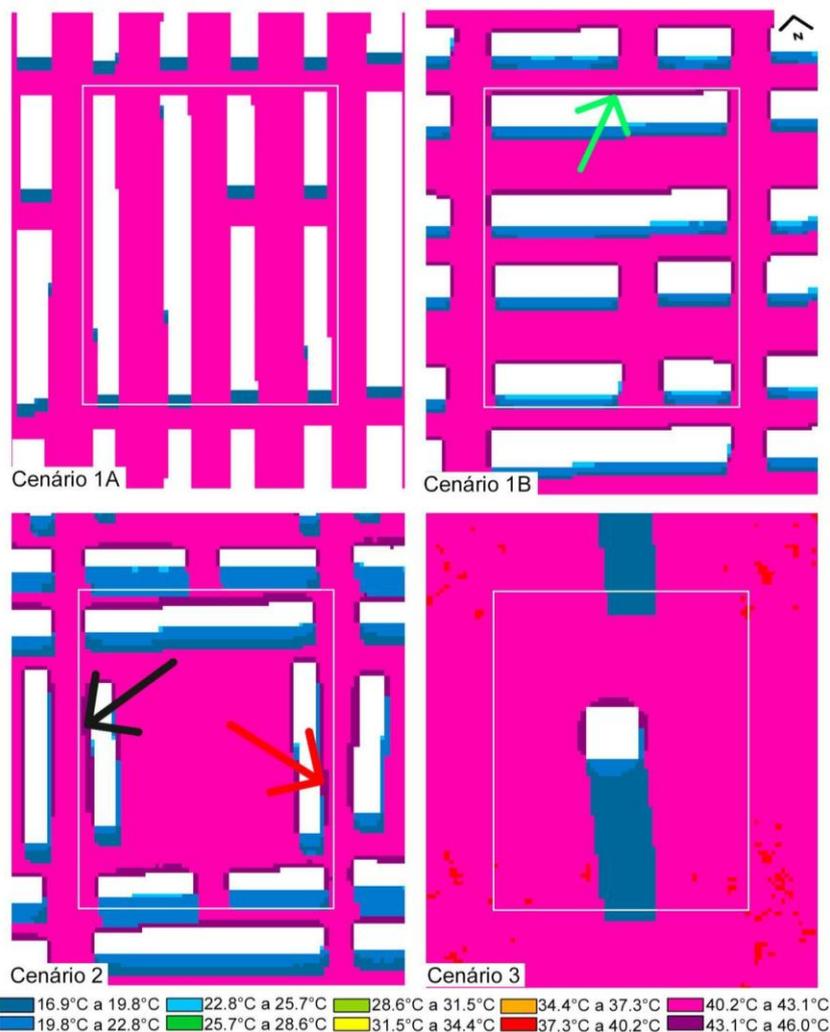


Figura 4.14: TRM ( $h=1.5m$ ) no dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

#### 4.1.3 Calçada Oeste

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados horários de TRM e a Tabela 4.3 informa a TRM no horário mais quente do dia e a média (24 horas) para verão e inverno.

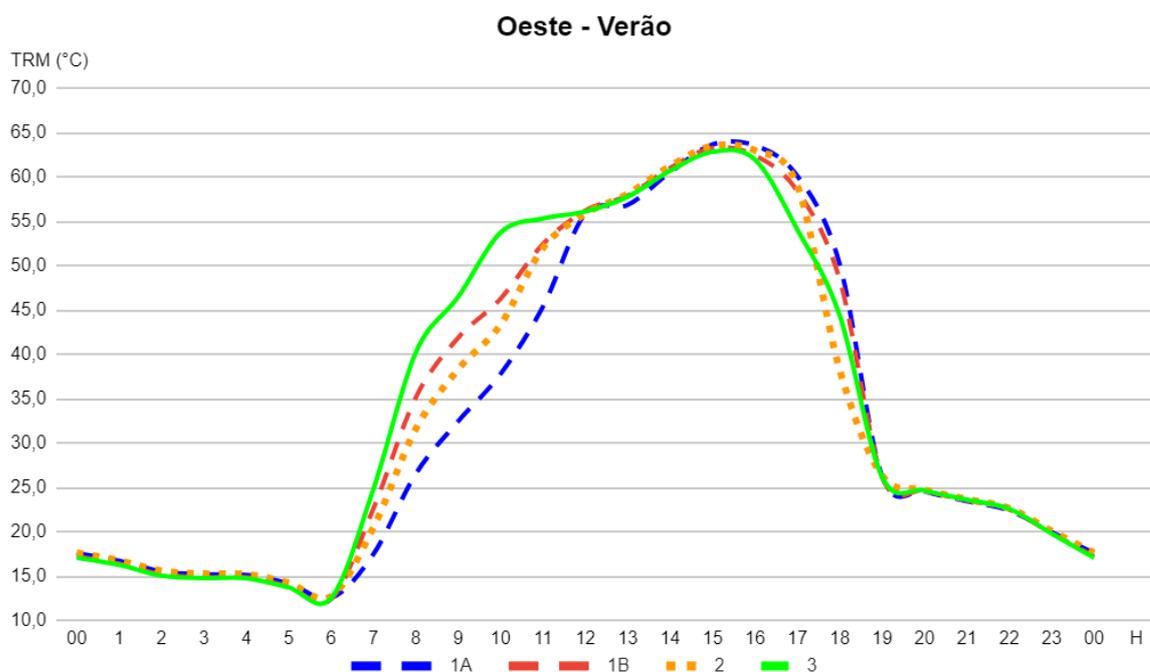


Figura 4.15: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Oeste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão.

Fonte: Autora, 2023.

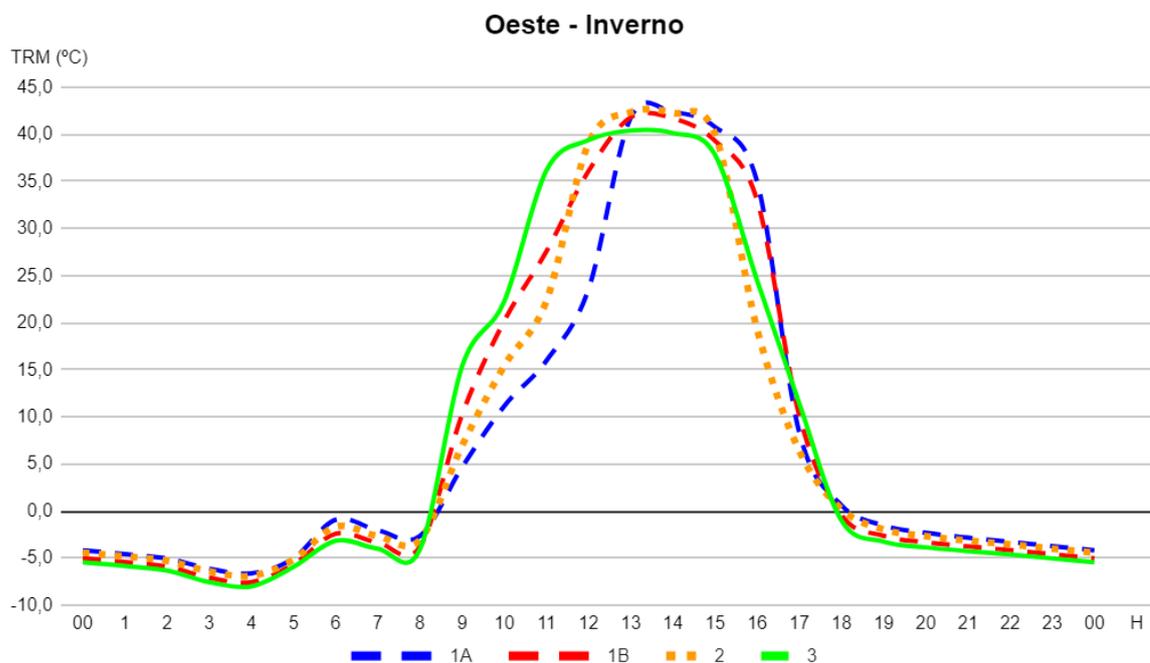


Figura 4.16: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Oeste dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 4.3 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Oeste.

Localização	Cenário	Verão -TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno - TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Oeste	1A	<b>33,1</b>	<b>63,6</b>	7,2	41,8
	1B	34,5	<b>63,3</b>	<b>8,1</b>	41,8
	2	33,7	<b>63,5</b>	7,4	<b>42,4</b>
	3	35,0	62,8	<b>8,1</b>	40,4

No verão, o cenário 1A, pela manhã, apresenta as TRM mais baixas (Figura 4.15), pois tem a edificação mais extensa adjacente à calçada Oeste, apresentando o maior sombreamento, comparado aos demais cenários (Figura 4.10). Conseqüentemente, o cenário 1A apresenta a TRM média mais baixa: 33.1°C. No inverno, os cenários 1B e 3 mantêm TRM elevadas ao longo do dia (Figura 4.16), resultando na TRM média mais elevada (favorável ao conforto térmico): ambos igualmente com 8.1°C (Tabela 4.3). Os dois cenários (1B e 3) apresentam, semelhantemente, os menores sombreamentos pela manhã (Figura 4.11). Isso decorre da implantação dos edifícios no eixo Leste-Oeste, ocupando pouca área adjacente à calçada Oeste (no cenário 1B), e à baixa taxa de ocupação da quadra (no cenário 3).

No horário mais quente do dia no verão (às 15:00h), todas as calçadas Oeste encontram-se ensolaradas (Figura 4.5) e apresentam TRM semelhantes (entre 63.3°C e 63.6°C), exceto no cenário 3. A exceção deve-se à implantação dos edifícios do cenário 3, distantes das calçadas, irradiando calor apenas em áreas no interior da quadra, e à baixa taxa de ocupação, que permite a circulação do vento mais livremente. A Figura 4.17 demonstra a diferença na velocidade dos ventos entre as calçadas Oeste dos cenários 1A e 3 (indicada pela seta preta), às 15:00h. A Figura 4.18 ilustra as diferenças de TRM, às 15:00h, entre as calçadas Oeste (indicadas pela seta preta) dos cenários 1A (TRM mais elevada) e 3 (TRM menos elevada).

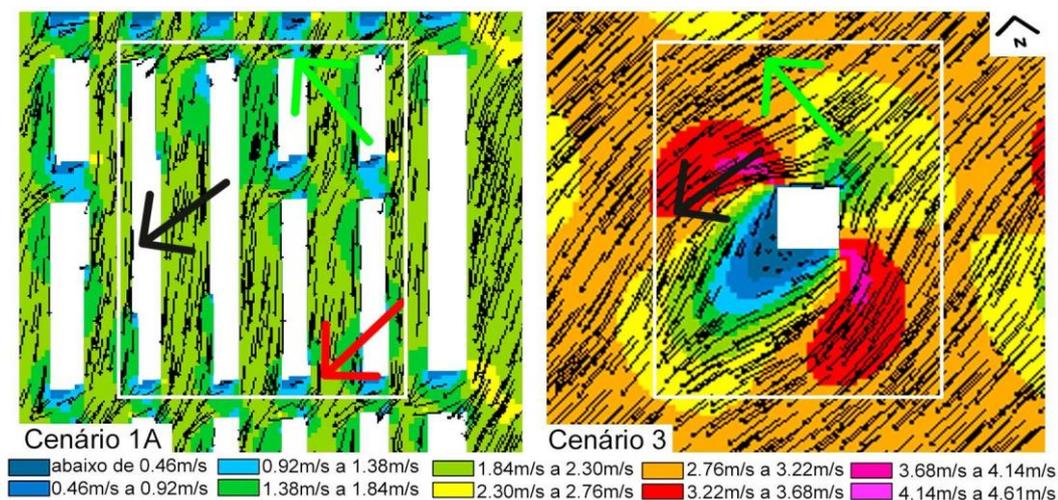


Figura 4.17: Direção e velocidade do vento ( $h=1.5\text{m}$ ) no dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.

Fonte: Autora, 2023.

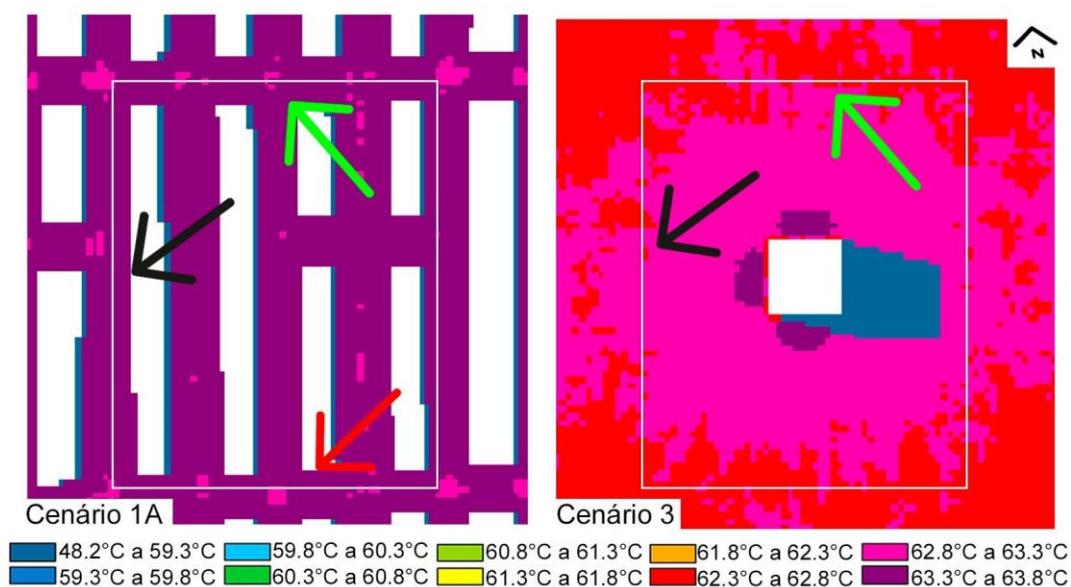


Figura 4.18: TRM ( $h=1.5\text{m}$ ) no dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.

Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente do dia no inverno (às 13:00h), as quatro calçadas Oeste estão ensolaradas (Figura 4.6) e o cenário 2 apresenta a TRM mais elevada: 42.4°C (Tabela 4.3). Semelhante ao observado na calçada Leste (às 13:00h no inverno), o edifício adjacente à calçada Oeste barra o vento à nordeste (indicado pela seta preta na Figura 4.13). Essa redução do vento (indicado pela seta preta na Figura 4.14) elevou a TRM no entorno imediato do edifício (calçada Oeste).

#### 4.1.4 Calçada Norte

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados horários de TRM e a Tabela 4.4 informa a TRM no horário mais quente do dia e a média (24 horas) para verão e inverno.

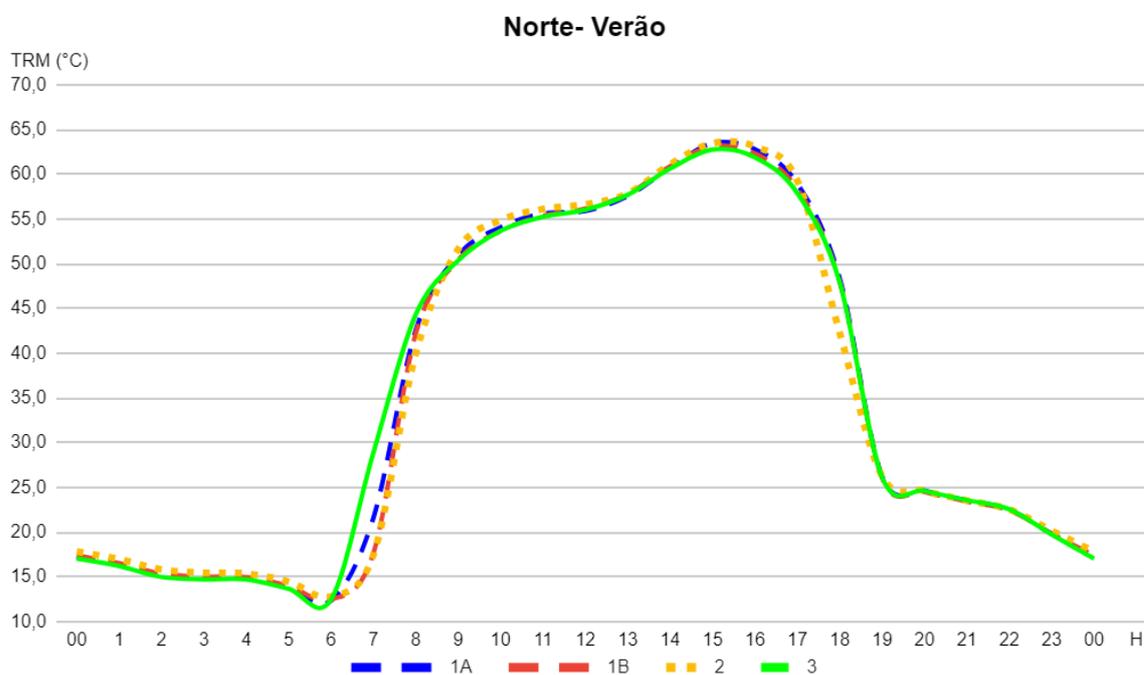


Figura 4.19: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Norte dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão.

Fonte: Autora, 2023.

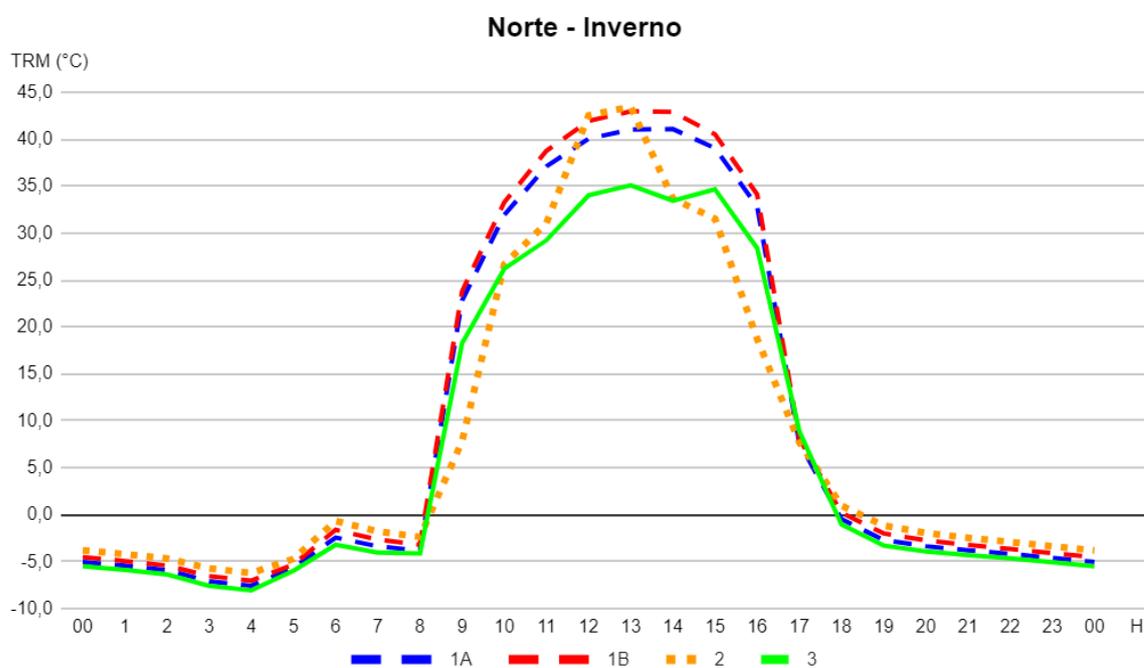


Figura 4.20: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Norte dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 4.4 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Norte.

Localização	Cenário	Verão - TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno - TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Norte	1A	35,6	63,5	9,5	41,0
	1B	35,3	63,2	10,4	43,0
	2	35,4	63,5	8,3	43,5
	3	35,8	62,8	7,3	35,1

No verão, as TRM dos quatro cenários são semelhantes (Figura 4.19), pois permanecem ensolaradas na maioria dos horários do dia e, conseqüentemente, as TRM médias apresentam diferenças pequenas (até 0.4°C). No inverno, o cenário 1B mantém as TRM mais elevadas durante o dia (Figura 4.20), resultando na TRM média mais elevada, dentre os cenários: 10.4°C. Esse resultado decorre da combinação: menor sombreamento ao longo do dia, devido à baixa altura (dois pavimentos) das edificações (Figura 4.21 e 4.12) e a fachada Norte extensa exposta ao sol nos horários mais quentes, irradiando calor ao entorno imediato e elevando a TRM na calçada (indicado pela seta verde na Figura 4.14).

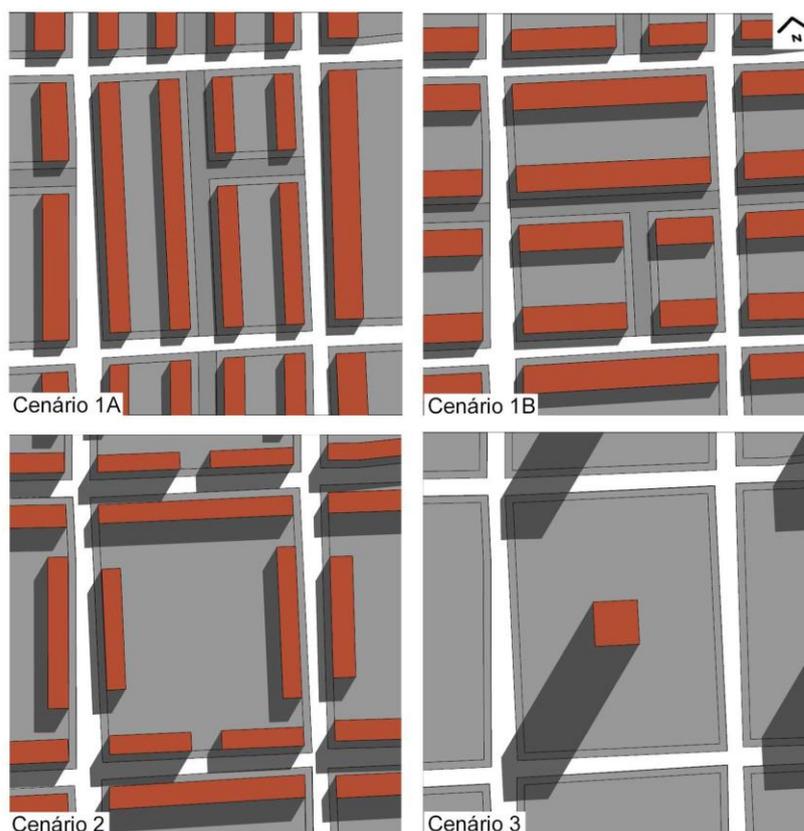


Figura 4.21: sombreamento do dia 18 de junho, às 11:00h, nos cenários: 1A, 1B, 2 e 3.  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente do dia no verão (às 15:00h), todas as calçadas Norte encontram-se ensolaradas (Figura 4.5) e apresentam TRM semelhantes, entre 63.2°C e 63.5°C (Tabela 4.4), exceto no cenário 3. A exceção deve-se à implantação dos edifícios do cenário 3, distantes das calçadas, irradiando calor apenas em áreas no interior da quadra. A Figura 4.17 ilustra as diferenças na velocidade dos ventos e a Figura 4.18, na TRM, às 15:00h, destacando a calçada Norte (setas verdes) dos cenários 1A (TRM mais elevada) e 3 (TRM menos elevada).

No horário mais quente do dia no inverno (às 13:00h), o cenário 2 foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 43.5°C (Tabela 4.4), pois tem a maior área de fachada (com três pavimentos) adjacente a calçada Norte exposta ao sol no horário, irradiando calor ao entorno imediato e elevando a TRM.

#### 4.1.5 Calçada Sul

As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam os resultados horários de TRM e a Tabela 4.5 informa a TRM no horário mais quente do dia e a média (24 horas) para verão e inverno.

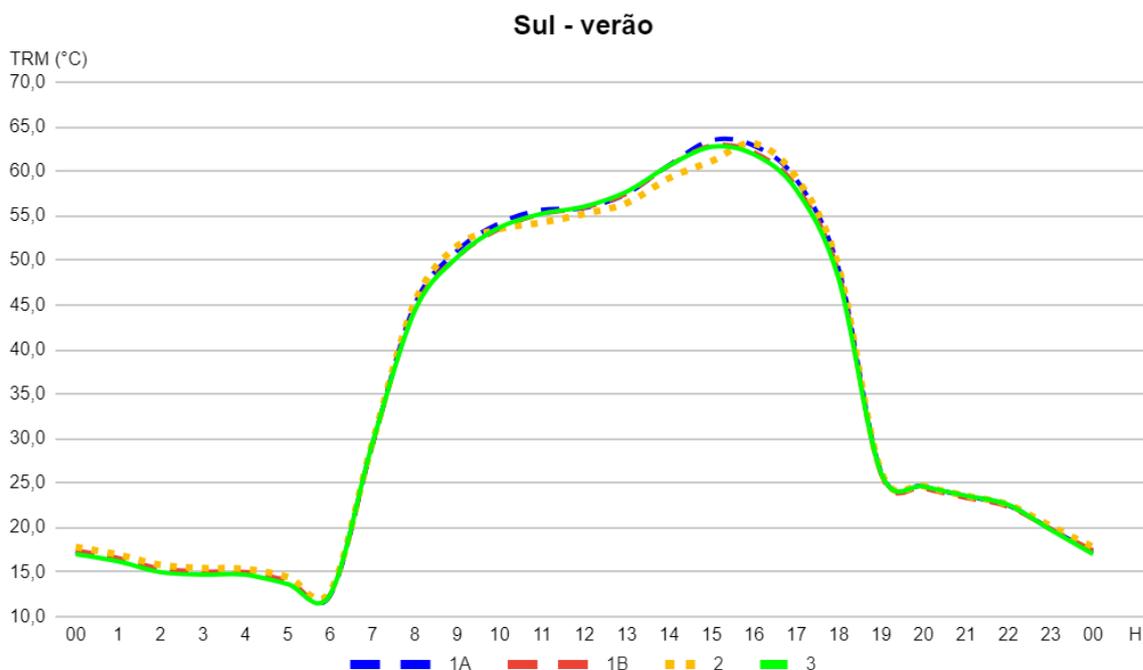


Figura 4.22: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Sul dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no verão.

Fonte: Autora, 2023.

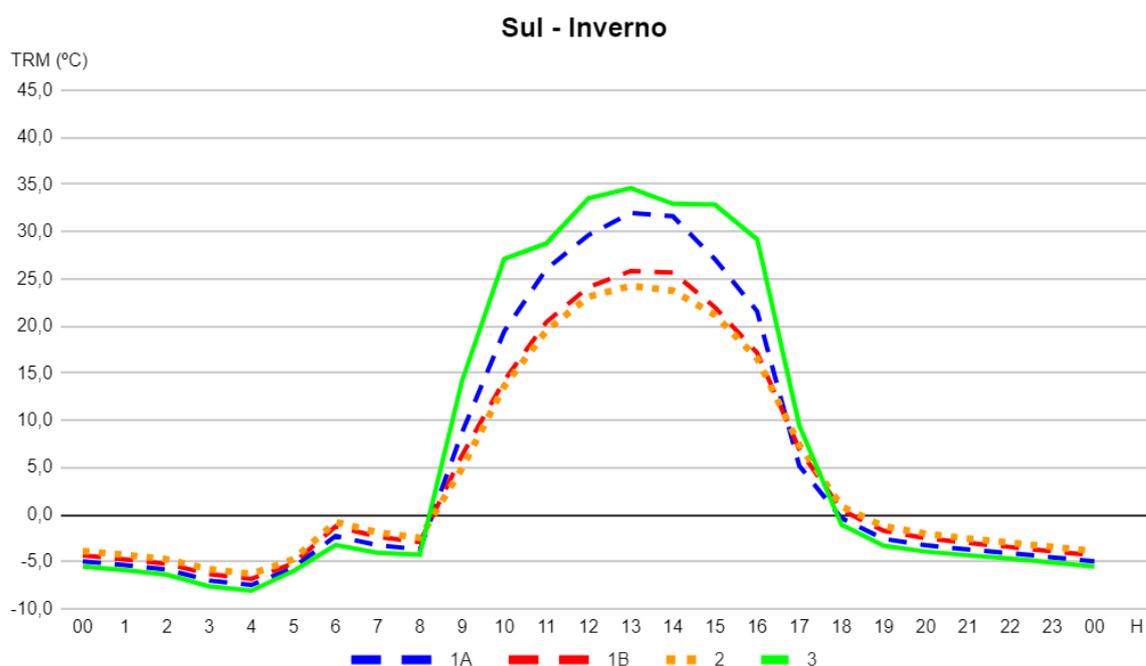


Figura 4.23: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) na calçada Sul dos cenários: 1A; 1B; 2 e 3 no inverno.  
Fonte: Autora, 2023.

Tabela 4.5 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão na calçada Norte.

Localização	Cenário	Verão - TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno - TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Sul	1A	<b>36,1</b>	<b>63,5</b>	5,7	32,0
	1B	<b>35,9</b>	62,9	4,6	25,8
	2	<b>36,0</b>	61,1	4,5	24,2
	3	<b>35,8</b>	62,8	<b>7,1</b>	<b>34,6</b>

No verão, as TRM médias das calçadas Sul apresentam pouca diferença ao longo das 24 horas (Figura 4.22), resultando em TRM médias semelhantes, com até 0.3°C de diferença entre os cenários. No inverno, o cenário 3 apresenta as TRM mais elevadas durante o dia (Figura 4.23), resultando na TRM média mais elevada: 7.1°C (Tabela 4.5). Esse resultado deve-se a baixa taxa de ocupação da quadra, resultando em menor sombreamento sobre a calçada Sul, comparado aos demais cenários (Figuras 4.12 e 4.21). Pelo mesmo motivo: baixa taxa de ocupação e, conseqüentemente, o menor sombreamento (Figura 4.6), no horário mais quente do dia (às 13:00h), o cenário 3 é o que, dentre todos, apresenta a TRM mais elevada.

No horário mais quente do dia no verão (às 15:00h), o cenário 1A foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 63.5°C (Tabela 4.5). Nesse horário, a calçada Sul dos quatro cenários encontra-se ensolarados, mas o cenário 1A é o que apresenta menor velocidade do vento (indicado pela seta vermelha na Figura 4.17), reduzindo a TRM (indicada pela seta vermelha na Figura 4.18), semelhante ao observado nas calçadas Oeste e Norte.

Gusson et al. (2016) em São Paulo, identificou TRM mais baixas no cenário mais alto: o cenário de nove torres por quadra com 14 pavimentos, comparado aos demais cenários: bloco perimetral com 8 pavimentos e blocos retangulares com 10 pavimentos. Semelhantemente, Nogueira et al. (2018) em Maceió - AL, identificou as temperaturas mais baixas no cenário de torre com 20 pavimentos comparados com cenários de 2 e 10 pavimentos. Entretanto, em ambos os estudos, os cenários têm maiores taxas de ocupação das quadras comparado ao cenário mais alto desta pesquisa (cenário 3 com 19 pavimentos, ou 57 metros). Por isso, o cenário mais alto desse estudo não apresentou TRM médias mais baixas, comparados aos demais cenários (1A, 1B e 2), no verão.

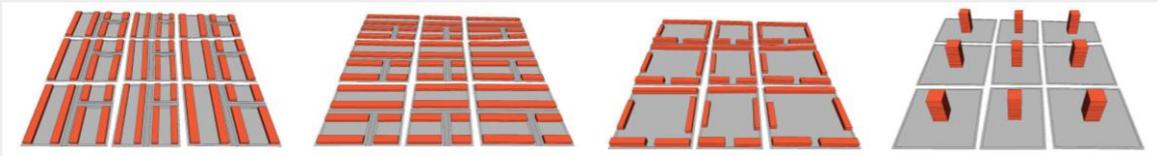
Os cenários com TRM mais baixas no verão diferem-se dentre as orientações de calçadas, não sendo possível estabelecer uma relação com as proporções H/W dos cenários, como realizados em outros estudos da área. Embora as diferenças na velocidade dos ventos entre os cenários tenham sido modestas neste estudo, observou-se seu efeito de elevação da TRM quando reduzida a velocidade dos ventos, principalmente em comparações entre calçadas igualmente ensolaradas.

#### 4.1.6 TRM médias e máximas

A Tabela 4.6 apresenta as TRM no horário mais quente do dia e as médias das 24 horas simuladas nos quatro cenários para as calçadas e o interior da quadra, no verão e no inverno.

Tabela 4.6 - TRM médias das 24 horas simuladas e TRM no horário mais quente do dia no inverno e no verão.

Localização	Cenário	Verão - TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno - TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Interior da quadra	1A	<b>35,2</b>	62,3	7,9	<b>40,8</b>
	1B	35,5	<b>63,0</b>	7,9	37,5
	2	<b>35,2</b>	62,1	<b>8,1</b>	38,5
	3	<b>35,2</b>	62,0	7,8	37,8
Leste	1A	<b>33,9</b>	61,1	8,3	41,4
	1B	34,6	60,6	<b>8,5</b>	41,8
	2	<b>33,7</b>	59,3	8,1	<b>42,6</b>
	3	35,1	<b>62,8</b>	8,0	40,4
Oeste	1A	<b>33,1</b>	<b>63,6</b>	7,2	41,8
	1B	34,5	63,3	<b>8,1</b>	41,8
	2	33,7	63,5	7,4	<b>42,4</b>
	3	35,0	62,8	<b>8,1</b>	40,4
Norte	1A	<b>35,6</b>	<b>63,5</b>	9,5	41,0
	1B	<b>35,3</b>	63,2	<b>10,4</b>	43,0
	2	<b>35,4</b>	<b>63,5</b>	8,3	<b>43,5</b>
	3	35,8	62,8	7,3	35,1
Sul	1A	<b>36,1</b>	<b>63,5</b>	5,7	32,0
	1B	<b>35,9</b>	62,9	4,6	25,8
	2	<b>36,0</b>	61,1	4,5	24,2
	3	<b>35,8</b>	62,8	<b>7,1</b>	<b>34,6</b>



Os resultados das simulações dos cenários hipotéticos apontam que no verão, as diferenças de TRM média (24 horas) dentre os cenários para uma mesma orientação de calçada são pequenas, em até 1.9°C. Ainda assim, observa-se que nas calçadas Leste e Oeste, o cenário 1A apresenta TRM média mais baixa devido aos

edifícios extensos no eixo Norte-Sul, adjacentes às calçadas. Por outro lado, no horário mais quente do dia (às 15:00h), o cenário 1A apresenta elevadas TRM (sendo a primeira ou segunda TRM mais elevada) em todas as calçadas e no interior da quadra. Isso decorre da baixa altura (dois pavimentos) e da implantação dos edifícios ao longo do eixo Norte-Sul, barrando os ventos (à nordeste) e elevando a TRM.

No inverno, as TRM médias (24 horas) no interior da quadra dos quatro cenários são semelhantes, devido à pequena proporção de sombreamento em relação a área ensolarada (ilustrada na seção 4.1.1). Nas calçadas, o cenário 1B apresenta as TRM mais elevadas (benéficas ao conforto térmico), devido à baixa altura (dois pavimentos) e a implantação dos edifícios no eixo Leste-Oeste. Essa implantação dos edifícios projeta menores sombreamentos, comparados aos demais cenários, nas calçadas Leste e Oeste e possui fachada extensa adjacente à calçada Norte irradiando calor ao entorno imediato. Uma exceção ocorreu na calçada Sul: o cenário 3 apresentou a TRM média mais elevada, devido a menor taxa de ocupação da quadra e a implantação dos edifícios distantes da calçada. As TRM médias e máximas mais elevadas no inverno ocorrem na calçada Norte e as mais baixas na calçada Sul, apresentando diferenças de até 19.3°C (entre TRM máximas do cenário 2).

## 4.2 Cenários base, prognósticos A e B

As seções 4.2.1 a 4.2.5 apresentam a análise dos resultados horários de TRM e a seção 4.2.6 sintetiza os resultados, apresentando as TRM média de 24 horas e as TRM máximas. Os resultados no índice PET são apresentados e discutidos na seção 4.2.7.

### 4.2.1 Interior da quadra

A Figura 4.24 apresenta os resultados das TRM no verão para o interior da quadra, por 24 horas, nos cenários base, prognósticos A e B.

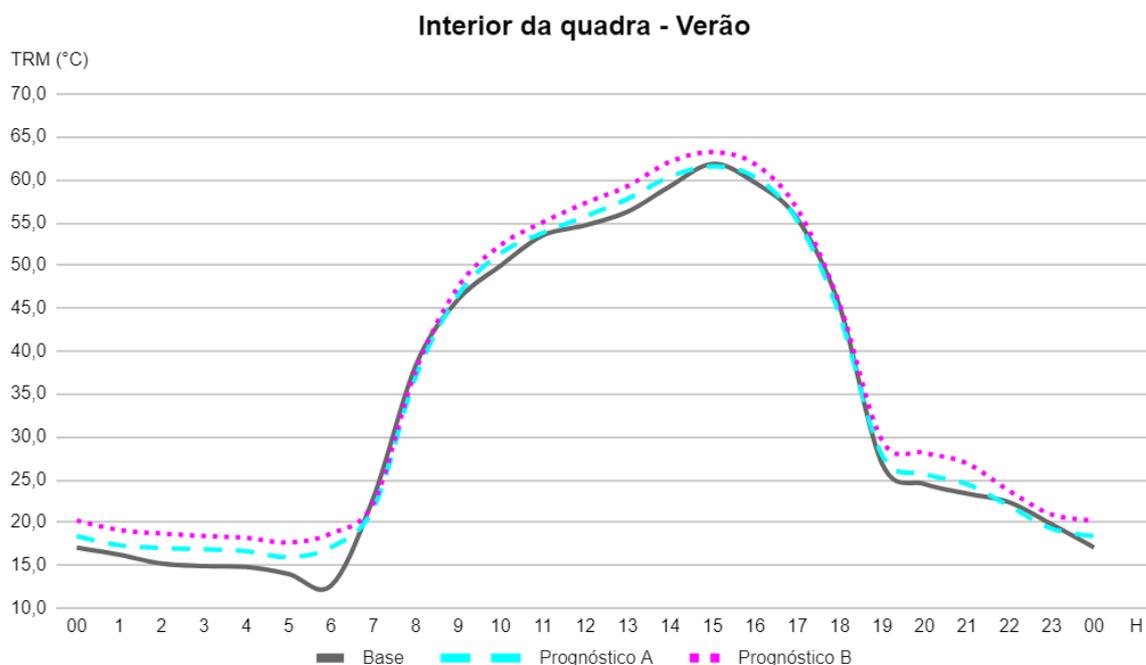


Figura 4.24: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro no interior da quadra dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.

Fonte: Autora, 2023.

Os cenários prognósticos A e B apresentam TRM modestamente mais elevadas na maioria dos horários, devido ao aquecimento da temperatura do ar (em razão das projeções de mudanças climáticas). Com isso, o cenário base apresenta as TRM mais favoráveis ao conforto térmico no verão, ao longo das 24 horas.

Às 7:00h, às 8:00h, às 17:00h e às 18:00h, as TRM dos três cenários são semelhantes, devido ao maior sombreamento no interior da quadra do cenário urbano prognóstico A e B (projetado pelas novas edificações de três pavimentos) em relação ao cenário base. Nesses horários, o aumento do sombreamento reduz as TRM no interior da quadra dos cenários prognóstico A e B, sobrepondo-se ao efeito do aquecimento da temperatura do ar. A Figura 4.25 mostra o aumento de sombreamento entre o interior da quadra do cenário prognóstico A e B em relação ao cenário base, às 8:00h.

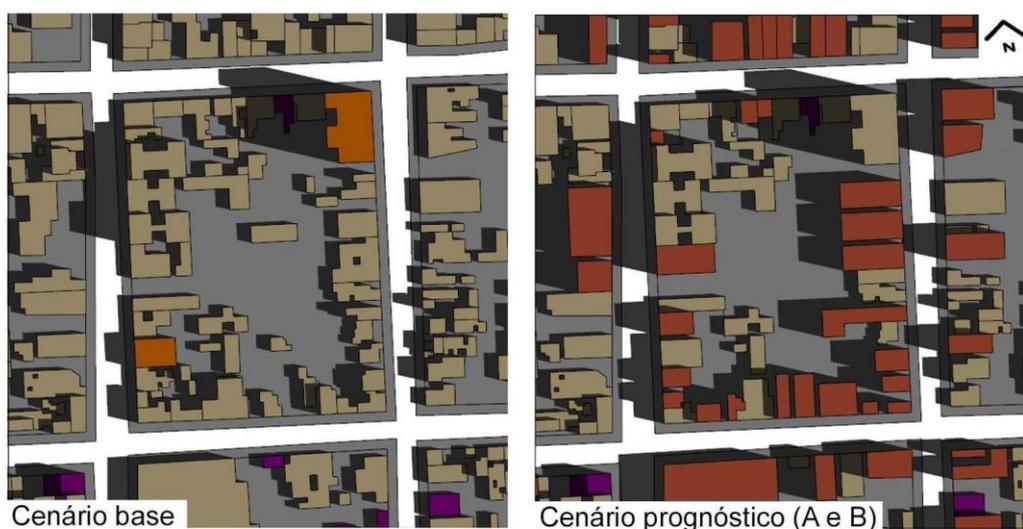


Figura 4.25: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 8:00h, nos cenários base e prognóstico (A e B).  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente do dia (às 15:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 63.2°C, enquanto que o cenário base apresentou 61.9°C e o prognóstico A, 61.6°C. A Figura 4.26 apresenta os resultados das TRM no inverno para o interior da quadra, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

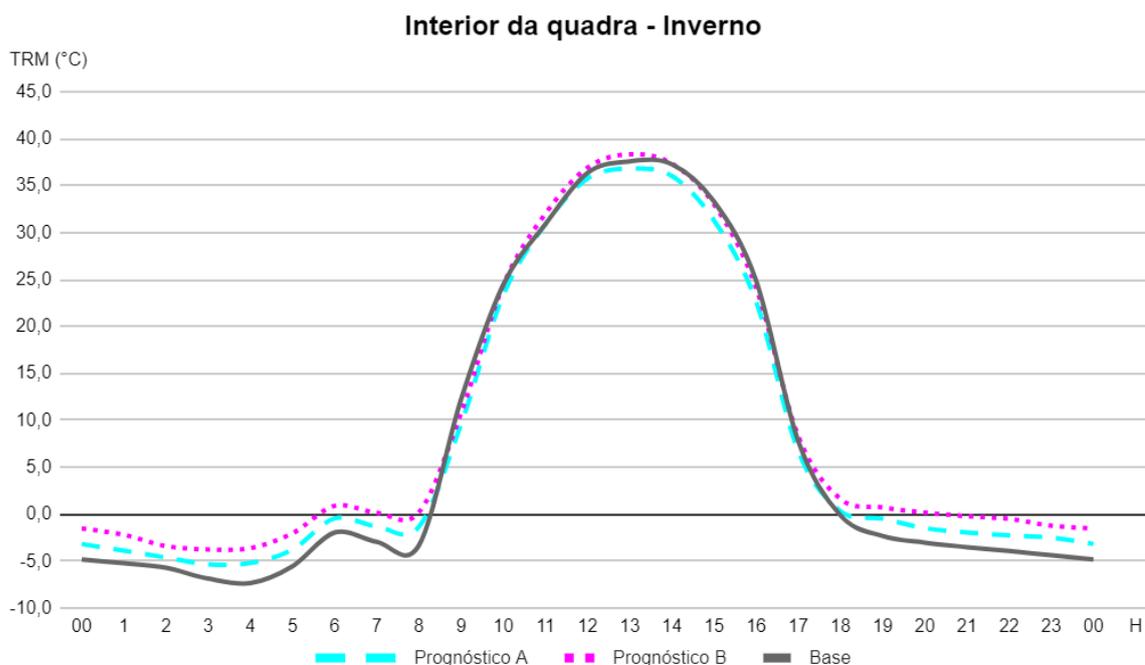


Figura 4.26: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho no interior da quadra dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

As TRM dos cenários de prognóstico A e B no interior da quadra são semelhantes às do cenário base, ao longo do dia. Esse resultado deve-se a

sobreposição de dois efeitos opostos: a redução das TRM devido ao maior sombreamento nos cenários prognóstico A e B, em relação ao cenário base, e o aumento das TRM devido ao aquecimento das temperaturas do ar (em razão das projeções de mudanças climáticas). A Figura 4.27 demonstra esse aumento de sombreamento projetado pelas novas edificações (representadas em vermelho) no interior da quadra do cenário prognóstico, principalmente nos recuos laterais entre as edificações.

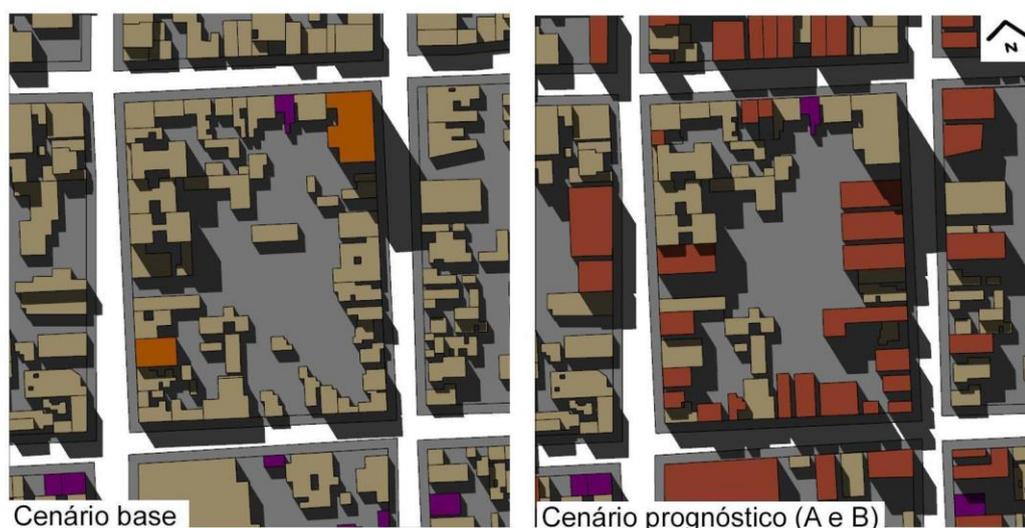


Figura 4.27: sombreamento do dia 18 de junho, às 15:00h, nos cenários base e prognóstico (A e B).  
Fonte: Autora, 2023.

As TRM entre às 13:00h e às 16:00h no cenário prognóstico A, que considera o patamar intermediário para a mitigação de gases e de aquecimento da temperatura do ar, apontam para a tendência de redução da TRM, embora a alteração no cenário urbano para prognóstico tenha sido modesta (inserindo edificações de apenas três pavimentos). No horário mais quente no interior da quadra (às 13:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 38.3°C, enquanto que o cenário base apresentou 37.8°C e o prognóstico A, 36.8°C. À noite, o cenário prognóstico B tem as TRM mais elevadas (favoráveis ao conforto térmico), devido ao aumento da temperatura do ar nos dados de entrada (efeito das mudanças climáticas projetadas).

#### 4.2.2 Calçada Leste

A Figura 4.28 apresenta os resultados das TRM no verão para a calçada Leste, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

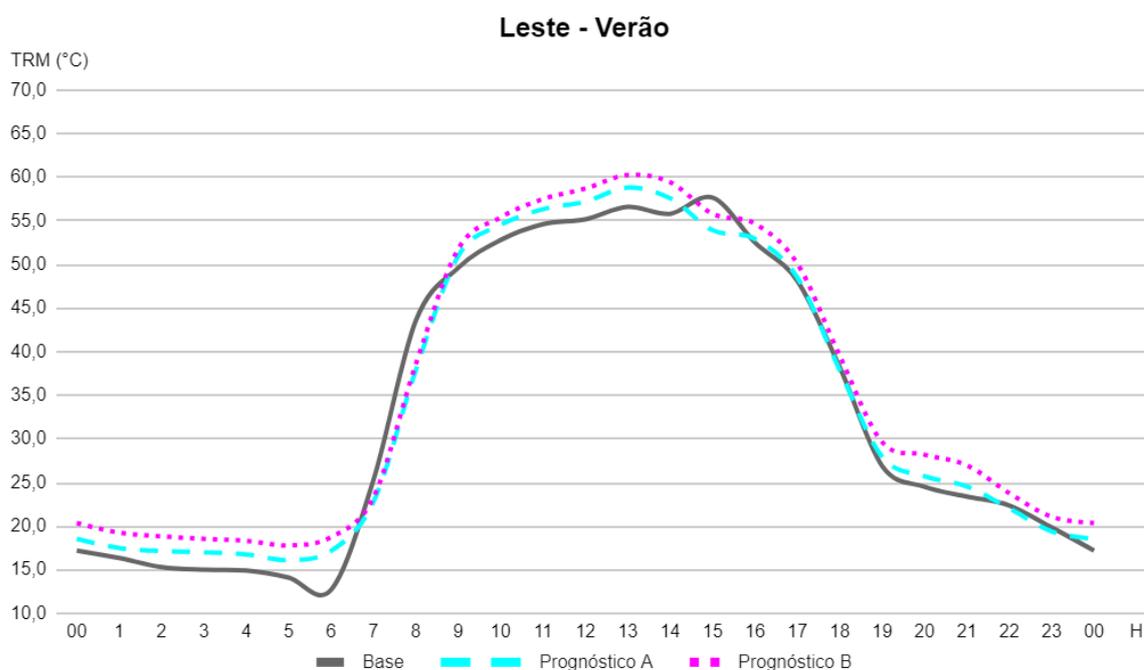


Figura 4.28: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Leste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

O cenário prognóstico B apresenta as TRM mais elevadas na maioria dos horários, decorrente do efeito do aquecimento da temperatura do ar e o cenário base, as TRM mais baixas (favoráveis ao conforto térmico), ao longo das 24 horas. As exceções ocorrem às 7:00h, às 8:00h e às 15:00h, quando o cenário base tem as TRM mais elevadas que os demais cenários. Nesses horários, o aumento do sombreamento na calçada Leste dos cenários prognóstico A e B, comparado ao cenário base (Figura 4.30), reduz as TRM, sobrepondo-se ao efeito do aumento da temperatura do ar. A Figura 4.29 ilustra a redução da TRM na calçada Leste dos cenários prognóstico A e B (indicada pela seta preta), em relação ao cenário base, e o aumento da TRM nas demais áreas, às 15:00h.

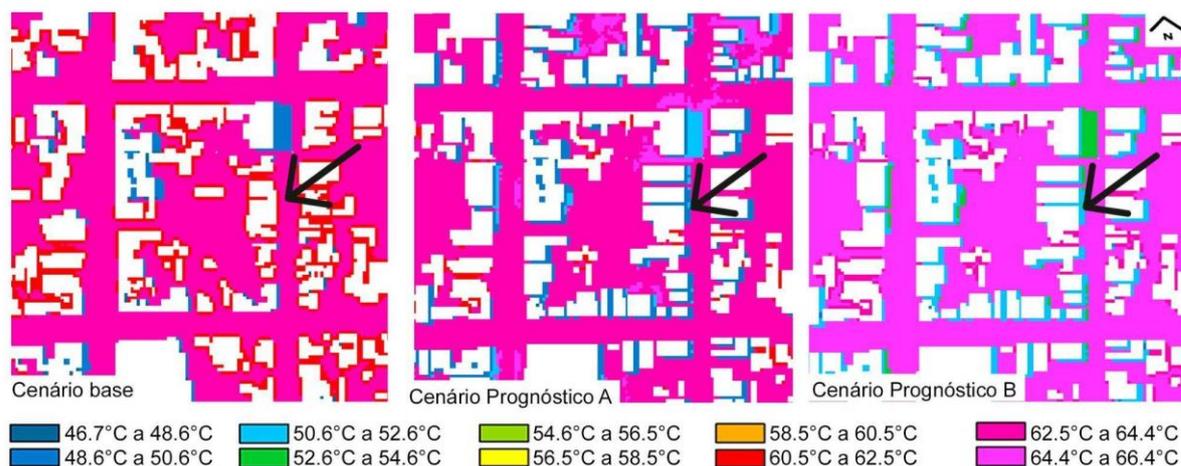


Figura 4.29: TRM no dia 24 de janeiro ( $h=1.5m$ ), às 15:00h, nos cenários: base, prognósticos A e B.  
Fonte: Autora, 2023.



Figura 4.30: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 15:00h, nos cenários: base e prognóstico (A e B)  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente na calçada Leste (às 15:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 60.3°C, enquanto que o cenário base apresentou 56.6°C e o prognóstico A, 58.8°C. A Figura 4.31 apresenta os resultados das TRM no inverno para a calçada Leste, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

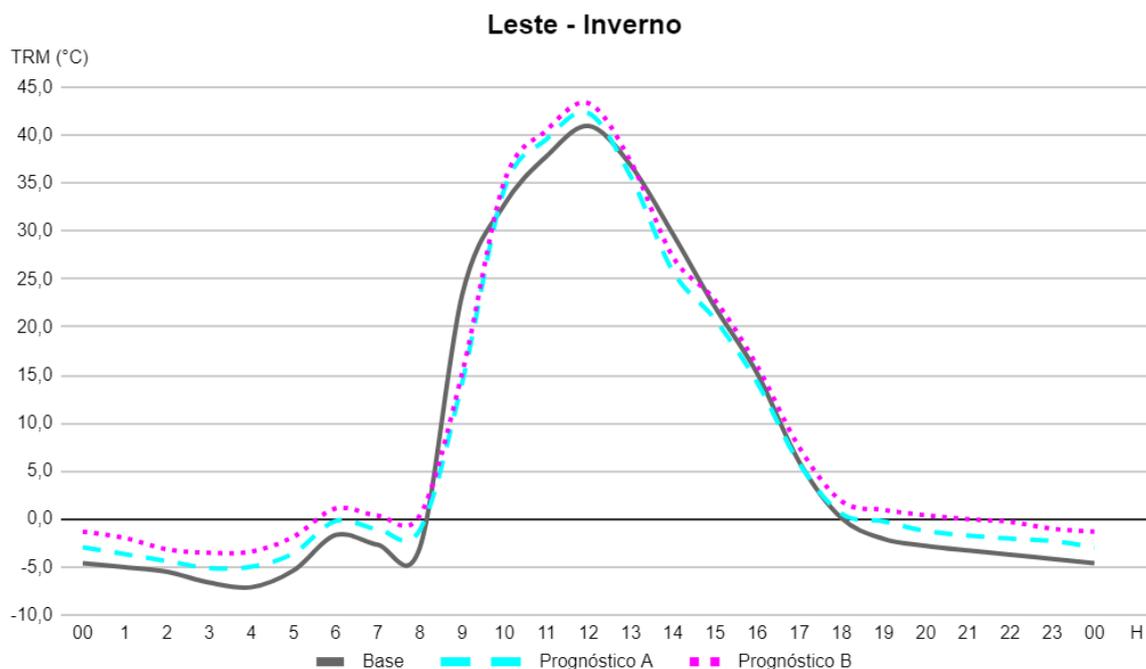


Figura 4.31: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Leste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

Os resultados das TRM durante o dia demonstram o efeito do sombreamento das novas edificações de três pavimentos nas calçadas Leste dos cenários prognóstico A e B, desfavorável ao conforto térmico no inverno. Às 9:00h e entre às 13:00h e às 18:00h, o maior sombreamento na calçada Leste do cenário prognóstico (A e B) comparado ao cenário base (Figura 4.32) resulta em TRM mais baixas ou semelhantes às do cenário base.

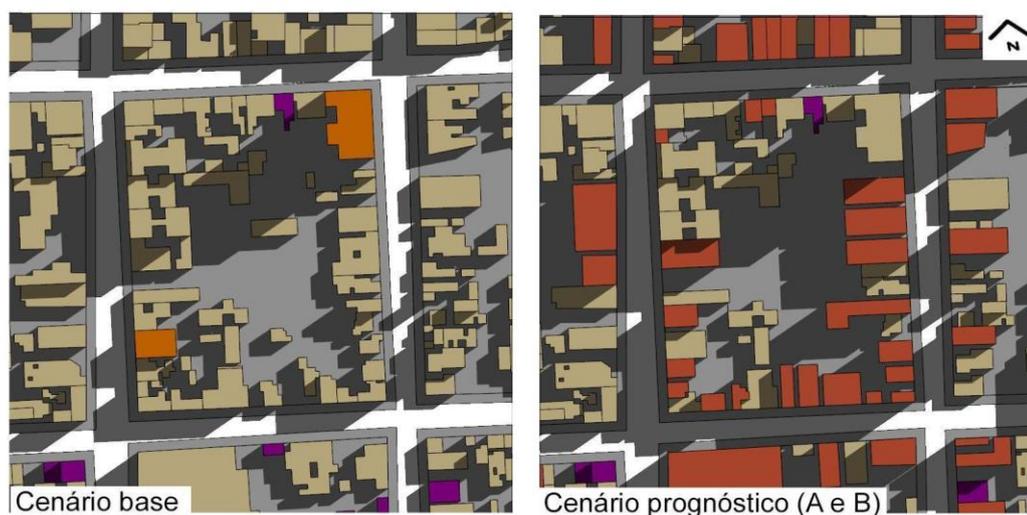


Figura 4.32: sombreamento do dia 18 de junho, às 9:00h, nos cenários: base e prognóstico.  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente na calçada Leste (às 12:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 43.3°C, enquanto que o cenário base apresentou 41.0°C e o prognóstico A, 42.3°C.

### 4.2.3 Calçada Oeste

A Figura 4.33 apresenta os resultados das TRM no verão para a calçada Oeste, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

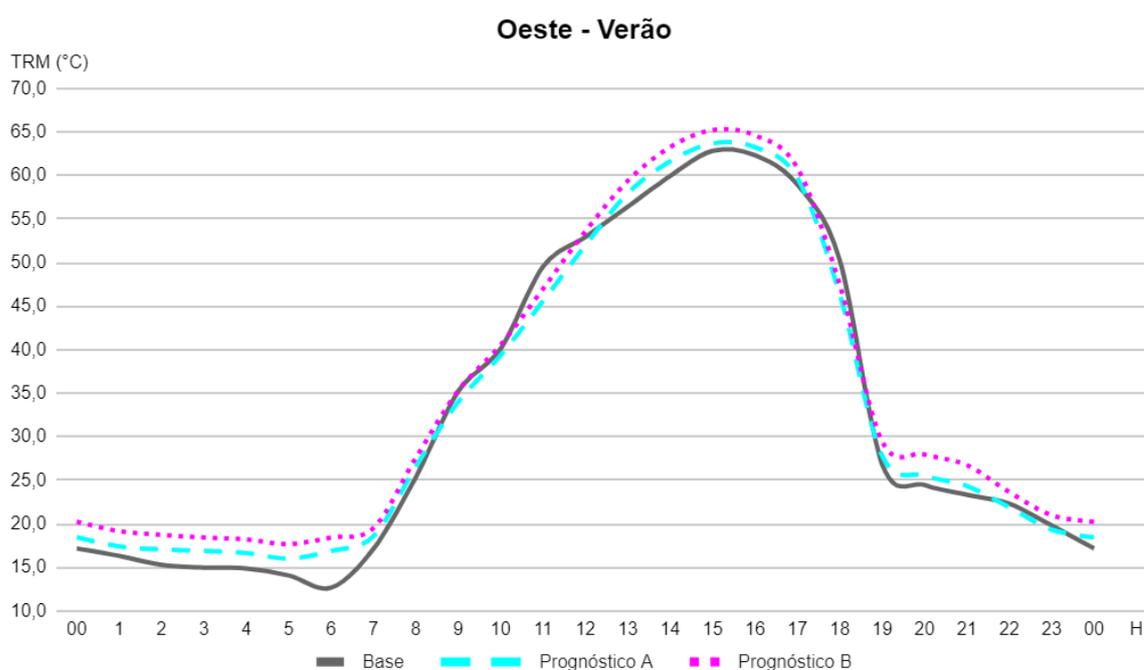


Figura 4.33: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Oeste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

Observa-se que entre às 8:00h e às 11:00h e às 18:00h, a calçada Oeste dos cenários de prognósticos A e B apresenta TRM mais baixas ou semelhantes ao cenário base. Isso decorre do aumento do sombreamento sobre a calçada Oeste nos cenários prognóstico A e B em relação ao cenário base (Figura 4.34), consequência das novas edificações com três pavimentos (representadas em vermelho).



Figura 4.34: sombreamento do dia 24 de janeiro, às 11:00h, nos cenários: base e prognóstico (A e B).  
Fonte: Autora, 2023.

Por outro lado, nos horários mais quentes do dia (entre às 13:00h e às 16:00h), os cenários prognósticos A e B apresentam TRM mais elevadas, o que deve aumentar o desconforto por calor. As TRM máximas nas calçadas Oeste elevaram-se do cenário base (62.9°C) para os cenários prognóstico A (63.7°C) e B (65.2°C). Diferente de Leal (2018) que, sem considerar as projeções de mudanças climáticas globais, observou redução de 1.7°C na TRM máxima na calçada oeste do cenário existente (edificações até seis pavimentos) com 72.8°C, em relação ao cenário com substituição dos edifícios mais baixos por novos de seis pavimentos com 71.1°C, em Vitória - ES.

A Figura 4.35 apresenta os resultados das TRM no inverno para a calçada Oeste, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

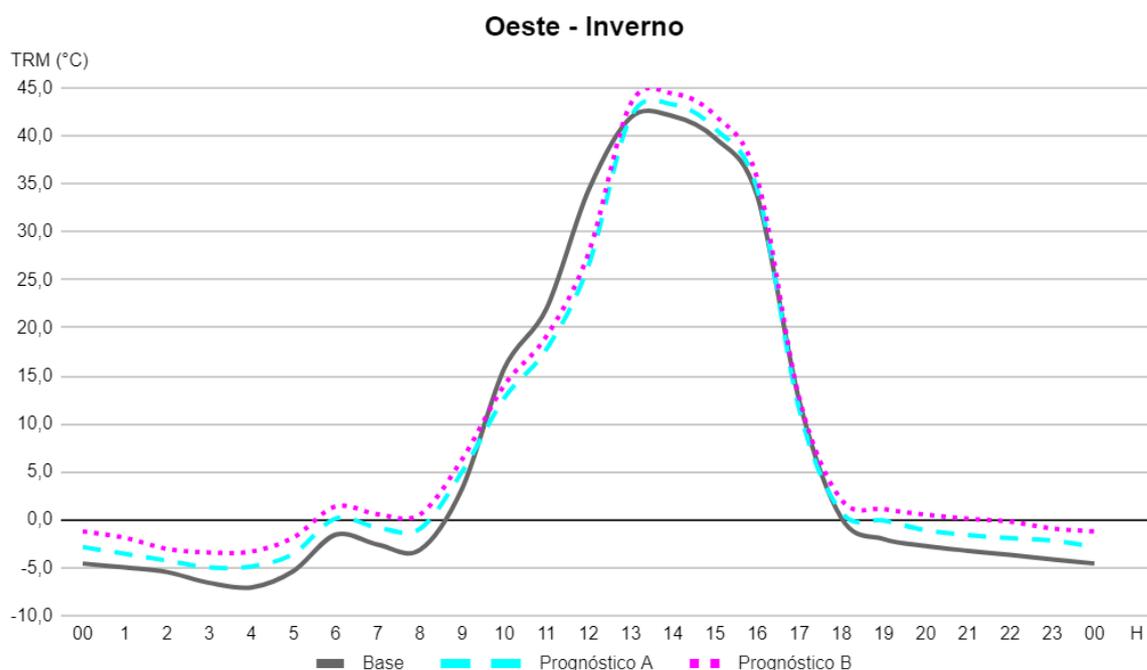


Figura 4.35: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Oeste dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

Semelhante ao observado nos resultados das calçadas Leste no inverno, as TRM das calçadas Oeste apontam para os efeitos do aumento do sombreamento, desfavoráveis ao conforto térmico, devido às novas edificações de três pavimentos nos cenários prognóstico A e B, durante o dia. O aumento do sombreamento sobre as calçadas Oeste nos cenários prognóstico A e B, em relação ao cenário base (exemplificado na Figura 4.36) resulta em TRM semelhantes ou mais baixas que as do cenário base.



Figura 4.36: sombreamento do dia 18 de junho, às 16:00h, nos cenários: base e prognóstico.  
Fonte: Autora, 2023.

No horário mais quente na calçada Oeste (às 13:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 43.3°C, enquanto que o cenário base apresentou 41.9°C e o prognóstico A, 42.0°C.

#### 4.2.4 Calçada Norte

A Figura 4.37 apresenta os resultados das TRM no verão para a calçada Norte, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

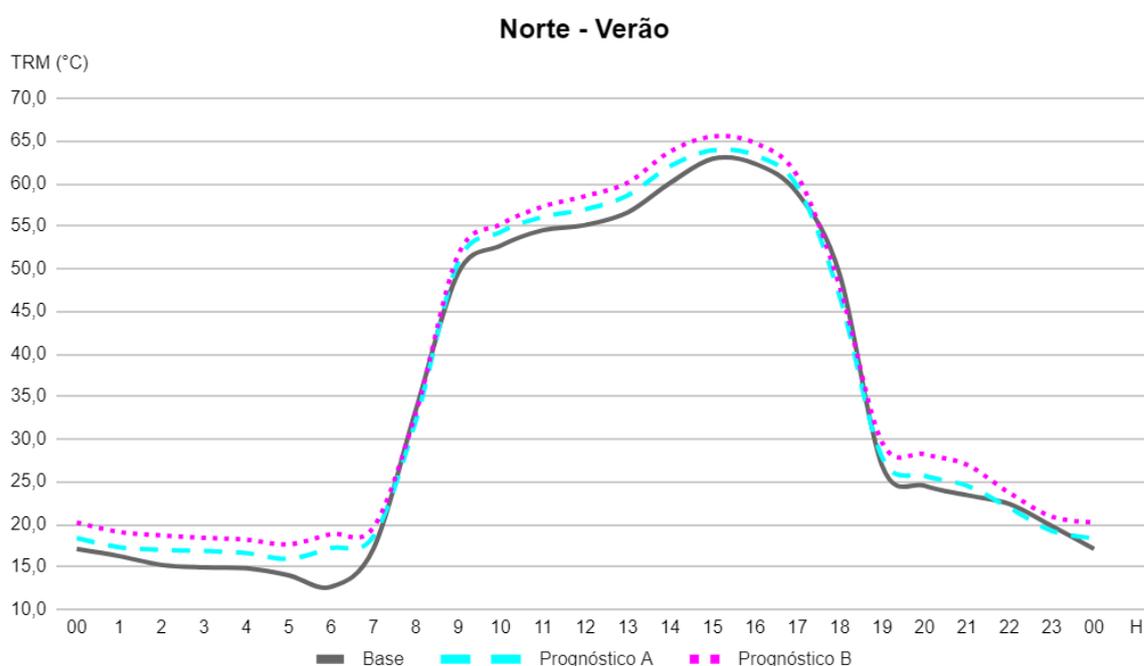


Figura 4.37: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Norte dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

Os cenários prognósticos A e B apresentam TRM mais elevadas que as do cenário base na maioria dos horários ao longo das 24 horas nas calçadas Norte, decorrente do efeito do aquecimento da temperatura do ar. Nesse caso, as novas edificações de três pavimentos inseridas no cenário prognóstico A e B, pouco alteram o sombreamento sobre as calçadas norte, devido à altura e a trajetória solar no período. As Figuras 4.30 e 4.34 exemplificam a calçada norte totalmente ensolarada durante o dia.

Apenas às 8:00h e às 18:00h, quando o sol se encontra em baixa altura, a Sudeste e a Sudoeste respectivamente, que os novos edifícios dos cenários prognóstico A e B aumentam o sombreamento, em relação ao cenário base, na calçada Norte. A Figura 4.25 exemplifica o aumento do sombreamento na calçada

Norte do cenário prognóstico (A e B) em relação ao cenário base. Nesses horários (às 8:00h e às 18:00h), o maior sombreamento nos cenários prognóstico A e B reduzem a TRM, sobrepondo-se ao efeito do aumento da temperatura do ar, resultando em TRM semelhantes às do cenário base. No horário mais quente na calçada Norte (às 15:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 65.5°C, enquanto que o cenário base apresentou 62.9°C e o prognóstico A, 63.9°C.

A Figura 4.38 apresenta os resultados das TRM no inverno para a calçada Norte, por 24 horas, nos cenários base, prognósticos A e B.

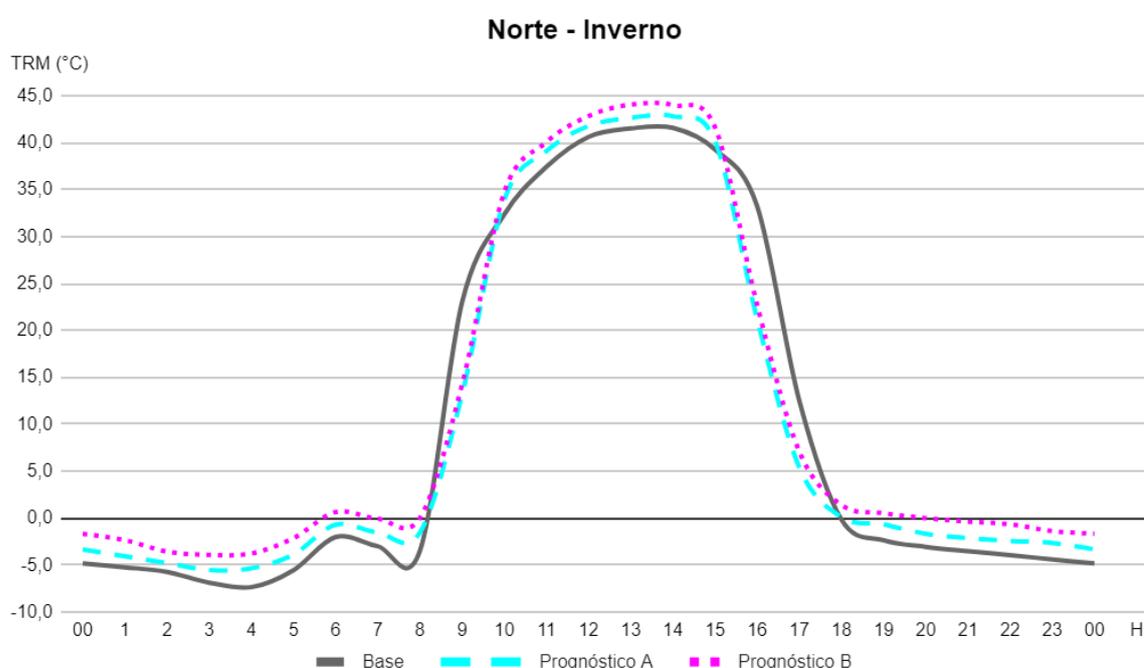


Figura 4.38: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Norte dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

Semelhante ao observado na calçada Norte no verão, as TRM dos cenários prognóstico A e B elevam-se, devido ao aquecimento da temperatura do ar, na maioria dos horários, o que favorece o conforto térmico. Apenas às 9:00h, às 16:00h e às 17:00h observa-se o efeito do aumento do sombreamento (redução da TRM) sobre a calçada Norte do cenário prognóstico A e B, em relação ao cenário base, o que desfavorece o conforto térmico. A Figura 4.32 exemplifica esse aumento do sombreamento na calçada Norte do cenário prognóstico A e B, às 9:00h.

Ressalta-se que o efeito do aumento do sombreamento foi modesto e pontual (em três horários do dia) porque as novas edificações têm apenas três pavimentos. No horário mais quente na calçada Norte (igualmente às 13:00h e às 14:00h), o

cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 44.0°C, enquanto que (às 14:00h) o cenário base apresentou 41.6°C e o prognóstico A, 42.8°C. A Figura 4.39 ilustra o aumento da TRM do cenário base para os cenários prognósticos A e B, às 13:00h. A Figura 4.40 apresenta o sombreamento no mesmo horário (às 13:00h), demonstrando a calçada Norte ensolarada em ambos cenários.

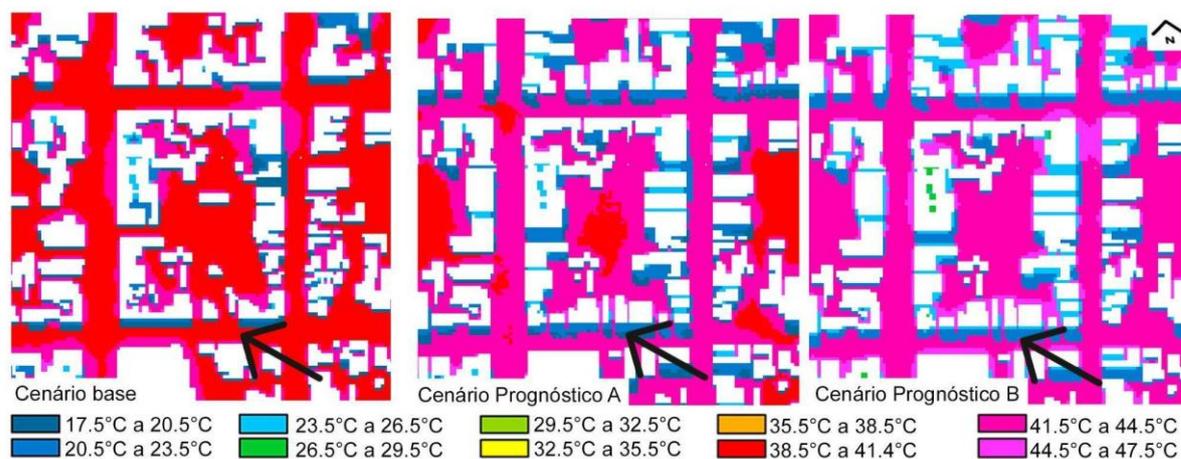


Figura 4.39: TRM no dia 18 de junho (h=1.5m), às 13:00h, nos cenários: base, prognósticos A e B. Fonte: Autora, 2023.

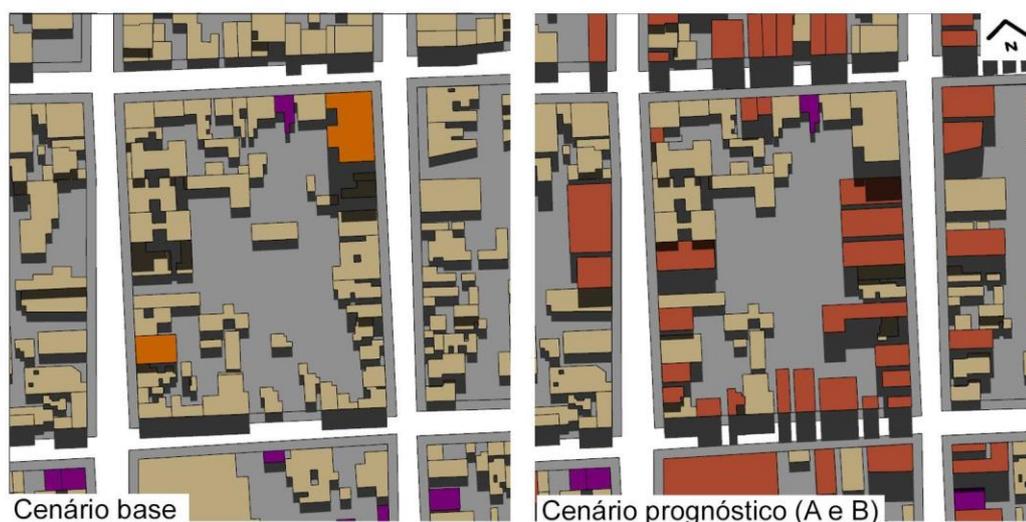


Figura 4.40: sombreamento do dia 18 de junho, às 13:00h, nos cenários: base e prognóstico. Fonte: Autora, 2023.

#### 4.2.5 Calçada Sul

A Figura 4.41 apresenta os resultados das TRM no verão para a calçada Sul, por 24 horas, nos cenários base, prognóstico A e B.

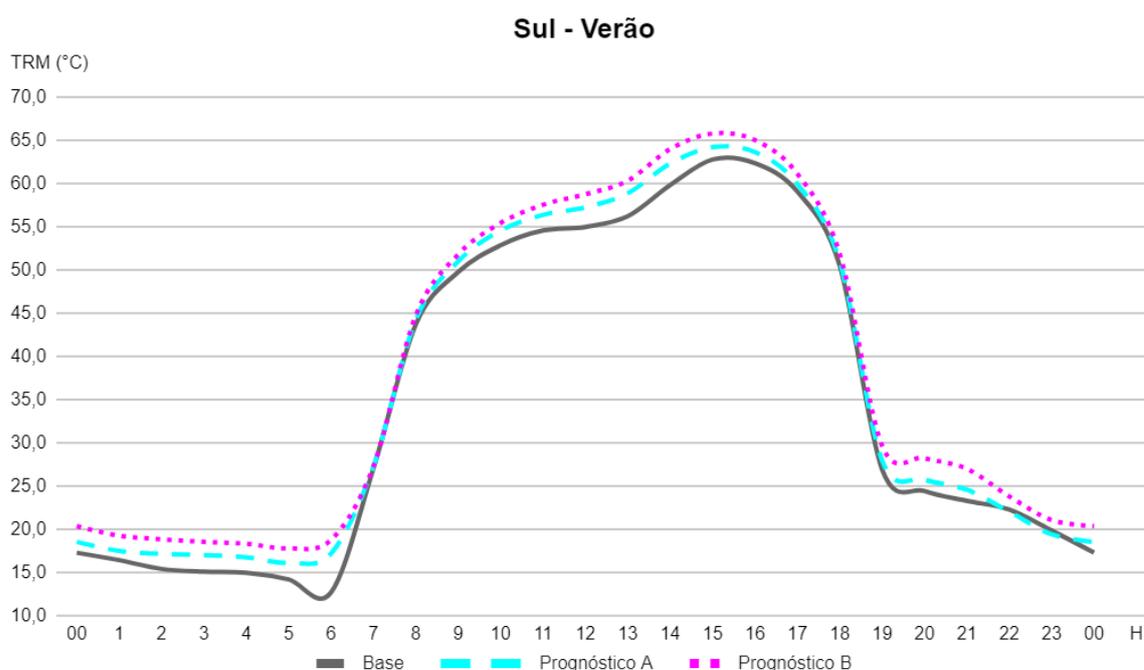


Figura 4.41: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 24 a 25 de janeiro na calçada Sul dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.

Fonte: Autora, 2023.

Os cenários prognósticos A e B apresentam TRM mais elevadas que as do cenário base na maioria dos horários, ao longo das 24 horas, nas calçadas Sul, apontando o efeito do aquecimento da temperatura do ar no verão. Nesse caso, as novas edificações de três pavimentos inseridas no cenário prognóstico A e B, pouco alteram o sombreamento sobre as calçadas sul. As Figuras 4.30 e 4.34, sombreamento às 15:00h e às 11:00h, demonstram a calçada Sul com pequenas áreas sombreadas no cenário prognóstico (A e B), às 15:00h, e ensolaradas em ambos cenários às, 11:00h. No horário mais quente na calçada Sul (às 15:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 65.5°C, enquanto que o cenário base apresentou 62.8°C e o prognóstico A, 64.2°C.

A Figura 4.42 apresenta os resultados das TRM no inverno para a calçada Sul, por 24 horas, nos cenários base, prognósticos A e B.

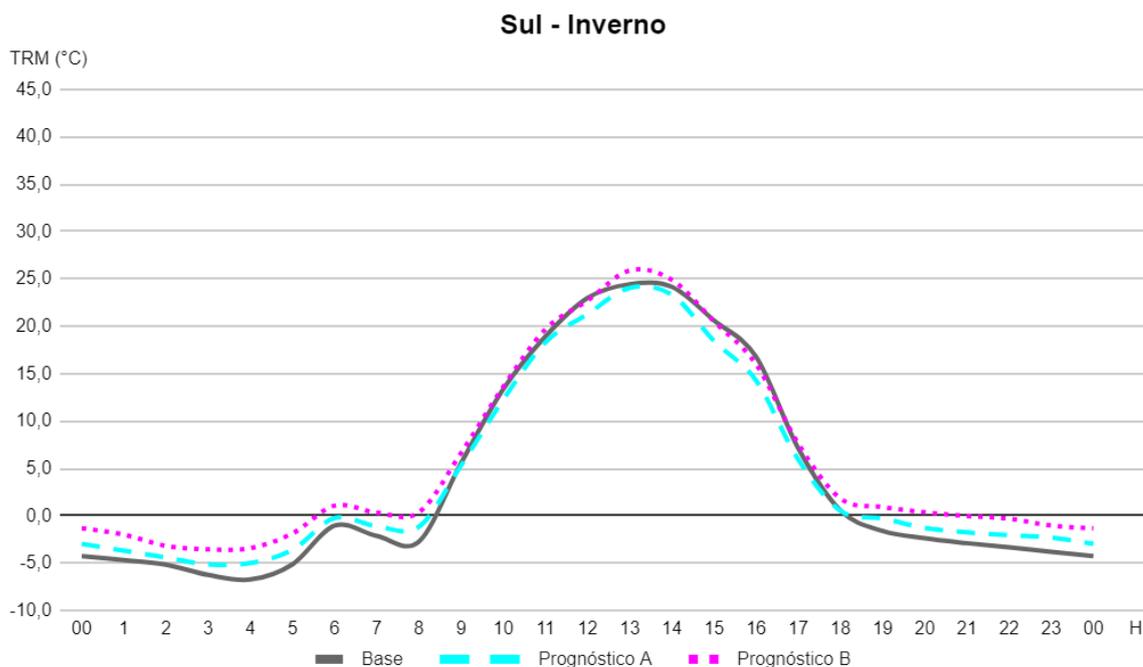


Figura 4.42: Temperatura Radiante Média (h=1.5m) dos dias 18 a 19 de junho na calçada Sul dos cenários: base; prognóstico A; e prognóstico B.  
Fonte: Autora, 2023.

As TRM do cenário prognóstico A tendem a ser as mais baixas dentre os três cenários durante o dia, devido ao efeito do aumento do sombreamento sobre a calçada Sul e em áreas próximas (como a via carroçável adjacente), que se sobrepõem ao efeito do aumento da temperatura do ar em patamar intermediário (RCP 4.5, como explicado na seção 3.4: Etapa 3: Simulações computacionais dos microclimas).

As Figuras 4.27, 4.32 e 4.36 (sombreamentos às 15:00h, às 9:00h e às 16:00h, respectivamente) demonstram maiores sombreamentos na calçada Sul e áreas adjacentes no cenário prognóstico A e B comparado ao cenário base. A Figura 4.39 ilustra, às 13:00h, as áreas sombreadas com TRM mais baixas (indicadas pelas setas pretas) e a elevação da TRM nas áreas ensolaradas nos cenários base, prognósticos A e B. No horário mais quente na calçada Sul (às 13:00h), o cenário prognóstico B foi, dentre todos, o que apresentou a TRM mais elevada: 60.3°C, enquanto que o cenário base apresentou 56.2°C e o prognóstico A, 58.9°C.

Os resultados das TRM nas calçadas e no interior da quadra demonstraram que nos horários mais quentes do dia e à noite, as TRM são mais elevadas no cenário prognóstico B, o que é desfavorável ao conforto térmico no verão e benéfico no inverno. Esses resultados alertam para os efeitos do aquecimento do ar decorrente das projeções de mudanças climáticas em escala global. O aumento do adensamento

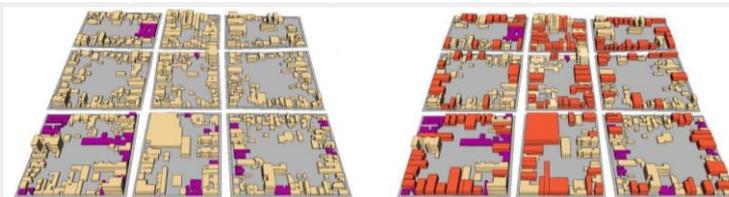
construtivo através da inserção de edifícios de três pavimentos reduziu modestamente as TRM em alguns horários, mas que não deve resultar em impactos negativos ao conforto térmico, como observado na seção 4.2.7 (Índice PET).

#### 4.2.6 TRM médias e máximas

A Tabela 4.7 apresenta a TRM média das 24 horas para as calçadas e o interior da quadra dos cenários base, prognóstico A e B no verão e no inverno.

Tabela 4.7 - TRM média das 24 horas das simulações de verão e de inverno.

Localização	Cenário	Verão: TRM média das 24 horas (°C)	Verão - TRM às 15:00h (°C)	Inverno: TRM média das 24 horas (°C)	Inverno - TRM às 13:00h (°C)
Interior da quadra	Base	<b>34,4</b>	61,9	7,7	37,6
	Prognóstico A	35,2	61,6	8,2	36,8
	Prognóstico B	36,7	<b>63,2</b>	<b>9,6</b>	<b>38,3</b>
Leste	Base	<b>33,9</b>	<b>57,7</b>	7,8	36,9
	Prognóstico A	34,6	53,9	8,3	35,7
	Prognóstico B	36,1	55,8	<b>9,7</b>	<b>37,3</b>
Oeste	Base	<b>33,1</b>	62,9	7,9	41,9
	Prognóstico A	33,6	63,7	8,4	42,0
	Prognóstico B	35,2	<b>65,2</b>	<b>9,8</b>	<b>43,3</b>
Norte	Base	<b>34,8</b>	62,9	10,0	41,5
	Prognóstico A	35,9	63,9	10,0	42,6
	Prognóstico B	37,4	<b>65,5</b>	<b>11,4</b>	<b>44,0</b>
Sul	Base	<b>35,7</b>	62,8	4,3	24,5
	Prognóstico A	37,1	64,2	4,5	24,1
	Prognóstico B	38,6	<b>65,8</b>	<b>6,1</b>	<b>25,9</b>



Cenário base

Cenário prognóstico (A e B)

No verão, o cenário base é o que apresenta as TRM médias mais favoráveis ao conforto térmico (mais baixas) nas quatro calçadas e no interior da quadra.

Inversamente, no inverno, o prognóstico B é o cenário que apresenta as TRM médias mais favoráveis ao conforto térmico (mais elevadas) nas quatro calçadas e no interior da quadra.

As TRM máximas ocorrem no cenário Prognóstico B nas calçadas e no interior da quadra para inverno e verão, em decorrência do aquecimento da temperatura do ar. Uma exceção ocorreu na calçada Leste no verão, devido ao maior sombreamento (às 15:00h) no cenário prognóstico B, em relação ao cenário base, conforme explicado na seção 4.2.2. Neste estudo a elevação de edifícios para três pavimentos pouco influenciou nos resultados das TRM, diferente de Brandão (2020) que investigou maiores alturas. Em Arapiraca - AL, também cidade de médio porte, a autora observou redução da TRM de 75°C para abaixo de 40°C, às 15:00h, entre os cenários extremos (de um e quinze pavimentos), em novembro.

Hepsheba et al. (2019), no verão, sem considerar projeções de mudanças climáticas, verificou redução de 3.89°C em média da TRM do cenário com edificações de quatro pavimentos, em relação ao de edificações com oito pavimentos, em Sri Lanka. Diferente deste estudo que demonstrou a elevação da TRM média do cenário com edificações modestamente mais altas (cenários prognósticos A e B) em relação ao cenário base, reiterando a importância de considerar projeções de aquecimento da temperatura do ar nos estudos de microclimas urbanos.

No verão, à noite (entre às 20:00h e às 5:00h), a TRM do cenário prognóstico B (média das calçadas e interior da quadra) elevou-se em 3°C em relação ao cenário base. Esse resultado alinha-se com o de Chapman et al. (2019) em Brisbane, na Austrália, que verificou aumento de 2.5°C na temperatura do ar, entre cenários de proporção H/W de 0.4 a 0.6, considerando aquecimento da temperatura do ar em patamar de concentração de gases (RCP) 8.5 (como no prognóstico B deste estudo).

Schmitz (2014) observou o aumento das temperaturas durante o dia, no verão, entre o cenário existente e de prognóstico, considerando as projeções de mudanças climáticas, semelhante a este estudo. A TRM média durante o dia (entre às 6:00h e às 19:00h, incluindo resultados de calçadas e interior da quadra) foi de 45.8°C do cenário base para 46.6°C no prognóstico A e 47.9°C no prognóstico B. Schmitz (2014) observou aumento da temperatura UTCI média (entre às 7:00h e às 19:00h) de 31.55°C em 2011 para 31.85°C em 2061 para Curitiba - PR.

No inverno, o mesmo estudo para Curitiba - PR observou que a temperatura UTCI média (entre às 7:00h e às 19:00h) elevou de 19.30°C, em 2011, para 20.15°C,

em 2061. Neste estudo para Bagé, observou-se que a TRM média durante o dia (entre às 8:00h e às 17:00h, considerando calçadas e o interior da quadra) foi de 23.5°C no cenário base, reduzindo para 22.3°C no prognóstico A e aumentando para 23.7°C no prognóstico B. Verifica-se que os resultados para Curitiba no inverno, assim como os do cenário base para o cenário prognóstico B para Bagé, têm a tendência de aumento da temperatura, ao oposto do cenário base em relação ao prognóstico A que tende a reduzir a temperatura. Essa situação aponta para a vinculação das tendências dos resultados à relação entre aumento do sombreamento e o patamar de projeção de mudança climática considerado.

#### 4.2.7 Índice PET

As temperaturas no índice de conforto térmico PET nos cenários base, prognóstico A e B (nas localizações e horários estabelecidos na seção 3.5) no verão são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - PET nos cenários base, prognóstico A e B no verão

	Cenário	PET	Sensação térmica	
			Calibração – Pelotas (ROSA, 2021)	Original (MATZARAKIS e MAYER, 1996)
calçada leste, às 8:00h	base	28.9°C	Levemente calor	Levemente calor
	prognóstico A	<b>28.1°C</b>	Levemente calor	Levemente calor
	prognóstico B	30.2°C	Levemente calor	Pouco calor
calçada leste, às 13:00h	base	<b>41.2°C</b>	Pouco calor	Muito calor
	prognóstico A	45.7°C	não classificado	Muito calor
	prognóstico B	48.3°C	não classificado	Muito calor
interior da quadra, às 15:00h	base	<b>44.0°C</b>	não classificado	Muito calor
	prognóstico A	48.5°C	não classificado	Muito calor
	prognóstico B	51.2°C	não classificado	Muito calor

Identificou-se **desconforto por calor em todas localizações e horários** analisadas na Tabela 4.8. Às 8:00h, o cenário prognóstico A é o que apresenta PET mais baixa (28.1°C), enquanto que nas demais situações (calçada Leste às 13:00h e interior da quadra às 15:00h), o cenário base tem as PET mais baixas. Nos horários mais quentes, às 13:00h na calçada Leste e às 15:00h no interior da quadra, as diferenças no índice PET são maiores, até 7.2°C entre cenário base e prognóstico B. Possivelmente, essas diferenças maiores ocorrem porque nesses horários os cenários encontram-se ensolarados, prevalecendo o efeito do aquecimento da temperatura do ar (sem efeito de aumento de sombreamento, o que ocorre às 8:00h na calçada leste).

Às 13:00h, os cenários prognósticos A e B resultaram em mudança de faixa de sensação térmica, conforme a calibração de Rosa (2021), diferente de Schmitz (2014) que não observou alterações de sensação térmica no índice UTCI entre os cenários: existente e prognóstico, no verão. Às 13:00h, as PET dos cenários prognósticos A e B, como as das 15:00h, não são classificadas por Rosa (2021) e representam a sensação de **muito calor**, conforme Matzarakis e Mayer (1996). Para a cidade de Maringá-PR (clima cfa, como Bagé), Aquino et al. (2019), classifica PET acima de 41°C como situação extrema de desconforto por calor.

Em outro estudo de adensamento construtivo sobre morfologias urbanas existentes no verão, mas sem considerar projeções de mudanças climáticas, Galal, Mahmoud e Sailor (2020) encontraram diferenças da PET até 5.5°C e de 1°C na média diária, entre o cenário de morfologia existente (com edificações até 36 metros) e o cenário hipotético com edifícios de até 12 metros de altura, em New Aswan, no Egito. Semelhantemente, Berardi e Wang (2016) encontraram diferenças de 2.4°C PET na média diária entre a morfologia existente (altura média de 14.2 metros) e o cenário hipotético (aumento da altura média para 18.2 metros) em Toronto, Canadá.

As temperaturas no índice de conforto térmico PET nos cenários base, prognóstico A e B (nas localizações e horários estabelecidos na seção 3.5) no inverno são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - PET nos cenários base, prognóstico A e B no inverno

	Cenário	PET	Sensação térmica	
			Calibração – Pelotas (ROSA, 2021)	Original (MATZARAKIS e MAYER, 1996)
calçada norte, às 8:00h	base	-4.2°C	não classificado	Muito frio
	prognóstico A	-1.7°C	não classificado	Muito frio
	prognóstico B	<b>0.4°C</b>	não classificado	Muito frio
calçada norte, às 14:00h	base	18.1°C	Neutralidade térmica	Neutralidade térmica
	prognóstico A	19.6°C	Neutralidade térmica	Neutralidade térmica
	prognóstico B	<b>22.0°C</b>	Neutralidade térmica	Neutralidade térmica
interior da quadra, às 13:00h	base	15.8°C	Levemente Frio	Levemente Frio
	prognóstico A	16.4°C	Levemente Frio	Levemente Frio
	prognóstico B	<b>19.0°C</b>	Neutralidade térmica	Neutralidade térmica

Observa-se que para todas as situações analisadas na Tabela 4.9, o cenário base tem as PET mais baixas e o cenário prognóstico B, as PET mais elevadas, demonstrando o efeito do aquecimento do ar. Às 8:00h, as calçadas Norte, sombreadas em todos os cenários, apresentam PET inferiores a 8°C, que não são classificadas por Rosa (2021), e representam a sensação de **muito frio**, conforme Matzarakis e Mayer (1996). Para a cidade de Maringá - PR (clima cfa, como Bagé), Aquino et al. (2019), classifica PET abaixo de 4°C como situação extrema de desconforto por frio.

Às 14:00h, as calçadas Norte dos três cenários estão ensolaradas, resultando na sensação de **neutralidade térmica**. As diferenças no índice PET entre o cenário base e os prognósticos A e B na calçada Norte às 8:00h e às 14:00h não resultaram em mudança da faixa de conforto térmico. Observa-se que às 13:00h no interior da quadra o cenário base e prognóstico A encontram-se em **desconforto leve por frio** e no prognóstico B a sensação térmica passou para neutralidade térmica, efeito do aumento da temperatura do ar.

Sun et al. (2022) verificou PET mais frias que as de Bagé, para Harbin (clima temperado frio), na China, em diferentes pontos de recortes urbanos com densidades construídas mais baixas e edifícios mais altos que os cenários deste estudo. Os autores observaram que a média PET (das 2:00h às 19:00h) nos pontos analisados variaram entre  $-7.9^{\circ}\text{C}$  e  $-16.3^{\circ}\text{C}$  (para densidade de 0.44);  $-9.0^{\circ}\text{C}$  (para densidade de 0.26) e  $-13.4^{\circ}\text{C}$  e  $-13.2^{\circ}\text{C}$  e  $-15.4^{\circ}\text{C}$  (para densidade de 0.48). Em Campinas - SP (clima Cfa), Muniz-Gaal et al. (2018) observou que o cânion com menor proporção H/W (0.4), semelhante ao cenário prognóstico A e B desta pesquisa, apresentou apenas 10% a 11% (variando entres as orientações solares) do período de 72 horas simuladas com sensação térmica de conforto.

### 4.3 Recomendações de diretrizes urbanísticas

Indica-se a escala de até três pavimentos para as edificações no recorte urbano estudado na cidade de Bagé - RS, considerando o prognóstico de densidade construída na área e visando o conforto térmico dos espaços urbanos. Indica-se que as edificações mais elevadas se situem no eixo Norte-Sul, ou seja nas faces das quadras Leste e Oeste. Edifícios com três pavimentos nas faces de quadra Leste e Oeste projetam sombreamentos maiores sobre as calçadas no verão, sem expressivos efeitos adversos ao conforto térmico no inverno. Ainda se recomenda que as faces das quadras Sul tenham menor taxa de ocupação (maior permeabilidade), permitindo a incidência solar sobre a calçada Sul no inverno.

## 5. Considerações finais

Este estudo analisou os efeitos do aumento do adensamento construtivo sobre o conforto térmico de pedestres em espaços abertos na cidade de Bagé, cidade de médio porte no Sul do Brasil. Para isto, foi estabelecido um prognóstico de crescimento para 2060, considerando mantido o ritmo de crescimento da década (2011-2021). Dois patamares de mudanças climáticas foram considerados: um de mitigação intermediária de emissão de gases pelo quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) e outro, considerado de aumento de emissão. Até o momento, estudos semelhantes a este, que investigam microclimas urbanos ao nível do pedestre em cenários com prognóstico de densidade construída junto a cenários de mudanças climáticas globais para cidades de médio porte no Sul do Brasil, não foram encontrados na literatura.

O objetivo principal desta pesquisa foi alcançado, observando que o aumento do adensamento construtivo, por novos edifícios de três pavimentos, junto às projeções de mudanças climáticas, deve elevar o desconforto térmico por calor no verão e favorecer o conforto no inverno. Foi possível observar o aumento do sombreamento projetado pelas edificações inseridas nos cenários de prognóstico, embora o efeito sobre os resultados das simulações tenha sido modesto. Possivelmente, as temperaturas do ar superestimadas, mascararam o efeito do aumento do sombreamento. Referente aos efeitos das projeções de mudanças climáticas, os resultados apontaram para o aumento das TRM e PET ao longo das 24 horas estudadas no verão e no inverno.

Indica-se que os resultados deste trabalho sejam lidos como uma tendência de comportamento, visto que as projeções de temperatura do ar provavelmente tenham sido superestimadas. Ainda assim, os resultados apontam para a necessidade de estudos que investiguem o aumento do adensamento construtivo somado aos efeitos das projeções de mudanças climáticas globais sobre os microclimas de cidades de médio porte, tendo em vista não só o conforto térmico, mas também a saúde humana.

No verão, o aumento da altura dos edifícios (para três pavimentos) pouco influenciou no conforto térmico nas calçadas e no interior da quadra. Enquanto que o aumento das temperaturas do ar, conforme projeções de mudanças climáticas em

escala global, elevou o desconforto térmico por calor do cenário base para os cenários de prognóstico em horários mais quentes do dia. Para o período de inverno, os cenários de prognósticos demonstraram que o aumento da altura das edificações para três pavimentos, combinado ao aumento da temperatura do ar, tem efeitos modestos. Não foi observado aumento do desconforto térmico no inverno para as situações analisadas (às 8:00h e às 14:00h na calçada norte e às 13:00h no interior da quadra), conforme o índice PET. Ao inverso, observou-se que no inverno os cenários base e prognóstico com patamar intermediário de emissão de gases, no horário mais quente do dia (às 13:00h), encontram-se em desconforto, enquanto que o cenário prognóstico com elevada emissão de gases, resultou em neutralidade térmica, devido ao aumento da temperatura do ar.

Os cenários base e prognósticos apresentaram diferenças de Temperatura Radiante Média (TRM) modestas por este estudo focar em cenários mais próximos à realidade de uma cidade de médio porte. Este estudo difere-se da maioria das investigações de conforto térmico de espaços abertos que investigam cenários mais extremos, explorando os limites construtivos dos Planos Diretores.

Os cenários com variações de morfologias urbanas (cenários hipotéticos) auxiliaram na compreensão do clima de Bagé - RS. As edificações extensas, implantadas no eixo Norte - Sul e adjacentes às calçadas favorecem o conforto térmico nas calçadas Leste e Oeste, ao nível do pedestre, no verão. Inversamente, no inverno, o cenário com edificações no eixo Leste - Oeste, adjacentes às calçadas e baixa altura (dois pavimentos) apresentaram TRM mais elevadas nas calçadas Norte, Leste e Oeste. Para a calçada Sul no inverno, a menor taxa de ocupação da quadra foi fator relevante para atingir as TRM mais elevadas.

Encontrou-se três limitações no desenvolvimento deste estudo: projeções da temperatura do ar para 2065 bem elevadas (provavelmente, superestimadas); erro nos dados climáticos de saída, utilizando a opção *full forcing* (possivelmente relacionado aos dados do arquivo EPW inserido, optando-se, então, pela opção *simple forcing*); e o tempo necessário para simulação de cenários com nove quadras completas (sendo resolvida com recorte da área).

Para os próximos trabalhos, indica-se a revisão da porcentagem de aumento da temperatura do ar (de 50% e 95%, utilizados nesse trabalho) para as projeções climáticas. Apesar das limitações, o método utilizado permitiu alcançar os objetivos deste estudo. O método de extração de resultados por área de *grids* de cada calçada

e do interior da quadra mostrou-se eficiente, principalmente nas calçadas, permitindo visualizar as diferenças entre as distintas orientações solares.

No interior da quadra esse método permitiu visualizar, de modo geral, os microclimas de cada cenário (que pouco alteraram). Por outro lado, o método limita uma análise mais específica, pois pelo estudo de sombreamento verifica-se que alguns cenários hipotéticos possuem áreas sombreadas (ainda que pequenas) que podem favorecer a permanência de pessoas em espaços abertos no verão, enquanto outros cenários encontram-se totalmente ensolarados. Essas diferenças não foram possíveis de visualizar nos resultados das simulações devido ao interior das quadras terem maior proporção de área ensolaradas, em relação às sombreadas, em todos cenários.

Em trabalhos futuros podem ser estudados outros cenários, baseado em morfologias urbanas existentes, com menores taxas de ocupação (o que favorece o conforto no inverno no clima Cfa, como de Bagé) e prognósticos com novas edificações mais altas (como quatro ou cinco pavimentos). Estudos futuros podem ainda cruzar os resultados da forma e posição dos prédios à inserção de arborização caducifolia (sombreamento apenas no verão). Ainda, indica-se que os resultados deste estudo sejam utilizados para simulações no interior de edificações, investigando os efeitos das alterações nos microclimas urbanos sobre os ambientes internos.

## Referências

- ABDOLLAHZADEH, N.; BILORIA, N. Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. **Frontiers of Architectural Research**, v. 10, n. 2, p. 394-409, 2021.
- ACERO, J. A. et al. Modelling the influence of high-rise urban geometry on outdoor thermal comfort in Singapore. **Urban Climate**, v. 36, p. 100775, 2021.
- AGUIAR L. F. M. C. et al. Caracterização de Cânions Urbanos e seus Efeitos Climáticos em Área com Intenso Processo de Verticalização na Cidade de Fortaleza, Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.10, n.04, p.1046-1058, 2017.
- AKSAMIJA, A. **Research Methods for the Architectural Profession**. Routledge, 2021.
- ALEXANDER, Christopher; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M. **A Pattern Language: Towns, buildings, construction**. Oxford university press, 1977.
- ANDRADE, T.; LODDER, C. **Sistema urbano e cidades médias no Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 1979.
- ANDRADE, T. C. et al. Medição do conforto térmico em áreas públicas urbanas de Salvador-BA e calibração do índice de conforto pet usando a técnica árvore de decisão. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 278-296, 2016.
- AQUINO, M. M.; SOARES, P. F.; BUENO-BARTOLOMEI, C. L. Determinación de los intervalos de confort y estrés térmico para espacios abiertos en la ciudad de Maringá (PR), Brasil, utilizando el índice PET. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 51, 2019.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, ATLANTA **Thermal environmental conditions for human occupancy**, 2004.
- ASSIS, E. S. Bases teóricas para a Aplicação da climatologia ao planejamento urbano. Encontro Nacional de Conforto térmico no Ambiente Construído. **Anais**, Salvador p.134-139, 1997.
- AYYAD, Y.; SHARPLES, S. The effect of street grid form and orientation on urban wind flows and pedestrian thermal comfort. **35th PLEA Conference on Passive and Low Energy Architecture**, v.1, p.671-676. 2020.
- BARBOSA, G. S.; ROSSI, A. M. G.; DRASH, P. R. C. Análise de Projeto Urbano a partir de parâmetros urbanos sustentáveis: alteração morfológica de Copacabana (1930 - 1950 - 2010). **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, V.6, n. 3, p. 275-287, set./dez. 2014.
- BAMM, Mathew et al. WeatherShift Water Tools: Risk-Based Resiliency Planning for Drainage Infrastructure Design and Rainfall Harvesting. In: **World Environmental and Water Resources Congress**, p. 642-651, 2017.

BELCHER, Stephen E.; HACKER, Jacob N.; POWELL, Dianne S. Constructing design weather data for future climates. **Building services engineering research and technology**, v. 26, n. 1, p. 49-61, 2005.

BERARDI, U.; JAFARPUR, P. Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 121, p. 109681, 2020.

BERARDI, Umberto; WANG, Yupeng. The effect of a denser city over the urban microclimate: The case of Toronto. **Sustainability**, v. 8, n. 8, p. 822, 2016.

BENCKE, Glayson Ariel; CHOMENKO, Luiza; SANT'ANNA, Danilo Menezes. O que é o Pampa. **Nosso Pampa desconhecido**. Porto Alegre: Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul, p. 61-75, 2016.

BRANDÃO, L. K. V. **Verticalização e ambiente térmico urbano análise de parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática em Arapiraca, Alagoas**. 2020. 149f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

BRANDÃO, L. K. de V., & Barbosa, R. V. R. (2023). Relação entre morfologia urbana e microclima a partir de cenários parametrizados em cidade de clima tropical de savana. **Diversitas Journal**, v.8, n.1.

BRUSE, D.; BRUSE, M. Decoding Urban Nature. **Journal of ENVI\_MET GmbH**, Alemanha, 2017.

CARVALHO J. P. **A tipologia dos edifícios de apartamentos e sua relação com o tecido urbano da cidade - um estudo de suas transformações nos últimos 40 anos**. 2008. 224f. Dissertação (Mestrado em Planejamento urbano e regional) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASTRO, Luiz Guilherme Rivera de. Densidades, formas urbanas e urbanidades. Relações de natureza complexa. **Arquitextos**, v. 19, n. 226.02, 2019.

CAVICCHIOLI, Andrea et al. Iniciativas e ações públicas para mitigação da ilha de calor urbana em cidades médias: o caso de Jacareí-SP. **Espaço e Economia. Revista brasileira de geografia econômica**, n. 21, 2021.

CHAPMAN, S. et al. The impact of climate change and urban growth on urban climate and heat stress in a subtropical city. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 6, p. 3013-3030, 2019.

CHEN, Xin et al. Investigation of outdoor thermal sensation and comfort evaluation methods in severe cold area. **Science of the Total Environment**, v. 749, p. 141520, 2020.

CHENG, V. Understanding Density and High Density. In: **Designing high-density cities: for social and environmental sustainability**. Routledge, 2009.

CORREA, R. L. **Espaço urbano**. São Paulo: Editora Ática, 1989.

DA GUARDA, E. L. A. et al. The influence of climate change on renewable energy systems designed to achieve zero energy buildings in the present: A case study in the Brazilian Savannah. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101843, 2020.

DE VECCHI, R.; LAMBERTS, R.; CANDIDO, C. M. The role of clothing in thermal comfort: how people dress in a temperate and humid climate in Brazil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 69-81, jan./mar. 2017.

DWIPUTRA, I. D.; MT, Ir W. K.; WINARSO, H. Impact of Urban Block Typology on Microclimate Performance in a Hot-Humid High-Density City. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, p.012067. 2021.

ERELL, Evyatar; PEARLMUTTER, David; WILLIAMSON, Terence. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. Routledge, 2011.

FARR, Douglas. **Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza**. Bookman editora, 2013.

Fanger P. O. **Thermal comfort**. New York: McGraw-Hill, 1972.

FIRLAĞ, Szymon; MISZCZUK, Artur; WITKOWSKI, Bartosz. Analysis of climate change and its potential influence on energy performance of building and indoor temperatures, part 1: Climate change scenarios. **Archives of Civil Engineering**, v. 67, n. 3, 2021.

FRANCIS, Mark. Urban open spaces. **Advances in environment, behavior, and design**, v. 1, n. 7, 1987.

GALAL, O. M.; SAILOR, D. J.; MAHMOUD, H. The impact of urban form on outdoor thermal comfort in hot arid environments during daylight hours, case study: New Aswan. **Building and Environment**, v. 184, p.107222, 2020.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. Tradução: Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. Título original: Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas.

GEHL, J. **Cidade Para Pessoas**. Tradução: Anita Di Marco. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 2014. Título original: Cities for people.

GIRALT, R. P. Conforto térmico em espaços públicos abertos na cidade de Torres-RS. 2006. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano Regional) - Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUSSON, C. dos S.; MADEIRA, Â. H. Y.; DUARTE, D.. São Paulo: a dense city? In: SASBE 2012 4th CIB International Conference on Smart and Sustainable Built Environments, 2012, São Paulo. **Proceedings of 4th CIB International Conference on Smart and Sustainable Built Environments**. Emerging Economies. Campinas: FUNCAMP, 2012. v. 1. p. 1-8.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. The effect of density on urban microclimate: Simulation of different building typologies for the subtropical Sao Paulo, Brazil. **Cities, buildings, people: towards regenerative environments**, 2016.

GUSSON, C. 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. 268 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

GREGOLETTO, D. **Edifícios altos na cidade média de Caxias do Sul: efeitos na estética urbana, nos usos de espaços abertos e na satisfação residencial**. 2019. 553f. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GROAT, L. N.; WANG, D. **Architectural research methods**. John Wiley & Sons, 2013.

GNECCO et al. Overheating risk in naturally ventilated and conditioned elementary schools from the perspective of climate change. In: **Proceedings of PLEA 2022, 36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**. Santiago, Chile: v. 2, p.604-609. 2022.

HARVEY, David. **A justiça social e a cidade**. Tradução de Armando Corrêa da Silva. São Paulo: Hucitec, 1980.

HEPSHEBA, J. J.; PERERA, N. G. R.; EMMANUEL, R. Implications of Planning and Building Regulation Induced Canyon Geometry. International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands. **Instituto Internacional de Tecnologia da informação**, Índia, 2019.

HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, v.43, n.2, p.71–75. 1999.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades Panorama**. IBGE, 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Acesso em: 06 de julho de 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Regiões de influência das cidades: 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. 192 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil : compatível com a escala 1:250 000**. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro : IBGE, 2019. 168 p.

ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. Geneva: **International Organization For Standardization**, 1998.

ISO 8996. Ergonomics of the thermal environments: determination of thermal metabolic rate. Genebra: **International Organization For Standardization**, 2004.

INDA P. A. A. **O planejamento urbano e seu impacto na tipologia arquitetônica, no bairro Cidade Baixa, em Porto Alegre**. 2003. 201f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – **INMET**. Normais Climatológicas (1991/2020). Brasília - DF, 2022.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report in **Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2014. 151p.

JENDRITZKY, G. et al. Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. **Final Report COST Action**, v. 730, p. 1-26, 2009.

KIM, S. W.; BROWN, R. D. Pedestrians' behavior based on outdoor thermal comfort and micro-scale thermal environments, Austin, TX. **Science of The Total Environment**, v.808, p.152143-152157, 2022.

KOTTEK, M. et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, n.3, p.259-263, 2006.

KREBS, L. F. **Extensive green roofs in Porto Alegre, Brazil. Effect on indoor thermal comfort in residential buildings**. 2018. 240f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil e Lund University, Porto Alegre (Brasil) e Suécia, 2018.

KRÜGER, E. L. et al. Identifying solar access effects on visitors' behavior in outdoor resting areas in a subtropical location: a case study in Japan Square in Curitiba, Brazil. **International Journal of biometeorology**, v. 63, n. 3, p. 301-313, 2019.

KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A.; CRISTELI, P. S. SOUZA, H. A. de. Calibração do índice de conforto para espaços externos Physiological Equivalent Temperature (PET) para Curitiba. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 135-148, jul./set. 2018.

KRÜGER, E. L. et al. Estudo de conforto em espaços abertos em região de clima temperado: o caso de Glasgow, Reino Unido. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 7-25, 2012.

LABAKI, L. C.I et al. Conforto térmico em espaços públicos de passagem: estudos em ruas de pedestres no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 167-183, 2012.

LABORATÓRIO, DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES. Programa Analysis SOL-AR (versão 6.2). **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>. Acesso em: fev, 2023.

LAMAS, J. M. R. G. **Morfologia Urbana e Desenho da Cidade**. 5ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian - Br, 2010. 590.

LAM, Cho Kwong Charlie et al. A review on the significance and perspective of the numerical simulations of outdoor thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 71, p. 102971, 2021.

LEAL, L. R. **Análise do adensamento urbano no comportamento microclimático de Vitória (ES): aplicações no Modelo ENVI-met.** 218. 190f. Tese (Dissertação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

LIMA, D.C.R. **Forma e arborização em cânions urbanos: tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR.** 2018. 251f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

LIMA, D.C.R.; LIMA, P.R.; CARAM, R.M. Influência da geometria e arborização no estresse térmico de pedestres em cenários de cânions urbanos de Umuarama – PR. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO.** Foz do Iguaçu, n.17, p.885-893, 2018.

LUCCHESI, Julia R. et al. Application of selected indices on outdoor thermal comfort assessment in Midwest Brazil. **International Journal of Energy and Environment**, v. 7, n. 4, p. 291, 2016.

MARTINS, W. T. O. S.; ROSSETI, K. A. C. Impactos da configuração da habitação na ocupação dos lotes, um estudo em área de alto adensamento construtivo na cidade de Cuiabá/MT. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais.** Porto Alegre: ANTAC, n. 15 e 11, p.693-702, 2019.

MATZARAKIS, Andreas; MAYER, Helmut. Another kind of environmental stress: thermal stress. **WHO newsletter.** Alemanha, v. 18, n. January 1996, p. 7-10, 1996.

MATZARAKIS, A., RUTZ, F., MAYER, H. Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology** n.51, p.323-334, 2007.

MEDEIROS, J. M. M.; FILHO, L.G. A. Conforto ambiental em uma nova capital modernista: a verticalização na margem do Lago de Palmas. In: XVI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais.** Palmas, TO, v.16, p.253-262, 2021.

MOHAMMED, M. J.; RADHA, C. H. SUSTAINABLE STRATEGIES FOR ENHANCING OUTDOOR THERMAL COMFORT. **Journal of East China University of Science and Technology**, v. 65, n. 4, p. 367-377, 2022.

MONTEIRO, F. **Análise da temperatura intraurbana: simulações computacionais para melhorias no meio urbano de Macapá - Amapá,** região equatorial do Brasil. 2020. 220f. Tese (Doutorado em Urbanismo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos.** 2008. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

MORSCH M. R. S. **Estratégias de mitigação de ilhas de calor: Uma metodologia para cidades médias consolidadas.** 2020. 192f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MORSCH M. R. S.; SILVOSO M. M. Avaliação microclimática de uma cidade de médio porte. In: XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais**. Balneário Camboriú, SC, V.14, p.214-221, 2017

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 177-196, abr./jun. 2018.

NAKANO, A. K. A produção da “cidade oca” nos padrões recentes de verticalização e adensamento construtivo do município de São Paulo. **Oculum Ensaios**, v. 15, n.1, p.33-50, 2018.

NG, Edward. Designing for Urban Ventilation. In: **Designing high-density cities: for social and environmental sustainability**. Routledge, 2009.

NICOL, Fergus et al. Comfort in outdoor spaces in Manchester and Lewes, UK. In: **Proceedings of conference: Comfort and Energy Use in Buildings-Getting them Right, Cumberland Lodge**, Windsor, UK. 2006.

NICOL, Fergus; HUMPHREYS, Michael; ROAF, Susan. **Adaptive thermal comfort: principles and practice**. Routledge, 2012.

NIKOLOPOULOU, Marialena; STEEMERS, Koen. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. **Energy and buildings**, v. 35, n. 1, p. 95-101, 2003.

NOGUEIRA, A. M. P. et al. Impacto da verticalização no microclima urbano: o caso do bairro Guaxuma, em Maceió-AL, Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas**, SP, v. 9, n. 2, p. 72-85, 2018.

NOVAES, G. B. A. **Impactos da morfologia da cidade nas condições microclimáticas de áreas urbanas consolidadas de São Paulo em dias quentes**. 2020. 332f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

NUNEZ M.; OKE, T. R. The Energy Balance of an Urban Canyon. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 16, n 1, p. 11-19, 1977.

OKE, T. R. et al. **Urban climates**. Cambridge University Press, 2017.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2ª ed. Londres: Routledge, 2002. 464 p.

OKE, T. R. Instruments and observing methods: Report No. 81: initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. **World Meteorological Organization, WMO/TD (1250)**, v. 51, 2006.

PACIFI, M. **Urban morphology and climate: field assessment and numerical modeling of interactions**. 2019. 225f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

PILLAR, V.P.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S. & JACQUES, A.V.A. **Campos Sulinos, conservação e uso sustentável da biodiversidade**. MMA: Brasília/DF, 2009.

PEREIRA, R. H. M. e FURTADO, B. A. **Dinâmica urbano-regional: rede urbana e suas interfaces**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011.

RIBEIRO, K. F. A. et al. Análise dos índices de conforto térmico PMV e PET em diferentes tipos de coberturas em ambiente aberto na cidade de Cuiabá-MT. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.

RIBEIRO, K. F. A. et al. Calibration of the Physiological Equivalent Temperature (PET) index range for outside spaces in a tropical climate city. **Urban Climate**, v. 44, p. 101196, 2022.

ROMERO, M. A. B. et al. **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. 1ª ed. Brasília: ETB, 2019. 151p.

ROSA, L. A. **Calibração do índice de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) para as áreas abertas de Pelotas - RS**. 2021. 204f. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

ROSA, L. A. et al. Definição de Zona de Conforto Térmico para áreas externas utilizando o índice pet para Pelotas - RS. In: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Porto Alegre: Antac, v.1, p.3110-3115. 2019.

ROSSI, Francine Aidie; KRÜGER, Eduardo; DRACH, Patricia. Calibração do índice PET para Curitiba e Rio de Janeiro. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, v. 14, 2017.

SACCARO JUNIOR, N. et al. **Projeto Competitividade e Governança das Cidades Médias do Brasil: referencial conceitual e metodológico: Relatório 1**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2022.

SANTOS, J. S. A.; SAUER, A. S. A INFLUÊNCIA DA VERTICALIZAÇÃO NA SENSAÇÃO TÉRMICA URBANA: ESTUDO DE CASO EM VILA VELHA/ES. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 4, p. 29-42, 2020.

SANTOS, M. M.; KREBS, L. F. e RIBAK, R. H. Urban verticalization Predicting the effect of a Master Plan on the microclimate in Bagé, Brazil. In: **Proceedings of PLEA 2022, 36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**. Pontifícia Universidade Católica do Chile: Santiago - Chile, v.1, p. 651-655. 2022.

SANTOS, M. M.; KREBS, L. F.; RIBAK, R. H.; POLIDORI, M. C. Efeitos do Adensamento Construtivo Sobre Microclimas Urbanos: estudo de caso em Bagé/RS. *Revista de Morfologia Urbana*, v. 11, n. 1, 2023. DOI: 10.47235/rmu.v11i1.289. Disponível em: <http://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/289>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SCHMITZ, L. K. **Reestruturação urbana e conforto térmico em Curitiba/PR: diagnóstico, modelagem e cenários**. 2014. 298f. (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, C. F. et al. **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**. Brasília: Universidade de Brasília, 2020. 284p.

SILVA, C. F. **O conforto térmico de cavidades urbanas: contexto climático do Distrito Federal**. 2013. 175f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília.

SILVA, G. J. A.; DONEGAN, L; NOME, Carlos Alejandro. Ferramentas de Projeto para análise da qualidade urbana: Relacionando forma, usos, densidade e configuração espacial na cidade de João Pessoa, Brasil. **Blucher Design Proceedings**, v. 3, n. 12, p. 101-107, 2017.

SPÓSITO, M. E. B. Novas redes urbanas: cidades médias e pequenas no processo de globalização. **Geografia**, v. 35, n. 1, p. 51-62, 2010.

STANDARD, I. ISO 7726 Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities, **ISO Standard**. 1998 (1998) 1–56. 1998.

SUN, C. et al. The impact of street geometry on outdoor thermal comfort within three different urban forms in severe cold region of China. **Building and Environment**, v. 222, p. 109342, 2022.

TORRES, S. C. **Forma e Conforto: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática**. 2017. 395f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

THE URBAN TASK FORCE. **Towards an Urban Renaissance: Final Report of the Urban Task Force**. Routledge, 2003.

YANG, W.; WONG, N. H; LIN, Y. Thermal Comfort in High-rise Urban Environments in Singapore. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 2125-2131. 2015.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 2a Edição. **Porto Alegre**, 2001.

ZARE, S. et al. Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. **Weather and climate extremes**, v. 19, p. 49-57, 2018.

ZHANG, M. et al. Investigation of typical residential block typologies and their impact on pedestrian-level microclimate in summers in Nanjing, China. **Frontiers of Architectural Research**, v. 11, n. 2, p. 278-296, 2022.

## **Apêndices**

## **Apêndice 1: Publicações oriundas da Dissertação**

Efeitos do Adensamento Construtivo Sobre Microclimas Urbanos: estudo de caso em Bagé/RS. Revista de Morfologia Urbana. Disponível em: <<http://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/289>>.

INFLUÊNCIA DO ADENSAMENTO CONSTRUTIVO SOBRE OS MICROCLIMAS Estudos brasileiros e singularidades do Sul. Revista Píxo. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/pixo/article/view/22317>>.

Urban verticalization Predicting the effect of a Master Plan on microclimate in Bagé, Brazil. In: Proceedings of PLEA 2022, 36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Disponível em: <<https://plea2022.org/wp-content/uploads/2023/03/PROCEEDING-ONLINE-FINAL-MARZO.pdf>>.