

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**IMPACTO DA MORFOLOGIA URBANA NAS CONDIÇÕES
TÉRMICAS INTERNAS E EXTERNAS DE HABITAÇÕES DE
INTERESSE SOCIAL: ACOPLAMENTO ENTRE ENVI-MET E
ENERGYPLUS**

Bruna de Souza Apolinário

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Érico Masiero

São Carlos

2025

Apolinário, Bruna de Souza

Impacto da morfologia urbana nas condições térmicas internas e externas de habitações de interesse social: acoplamento entre ENVI-met e EnergyPlus / Bruna de Souza Apolinário -- 2025.
116f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Érico Masiero
Banca Examinadora: Eduardo Leite Krüger, Karin Maria Soares Chvatal
Bibliografia

1. Morfologia urbana. 2. Conforto térmico. 3. Acoplamento. I. Apolinário, Bruna de Souza. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

O que é a pesquisa, se não um encontro às
cegas com o conhecimento?

Will Harvey

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus, fonte de força, sabedoria e inspiração em todos os momentos;
- Aos meus pais, Irene e Sérgio, pelo apoio e amor incondicional;
- Às minhas irmãs, Anne e Camila, e ao meu cunhado, Luis, pelo amor e apoio emocional;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Érico Masiero, pelo direcionamento, suporte, confiança e gentileza durante todo o processo;
- Ao Dr. Eduardo Leite Krüger e a Dra. Karin Maria Soares Chvatal, pelo suporte técnico e pelas valiosas revisões desta pesquisa;
- Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Kowalski, por ter me introduzido à área de conforto térmico e às simulações computacionais;
- Ao Tasso e Ian pela ajuda na instalação dos equipamentos para coleta dos dados microclimáticos;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

RESUMO

Diante do aquecimento global, do aumento da ocorrência de ondas de calor e do efeito das ilhas de calor urbanas, o estudo de soluções para mitigar o estresse térmico humano e a demanda de energia para climatização se torna essencial. Nesse contexto, um planejamento urbano que considere índices de morfologia alinhados ao clima contribui para a melhoria das condições térmicas externas e internas das habitações. Com base nessas questões, o presente estudo tem como objetivo analisar as condições térmicas externas e internas de unidades de habitação de interesse social em função da verticalidade e das tipologias edificadas, durante e fora de uma onda de calor. Para isso, foram elaborados cenários com três tipologias habitacionais: casas térreas, torres em formato H e edifícios pátios. As habitações multifamiliares foram analisadas para duas alturas de 14 e 29 metros. O método se baseou na coleta de dados microclimáticos e em simulações computacionais. Os cenários foram simulados no *software* ENVI-met, utilizando os dados coletados como entrada. Os dados microclimáticos dessas simulações foram posteriormente acoplados ao EnergyPlus, utilizando o método de encadeamento e o *software* BCVTB. Os resultados evidenciaram os altos níveis de estresse térmico a que moradores de habitações de interesse social são expostos durante ondas de calor os quais podem causar câibras de calor, esgotamento e insolação, afetando negativamente a saúde e bem-estar. Além disso, foi identificado que os cenários com edifícios pátios tiveram os melhores resultados externos, sendo os únicos a proporcionarem áreas sem extremo estresse térmico. No entanto, internamente, geraram os maiores níveis de estresse térmico e demandas energéticas para resfriamento, com um aumento de 29,22%. Já as torres em formato H, apesar de apresentarem condições térmicas externas inferiores às dos edifícios pátios, apresentaram os melhores resultados internos. Esses cenários foram os únicos sem níveis de estresse térmico interno classificados como “em perigo” e reduziram a demanda energética de resfriamento em 20,97% em relação às casas térreas. Quanto à altura das edificações, a redução se mostrou vantajosa durante a onda de calor e desfavorável fora desse período. Esses resultados evidenciam o impacto das tipologias habitacionais e da altura das edificações nos níveis de estresse térmico e na demanda energética para climatização. No entanto, indicam que, enquanto uma configuração urbana pode melhorar as condições térmicas externas, internamente pode agravá-las. Dessa forma, é essencial aprofundar os estudos sobre o impacto da morfologia urbana no ambiente térmico interno das habitações, a fim de embasar um planejamento urbano capaz de minimizar tanto o consumo energético quanto o estresse térmico externo e interno.

Palavras-chaves: Morfologia Urbana. Planejamento Urbano. Resiliência Climática. Edifícios Pátios. Acoplamento.

ABSTRACT

Amid global warming, the increasing occurrence of heat waves, and the urban heat island effect, exploring solutions to mitigate human thermal stress and energy demand for cooling becomes essential. In this context, urban planning that considers morphology indices aligned with the climate contributes to improving both external and internal thermal conditions of housing. Based on these issues, this study aims to analyze the external and internal thermal conditions of social housing units in relation to verticality and built typologies, both during and outside a heat wave. To achieve this, scenarios were developed with three housing typologies: single-story houses, H-shaped towers, and courtyard buildings. Multifamily housing was analyzed at two heights: 14 and 29 meters. The methodology was based on the collection of microclimatic data and computational simulations. The scenarios were simulated using the ENVI-met *software*, with the collected data used as input. The microclimatic data from these simulations were subsequently coupled to EnergyPlus using the chaining method and the BCVTB *software*. The results highlighted the high levels of thermal stress to which social housing residents are exposed during heat waves, which can cause heat cramps, exhaustion, and heatstroke, negatively affecting health and well-being. Additionally, it was found that scenarios with courtyard buildings performed best externally, being the only ones to provide areas without extreme thermal stress. However, internally, they generated the highest levels of thermal stress and energy demand for cooling, with a 29.22% increase. On the other hand, H-shaped towers, despite presenting less favorable external thermal conditions compared to courtyard buildings, achieved the best internal results. These scenarios were the only ones without internal thermal stress levels classified as "at risk" and reduced cooling energy demand by 20.97% compared to single-story houses. Regarding building height, the reduction proved advantageous during the heat wave but unfavorable outside this period. These results highlight the impact of housing typologies and building height on thermal stress levels and energy demand for cooling. However, they indicate that while an urban configuration may improve external thermal conditions, it may worsen internal conditions. Therefore, it is essential to deepen studies on the impact of urban morphology on the indoor thermal environment of housing to support urban planning that minimizes both energy consumption and external and internal thermal stress.

Keywords: Urban Morphology. Urban Planning. Climate Resilience. Courtyard Buildings. Coupling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Índice de espaço bruto, índice de área de piso, relação volume área, relação fachada terreno.	5
Figura 2: Proporção de aspecto, verticalidade, relação h/w e fator de visão do céu.	6
Figura 3: Comportamento geral de uma ilha de calor urbana.....	7
Figura 4: Zonas Climáticas Locais.	8
Figura 5: Fluxograma do processo do estudo.	18
Figura 6: Local de estudo, correspondente a um conjunto habitacional unifamiliar de interesse social.	19
Figura 7: Conjunto habitacional de interesse social.	20
Figura 8: Médias mensais de temperatura e precipitação.	20
Figura 9: Pontos de coleta dos dados microclimáticos.....	23
Figura 10: Dados climáticos coletados em um ambiente controlado.	23
Figura 11: Diferenças entre os dados coletados, com base no sensor do ponto A.	24
Figura 12: Ponto B de coleta de dados microclimáticos.	24
Figura 13: Processos de modelagem dos cenários urbanos.	25
Figura 14: Delimitação da área de estudo.....	26
Figura 15: Topografia da área de estudo com as edificações.	27
Figura 16: Ruas e calçadas e superfícies (direita) e edificações (esquerda).	27
Figura 17: Tipologias de edificações analisadas nos cenários.	27
Figura 18: Índices morfológicos. Índice de espaço bruto (IEB); Índice de área de piso (IAP); Relação volume área (RVA); Proporção de aspecto (PA); relação H/W (H/W).	28
Figura 19: Procedimentos de validação dos modelos ENVI-met.	29
Figura 20: Processo de modelagem e simulação computacional.	31
Figura 21: (Esquerda) Planta baixa da habitação C4m. (Direita) Volumetria da modelagem.	32
Figura 22: (à direita) Planta baixa do andar tipo T; (à esquerda) Planta baixa da unidade...	32
Figura 23: Modelagens das edificações dos cenários de torres de apartamentos.....	33
Figura 24: (Esquerda) Planta baixa da habitação C14m. (Direita) Volumetria da modelagem.	33
Figura 25: Modelagens das edificações dos cenários de edificações pátio.	34
Figura 26: Propriedades térmicas das paredes e cobertura.	34
Figura 27: Horários com abertura das janelas no dormitório 1 e sala.....	36
Figura 28: Processo de acoplamento do ENVI-met ao EnergyPlus.....	39
Figura 29: Receptor de coleta de dados para as simulações internas.	41
Figura 30: Parte do arquivo .cfg do cenário C4_H.	42

Figura 31: Modelo de acoplamento desenvolvido no BCVTB.....	47
Figura 32: Temperaturas externas do ar.	53
Figura 33: Umidades relativas do ar.	53
Figura 34: Temperatura e precipitação no ponto B.	54
Figura 35: Temperaturas e umidades dos dias mais e menos quentes.....	54
Figura 36: Regressão linear da temperatura simulada e medida.	56
Figura 37: Regressão linear da umidade medida e simulada.....	56
Figura 38: Temperatura do ar nos cenários C4_H e C4_N.	57
Figura 39: PET nos cenários C4_H e C4_N para um homem adulto.	58
Figura 40: Temperatura do ar nos cenários T29_H e T14_H.....	60
Figura 41: Temperatura do ar nos cenários T29_N e T14_N.	61
Figura 42: PET nos cenários T29_H e T14_H para um homem adulto.	62
Figura 43: PET nos cenários T29_N e T14_N para um homem adulto.	64
Figura 44: Temperatura do ar nos cenários P29_H e P14_H.....	65
Figura 45: Temperatura do ar nos cenários P29_N e P14_N.....	66
Figura 46: PET nos cenários P29_H e P14_H para um homem adulto.	68
Figura 47: PET nos cenários P29_N e P14_N para um homem adulto.....	69
Figura 48: Diferença de temperatura entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), durante a onda de calor.	70
Figura 49: Diferença de temperatura entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), fora da onda de calor.	71
Figura 50: Diferenças de temperatura na calçada, durante a onda de calor (à esquerda) e fora da onda de calor (à direita).	72
Figura 51: Diferenças de PET entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), durante a onda de calor.	73
Figura 52: Diferenças de PET entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), fora da onda de calor.	73
Figura 53: Estresse térmico entre as edificações e nos pátios durante a onda de calor.....	74
Figura 54: Diferença de PET na calçada durante a onda de calor (à esquerda) e fora da onda de calor (à direita).	75
Figura 55: Estresse térmico na calçada durante a onda de calor.....	76
Figura 56: Resumo das condições térmicas externas.....	77
Figura 57: Temperaturas do ar durante a onda de calor (à esquerda) e fora (à direita).	78
Figura 58: Temperaturas operativas, durante a onda de calor.	79
Figura 59: Temperaturas operativas, fora da onda de calor.	80
Figura 60: Porcentagens de horas ocupadas em desconforto térmico, durante a onda de calor.	81

Figura 61: Índice de calor na sala, durante a onda de calor.	81
Figura 62: Índice de calor no dormitório, durante a onda de calor.	82
Figura 63: Índice de calor na sala, fora da onda de calor.	82
Figura 64: Índice de calor no dormitório, fora da onda de calor.	83
Figura 65: Carga térmica dos cenários, durante a onda de calor.	83
Figura 66: Carga térmica dos cenários, fora da onda de calor.	84
Figura 67: Resumo das condições térmicas internas.	85
Figura 68: Resumo dos resultados externos e internos no dia da onda de calor.	87
Figura 69: Resumo dos resultados externos e internos no dia fora da onda de calor.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos materiais utilizados no CR.	26
Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais dos sistemas construtivos.	35
Tabela 3: Cargas internas, ocupação e taxa metabólica dos habitantes.	37
Tabela 4: Parâmetros do solo.	38
Tabela 5: Temperaturas máximas diárias do dia 15/09/2023 a 03/10/2023 (continua).	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Coeficientes urbanísticos de São Carlos.	21
Quadro 2: Recuos em São Carlos.	22
Quadro 3: Distâncias mínimas das aberturas em relação às divisas.....	22
Quadro 4: Parâmetros construtivos exigidos e utilizados na área de estudo.....	22
Quadro 5: Especificações técnicas Hobo/ Pro V2 U23-001.....	23
Quadro 6: Variáveis de validação.	29
Quadro 7: Sistema construtivo das habitações.	34
Quadro 8: Padrões de funcionamento dos sistemas de ventilação.	35
Quadro 9: Características dos elementos transparentes.....	37
Quadro 10: Níveis de estresse fisiológico.	50
Quadro 11: Cálculo da $t_{pma(ext)}$ e limites de aceitabilidade de temperatura operativa.	51
Quadro 12: Parâmetros para correção do limite superior de temperatura operativa.	51
Quadro 13: Níveis de Índice de calor.	52
Quadro 14: Processo de validação da simulação computacional para o dia 26 de setembro de 2023 (onda de calor).....	55

LISTA DE SIGLAS

CA	Coeficiente de Aproveitamento
CAB	Coeficiente de Aproveitamento Básico
CAM	Coeficiente de aproveitamento Máximo
CCV	Coeficiente de Cobertura Vegetal
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
CO	Coeficiente de Ocupação
CP	Coeficiente de Área Permeável
FVC	Fator de Visão do Céu
HI	Índice de Calor
HIS	Habitações de Interesse Social
H/W	Relação H/W
IAP	Índice de Área de Piso
ICU	Ilhas de Calor Urbano
IAP	Índice de Área de Piso
IEB	Índice de Espaço Bruto
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MAE	Erro Médio Absoluto
MAPE	Erro Absoluto Percentual
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PAE	Proporção de Aspecto
PET	Temperatura Fisiológica
PMV	Voto Médio Predito
R²	Coeficiente de determinação
RFT	Relação Fachada Terreno
RVA	Relação Volume Área

TBS	Temperatura de Bulbo Seco
To	Temperatura operativa
T_{pma(ext)}	Temperatura Média predominante do ar externo
UTCI	Índice Climático Térmico Universal
V	Verticalidade
ZCL	Zonas Climáticas Locais

LISTA DE UNIDADES

°C	Graus celsius
K	Kelvin
km	Quilometro
m²	Metro quadrado
%	Porcentagem
g/m³	Gramas por metro cúbico

Sumário

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura	3
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Morfologia urbana	4
2.1.1 Índices Morfológicos	5
2.1.2 Ilhas de calor urbanas	7
2.1.3 Zonas Climáticas Locais	8
2.1.4 Impacto da morfologia urbana no microclima.....	9
2.1.5 Planejamento urbano no Brasil	11
2.2 Interação entre o microclima urbano e o ambiente térmico das edificações	11
2.3 Conforto térmico e consumo energético em conjuntos habitacionais de interesse social	13
2.4 Mudanças climáticas e o aumento da frequência e intensidade das ondas de calor	15
2.4.1 Configurações urbanas voltadas à diminuição do efeito das ondas de calor.....	16
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 Definição da área de estudo.....	19
3.2 Caracterização física e climática do local	19
3.2.1 Parâmetros urbanísticos vigentes no Plano Diretor da Cidade de São Carlos, SP	21
3.3 Coleta de dados microclimáticos no local de estudo	22
3.4 Modelagem dos cenários urbanos hipotéticos e real para simulação no <i>software</i> ENVI- met	25
3.4.1 Cenário real (C4)	25
3.4.2 Cenários hipotéticos de ocupação urbana	27
3.5 Simulação e validação dos cenários urbanos no ENVI-met.....	29
3.6 Modelagem e simulação termoenergética das unidades habitacionais.....	31
3.6.1 Modelagem computacional do cenário C4	32
3.6.2 Modelagens computacionais dos cenários de torres de apartamentos (T).....	32
3.6.3 Modelagens computacionais dos cenários de edificações pátios (P)	33
3.6.4 Sistema construtivo	34
3.6.5 Condições de ventilação, padrões de funcionamento e parâmetros de uso.....	35
3.6.6 Contato da edificação com o solo	37
3.7 Acoplamento do ENVI-met ao EnergyPlus	38
3.7.1 Etapa 1: Extração dos dados climáticos	40
3.7.2 Etapa 2: Conversão do arquivo climático.....	42
3.7.3 Etapa 3: Edição do arquivo climático	42

3.7.4 Etapa 4: Mapeamento dos dados do ENVI-met para o acoplamento	42
3.7.5 Etapa 5: Acoplamento por meio do <i>software</i> BCVTB.....	42
3.8 Procedimentos para análise dos resultados nos ambientes externos e internos	48
3.8.1 Caracterização do período de onda de calor	48
3.8.2 Conforto térmico externo	49
3.8.3 Conforto térmico interno adaptativo	50
3.8.4 <i>Índice de Calor (Heat Index)</i>	51
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	52
4.1 Dados microclimáticos.....	53
4.2 Validação dos cenários urbanos no ENVI-met	54
4.3 Condições térmicas do espaço urbano.....	56
4.3.1 Cenário com edificações térreas (C4).....	57
4.3.2 Cenários com torres de apartamentos (T14 e T29).....	59
4.3.3 Cenários com edifícios pátios (P14 e P29)	65
4.3.4 Influência das tipologias e da verticalidade nas condições térmicas externas.....	70
4.3.5 Resumo das condições térmicas externas.....	77
4.4 Condições térmicas das habitações	78
4.4.1 Temperaturas externas do ar.....	78
4.4.2 Temperaturas operativas	79
4.4.3 Conforto térmico adaptativo	80
4.4.4 Índice de calor	81
4.4.5 Demanda energética de climatização das habitações	83
4.4.6 Resumo das condições térmicas internas.....	84
4.4.7 Discussões sobre as condições térmicas internas	86
4.5 Impacto das tipologias habitacionais e verticalidade nas condições térmicas externas e internas.....	86
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1 Limitações	90
5.2 Sugestões de trabalhos futuros	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O estresse térmico por calor, além de reduzir o bem-estar e a produtividade humana, está relacionado ao aumento das taxas de mortalidade por doenças cardiovasculares, respiratórias e cerebrovasculares (Grigorescu *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2023; Macfarlane, 1978; Nitschke *et al.*, 2013). Os efeitos das altas temperaturas no corpo humano reforçam a preocupação com eventos climáticos extremos e intervenções humanas que intensificam o estresse térmico. Nesse contexto, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que o uso insustentável de energia, os padrões de consumo e produção, bem como as mudanças no uso do solo, contribuem para o aquecimento global, o que resulta no aumento da ocorrência de ondas de calor (IPCC, 2023).

Diante desse cenário, torna-se essencial um planejamento urbano alinhado ao clima, tanto para mitigar os efeitos da urbanização no microclima, quanto para reduzir os impactos do estresse térmico causado por ondas de calor e ilhas de calor. Além disso, a construção de edificações considerando fatores climáticos é fundamental para minimizar o estresse térmico.

Com o objetivo de desenvolver cidades resilientes ao clima, diversos estudos analisam o impacto da morfologia urbana no microclima. Entre os aspectos investigados, destacam-se a influência de índices de morfologia urbana nas temperaturas externas do ar e no conforto térmico externo, tais como o Fator de Visão do Céu, a Taxa de Permeabilidade, a Taxa de Ocupação do Solo, a altura das edificações, a densidade e a forma dos edifícios (Chokhachian *et al.*, 2020; Lassandro; Di Turi; Zaccaro, 2019; Li *et al.*, 2023; Ronchi; Salata; Arcidiacono, 2020; Yang *et al.*, 2021). Esses estudos são de grande valia, pois indicam os efeitos de diferentes cenários urbanos, identificando aqueles que reduzem a incidência solar, melhoram a ventilação urbana e são mais adequados para cada tipo de clima.

No que se refere ao conforto térmico interno e no consumo energético do espaço habitado, diversos pesquisadores analisaram soluções para otimizar essas questões. As pesquisas, destacam melhorias na envoltória das edificações, incluindo o aprimoramento de janelas e vidros, uso de diferentes sistemas construtivos, implementação de paredes e telhados verdes, além da orientação das edificações e das aberturas (Dalbem *et al.*, 2019; Gabriel *et al.*, 2024; Oliveira; Alves, 2021; Tubelo *et al.*, 2018a; Valdenebro; Dietrich; Ino, 2019). Os resultados evidenciam o potencial significativo dessas soluções para melhorar as condições térmicas das habitações.

Apesar da relevância dos estudos de soluções para os ambientes externos e para os internos, poucos avaliam o impacto das alterações urbanas nas condições térmicas internas das habitações. Givoni (1998) aponta que, devido às interações entre o ambiente externo e interno, o espaço urbano influencia a temperatura do ar interno das edificações, enquanto essas, por sua vez, alteram o clima externo.

Apesar do reconhecimento da relação entre os ambientes externos e internos, poucos estudos consideram o efeito dos parâmetros urbanos no consumo energético e conforto térmico das edificações (Li *et al.*, 2022; Shareef, 2021; Zheng; Li, 2022a). Esse déficit pode ser atribuído à tendência dos urbanistas de focarem seus estudos nos ambientes externos, enquanto os arquitetos se concentram nos ambientes internos, ambos negligenciando o impacto da morfologia urbana nos ambientes internos (Zheng; Li, 2022a).

Para reduzir essa lacuna, alguns estudos analisam o impacto da morfologia urbana no ambiente térmico interno das edificações, utilizando métodos de acoplamento de simulações microclimáticas a simulações termoenergéticas de edificações. Questões como o sombreamento urbano, a densidade e altura das edificações, o Fator de Visão de Céu (FVC), a Relação de Área Útil e as tipologias habitacionais foram analisadas (M'Saouri El Bat *et al.*, 2023; Natanian *et al.*, 2020; Natanian; Auer, 2020; Shareef, 2021; Zheng; Li, 2022b). Os resultados indicam que a aplicação desses índices alinhados ao clima proporciona redução do consumo energético e aumento do conforto térmico.

No Brasil, e em climas subtropicais de inverno seco e verão quente como o de São Carlos/SP, essa área ainda é pouco explorada. Não há pesquisas que analisem o impacto da morfologia urbana no ambiente térmico interno de edificações.

Dois estudos recentes avaliam o impacto de questões urbanas no desempenho e conforto térmico de HIS em Belém, no Pará. Gonçalves *et al.* (2024) analisaram a variação de pavimentos, a inserção de árvores e as porcentagens de áreas permeáveis no conforto térmico dessas habitações. No entanto, os autores concluíram que essas estratégias não afetaram significativamente o desempenho térmico das habitações. Já Cunha *et al.* (2025), utilizando o mesmo estudo de caso de Gonçalves *et al.* (2024), investigaram o impacto da urbanização no desempenho térmico das habitações. Para isso, editaram o arquivo climático local com os parâmetros urbanos das Zonas Climáticas Locais (ZCL) 3A e 13E. Os resultados demonstraram que o aumento da densidade urbana reduziu o conforto térmico e aumentou a demanda energética para resfriamento.

Embora esses estudos representem um avanço na compreensão do impacto da urbanização nas condições térmicas internas de habitações no Brasil, não abordam a influência de índices de morfologia urbana nessa questão. Portanto, ainda há a necessidade de estudar o impacto da morfologia urbana no microclima, de modo a embasar um planejamento urbano mais resiliente ao clima.

Ao considerar a realidade das habitações de interesse social no Brasil, torna-se ainda mais relevante estudar o impacto da morfologia urbana nas condições térmicas internas dessas unidades. Diversos estudos apontam as baixas condições térmicas dessas residências (Dalbem *et al.*, 2019; Tubelo *et al.*, 2018b). Além disso, a vulnerabilidade energética nessas áreas é um fator relevante, pois os moradores, devido a questões

econômicas, podem apresentar acesso limitado a equipamentos de climatização ou à energia elétrica, agravando o estresse térmico (Simões; Leder, 2022).

Em todo o Brasil, as tipologias habitacionais de interesse social mais construídas são as casas térreas e apartamentos, ambos reproduzidos em larga escala (Ministério do desenvolvimento regional, 2020 apud bavaresco *et al.*, 2021). Nas edificações multifamiliares se destacam as torres em formato H e as lineares. Estudos indicam que a compacidade das torres em formato H tende a proporcionar melhores condições térmicas internas (Benincá *et al.*, 2023). Além disso, pesquisas sugerem que edifícios pátios podem reduzir a demanda de energia para climatização e o desconforto térmico (M'Saouri El Bat *et al.*, 2023; Natanian; Auer, 2020). No entanto, edifícios pátios ainda não são analisados e nem aplicados em HIS no Brasil.

Diante dessas questões, surge o interesse de analisar o impacto das tipologias habitacionais e da altura das edificações nos níveis de estresse térmico a que os moradores de habitações de interesse social são expostos, bem como na demanda energética necessária para garantir o conforto térmico humano, especialmente durante ondas de calor. A compreensão desses fatores pode contribuir para o planejamento de loteamentos de interesse social mais resilientes ao clima, promovendo saúde e bem-estar aos moradores.

1.1 Objetivos

O objetivo geral consiste em analisar a influência da morfologia urbana nas condições térmicas internas de habitações de interesse social, considerando a verticalidade e as tipologias edificadas.

Alinhados ao objetivo geral, os objetivos específicos consistem em:

- Identificar o nível de estresse térmico ao qual moradores de habitações de interesse social unifamiliares estão expostos, assim como a demanda energética de climatização, em períodos de onda de calor e fora desse evento;
- Comparar o potencial de mitigação do estresse térmico externo e interno em função da forma construída, tais como edifícios com pátios, torres em formato H e residências térreas, com coeficientes de ocupação semelhantes.

1.2 Estrutura

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo eles:

Capítulo 1. A introdução contextualiza o tema da pesquisa, suas problemáticas, justificativas e objetivos.

Capítulo 2. A Revisão bibliográfica aborda conceitos sobre o impacto da morfologia urbana no microclima, interação entre o microclima urbano e o ambiente térmico das edificações,

mudanças climáticas e ondas de calor e contextualiza as condições térmicas das habitações de interesse social no Brasil.

Capítulo 3. Os Materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa são apresentados e identificados os processos das simulações e dos levantamentos e coletas de dados.

Capítulo 4. Os Resultados são apresentados, de acordo com os cenários urbanos estudados, e são analisados os impactos das tipologias habitacionais e da verticalidade na temperatura externa do ar, conforto térmico e estresse térmico externo e interno e na demanda energética de climatização.

Capítulo 5. As considerações finais da pesquisa são apresentadas, assim como suas limitações, sugestões para trabalhos futuros e contribuições.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos abordados na pesquisa, sobre morfologia urbana, interação entre o microclima urbano e o ambiente térmico das edificações, mudanças climáticas e ondas de calor e habitações de interesse social no Brasil.

2.1 Morfologia urbana

Por tratar do estudo do meio físico da forma urbana e permitir a compreensão e planejamento da cidade, a morfologia urbana é estudada em várias áreas, como o Desenho Urbano, Geografia e História da Cidade (Rego; Meneguetti, 2011). No planejamento da cidade a morfologia urbana pode ser compreendida como o estudo da forma urbana, referindo-se a elementos que moldam e estruturam a cidade, como as ruas, praças, quadras, lotes e edifícios (Chiaradia, 2019; Lilley, 2009; Oliveira, 2020).

Os diferentes pesquisadores da morfologia urbana analisam o tecido urbano, com o seu sistema viário, parcelamento do solo, aglomeração, isolamento das edificações e espaços livres, porém, com diferentes finalidades. Além de retratar questões sociais, econômicas e políticas (Rego; Meneguetti, 2011), o estudo da morfologia urbana pode ser utilizado para o planejamento de cidades resilientes ao clima.

A morfologia urbana, compreende o estudo de sistemas abertos e gera infinitas possibilidades projetuais, as quais são escolhidas conforme o que o tomador de decisão vê como mais apropriado (Strappa, 2019 apud Simões; Leder; Labaki, 2021). Para um planejamento urbano alinhado ao clima, é necessário que essas decisões considerem suas influências no microclima urbano.

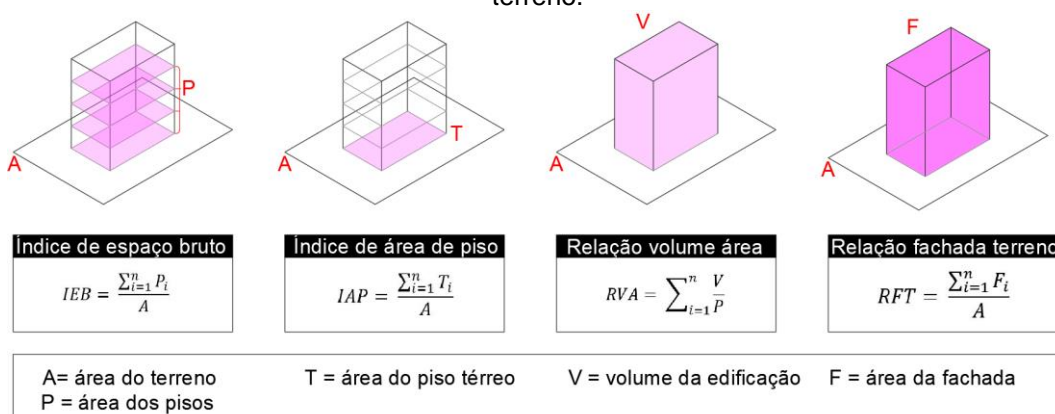
O estudo de cidades resilientes ao clima envolve o conhecimento de algumas ferramentas, como os índices de morfologia urbana, os quais auxiliam no planejamento urbano e na compreensão sobre o impacto de diferentes cenários urbanos no microclima.

2.1.1 Índices Morfológicos

Dentre os índices morfológicos relevantes no planejamento urbano alinhado ao clima, podem ser destacadas a verticalidade das edificações (altura), relação H/W, fator de visão do céu (Silva *et al.*, 2018), índice de espaço bruto, índice de área de piso, relação fachada terreno, relação volume área e proporção de aspecto do edifício (Morganti *et al.*, 2017).

O primeiro grupo de índices morfológicos pode ser caracterizado pela sua relação com a área do terreno urbano. A Figura 1 ilustra estes índices, os quais são descritos em seguida.

Figura 1: Índice de espaço bruto, índice de área de piso, relação volume área, relação fachada terreno.



Fonte: Elaborado pela autora, com base em Morganti *et al.* (2017).

Índice de espaço bruto (IEB): é um indicador de densidade, o qual descreve a compactidade dos edifícios na textura urbana. É definido como a razão entre a área construída e a área do terreno (Morganti *et al.*, 2017). Esse índice está relacionado diretamente com as áreas permeáveis disponíveis, e influencia no balanço energético do ambiente urbano. No planejamento urbano brasileiro é nomeado como Coeficiente de Aproveitamento.

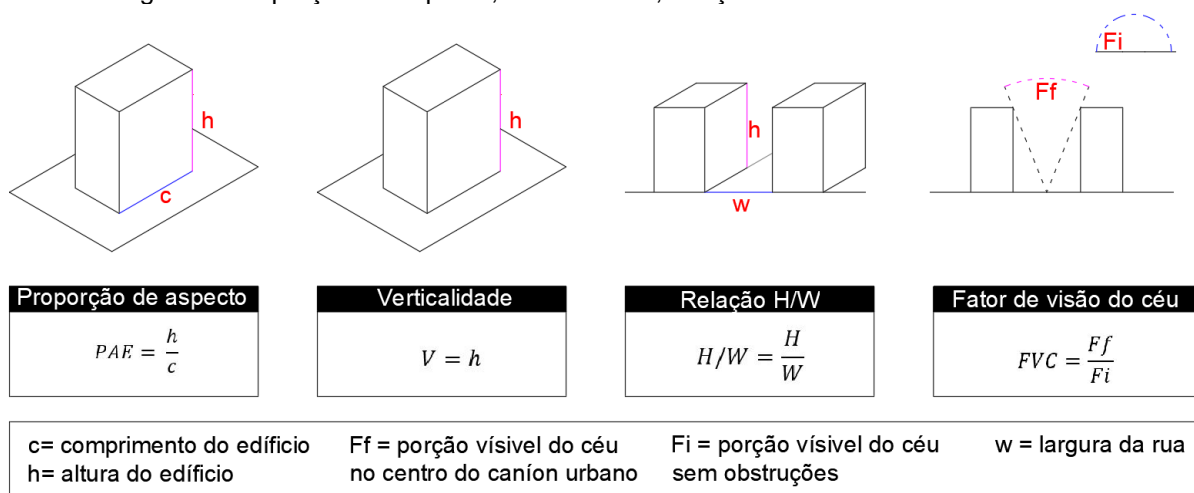
Índice de área de piso (IAP): é um indicador de densidade, relacionado a intensidade dos edifícios na textura urbana. Consiste na razão entre a área bruta do piso e a área do terreno urbano (Morganti *et al.*, 2017). No planejamento urbano brasileiro é conhecido como Taxa de Ocupação.

Relação Volume área (RVA): assim como o índice de espaço bruto, indica a densidade do edifício, porém, em relação ao seu volume. Consiste na razão entre o volume do edifício e a área do terreno urbano (Morganti *et al.*, 2017).

Relação fachada terreno (RFT): indica a densidade vertical para a textura urbana. É proporcional a quantidade de superfícies verticais existentes e depende da forma e altura dos edifícios (Morganti *et al.*, 2017).

O segundo grupo de índices morfológicos está relacionado às características dos edifícios ou sua relação com o entorno urbano. A Figura 2 ilustra esses índices, descritos a seguir.

Figura 2: Proporção de aspecto, verticalidade, relação h/w e fator de visão do céu.



Fonte: Elaborado pela autora, com base em Morganti *et al.* (2017).

Proporção de aspecto do edifício (PA): está relacionado a compacidade da forma do edifício e indica a quantidade da envoltória exposta por unidade de volume (Morganti *et al.*, 2017).

Verticalidade (V): Representa a altura das edificações analisadas, o qual afeta diretamente o sombreamento urbano. Altas verticalidades podem dificultar a dispersão do calor na atmosfera e criar barreiras para a circulação dos ventos, o que gera acúmulo de calor e poluentes (Silva *et al.*, 2018).

Relação H/W: é a divisão entre a altura da edificação e a largura da rua. Esse índice é utilizado para caracterizar cânions urbanos (Silva *et al.*, 2018) e está relacionado ao Fator de Visão do Céu (FVC), o qual auxilia na compreensão da capacidade de resfriamento das superfícies (Oke, 1988).

Fator de Visão do Céu (FVC): é a fração visível do céu, a partir do centro de um cânion urbano, influenciado pela altura das edificações e da relação H/W. Baixos FVC resultam em menores temperaturas durante o dia, devido ao sombreamento, porém, durante a noite

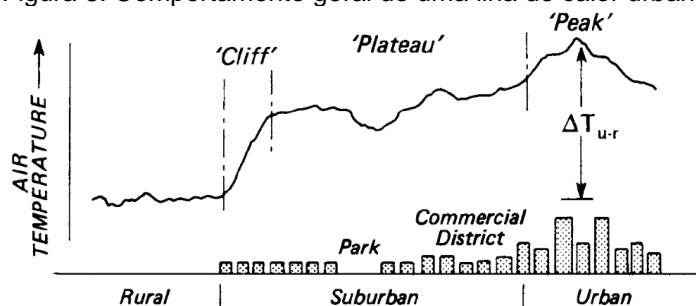
limitam a perda de radiação de ondas longas. Por outro lado, altos FVC, resultam em altas temperaturas durante o dia e não dificultam a liberação da radiação de ondas longas durante a noite (Al Haddid; Al-Obaidi, 2022).

2.1.2 Ilhas de calor urbanas

As modificações realizadas pelo ser humano no ambiente, caracterizados pelos diversos índices de morfologia urbana, diminuem o processo de evapotranspiração, aumentam a absorção dos raios solares pelos materiais construtivos e pavimentos, e reduzem o armazenamento de água no solo. Estes processos resultam nas ilhas de calor urbanas (ICU) (Landsberg, 1981).

O fenômeno das ICU, é caracterizado por temperaturas mais elevadas no ambiente urbano em comparação a áreas rurais (Oke, 1987). A elevação das temperaturas nas áreas urbanas ocorre de forma gradual, partindo do ambiente rural para os suburbanos e os centros das cidades, onde ocorrem os maiores picos (Oke, 1987). Na Figura 3 é ilustrado um exemplo de uma ilha de calor urbano, onde são identificados o *Cliff*, *Plateau* e o *Peak*.

Figura 3: Comportamento geral de uma ilha de calor urbana.



Fonte: Oke (1976).

Oke (1987) explica o conceito de *Cliff*, *Plateau* e *Peak*. O *Cliff*, representa o aumento acentuado da temperatura entre a área rural e o subúrbio. Após esta mudança brusca de temperatura, o ambiente urbano tende a apresentar baixos gradientes de temperatura horizontal, indicado como *Plateau*. Por fim, nos centros urbanos, ocorrem as temperaturas mais altas, as quais são utilizadas para definir o valor da ilha de calor urbano.


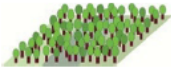



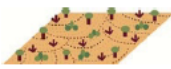






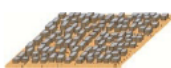




Dentre os impactos das ilhas de calor urbano, há o maior tempo de resfriamento após o pôr-do-sol, o que resulta em noites mais quentes (Landsberg, 1981; Oke, 1987). Esse fenômeno ocorre por algumas questões, como as propriedades térmicas das superfícies, menor evapotranspiração, redução da velocidade do vento e a maior retenção de ondas curtas e longas de radiação, devido à geometria urbana (Oke, 1987).

2.1.3 Zonas Climáticas Locais

Para complementar as pesquisas sobre Ilhas de Calor Urbano (ICU), foram introduzidas as Zonas Climáticas Locais (ZCL), por Stewart e Oke (2012). Anteriormente, a classificação dos locais de estudo se baseava simplesmente na distinção entre urbano e rural, o que não permitia a identificação precisa das características locais essenciais para avaliar o impacto dos ambientes urbanos no microclima (Stewart; Oke, 2012). As ZCLs foram desenvolvidas para abordar essa lacuna, por meio da definição de regiões com uniformidade em cobertura de superfície, estrutura, materiais e atividades humanas (Stewart; Oke, 2012).

A caracterização das ZCL combina o tipo de edificações com o tipo de cobertura do solo e propriedades de cobertura do solo que são variáveis, como neve e solo úmido (Stewart; Oke, 2012). As possíveis classificações são expostas na Figura 4.

Figura 4: Zonas Climáticas Locais.

Built types	Definition	Land cover types	Definition
	1. Compact high-rise Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.		A. Dense trees Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
	2. Compact midrise Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.		B. Scattered trees Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
	3. Compact low-rise Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.		C. Bush, scrub Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
	4. Open high-rise Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.		D. Low plants Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
	5. Open midrise Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.		E. Bare rock or paved Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
	6. Open low-rise Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.		F. Bare soil or sand Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
	7. Lightweight low-rise Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).		G. Water Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
	8. Large low-rise Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
	9. Sparsely built Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	<i>b. bare trees</i>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
	10. Heavy Industry Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<i>s. snow cover</i>	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<i>d. dry ground</i>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<i>w. wet ground</i>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Fonte: Stewart e Oke (2012).

A definição dos tipos de ZCL baseou-se em dados microclimáticos e simulações computacionais para representar as variações térmicas entre diferentes cenários urbanos. Tais variações podem ser significativas, entre 2 K e 5 K, a depender das diferenças nas edificações e cobertura do solo entre as ZCL (Stewart; Oke, 2012). Essas informações destacam a relevância das ZCL para analisar as ICU e, conseqüentemente, o impacto da morfologia urbana no microclima.

2.1.4 Impacto da morfologia urbana no microclima

Ao considerar a necessidade da mitigação do calor urbano, diversos estudos têm sido realizados para avaliar o impacto de diferentes morfologias urbanas no microclima. Lassandro, Di Turi e Zaccaro (2019) investigaram a resiliência térmica de duas configurações urbanas, uma histórica e outra moderna, na cidade de Bari, Itália, que possui clima Csa. Os resultados destacaram a maior resiliência da configuração histórica, e a importância de manter um Fator de Visão do Céu (FVC) abaixo de 0,25 para promover o conforto térmico.

Expansões de tais análises incluem a avaliação de outros fatores urbanos, como a quantidade de áreas impermeáveis, vegetação e sombreamento. Nesse contexto, Masiero *et al.* (2022) analisaram a relação entre diferentes Zonas Climáticas Locais (ZCLs) e o risco de exposição ao calor, na cidade de São José do Rio Preto (Aw). Os resultados indicaram que locais com predominância de áreas impermeáveis, poucas áreas abertas, baixa quantidade de vegetação e pouco sombreamento (ZCL 5) apresentaram temperaturas do ar mais altas, elevando os riscos à saúde. Em contrapartida, as ZCLs 1, ainda que apresentem área totalmente impermeabilizada, devido ao menor Fator de Visão do Céu (FVC), pode apresentar ventilação urbana canalizada e temperaturas mais baixas, pela menor incidência de radiação solar nas superfícies.

Ampliando a investigação sobre o impacto da morfologia urbana, Ronchi, Salata e Arcidiacono (2020), avaliaram a influência dos índices morfológicos no clima de Hong Kong (Cwa). Por meio da correlação estatística entre os índices morfológicos e as capacidades térmicas, concluiu-se que áreas urbanas com maior permeabilidade, baixa ocupação do solo e distribuição vertical mais acentuada possuíam maior capacidade de resfriamento, destacando a importância de características específicas da estrutura urbana no controle das temperaturas locais.

A densidade de edificações, por sua vez, também tem um papel crucial no microclima urbano. Chokhachian *et al.* (2020), analisaram essa relação em Munique (Cfb), evidenciando que maiores densidades contribuem significativamente para o aumento das ilhas de calor urbano. O estudo mostrou que coeficientes de aproveitamento (CA) mais elevados estavam associados a maiores variações de temperatura, com diferenças que chegaram a até 14,10°C,

o que reforça a necessidade de um planejamento urbano mais criterioso em áreas de alta densidade.

Em Dalian na China (Cwa), Yang *et al.* (2021) identificaram que a densidade de edificações foi o parâmetro com maior influência no microclima. O aumento simultâneo da densidade e altura das edificações resultou na elevação da temperatura superficial, devido à maior área de edifícios para receber a radiação solar e à menor circulação do vento. Todavia, os autores observaram que, para casos em que a densidade é fixa, o aumento da altura, mudanças de materiais e o planejamento da forma das edificações para criar corredores de ventilação podem melhorar a ventilação e diminuir o efeito das ilhas de calor.

Com foco no conforto térmico do pedestre, Ma *et al.* (2022), ao analisar a cidade de Hong Kong (Cwa), exploraram o impacto da configuração da altura e das formas dos edifícios, além das taxas de ocupação, sobre o conforto térmico do pedestre. Foi identificado que, em ruas não voltadas a leste-oeste, o aumento do H/W e da taxa de ocupação do solo levaram a uma melhoria do conforto térmico. A modificação da taxa de ocupação de 30% para 60% reduziu o PET em até 12,1°C, enquanto o aumento do H/W de 0,5 para 2 reduziu o PET em até 8,9°C, explicando essas alterações pela redução da incidência solar.

No clima semiúmido tropical de savana de Cuiabá, Mato-Grosso Callejas *et al.* (2020) analisaram o conforto térmico na área central de um edifício pátio. Os resultados apontaram que durante dias frios, o desconforto térmico por frio é reduzido e nos dias quentes o desconforto por calor é reduzido. A única exceção foram os períodos com maior insolação solar. Algumas recomendações foram feitas para a utilização dessas áreas. Em dias frios, devem ser usados durante o período com maior insolação, enquanto nos dias quentes esses horários devem ser evitados. Além disso, vegetações e sombreamentos contribuem para a melhoria do conforto térmico nessas áreas.

A investigação do conforto térmico em áreas de pátios, em Cuiabá, foi aprofundada por Callejas e Krüger (2022). O estudo comparou dois edifícios: um mais compacto e outro mais aberto, com relações altura/largura (AR) de 1,18 e 0,11, respectivamente. Os resultados indicaram que os pátios têm potencial para reduzir o desconforto térmico, mas essa eficiência depende da morfologia das edificações. O pátio mais aberto apresentou menor conforto térmico devido à maior incidência de radiação solar. Além disso, a ventilação cruzada nos pátios pode contribuir para a melhoria das condições térmicas.

Nos estudos apresentados, de maneira geral, houve consenso entre os resultados. Em relação ao FVC, menores valores tenderam a proporcionar melhor conforto térmico por diminuir a incidência de radiação solar e possibilitarem a criação de corredores de ventilação urbana. A baixa ocupação do solo, o aumento da verticalidade e relação H/W também foram vistas como positivas. Além disso, os edifícios pátios apresentaram potencial em reduzir o desconforto térmico. Os resultados destacam o impacto da morfologia urbana no

microclima e a necessidade de serem considerados no planejamento urbano para obtenção de cidades resilientes ao clima.

2.1.5 Planejamento urbano no Brasil

No Brasil, o planejamento urbano segue parâmetros urbanísticos, estabelecidos nos Planos diretores de cada cidade (Brasil, 2001). Estes parâmetros, usualmente, são o Coeficiente de Aproveitamento (CA), Coeficiente de Ocupação (CO) e o Coeficiente de Área Permeável (CP). O Coeficiente de Aproveitamento é a relação entre a área edificável e a área do terreno (Brasil, 2001). Já o Coeficiente de Ocupação corresponde a relação entre a área de projeção da edificação no solo e a área do terreno, enquanto o Coeficiente de Área Permeável consiste na relação entre a área permeável e a área do terreno (São Carlos, 2016).

Os parâmetros urbanísticos utilizados no Brasil, não resultam da consideração dos índices de morfologia urbana, nem das relações das Zonas Climáticas Locais com o microclima. Essa questão dificulta a obtenção de cidades resilientes ao clima e tende a agravar os problemas de saúde, gerar alto consumo energético e reduzir o bem-estar humano. Essas questões destacam a necessidade de incorporar o conceito dos índices morfológicos e das zonas climáticas, alinhadas ao clima local, no planejamento urbano.

2.2 Interação entre o microclima urbano e o ambiente térmico das edificações

O ambiente térmico das edificações é influenciado pelo microclima urbano, devido a interação entre o ambiente externo e interno (Givoni, 1998). As temperaturas internas das edificações são em parte provenientes da radiação líquida de todas as ondas do exterior do edifício (Oke, 1987). Apesar do reconhecimento dessa relação, poucos estudos consideram o efeito dos parâmetros urbanos no consumo energético e conforto térmico das edificações (Li *et al.*, 2022; Shareef, 2021; Zheng; Li, 2022). Este déficit pode ser atribuído à tendência dos urbanistas em concentrarem seus estudos nos ambientes externos, enquanto arquitetos se preocupam mais com os ambientes internos, ambos negligenciando o impacto da morfologia urbana nos ambientes internos (Zheng; Li, 2022).

A fim de preencher esta lacuna, alguns estudos, os quais interligam o clima urbano com o desempenho térmico de edificações, têm sido realizados em diferentes países. Dentre as questões analisadas se encontram o impacto do sombreamento, densidade e verticalidade de edificações, e tipologias habitacionais no consumo energético e conforto térmico.

Em relação ao sombreamento do espaço urbano, Natanian *et al.* (2020) testaram a hipótese de que o conforto térmico em climas quentes, como o Csa, Bsh e BWh, será diretamente influenciado pelos níveis de sombreamento das superfícies externas. O estudo destacou que maiores densidades minimizaram o balanço energético, devido ao alto

sombreamento e diminuíram o consumo energético. Além disso, identificou a necessidade de em climas quentes como o estudado, utilizar menores gabaritos na direção Leste-Oeste e maiores na Norte-Sul.

Com foco na orientação e diversidade de altura das edificações, Shareef (2021) avaliou o impacto da morfologia urbana no consumo energético de edificações em Dubai (BWh). Para um cenário com edifícios de mesma altura, a orientação N-S diminuiu em 6,4% a carga térmica de resfriamento e ao implementar a diversidade de alturas nos edifícios, o melhor caso, reduziu a carga térmica de resfriamento em 4,6%.

Considerando o Fator de Visão do Céu (FVC), Zheng e Li (2022) analisaram o seu impacto no ambiente térmico de edificações residenciais em Chenzhou, China (Cfa). Maiores valores de FVC resultaram em temperaturas internas mais elevadas em todos os meses do ano, até mesmo no período noturno devido ao alto acúmulo de calor durante o dia. O uso de alto FVC diminuiu a carga térmica de aquecimento em até 13,61%, enquanto aumentou a de resfriamento em 18,4%, e reduziu em 4,79% a sensação aceitável de conforto térmico.

Outros parâmetros analisados foram a relação de área útil (FAR), densidade e gabarito. Li *et al.* (2022), observaram o impacto desses parâmetros nas temperaturas internas em Singapura (Af). Dentre os parâmetros analisados, a densidade foi a que mais influenciou nas temperaturas internas, sendo que o cenário de 0,766 reduziu 4,7 °C. Já a mudança de altura de 12 para 72 metros trouxe uma redução de 1,7 °C. Por fim, os autores compreenderam que a FAR, quando fixada em 2 e com o aumento da densidade de 0,141 para 0,766, pode diminuir a temperatura interna em 2,1 °C.

Avaliando tipologias de edificações de edifícios pátios e arranha-céus, em Tel Aviv, Israel (Csa), Natanian e Auer (2020) identificaram que em edifícios pátios, em dias frios, altos coeficientes de ocupação e ruas estreitas reduziram o conforto térmico externo devido à diminuição da luz solar. Em dias quentes o conforto térmico aumentou devido ao sombreamento. Internamente, o impacto da ilha de calor no consumo energético foi mais alto nos cenários com edifícios pátios, aumentando com a utilização de formas mais compactas.

Dando continuidade à análise das características dos edifícios pátios, M'Saouri El Bat *et al.* (2023) investigaram o impacto das proporções dos pátios na demanda energética, com foco nas relações entre o perímetro e a altura, e a largura pelo comprimento. Em climas frios, pátios quadrados se mostraram as soluções mais eficazes, por diminuírem o desconforto térmico causado pelo frio e reduzirem a demanda energética em até 48%. Em climas quentes e áridos, pátios mais profundos e estreitos foram mais vantajosos, proporcionando maior sombreamento no verão e uma redução de até 10% da demanda energética. Já nos climas temperados, pátios com menores comprimentos e maiores profundidades foram as soluções mais eficientes, resultando em uma redução de até 58% na demanda energética.

Os resultados dos estudos expostos destacam a importância da análise do impacto dos parâmetros urbanísticos e das tipologias habitacionais nas condições térmicas internas das habitações. De maneira geral, os dados apresentam conformidade entre si. O sombreamento gerado por maiores densidades, baixos FVC e maiores gabaritos diminuiram o consumo energético para resfriamento, devido ao aumento do conforto térmico durante períodos quentes. Todavia, esses parâmetros precisam ser analisados atentamente, a fim de verificar os limites para os quais os efeitos das ilhas de calor sobrepõem os benefícios do sombreamento. Por fim, o uso de edifícios pátios pode reduzir o consumo energético, porém, precisam ser projetados com configurações alinhadas ao clima.

2.3 Conforto térmico e consumo energético em conjuntos habitacionais de interesse social

No Brasil, para mitigar o alto déficit habitacional, foram implementados programas governamentais voltados à construção de habitações de interesse social (HIS). No entanto, essas edificações ainda apresentam desafios significativos, como o baixo conforto térmico e a alta demanda energética.

Para enfrentar esses problemas, pesquisadores têm proposto soluções que aprimoram a eficiência térmica das HIS. As principais abordagens incluem melhorias na envoltória das edificações, como o aumento do isolamento térmico, o aprimoramento de janelas e vidros, a variação das taxas de infiltração, além da avaliação de diferentes sistemas construtivos, incluindo paredes e coberturas vegetadas (Dalbem *et al.*, 2019; Gabriel *et al.*, 2024; Oliveira; Alves, 2021; Tubelo *et al.*, 2018; Valdenebro; Dietrich; Ino, 2019).

A maioria dos estudos que avaliam soluções não relacionadas à envoltória das edificações concentra-se na orientação e forma das construções. Dörfler e Krüger (2016), avaliaram diferentes orientações, variando a cada 45°, em quatro climas brasileiros. Os resultados mostraram que as maiores reduções na demanda energética para obtenção de conforto térmico ocorreram no clima temperado, chegando a 14%. Nos climas temperado com inverno frio, quente seco e quente úmido, as reduções máximas variaram entre 2% e 4%.

Zibetti *et al.* (2023) também investigaram essa estratégia para cidades de clima quente, frio e ameno. Os resultados indicaram que orientações intermediárias (45°, 135°, 225° e 315°) não apresentam valores médios em relação às orientações principais (0°, 90°, 180° e 270°). Além disso, as orientações mais e menos favoráveis variaram de acordo com a cidade. Para o clima quente, a orientação a 45° foi a mais satisfatória, enquanto para o clima frio e para o ameno, a mais eficiente foi 270°.

Ao considerar o impacto combinado da orientação e da forma das edificações, Benincá *et al.* (2023) analisaram edifícios em Passo Fundo no Rio Grande do Sul, que apresenta um

clima frio (Cfa). O estudo revelou que construções em formato H apresentaram menor demanda energética devido à maior compactidade e menor exposição solar em comparação com formas lineares. Para esses edifícios, a orientação solar de 350° resultou na maior redução da demanda energética para resfriamento e aquecimento (2,7%). Já para edificações lineares, a melhor orientação foi 175°, com uma redução total de 8,2%.

No que diz respeito ao impacto do microclima na demanda energética de habitações de interesse social, Gonçalves *et al.* (2024) modificaram o arquivo climático utilizado no EnergyPlus com dados microclimáticos provenientes de simulações no ENVI-met. Externamente, analisaram o efeito da variação de pavimentos, da inserção de árvores e porcentagens de áreas permeáveis no conforto térmico. No entanto, internamente, os autores apenas indicaram que essas estratégias não afetaram significativamente o desempenho térmico das edificações.

Para o mesmo clima, cidade e HIS analisada por Gonçalves *et al.* (2024), Cunha *et al.* (2025) investigaram o impacto da urbanização no desempenho térmico da unidade habitacional. Utilizando o *software* UWG, editaram o arquivo climático local com os parâmetros urbanos da LCZ 3A e da 13E. Os resultados demonstraram que o aumento da densidade urbana reduziu o conforto térmico e aumentou a demanda energética para resfriamento. Com base nesses achados, os autores destacaram a importância da regulamentação da densidade das edificações para otimizar o desempenho térmico e energético das habitações de interesse social.

Apesar da relevância dessas pesquisas, o impacto dos índices de morfologia urbana no conforto térmico e na demanda energética ainda é pouco explorado e incorporado em ferramentas de planejamento urbano, especialmente em conjuntos de habitação de interesse social.

Com um dos objetivos consistindo na melhoria do conforto ambiental e da habitabilidade, foi estabelecida a Portaria MCID Nº 725 (Brasil, 2023), que dispõe sobre especificações urbanísticas, de projeto do empreendimento e da unidade habitacional para obras financiadas com recursos do Programa Minha Casa, Minha Vida. O documento apresenta exigências relacionadas tanto ao espaço urbano quanto às habitações. Externamente, são indicados requisitos para elementos arbóreos, áreas sombreadas, materiais de pavimentação, entre outros aspectos. Internamente, exige-se das edificações o atendimento ao desempenho térmico especificado na NBR 15575 (ABNT, 2021), a previsão de uma possibilidade de ampliação das casas térreas que não prejudique a ventilação natural, o uso de estratégias passivas para melhoria do conforto térmico, entre outros parâmetros arquitetônicos.

Embora a Portaria MCID Nº 725 (Brasil, 2023) contribua para a melhoria do conforto térmico em HIS, parâmetros de morfologia urbana relevantes para essa questão ainda não

são incorporados ao documento. Assim, a orientação das vias, a taxa de ocupação, a porcentagem de áreas permeáveis, os gabaritos, os fatores de visão do céu, o espaçamento entre as edificações, os coeficientes de aproveitamento, entre outros índices de morfologia urbana, precisam ser mais investigados, especialmente considerando os climas brasileiros, a fim de serem integrados ao planejamento urbano.

Essa lacuna no conhecimento tem consequências diretas: conjuntos habitacionais de interesse social continuam sendo construídos sem um planejamento adequado às condições climáticas locais, comprometendo a eficiência térmica e energética dessas habitações e refletindo na saúde e bem-estar dos moradores.

2.4 Mudanças climáticas e o aumento da frequência e intensidade das ondas de calor

As mudanças climáticas ocorrem devido a fatores definidos como “condutores” ou “forçadores” radioativos. A mudança no balanço energético atmosférico, devido a variações nesses fatores, quando positiva indica aquecimento e quando negativa, resfriamento (IPCC, 2023). Nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), foi indicado que, desde 1800-1900, a soma dos forçadores radioativos tem sido positiva, o que evidencia a tendência de aquecimento global (IPCC, 2023). Projeções do IPCC AR5 indicaram aumentos na temperatura global entre 2 °C e 6 °C até o final do século (IPCC, 2023).

Os forçadores ou condutores radioativos são caracterizados como naturais ou antropogênicos. Dentre os fatores naturais há as mudanças na irradiância solar, correntes oceânicas, aerossóis que ocorrem naturalmente e fontes e sumidouros de gases radiativamente ativos (IPCC, 2023). Nos fatores antropogênicos se destacam a utilização de combustíveis fósseis, aerossóis, emissões de CO₂ e alterações no uso do solo, como o desmatamento, agricultura e urbanização (IPCC, 2023).

Em relação à alteração do uso do solo, desde 1980, cerca de 66% das mudanças na cobertura do solo na América do Sul estão relacionadas à desflorestação tropical, à florestação temperada, à intensificação das terras agrícolas e à urbanização (Song *et al.*, 2018). Ao avaliar o impacto das alterações no uso do solo, conclui-se que os efeitos biogeoquímicos resultaram no aquecimento anual da superfície (IPCC, 2023).

Como resultado do aquecimento global, o aumento da intensidade e frequência de ondas de calor foi identificado com alta confiança na América Central e do Sul, muito provável na Ásia, Austrália, Europa e América do Norte e confiança média na África (IPCC, 2023). As ondas de calor são definidas como um período de temperaturas atmosféricas acima do usual, que podem causar mudanças temporárias no estilo de vida e consequências negativas na saúde da população (Robinson, 2001).

Um dos eventos relacionados a ondas de calor na América do Sul é o *El Niño*. Relatórios indicaram que a amplitude do *El Niño* de 1979 - 2009 foi maior que durante o período de 1590 - 1880 (IPCC, 2023). Além disso, a intensidade e a frequência do *El Niño* de 1951 a 2000 foi mais alta que de 1901 a 1950 (IPCC, 2023).

As alterações no uso do solo e a emissão de aerossóis antropogênicos, assim como os eventos naturais, influenciam significativamente na alteração dos extremos de temperatura em algumas regiões (IPCC, 2023). Em áreas urbanas essas temperaturas são mais elevadas devido ao efeito das ilhas de calor urbano (Chapman *et al.*, 2017; Phelan *et al.*, 2015). Por estes motivos, a urbanização tem intensificado os efeitos do aquecimento global nas cidades (IPCC, 2023).

O aumento da frequência e amplitude das ondas de calor são preocupantes. As altas temperaturas podem ser fatais e são relacionadas ao aumento de entradas em hospitais, e baixa segurança e produtividade de trabalhadores ao ar livre (Goldie *et al.*, 2017; Mora *et al.*, 2017; Orlov *et al.*, 2019; Watts *et al.*, 2018). Estas questões ocorrem porque o calor extremo aumenta problemas respiratórios e episódios de asma (Upperman *et al.*, 2017).

Além do impacto na saúde humana, o aumento da temperatura resulta no maior consumo energético, devido à alta demanda de condicionamento de ar. Entre 1990 e 2019, o consumo de energia para condicionamento de ar aumentou em 75% (IPCC, 2023). Estas altas demandas energéticas podem afetar negativamente populações vulneráveis devido à pobreza energética, além de, poder resultar em sobrecarga nas redes de energia e interrupção do fornecimento (Biardeau *et al.*, 2020; Sun; Specian; Hong, 2020).

2.4.1 Configurações urbanas voltadas à diminuição do efeito das ondas de calor

O potencial da morfologia urbana em reduzir ou intensificar o calor urbano destaca a necessidade de analisar o impacto de diferentes configurações urbanas no conforto térmico. Neste contexto, índices urbanísticos, materiais construtivos e infraestruturas verdes e azuis tem sido avaliados, a fim de buscar as melhores soluções para amenizar o desconforto térmico durante ondas de calor.

Ao avaliar o Fator de Visão do Céu (FVC), em climas subtropicais úmidos e marinhos da costa oeste, observou-se que baixos valores reduzem as trocas de calor e a perda de radiação de ondas longas, além de diminuir a ventilação (Anders *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2024). Por outro lado, o sombreamento gerado pelos edifícios pode reduzir a incidência de radiação de ondas curtas, o que resulta em um aumento do conforto térmico durante o dia e diminuição durante a noite (Anders *et al.*, 2023). O FVC foi identificado como o fator com maior influência na temperatura do ar externa. Baixos valores tendem a piorar o microclima urbano (Fan *et al.*, 2024). Ao avaliar os fatores dominantes no microclima de áreas externas com e sem

vegetação e espaços semiabertos, foi identificado que o FVC foi o com maior influência. Quanto maior o valor do FVC, mais alta a temperatura radiante média (T_{mrt}), o PET e o Índice Climático Térmico Universal (UTCI) (Li *et al.*, 2023).

As áreas permeáveis também foram identificadas como relevantes na diminuição do calor urbano. Superfícies permeáveis possuem alta capacidade de transmissão do calor, com uma tendência de absorver mais a radiação solar e refletir menos, o que resulta em um efeito positivo na temperatura (Fan *et al.*, 2024). A utilização de superfícies horizontais permeáveis em áreas densamente construídas pode melhorar a capacidade de armazenamento de calor do solo e reduzir o aumento de calor provocado por baixos FVC (Fan *et al.*, 2024). Neste mesmo sentido, a retirada de pavimentos impermeáveis mostrou um aumento do conforto térmico entre 15% e 20% em climas subtropicais úmidos, marinhos da costa oeste e mediterrâneos (Bassolino; D'ambrosio; Sgobbo, 2021).

Em relação aos pavimentos, Kowalski, Masiero e Krüger (2024) analisaram, por meio de modelos em escala reduzida, a influência do albedo e da geometria urbana na mitigação do calor. Os resultados demonstraram a viabilidade dos pavimentos refletivos, cuja eficácia depende do sombreamento e das propriedades dos materiais. A relação altura/largura (H/W) mostrou impacto direto nas temperaturas do ar e de globo, sendo, portanto, um fator relevante a ser considerado. Pavimentos de concreto claro, comparados ao asfalto escuro, apresentaram menor aumento da temperatura do ar em cânions mais profundos. Quanto à temperatura de globo, os pavimentos de concreto claro reduziram significativamente os valores, efeito potencializado pelo aumento do cânion. Já o concreto escuro apresentou menores temperaturas do ar em comparação ao concreto claro, que, por sua vez, teve melhor desempenho na redução da temperatura de globo.

Outras questões destacadas nos estudos foram relacionadas ao sombreamento urbano e o fator de ocupação das edificações. Foi visto que o sombreamento em cenários de baixa e média densidade pode aumentar o conforto térmico entre 10% e 20%, enquanto em áreas compactas no máximo 5% (Bassolino; D'ambrosio; Sgobbo, 2021). No fator de ocupação do solo das edificações, identificou-se sua alta relação com as ilhas de calor urbano, questão que indica a necessidade de controlar a densidade dos edifícios (Fan *et al.*, 2024).

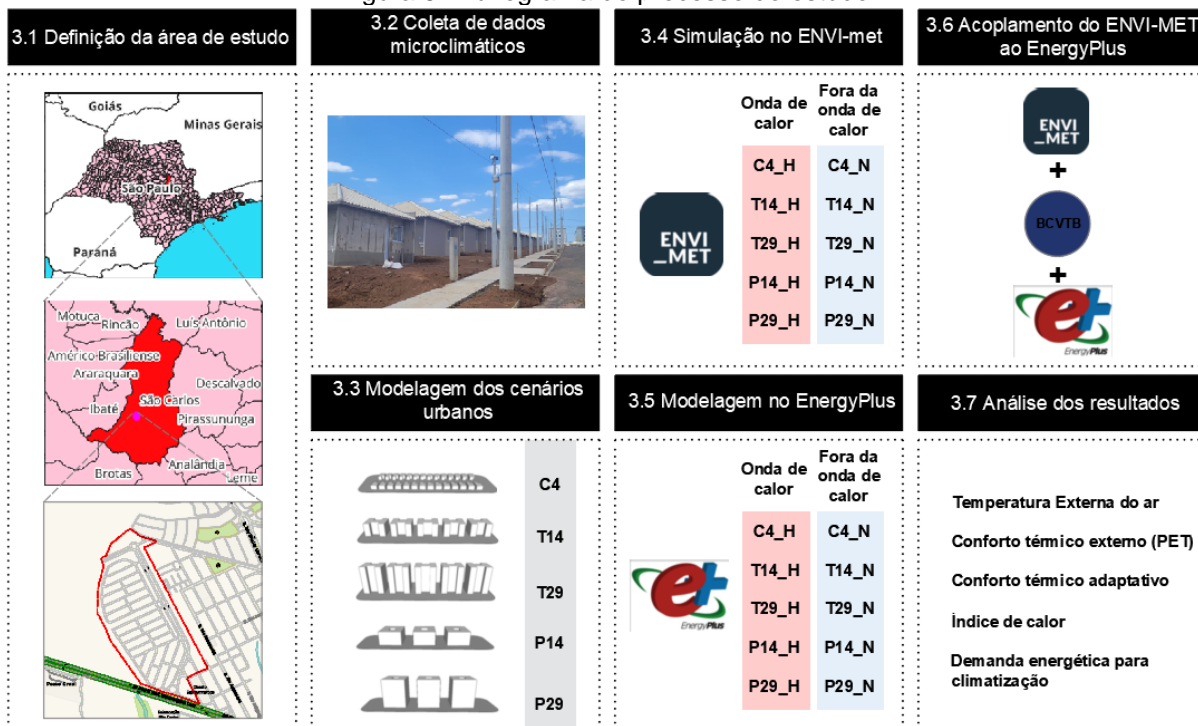
Os resultados dos estudos citados anteriormente estão alinhados com os discutidos no tópico 2.2.1. O sombreamento das superfícies e o aumento de áreas permeáveis são extremamente relevantes na diminuição da temperatura durante ondas de calor. Além disso, as altas densidades e FVC também aumentam o potencial das ilhas de calor e reduzem o conforto térmico. Essa constatação sugere que durante ondas de calor o conforto térmico de períodos sem extremos climáticos é reduzido. Isso destaca a importância de o planejamento urbano considerar períodos de ondas de calor.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa se baseia no desenvolvimento de processos experimentais, realizados por meio de simulações computacionais e coleta de dados microclimáticos em uma área urbana com habitações de interesse social. O processo do estudo é demonstrado na Figura 5 e se divide em sete etapas:

1. Definição da área de estudo e caracterização física e climática do local;
2. Coleta de dados microclimáticos no local de estudo;
3. Modelagem computacional dos cenários urbanos real e hipotéticos para simulação no *software* ENVI-met;
4. Simulação e validação do cenário real e modelos urbanos do ENVI-met com base nos dados microclimáticos coletados sob uma condição de onda de calor e fora desse evento;
5. Modelagem das unidades habitacionais em diferentes cenários de ocupação urbana no EnergyPlus;
6. Acoplamento dos dados gerados pelo ENVI-met no EnergyPlus;
7. Análise das condições térmicas dos cenários hipotéticos e real com diferentes configurações morfológicas urbanas nos ambientes externos e internos, por meio da temperatura externa do ar, do conforto térmico interno e externo, do índice de calor e demanda de energia para climatização sob as condições de uma onda de calor e fora desse evento.

Figura 5: Fluxograma do processo do estudo.



Fonte: Autora (2025).

3.1 Definição da área de estudo

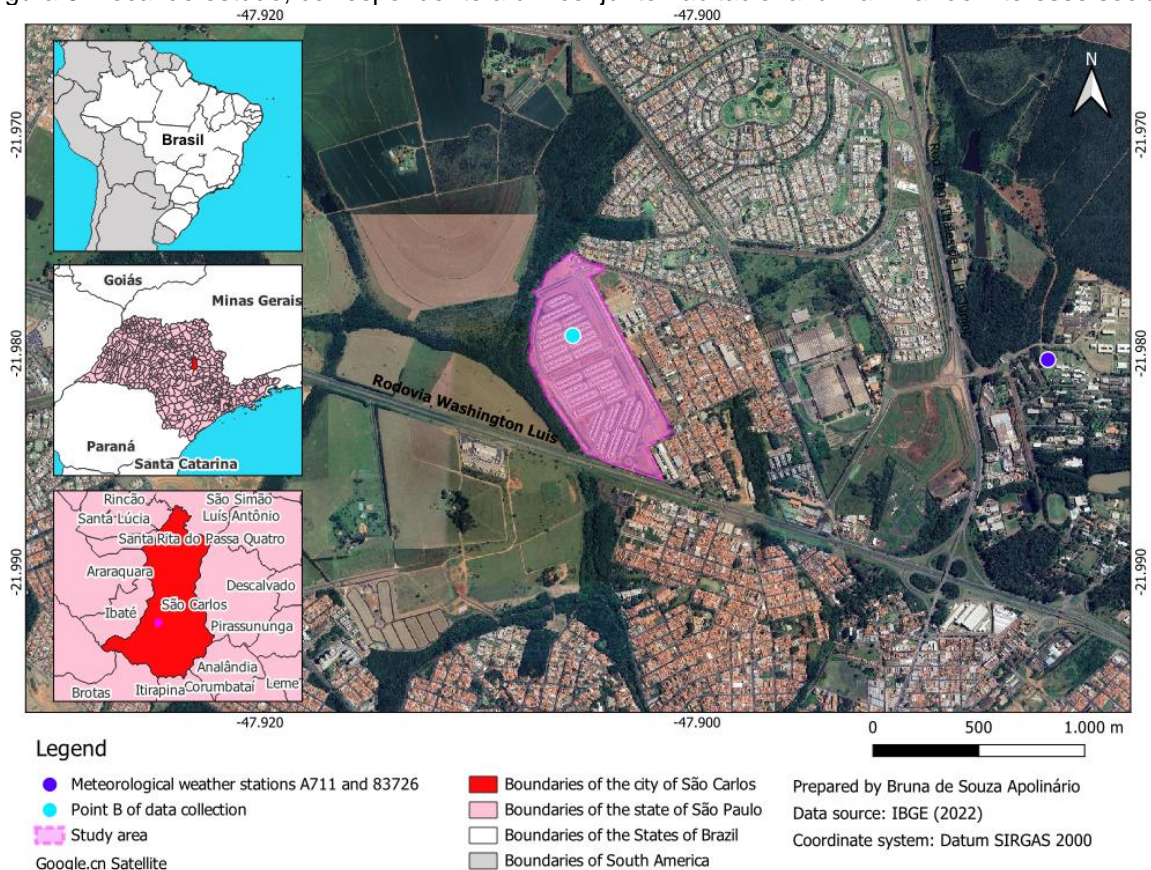
Para a escolha do local de estudo, buscou-se uma área urbana com habitações de interesse social, onde os parâmetros de uso e ocupação do solo fossem homogêneos e recém-construído. Esse critério foi adotado para possibilitar a análise de um cenário urbano comumente adotado no Brasil, de tal modo a identificar o impacto no conforto térmico e na demanda energética para climatização.

3.2 Caracterização física e climática do local

O local selecionado corresponde a um conjunto habitacional unifamiliar de interesse social que está em fase final de construção, localizado na cidade de São Carlos-SP. Assim, o conjunto residencial de casas térreas, no momento do levantamento de dados, ainda não havia sofrido intervenções dos proprietários dos imóveis e preservava as características conforme o projeto original da construtora.

A cidade de São Carlos está a uma altitude de 856 m e os limites de suas coordenadas geográficas são: 47° 30' e 48° 30' longitude oeste e 21° 30' e 22° 30' latitude sul (São Carlos, 2024). Este empreendimento possui uma área de aproximadamente 508.047,00 m², 954 lotes e está em uma área periférica da cidade. Sua implantação é representada na Figura 6.

Figura 6: Local de estudo, correspondente a um conjunto habitacional unifamiliar de interesse social.



Fonte: Autora (2025).

A área possui lotes de uso residencial e misto, áreas institucionais, uma lagoa de detenção, sistemas de lazer e uma área de preservação permanente no entorno do córrego Santa Maria do Leme, localizado no lado oeste da área. A distribuição dessas áreas pode ser vista na Figura 7.

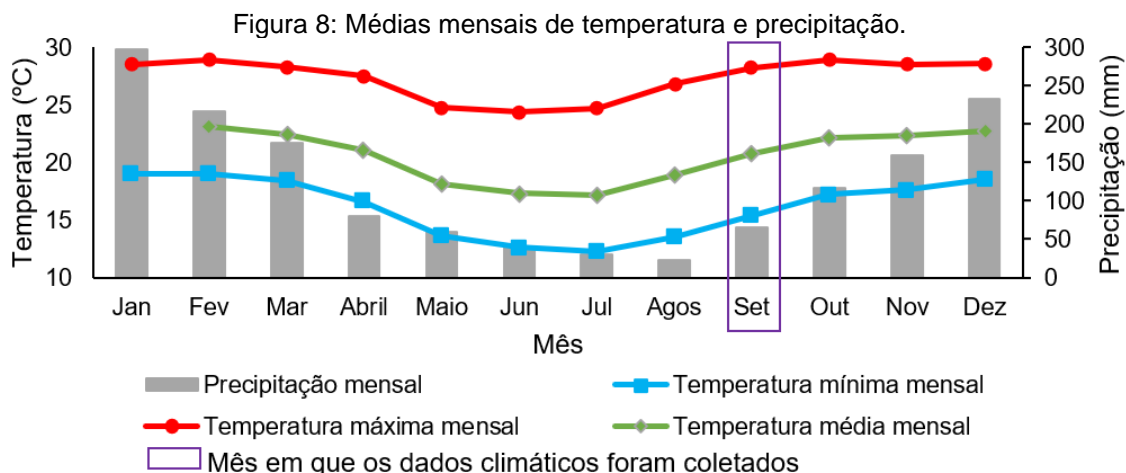
Figura 7: Conjunto habitacional de interesse social.



Fonte: Google Maps (2025).

Segundo o projeto disponibilizado pela Prefeitura Municipal de São Carlos (São Carlos, 2024), os lotes de meio de quadra possuem área de 160 m², e os localizados nas avenidas ou voltados para áreas de lazer são de uso misto. As ruas possuem três variações de larguras: nove, dez e meio e doze metros. As residências possuem recuo frontal de no mínimo 5,50 metros e recuo em apenas uma lateral do terreno, correspondente a 2 metros.

A cidade de São Carlos, pela classificação de Köppen-Geiger, possui clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa) (Embrapa, 2025). As temperaturas médias e precipitações mensais são expostas na Figura 8, com base na série histórica de 1991-2020, obtida da estação meteorológica A711. As maiores precipitações e as temperaturas mais altas ocorrem durante os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março.



Fonte: Normal climatológica 1991-2020 (INMET, 2025).

3.2.1 Parâmetros urbanísticos vigentes no Plano Diretor da Cidade de São Carlos, SP

O Plano Diretor de São Carlos divide o território em macrozonas, a fim de definir prioridades e objetivos para políticas públicas de desenvolvimento sociocultural e econômico (São Carlos, 2016).

Atualmente, São Carlos é dividida em treze macrozonas, dentre elas a Macrozona Urbana e a Macrozona de Uso Multifuncional Rural, para as quais são estipulados parâmetros de uso e ocupação solo. Estas macrozonas são divididas em zonas, com seus respectivos parâmetros urbanísticos. No Quadro 1 são apresentados os Coeficientes de Ocupação (CO), Coeficiente de Aproveitamento Básico (CAB), Coeficiente de aproveitamento Máximo (CAM), Coeficiente de Aproveitamento (CA), Coeficiente de Permeabilidade (CP) e o Coeficiente de Cobertura Vegetal (CCV), exclusivamente da Macrozona Urbana.

Quadro 1: Coeficientes urbanísticos de São Carlos.

	Zona	CO (%)	CAB	CAM	CA	CP (%)	CCV (%)
Ocupação induzida	1	70	2	3,5	1,4 ^a	15	-
Ocupação condicionada	2	70	1,4	3 ^b	1,4 ^a	15	-
Recuperação e ocupação controlada	3A	70	-	-	1,4 ^c 1,0 ^d	15	-
Recuperação e ocupação controlada	3B	70 ^e 70 a 50 ^f 50 ^g	-	-	1,4 ^c 1,0 ^d	15 ^e 15 a 30 ^f 30 ^g	10

^a Para uso estritamente residencial unifamiliar;
^b Nos eixos da zona 2;
^c Para EHIS;
^d Para demais parcelamentos;
^e Para lotes de 125m²;
^f Para lotes de 125,01m² a 300m² (CO = 84,287 – 0,11429 x área).

Fonte: Adaptado de São Carlos (2016).

Em relação aos coeficientes urbanísticos, o Coeficiente de Aproveitamento Básico (CAB) é a relação entre a área edificável máxima e a área do lote sem o pagamento da Contrapartida de Outorga Onerosa do Direito de Construir. Em contrapartida o Coeficiente de aproveitamento Máximo (CAM), é a relação entre a área edificável máxima e a área do lote com o pagamento da Contrapartida de Outorga Onerosa do Direito de Construir. Já Coeficiente de Cobertura Vegetal (CCV), é a relação entre a área coberta por vegetação arbórea ou arbustiva de um determinado imóvel e sua área total (São Carlos, 2016).

Além dos parâmetros de uso e ocupação do solo estabelecidos no Plano Diretor, os recuos para as edificações são definidos no Código de Obras da Cidade. Em São Carlos, as dimensões dos recuos variam de acordo com a altura da edificação e se há a presença de aberturas. No Quadro 2 são expostos os recuos exigidos entre as edificações.

Quadro 2: Recuos em São Carlos.

Recuos das edificações		
Altura da edificação (H)	Parede sem abertura	Parede com abertura
Subsolo ou H < 6 m	0,00 m	1,50 m
H ≥ 6 m	2,0 m a partir de H > 12m	H/8 com mínimo de 2,00 m

Fonte: Adaptado de São Carlos (2016).

Além dos recuos das edificações são especificadas as distâncias mínimas das aberturas em relação às divisas, apresentadas no Quadro 3.

O Residencial de HIS está localizado na zona 2 de ocupação condicionada. Dessa forma, os parâmetros exigidos e os utilizados no loteamento são expostos no Quadro 4. Em relação aos recuos, o projeto original apresenta recuos de 2 m em uma lateral, 5 m na frente do lote e 6 m no fundo.

Quadro 3: Distâncias mínimas das aberturas em relação às divisas.

Distância mínima das aberturas em relação às divisas							
Altura da edificação	Paralela	Perpendicular	Inclinada***				
			15°	30°	45°	60°	75°
Subsolo ou H < 3 m	1,50 m	0,75 m*	1,47 m*	1,40 m*	1,28 m*	1,13 m*	0,94 m*
3 m ≤ H ≤ 6m	1,50 m	0,75 m	1,47 m	1,40 m	1,28 m	1,13 m	0,94 m
H > 6	H/8 com mínimo de 2,0 m	0,75 m	1,97 m	1,87 m	1,71 m	1,50 m	1,26 m

Notas:
 (*) ou não terão recuo mínimo obrigatório, desde que o muro de divisa acompanhe em altura a parte mais alta da abertura.
 (**) os valores descritos nesta tabela correspondem à distância obtida a partir da inscrição de um círculo, cujo diâmetro equivale ao recuo da Parede com Abertura.
 (***) representam casos onde as paredes não estão alinhadas às divisas.

Fonte: Adaptado de São Carlos (2016).

Quadro 4: Parâmetros construtivos exigidos e utilizados na área de estudo.

Parâmetros	CO	CAB	CAM	CP
Exigido	>70%	<1,4	<3	>15%
Área de estudo	0,24	0,24	-	50%

Fonte: Adaptado de São Carlos (2016).

3.3 Coleta de dados microclimáticos no local de estudo

Para uma representação alinhada com a realidade, o ENVI-met foi calibrado a partir de dados microclimáticos coletados no local durante a primavera de 2023. Durante a coleta dos dados microclimáticos, na área delimitada para a simulação, as vias e calçadas estavam finalizadas, enquanto as habitações estavam em processo de finalização da pintura externa.

A medição da temperatura e umidade relativa do ar na área urbana foi realizada com o posicionamento de sensores nos pontos A, B, C e D, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9: Pontos de coleta dos dados microclimáticos.



Fonte: Google Maps (2025).

As especificações do termo-higrômetro utilizado para coletar a temperatura e umidade relativa do ar, são expostas no Quadro 5.

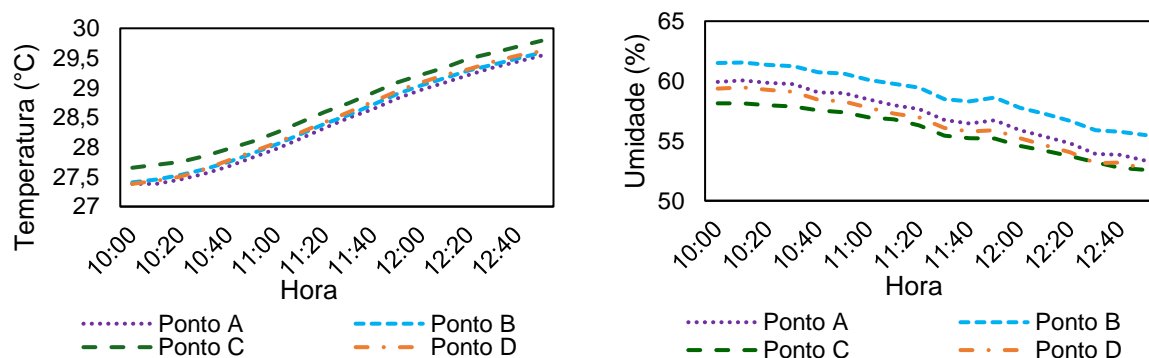
Quadro 5: Especificações técnicas Hobo/ Pro V2 U23-001.

Especificações	Sensor de temperatura	Sensor de umidade
Faixa de operação	-40° a 70 °C	0 a 100% de umidade relativa
Precisão	± 0,21 °C (0° a 50 °C)	± 2,5% de 10% a 90% de umidade relativa, para um máximo de ± 3,5%, incluindo histerese a 25 °C; Abaixo de 10% e acima de 90% ± 5%
Tempo de resposta	40 minutos no ar movendo a 1 m/s	
Marca/modelo	HOBO/ Pro V2 U23-001	

Fonte: Autora (2025).

Para verificar a variação entre a medição dos equipamentos, posteriormente a coleta de dados realizada no local, os dados de temperatura e umidade do ar foram coletados em um ambiente controlado, sem incidência solar e sem correntes de vento. No dia da coleta não houve precipitação, havia baixa nebulosidade, a temperatura máxima foi de 30,8°C e a mínima de 21,4°C, a umidade relativa do ar entre 26% e 74% e a velocidade máxima do vento foi de 2,2 m/s. Os dados foram coletados durante duas horas e cinquenta minutos (Figura 10).

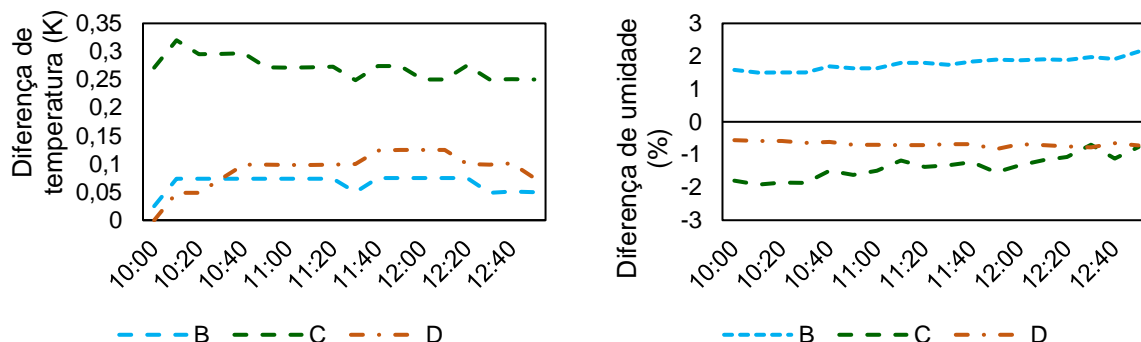
Figura 10: Dados climáticos coletados em um ambiente controlado.



Fonte: Autora (2025).

Nos dados de temperatura do ar, registrados pelo sensor Hobo, nomeado como Ponto C apresentou os resultados mais elevados. Na umidade do ar, os valores mais altos foram registrados no ponto B. Para analisar as diferenças entre os sensores, foi adotado o Hobo Ponto A como referência, e os resultados são expostos na Figura 11.

Figura 11: Diferenças entre os dados coletados, com base no sensor do ponto A.



Fonte: Autora (2025).

Em relação à temperatura do ar, o ponto C apresentou aumentos de 0,25 K a 0,32 K. Já no Hobo B, as diferenças estiveram abaixo de 0,1 K e, no C de 0,12 K. Considerando a precisão de medição do sensor de temperatura, apenas o ponto C esteve fora do intervalo aceitável. Quanto à umidade relativa, o ponto C apresentou a maior variação negativa, de até 1,91 %, e o ponto B maiores variações positivas, de até 2,14 %. Com base na precisão do sensor de umidade, todos os sensores estiveram dentro do intervalo aceitável, com variações inferiores a precisão dos equipamentos.

A coleta ocorreu durante o período de 19 de setembro de 2023 a 04 de outubro de 2023, com intervalo de registro de 10 minutos. Para isso, os termo-higrômetros foram instalados em postes de energia elétrica a 3 metros de altura, para garantir a segurança dos equipamentos e a não interferência nas atividades da obra, conforme a Figura 12.

Figura 12: Ponto B de coleta de dados microclimáticos.

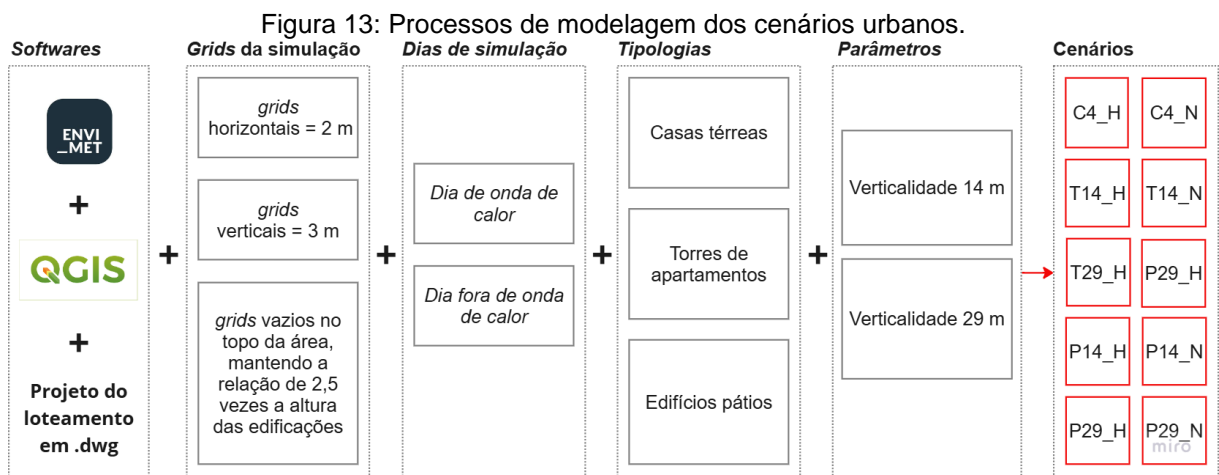


Fonte: Autora (2025).

Nos dados de entrada do ENVI-met os dados coletados no local foram utilizados juntamente com dados das estações meteorológicas A711 e 83726. Além disso, foi identificado o período em onda de calor durante a coleta. As informações sobre esses procedimentos são expostas no tópico 3.5 e 3.8.1.

3.4 Modelagem dos cenários urbanos hipotéticos e real para simulação no software ENVI-met

Para a modelagem do microclima urbano foi utilizado o software ENVI-met 5.6.1, em sua versão estudante, juntamente com o software QGIS e o arquivo em formato .dwg do projeto do empreendimento. O ENVI-met 5.6.1 se baseia em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e termodinâmica, simulando as interações entre os edifícios, superfícies, solos, vegetação e ar (Bruse; Fler, 1998). O processo de modelagem dos cenários urbanos é exposto na Figura 13. Os cenários hipotéticos foram simulados considerando diferentes formas e alturas de edificações, sendo que as siglas de identificação de cada cenário estão detalhadas a partir do item 3.4.1, mas consistem em uma letra que indica a tipologia habitacional, seguida pela altura das edificações e H para indicar onda de calor e N para um dia fora da onda de calor. A letra C indica casas térreas, T edificações de torres em formato H e P edifícios pátios.



Fonte: Autora (2025).

3.4.1 Cenário real (C4)

Para avaliar a influência de diferentes morfologias urbanas no microclima, inicialmente foi modelado o cenário existente no momento da coleta dos dados microclimáticos (19 de setembro de 2023). A área modelada é destacada na Figura 14, abrangendo as quadras E, F, G, I, J e K do empreendimento, totalizando 180 m x 380 m.

Figura 14: Delimitação da área de estudo.



Legenda

■ Área de estudo

Fonte: Adaptado de Google Maps (2025).

As dimensões das ruas, calçadas e edificações foram arredondadas para valores múltiplos dos *grids* definidos na simulação. As dimensões dos *grids* horizontais foram definidas em 2 m, enquanto na vertical em 3 m. No topo da área a ser simulada foram adicionados *grids* vazios, para manter a relação de 2,5 vezes a altura do edifício mais alto do cenário (edifício + topografia). Quando necessário, também foram inseridos *grids* vazios entre os edifícios e a borda do modelo para manter uma distância igual à altura dos edifícios. Estes *grids* vazios foram inseridos seguindo as recomendações do ENVI-met (2024).

Devido ao estágio de construção do loteamento, durante a coleta dos dados microclimáticos, os terrenos ainda se encontravam sem nenhuma cobertura vegetal e não havia árvores no local. Por esses motivos, as superfícies do cenário real (C4), variam entre asfalto, concreto e solo natural, o qual segundo a Embrapa (2023) corresponde a um Latossolo Vermelho Distroférico. As características e materiais utilizados em todos os cenários são expostas na Tabela 1. Os materiais utilizados nas construções foram os mesmos configurados nas simulações internas do EnergyPlus, conforme exposto no tópico 3.6.

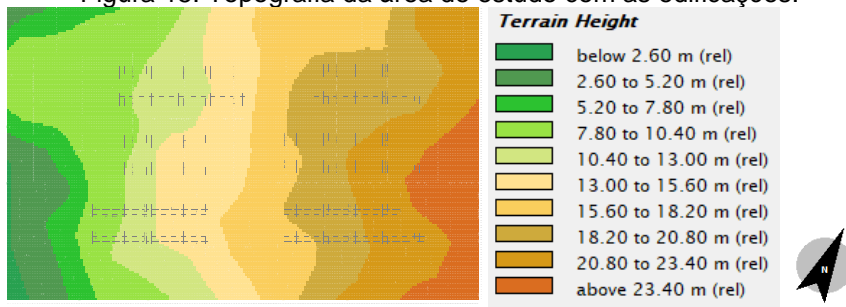
Tabela 1: Características dos materiais utilizados no CR.

Elementos	Materiais	Albedo	Emissividade
Asfalto	<i>Sandy Clay Loam + Basalt + Asphalt with basalt</i>	0,06	0,90
Calçadas	<i>Sandy Clay Loam + Cement concrete</i>	0,30	0,90
Latossolo Vermelho distroférico	<i>Sandy Clay Loam</i>	0,24	0,90

Fonte: Adaptado de Post *et al.* (2000) e Alves e Vecchia (2012).

Além dos materiais e características das superfícies, também foi configurada a topografia, com a base de dados SRTM GL3 Arc_Sec (NASA, 2024), a qual possui resolução de 30 metros. Essa base de dados é disponibilizada no ENVI-met Monde, o qual ajusta sua resolução ao modelo. Na Figura 15 é representada a topografia obtida para o local de estudo.

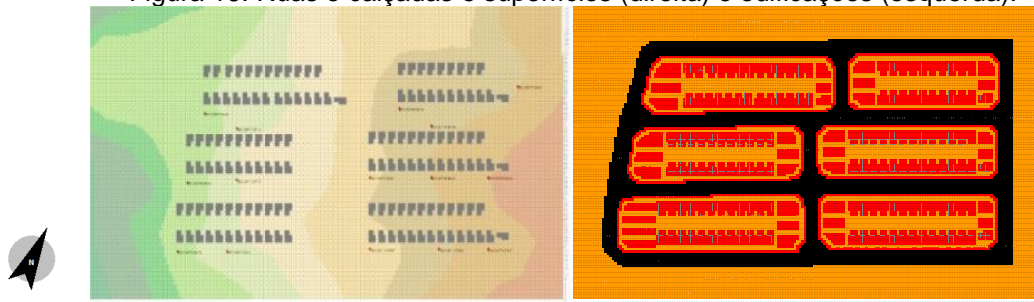
Figura 15: Topografia da área de estudo com as edificações.



Fonte: Autora (2025).

Após todas as configurações e modelagem do C4, foi obtido o modelo a ser simulado. Na Figura 16 estão representadas ruas (em preto), áreas impermeáveis (em vermelho) e edificações (em cinza).

Figura 16: Ruas e calçadas e superfícies (direita) e edificações (esquerda).

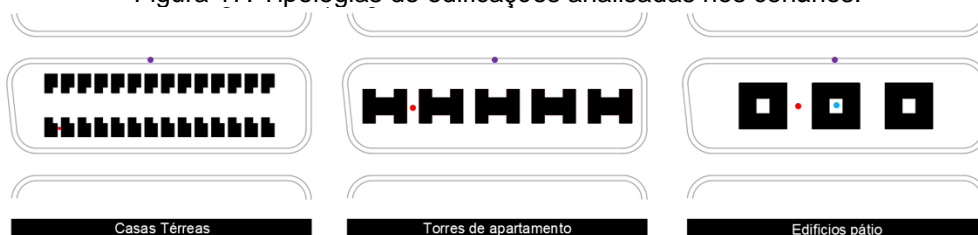


Fonte: Autora (2025).

3.4.2 Cenários hipotéticos de ocupação urbana

Para o estudo da influência da verticalidade e das tipologias habitacionais no conforto térmico e consumo energético de habitações de interesse social, foram modelados outros quatro cenários de ocupação. Para isso, duas tipologias de edificações foram escolhidas: torres em formato H e edifícios pátios, as quais são expostas na Figura 17. A primeira tipologia representa um padrão utilizado em habitações multifamiliares de interesse social no estado de São Paulo, enquanto a segunda ainda não é empregada no Brasil em HIS e a edificação apresentada é proposta pela autora para a pesquisa a ser realizada.

Figura 17: Tipologias de edificações analisadas nos cenários.



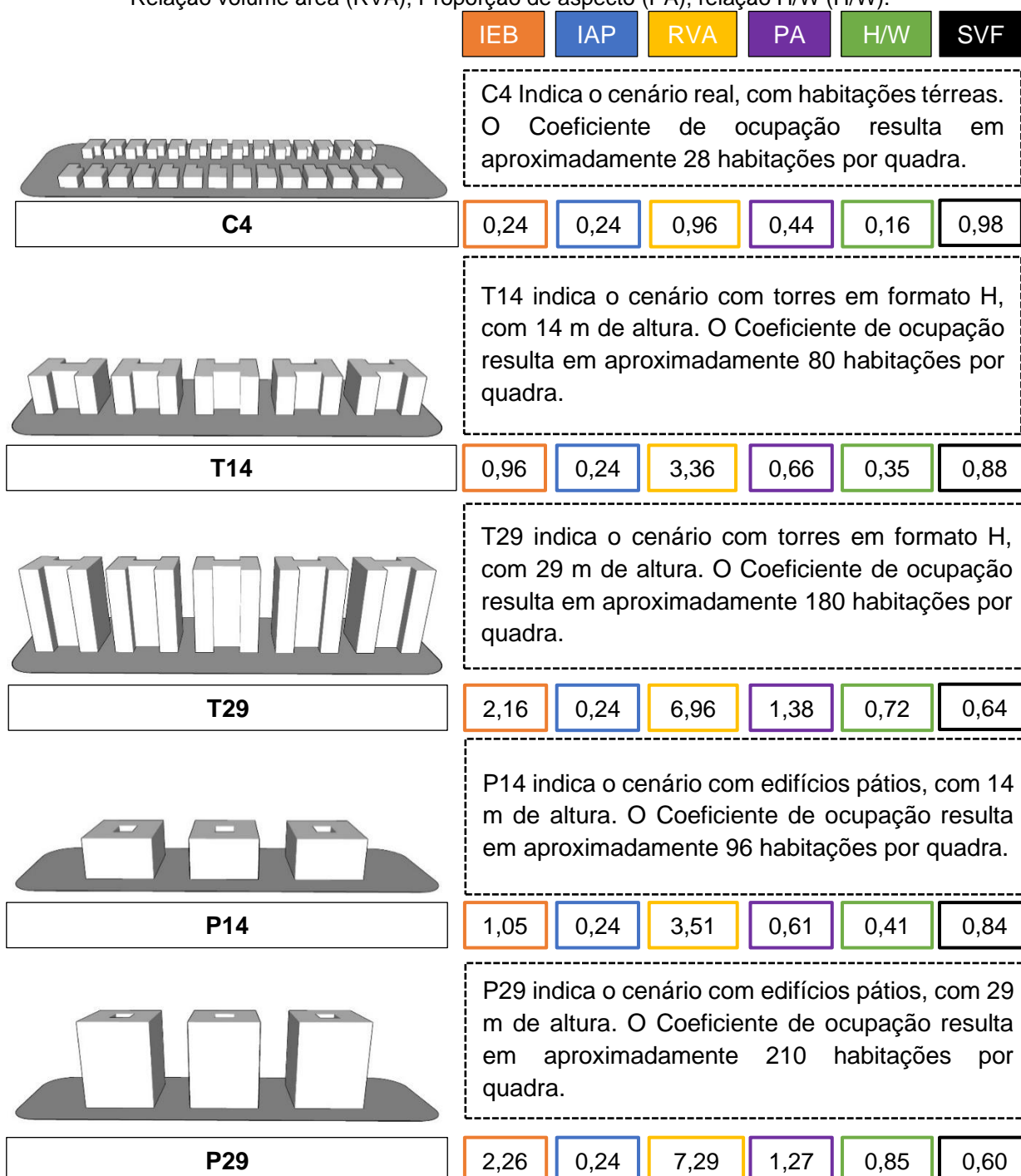
Legenda

- Receptor de análise dos dados externos entre as edificações
- Receptor de análise dos dados externos na calçada
- Receptor de análise dos dados externos no centro dos edifícios pátios

Fonte: Autora (2025).

Para cada tipologia foram analisados dois cenários com diferentes verticalidades, 14 m e 29 m. Para facilitar a identificação dos cenários eles foram nomeados pela letra C (casas térreas), T (torres em formato H) e P (edifícios pátios), seguido da verticalidade das edificações, e a letra H para o dia da onda de calor e N para o dia fora da onda de calor.

Figura 18: Índices morfológicos. Índice de espaço bruto (IEB); Índice de área de piso (IAP); Relação volume área (RVA); Proporção de aspecto (PA); relação H/W (H/W).

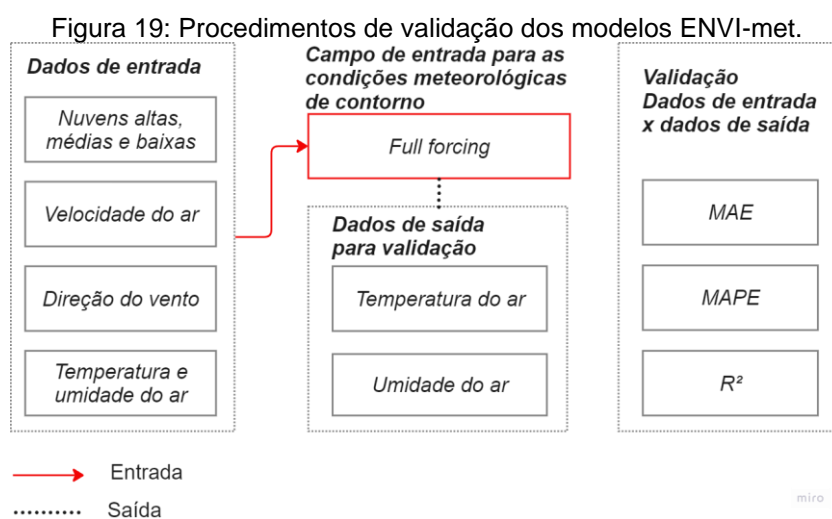


Fonte: Autora (2025).

A variação da verticalidade das edificações resultou em cenários com diferentes índices de morfologia urbana, representados na Figura 18. Nos cenários as áreas permeáveis consistem no Latossolo Vermelho Distroférico, natural do local. Vale ressaltar que a delimitação das áreas foi realizada com base nas dimensões dos *grids* do ENVI-met.

3.5 Simulação e validação dos cenários urbanos no ENVI-met

Para a simulação dos cenários urbanos no ENVI-met foi definido um dia representativo da onda de calor e um dia fora desse período. Os procedimentos de validação são representados na Figura 19.



Fonte: Autora (2025).

O tempo de simulação foi de 48h, correspondentes ao dia de análise e um dia anterior. Os dados de entrada para a simulação do modelo foram a velocidade do vento, direção do vento, temperatura do ar, umidade do ar, nuvens altas, médias e baixas. As fontes dessas variáveis são expostas no Quadro 6.

Quadro 6: Variáveis de validação.

Variáveis	Fonte
Nuvens altas, médias e baixas	Estação meteorológica 83726
Velocidade do ar	Estação meteorológica A711
Direção do vento	Estação meteorológica A711
Temperatura e umidade do ar	Coletado pela autora

Fonte: Organizado pela Autora (2025).

Os dados das variáveis expostas no Quadro 6 foram inseridos no *full forcing* do ENVI-met, onde as condições meteorológicas de contorno da simulação devem ser inseridas. A simulação foi realizada e para a validação do modelo, foram verificadas as diferenças entre os valores de temperatura e umidade relativa do ar medidos em campo e simulados. Para isso, um receptor da simulação foi inserido no mesmo local do ponto de coleta de dados

microclimáticos B, para obter a temperatura e umidade do ar simulados no mesmo local dos medidos em campo.

Para verificar se as diferenças entre a temperatura e umidade do ar simulados e medidos em campo eram aceitáveis, foram utilizadas quatro métricas, o Coeficiente de determinação (R^2), o Índice de concordância de Willmott (d), o Erro Médio Absoluto (MAE) e o Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE).

O R^2 avalia o ajuste do modelo de regressão aos dados, com valor que varia de 0 a 1. Valores próximos a 1 indicam um bom ajuste do modelo de regressão aos dados (Draper; Smith, 1998). O cálculo do R^2 é exposto na Equação 2.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Onde:

R^2 é o coeficiente de determinação;

n é a quantidade de dados;

y_i é o valor observado;

\bar{y} é a média dos valores observados;

\hat{y}_i é o valor predito pelo modelo.

O MAE é a média do erro absoluto entre os valores preditos e os observados (Willmott; Matsuura, 2005). Menores valores indicam um baixo desvio entre o modelo predito e o observado. O cálculo do MAE é exposto na Equação 3.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (3)$$

Onde:

MAE é a média do erro absoluto;

n é a quantidade de dados;

y_i é o valor observado;

\hat{y}_i é o valor predito pelo modelo.

O MAPE, é semelhante ao MAE, porém, o erro absoluto percentual é analisado (Oliveira *et al.*, 2015). Menores valores também indicam um baixo desvio entre o modelo predito e o observado. O cálculo do MAPE é exposto na Equação 4.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

MAPE é o erro absoluto percentual médio;

n é a quantidade de dados;

y_i é o valor observado;

\hat{y}_i é o valor predito pelo modelo.

O Índice de concordância de Willmott (d) avalia o grau de acurácia do valor previsto em relação ao observado (Willmott, 1981). Assim como no R^2 esse índice varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos a 1 indicam que há uma alta concordância entre os dados. O cálculo de d é exposto na Equação 5.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

Onde:

P_i é o valor previsto no tempo i;

O_i é o valor observado no tempo i;

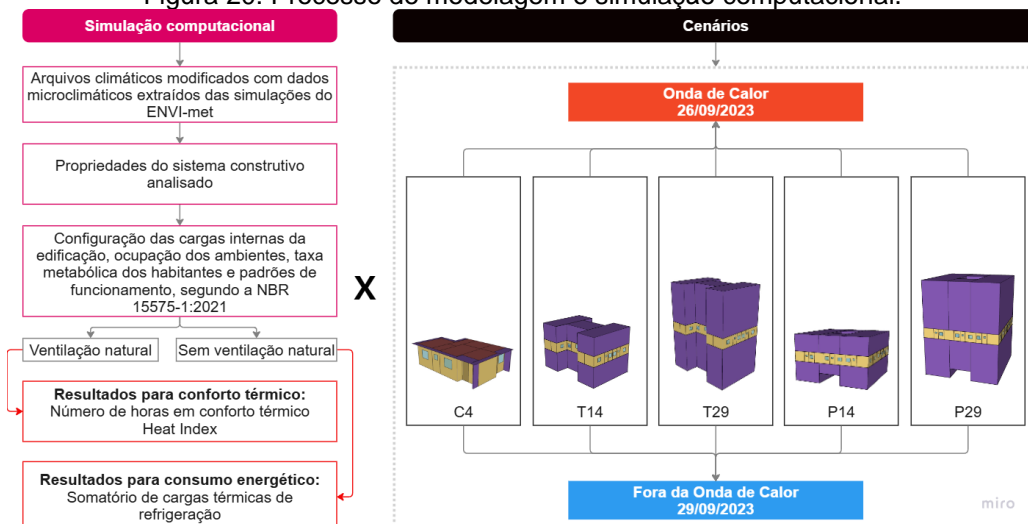
\bar{O} é a média dos valores observados;

N é o número de observações.

3.6 Modelagem e simulação termoenergética das unidades habitacionais

Com o auxílio do *software* Sketchup Make 2017 e do OpenStudio, as unidades habitacionais analisadas nos diferentes cenários de ocupação do local foram modeladas, assim como o seu entorno. Na edificação térrea cada ambiente correspondeu a uma zona térmica. Já nas edificações multifamiliares foi modelado apenas o pavimento central, no qual cada ambiente correspondeu a uma zona térmica e as lajes de piso e cobertura foram definidas como adiabáticas.

Figura 20: Processo de modelagem e simulação computacional.

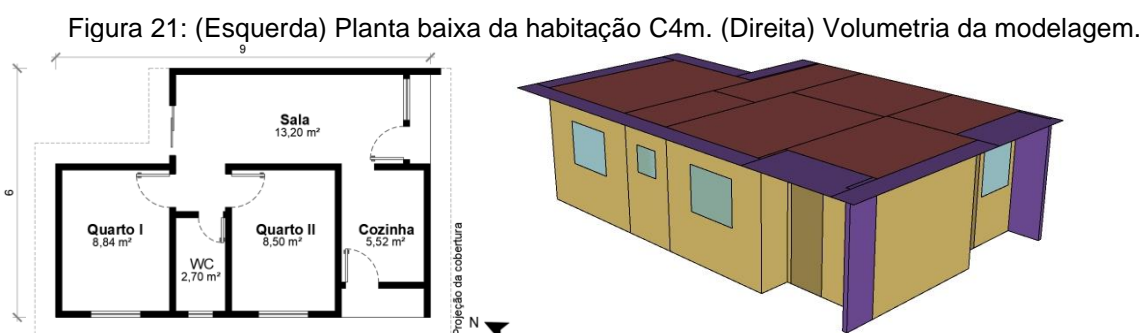


Fonte: Autora (2025).

As simulações termoenergéticas foram realizadas no EnergyPlus 23.2 por este calcular as trocas de calor entre o solo e a edificação, considerar os efeitos da inércia térmica e simular a ventilação cruzada entre ambientes. O processo é exposto na Figura 20.

3.6.1 Modelagem computacional do cenário C4

Para o cenário real (casa térrea) foi modelada a unidade habitacional construída no local, conforme exposto na Figura 21. Esta edificação possui área útil de 38,76 m², e é composta por uma sala, cozinha, banheiro e dois quartos.

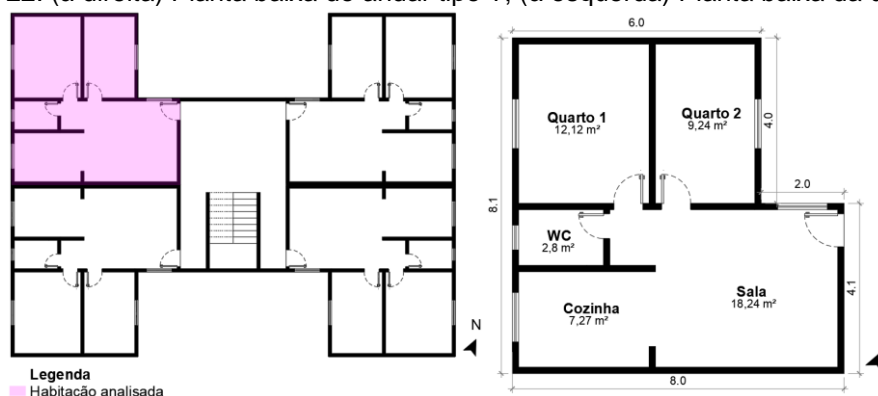


Fonte: Autora (2025).

3.6.2 Modelagens computacionais dos cenários de torres de apartamentos (T)

Nos cenários T foi considerado um padrão de habitações multifamiliares de interesse social construído no estado de São Paulo. Na Figura 22 é ilustrada a planta baixa do pavimento tipo dessa tipologia, a qual conta com 4 unidades habitacionais, compostas por dois quartos, sala, cozinha e banheiro. A área útil de cada habitação é de 49,67 m². Na Figura 22 a unidade habitacional analisada é destacada em rosa, tendo sido definida por possuir orientação das superfícies e aberturas mais semelhantes à da casa térrea.

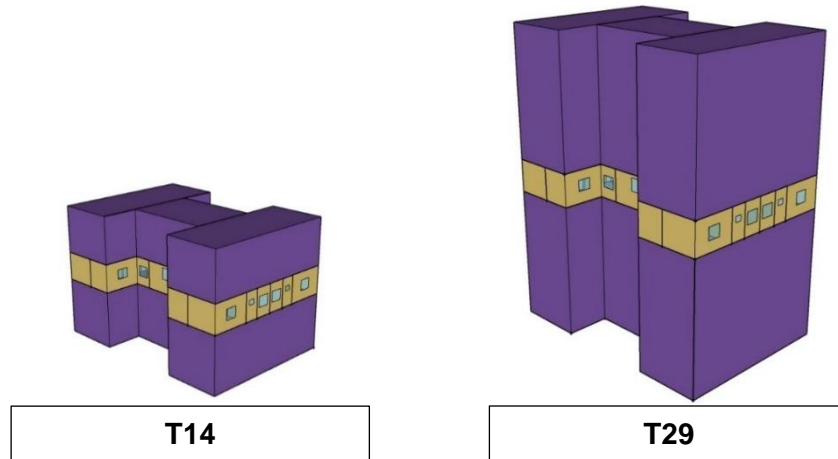
Figura 22: (à direita) Planta baixa do andar tipo T; (à esquerda) Planta baixa da unidade.



Fonte: Autora (2025).

Para essa tipologia foram simulados 2 cenários, com diferentes alturas das edificações, de 14 m e 29 m. As modelagens das edificações desses cenários são expostas na Figura 23.

Figura 23: Modelagens das edificações dos cenários de torres de apartamentos.

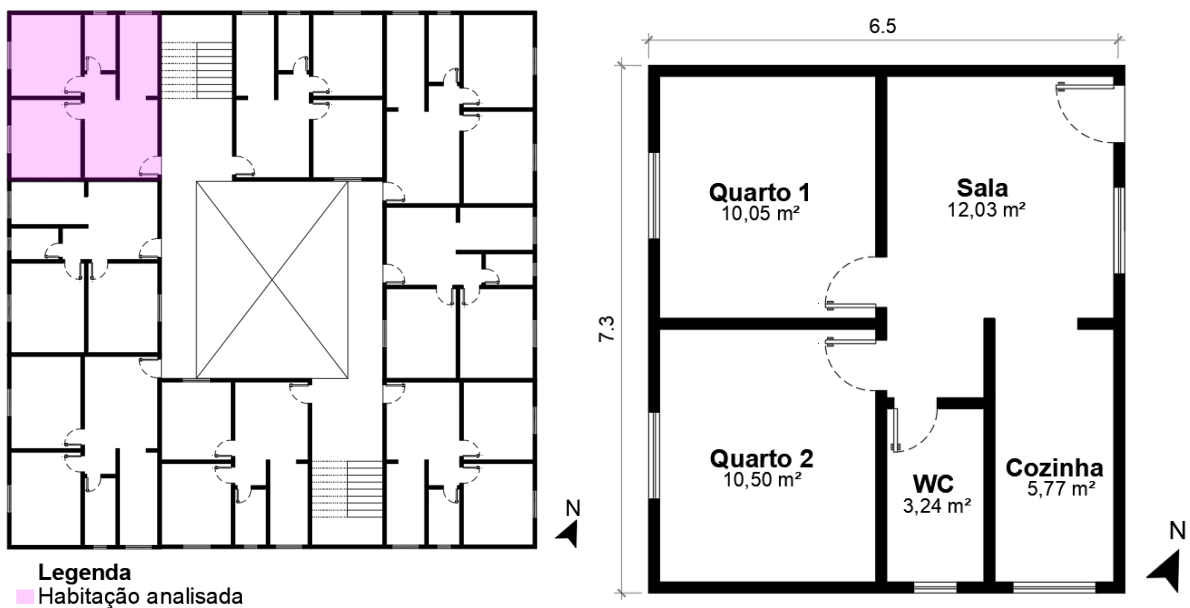


Fonte: Autora (2025).

3.6.3 Modelagens computacionais dos cenários de edificações pátios (P)

A fim de avaliar se edificações com pátios podem melhorar as condições térmicas internas de habitações de interesse social, cenários de simulação foram modelados com essa tipologia, a qual ainda não é utilizada em HIS no Brasil. Na Figura 24 o pavimento tipo e a planta baixa da unidade habitacional dessa tipologia, proposta pela autora, são representados. Cada pavimento possui 10 habitações, compostas por dois quartos, sala, cozinha e banheiro. A área útil de cada habitação é de 41,59 m². Na Figura 24 a unidade habitacional analisada é destacada em rosa, tendo sido definida por possuir orientação das superfícies e aberturas mais semelhantes à da casa térrea.

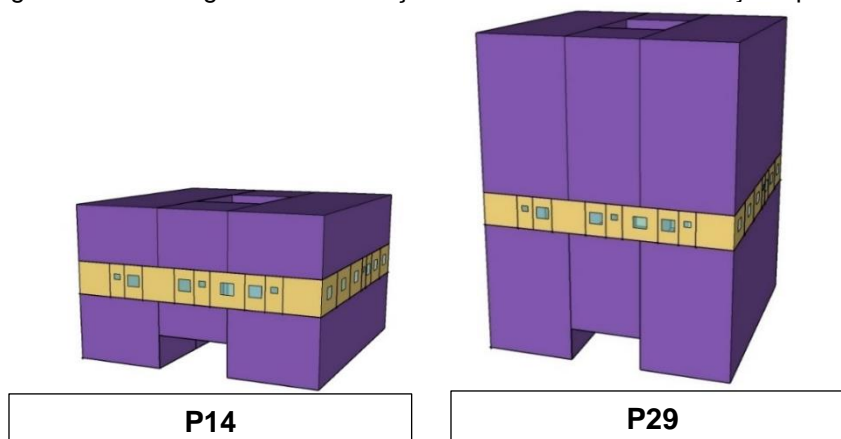
Figura 24: (Esquerda) Planta baixa da habitação C14m. (Direita) Volumetria da modelagem.



Fonte: Autora (2025).

Para essa tipologia também foram simulados dois cenários, com alturas de 14 m e 29 m. As modelagens das edificações desses cenários são expostas na Figura 25.

Figura 25: Modelagens das edificações dos cenários de edificações pátio.



Fonte: Autora (2025).

3.6.4 Sistema construtivo

O sistema construtivo considerado para a configuração das simulações foi o utilizado na construção das habitações do local de estudo. No Quadro 7 são expostas as características deste sistema construtivo.

Quadro 7: Sistema construtivo das habitações.


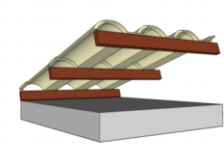
Sistema construtivo	C4	T14	T29	P14	P29
Parede	Concreto (10 cm);				
Cobertura	Telha cerâmica; Laje maciça de concreto (10cm).				

Fonte: Autora (2025).

As propriedades térmicas, expostas na Tabela 2, foram definidas conforme o Projeto de norma ABNT 02:135.07-001/2 (ABNT, 2005) e da biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa EnergyPlus (Weber *et al.*, 2017).

A partir das propriedades de cada material foram calculadas as propriedades térmicas dos componentes, conforme a Figura 26.

Figura 26: Propriedades térmicas das paredes e cobertura.

Parede	Cobertura
	
$\alpha = 0,45$	$\alpha = 0,30$
$U = 4,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $CT = 240 \text{ kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ $\varphi = 2,69 \text{ h}$	$U = 2,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $CT = 238,40 \text{ kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ $\varphi = 6,58 \text{ h}$
Legenda: U - Transmitância térmica; CT - Capacidade térmica; φ - Atraso térmico; μ - Amortecimento térmico; α - Absortância solar	

Fonte: Autora (2025), com base na NBR 15220 (ABNT, 2022).

Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais dos sistemas construtivos.

Sistema construtivo	Material	e [cm]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	ρ [Kg/m ³]	α
Paredes	Concreto	10	1,75	1000	2400	0,45
Cobertura	Cerâmica	1,0	1,05	920	2000	0,30
	Concreto	10,0	1,75	1000	2200	0,20
	Câmara de ar	-	-	-	-	-
Pisos	Concreto	7,5	1,75	1000	2400	0,70
	Contrapiso	2,0	1,15	1000	2000	0,70
	Piso Cerâmico	0,75	1,05	920	2000	0,20
Janelas quartos	Alumínio	0,5	230	880	2700	0,15
Janela sala e wc	Vidro	0,025	0,9	-	-	-
Portas internas	Madeira	3,5	0,2	2300	225	0,20
Porta frontal	Alumínio	0,5	230	880	2700	0,15
Porta posterior	Vidro	0,025	0,9	-	-	-

e é a espessura do material; λ é a condutividade térmica; c é o calor específico; ρ é a densidade; α é a absorvância solar.

¹ Câmara de ar com resistência térmica de 0,21 m².K/W

Fonte: Autora (2025), baseado na NBR 15220 (ABNT, 2022).

3.6.5 Condições de ventilação, padrões de funcionamento e parâmetros de uso

Para a análise do conforto térmico humano e da demanda de energia para climatização das unidades durante e fora da onda de calor foram configurados dois arquivos de simulação para cada cenário, seguindo os dados estabelecidos na NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

O primeiro arquivo de simulação possui ventilação natural, enquanto o segundo apenas condicionamento de ar. Para o modelo sem ventilação natural foi utilizado o módulo *Ideal Loads* do EnergyPlus. Ambas as situações utilizaram parâmetros definidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021), relativos a padrões e condições de funcionamento do condicionamento de ar ou abertura de janelas, os quais se encontram no Quadro 8.

Quadro 8: Padrões de funcionamento dos sistemas de ventilação.

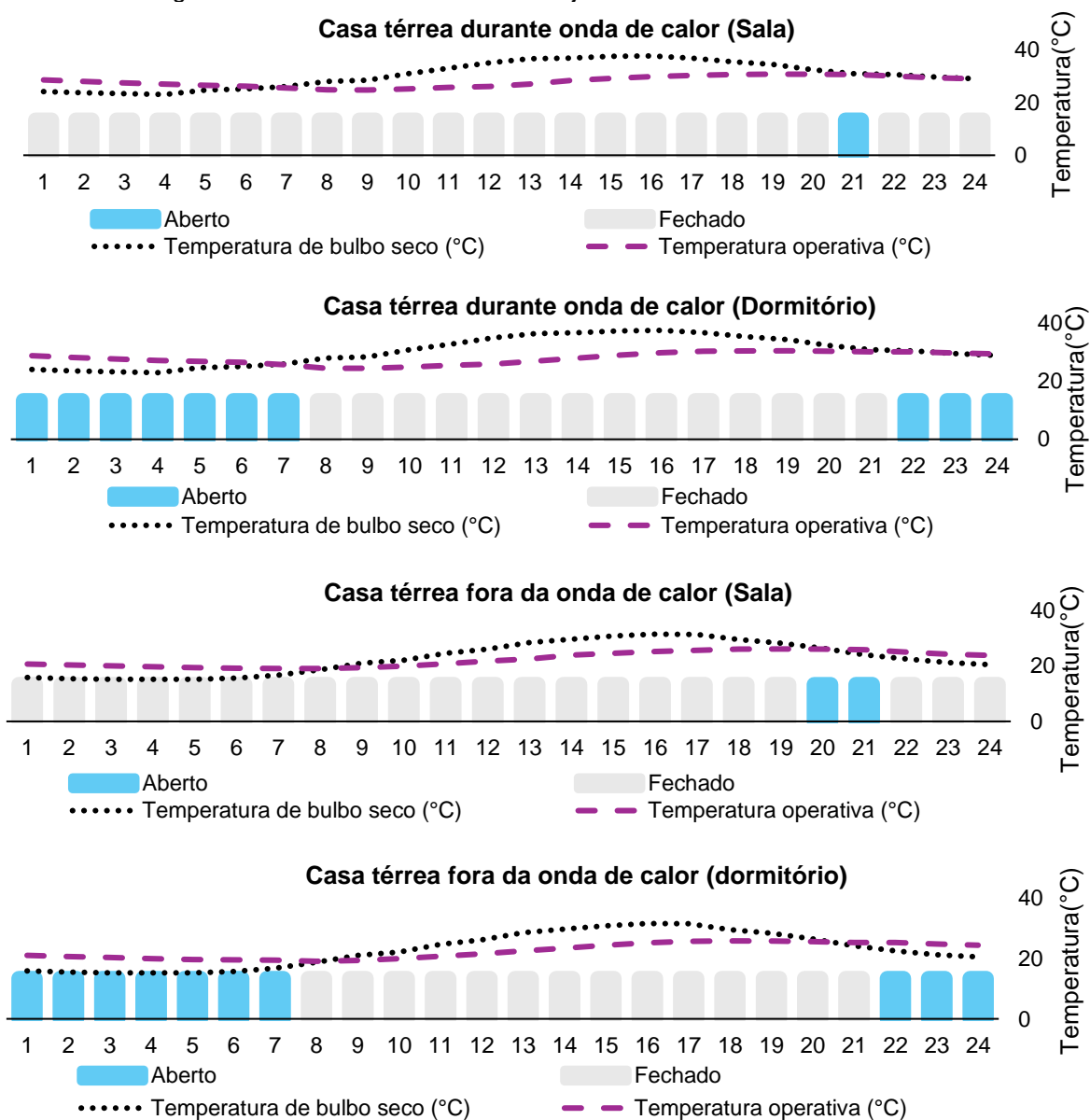
Modelo	Ventilação natural	Sem ventilação natural
Abertura de janelas	Quando houver ocupação.	Todas as portas e janelas devem ser consideradas fechadas durante todo o ano, com exceção da janela do banheiro que deve ser considerada aberta.
	Quando a temperatura de bulbo seco interna do ambiente for igual ou superior a 19 °C e superior à temperatura de bulbo seco externa.	
Abertura de portas internas	Devem estar abertas entre ambientes de permanência prolongada e permanência transitória, exceto para portas de banheiro.	
Abertura de portas externas	Devem estar fechadas durante todo o ano.	
Sistema de refrigeração de ar	Não se aplica.	Quando houver ocupação do ambiente e a temperatura estiver acima de 23° C.
Sistema de aquecimento de ar	Não se aplica.	Quando houver ocupação do ambiente e a temperatura estiver abaixo de 21° C.

Fonte: Autora (2025), baseado na NBR 15575-1:2021.

Para os modelos com ventilação natural foi utilizado o objeto *Zone Airflow*, configurando os campos *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, *ZoneVentilation:DesignFlowRate* e *Zone:CrossMixing*. Em todos estes campos foi utilizado o método de cálculo de trocas de ar por hora, com uma taxa de 1 renovação/hora, tanto na ventilação quanto na infiltração, portanto para a condição de janelas abertas a taxa total foi de 2 renovações/hora.

Visto que a abertura das janelas depende da temperatura de bulbo seco interna do ambiente ser igual ou superior a 19°C e maior que a temperatura de bulbo seco externa, em diversos momentos as janelas estiveram fechadas. A Figura 27 apresenta a condição das janelas da sala e do dormitório 1, na casa térrea (C4), tanto no dia de onda de calor quanto no dia fora desse evento climático. A abertura das janelas foi extraída usando o dado de saída de Taxa de troca de ar de ventilação da zona.

Figura 27: Horários com abertura das janelas no dormitório 1 e sala.



Fonte: Autora (2025).

Em relação aos dados de ocupação, taxa metabólica dos habitantes e cargas internas da edificação, foram especificados os valores expostos na Tabela 3. Além dos parâmetros citados, foram configurados as características dos perfis das esquadrias, segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), expostos no Quadro 9.

Tabela 3: Cargas internas, ocupação e taxa metabólica dos habitantes.

	Ambientes	Sala	Quarto
Ocupação	Nº de ocupantes	4	2
	Porcentagem de ocupação (%)		
	15:00 – 17:59	50	-
	18:00 – 21:59	100	-
	22:00 – 07:59	-	100
Taxa metabólica	Atividade realizada	Sentado ou assistindo TV	Dormindo ou descansando
	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m ² de área de superfície corporal (W)	108	81
	Fração radiante	0,30	0,30
Sistema iluminação	Padrões de uso (%)		
	16:00 – 21:59	100	-
	22:00 – 23:59	-	100
	Densidade de potência instalada (W/m ²)	5,0	5,0
	Fração radiante	0,32	0,32
	Fração visível	0,23	0,23
Equipament	Período de uso	14:00 – 21:59	-
	Potência (W)	120	-
	Fração radiante	0,30	-

Fonte: Autora (2025), baseado na NBR 15575-1:2021.

Quadro 9: Características dos elementos transparentes.

Elemento	Absortância à radiação solar dos perfis	Emissividade de onda longa dos perfis	Condutância térmica	Largura dos perfis das esquadrias
Perfis	0,58	0,90	56,00	50,00

Fonte: Autora (2025), baseado na NBR 15575-1:2021.

Após a configuração, os arquivos foram executados, com dados de saída de temperatura operativa (To), índice de calor e carga térmica total de aquecimento e resfriamento.

3.6.6 Contato da edificação com o solo

O contato da edificação com o solo foi realizado com o modelo de cálculo *Finite Difference*, conforme exposto por Eli *et al.* (2019). Para a utilização desse modelo foram necessários parâmetros referentes ao solo, os quais podem ser vistos na Tabela 4, definidos para um solo argiloso arenoso.

Tabela 4: Parâmetros do solo.

Parâmetro	Unidade	Valor
Condutividade do solo	W/m.K	1
Densidade do solo	Kg/m ³	1800
Calor específico	J/kg.K	1200

Fonte: Autora (2025), com base em Oke (1987).

Os dados de parâmetro do solo foram inseridos no objeto *Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference* e para os campos de “Fração volumétrica do conteúdo de umidade do solo”, “Fração volumétrica do conteúdo de umidade do solo na saturação” e “Parâmetro de cobertura do solo para evapotranspiração” foram utilizados os valores padrões do programa.

Para a utilização do modelo de cálculo *Finite Difference* também foi configurado o objeto *Site:GroundDomain:Slab*, com a utilização do *Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference* e *on grade* no campo “*Slab Location*”. Todos os demais campos do *Site:GroundDomain:Slab* utilizaram os valores padrões do programa, conforme recomendação de Eli *et al.* (2019).

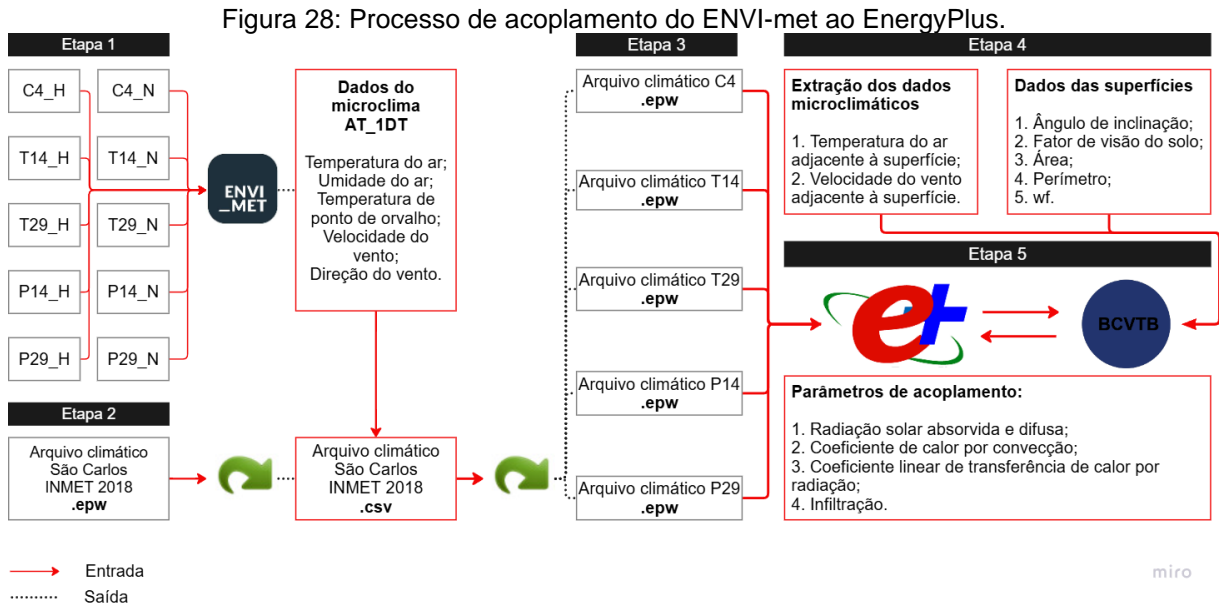
3.7 Acoplamento do ENVI-met ao EnergyPlus

Para avaliar o impacto de diferentes morfologias urbanas nas condições térmicas das habitações, foi necessário o acoplamento entre o ENVI-met e o EnergyPlus. Os processos de acoplamento do microclima urbano em simulações termoenergéticas de edificações variam em relação aos *softwares* utilizados, aos parâmetros acoplados e aos níveis de acoplamento.

Em métodos mais simplificados, apenas o arquivo climático utilizado no EnergyPlus é modificado com dados simulados para o microclima. No contexto brasileiro, dois estudos seguiram essa abordagem: o de Krebs e Johansson (2021), que avaliou o impacto de telhados verdes no conforto térmico de uma habitação, e o de Gonçalves *et al.* (2024) que investigou os efeitos da inserção de árvores, das porcentagens de áreas permeáveis e pavimentos no desempenho e conforto térmico de habitações.

Entretanto, assim como citado por Krebs e Johansson (2021), há métodos de acoplamento mais sofisticados, nos quais a edição do arquivo climático representa apenas uma das etapas. Nesse sentido, destaca-se o método desenvolvido por Yang *et al.* (2012), adotado em estudos como os de Ge *et al.* (2024) e Salvati *et al.* (2020), e que será utilizado nesta pesquisa. Além da modificação do arquivo climático, esse método inclui o acoplamento de variáveis como a radiação direta e difusa absorvidas, o coeficiente de transferência de calor convectivo, o coeficiente de transferência de calor linear por radiação e a transferência de calor por infiltração.

Inicialmente, o cenário urbano é simulado no ENVI-met para a obtenção dos dados microclimáticos, que posteriormente serão acoplados ao EnergyPlus. Os procedimentos para o acoplamento são apresentados na Figura 28.



Fonte: Autora (2025).

Para realizar o acoplamento é essencial compreender o funcionamento do EnergyPlus. As cargas internas de uma zona, conforme Yang *et al.* (2012) são calculadas a partir da Equação 6 .

$$Q_{internalloads} = Q_{internalheatgains} + Q_{convectiveheatgains} + Q_{infiltration} + \Delta E_{air} \quad (6)$$

Onde:

$Q_{internalloads}$ é a carga térmica de aquecimento e resfriamento do edifício;

$Q_{internalheatgains}$ são os ganhos internos de calor provenientes de pessoas, equipamentos e luzes;

$Q_{convectiveheattransfer}$ é a transferência de calor convectivo entre superfícies internas das zonas;

$Q_{infiltration}$ é a transferência de calor devido a infiltração com o ar externo;

ΔE_{air} são as mudanças de energia armazenada no ar da zona.

Da equação acima, o fluxo de calor convectivo e a transferência de calor devido a infiltração com o ar externo são influenciados pela interação entre as superfícies externas do edifício e o microclima urbano (Ramesh, 2017). Neste contexto, o balanço de calor da superfície externa é obtido pela Equação 7.

$$q_{\alpha sol} + q_{lwr} + q_{conv} - q_{ko} = 0 \quad (7)$$

Onde:

q_{asol} é o fluxo de calor de radiação direta e difusa absorvida;

q_{LWR} é o fluxo líquido de radiação térmica de onda longa trocado com o ar e os arredores;

q_{conv} é a troca do fluxo convectivo com o ar externo;

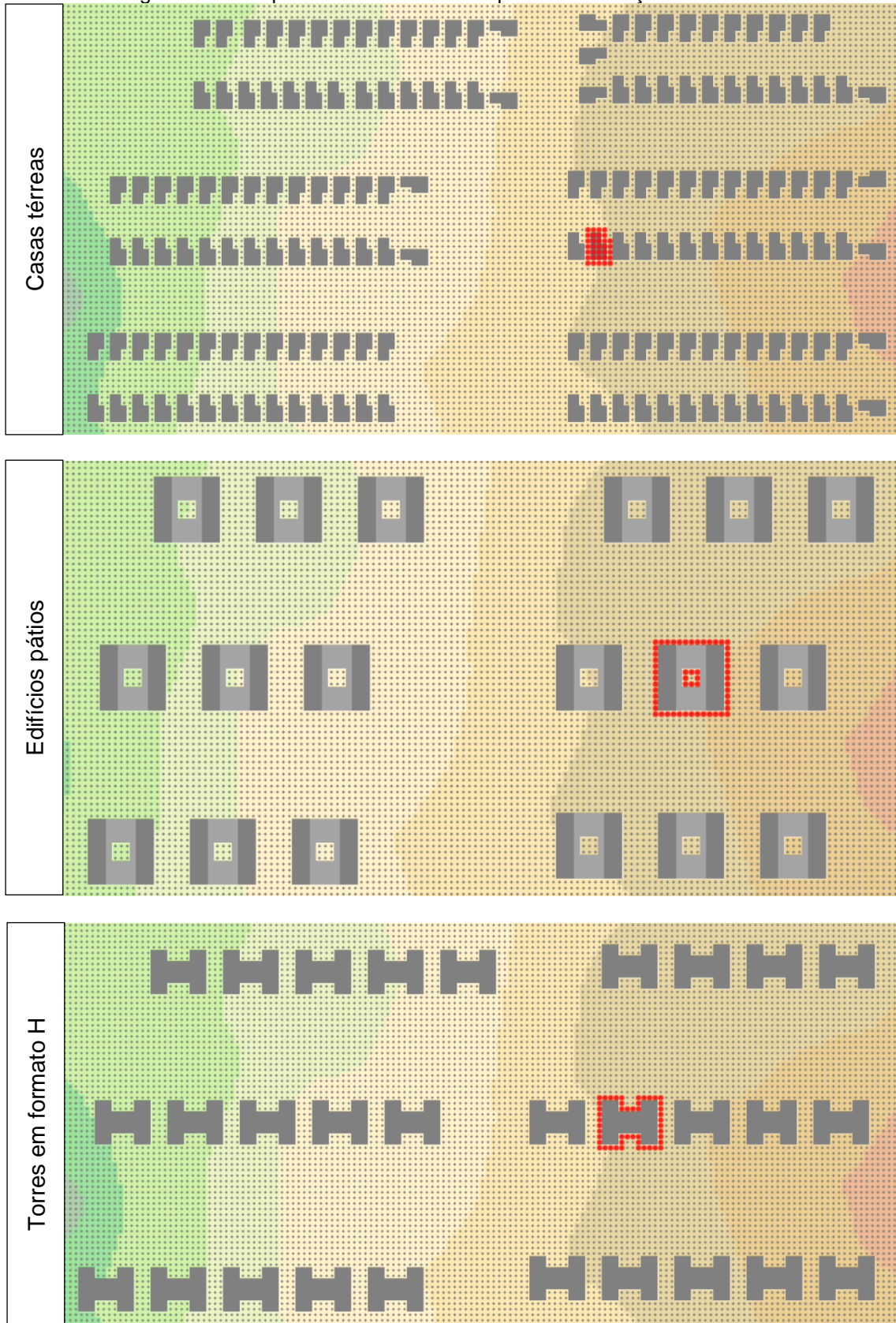
q_{ko} é o fluxo de calor por condução na parede.

Segundo Ramesh (2017) e Yang *et al.* (2012), Para considerar as variáveis das Equações 5 e 6, influenciadas pelo microclima, são necessárias três considerações. (I) O arquivo climático e os fluxos de radiação direta e difusa absorvidas; (II) o coeficiente de transferência de calor convectivo e o coeficiente de transferência de calor linear por radiação; (III) A infiltração. Para isso são necessárias cinco etapas, descritas a seguir.

3.7.1 Etapa 1: Extração dos dados climáticos

Inicialmente os dados microclimáticos de velocidade e direção do vento e a temperatura e umidade do ar, das simulações do ENVI-met são extraídos. A partir desses dados é calculada a temperatura do ponto de orvalho. Visto que os dados microclimáticos provenientes do ENVI-met são espacializados, a condição microclimática dominante é definida a partir da média dos dados dos *grids* ao redor de uma edificação. Para inserção no arquivo climático é calculada a média dos dados microclimáticos nesses pontos, na altura do centro da edificação, conforme recomendado no método de encadeamento (Lauzet *et al.*, 2019; Ramesh, 2017; Yang *et al.*, 2012). Nos cenários propostos foi definida uma edificação central à área simulada, conforme representado na Figura 29.

Figura 29: Receptor de coleta de dados para as simulações internas.



Legenda
● Receptores

Fonte: Autora (2025).



3.7.2 Etapa 2: Conversão do arquivo climático

Na segunda etapa o arquivo climático de São Carlos INMET 2018 (disponibilizado no *site* Labeeee (2024)) foi convertido para o formato .csv, por meio do DeEPWaCSV, programa elaborado por Campos (2018), vinculado a distribuidora oficial do *software* DesignBuilder na Espanha. Essa etapa permitiu a edição do arquivo climático.

3.7.3 Etapa 3: Edição do arquivo climático

Na terceira etapa, os dados do microclima obtidos na etapa 1 foram inseridos no arquivo climático de São Carlos. Os procedimentos dessa etapa resultaram em um arquivo climático para cada cenário.

Por fim, como os dados inseridos no arquivo climático foram obtidos de alturas diferentes das estações meteorológicas, no objeto “*SiteWeatherStation*” do EnergyPlus foi indicada a altura de coleta dos dados climáticos, para que o programa faça a conversão necessária.

3.7.4 Etapa 4: Mapeamento dos dados do ENVI-met para o acoplamento

O ENVI-met e o EnergyPlus possuem algumas diferenças em seus modelos geométricos. No ENVI-met todas as superfícies são divididas em *grids*, enquanto no EnergyPlus as superfícies são consideradas elementos individuais. Dessa forma, para acoplar os dados entre estes programas, é necessário um mapeamento de dados.

Nesta etapa, identifica-se quais receptores do ENVI-met correspondem a cada superfície externa no EnergyPlus e em seguida a média dos dados climáticos destes receptores é calculada (temperatura do ar e velocidade do vento próximas à superfície), para ser vinculada a superfície equivalente no EnergyPlus. A média das variáveis climáticas de cada superfície é inserida no BCVTB para o acoplamento, com valores a cada *timestep* da simulação do EnergyPlus. O mapeamento foi realizado com o programa RStudio.

3.7.5 Etapa 5: Acoplamento por meio do *software* BCVTB

Para o acoplamento dos dados microclimáticos ao EnergyPlus, foi utilizado o *software* BCVTB, desenvolvido pelo Laboratório Nacional Lawrence Berkeley. Esse programa opera com base na interface do Ptolemy II e requer a configuração de um arquivo .cfg. Nesse arquivo, é necessário especificar as variáveis a serem acopladas ao EnergyPlus, na ordem exata em que serão integradas, bem como os dados de saída desejados. A Figura 30 apresenta uma parte do arquivo .cfg configurado para o cenário C4_H.

Figura 30: Parte do arquivo .cfg do cenário C4_H.

```
variables - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<!DOCTYPE BCVTB-variables SYSTEM "variables.dtd">

<BCVTB-variables>

<variable source="EnergyPlus">
  <EnergyPlus name="Environment"
    type="Site Wind Speed"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface47"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface48"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface54"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface49"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface70"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface71"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface72"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface17"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface22"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface16"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <EnergyPlus actuator="OutdoorADBSurface42"/>
</variable>

<variable source="Ptolemy">
  <
</variable>

Ln 8, Col 19 100% Unix (LF) UTF-8
```

Fonte: Autora (2025).

3.7.5.1 Radiação direta e difusa absorvidas

Nesta etapa são consideradas a radiação solar incidente, os efeitos do sombreamento e a refletância do solo. Em relação à radiação difusa e refletida e aos efeitos de sombreamento, os cálculos do EnergyPlus são mais precisos que o do ENVI-met (Ramesh, 2017; Yang *et al.*, 2012). Por este motivo, o entorno da edificação foi modelada no EnergyPlus para que esses cálculos fossem realizados. Quanto à refletância do solo, o cálculo pelo EnergyPlus é simplificado e, por isso, a média das simulações do ENVI-met foi inserida no objeto “Site:GroundReflectance” do EnergyPlus.

3.7.5.2 Coeficiente de Transferência de Calor Convectivo

No EnergyPlus o coeficiente de transferência de calor convectivo é calculado por meio da Equação 8 (Berkeley *et al.*, 2020).

$$Q_c = hc_{ext} - A(T_{surf} - T_{air}) \quad (8)$$

Onde:

Q_c é a taxa de transferência de calor convectivo externo;

hc_{ext} é o coeficiente de convecção externo;

A é a área da superfície;

T_{surf} é a temperatura da superfície;

T_{air} é a temperatura externa do ar.

As correlações desta equação só podem ser aplicadas quando a velocidade do vento é obtida de estações meteorológicas, representando a velocidade do vento ao nível do terreno (Ramesh, 2017; Yang *et al.*, 2012). Ao utilizar o ENVI-met a velocidade do vento é calculada para cada *grid*, o que invalida o uso da Equação 7. Desta forma para calcular o CHTC, Ramesh (2017) e Yang *et al.* (2012), propõem a Equação 9.

$$hc_{ext} = 4 + 4v \quad (9)$$

Onde:

hc_{ext} é o CHTC;

v é a velocidade do vento adjacente à superfície.

A partir da Equação 8 o CHTC é calculado para cada superfície e sobrescrito no EnergyPlus. Para isso é utilizado o objeto “*ExternalInterface:Actuator*”, o qual, a cada *time*

step, recebe do BCVTB o valor calculado do CHTC. O “*ExternalInterface:Actuator*” utilizado para sobrescrever esses valores é o “*Exterior Surface Convection Heat Transfer Coefficient*”.

A Equação 8 é aplicável para velocidades do vento entre 1 e 10 m/s, por isso, para velocidades abaixo de 1 m/s foi utilizado o método TARP, conforme recomendado por Yang *et al.* (2012). Esse método existe dentro do EnergyPlus e é descrito em sua documentação (Berkeley *et al.*, 2020).

3.7.5.3 Coeficiente de Transferência de Calor Linear por Radiação

No EnergyPlus o Coeficiente de Transferência de calor linear por radiação é obtido pela Equação 10 (Berkeley *et al.*, 2020; Ramesh, 2017; Yang *et al.*, 2012).

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon \sigma F_{air}(T_{Surface}^4 - T_{air}^4)}{T_{surface} - T_{air}} \quad (10)$$

$h_{r,air}$ é o coeficiente de transferência de calor linear por radiação;

ε é a emitância de ondas longas pela superfície;

F_{air} é o fator de visão da superfície para a temperatura do ar;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann;

$T_{surface}$ é a temperatura externa da superfície no ENVI-met;

T_{air} é a temperatura externa do ar adjacente à superfície.

Para considerar os efeitos deste coeficiente no EnergyPlus, seguiu-se as recomendações de Yang *et al.* (2012). Nesta abordagem, o h_r é somado ao CHTC, o qual então é substituído pelo “*Exterior Surface Convection Heat Transfer Coefficient*”, conforme citado no tópico 3.7.5.2. Este processo é realizado devido à ausência de um *ExternalInterface:Actuator* para substituir o Coeficiente de Transferência de calor linear por radiação no EnergyPlus, de superfícies expostas ao ar externo.

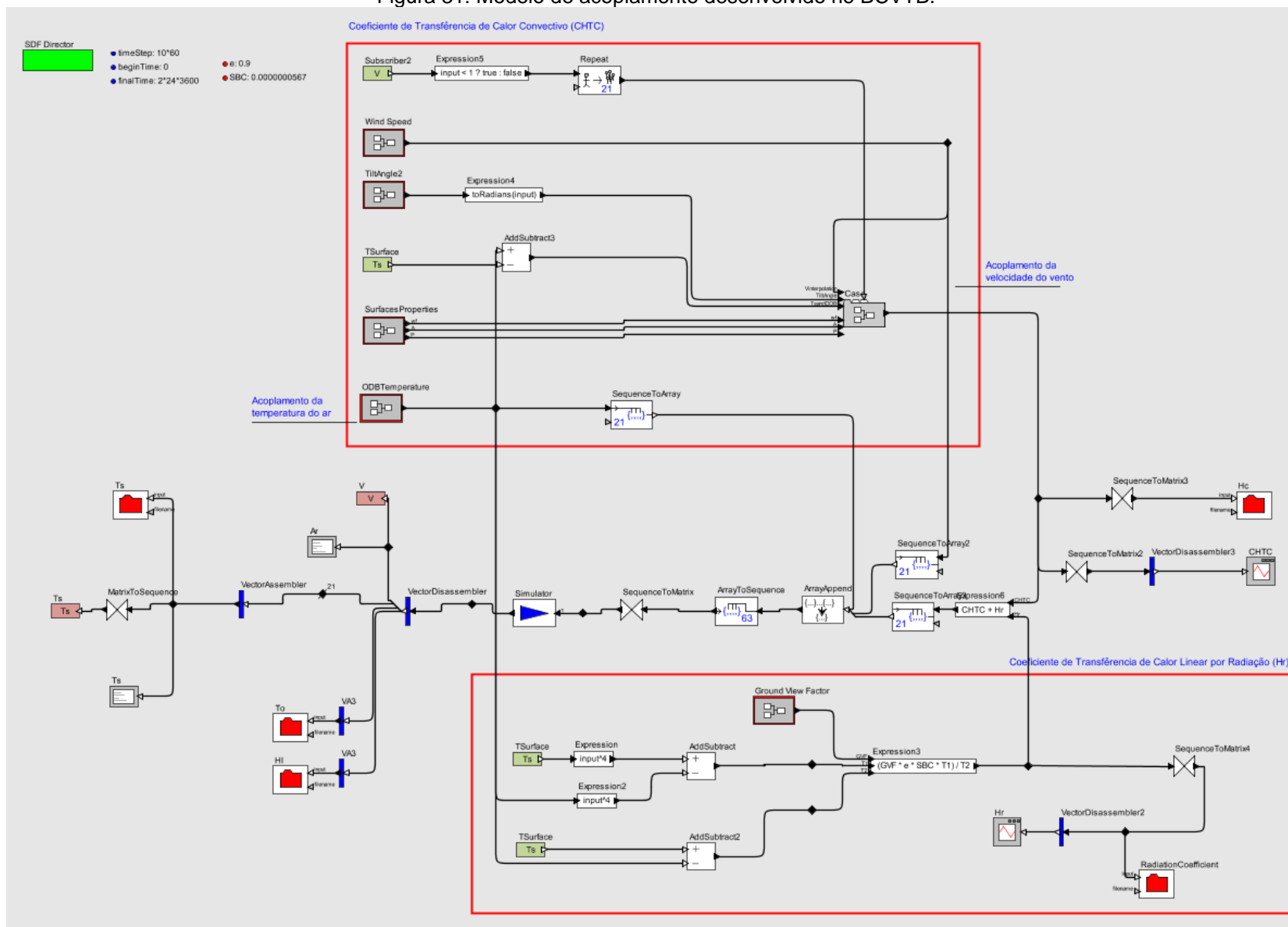
Devido a tanto o CHTC quanto o h_r utilizarem a temperatura da superfície em seus cálculos, primeiramente foi acoplada a temperatura do ar adjacente a cada superfície, simulada no ENVI-met, por meio do Actuator “*Outdoor Air Drybulb Temperature*” no “*ExternalInterface*”. Com esse processo a temperatura de superfície é calculada com as novas temperaturas do ar e os cálculos do h_r e CHTC são realizados.

3.7.5.4 Transferência de calor por infiltração

Para esta etapa é necessário acoplar a temperatura externa do ar e velocidade do vento para cada superfície. A temperatura externa do ar foi acoplada no tópico 3.7.5.3,

faltando apenas acoplar a velocidade do vento. Para isso, foi utilizado o actuator “Outdoor Air Wind Speed”. A Figura 31 apresenta o acoplamento desenvolvido para o C4_H, com base no exposto por Ramesh (2017), onde as etapas anteriores são configuradas, com as equações, o recebimento dos dados do ENVI-met e o envio para o EnergyPlus a cada timestep .

Figura 31: Modelo de acoplamento desenvolvido no BCVTB.



Fonte: Autora (2025).

3.8 Procedimentos para análise dos resultados nos ambientes externos e internos

As simulações do microclima urbano serão utilizadas para avaliar o impacto da verticalidade das edificações e tipologias habitacionais no nível de conforto térmico externo ao nível de pedestre, assim como a influência na temperatura do ar externo e nos ambientes internos das edificações. As simulações internas, por sua vez, permitirão a análise de duas questões, a demanda de energia para climatização, o conforto térmico humano apenas com a ventilação natural e o nível de estresse térmico.

3.8.1 Caracterização do período de onda de calor

A caracterização do período de onda de calor nos dados coletados foi realizada conforme o descrito pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Nesta definição, proveniente da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), onda de calor consiste no período de cinco ou mais dias consecutivos com temperaturas máximas diárias acima da máxima média mensal em 5 °C, ou mais (INMET, 2023).

Visto que os dados microclimáticos foram coletados durante o mês de setembro e outubro, foram obtidas as normais climatológicas desses meses para a cidade de São Carlos. Os dados foram obtidos da estação INMET 83726, para a normal climatológica de 1991-2020. As Temperaturas máximas da normal climatológica de setembro e outubro são de 28,2 °C e 28,9 °C, respectivamente. Dessa forma, os limites para onda de calor correspondem a 33,2 °C e 33,9°C, respectivamente. Com base nos limites de temperatura para setembro e outubro, foram identificados os dias de onda de calor dos dados microclimáticos coletados. Na Tabela 5 são expostas as temperaturas máximas diárias do período de coleta.

Tabela 5: Temperaturas máximas diárias do dia 15/09/2023 a 03/10/2023 (continua).

Data	Temperatura máxima diária (°C)		
	83726	A711	Ponto B
15/09/2023	26,6	25,9	*
16/09/2023	31,4	31,2	*
17/09/2023	*	33,8	*
18/09/2023	30,7	31,8	*
19/09/2023	33,6	33,50	*
20/09/2023	33,2	33,30	33,44
21/09/2023	34,20	34,00	33,34
22/09/2023	34,80	34,80	33,97
23/09/2023	29,30	35,80	34,52
24/09/2023	*	36,60	35,93
25/09/2023	37,40	37,60	36,12
26/09/2023	37,20	37,10	36,85
27/09/2023	33,40	33,40	33,00
28/09/2023	23,80	24,20	23,91

Tabela 5: Temperaturas máximas diárias do dia 15/09/2023 a 03/10/2023 (finaliza).

Data	Temperatura máxima diária (°C)		
	83726	A711	Ponto B
29/09/2023	31,20	30,70	30,39
30/09/2023	32,80	32,30	32,64
01/10/2023	*	26,70	25,53
02/10/2023	30,20	29,60	28,59
03/10/2023	32,50	32,00	31,84

* Dados não registrados ou coletados;

Em vermelho temperaturas acima da média máxima mensal da normal climatológica 1991-2019.

Fonte: Autora (2025) e INMET A711 e 83726.

As temperaturas máximas diárias registradas na estação A711, indicam que a onda de calor se iniciou no dia 19/09 e finalizou no dia 27/09. Por outro lado, os valores acima de 33,14 °C da estação 83726 não ocorreram por mais de cinco dias consecutivos, provavelmente devido a um erro de medição. Optou-se por considerar os dados da estação A711, que apresenta onda de calor correspondente com o informado pelo INMET

3.8.2 Conforto térmico externo

Dentre os índices existentes para a medição do conforto térmico externo, o Voto Médio Predito (PMV) e a Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) são comumente empregados. O PET foi elaborado para trazer um resultado mais compreensível aos planejadores urbanos e outras pessoas fora do campo da Termo Fisiologia (Mayer; Höppe, 1987). Para isso, seu resultado é obtido em °C, diferentemente do PMV que consiste em uma escala de -3 a 3. Devido a maior facilidade de compreensão de seus resultados, o PET será utilizado para avaliar conforto térmico externo neste trabalho.

O PET deriva do modelo de balanço de calor MEMI, o qual se baseia no balanço energético do corpo humano e parâmetros do modelo Gagge two-node (Höppe, 1999). O MEMI é obtido por meio das Equações (11), (12) e (13), que possibilitam o cálculo do estado térmico do corpo humano para diferentes parâmetros climáticos (Höppe, 1999).

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} = 0 \quad (11)$$

$$F_{CS} = V_b \cdot \rho_b \cdot C_b \cdot (T_c - T_{sk}) \quad (12)$$

$$F_{sc} = \left(\frac{1}{I_{cl}}\right) \cdot (T_{sk} - T_{cl}) \quad (13)$$

Sendo:

M é a taxa metabólica;

W é o trabalho físico;

R é a radiação líquida do corpo;

C é o fluxo de radiação convectiva;

E_d é o fluxo de calor latente;

E_{Re} é a soma dos fluxos de calor para o aquecimento e umidificação do ar inspirado;

E_{sw} é o fluxo de calor devido a evaporação do suor;
 F_{cs} é o fluxo de calor do centro do corpo até a pele;
 F_{sc} é o fluxo de calor da pele até a superfície da roupa;
 V_b é o fluxo de calor do centro do corpo até a pele;
 P_b é a densidade do sangue;
 C_b é o calor específico;
 T_c é a temperatura central do corpo;
 T_{sk} é a temperatura média da superfície da pele;
 T_{cl} é a temperatura média da superfície da roupa;
 I_{cl} é a resistência ao calor da roupa.

Desta forma, o PET é obtido com o cálculo das condições térmicas do corpo para as condições meteorológicas analisadas, por meio das Equações (11), (12) e (13), considerando a temperatura do ar (com velocidade = 0,1 m/s, VP=12 hPa e temperatura média radiante = temperatura do ar) (Höppe, 1999). A escala de interpretação dos resultados PET são expostos no Quadro 10.

Quadro 10: Níveis de estresse fisiológico.

PET (°C)	Percepção térmica	Grau de estresse fisiológico
4	Muito frio	Extremo estresse térmico por frio
8	Frio	Forte estresse térmico por frio
13	Frio	Moderado estresse térmico por frio
18	Levemente frio	Leve estresse térmico por frio
23	Confortável	Sem estresse térmico
29	Levemente quente	Leve estresse térmico por calor
35	Quente	Moderado estresse térmico por calor
41	Quente	Forte estresse térmico por calor
	Muito quente	Extremo estresse térmico por calor

Fonte: Adaptado de Matzarakis e Mayer (1996).

3.8.3 Conforto térmico interno adaptativo

A análise do conforto térmico para ambientes internos se baseou na ASHRAE 55 (American Society Of Heating, 2017), a qual utiliza o método adaptativo, que relaciona as temperaturas externas com as temperaturas operativas dos ambientes. Dessa forma, para a análise do conforto térmico são definidos limites de temperatura operativa aceitáveis, conforme a temperatura média predominante do ar externo ($t_{pma}(ext)$). Os cálculos para estes valores podem ser vistos no Quadro 11.

Quadro 11: Cálculo da $tpma(ext)$ e limites de aceitabilidade de temperatura operativa.

Parâmetro	Equação
$tpma(ext)$	$0,34tod_{-1} + 0,23tod_{-2} + 0,16tod_{-3} + 0,11tod_{-4} + 0,08tod_{-5} + 0,05tod_{-6} + 0,03tod_{-7}$
Limite superior de 80% de aceitabilidade (°C)	$0,31 tpma(ext) + 21,3$
Limite inferior de 80% de aceitabilidade (°C)	$0,31 tpma(ext) + 14,3$
tod ₋₁ corresponde a temperatura média do ar no dia anterior a análise. Na ausência destes dados pode ser utilizada a média mensal de estações meteorológicas.	

Fonte: Adaptado de American Society of Heating (2017).

Neste modelo há o aumento do limite superior de aceitabilidade da temperatura operativa, para valores superiores a 25°C. O critério para este ajuste é exposto no Quadro 12 e se aplica nos casos em que os usuários possuem controle da velocidade do vento.

Quadro 12: Parâmetros para correção do limite superior de temperatura operativa.

Velocidade média do ar > 0,3 e ≤ 0,6m/s	Velocidade média do ar > 0,6 e ≤ 0,9m/s	Velocidade média do ar > 0,9 e ≤ 1,2m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: Adaptado de American Society of Heating (2017).

Além dessa correção, há também o ajuste do limite inferior. Para temperaturas operativas internas maiores que 19,5 °C, com temperatura média do ar externa superior a 16,5 °C, essa passa a ser de 19,5 °C. Vale destacar que esse método só é aplicável para $tpma(ext)$ entre 10 °C e 33,5 °C.

3.8.4 Índice de Calor (Heat Index)

Para avaliar o risco de sobreaquecimento interno foi adotado o índice de calor (IC), desenvolvido por Rothfusz (1990). Esse índice foi elaborado com base em diversos estudos biometeorológicos, em especial o de Steadman (1979). Diversos parâmetros são considerados no cálculo desse índice, sendo eles: pressão do vapor, dimensões humanas, radiação efetiva da pele, vestimenta, temperatura corporal interna, pressão de vapor do núcleo corporal, temperatura de superfície da pele e vestimenta, atividade, velocidade do ar, resistência a transferência de calor da roupa, resistência a transferência de umidade da roupa, radiação e convecção da superfície da pele e taxa de sudorese (Rothfusz, 1990).

A Equação para o cálculo de HI foi elaborada com base em regressões multilíneas, que utilizam apenas a temperatura de bulbo seco do ambiente e a umidade relativa para abranger todos os parâmetros citados anteriormente (Rothfusz, 1990). A Equação 14 representa o cálculo do HI.

$$HI = -42,379 + 2,04901523T + 10,14333127R - 0,22475541TR - 6,83783 \cdot 10^{-3}T^2 - 5,481717 \cdot 10^{-2}R^2 + 1,22874 \cdot 10^{-3} \cdot T^2R^2 + 8,5282 \cdot 10^{-4}TR^2 - 1,99 \cdot 10^{-6}T^2R^2 \quad (14)$$

Se $R < 13\%$ e $26,66^{\circ}\text{C} < T < 44,44^{\circ}\text{C}$, realizar ajuste (subtração) = $[13 - R] / 4 \cdot \text{SQRT} \{17 - \text{ABS}(T - 95)\} / 17$;

Se $R > 85\%$ e $26,66 < T_{air} < 30,55^{\circ}\text{C}$, realizar ajuste (adição) = $[R - 85]/10 \cdot [(87 - T)/5]$

Onde:

T = Temperatura de bulbo seco do ambiente ($^{\circ}\text{F}$);

R= Umidade relativa (porcentagem inteira);

SQRT é raiz quadrada;

ABS é o valor absoluto.

Para interpretação dos resultados do HI, a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA) define diferentes níveis de IC, com base nos seus efeitos no corpo humano (Rahif; Kazemi; Attia, 2023), os quais são expostos no Quadro 13.

Quadro 13: Níveis de Índice de calor.

Classificação	Índice de calor	Grau de estresse fisiológico
Cuidado	26,6°C a 32,2°C	Possível fadiga com prolongada exposição e/ou atividade física
Cuidado extremo	32,2°C a 39,4°C	Insolação, câibras de calor, ou esgotamento por calor possível com prolongada exposição e/ou atividade física
Perigo	39,4°C a 51,1°C	Câibras de calor ou esgotamento por calor prováveis, e insolação é possível com prolongada exposição e/ou atividade física
Perigo extremo	Acima de 51,1°C	Insolação altamente provável

Fonte: Rahif; Kazemi; Attia, (2023)

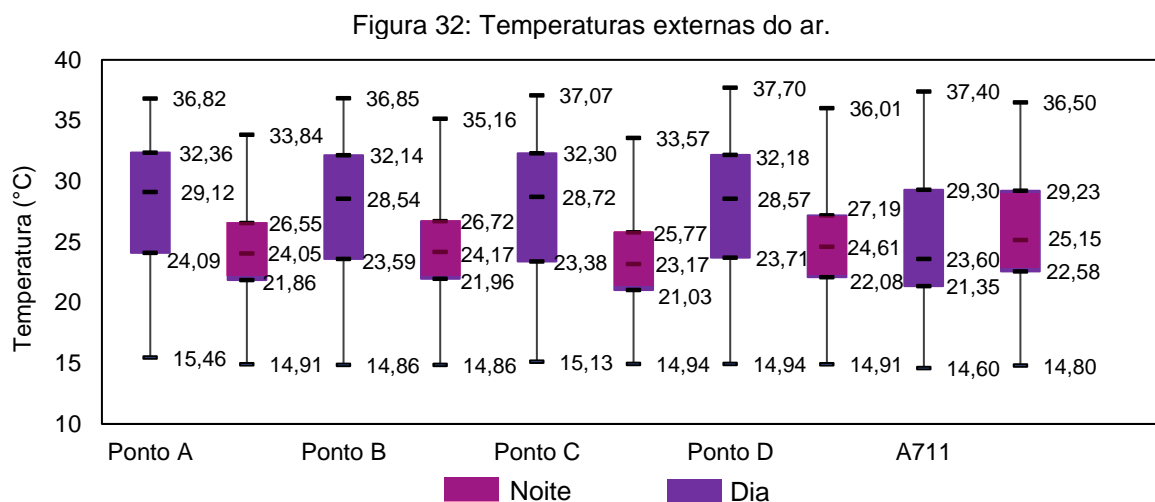
CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados e análises do impacto da altura e das tipologias habitacionais nas áreas externas e internas das habitações. Primeiramente serão apresentados os dados microclimáticos coletados e o processo de validação do ENVI-met. Em seguida serão expostas as análises externas e as internas.

Para facilitar a identificação dos cenários eles foram nomeados por uma letra que indica a tipologia habitacional, seguida pela altura das edificações e H para indicar onda de calor e N para um dia fora da onda de calor. A letra C indica casas térreas, T torres em formato H e P edifícios pátios.

4.1 Dados microclimáticos

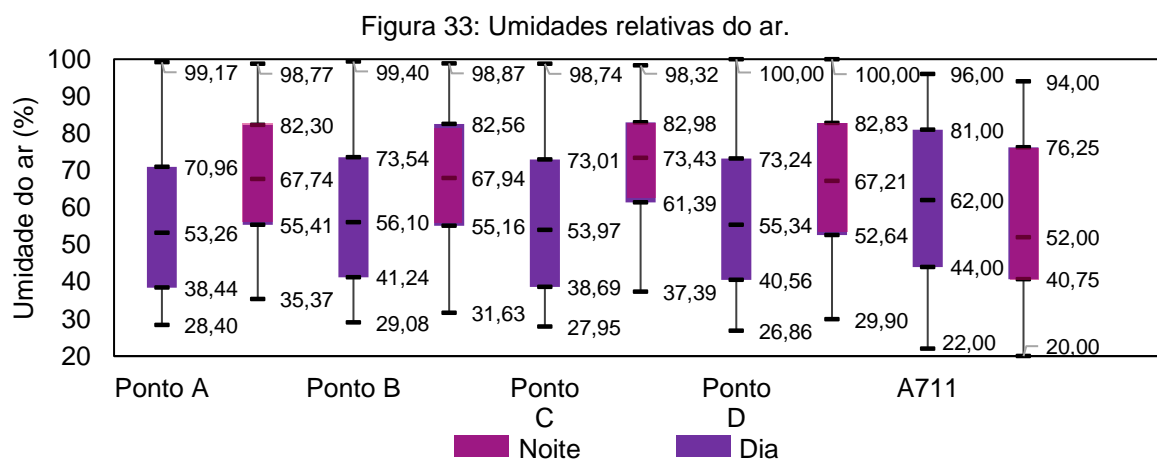
A coleta dos dados microclimáticos ocorreu durante uma onda de calor que abrangeu a região de São Carlos. Por este motivo, as temperaturas registradas apresentaram valores mais elevados. Na Figura 32 é apresentado o perfil das temperaturas nos 4 pontos e na estação INMET A711 (localizada em São Carlos) durante o período diurno e noturno.



Fonte: Autora (2025).

Ao observar a Figura 32, nota-se que 50% das temperaturas diurnas estiveram entre 23,38 °C a 32,36 °C, com 25% variando até o limite máximo de 37,70 °C. Durante o período noturno 50% das temperaturas variaram de 21,86°C a 27,19°C, e ocorreram temperaturas máximas de até 36,01°C. De maneira geral, as diferenças entre os pontos de coleta foram inferiores a 1°C.

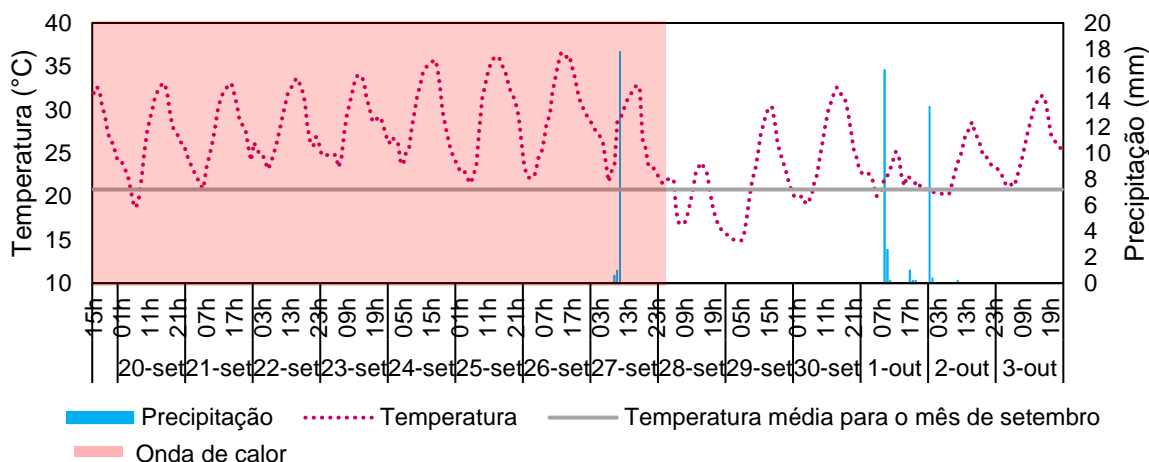
O perfil da umidade relativa do ar durante o período analisado é exposto na Figura 33. Durante o dia, 50% dos valores de umidade relativa do ar estiveram entre 38,44% e 73,54%, com valores mínimos de 27,95%. Durante a noite, 50% das umidades variaram entre 55,16% e 82,98%, com valores mínimos de 29,90%.



Fonte: Autora (2025).

No período analisado foram identificados os dias mais e menos quentes em que não ocorreram precipitações. Inicialmente, os dias mais e menos quente seriam 26 e 28 de setembro de 2023, respectivamente. Todavia, no dia 28 a nebulosidade foi alta, desta forma, o dia menos quente escolhido como representativo foi o 29 de setembro que possuiu menor nebulosidade. A temperatura e precipitação do período avaliado são expostos na Figura 34.

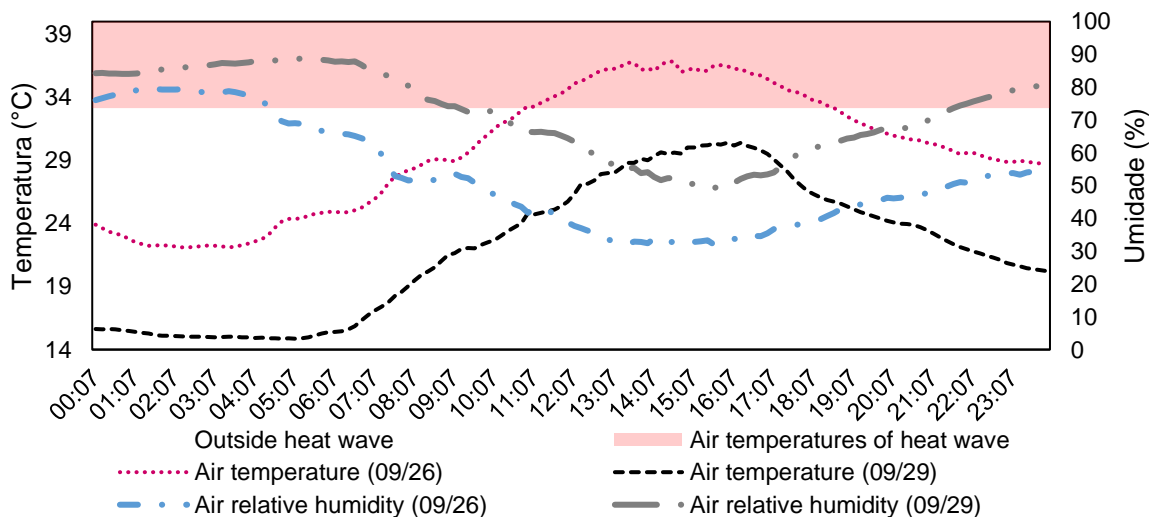
Figura 34: Temperatura e precipitação no ponto B.



Fonte: Autora (2025).

Os dados de temperatura e umidade do ar destes dias, registrados no ponto B, podem ser vistos na Figura 35. Para o dia mais quente (26), a temperatura variou de 22,10 °C a 36,85 °C, enquanto a umidade relativa esteve entre 32,02% e 79,80%. Já no dia menos quente (29) a temperatura variou de 15,62 °C e 30,24 °C e a umidade de 49,14% a 84,35%.

Figura 35: Temperaturas e umidades dos dias mais e menos quentes.



Fonte: Autora (2025).

4.2 Validação dos cenários urbanos no ENVI-met

No processo de validação do ENVI-met, o cenário real foi simulado, com o método *full forcing* e a utilização dos dados microclimáticos medidos no local e os provenientes da

estação meteorológica A711. O processo para o dia de onda de calor é exposto no Quadro 14.

Quadro 14: Processo de validação da simulação computacional para o dia 26 de setembro de 2023 (onda de calor).

Tentativa	Principais ajustes realizados
1-3	As simulações não foram concluídas ou apresentaram erros de visualização devido à falta de <i>grids</i> vazios suficientes no entorno e no topo da área, à queda de energia durante o processo e à ativação da divisão do primeiro <i>grid</i> vertical em cinco subcélulas no modelo com topografia, o que impede a visualização adequada dos mapas.
4	Modelo simulado possuía dimensões de 192 x 119 x 15 grids. Foram utilizadas as temperaturas e umidades coletadas no local, os dados de radiação direta e difusa provenientes do arquivo epw. A velocidade do vento proveniente da estação A711 não foi utilizada por conter em certos horários velocidade de 0 m/s, o qual torna impossível ao ENVI-met realizar as simulações. Por isso, foi adotada a velocidade de 1,27 m/s na borda do modelo (média da velocidade na estação A711) e direção de 250° (média do dia 26/09/2023). A simulação foi finalizada após 27h e 40min. As diferenças entre as temperaturas e umidades do ar medidas e simuladas ficaram dentro dos limites aceitáveis.
5	As configurações da simulação 4 foram mantidas, com exceção da velocidade e direção do vento. O vento foi forçado, com os dados da estação A711, com a substituição de valores de velocidade = 0m/s para 0,1 m/s, para verificar o impacto nos resultados da simulação. A simulação foi finalizada após 35h 54min. As diferenças entre as temperaturas e umidades do ar medidas e simuladas ficaram dentro dos limites aceitáveis. Temperatura do ar ($R^2 = 0,995$; MAE = 0,3109 e MAPE = 1,01%) umidade do ar ($R^2 = 0,9949$; MAE= 0,8824; MAPE = 1,91%).
6	Devido a um problema de visualização dos resultados, o modelo foi revisado, e retirada a opção de subdividir em 5 células o primeiro grid da simulação, o qual deve estar desativado quando se utiliza topografia. Foram utilizadas as temperaturas e umidades coletadas no local, os dados de nuvens altas, baixas e médias da estação meteorológica 83726 (utilizando interpolação linear para os horários sem medição) e a velocidade do ar da estação A711. Os valores de velocidade do vento inferiores a 1,0 m/s foram alterados para 1 m/s, para verificar o impacto nos resultados da simulação. A simulação foi finalizada após 38h 1min. As diferenças entre as temperaturas e umidades do ar medidas e simuladas ficaram dentro dos limites aceitáveis. Temperatura do ar ($R^2 = 0,989$; MAE = 0,49; MAPE = 1,69%; Willmot = 0,995) e umidade do ar ($R^2 = 0,9879$; MAE = 1,52; MAPE = 2,77% e Willmot = 0,994).

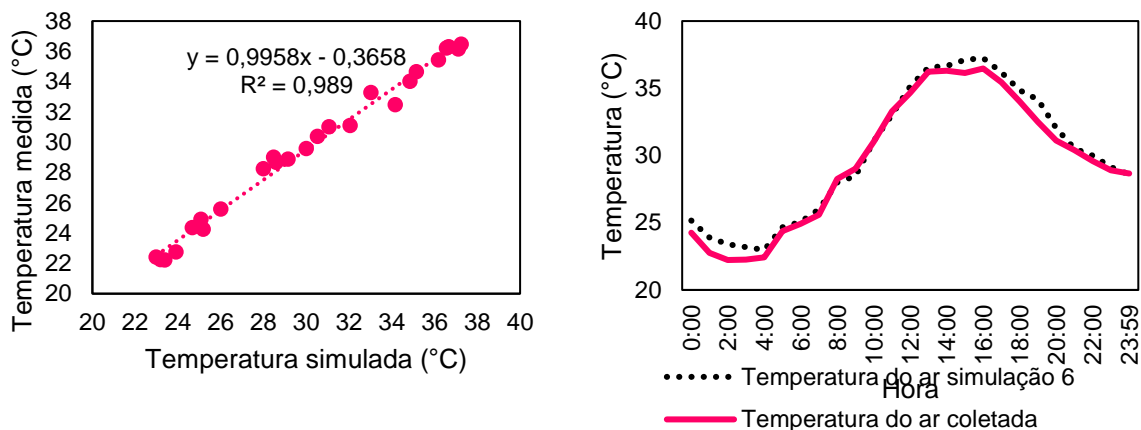
Fonte: Autora (2025).

Dentre as simulações realizadas no processo de validação, optou-se por utilizar as configurações da simulação 6, de temperatura e umidade do ar coletados no local, velocidade e direção do vento da estação A711 (com valores inferiores a 1,0 m/s substituídos por 1,0) e dados de nuvens altas, médias e baixas da estação 83726. Estas configurações foram escolhidas por serem as mais próximas da realidade, no período de onda de calor registrado, e resultarem em dados de temperatura, umidade do ar e radiação global mais coerentes.

Para verificar se as diferenças entre as temperaturas simuladas e medidas eram aceitáveis e os resultados da simulação validos, o R^2 , MAE, MAPE e o Índice de concordância

de Willmott (d) dos dados foram verificados. Em relação à temperatura do ar, na simulação 6, obteve-se um R^2 de 0,989 e d de 0,995, que representam um modelo confiável, conforme exposto na Figura 36. Os valores calculados de MAE e MAPE foram de 0,49 e 1,69%, respectivamente, os quais também indicam um modelo confiável.

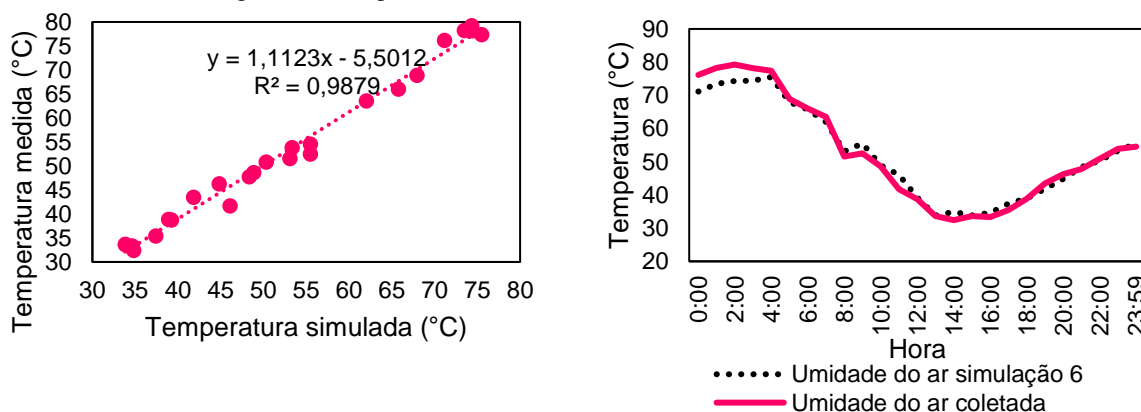
Figura 36: Regressão linear da temperatura simulada e medida.



Fonte: Autora (2025).

O mesmo processo foi realizado para a umidade do ar. O valor de R^2 foi de 0,9879, o d foi de 0,994 e os valores de MAE e MAPE foram de 1,52 e 2,77%, respectivamente. Estas análises confirmam novamente que a validação da simulação foi bem-sucedida. A regressão linear destas variáveis é exposta na Figura 37.

Figura 37: Regressão linear da umidade medida e simulada.



Fonte: Autora (2025).

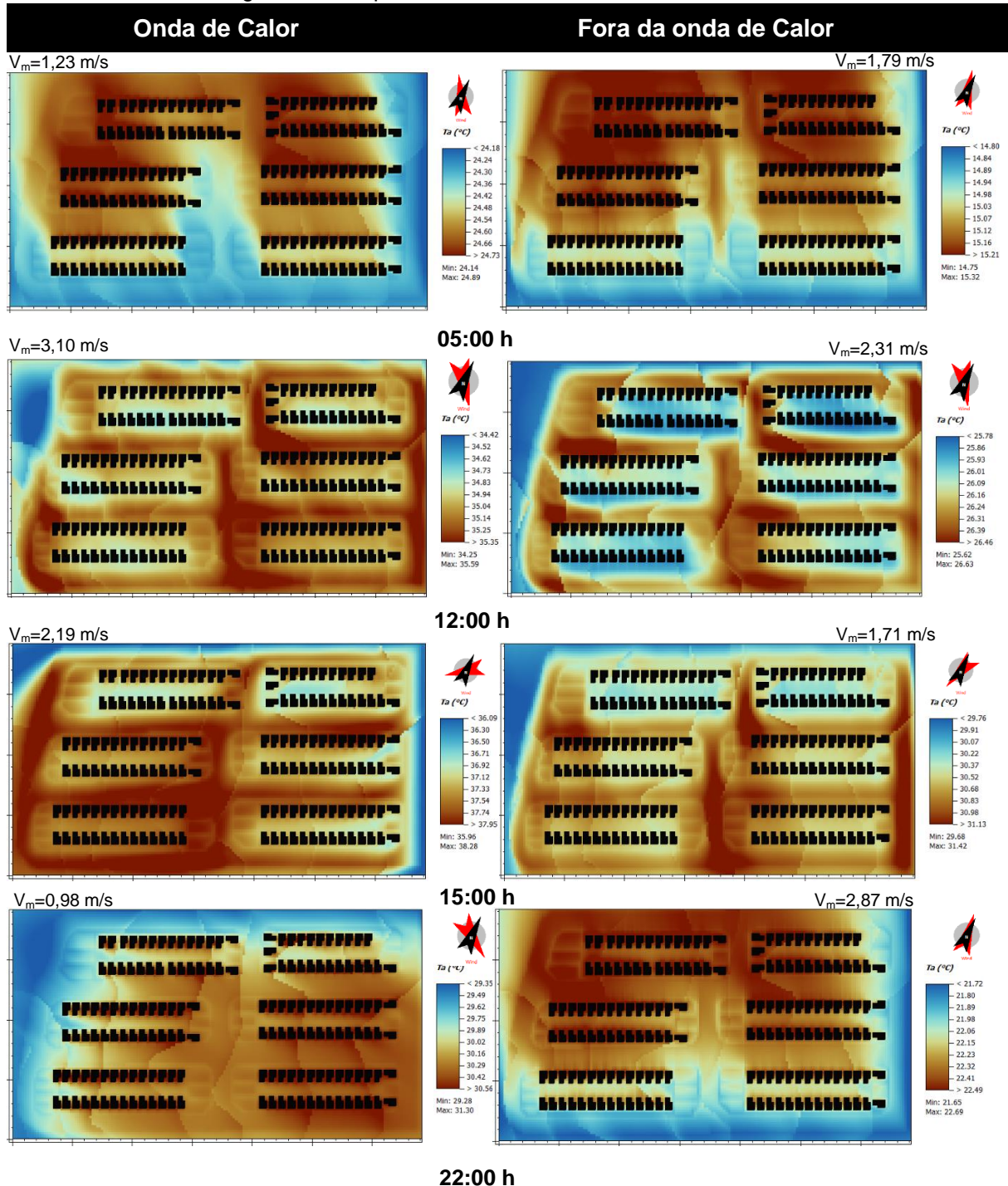
4.3 Condições térmicas do espaço urbano

As condições térmicas do espaço urbano são apresentadas neste tópico, com base na temperatura do ar e no índice PET de conforto térmico. Primeiramente, são apresentadas as condições dos diferentes cenários urbanos às 05 h, 12 h, 15 h e 22h, e ao final, a diferença entre eles durante as 24 h do dia, a fim de verificar a influência das tipologias habitacionais e verticalidades nas condições térmicas.

4.3.1 Cenário com edificações térreas (C4)

As temperaturas externas do ar (T_a) foram analisadas tanto no dia da onda de calor quanto no dia fora da onda de calor, e são apresentadas na Figura 38. No dia da onda de calor, às 05 h e às 22 h, as maiores temperaturas ocorreram entre as edificações, com valores em torno de 30,56 °C às 22 h e 24,73 °C às 05 h. Durante o dia as temperaturas ficaram em torno de 35 °C ao meio-dia e atingiram cerca de 37,95 °C às 15 h.

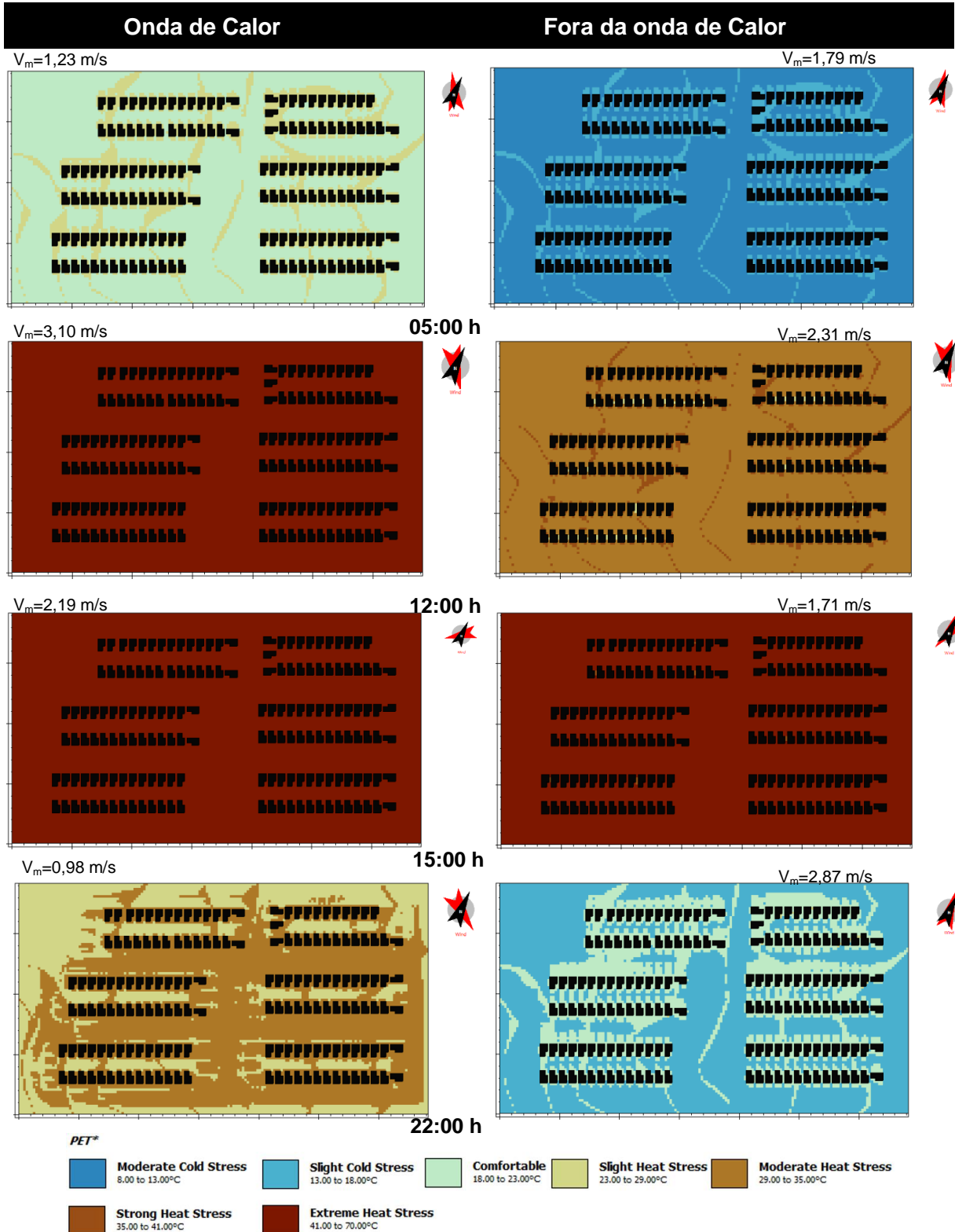
Figura 38: Temperatura do ar nos cenários C4_H e C4_N.



Fonte: Autora (2025).

No dia fora da onda de calor, os mesmos padrões foram observados, porém com temperaturas em torno de 15 °C entre as edificações às 5 h e 22,40 °C às 22 h. Durante o dia, as temperaturas registraram cerca de 26 °C ao meio-dia e 31 °C às 15 h.

Figura 39: PET nos cenários C4_H e C4_N para um homem adulto.



Fonte: Autora (2025).

O conforto térmico foi analisado com base no PET para um homem adulto (Figura 39). No dia da onda de calor, as áreas entre as edificações apresentaram leve estresse térmico às 5 h e moderado às 22h. Já ao meio-dia e às 15 h, toda a área registrou extremo estresse térmico.

No dia fora da onda de calor, às 5 h registrou-se leve a moderado estresse térmico por frio, enquanto às 22 h houve leve estresse térmico por frio. Ao meio-dia, toda a área apresentou moderado estresse térmico por calor, e às 15 h, foi observado extremo estresse térmico.

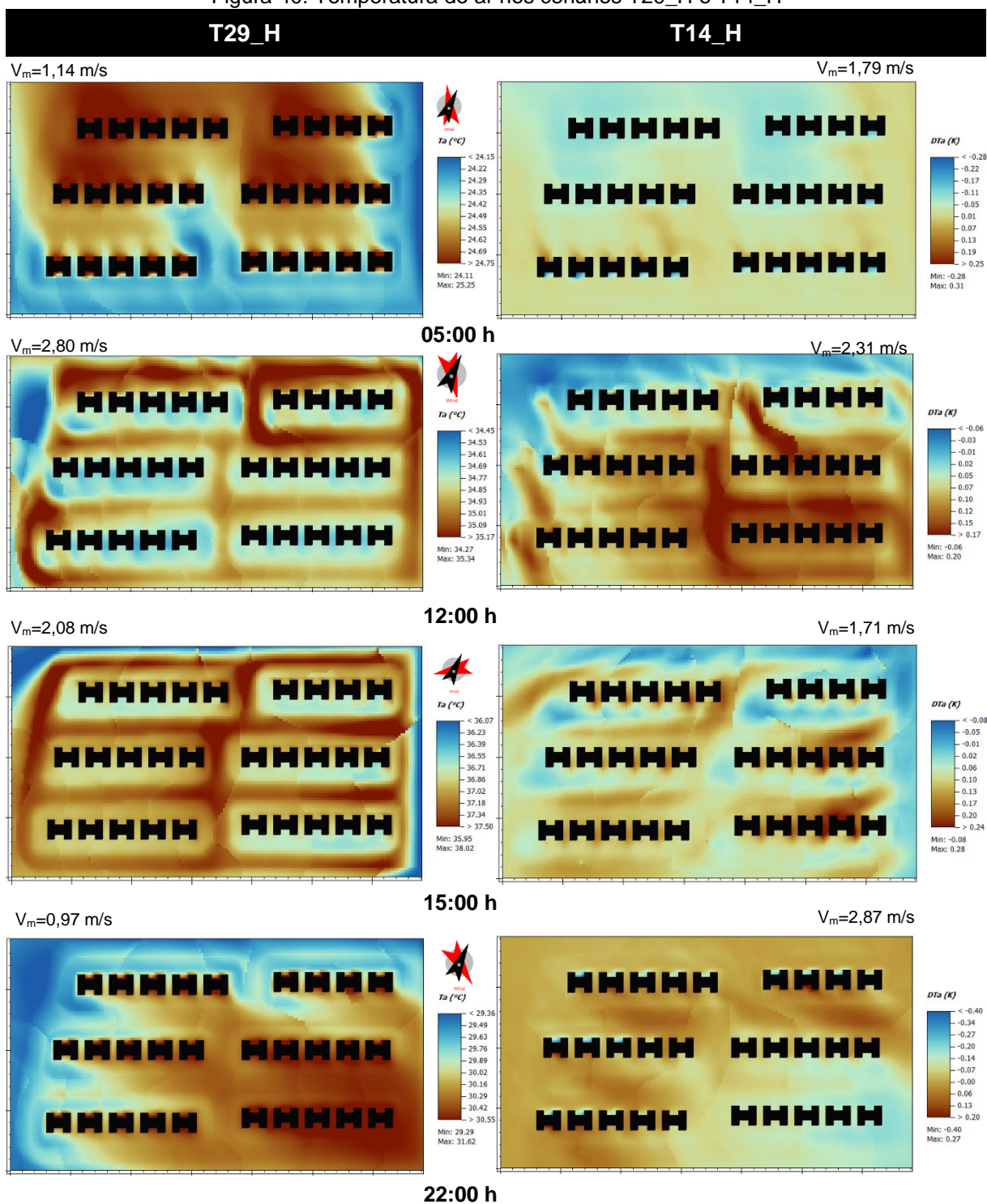
Os resultados apresentados indicam que a tipologia de loteamento de interesse social unifamiliar, amplamente utilizada no estado de São Paulo e em todo o Brasil, no clima de São Carlos (Cwa), resulta em condições térmicas críticas à saúde humana durante os horários analisados. Durante ondas de calor, predomina o estresse térmico por calor, enquanto nos dias fora da onda de calor ocorre tanto o estresse térmico por calor quanto por frio. No tópico 4.3.4, serão apresentados os dados horários, os quais permitirão uma visão diária das condições térmicas e a comparação com os demais cenários.

4.3.2 Cenários com torres de apartamentos (T14 e T29)

As temperaturas externas do ar para os cenários com edifícios em formato H, no dia da onda de calor, são apresentadas na Figura 40. À esquerda são registradas as temperaturas do ar para o T29_H e, à direita, as diferenças de temperatura (DTa) causadas pela redução da altura das edificações no T14_H, comparado ao T29_H. Em relação ao T29_H, assim como nas casas térreas, às 05 h e 22 h ocorreu um acúmulo de calor entre as edificações, com valores próximos a 24,69 °C às 05 h e 30,42 °C às 22 h. Ao meio-dia, as menores temperaturas ocorreram entre os edifícios, com valores em torno de 34,61 °C, enquanto às 15 h esses valores subiram para 36,86 °C.

A redução da verticalidade das edificações para 14 metros resultou na diminuição da temperatura em áreas adjacentes aos edifícios, de até 0,28 K às 5 h, e aumento nas demais áreas, em torno de 0,07 K. Já às 12 h e 15 h, os aumentos de temperatura foram mais significativos que as reduções, atingindo 0,24 K e -0,08 K, respectivamente. Às 22 h as reduções voltaram a serem mais expressivas que os aumentos, correspondendo a 0,40 k e -0,20 K, respectivamente.

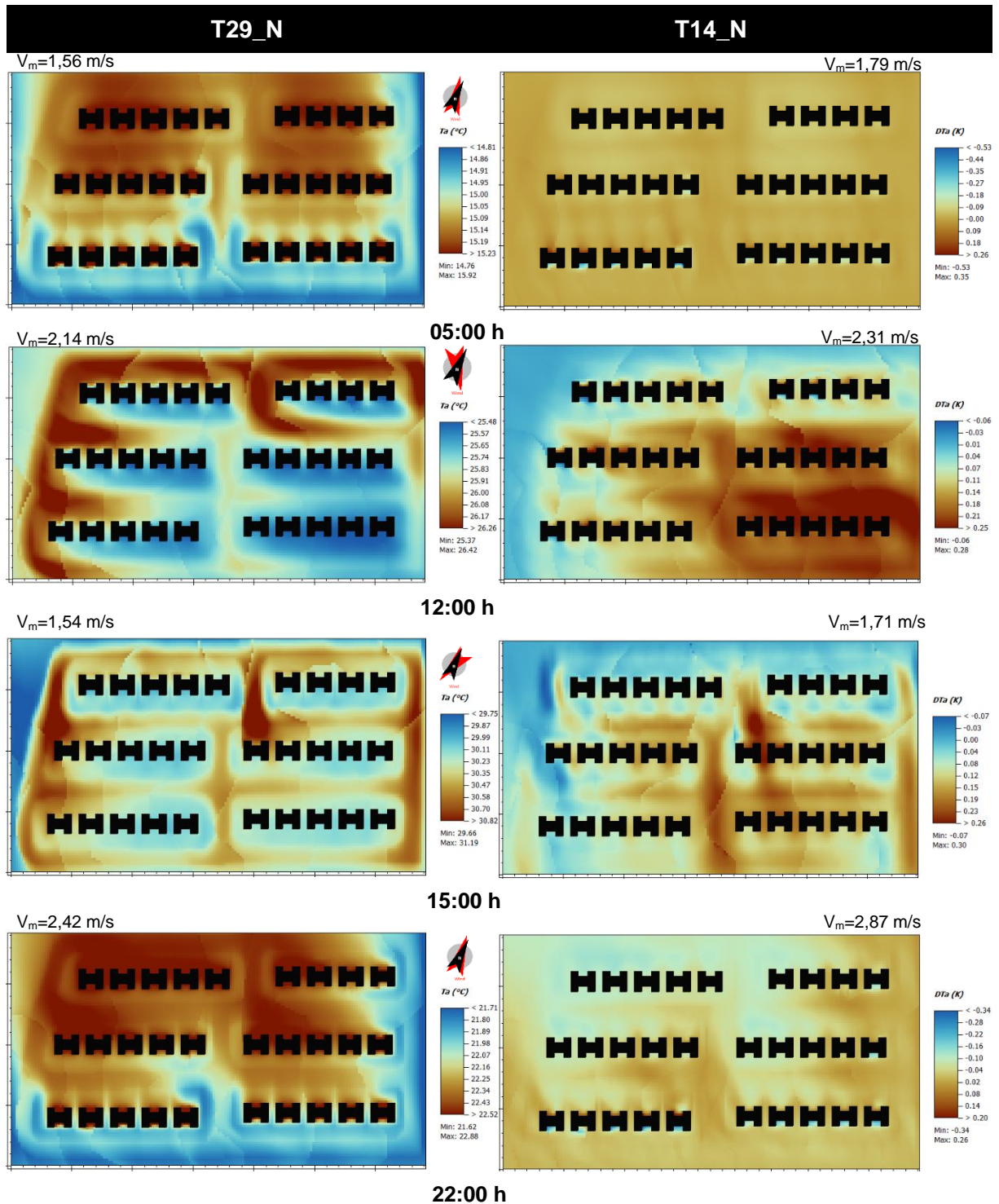
Figura 40: Temperatura do ar nos cenários T29_H e T14_H



Fonte: Autora (2025).

As temperaturas externas do ar no dia fora da onda de calor (Figura 41) foram maiores entre as edificações, com valores em torno de 15,14 °C às 05 h e 22,43 °C às 22 h. Ao meio-dia, as temperaturas entre os edifícios foram de aproximadamente 25,65 °C, enquanto às 15 h esses valores subiram para 30,23 °C.

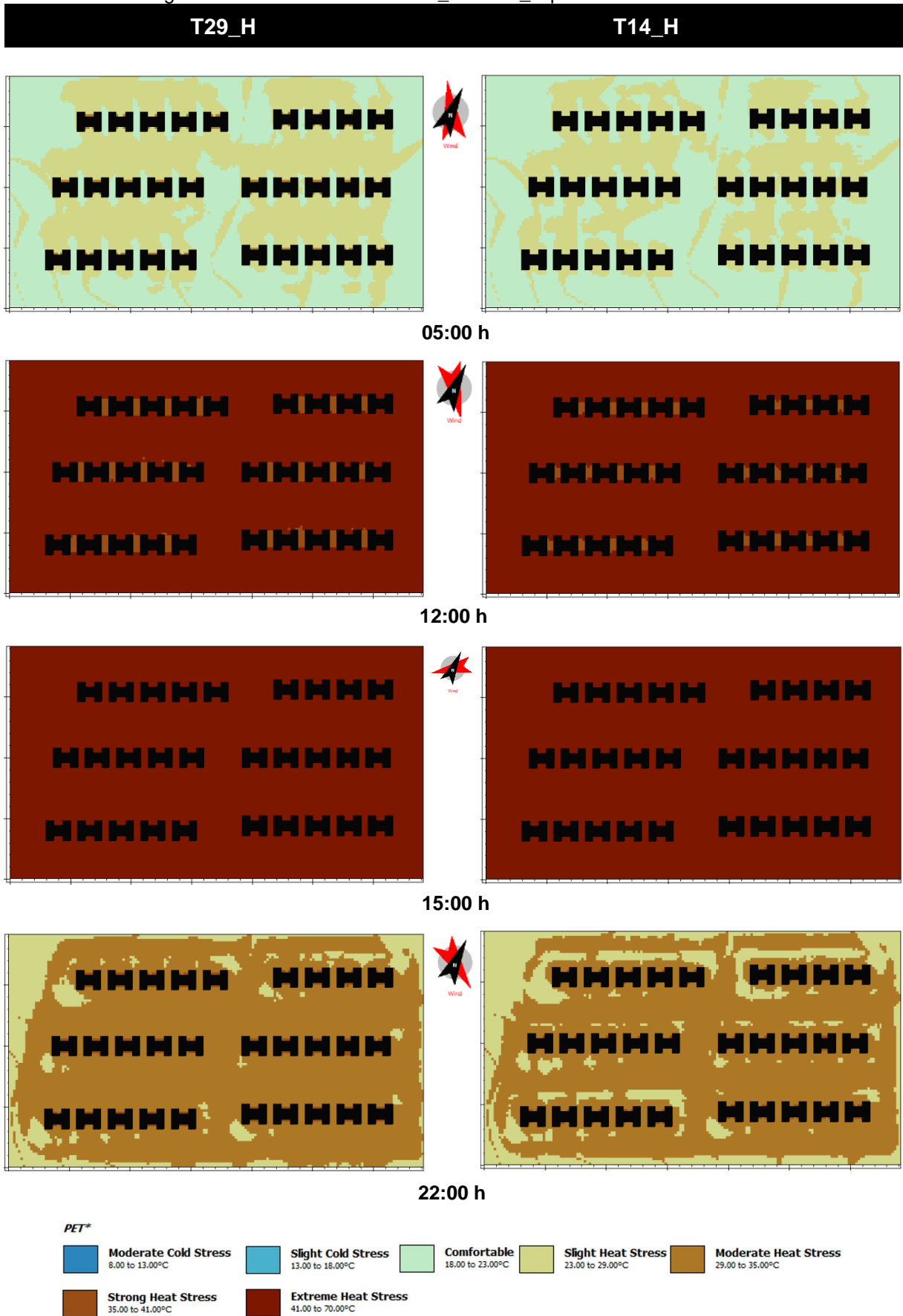
Figura 41: Temperatura do ar nos cenários T29_N e T14_N.



Fonte: Autora (2025).

A redução da altura das edificações não provocou mudanças significativas nas temperaturas em quase toda a área às 5 h e às 22 h. Nesses horários, apenas algumas áreas adjacentes às edificações apresentaram variações nas temperaturas, com reduções mais intensas, em torno de 0,50 K às 05 h e 0,30 K às 22 h. Já às 12 h e 15 h os aumentos de temperatura foram mais significativos, atingindo cerca de 0,25 K.

Figura 42: PET nos cenários T29_H e T14_H para um homem adulto.



Fonte: Autora (2025).

O conforto térmico no dia da onda de calor é mostrado na Figura 42. Às 05 h, as áreas próximas às edificações apresentaram leve estresse térmico, enquanto às 22 h, moderado a forte. Já ao meio-dia, entre as edificações houve forte estresse térmico, e no restante da área, extremo. Às 15 h, em toda a área, houve extremo estresse térmico.

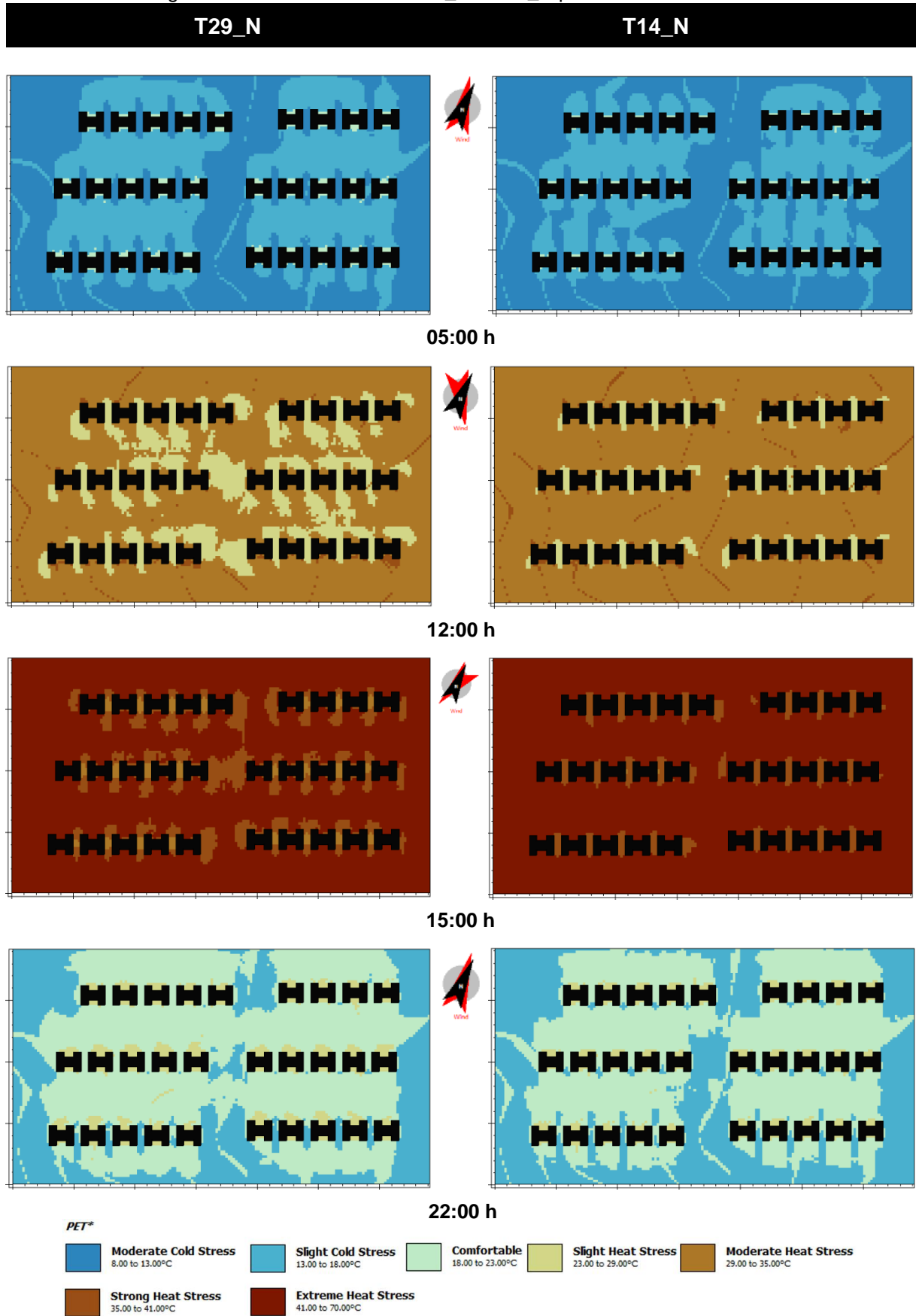
A redução da verticalidade, às 05 h, aumentou as áreas sem estresse térmico, e às 22 h diminuiu o estresse de moderado para leve em alguns locais. Já ao meio-dia, o estresse térmico em parte das áreas entre as edificações aumentou de forte para extremo.

No dia fora da onda de calor (Figura 43), o cenário T29_N apresentou leve a moderado estresse térmico por frio às 05 h. Ao meio-dia, as áreas entre as edificações apresentaram leve estresse térmico por calor, enquanto as demais, moderado. Já às 15 h, entre as edificações, o estresse foi moderado e no restante da área, foi de forte a extremo. Às 22 h, algumas áreas próximas às edificações apresentaram leve estresse térmico por frio e por calor.

O Cenário T14_N aumentou o estresse térmico por frio às 05 h e 22 h, de leve para moderado. Já às 12h o estresse térmico por calor aumentou de leve para moderado em várias áreas. Às 15h às áreas entre as edificações passaram a ter forte estresse térmico.

Os dados de temperatura e conforto térmico da tipologia de torres de apartamento, comparado ao C4, indicam um potencial de reduzir o estresse térmico ao meio-dia, e de aumentar às 05 h e 22 h. Já a redução da verticalidade de 29 m para 14 m nesta tipologia aumentou o estresse térmico ao longo do dia e diminuiu durante a noite. As análises horárias apresentadas no tópico 4.3.4 permitirão a compreensão do impacto desta tipologia e das verticalidades ao longo de todo o dia, e a comparação com os demais cenários.

Figura 43: PET nos cenários T29_N e T14_N para um homem adulto.

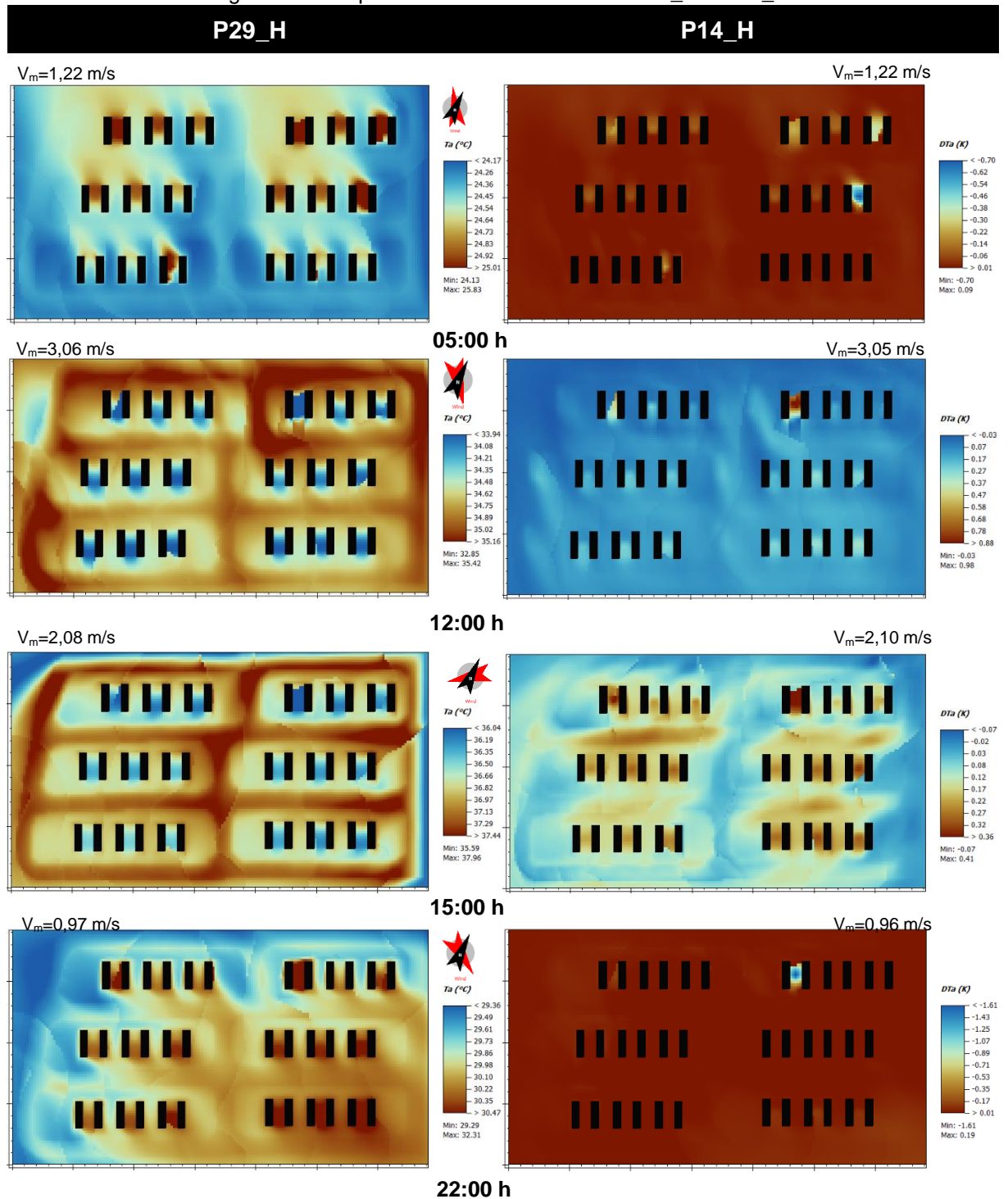


Fonte: Autora (2025).

4.3.3 Cenários com edifícios pátios (P14 e P29)

Nos cenários P14_H e P29_H (Figura 44), os pátios gerados pelos edifícios, durante o dia, corresponderam às áreas com as menores temperaturas do ar. No P29_H, essas temperaturas variaram de 33,94 °C às 12 h a 36,04 °C às 15 h. Já às 22 h e 5 h, as maiores temperaturas do ar ocorreram nessas áreas, em torno de 25 °C às 5 h e 30 °C às 22 h.

Figura 44: Temperatura do ar nos cenários P29_H e P14_H.

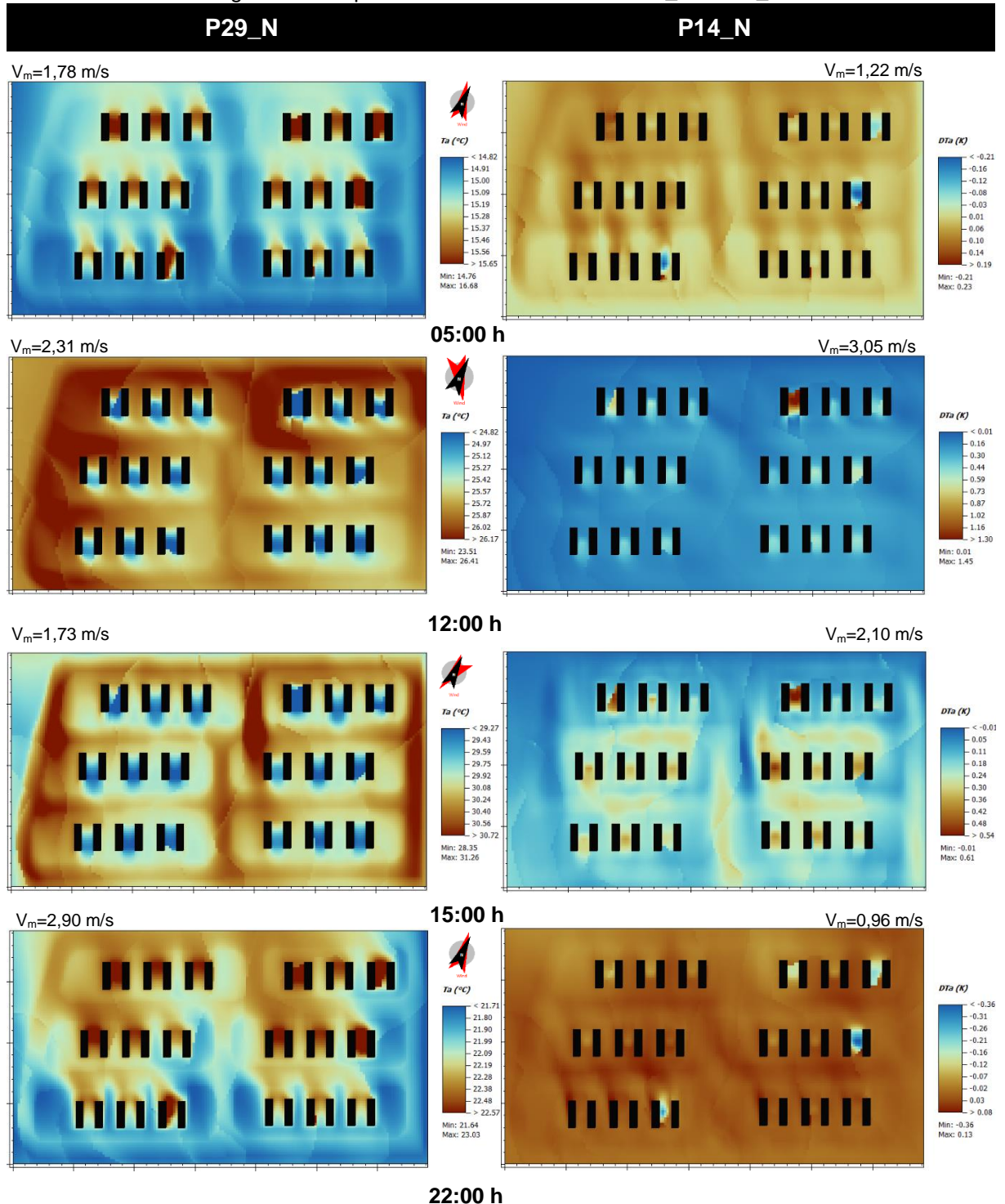


Fonte: Autora (2025).

A redução da verticalidade para 14 m modificou a temperatura do ar de forma mais significativa às 15 h, com aumentos em torno de 0,32 K nos pátios.

No dia fora da onda de calor (Figura 45), o mesmo padrão do dia da onda de calor foi apresentado. Às 5 h, as temperaturas nos pátios foram de cerca de 15,65 °C, enquanto às 22 h foram de 22,57 °C. Já durante o dia, variaram de 24,82 °C às 12 h a 29,27 °C às 15 h.

Figura 45: Temperatura do ar nos cenários P29_N e P14_N.



Fonte: Autora (2025).

No P14_N às 12 h houve um aumento em torno de 0,59 K nos pátios, com exceção de um em que a temperatura subiu em até 1,30 K. Às 15h o mesmo ocorreu, chegando a até 0,54 K. Às 22 h e 5 h em alguns pátios a temperatura foi levemente reduzida, enquanto no restante da área tendeu a permanecer igual ao P29_H.

Ao analisar os valores do PET no cenário P29_H às 5 h (Figura 46), percebeu-se que houve um leve estresse térmico no pátio de algumas edificações, enquanto às 22 h, em todos os pátios, o estresse térmico foi moderado e, no restante da área, leve. Durante o dia, houve forte estresse térmico nos pátios e extremo no restante da área.

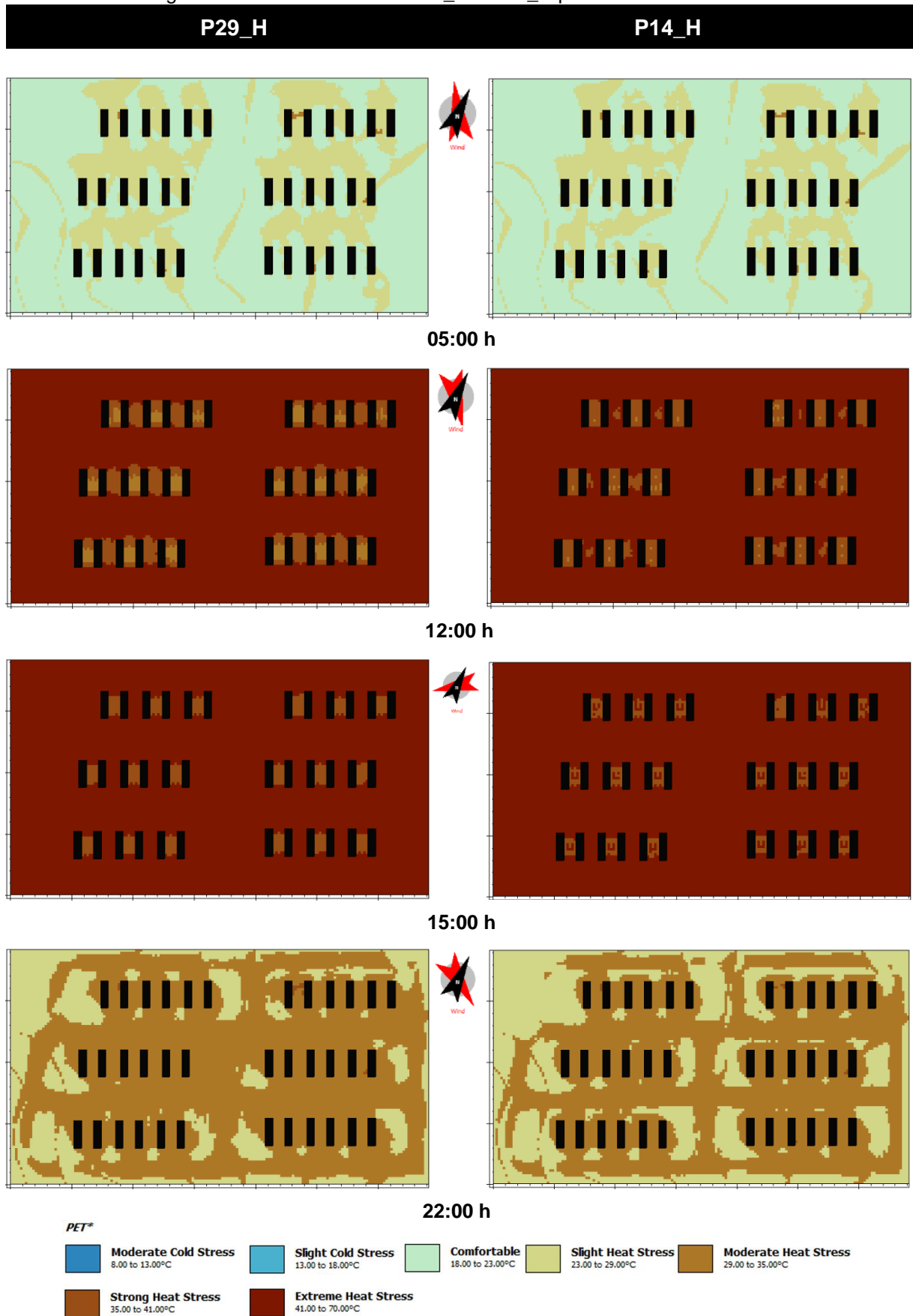
No P14_H, às 5 h, as áreas com leve estresse térmico diminuíram para sem estresse térmico. Às 22 h o mesmo ocorreu, porém, de moderado para leve estresse térmico. Já ao meio-dia e às 15 h o nível de estresse térmico foi agravado.

No cenário P29_N (Figura 47), os valores de PET corresponderam a leve estresse térmico por frio às 5 h, enquanto às 22 h, apenas algumas áreas apresentaram leve estresse térmico por frio. Ao meio-dia não houve estresse térmico nos pátios, enquanto no restante da área, leve a moderado estresse térmico. Já às 15 h, houve leve estresse térmico nos pátios e forte a extremo no restante da área. A redução da verticalidade para 14 m, assim como no dia da onda de calor, resultou na diminuição do estresse térmico às 5 h e 22 h e aumento às 12 h e 15 h.

A tipologia de edifícios pátios apresentou um diferencial em relação aos demais cenários, com os pátios resultando em áreas com menores níveis de estresse térmico durante o dia. Durante a onda de calor, às 15 h, os pátios foram as únicas áreas, em todos os cenários, que não apresentaram extremo estresse térmico, os quais indicaram potencial para refúgio aos moradores. No dia fora da onda de calor, estas áreas chegaram a ser confortáveis ao meio-dia e com leve estresse térmico às 15 h, diferente dos demais cenários.

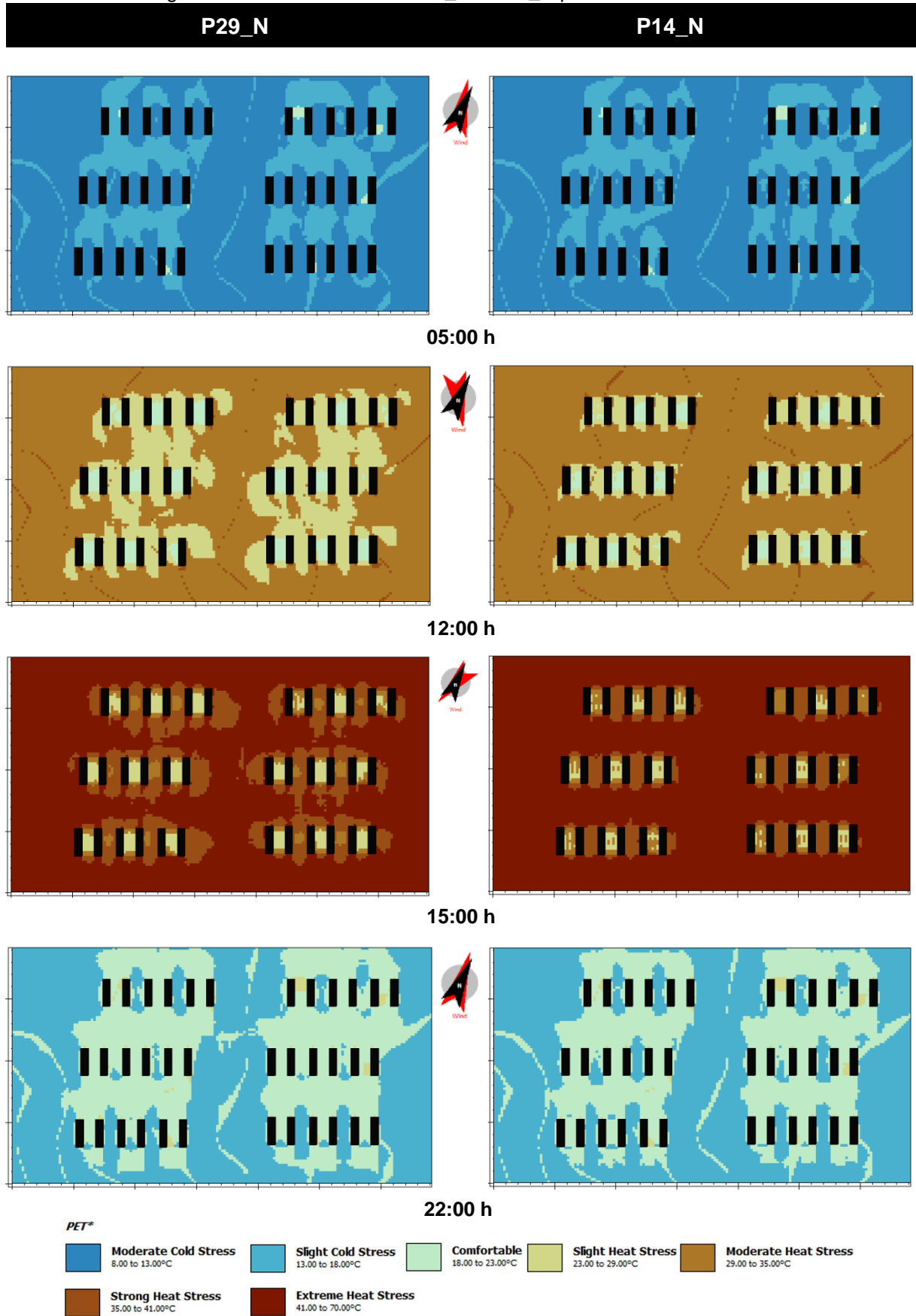
Assim como na tipologia de torres de apartamentos (T29 e T14), a redução da verticalidade melhorou as condições térmicas às 05 h e 22 h e piorou às 12 h e 17 h. No tópico 4.3.4 tanto a influência da tipologia quanto a verticalidade serão aprofundadas.

Figura 46: PET nos cenários P29_H e P14_H para um homem adulto.



Fonte: Autora (2025).

Figura 47: PET nos cenários P29_N e P14_N para um homem adulto.

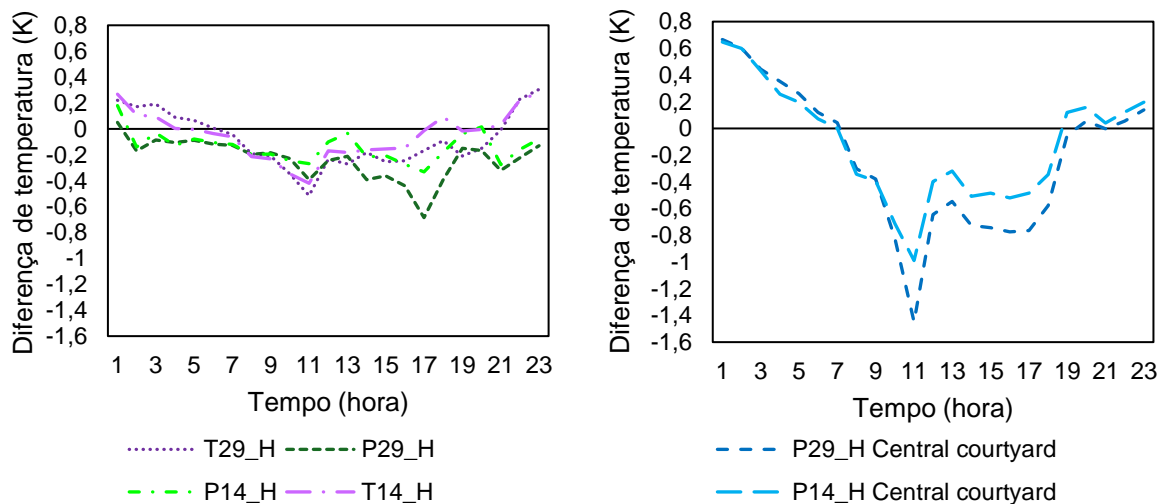


Fonte: Autora (2025).

4.3.4 Influência das tipologias e da verticalidade nas condições térmicas externas

A fim de possibilitar a análise da influência das tipologias habitacionais e da verticalidade nas condições térmicas externas, durante todo o dia, foram extraídas as temperaturas do ar entre as edificações e na calçada em todos os cenários, e no pátio do P29 e P14. A Figura 48 apresenta as diferenças de temperaturas externas do ar entre as edificações e nos pátios, com o cenário real (C4) como referência.

Figura 48: Diferença de temperatura entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), durante a onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

No dia da onda de calor, os cenários T29_H e T14_H apresentaram maiores aumentos de temperatura, com picos de aproximadamente 0,28 K. Os cenários P29_H e P14_H mostraram aumentos apenas na primeira hora do dia, enquanto no T29_H o aumento se estendeu até às 5h e no T14_H até às 4 h. À noite, apenas as torres em formato “H” (T) registraram aumentos de temperatura.

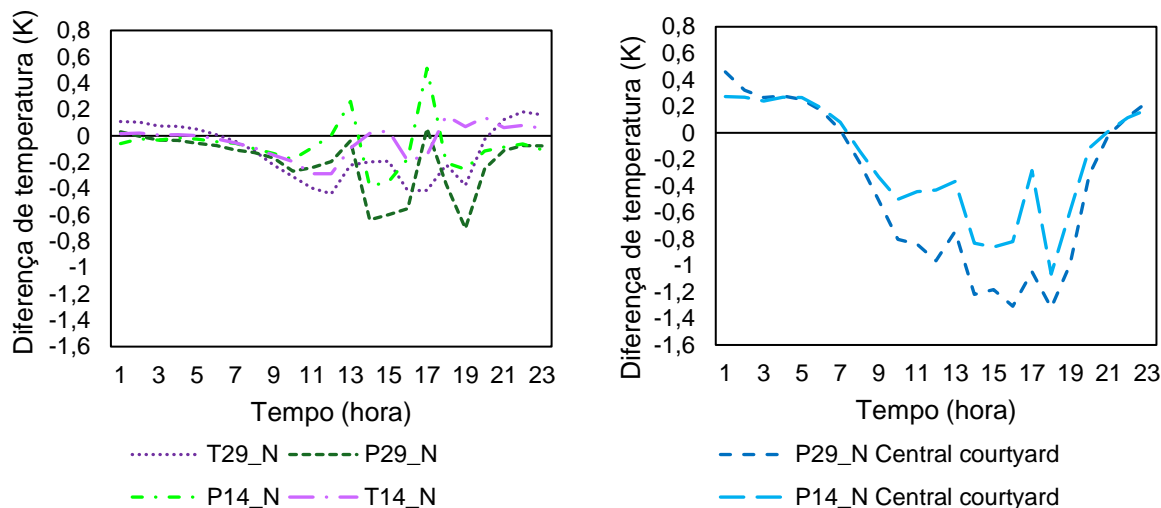
Durante o dia, todos os cenários reduziram a temperatura do ar. O P29_H foi o que apresentou as maiores reduções durante o dia, exceto entre 09 h e meio-dia, quando o T29_H teve as maiores reduções. Em geral, a redução da altura das edificações para 14m teve um impacto significativo durante o período de incidência solar, por reduzir o sombreamento. Ainda assim, o P14_H, obteve melhores resultados do que o T29_H e o T14_H na maior parte do dia.

A área dos pátios dos cenários P29_H e P14_H, durante o dia, apresentaram as maiores reduções, de até 1,44 K e 0,98 K, respectivamente. Contudo, entre 1 h e 6 h, essas áreas apresentaram os maiores aumentos de temperatura, com picos de até 0,65 K.

No dia fora da onda de calor (Figura 49), o P29_N foi o cenário que mais reduziu a temperatura durante quase todo o dia, exceto entre 9 h e 14 h e das 17 h às 18 h, quando o T29_N teve melhores resultados. Entre 12 h e 14 h e das 17 h às 18 h, o P29_N e o P14_N

apresentaram picos nas diferenças de temperatura, com um aumento de até 0,51 K no P14_N. O T29_N e o T14_N também registraram picos, mas com aumentos menores, sendo o maior de 0,15 K no T14_H.

Figura 49: Diferença de temperatura entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), fora da onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

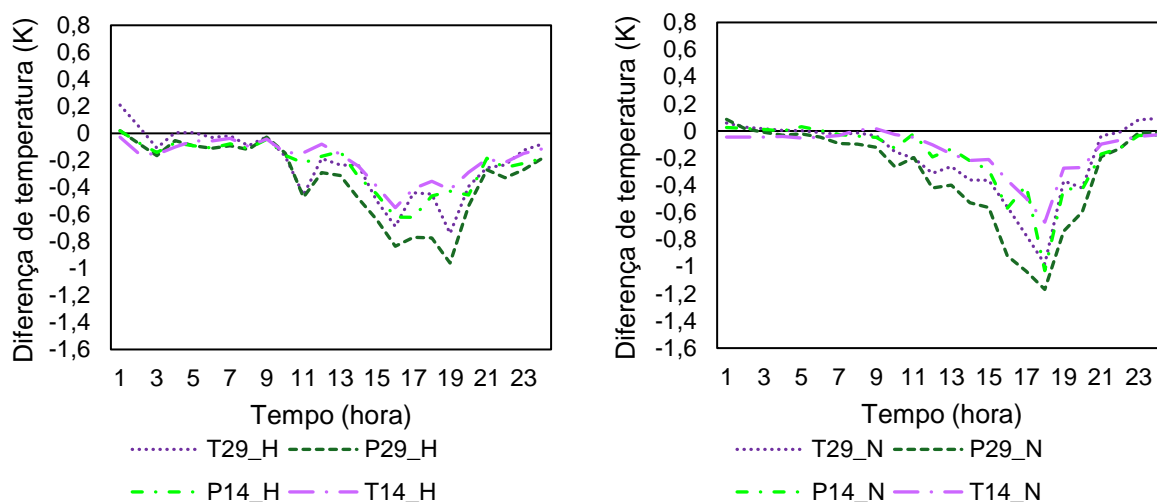
O sombreamento gerado pelas maiores alturas das edificações dos cenários P29, P14, T29 e T14 contribuiu para a redução das temperaturas ao longo do dia. No entanto, tanto no dia da onda de calor quanto no dia fora dessa condição, observaram-se picos de temperatura durante o dia. Entre 10h e 14h, esses picos ocorreram devido à diminuição do sombreamento, causada pela altura solar. Já entre 16 h e 18 h, no dia fora da onda de calor, os picos de temperatura foram resultado da presença de nuvens, que geraram apenas radiação difusa e refletida. Nesse período, o sombreamento que antes bloqueava a radiação solar direta deixou de ser eficaz na redução das temperaturas.

As temperaturas externas do ar mais altas no T29 e T14, em comparação com os cenários P14 e P29, podem ser explicadas pelo menor espaçamento entre as edificações nesses casos (6 m contra 12 m nos cenários P14 e P29). Durante a noite, essa configuração reduz a perda de ondas longas de radiação, as trocas de calor e a ventilação, o que leva ao aumento das temperaturas (Anders *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2024). Essa característica também justifica as temperaturas mais altas nos pátios do P14 e P29 durante a noite.

Esses resultados são consistentes com os encontrados nos estudos de Lassandro, Di Turi e Zaccaro (2019), Masiero *et al.* (2022), Ronchi, Salata e Arcidiacono (2020), Yang *et al.* (2021) e Ma *et al.* (2022), onde menores FVC, o aumento da relação H/W e da altura das edificações contribuem para a redução das temperaturas do ar ao diminuírem a incidência de radiação solar.

As diferenças de temperaturas na calçada (Figura 50) mostram que, durante a onda de calor, todos os cenários apresentaram temperaturas inferiores ao C4_H na maior parte do dia. A única exceção foi o T29_H, que teve um aumento de temperatura às 1 h e 2 h. O P29_H teve as maiores reduções de temperatura, de até 0,96 K. A redução da verticalidade no P14_H resultou em menores diminuições de temperatura, enquanto no T14_H, a redução foi maior que no T29_H até as 7 h e menor no restante do dia.

Figura 50: Diferenças de temperatura na calçada, durante a onda de calor (à esquerda) e fora da onda de calor (à direita).



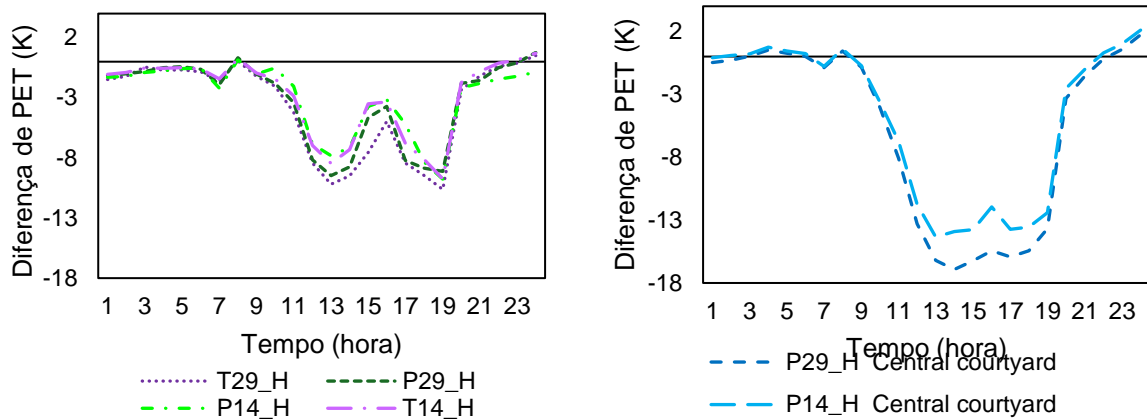
Fonte: Autora (2025).

No dia fora da onda de calor, o P29_N continuou a apresentar as maiores reduções de temperatura, em até 1,16 K. Em seguida, as menores temperaturas tenderam a ocorrer no T29_N, P14_N e as maiores ocorreram no T14_N. Durante as primeiras horas do dia, o T14_N foi o único cenário que não apresentou aumento na temperatura do ar.

As menores temperaturas externas do ar na calçada nos cenários P14 e P29, comparados ao T14 e T29, podem ser atribuídas à configuração dos edifícios pátios. A área aberta no térreo desses cenários permite uma ventilação mais eficaz, contribuindo para a redução da temperatura.

Em relação ao conforto térmico externo, a Figura 51 apresenta as diferenças de PET, com o C4 como referência. No dia da onda de calor, todos os cenários reduziram o PET, exceto às 8 h, 23 h e meia-noite. As maiores reduções ocorreram no T29_H, em até 10,62 K, seguido pelo P29_H, em 9,47 K. A diminuição da altura das edificações tendeu a aumentar os valores de PET.

Figura 51: Diferenças de PET entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), durante a onda de calor.



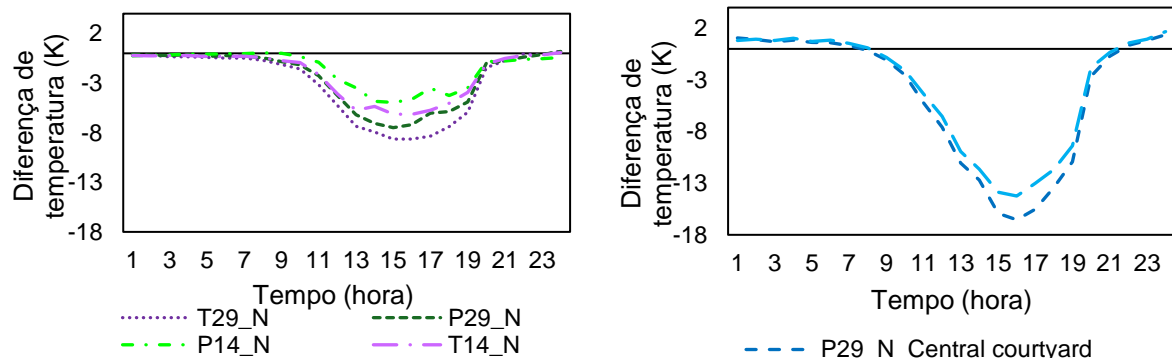
Fonte: Autora (2025).

Nos pátios internos do P29_H e P14_H, os valores de PET foram significativamente inferiores aos dos espaços entre as edificações do C4 durante o dia. O P29_H apresentou uma redução de até 16,92 K, enquanto o P14_H de 14,35 K. No entanto, entre 2 h e 6 h, às 8 h e entre 22 h e meia-noite, houve um aumento nos valores de PET, em até 2,10 K.

A diminuição do PET, nos pátios, durante o dia e o aumento durante a noite se deve a proximidade entre as paredes desta área e a altura da edificação. Durante o dia, essa configuração reduz a incidência de radiação solar direta, resultando na diminuição da temperatura. Porém, durante a noite, a perda de ondas longas de radiação, as trocas de calor e a ventilação são reduzidas, o que contribui para o aumento das temperaturas (Anders *et al.*, 2023; Callejas *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2024).

No dia fora de onda de calor (Figura 52), novamente todos os cenários reduziram o PET na maior parte do dia, com a maior diminuição observada no T29_N (8,63 K), seguido pelo P29_N (7,49 K). As maiores reduções ocorreram durante o período de maior radiação solar, devido ao sombreamento gerado por esses cenários.

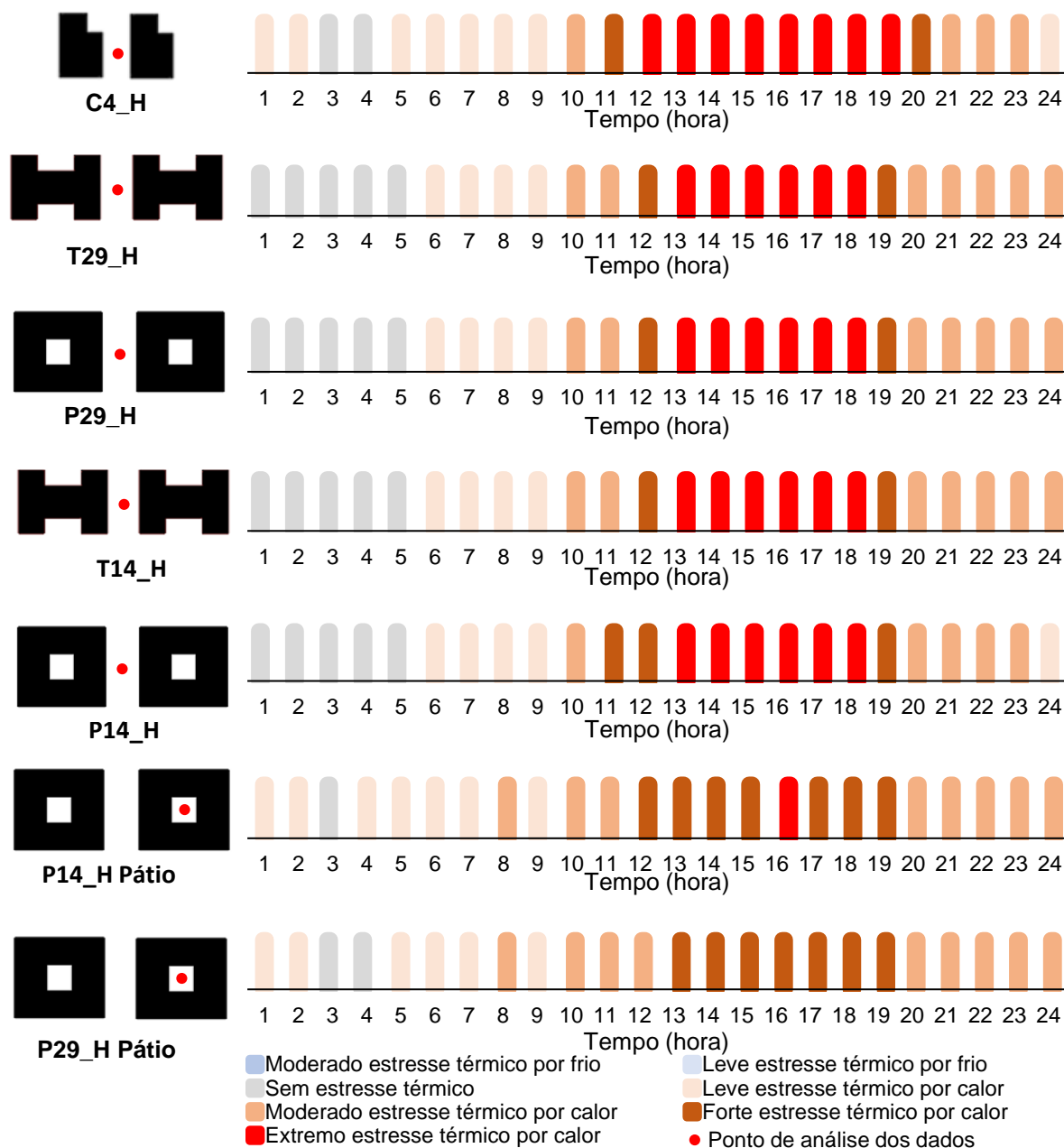
Figura 52: Diferenças de PET entre as edificações (à esquerda) e nos pátios (à direita), fora da onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

Nos pátios do P29_N e do P14_N houve um aumento do PET das 1 h às 8 h e das 22 h à meia-noite, com valores máximos de 1,67 K. No restante do dia os PETs foram reduzidos em até 16,55 K no P29_N e 14,24 K no P14_N. O impacto das variações dos PETs entre os cenários, no nível de estresse térmico, durante a onda de calor, é apresentado na Figura 53.

Figura 53: Estresse térmico entre as edificações e nos pátios durante a onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

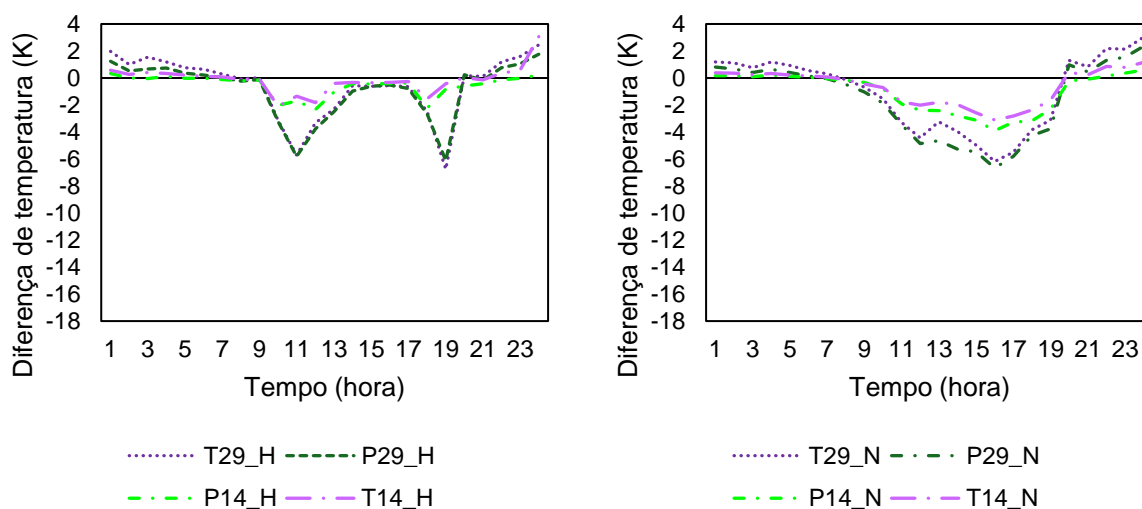
Comparado ao C4_H, tanto o T29_H quanto o P29_H reduziram o estresse térmico ao meio-dia e às 19 h, de extremo para forte em duas horas. Durante a madrugada, esses cenários também reduziram o estresse térmico para sem estresse em três horas. No entanto,

à meia-noite, houve um aumento no estresse térmico, de leve para moderado. A criação do pátio no P29_H resultou em uma área onde o extremo estresse térmico não ocorreu.

Nos cenários de menor verticalidade, o T14_H manteve níveis de estresse térmico iguais aos do T29_H. Por outro lado, o P14_H, em comparação ao P29_H, reduziu o estresse térmico à meia-noite de moderado para leve, mas aumentou às 10 h, de leve para moderado. O pátio do P14_H registrou extremo estresse térmico apenas às 16 h.

Em relação ao conforto térmico da calçada (Figura 54), durante a onda de calor, todos os cenários aumentaram o PET em relação ao C4_H até às 7h. À noite, o T14_H teve um aumento de até 3,06 K. No restante do dia, os PETs foram reduzidos de forma similar no P29_H e pelo T29_H, com uma redução máxima de 6,12 K. A redução da altura das edificações diminuiu as reduções dos PETs, de forma semelhante para o P14_H e o T14_H. No entanto, as maiores reduções ainda ocorreram no P14_H, correspondentes a até 2,32 K.

Figura 54: Diferença de PET na calçada durante a onda de calor (à esquerda) e fora da onda de calor (à direita).



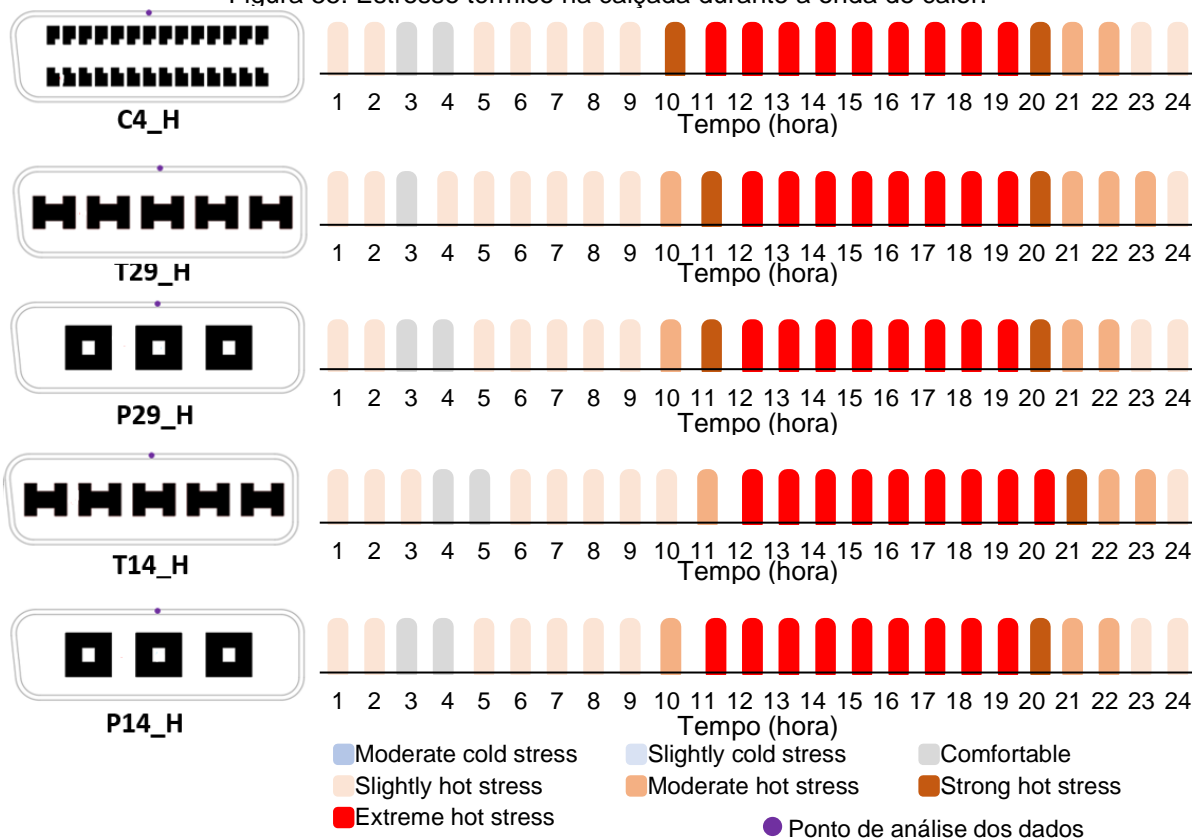
Fonte: Autora (2025).

No dia fora da onda de calor, os mesmos padrões do dia da onda de calor foram observados. Em ambos os casos, todos os cenários aumentaram os PETs nas primeiras e últimas horas do dia, enquanto reduziram durante o período com incidência solar. O P29_N proporcionou as maiores reduções de temperatura, seguido pelo T29_N, P14_N e, por fim, o T14_N.

Na calçada, as alterações nos valores de PET no T29_H e P29_H, reduziram o estresse térmico de extremo para forte às 11 h (Figura 55), e de forte para moderado às 10 h. No entanto, o T29_H aumentou o estresse térmico de leve para moderado às 23 h, e de sem estresse para leve estresse térmico às 4 h.

A redução da verticalidade no T14_H diminuiu o nível de estresse térmico às 10 h e 11 h, mas causou um aumento às 20 h e 21 h. No P14_H, em comparação com o P29_H, o estresse térmico aumentou apenas às 11 h.

Figura 55: Estresse térmico na calçada durante a onda de calor.



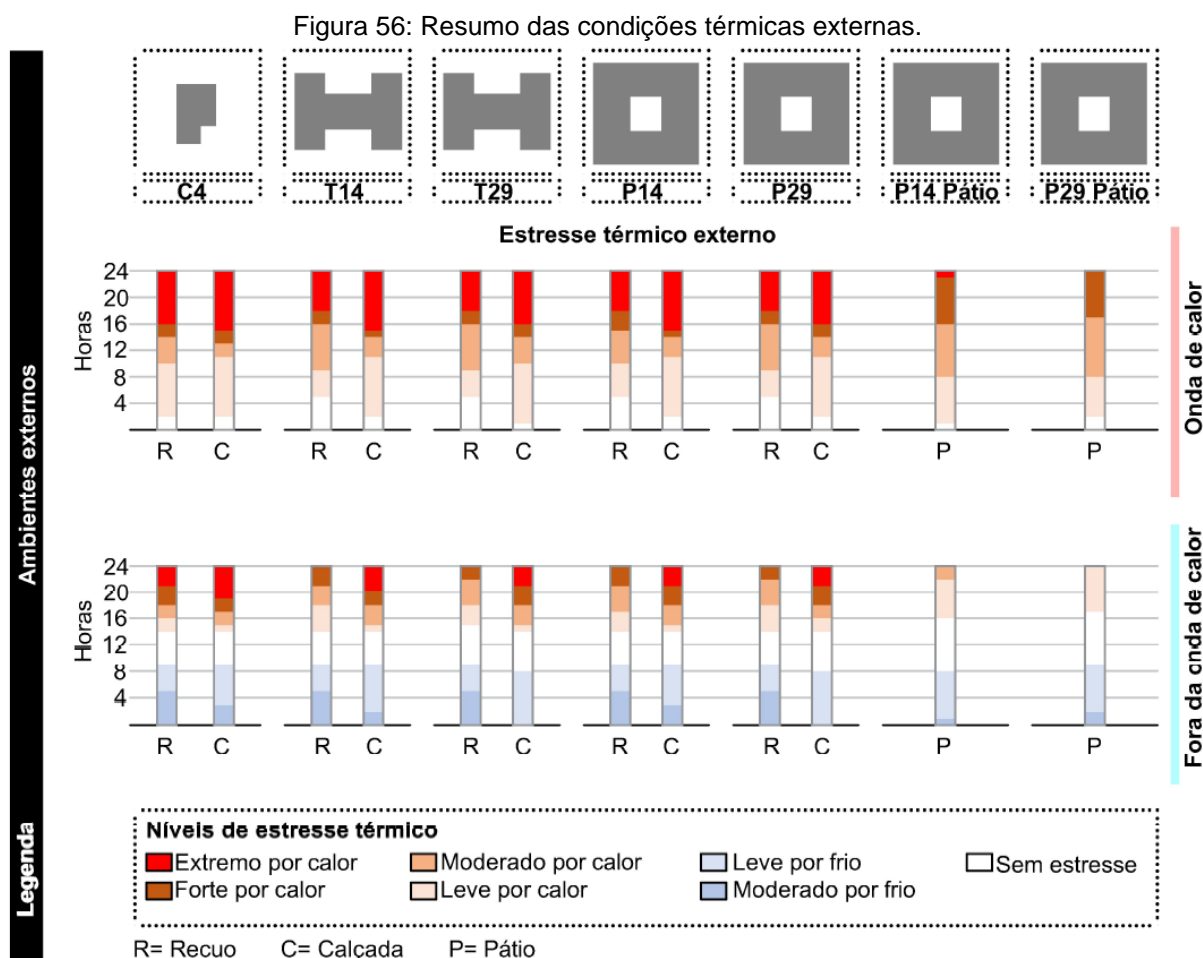
Fonte: Autora (2025).

Os resultados indicam que, embora o T29 e o T14 tenham aumentado a temperatura do ar durante a noite, tanto o T29 quanto o P29, T14 e P14 reduziram o estresse térmico, entre as edificações e na calçada. O T29 e o P29 proporcionaram as maiores reduções de estresse térmico. Por outro lado, as menores verticalidades diminuíram o potencial de mitigação do estresse térmico durante o dia, mas aumentaram durante a noite.

Dentre as tipologias analisadas, o P29 e o P14 se destacaram por gerarem pátios onde não ocorre extremo estresse térmico (P29) ou quase não ocorre (P14). Em todos os outros cenários, não há áreas onde o estresse térmico extremo é evitado entre 13 h e 19 h. Portanto, os pátios gerados pelo P29 e P14 apresentam grande potencial para aliviar o estresse térmico dos moradores, oferecendo espaços que podem ser utilizados para convivência e permanência temporária.

4.3.5 Resumo das condições térmicas externas

Para facilitar a compreensão do impacto de cada cenário nas calçadas e entre as edificações, foi elaborada a Figura 56, que resume o estresse térmico em cada um dos cenários.



Fonte: Autora (2025).

Durante o dia da onda de calor, nas áreas entre as edificações (R), os cenários T14, T29 e P29 apresentaram menos horas em extremo e forte estresse térmico por calor, comparados ao C4, que foi o cenário com maior estresse térmico. Já os pátios, enquanto as outras áreas apresentaram extremo estresse térmico, o reduziram para forte. Ao considerar os pátios, os cenários P29 e P14 apresentam possibilidades para redução do estresse térmico externo.

Nas calçadas, o P29 teve mais horas sem estresse térmico que o T29. Para ambos os casos, a redução da verticalidade aumentou o estresse térmico e o C4 novamente apresentou os maiores níveis de estresse térmico.

No dia fora da onda de calor, entre as edificações, o T29 apresentou os menores níveis de estresse térmico, seguido pelo P29, T14 e P14. Já nas calçadas os menores estresses térmicos ocorreram no P29, e posteriormente no T29, T14 e P14. Novamente, se

considerarmos os níveis de estresse térmico dos pátios, os cenários P29 e P14 apresentam potencial para reduzir o estresse térmico.

Desta forma, do ponto de vista externo, os cenários com tipologias habitacionais de torres em formato H e edifícios pátios, assim como o aumento da altura das edificações, apresentaram o potencial de amenizar o estresse térmico. O T29_H, T14_, P29_H e P14_H reduziram as horas em extremo estresse térmico em 25%, enquanto os pátios do P29_H e P14_H em 100% e 87,5%, respectivamente. Esses resultados se devem principalmente à diminuição da incidência solar com o aumento da altura das edificações, conforme discutido por autores como Lassandro, Di Turi e Zaccaro (2019), Masiero *et al.* (2022), Ronchi, Salata e Arcidiacono (2020), Yang *et al.* (2021) e Ma *et al.* (2022). É importante destacar que o aumento da altura das edificações foi realizada para cenários de baixa ocupação do solo. Se a altura das edificações for aumentada junto com o aumento da ocupação do solo, isso pode resultar em temperaturas do ar mais elevadas (Yang *et al.*, 2021).

Para avaliar o impacto das condições térmicas externas na demanda energética para climatização, no conforto térmico humano e no estresse térmico interno das habitações, essas questões são discutidas no tópico a seguir.

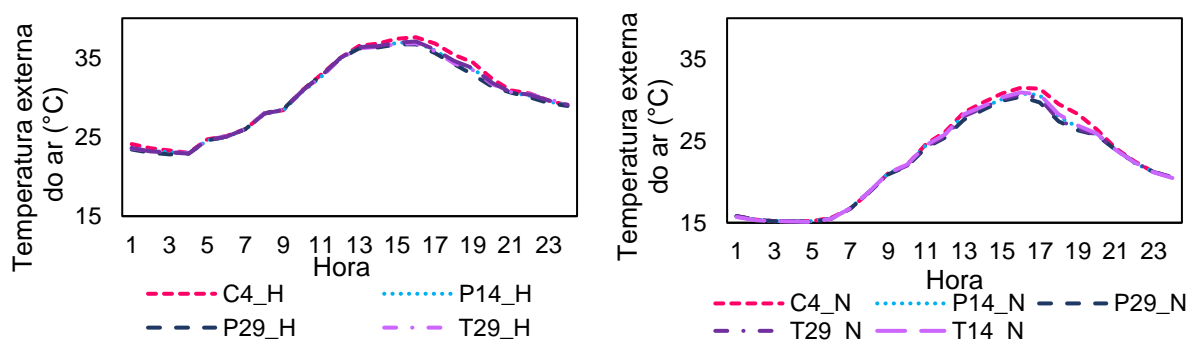
4.4 Condições térmicas das habitações

O impacto das tipologias habitacionais e das verticalidades no ambiente térmico das edificações foi analisado com base nas temperaturas externas do ar, temperaturas operativas, conforto térmico adaptativo, índice de calor e da demanda de energia para climatização, os quais são apresentados nesta seção.

4.4.1 Temperaturas externas do ar

O acoplamento das condições microclimáticas geradas pelo ENVI-met em cada cenário resultou em diferentes temperaturas externas do ar em cada simulação no EnergyPlus. A Figura 57 apresenta as temperaturas do ar em cada cenário, em um dia de onda de calor e outro posterior a este evento.

Figura 57: Temperaturas do ar durante a onda de calor (à esquerda) e fora (à direita).

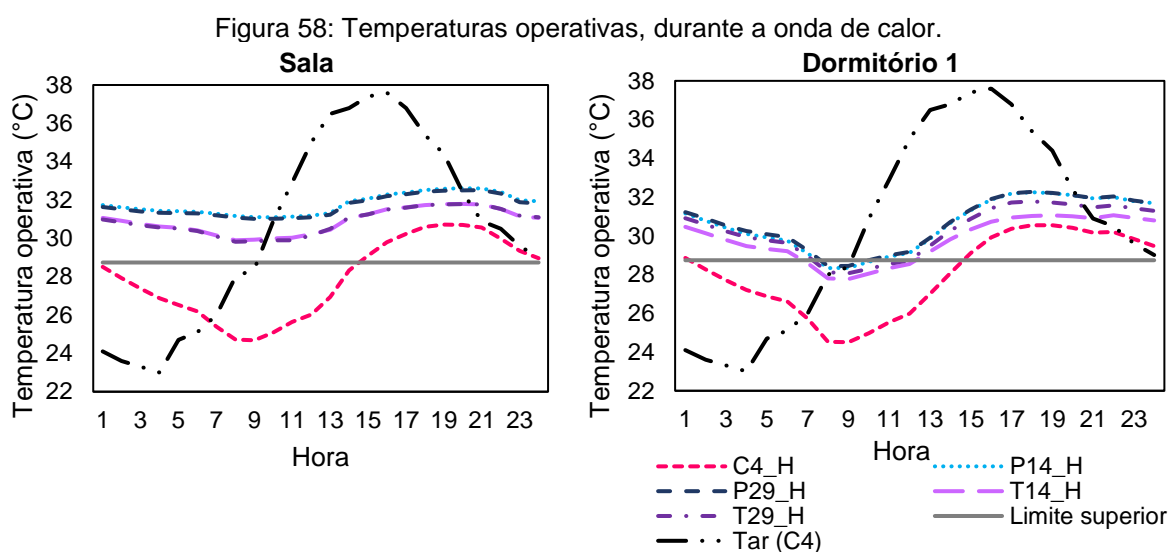


Fonte: Autora (2025).

No dia da onda de calor, as temperaturas externas do ar variaram entre 23 °C e 37 °C, com os maiores valores registrados no C4, seguidos pelo P14 e T29. As menores temperaturas, por sua vez, ocorreram no P29. No dia fora da onda de calor, as temperaturas oscilaram entre 15 °C e 31 °C, com maiores valores observados no C4 e os menores no P29.

4.4.2 Temperaturas operativas

As temperaturas operativas (TO) foram analisadas para a sala e dormitório 1. Os dados referentes ao dia da onda de calor são apresentados na Figura 58.

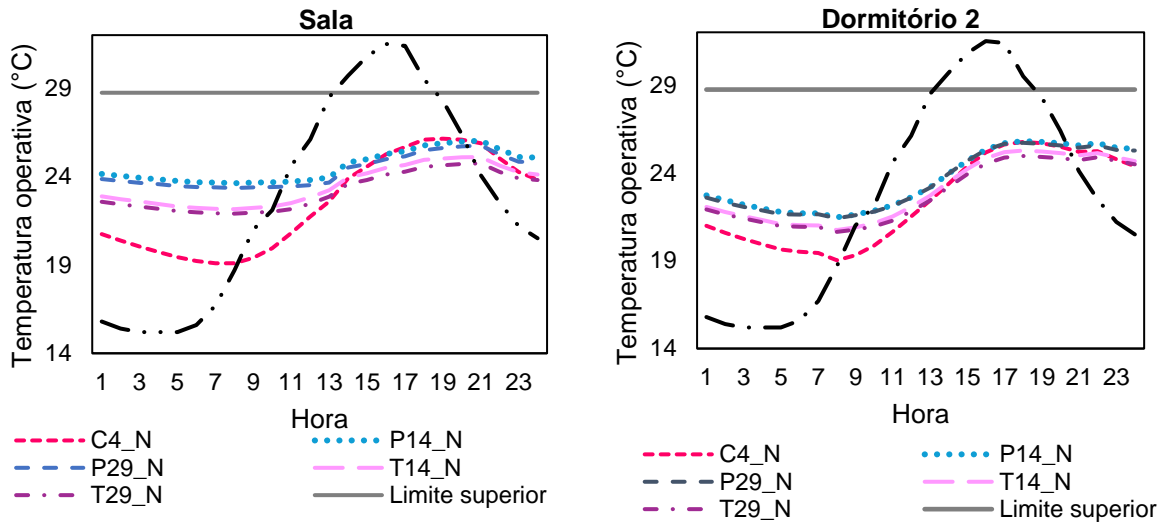


No dia da onda de calor, houve uma diferença significativa entre as temperaturas operativas do C4_H e dos demais cenários, de até 6,44 °C na sala (26,05%) e 3,93 °C (16,05%) no dormitório. Essas diferenças se devem, em parte, ao fato de a edificação térrea ter contato com o solo e a cobertura, o que permite tanto um maior ganho térmico quanto uma maior liberação térmica. As maiores diferenças de TO na sala, se devem à ausência de contato das paredes com o ambiente externo nos cenários T14, T29, P14 e P29.

O cenário com casas térreas (C4) apresentou as menores temperaturas operativas e a maior amplitude térmica. Entre os demais cenários, os com pátios (P) apresentaram as maiores TO. Assim como nos cenários de torres em formato H (T), a diminuição da verticalidade das edificações resultou no aumento das TO na sala e redução no dormitório. Na sala, esses acréscimos foram de até 0,12 °C (0,42%) no T14_H e de até 0,12 °C (0,39%) no P14_H. Já as reduções no dormitório chegaram a 0,78 °C (2,47%) no T14_H e 0,17 °C (0,58%) no P14_H.

No dia fora da onda de calor houve uma redução das diferenças de TO entre os cenários com torres H (T), edifícios pátios (P) e o com casas térreas (C) (Figura 59). Na sala, a diferença máxima entre os cenários foi de 4,56 °C, enquanto, no dormitório, foi de 2,44 °C.

Figura 59: Temperaturas operativas, fora da onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

Na sala e no dormitório, durante o período da manhã, as menores TO ocorreram no C4_N, enquanto, no restante do dia no T29_N e T14_N. Em relação à verticalidade, tanto nos cenários com torres em formato H quanto nos com edifícios pátios, a redução da verticalidade resultou em TO mais altas.

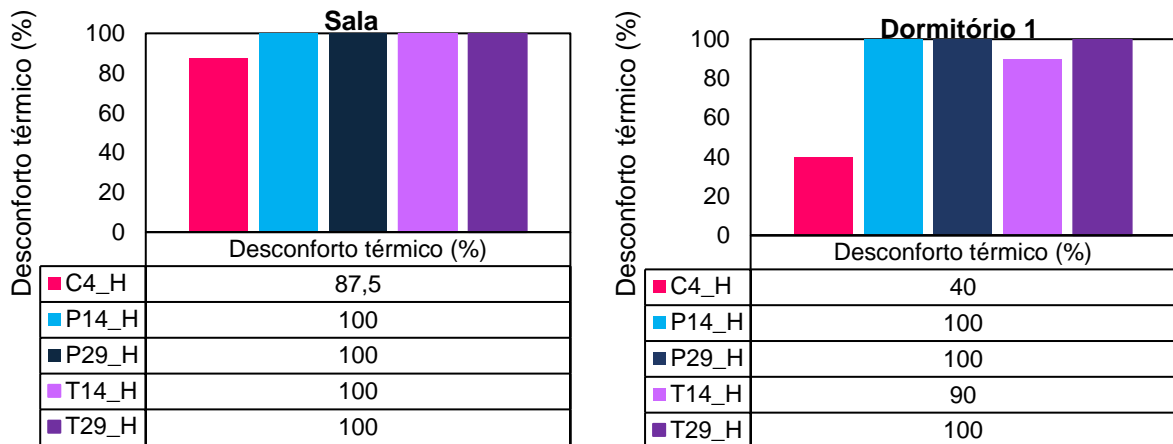
Em resumo, durante a onda de calor, o C4_H apresentou as menores TO, enquanto os cenários com edifícios pátios, as maiores. Já no dia fora da onda de calor, o C4_N apresentou as menores TO durante o período da manhã, enquanto o T29_N e o T14_H, durante a tarde e noite. Em todos os casos a redução da verticalidade das edificações resultou no aumento das TO, com exceção do dormitório no dia da onda de calor.

As diferenças entre os dias de onda de calor e fora da onda de calor, podem ser explicadas pelas condições climáticas. O dia posterior à onda de calor apresentou alta nebulosidade, o que reduziu a reflexão de ondas longas de calor nos cenários T14, T29, P14 e P29 e o acúmulo de calor devido à ausência de contato com a cobertura e com o solo.

4.4.3 Conforto térmico adaptativo

A porcentagem de horas em desconforto térmico das habitações foi calculada considerando o t_{pm}a como a média mensal da temperatura do mês de setembro de 2023. Os valores para o dia de onda de calor são apresentados na Figura 60. Com exceção do C4_H e do T14_H, tanto na sala quanto no dormitório 1, todos os cenários resultaram em desconforto térmico em todas as horas ocupadas. Na sala, o desconforto térmico no C4_H foi de 87,5%, enquanto no dormitório 1 de 40%. Já o T14_H apresentou 90% de desconforto térmico no dormitório.

Figura 60: Porcentagens de horas ocupadas em desconforto térmico, durante a onda de calor.



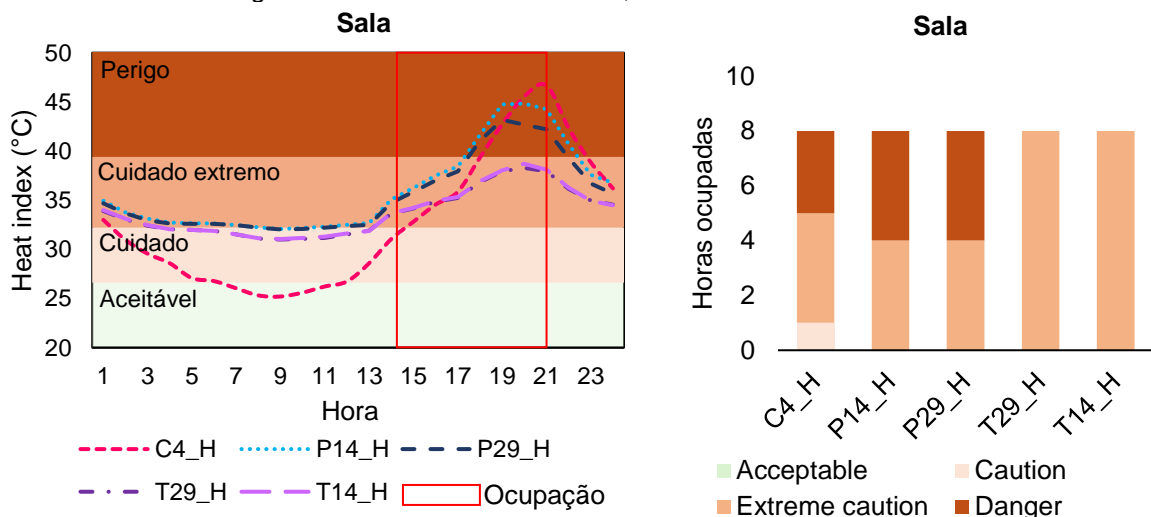
Fonte: Autora (2025).

No dia fora da onda de calor, em todos os ambientes e cenários analisados, todas as horas estiveram em conforto térmico. Isto se deve, em parte, pelo tpma, que considera as temperaturas ocorridas nos dias de onda de calor, o que resulta em um limite superior de conforto térmico mais alto (28,74°C).

4.4.4 Índice de calor

O índice de calor (IC) na sala, para o dia da onda de calor, é apresentado na Figura 61. A partir das 17 h houve uma elevação no IC do C4_H, que possuía os menores valores entre os cenários. Dessa forma, o T29_H e o T14_H apresentaram, na maioria das horas ocupadas, os menores IC, e foram os únicos em que não ocorreram horas classificadas como em perigo. O P14_H e o P29_H, em comparação ao C4, aumentaram a classificação em uma hora de cuidado extremo para perigo, as quais estão relacionadas a prováveis câibras de calor, esgotamento e insolação.

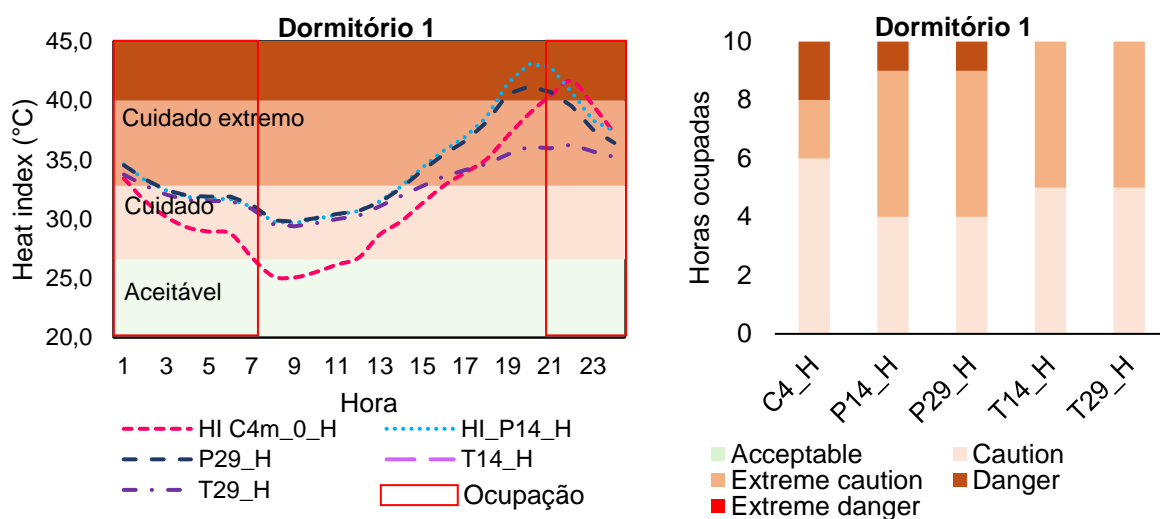
Figura 61: Índice de calor na sala, durante a onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

No dormitório (Figura 62), durante as horas de ocupação, novamente o T29_H e o T14_H foram os únicos em que não ocorreram horas em perigo. Durante 1 h e 17 h, o C4_H apresentou menores IC, porém, a partir das 18 h, o T29_H e o T14_H passaram a apresentar os menores valores. Já os cenários com pátios tenderam a apresentar os maiores IC, com valores melhores que o C4_H apenas a partir das 22 h. Apesar disso, o P14_H e o P29_H apresentaram duas horas ocupadas a menos em perigo que o C4_H, mas mais três horas em cuidado extremo.

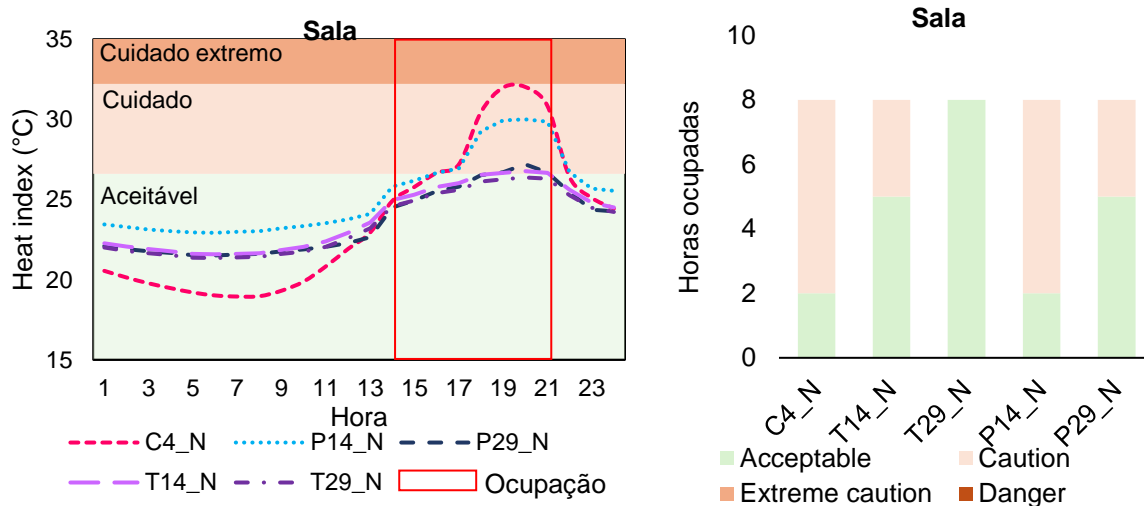
Figura 62: Índice de calor no dormitório, durante a onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

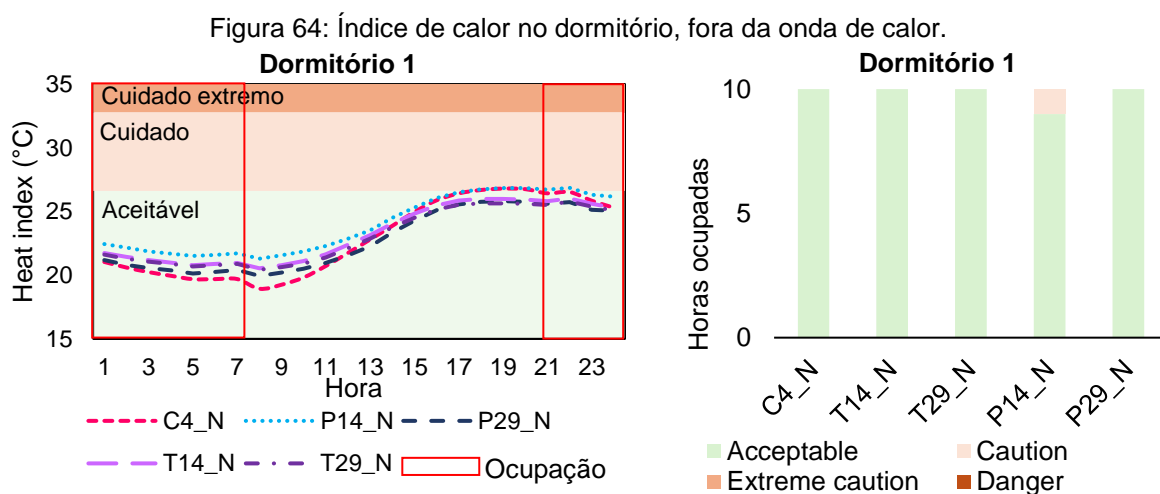
Fora da onda de calor, na sala, o C4_N apresentou os maiores índices de calor durante o período de ocupação, seguido pelo P14_N (Figura 63). Nos demais cenários (P29_N, T14_N e T29_N), os valores de IC estiveram muito próximos, porém, no T29_N, todas as horas estiveram dentro do intervalo aceitável, enquanto os demais apresentaram horas em cuidado.

Figura 63: Índice de calor na sala, fora da onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

No dormitório (Figura 64), com exceção do P14_N, todos os cenários apresentaram IC aceitáveis. Das 1 h às 11 h, a ordem crescente de IC foi: C4_N, seguido pelo P29_N, T29_N, T14_N e P14_N. A partir das 12 h, o C4_N registrou valores inferiores apenas ao P14_N.



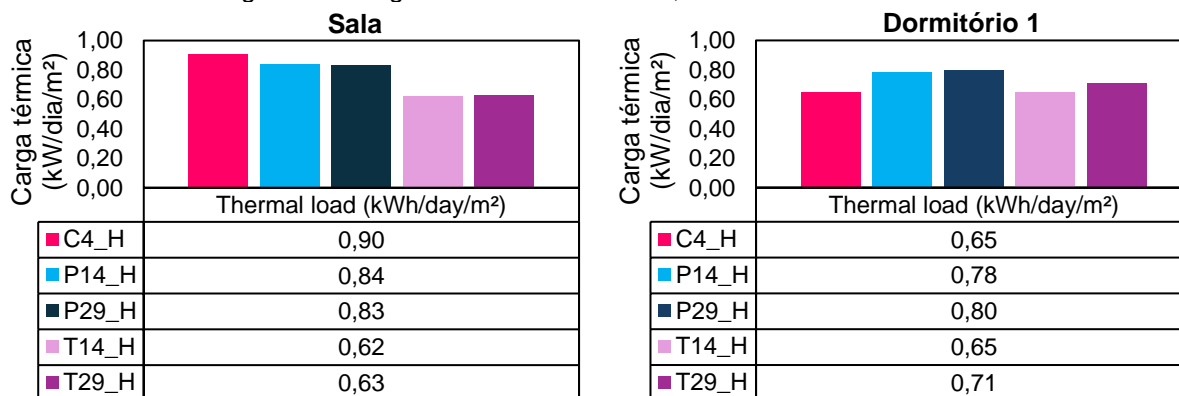
Fonte: Autora (2025).

Em relação ao índice de calor, o T29 e T14 apresentaram os melhores resultados, e a redução da verticalidade, novamente demonstrou agravar as condições térmicas das edificações.

4.4.5 Demanda energética de climatização das habitações

A demanda energética de climatização por m², durante a onda de calor, é apresentado na Figura 65. Na sala, a maior carga térmica ocorreu no C4_H, seguido pelo P14_H e P29_H. Os menores consumos energéticos foram registrados no T14_H e T29_H. Em relação ao C4_H, o P14_H e o P29_H reduziram a carga térmica em 6,66% e 7,77%, respectivamente. Já o T14_H e o T29_H reduziram em 31,11% e 30%, respectivamente.

Figura 65: Carga térmica dos cenários, durante a onda de calor.

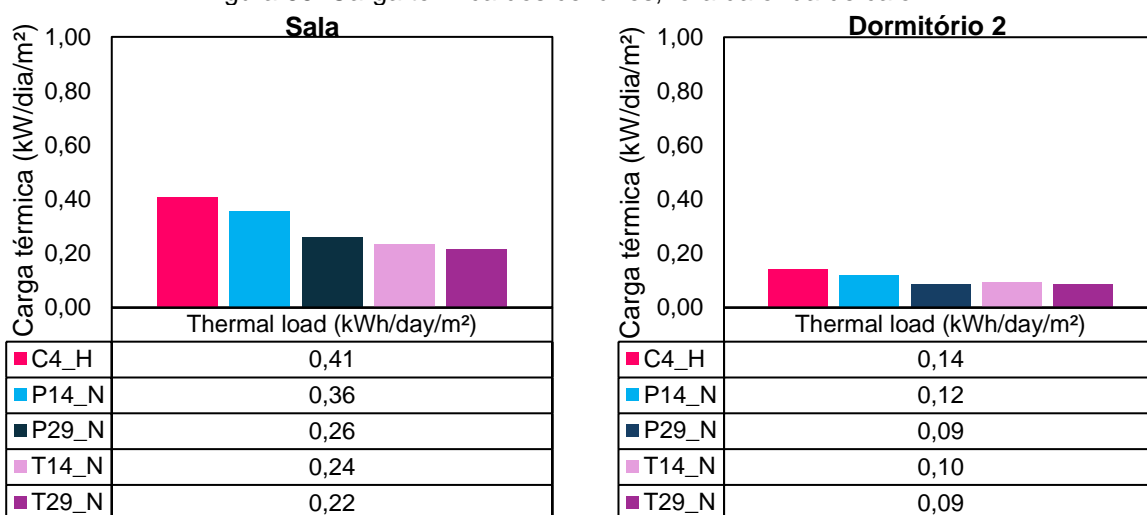


Fonte: Autora (2025).

No dormitório, a maior demanda energética ocorreu no P29_H e no P14_H, enquanto os menores ocorreram no T14_H e no C4_H. Comparado ao cenário com edificações térreas (C4), o P29_H e o P14_H e o T29_H aumentaram a demanda em 23,07%, 20,0% e 9,23%, respectivamente.

No dia fora da onda de calor, o C4_N continuou a apresentar a maior demanda energética na sala, enquanto o menor foi registrado no T29_N, seguido pelo T14_N (Figura 66). Nesta condição climática, na sala, a redução de carga térmica gerada pelo T29_N, T14_N, P29_N e P14_N, em comparação C4_N, foi de 46,34%, 41,46%, 36,58% e 12,19%, respectivamente. No dormitório, a maior carga térmica também foi registrada no C4_N e as menores no T29_N e P29_N, com uma redução de 35,71%.

Figura 66: Carga térmica dos cenários, fora da onda de calor.



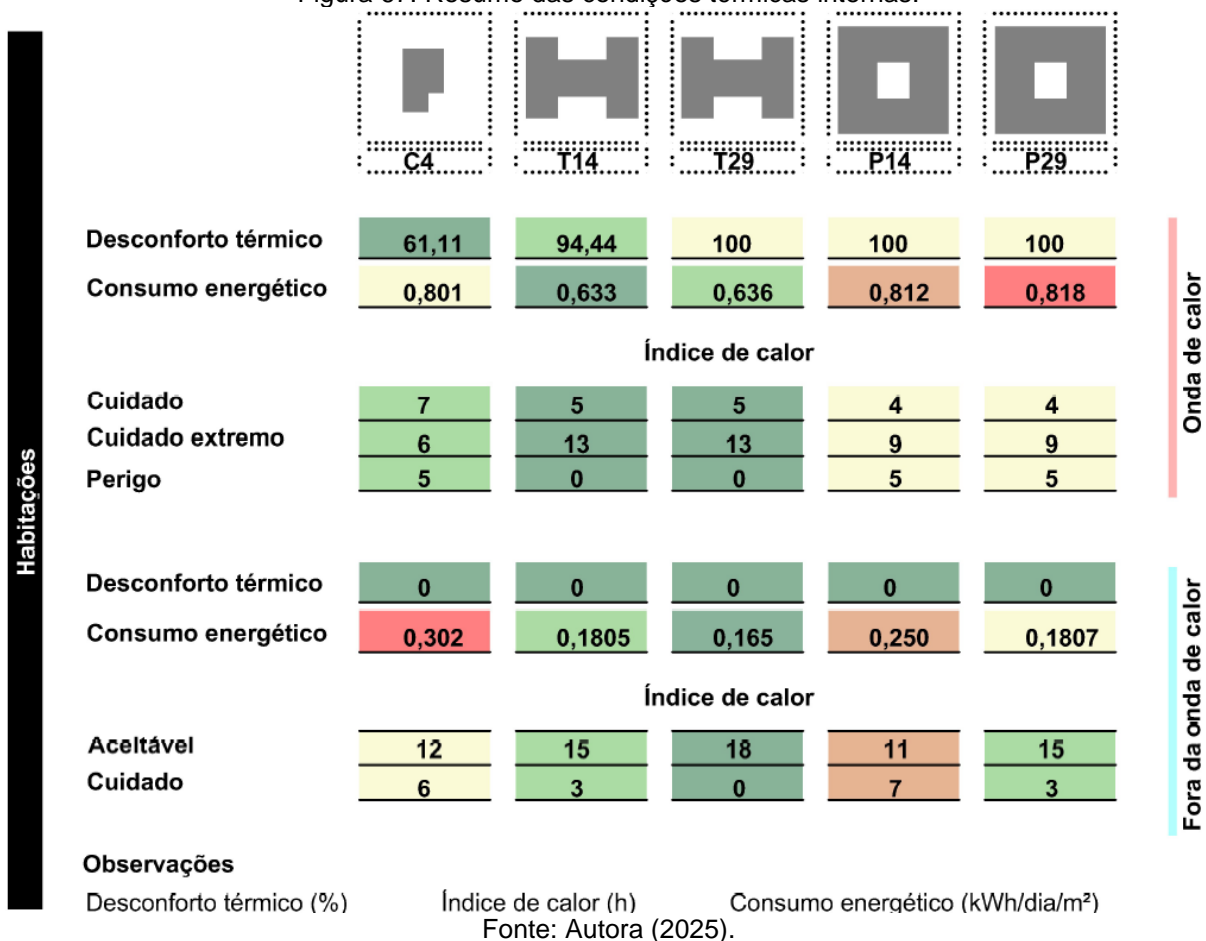
Fonte: Autora (2025).

Nos casos apresentados, durante a onda de calor, a redução da altura das edificações tendeu a reduzir as cargas térmicas de resfriamento, enquanto no dia fora da onda de calor tendeu a aumentar. Esta questão pode ser relacionada a maior reflexão de ondas longas nos cenários com edifícios mais altos, as quais no dia fora da onda de calor, devido a presença de nuvens e menor incidência solar foram amenizadas.

4.4.6 Resumo das condições térmicas internas

Para facilitar a avaliação das condições térmicas internas das edificações, foi elaborado um quadro com as condições de conforto térmico, demanda energética de climatização e índice de calor, considerando a soma de todos os ambientes (Figura 67).

Figura 67: Resumo das condições térmicas internas.



Ao analisar os resultados dos cenários para os diferentes índices, observou-se que, ao balancear todos os critérios durante a onda de calor, o T14 e o T29 obtiveram os melhores resultados. Por outro lado, o P14 e o P29 apresentaram os piores resultados, especialmente devido a maior quantidade de horas em cuidado extremo. No dia fora da onda de calor o melhor cenário foi o T29, seguido pelo T14 e P29. Já os cenários P14 e C4 foram os menos favoráveis para a saúde e conforto térmico dos moradores.

É importante destacar que as análises realizadas se referem a uma única unidade de apartamento, localizada no pavimento central de edificações com tipologias em H e em pátio, cuja orientação de janelas e paredes externas foi mantida semelhante à da casa térrea. Ressalta-se, entretanto, que outras unidades com diferentes orientações solares (especialmente aquelas com menor incidência de radiação solar) e localizadas em pavimentos inferiores podem apresentar condições térmicas distintas. Nesses casos, as condições térmicas podem ser superiores às da unidade analisada e mais próximas às observadas na casa térrea.

4.4.7 Discussões sobre as condições térmicas internas

Os resultados das temperaturas externas do ar indicaram os maiores valores no C4. Essa questão pode ser explicada pela menor altura das edificações, que resulta em maior incidência de radiação solar. Já as maiores Tar do T14 e T29, comparadas ao P29 e P14, se devem em parte pelo menor recuo entre as edificações, que resultam na maior reflexão de ondas longas (Anders *et al.*, 2023).

Os resultados de temperaturas operativas, conforto térmico, índices de calor e demanda energética dos cenários que possuem as mesmas condições de contato com solo e cobertura (T14, T29, P14 e P29), condizem com os de outros estudos. Natanian *et al.* (2020), Zheng e Li (2022) e Li *et al.* (2022), em diferentes contextos climáticos, identificaram que o sombreamento gerado por maiores verticalidades e densidades habitacionais e menores Fatores de Visão do Céu, reduziram as temperaturas operativas e cargas térmicas de resfriamento dos ambientes.

Nos cenários com edifícios pátios, as maiores temperaturas operativas e cargas térmicas de resfriamento, comparado aos cenários T14 e T29, podem ser explicadas pela incidência solar nas paredes internas do pátio, e conseqüentemente pela maior reflexão de ondas longas de calor. Esse fenômeno foi identificado no estudo de M'Saouri El Bat *et al.* (2023), onde pátios quadrados aumentaram a carga térmica de resfriamento em climas quentes e semiáridos, enquanto reduziram a carga térmica de aquecimento em climas frios.

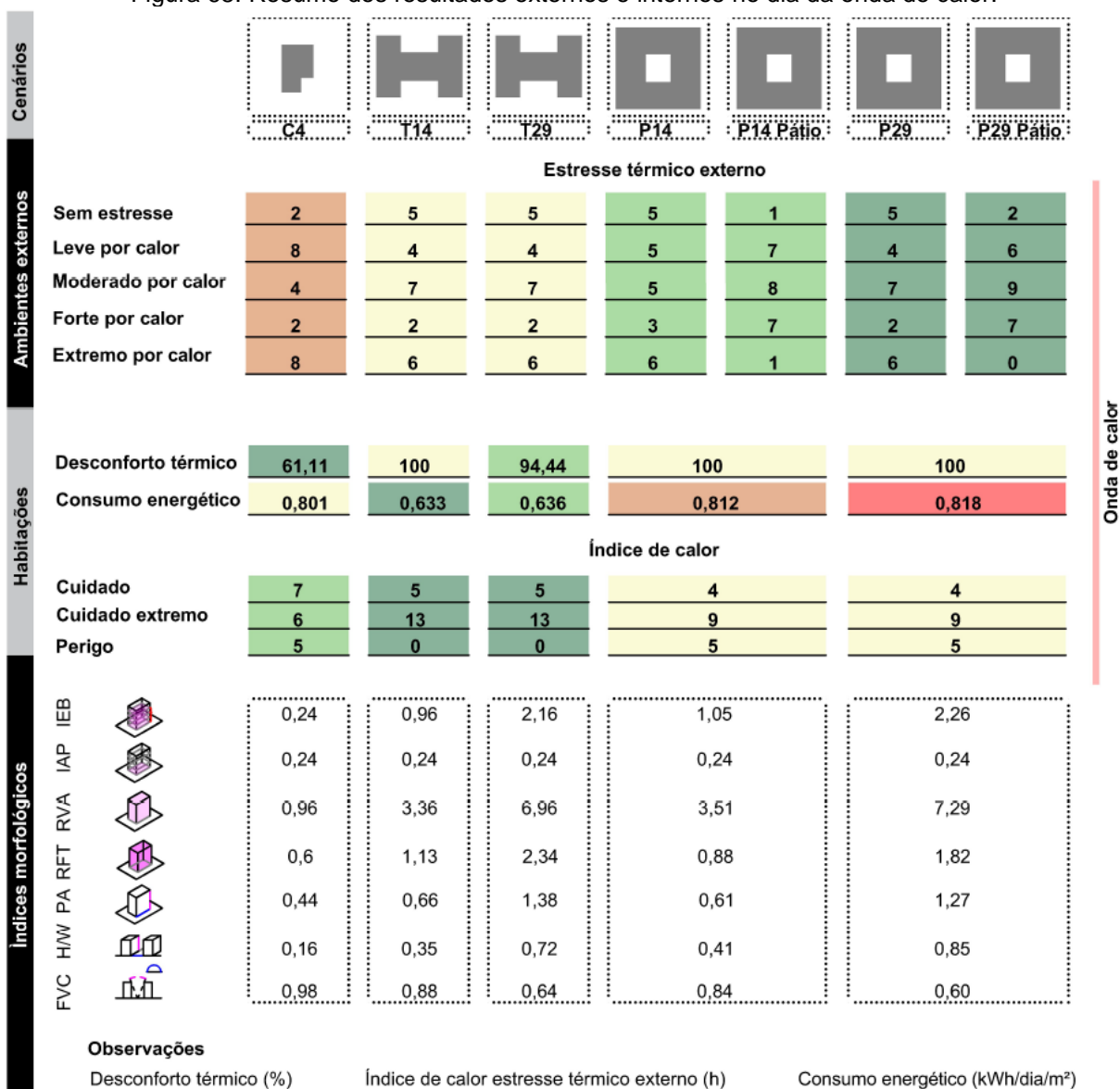
Esses resultados destacam a importância do planejamento urbano alinhado ao clima, considerando índices de morfologia urbana que reduzam o estresse térmico e a demanda energética de climatização das habitações. Para isso, há a necessidade do estudo aprofundado dessas questões para climas brasileiros, a fim de maior embasamento para as tomadas de decisões no planejamento urbano.

Da mesma forma, os resultados obtidos nos cenários com edifícios pátios, destacam a importância do estudo das configurações de tipologias habitacionais. Pátios quadrados, para a condição de onda de calor, resultaram no aumento da demanda energética, porém, configurações de pátios mais estreitas e compridas podem amenizar essas questões, como identificado por M'Saouri El Bat *et al.* (2023).

4.5 Impacto das tipologias habitacionais e verticalidade nas condições térmicas externas e internas

O impacto das tipologias habitacionais e das verticalidades nas condições térmicas externas e internas é apresentado de forma resumida na Figura 68, para o dia da onda de calor. Em relação às condições internas, foram calculadas as médias, considerando a sala e o dormitório.

Figura 68: Resumo dos resultados externos e internos no dia da onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

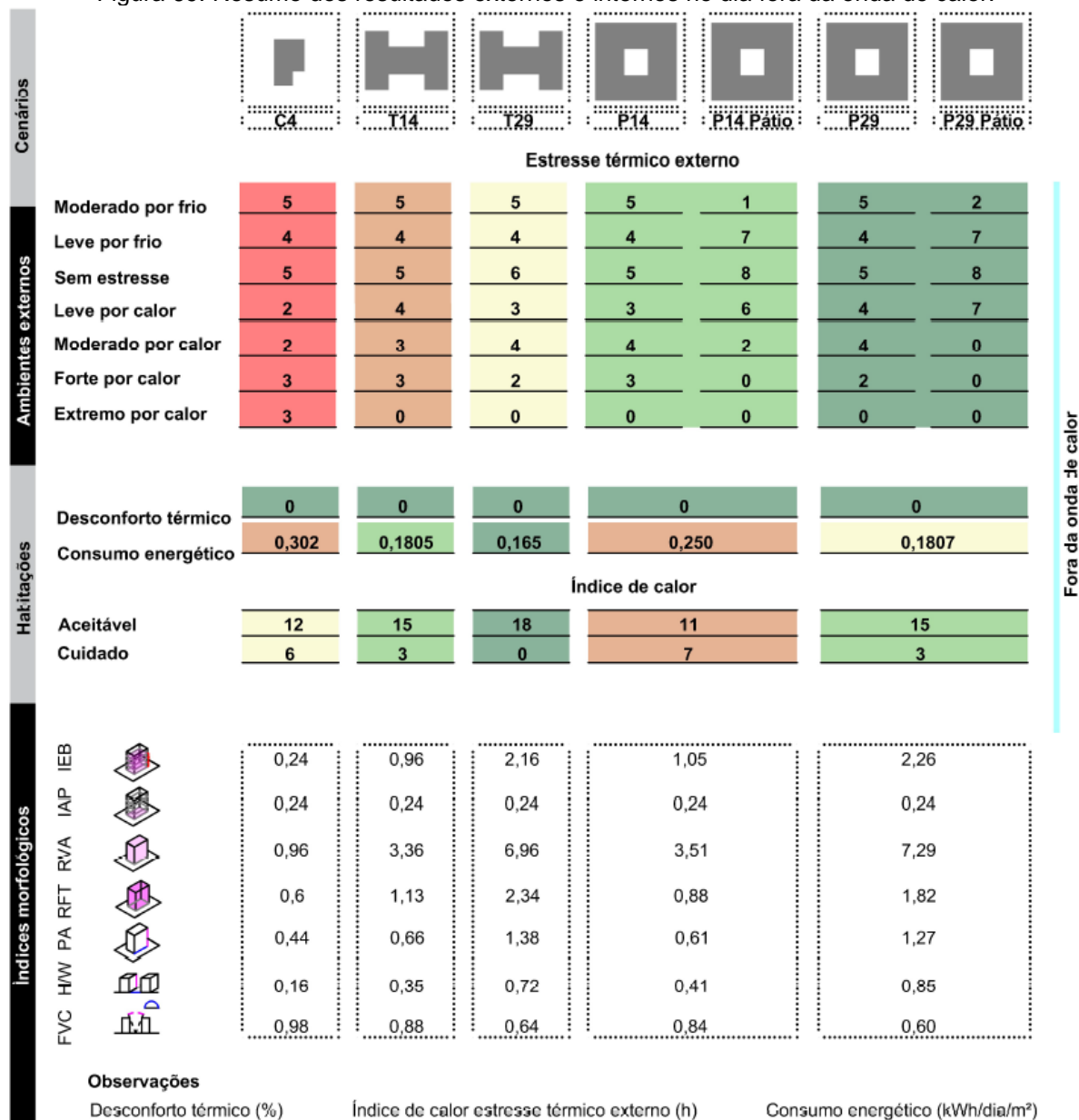
Ao considerar as condições externas e internas, apesar das melhores condições externas do P29 e P14, as melhores soluções seriam o T29 e o T14, por possuírem as melhores condições térmicas internas e, externamente, serem inferiores ao P29 e P14 apenas devido aos pátios. Nos demais cenários, enquanto o C4 apresenta melhores condições internas que o P29 e o P14, na parte externa é inferior a esses cenários.

Nas condições térmicas internas, ao considerar todos os parâmetros, os cenários T29 e T14 apresentaram melhores resultados. Por outro lado, os cenários com pátios (P14 e P29) apresentaram os maiores índices de calor e demanda energética.

O resumo das condições externas e internas para o dia fora da onda de calor é apresentado na Figura 69. Nesse dia, considerando as condições externas e internas, os

melhores cenários foram o P29 e o T29, enquanto o pior foi o C4, principalmente devido ao estresse térmico externo.

Figura 69: Resumo dos resultados externos e internos no dia fora da onda de calor.



Fonte: Autora (2025).

Ao analisar os índices morfológicos dos cenários, percebe-se que os cenários P29, P14, T29 e T14, apresentam valores muito semelhantes em todos os parâmetros. As Relações de Volume por Área (RVA) do T29 e T14 são levemente inferiores às do P29 e P14, respectivamente. Apesar disso, as Relações Fachadas Terrenos (RFT) do T29 e T14 são mais altas, o que indica maior área de fachadas para absorção de calor. Quanto à Relação H/W e o Fator de Visão do Céu (FVC) o T29 e o T14 possuem valores mais baixos no primeiro

e mais altos no segundo. Esses últimos parâmetros indicam que o cenário com torres em formato H teria maior capacidade de resfriamento das superfícies.

Apesar das indicações quanto aos índices morfológicos dos cenários, a baixa diferença entre as configurações com torres em formato H (T) e edifícios pátios (P) não seria suficiente para explicar a diferença significativa entre os resultados internos. Todavia, ao analisar a configuração dos cenários P29 e P14, os pátios, apesar de proporcionarem áreas externas sem extremo estresse térmico por calor, acumulam calor ao longo de sua altura, devido à reflexão de ondas longas, o que diminui as condições térmicas internas. Essa questão também foi identificada no estudo de M'Saouri El Bat *et al.* (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou as condições térmicas externas e internas de habitações de interesse social em função da verticalidade e das tipologias edificadas, tanto durante quanto fora de uma onda de calor. Para isso, foi realizado o acoplamento do ENVI-met ao EnergyPlus para analisar cenários com edificações térreas, de torres em formato H e edifícios pátios, variando a altura das edificações de 14 para 29 metros.

No que diz respeito às condições térmicas externas, o cenário de edificações térreas, amplamente empregado em loteamentos de interesse social no Brasil, apresentou os maiores níveis de estresse térmico. Em contrapartida, os cenários compostos por torres em formato H e edifícios pátios apresentaram potencial para amenizar esse estresse térmico. Para as verticalidades de 29 metros, esses cenários reduziram o estresse térmico de extremo para forte em duas horas e de moderado para sem estresse térmico em três horas. Os edifícios pátios se destacaram por serem os únicos a criarem áreas em que não houve extremo estresse térmico. No entanto, a redução da altura das edificações comprometeu a mitigação do estresse térmico.

Em relação às condições térmicas internas, os cenários com torres em formato H apresentaram os menores níveis de estresse térmico, sendo os únicos a não apresentarem horas classificadas como “em perigo”. Esses cenários também exibiram as menores cargas térmicas de resfriamento, com reduções de até 20,97% em relação ao cenário real de casas térreas. Em contrapartida, os cenários com edifícios pátios apresentaram as maiores cargas térmicas de resfriamento, com um aumento de até 29,22% em relação ao melhor cenário, além de maiores níveis de estresse térmico durante a onda de calor. A redução da verticalidade se mostrou vantajosa durante a onda de calor, mas desfavorável fora desse período.

Considerando um equilíbrio entre as melhores condições térmicas externas e internas, os cenários com torres em formato H se destacaram como a solução mais eficiente.

Internamente, ofereceram as melhores condições térmicas, enquanto externamente foram inferiores aos com edifícios pátios apenas pela ausência das áreas de pátios.

Os resultados evidenciaram que a altura das edificações, as tipologias habitacionais e, conseqüentemente a morfologia urbana, impactam significativamente tanto nas condições térmicas externas quanto nas internas. Apesar disso, um cenário pode melhorar as condições térmicas externas e, internamente reduzir. Dessa forma, é essencial aprofundar os estudos sobre o impacto da morfologia urbana no ambiente térmico interno das habitações para embasar um planejamento urbano capaz de minimizar o consumo energético e o estresse térmico, beneficiando tanto os pedestres quanto os habitantes. Isso contribuiria para a melhoria da qualidade de vida e para a redução dos impactos dos eventos climáticos extremos na saúde humana.

Apesar da clara influência do impacto da morfologia urbana nas condições térmicas, coeficientes atualmente empregados no planejamento urbano não consideram seus efeitos sobre a qualidade térmica dos ambientes externos e internos. Dessa forma, é necessário incorporar índices de morfologia urbana que adequem o planejamento ao clima, tornando as cidades mais resilientes.

Os achados deste estudo contribuem para evidenciar as condições térmicas extremas em loteamentos unifamiliares de interesse social durante ondas de calor, em climas semelhantes ao de São Carlos (Cwa). Tanto dentro das habitações quanto fora, os moradores são expostos a altos níveis de estresse térmico, os quais podem causar câibras de calor, esgotamento e insolação, afetando negativamente a saúde e bem-estar. Essa realidade destaca a necessidade de soluções para amenizar o estresse térmico nessas áreas, a fim de reduzir os impactos na saúde dos moradores, pedestres e trabalhadores ao ar livre. Além disso, reforça a necessidade de estudos que aprofundem os conhecimentos nesta área, subsidiando a incorporação de índices de morfologia urbana no planejamento urbano em climas brasileiros.

5.1 Limitações

A pesquisa apresentada possui algumas limitações relacionadas ao *software utilizado*, ao método adotado e às configurações das simulações, conforme descrito a seguir:

Software:

- O ENVI-met requer alta demanda por processamento computacional, grande capacidade de armazenamento e longos períodos de simulação, o que inviabiliza análises em escala anual ou com múltiplos cenários, sobretudo no contexto de uma pesquisa de mestrado.

Método:

- O método de acoplamento adotado, por ser de encadeamento, permite avaliar o impacto do cenário urbano sobre as habitações. No entanto, não considera o impacto das edificações sobre o microclima urbano.

Decisões de simulações e análises:

- Nos edifícios pátios e nas torres em formato H, as condições térmicas internas foram analisadas apenas no pavimento central;
- Para cada tipo de edifício, foi analisada apenas uma unidade habitacional por pavimento, escolhida com base na orientação solar e na direção das aberturas mais semelhantes à da casa térrea;
- As configurações de aberturas para ventilação natural das unidades habitacionais foram definidas com base no controle ideal previsto pela NBR 15575 (ABNT, 2021). No entanto, esse controle ideal pode não refletir o comportamento real dos moradores.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, indicam-se:

1. O estudo de diferentes configurações de edifícios pátios, avaliando proporções variadas dos pátios que possam reduzir a demanda de carga térmica para resfriamento e aquecimento em climas brasileiros;
2. A investigação do impacto de outros índices de morfologia urbana nas condições térmicas, como o Fator de Visão do Céu, o espaçamento entre as edificações e a Taxa de Ocupação;
3. A análise do efeito combinado da vegetação, de diferentes tipos de pavimentação e da morfologia urbana nas condições térmicas;
4. A ampliação dos estudos para outros climas brasileiros, incluindo a análise de dias representativos de cada estação;
5. A investigação do impacto dos índices de morfologia urbana nos pavimentos térreos e de cobertura, com o objetivo de compreender as variações térmicas ao longo do edifício e identificar os pontos mais críticos, bem como possíveis estratégias de mitigação;
6. A análise do impacto da morfologia urbana nas condições térmicas das demais unidades habitacionais do pavimento, visando compreender os efeitos da posição e da orientação solar nas condições térmicas internas;

7. Analisar as condições térmicas internas ao utilizar padrões de abertura de janelas e portas semelhantes aos adotados pelos moradores, de modo a refletir comportamentos reais de ventilação natural;
8. Analisar o impacto de diferentes índices de morfologia urbana em outros parâmetros como a iluminação natural e a salubridade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL HADDID, Hala; AL-OBAIDI, Karam M. Examining the impact of urban canyons morphology on outdoor environmental conditions in city centres with a temperate climate. **Energy Nexus**, [s. l.], vol. 8, no. October, p. 100159, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100159>.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating and air-conditioning engineers. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. [s. l.], 2017.

ANDERS, Julian; SCHUBERT, Sebastian; SAUTER, Tobias; TUNN, Siiri; SCHNEIDER, Christoph; SALIM, Mohamed. Modelling the impact of an urban development project on microclimate and outdoor thermal comfort in a mid-latitude city. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 296, no. July, p. 113324, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113324>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

BASSOLINO, Eduardo; D'AMBROSIO, Valeria; SGOBBO, Alessandro. Data exchange processes for the definition of climate-proof design strategies for the adaptation to heatwaves in the urban open spaces of dense Italian cities. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], vol. 13, no. 10, 2021. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5694>.

BAVARESCO, Mateus V; CUCHIVAGUE, Hamilton Yair Ortiz; SCHINAZI, Alexandre; GHISI, Eneidir. Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, [s. l.], vol. 21, no. 1, p. 263–292, 2021. Available at: <https://www.scielo.br/j/ac/a/MCZzz7WysfwRdfyN6YzjmLJ/>.

BENINCÁ, Letiane; CRESPO SÁNCHEZ, Eva; PASSUELLO, Ana; KARINI LEITZKE, Rodrigo; GRALA DA CUNHA, Eduardo; MARIA GONZÁLEZ BARROSO, José. Multi-objective optimization of the solar orientation of two residential multifamily buildings in south Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 285, p. 112838, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112838>.

BERKELEY, Lawrence; RIDGE, O A K; UT-BATTELLE, Managed B Y; FOR, Alliance; ENERGY, Sustainable; OR, Ducod; IN, Transmitted; FORM, A N Y; BY, O R; MEANS, A N Y; THE, Without. **Engineering Reference**. [S. l.: s. n.], 2020. Available at: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v24.2.0/EngineeringReference.pdf.

BIARDEAU, Léopold T.; DAVIS, Lucas W.; GERTLER, Paul; WOLFRAM, Catherine. Heat exposure and global air conditioning. **Nature Sustainability**, [s. l.], vol. 3, no. 1, p. 25–28,

2020. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0441-9>.

BRASIL. **Lei N° 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, Seção 1, p. 1, 2001. Available at: Diário Oficial da União, Seção 1, p. 1.

BRASIL, Ministério das Cidades. **PORTARIA MCID N° 725, DE 15 DE JUNHO DE 2023**. Brasília: 2023. Available at: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mcid-n-725-de-15-de-junho-de-2023-490336615>.

BRUSE, Michael; FLEER, Heribert. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], vol. 13, no. 3–4, p. 373–384, 1998. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815298000425>.

CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio; DURANTE, Luciane Cleonice; DIZ-MELLADO, Eduardo; GALÁN-MARÍN, Carmen. Thermal sensation in courtyards: Potentialities as a passive strategy in tropical climates. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], vol. 12, no. 15, 2020.

CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio; KRÜGER, Eduardo. Microclimate and thermal perception in courtyards located in a tropical savannah climate. **International Journal of Biometeorology**, [s. l.], vol. 66, no. 9, p. 1877–1890, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02329-8>.

CAMPOS, Germán. **Aurea Consulting**. [S. l.], 2018. Available at: <https://ecoeiciente.es/>. Accessed at: 17 Jun. 2023.

CHAPMAN, Sarah; WATSON, James E.M.; SALAZAR, Alvaro; THATCHER, Marcus; MCALPINE, Clive A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. **Landscape Ecology**, [s. l.], vol. 32, no. 10, p. 1921–1935, 2017. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-017-0561-4>.

CHIARADIA, Alain J. F. Urban Morphology/Urban Form. *In*: THE WILEY BLACKWELL ENCYCLOPEDIA OF URBAN AND REGIONAL STUDIES. [S. l.]: Wiley, 2019. p. 1–6. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118568446.eurs0382>.

CHOKHACHIAN, Ata; PERINI, Katia; GIULINI, Saverio; AUER, Thomas. Urban performance and density: Generative study on interdependencies of urban form and environmental measures. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], vol. 53, no. November 2019, p. 101952, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101952>.

CUNHA, Luis Filipe Brasil da; MACHADO, Rayner Maurício e.Silva; DA SILVA JUNIOR, Jose Ary; DE SOUZA FARIAS, Alessandra; BARATA, Márcio Santos; ZEMERO, Bruno Ramos. Modeling the impact of urban climate transformations in low income housing located in critical climate: A case study. **Energy for Sustainable Development**, [s. l.], vol. 85, no. January, 2025.

DALBEM, Renata; GRALA DA CUNHA, Eduardo; VICENTE, Romeu; FIGUEIREDO, Antonio; OLIVEIRA, Rui; SILVA, Antonio César Silveira Baptista da. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. **Energy**, [s. l.], vol. 167, p. 1278–1296, 2019.

DÖRFLER, Marianna; KRÜGER, Eduardo. Simulações de desempenho térmico de moradias do PMCMV em diferentes zonas bioclimáticas quanto aos aspectos de implantação,

materialidade e sombreamento de aberturas. *In:* , 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

DRAPER, Norman R.; SMITH, Harry. **Applied regression analysis**. 3. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1998.

ELI, Letícia Gabriela; KRELLING, Amanda Fraga; MENDES, Lorrany Silva; MACHADO, Rayner Maurício e Silva; MAZZAFERRO, Leonardo; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1**. [S. l.: s. n.], 2019. Available at: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Manual_GroundDomain_E%2Bversao9.0.pdf. .

EMBRAPA. **Condições Meteorológicas**. [S. l.], 2025. Available at: <https://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=caracterizacao>. Accessed at: 20 May 2025.

ENVI-MET. **Spaces**. [S. l.], 2024. Available at: <https://envi-met.info/doku.php?id=apps:spaces>. .

FAN, Chengliang; ZOU, Binwei; LI, Jianjun; WANG, Mo; LIAO, Yundan; ZHOU, Xiaoqing. Exploring the relationship between air temperature and urban morphology factors using machine learning under local climate zones. **Case Studies in Thermal Engineering**, [s. l.], vol. 55, no. February, p. 104151, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104151>.

GABRIEL, Elaise; PICCILLI, Daniel Gustavo Allasia; TASSI, Rutineia; KÖHLER, Manfred; KREBS, Lisandra Fachinello. Improving indoor environmental quality in an affordable house by using a vegetated wall: A case study in subtropical Brazil. **Building and Environment**, [s. l.], vol. 250, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132323011733>.

GE, Juejun; WANG, Yupeng; ZHOU, Dian; GU, Zhaolin; MENG, Xiangzhao. Effects of urban vegetation on microclimate and building energy demand in winter: An evaluation using coupled simulations. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], vol. 102, no. November 2023, p. 105199, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105199>.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: ITP, 1998.

GOLDIE, James; ALEXANDER, Lisa; LEWIS, Sophie C.; SHERWOOD, Steven. Comparative evaluation of human heat stress indices on selected hospital admissions in Sydney, Australia. **Australian and New Zealand Journal of Public Health**, [s. l.], vol. 41, no. 4, p. 381–387, 2017. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28712114/>.

GONÇALVES, Eduarda Lorrany Sousa; BRAGA, Jhonata Lima; SAMPAIO, Athos de Oliveira; BATISTA, Vitor dos Santos; MENEZES, Leonardo Junior da Rocha; ELI, Leticia Gabriela; BARATA, Márcio Santos; VENTURA NETO, Raul da Silva; ZEMERO, Bruno Ramos. Multiscale modeling to optimize thermal performance design for urban social housing: A case study. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], vol. 236, no. August 2023, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431123014084>.

GRIGORESCU, Ines; MOCANU, Irena; MITRICĂ, Bianca; DUMITRAȘCU, Monica; DUMITRICĂ, Cristina; DRAGOTĂ, Carmen Sofia. Socio-economic and environmental vulnerability to heat-related phenomena in Bucharest metropolitan area. **Environmental**

Research, [s. l.], vol. 192, no. August 2020, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935120311658>.

HÖPPE, Petter. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International journal of biometeorology**, [s. l.], vol. 43, no. 2, p. 71–75, 1999.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Glossário**. [S. l.], 2023. Available at: <https://portal.inmet.gov.br/glossario/glossario#O>. Accessed at: 17 Mar. 2023.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL 1991-2020**. [s. l.], 2025. Available at: <https://portal.inmet.gov.br/normais>.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. *In:* , 2023, Geneva, Switzerland. **Anais [...]**. Geneva, Switzerland: [s. n.], 2023. p. 184. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.

IPCC. **Human Influence on the Climate SystemClimate Change 2021 – The Physical Science Basis**. [S. l.: s. n.], 2023.

IPCC. **Summary for Policymakers of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S. l.: s. n.], 2023.

KIM, Yoon Jung; PARK, Chan; LEE, Dong Kun; PARK, Tae Yoon. Connecting public health with urban planning: allocating walkable cooling shelters considering older people. **Landscape and Ecological Engineering**, [s. l.], vol. 19, no. 2, p. 257–269, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11355-023-00543-z>.

KOWALSKI, L. F.; MASIERO, E.; KRÜGER, E. L. Evaluating the impact of pavement reflectance and aspect ratio on thermal conditions in a scale model of a street canyon: introducing PAVSCAM. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], vol. 155, no. 6, p. 4535–4551, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04911-z>.

KREBS, Lisandra Fachinello; JOHANSSON, Erik. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 241, p. 110963, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110963>.

LABEEE. **Arquivos climáticos INMET 2018**. [S. l.], 2024. Available at: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Accessed at: 11 Jul. 2024.

LANDSBERG, Helmut Erich. **The Urban Climate**. 28. ed. New York: Academic Press, 1981.

LASSANDRO, P.; DI TURI, S.; ZACCARO, S. A. Mitigation of rising urban temperatures starting from historic and modern street canyons towards zero energy settlement. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], vol. 609, no. 7, 2019. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/609/7/072036>.

LAUZET, Nicolas; RODLER, Auline; MUSY, Marjorie; AZAM, Marie Hélène; GUERNOUTI, Sihem; MAUREE, Dasaraden; COLINART, Thibaut. How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], vol. 116, no. September, p. 109390, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109390>.

LI, Yilun; OUYANG, Wanlu; YIN, Shi; TAN, Zheng; REN, Chao. Microclimate and its influencing factors in residential public spaces during heat waves: An empirical study in Hong Kong. **Building and Environment**, [s. l.], vol. 236, no. March, p. 110225, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110225>.

LI, Jiayu; ZHENG, Bohong; BEDRA, Komi Bernard; LI, Zhe; CHEN, Xiao. Effects of residential building height, density, and floor area ratios on indoor thermal environment in Singapore. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 313, no. June 2021, p. 114976, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114976>.

LILLEY, K.D. Urban Morphology. *In*: INTERNATIONAL ENCYCLOPEDIA OF HUMAN GEOGRAPHY. [S. l.]: Elsevier, 2009. p. 66–69. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080449104010932>.

M'SAOURI EL BAT, Adnane; ROMANI, Zaid; BOZONNET, Emmanuel; DRAOUI, Abdeslam; ALLARD, Francis. Optimizing urban courtyard form through the coupling of outdoor zonal approach and building energy modeling. **Energy**, [s. l.], vol. 264, no. November 2021, p. 126176, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126176>.

MA, Xintong; LEUNG, T. M.; CHAU, C. K.; YUNG, Esther H.K. Analyzing the influence of urban morphological features on pedestrian thermal comfort. **Urban Climate**, [s. l.], vol. 44, no. April, p. 101192, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101192>.

MACFARLANE, Alison. Daily mortality and environment in English conurbations. II. Deaths during summer hot spells in Greater London. **Environmental Research**, [s. l.], vol. 15, no. 3, p. 332–341, 1978. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0013935178901159>.

MASIERO, Érico; CHRISTOFORO, André Luis; KOWALSKI, Luiz Fernando; FERNANDES, Maria Eugênia. Urban morphology and prediction models of microclimatic phenomena in dry atmospheric context. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], vol. 31, no. December, p. 259–284, 2022. Available at: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/15707/8832>.

MATZARAKIS, Andreas; MAYER, Helmut. Another kind of environmental stress: Thermal stress. **WHO Newsletter**, 18, [s. l.], no. January 1996, p. 7–10, 1996. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/233759000>.

MAYER, H.; HÖPPE, P. Thermal comfort of man in different urban environments. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], vol. 38, no. 1, p. 43–49, 1987. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00866252>.

MORA, Camilo; DOUSSET, Bénédicte; CALDWELL, Iain R.; POWELL, Farrah E.; GERONIMO, Rollan C.; BIELECKI, Coral R.; COUNSELL, Chelsie W.W.; DIETRICH, Bonnie S.; JOHNSTON, Emily T.; LOUIS, Leo V.; LUCAS, Matthew P.; MCKENZIE, Marie M.; SHEA, Alessandra G.; TSENG, Han; GIAMBELLUCA, Thomas W.; LEON, Lisa R.; HAWKINS, Ed; TRAUERNICHT, Clay. Global risk of deadly heat. **Nature Climate Change**, [s. l.], vol. 7, no. 7, p. 501–506, 2017. Available at: <https://www.nature.com/articles/nclimate3322>.

MORGANTI, Michele; SALVATI, Agnese; COCH, Helena; CECERE, Carlo. Urban morphology indicators for solar energy analysis. **Energy Procedia**, [s. l.], vol. 134, p. 807–814, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.533>.

NASA. **SRTMGL3 v003 NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second**.

[S. I.], 2024. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl3v003/>. Accessed at: 11 Jul. 2024.

NATANIAN, Jonathan; AUER, Thomas. Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], vol. 56, no. December 2019, p. 102094, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102094>.

NATANIAN, Jonathan; KASTNER, Patrick; DOGAN, Timur; AUER, Thomas. From energy performative to livable Mediterranean cities: An annual outdoor thermal comfort and energy balance cross-climatic typological study. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 224, p. 110283, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110283>.

NITSCHKE, Monika; HANSEN, Alana; BI, Peng; PISANIELLO, Dino; NEWBURY, Jonathan; KITSON, Alison; TUCKER, Graeme; AVERY, Jodie; DAL GRANDE, Eleonora. Risk factors, health effects and Behaviour in older people during extreme heat: A survey in South Australia. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], vol. 10, no. 12, p. 6721–6733, 2013.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2 eded. Londres: Taylor and Francis, 1987-. ISSN 1984-6398.vol. 5

OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 11, no. 1–3, p. 103–113, 1988.

OLIVEIRA, Vítor. Urban Morphology. *In*: URBAN STUDIES. [S. l.]: Oxford University Press, 2020. Available at: <https://oxfordbibliographies.com/view/document/obo-9780190922481/obo-9780190922481-0004.xml>.

OLIVEIRA, Roberta Bastos de; ALVES, Camila dos Reis. Análise do desempenho térmico de habitação de interesse social com paredes de concreto em Uberlândia-MG. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s. l.], vol. 12, p. 1–20, 2021. Available at: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8661094>.

OLIVEIRA, João Paulo Bestete de; CECÍLIO, Roberto Avelino; PRUSKI, Fernando Falco; ZANETTI, Sidney Sára. Espacialização da erosividade das chuvas no Brasil a partir de séries sintéticas de precipitação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [s. l.], vol. 10, no. 4, p. 558–563, 2015. Available at: <https://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v10i4a4998>.

ORLOV, Anton; SILLMANN, Jana; AAHEIM, Asbjørn; AUNAN, Kristin; DE BRUIN, Karianne. **Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker Productivity: a Case Study of Europe****Economics of Disasters and Climate Change**. [S. l.]: Economics of Disasters and Climate Change, 2019. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41885-019-00044-0>.

PHELAN, Patrick E.; KALOUSH, Kamil; MINER, Mark; GOLDEN, Jay; PHELAN, Bernadette; SILVA, Humberto; TAYLOR, Robert A. Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], vol. 40, no. August, p. 285–307, 2015. Available at: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-environ-102014-021155>.

RAHIF, Ramin; KAZEMI, Mostafa; ATTIA, Shady. Overheating analysis of optimized nearly Zero-Energy dwelling during current and future heatwaves coincided with cooling system outage. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 287, p. 112998, 2023. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112998>.

RAMESH, Shalini. **Urban Energy Information Modeling : A framework to quantify the thermodynamic interactions between the natural and the built environment that affect building energy consumption**. 2017. 176 f. - Carnegie Mellon University, [s. l.], 2017.

Available at:

https://kilthub.cmu.edu/articles/Urban_Energy_Information_Modeling_A_Framework_To_Quantify_The_Thermodynamic_Interactions_Between_The_Natural_And_The_Built_Environment_That_Affect_Building_Energy_Consumption/6724181/files/12259709.pdf.

REGO, Renato Leão; MENEGUETTI, Karin Schwabe. A respeito de morfologia urbana. Tópicos básicos para estudos da forma da cidade. **Acta Scientiarum - Technology**, [s. l.], vol. 33, no. 2, p. 123–127, 2011. Available at:

<https://www.redalyc.org/pdf/3032/303226531003.pdf>.

ROBINSON, P. J. On the definition of a heat wave. **Journal of Applied Meteorology**, [s. l.], vol. 40, no. 4, p. 762–775, 2001. Available at:

https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/40/4/1520-0450_2001_040_0762_otdoah_2.0.co_2.xml.

RONCHI, Silvia; SALATA, Stefano; ARCIDIACONO, Andrea. Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], vol. 63, no. April, p. 102459, 2020. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>.

ROTHFUSZ, L P. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). **Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology**, [s. l.], p. 23–90, 1990. Available at: <papers://c6bd9143-3623-4d4f-963f-62942ed32f11/Paper/p395>.

SALVATI, A.; PALME, M.; CHIESA, G.; KOLOKOTRONI, M. Built form, urban climate and building energy modelling: case-studies in Rome and Antofagasta. **Journal of Building Performance Simulation**, [s. l.], vol. 13, no. 2, p. 209–225, 2020. Available at:

<https://doi.org/10.1080/19401493.2019.1707876>.

SÃO CARLOS, Prefeitura Municipal. **DADOS DA CIDADE (Geográfico e Demográfico)**. [S. l.], 2024. Available at: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>. Accessed at: 10 Jul. 2024.

SÃO CARLOS, Prefeitura Municipal. **Lei N° 18.053 de 19 de dezembro de 2016**. Estabele o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências. São Carlos, SP: 2016.

SÃO CARLOS, Prefeitura Municipal. **MAPAS - LOTEAMENTOS - CIDADE - DISTRITOS**. [S. l.], [s. d.]. Available at: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/habitacao-morar/154835-mapas-loteamentos-cidade-distrutos.html>. Accessed at: 23 Jul. 2024.

SHAREEF, Sundus. The impact of urban morphology and building's height diversity on energy consumption at urban scale. The case study of Dubai. **Building and Environment**, [s. l.], vol. 194, no. February, p. 107675, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107675>.

SILVA, Ivanize; SANTOS, Rafael; LOPES, António; ARAÚJO, Virgínia. Morphological indices as urban planning tools in northeastern Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], vol. 10, no. 12, p. 1–18, 2018. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/12/4358>.

SIMÕES, Gianna Monteiro Farias; LEDER, Solange Maria. Energy poverty: The paradox between low income and increasing household energy consumption in Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 268, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778822004054>.

SIMÕES, Gianna Monteiro Farias; LEDER, Solange Maria; LABAKI, Lucila Chebel. How uncomfortable and unhealthy can social (low-cost) housing in Brazil become with use?. **Building and Environment**, [s. l.], vol. 205, 2021.

SONG, Xiao Peng; HANSEN, Matthew C.; STEHMAN, Stephen V.; POTAPOV, Peter V.; TYUKAVINA, Alexandra; VERMOTE, Eric F.; TOWNSHEND, John R. Global land change from 1982 to 2016. **Nature**, [s. l.], vol. 560, no. 7720, p. 639–643, 2018. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>.

STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. **J. Appl. Meteor.**, [s. l.], vol. 18, p. 861–873, 1979.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, 2012. Available at: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml>.

SUN, Kaiyu; SPECIAN, Michael; HONG, Tianzhen. Nexus of thermal resilience and energy efficiency in buildings: A case study of a nursing home. **Building and Environment**, [s. l.], vol. 177, no. November 2019, p. 106842, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106842>.

TUBELO, Renata; RODRIGUES, Lucelia; GILLOTT, Mark; GONÇALVES SOARES, Joana Carla. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**, [s. l.], vol. 133, p. 213–227, 2018.

UPPERMAN, Crystal Romeo; PARKER, Jennifer D.; AKINBAMI, Lara J.; JIANG, Chengsheng; HE, Xin; MURTUGUDDE, Raghuram; CURRIERO, Frank C.; ZISKA, Lewis; SAPKOTA, Amir. Exposure to Extreme Heat Events Is Associated with Increased Hay Fever Prevalence among Nationally Representative Sample of US Adults: 1997-2013. **Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice**, [s. l.], vol. 5, no. 2, p. 435-441.e2, 2017. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaip.2016.09.016>.

VALDENEBRO, Esaiy; DIETRICH, Udo; INO, Akemi. Thermal comfort analysis of a representative multi-story social housing unit with wood as an alternative construction material in Brazil. *In*: , 2019. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2019. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/297/1/012019>.

WATTS, Nick; AMANN, Markus; ARNELL, Nigel; AYEB-KARLSSON, Sonja; BELESOVA, Kristine; BERRY, Helen; BOULEY, Timothy; BOYKOFF, Maxwell; BYASS, Peter; CAI, Wenjia; CAMPBELL-LENDRUM, Diarmid; CHAMBERS, Jonathan; DALY, Meaghan; DASANDI, Niheer; DAVIES, Michael; DEPOUX, Anneliese; DOMINGUEZ-SALAS, Paula; DRUMMOND, Paul; EBI, Kristie L.; EKINS, Paul; MONTOYA, Lucia Fernandez; FISCHER, Helen; GEORGESON, Lucien; GRACE, Delia; GRAHAM, Hilary; HAMILTON, Ian; HARTINGER, Stella; HESS, Jeremy; KELMAN, Ilan; KIESEWETTER, Gregor; KJELLSTROM, Tord; KNIVETON, Dominic; LEMKE, Bruno; LIANG, Lu; LOTT, Melissa; LOWE, Rachel; SEWE, Maquins Odhiambo; MARTINEZ-URTAZA, Jaime; MASLIN, Mark; MCALLISTER, Lucy; MIKHAYLOV, Slava Jankin; MILNER, James; MORADI-LAKEH, Maziar; MORRISSEY, Karyn; MURRAY, Kris; NILSSON, Maria; NEVILLE, Tara;

ORESZCZYN, Tadj; OWFI, Fereidoon; PEARMAN, Olivia; PENCHEON, David; PYE, Steve; RABBANIHA, Mahnaz; ROBINSON, Elizabeth; ROCKLÖV, Joacim; SAXER, Olivia; SCHÜTTE, Stefanie; SEMENZA, Jan C.; SHUMAKE-GUILLEMOT, Joy; STEINBACH, Rebecca; TABATABAEI, Meisam; TOMEI, Julia; TRINANES, Joaquin; WHEELER, Nicola; WILKINSON, Paul; GONG, Peng; MONTGOMERY, Hugh; COSTELLO, Anthony. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. **The Lancet**, [s. l.], vol. 392, no. 10163, p. 2479–2514, 2018. Available at: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(18\)32594-7/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(18)32594-7/abstract).

WEBER, Fernando da Silva; MELO, Ana Paula; MARINOSKI, Deivis Luis; GUTHS, Saulo; LAMBERTS, Roberto. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: [s. n.], 2017. Available at: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_Compone ntesConstrutivos_0.pdf. .

WILLMOTT, Cort J. ON THE VALIDATION OF MODELS. **Physical Geography**, [s. l.], p. 184–194, 1981.

WILLMOTT, Cort J.; MATSUURA, Kenji. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, [s. l.], vol. 30, no. 1, p. 79–82, 2005. Available at: <https://www.jstor.org/stable/24869236>.

YANG, Jun; YANG, Yuxin; SUN, Dongqi; JIN, Cui; XIAO, Xiangming. Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], vol. 72, no. May, p. 103045, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103045>.

YANG, Xiaoshan; ZHAO, Lihua; BRUSE, Michael; MENG, Qinglin. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 54, p. 243–251, 2012. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>.

ZHENG, Bohong; LI, Jiayu. Evaluating the Annual Effect of the Sky View Factor on the Indoor Thermal Environment of Residential Buildings by Envi-met. **Buildings**, [s. l.], vol. 12, no. 6, 2022. Available at: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/6/787>.

ZIBETTI, Clara; VEIGA, Matuella; SOUZA, Larissa Pereira De; LAMBERTS, Roberto. Análise da Influência da Orientação Solar em Habitações de Interesse Social para Diferentes Climas do Brasil. *In:* , 2023, Florianópolis. **VII CONGRESSO LATINO AMERICANO DE SIMULAÇÃO DE EDIFÍCIOS - IBPSA LATAM 2023**. Florianópolis: [s. n.], 2023. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/369230443%0AAnálise>.